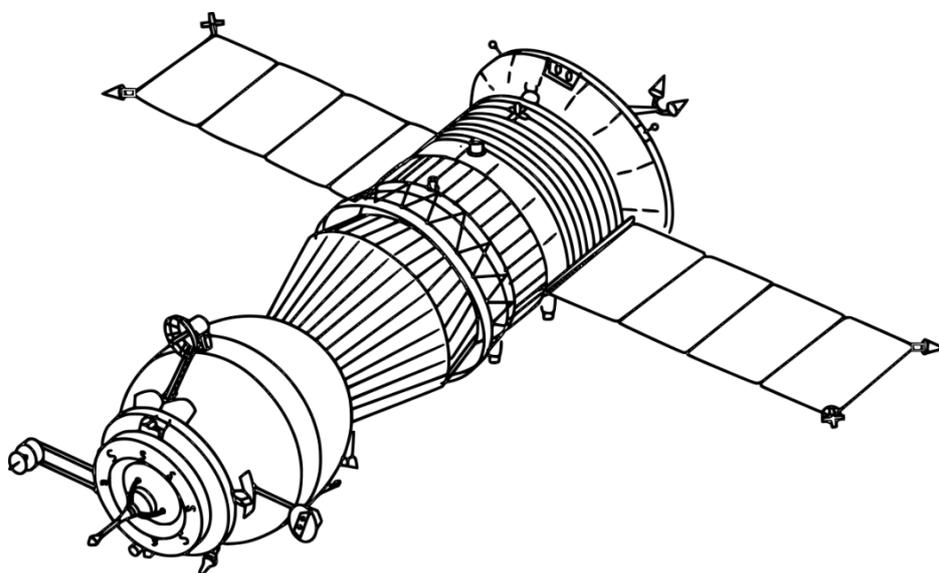


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Замуруев С.Н., Васильев А.Г., Боков С.В.,
Увайсов С.У., Костин М.С., Карпов Д.А.,**

**МЕЖДУНАРОДНАЯ МЕЖВЕДОМСТВЕННАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ-2023»**

СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ



МОСКВА - 2024

УДК 629.7(062.552)
ББК 39.6я43
С23

Замуруев С.Н. Международная межведомственная научно-техническая конференция «Космические технологии-2023». [Электронный ресурс]: Сборник научных статей / Замуруев С.Н., Васильев А.Г., Увайсов С.У., Костин М.С., Карпов Д.А., Боков С.В. — М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

В сборнике научных статей представлены материалы Международной межведомственной научно-технической конференции «Космические технологии», отражающие результаты направления современных фундаментальных и прикладных исследований и разработок ученых, специалистов, студентов и аспирантов из разных стран в области космической деятельности. Научные статьи охватывают такие направления, как космические системы и их компоненты, радиоэлектроника компонентов космических аппаратов, космическая энергетика и двигательные установки, а также методы зондирования Земли.

Научные труды сборника представляют интерес для широкого круга специалистов радиоэлектронной отрасли, научных и педагогических работников высшей школы, а также аспирантов и студентов вузов, связанных с решением научно-практических задач совершенствования и развития космических технологий.

Материалы научных статей отображают персональную позицию участников конференции и издаются исключительно в авторской редакции.

Электронная точка доступа: <http://cosmos.mirea.ru/>

Редакционная коллегия и рецензенты:

д.ф-м.н. проф., директор ИРИ РТУ МИРЭА Васильев А.Г.,
к.э.н, директор ИТУ РТУ МИРЭА, Мьельникова А.Н.,
д.т.н. доц., зав. кафедрой РЭСР РТУ МИРЭА Замуруев С.Н.,
д.т.н., доц, зав. кафедрой РПТ РТУ МИРЭА Костин М.С.,
д.т.н., проф., зав. кафедрой КПрЭС РТУ МИРЭА Увайсов С.У.,
к.т.н., зав. кафедрой ГИС РТУ МИРЭА Карпов Д.А.,
д.э.н, главный научный сотрудник 46 ЦНИИ МО РФ, Боков С.И.

С23

Сборник научных статей по материалам Международной межведомственной научно-технической конференции «Космические технологии», г. Москва, РТУ МИРЭА: сборник научных статей. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, / сост. Замуруев С.Н., Васильев А.Г., Боков С.В., Увайсов С.У., Костин М.С., Карпов Д.А. 2024. – 232 с.

УДК 629.7(062.552)

ББК 39.6я43

ISBN формируется

© сост. Замуруев С.Н., Васильев А.Г., Боков С.В.,
Увайсов С.У., Костин М.С., Карпов Д.А. 2024
© МИРЭА – Российский технологический
университет, 2024

Уважаемые коллеги!

Оргкомитет Международной межведомственной научно-технической конференции «Космические технологии» приветствует участников и гостей научного форума в стенах РТУ МИРЭА.

МИРЭА - Российский технологический университет – признанный в России и в мире современный образовательный и научно-исследовательский центр, сочетающий в своей работе классические университетские традиции и современные образовательные технологии, являющийся одним из лидеров в области подготовки квалифицированных кадров для стремительно развивающихся наукоемких отраслей – радиоэлектроники и радиоинформатики, телекоммуникаций, информационных компьютерных технологий, автоматике, кибернетики и др.

РТУ МИРЭА придает большое значение развитию и углублению связей с российскими и зарубежными партнерами. Мы уделяем большое значение развитию и углублению научных, образовательных и деловых связей с российскими и зарубежными партнерами, имеем далеко идущие планы по расширению сотрудничества в научно-технической сфере и надеемся, что конференция позволит всем ее участникам реализовать задуманное.

Желаем участникам конференции плодотворного общения, укрепления и расширения сотрудничества, новых деловых знакомств и успешного развития в области научно-практических исследований!

Оргкомитет конференции

СОДЕРЖАНИЕ

Литвинов С.В. <i>РАЗВИТИЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ</i>	10
Барсуков И.А., Гаврилов М.И., Зубков И.А., Черный И.В., Стрельцов А.М., Болдырев В.В., Евсеев Г.Е., Яковлев В.В. <i>РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СВЧ-РАДИОМЕТРИИ И ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО И ОКЕАНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ</i>	16
Куликов Г.В., Данг Суан Ханг <i>ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛОВ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ</i>	28
Панов Е.А., Клопова А.П <i>GPS-ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДРОН DJI PHANTOM 3. УЯЗВИМОСТЬ ЕГО СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ</i>	33
Григорян М.А., Пыхтина И.Ю., Осипова В.О. <i>ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ДЕМОДУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПРИЁМА MSK СИГНАЛА С РАЗЛИЧНЫМИ СКОРОСТЯМИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ</i>	41
Чмеренко М.А., Чистяков Е. А., Лукьянова Е.Г. <i>МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДИОСВЯЗИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И НАЗЕМНЫХ РАДИОСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ</i>	46
Ксендзук А. В., Семин А.В. <i>МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ СИСТЕМ ДЗЗ.....</i>	51
Александров К.М., Чистяков Е. А., Левченков А.С. <i>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ</i>	55
Литвинов С.В., Скрипачев В.О., Семенова О.В. <i>ЧАСТНОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 25 ОКТЯБРЯ 2022 ГОДА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИОНОСФЕРУ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ.....</i>	59
Булычев Г.Г., Федоров В.Б. <i>ОТНОСИТЕЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРЕНИЯ МЕЖСПУТНИКОВОЙ ДАЛЬНОСТИ ЧАСТЬ I.....</i>	63
Булычев Г.Г., Федоров В.Б. <i>ОТНОСИТЕЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРЕНИЯ МЕЖСПУТНИКОВОЙ ДАЛЬНОСТИ ЧАСТЬ II.....</i>	69

Груненок Н.В. <i>РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВИБРОИСПЫТАНИЙ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА STM32</i>	75
Никитин В.В. <i>ГЛОНАСС В СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ДТП С УЧАСТИЕМ ДВУХКОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ</i>	79
Корляков Д.С., Батейкина А.Л., Шпак А.В. <i>МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ</i>	84
Третьякова Д.В., Чистяков Е.А. <i>СИСТЕМЫ СБОРА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ</i>	88
Легкий Т.Н., Чистяков Е.А. <i>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИЙ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ</i>	94
Бурмистров Ф.А., Скворцов А.Д., Чистяков Е.А. <i>СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ</i>	98
Иванов В.С., Бутышев Н.С., Хаджийская Е.Ю. <i>КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ И ТРАНКИНГОВОЙ СИСТЕМ СВЯЗИ</i>	102
Алтухов А.А. <i>РАЗРАБОТКА БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ</i>	107
Костин М.С., Шильцин А.В. <i>МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ШУМОПОДАВЛЕНИИ</i>	117
Зябриков С.Ю., Трефилов Н.А., Шпак А.В. <i>РАЗВОРАЧИВАЕМЫЕ ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ</i>	123
Туров Д.А., Трефилов Н.А. <i>МАЛОГАБАРИТНЫЕ АНТЕННЫ АБОНЕНТСКИХ УСТРОЙСТВ</i>	128
Григорян М.А., Осипова В.О. <i>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕЙКИ ИЗМЕРИТЕЛЯ УРОВНЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА</i>	132
Зябриков С.Ю., Трефилов Н.А., Шпак А.В. <i>АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ В РАСКРЫВЕ РАЗВОРАЧИВАЕМЫХ АНТЕНН ЗОНТИЧНОГО ТИПА</i>	136

Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. <i>ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ФОРМАЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОВАКУУМНОМ ТРИГГЕРЕ СВЧ</i>	140
Демин О.А., Иванцов М.О., Корчагин А.С., Никашин А.К. <i>ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В S ДИАПАЗОНЕ</i>	144
Сгибнев А.К., Денисенко В.Д. <i>ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ В ПОСТРОЕНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИЕМА ЦИФРОВЫХ РАДИОСИГНАЛОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ</i>	148
Савин Д. А., Денисенко В. Д. <i>АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КАНАЛОВ СВЯЗИ МЕЖДУ НАЗЕМНЫМИ И ОРБИТАЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ</i>	154
Геворкян Г.К., Денисенко В.Д. <i>ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЕТЕКЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЗВУКОИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ СПУТНИКОВЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ</i>	159
Петленко Д.Б. <i>ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОМЕТРОВ В ГЕОЛОГИИ</i>	164
Чухарев Е.С., Ануфриев <i>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В СОВРЕМЕННЫХ ВООРУЖЕННЫХ КОНФЛИКТАХ. ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕР БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ И ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОБЩЕСТВЕННОСТЬЮ</i>	170
Петросян Л.Э. V, Шенбергер А.А. <i>БИОМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ В ВС РФ</i>	176
Nosrati Mehrdad, Abbasov Iftikhar B. <i>REALISTIC PLANETARY LANDSCAPE SIMULATION FOR SPACE EXPLORATION</i>	178
Машинистов Ф.Б., Ануфриев С.О. <i>РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К МОБИЛЬНОМУ ПРИЛОЖЕНИЮ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ЕДИНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ</i>	182
Кокуркин А.Д., Подольская Е.С. <i>РЕЗУЛЬТАТЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОГ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОСЕТИ U-NET И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ OSM В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ</i>	186
Коврижных Д.Д., Ануфриев С.О. <i>МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ «НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ»</i>	191

Лукашик М.С., Ануфриев С.О. <i>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРБАНИЗАЦИИ СИБИРИ НА ЭКОЛОГИЮ, ОБЩЕСТВО И ЭКОНОМИКУ</i>	196
Антонова С.Н., Юстус А.А. <i>ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ</i>	199
Прядилина А.В. <i>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИКИ НОРМАЛИЗОВАННОГО РАЗНОСТНОГО ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД</i>	208
Джаныбеков Р.Ю., Аббасов И.Б. <i>БЕСПИЛОТНЫЙ ЭКРАНОПЛАН КАК НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ В СТРОЕНИИ ВОЕННО- МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ</i>	212
Чистяков Е. А., Репин М. М. <i>АНАЛИЗ МЕТОДОВ СВЯЗИ МЕЖДУ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИЕЙ СЛЕЖЕНИЯ И КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ</i>	216
Абрамова Е.А., Кацаева А.В., Максимович А.В. <i>СИНХРОНИЗАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПО СИГНАЛАМ ГНСС</i>	220
Ярлыков А.Д. <i>УЛУЧШЕНИЕ СХОДИМОСТИ РЯДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЕКЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ</i>	224
Судаков Д.В., Чистяков Е.А. <i>ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ БПЛА</i>	229
Пестун У.А., Эпенетосский В.Б. <i>НАУЧНО МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ОБОРОННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ГОСУДАРСТВ</i>	233

СООРГАНИЗАТОРЫ И ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ ПАРТНЕРЫ



ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель: Замуруев С.Н. **Ученый секретарь:** Чистяков Е.А.

Руководители секций:

Замуруев С.Н., Увайсов С.У., Костин М.С., Карпов Д.А., Боков С.В.

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Радиоэлектронные системы и комплексы локации и навигации и дистанционного зондирования Земли
2. Проектирование космической аппаратуры с длительным сроком активного функционирования
3. Радиоэлектронные технологии космических систем и СВЧ-модулей
4. Геоинформационные системы и технологии
5. Системные вопросы планирования развития космических систем

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ

1. Ю. И. Борисов – Генеральный директор государственной корпорации по космической деятельности «РОСКОСМОС», д.т.н.
2. С.А. Кудж – Ректор РТУ МИРЭА, д.т.н., профессор
3. А.С. Сигов – Президент РТУ МИРЭА, академик РАН
4. А.Г. Васильев – Директор ИРИ РТУ МИРЭА, д.ф.-м.н., профессор
5. С.И. Боков – Главный научный сотрудник 46 ЦНИИ МО РФ, д.э.н.
6. А.Н. Мыльникова – Директор Института технологий управления, к.э.н

ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА

Андреев Г.И. – Генеральный директор АО «ЦНИРТИ им. академика А.И.Берга», д.т.н., профессор
Бендерский Г.П. – Генеральный директор ПАО «НПО «Алмаз» им. академика А.А. Расплетина», д.т.н, профессор
Макушев И.Ю. – Генеральный директор ПАО МАК «Вымпел», д.т.н., д.э.н., профессор
Верба В.С. – Генеральный конструктор - первый заместитель генерального директора АО «Концерн радиостроения «ВЕГА», чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор
Васильев А.Г. – Директор Института РИ РТУ МИРЭА, председатель Московского НТО радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова - д.ф.-м.н., профессор
Ненартович Н.Э. – Первый заместитель генерального директора – Генеральный конструктор ПАО «НПО «Алмаз» им. академика А. А. Расплетина, к.т.н.
Зайцев В.Е. – Генеральный директор АО «ВНИИРТ», к.т.н.
Рагуткин А.В. – Советник по научной работе, к.т.н, доцент
Винокуров О.Е. - Проректор РТУ МИРЭА
Сапрыкин С.Д. – Генеральный конструктор ОАО «НПК «НИИДАР», к.т.н., профессор
Самсонов Г.А. – Вице-президент РНТОРЭС им. А.С. Попова, к.т.н., доцент
Третьяков В.А. – Главный научный сотрудник ПАО (МАК) «Вымпел», д.т.н., профессор
Кравцов А.А. – Заведующий базовой кафедрой №333 имени профессора Лобанова Б.С. – систем радиоэлектронной борьбы, к.т.н., профессор
Ижуткин В.С. – Заведующий базовой кафедрой №335 Всероссийского научно-исследовательского Института радиотехники (АО «ВНИИРТ»), д.ф.-м.н., профессор
Литовченко Д.Ц. – Заведующий базовой кафедрой №338 – космической радиоэлектроники «Корпорация космических систем специального назначения “Комета”», д.т.н.
Макаров М.И. – Заведующий базовой кафедрой №342 космических средств связи и управления Научно-исследовательского института космических систем имени А.А. Максимова, д.т.н., профессор
Гусейн-заде Н.Г. – Заведующий базовой кафедрой №335 – моделирования радиофизических процессов Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, д.т.н., профессор
Ксендзук А.В. – Заведующий базовой кафедрой №346 – радиоинформационных систем, «Межгосударственная акционерная Корпорация «Вымпел», д.т.н.

УДК 550.388.2

РАЗВИТИЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Литвинов С.В.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов

РТУ МИРЭА

Москва, Россия

Litvinov_S@mirea.ru

Аннотация — В статье дается краткий обзор методам исследования ионосферы и ее влиянию на распространение радиоволн. Рассматривается дополнение функционала наземных вертикальных ионозондов возможностью приема и обработки сигналов наклонного зондирования и совмещения этих методов (т.н. комплексное зондирование). Предлагается модернизация примененной аппаратуры ионозонда путем применения многочастотной структуры. Рассматриваются возможности Космоцентра РТУ МИРЭА по приему и обработке сигналов наземных ионозондов, а также по работе с космическими аппаратами, в частности КА RTU MIREA1, разрабатываемый в РТУ МИРЭА.

Ключевые слова — ионосфера, вертикальное зондирование, наклонное зондирование, ионозонд, космический аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

Обострение международной обстановки показало необходимость совершенствования радиотехнических систем (РТС) различного назначения, в частности средств коротковолновой (КВ) радиосвязи и загоризонтной радиолокации. Эти средства используют эффект отражения радиоволн от ионосферы для передачи радиосигнала на дальности до 3000 км (рисунок 1) [1]. Для эффективной работы радиосистем коротковолнового диапазона необходима актуальная информация о параметрах области ионосферы, от которой происходит отражение радиосигнала.

Ионосфера является слоем атмосферы, ионизированным в результате солнечного и иного космического облучения, а, следовательно, непрерывно изменяется в зависимости от географического положения, времени суток, года, а также 11-летнего солнечного цикла. При этом ионосфера не является зеркальной поверхностью, а представляет из себя неоднородные слои ионизированных частиц. Отечественные службы геофизического мониторинга и прогнозирования не были спроектированы таким образом, чтобы обеспечивать гелиогеофизические потребности средств дальней радиолокации России в оперативном режиме, с заданным уровнем надежности. Ионосфера также оказывает негативное влияние на распространение радиоволн в

ночное время суток в диапазонах низких и средних частот (от 30 кГц до 3 МГц), а также является источником сбоев в работе систем связи Земля-космос, в т.ч. навигационных систем [2]. Влияние ионосферы на распространение радиоволн различных диапазонов приведено в таблице 1 и схематично показан на рисунке 1.

Природа ионосферы тесно связана с солнечным излучением и состоянием геосфер Земли, что делает ее крайне изменчивой, при этом предсказать уровень влияния на системы связи, порой, является трудновыполнимой задачей. Изменение ионосферы возможно отслеживать с применением средств как космического, так и наземного базирования [3]. Схематично методы исследования ионосферы показаны на рисунке 2.

ТАБЛИЦА 1. ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Диапазон	Длина волны	Взаимодействие с ионосферой
Сверхдлинные волны (СДВ)	100 км - 10 км	Поглощаются ионосферой, распространяются огибающей поверхностной волной вдоль Земли
Длинные волны (ДВ)	10 км - 1 км	
Средние волны (СВ)	1 км - 100 м	Днем поглощаются ионосферой, ночью отражаются
Короткие волны (КВ)	100 м - 10 м	Отражаются ионосферой
Ультракороткие волны (УКВ)	10 - 0,1 мм	Распространяются в пределах прямой видимости, проходят сквозь ионосферу

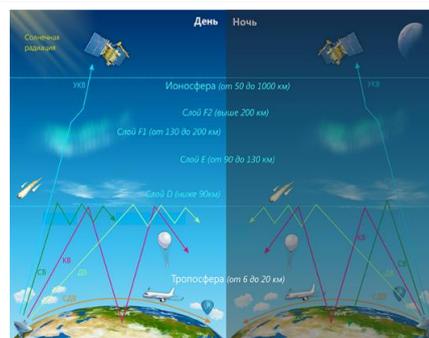


Рис. 1. Влияние ионосферы на радиоволны

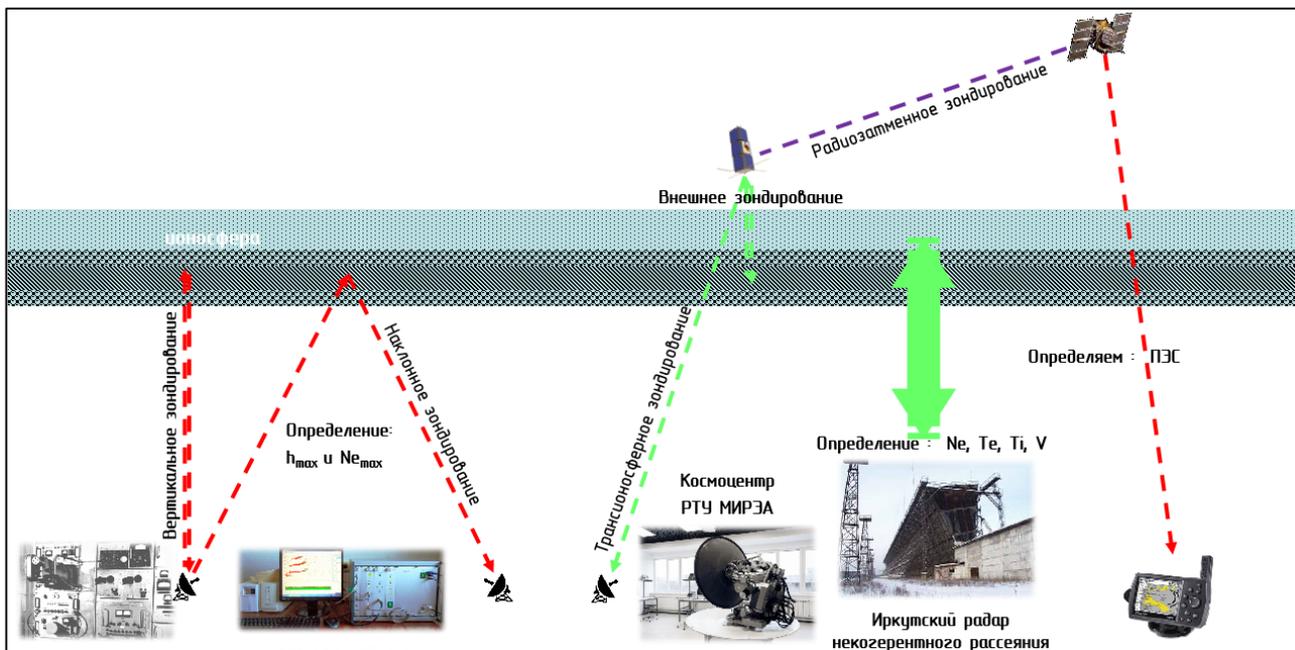


Рис. 2. Методы исследования ионосферы

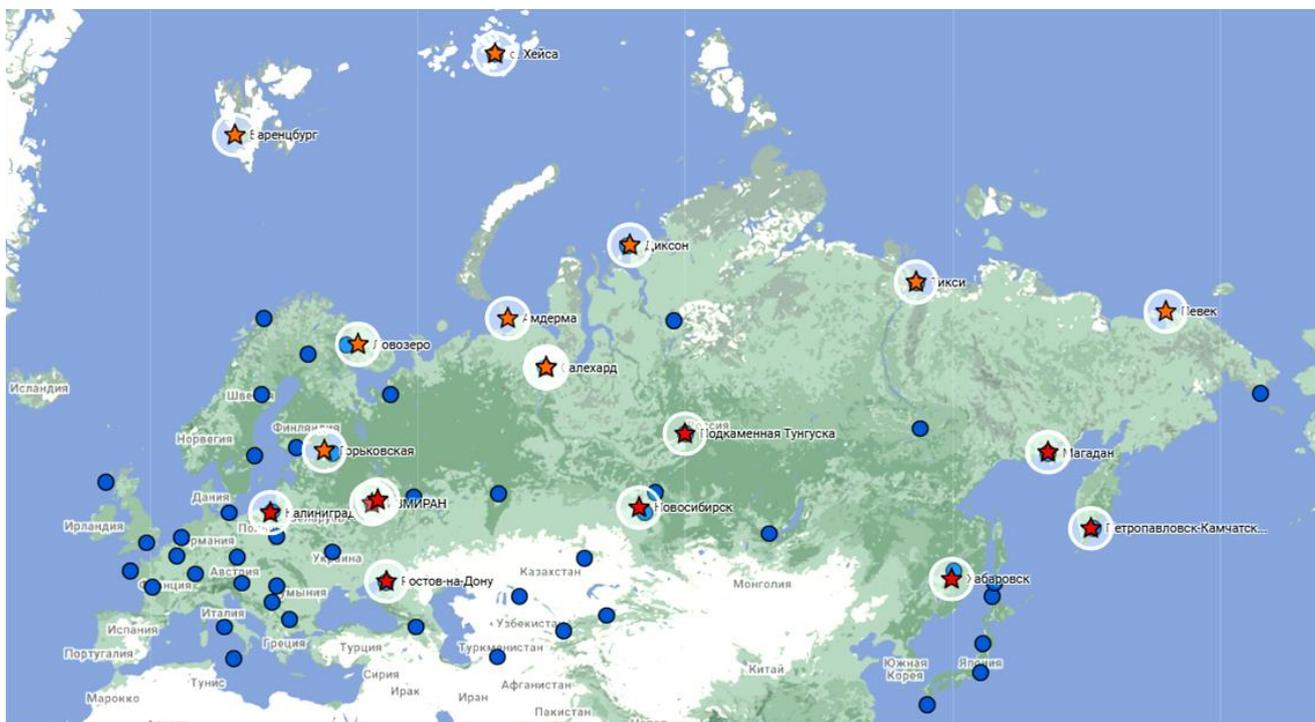


Рис. 3. Ионозонды Евразии

Ранее подробно рассматривались методы исследования ионосферы радиоэлектронными системами наземного базирования [4]. Основная проблема исследования ионосферы наземными средствами зондирования заключается в их малом количестве на территории России, разнородности исследовательской аппаратуры, нерегулярности работы отдельных ионозондов, разная подведомственность организаций. На рисунке 3 показано размещение ионозондов Евразии. Красными звездами

помечены отечественные ионозонды серии «Парус-А», принадлежащие Институту прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова. Оранжевые звезды - ионозонды SADI канадского производства, сети Арктический и антарктический научно-исследовательский института. Синие точки - преимущественно ионозонды DPS-4 (производство США), входящие в мировую ионосферную сеть.

I. КОМПЛЕКСНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Ионозонды, в большинстве своем, проводят сеансы вертикального зондирования ионосферы. При синхронизации передачи и приема сигналов ионозондов возможно проводить наклонное зондирование. Для регистрации ионограмм НЗ один ионозонд (Rx) запускают в режиме «радиотишины», т.е. с выключенным передатчиком, чтобы он принимал сигналы от удаленной передающей станции (Tx). При этом передающая станция (Tx) принимает только отраженные сигналы ВЗ и не регистрирует сигналы НЗ, которые могли бы запутать автоматическое распознавание ионограммы ВЗ. Известны работы по совмещенному зондированию ионосферы [5,6]. Т.е. на обоих ионозондах не отключается передатчик и они одновременно регистрируют результаты вертикального и наклонного зондирования на совмещенной ионограмме.

На рисунке 4 показан пример такой совмещенной ионограммы, полученной в 12.00 UT 26.10.2023 (в день проведения конференции «Космические технологии») на ионосферной станции близ г. Новосибирска по сигналам собственного передатчика (ВЗ - на высотах до 800 км) и по сигналам станции в г. Салехарде (следы на высоте ~800 км). Станция оснащена ионозондом российской разработки «Парус-А».

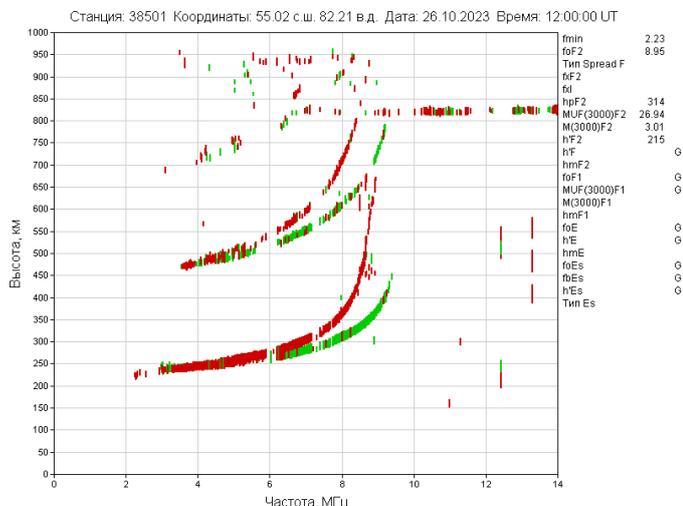


Рис. 4. Ионограмма совмещенного зондирования

II. МОДЕРНИЗАЦИЯ АППАРАТУРЫ

Приборно-методическое обеспечение зондирования ионосферы постоянно совершенствуется. Не смотря на успешную практику применения маломощных ионозондов со сложными сигналами, мощные станции работают заметно стабильнее во время ионосферных бурь и большого поглощения в спорадическом слое Es.

Конструкция уже упомянутого отечественного ионозонда «Парус-А» построена по модульному принципу, а режим работы изменяется согласно программе, что позволяет его легко адаптировать к конкретным потребностям различных экспериментальных комплексов диагностики ионосферы.

Аппаратура ионозонда состоит из радиоприемного устройства (включая модуль управления, модуль

четырёхканального приемного устройства, модуль синхронизации и привязки в спутниковой навигационной системе), радиопередающего устройства, вычислительного комплекса управления и обработки данных, вычислительный комплекс автоматической обработки ионограмм.

Применяющееся приемное устройство возможно модернизировать, применив многочастотную структуру [7], при этом количество антенн не изменяется, а добавляются т.н. частотные каналы. Например, в ионозондах серии «Парус-А» каждый сеанс зондирования предваряется сканированием всего рабочего диапазона частот с целью выявления частот, занятых для работы другими источниками. Применение многочастотной схемки позволит на порядок сократить время такого сканирования. При условии модернизации приемного и передающего устройств, время зондирования ионосферы также может значительно сократиться, что особенно важно в переходные периоды суток и в случае ионосферной нестабильности.

III. СЕТИ ИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Для решения задачи рационального размещения вертикально-наклонных ионозондов авторским коллективом кафедры РСК РТУ МИРЭА разработано программное обеспечение моделирования ионосферной сети. Получены свидетельства о регистрации программы для ЭВМ: № 2022664212, № 2022664224, № 2022664169, № 2022664176 [8, 9]. Изображение интерфейса программы приведено на рисунке 5. Программа позволяет:

- разместить на карте мира станции ионосферного зондирования (ионозонды) с заданными координатами;
- отобразить условные зоны ответственности ионозондов;
- построить потенциальные трассы наклонного зондирования ранее добавленных ионозондов с условной зоной отражения радиосигналов;
- вывести отчет полученного моделирования.

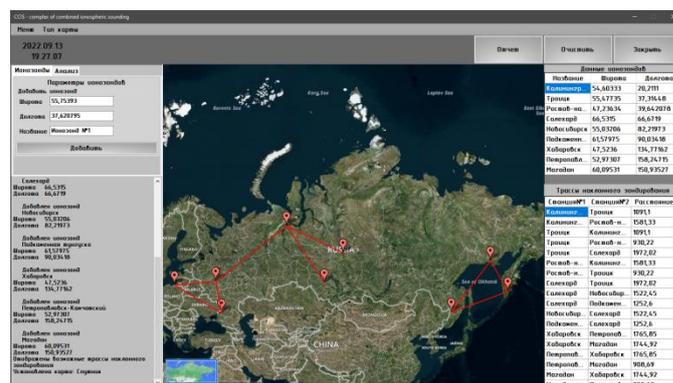


Рис. 5. Интерфейс программы

IV. ВОЗМОЖНОСТИ КОСМОЦЕНТРА РТУ МИРЭА

Проведенные предварительные исследования подтверждают возможность реализации в рамках лаборатории мониторинга окружающей среды и космического пространства УНЦ «Космоцентр» РТУ

МИРЭА ряда учебно-методических и научно-исследовательских радиотехнических комплексов в целях подготовки специалистов и проведения НИОКР по направлению исследования ионосферы Земли. Обоснованы перспективными направления исследования, основанные на приеме и анализе параметров сигналов от ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo, в том числе от КА типа Cubesat, а также и от сети СДВ радиопередатчиков [10].

Весной 2022 года МИРЭА — Российский технологический университет (РТУ МИРЭА) стал победителем конкурса Фонда содействия инновациям (ФСИ) на финансовое обеспечение организационно-технического и методического сопровождения проектов программы «Дежурный по планете» (VIII очередь) [11].

В рамках поддержанного проекта в 2022–2023 гг. будет создан и запущен малый космический аппарат типа Cubesat 3U на платформе компании ГЕОСКАН, оснащенный полезной нагрузкой, разрабатываемой кафедрой радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики. [12] Реализация проекта позволит РТУ МИРЭА получить собственный космический аппарат, а школьникам России и обучающимся в РТУ МИРЭА получить компетенции, связанные с особенностями его разработки, эксплуатации и обработки получаемой информации.

На борту МКА установлена бортовая научная аппаратура:

- оптико-электронная аппаратура видимого диапазона разрешения;
- приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS;
- приемо-передающий модуль (для эксперимента организации межспутниковой связи совместно с МКА TUSUR-GO).

Установленная научная аппаратура обуславливает задачи, решаемые МКА RTU MIREA1: съемка подстилающей поверхности в видимом диапазоне электромагнитного спектра, экспериментальная межспутниковая связь, исследование ионосферы по сигналам ГНСС [13].

В целом возможности Космоцентра РТУ МИРЭА по мониторингу ионосферы разделяются на два направления:

- 1) Работа с космической группировкой:
 - запуск спутника RTU MIREA1 типа Cubesat 3U;
 - прием сигналов ГНСС;
 - прием сигналов трансionoсферного зондирования.
- 2) Работа с наземными средствами
 - прием сигналов вертикального зондирования наземных ионозондов «Парус-А» (г. Троицк, г. Электроугли);
 - прием сигналов наклонного зондирования наземных ионозондов НЗ «Парус-А» (г. Калининград, г. Ростов-на-Дону).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей стране наземные средства исследования ионосферы в большинстве случаев работают по принципу вертикального зондирования. Высокоширотная ионосферная сеть, на основе ионозондов иностранного

производства обладает рядом ограничений. Опыт эксплуатации десяти экземпляров ионозонда «Парус-А» показал исключительную устойчивость воспроизводимой им структуры ионосферы в условиях самых разнообразных возмущений — ионосферных бурь, F-рассеяний, наклонных отражений, волн широкого спектра и т.д.

Для пространственного покрытия территории России необходимо расширять возможности ионосферной сети. Это может быть сделано за счет увеличения количества ионозондов, а также расширения их возможностей в части наклонного зондирования и применения спутниковых средств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Прикладной потребительский центр Роскосмоса // [Электронный ресурс] URL: <https://www.glonass-iac.ru>. (Дата обращения: 26.10.2023).
- [2] Деминов М.Г. Ионосфера Земли: закономерности и механизмы // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли : Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. – Москва : Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 2015. – С. 295-346. – EDN YNAQOR.
- [3] Скрипачев В.О., Суровцева И.В., Барсуков А.И., Жуков А.О. Результаты обработки данных бортовой геофизической аппаратуры для выявления сейсмической активности // Материалы пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2017 год, серия Вопросы электромеханики, «Корпорация «ВНИИЭМ» Москва, с. 159-167.
- [4] Литвинов С.В., Глинкин И.А., Скрипачев В.О. Мониторинг ионосферы Земли методом совмещенного зондирования // Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2023. С 335 - 343.
- [5] Verhulst T., Altadill D. et all. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronized ionosondes // Advances in Space Research, 2017. V. 60. I. 8. P. 1644-1656.
- [6] Литвинов С.В., Глинкин И.А., Панышин Е.А., Скрипачев В.О. Обработка результатов эксперимента по совмещенному (вертикальному и наклонному) зондированию ионосферы на ионозондах серии Парус-А // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 372. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a
- [7] Кашеваров А.А., Литвинов С.В., Глинкин И.А. Многоканальное многочастотное приемное устройство РЛС ЗГО ионосферной волны // Сборник

- научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции "Радиоинфоком-2022", Москва, 06–10 июня 2022 года. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2022. – С. 86-90. – EDN KBLYXK.
- [8] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022665014 Российская Федерация. Программа проектирования комплекса совмещенного (вертикального и наклонного) зондирования ионосферы (CCIS - complex of combined ionospheric sounding) : № 2022664212 : заявл. 29.07.2022 : опубл. 09.08.2022 / С. В. Литвинов, Д. С. Корляков, К. В. Авдеев, А. А. Бондарь ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет». – EDN UIQLZY.
- [9] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667714 Российская Федерация. Программа территориального планирования и расчет зон ответственности при проектировании сети ионосферных станций вертикального зондирования (NIMS - network of ionosphere measurement stations) : № 2022664176 : заявл. 29.07.2022 : опубл. 23.09.2022 / С. В. Литвинов, Г. А. Милорадов, В. В. Дорошенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет». – EDN DPDNTC.
- [10] Замуруев С.Н., Скрипачев В.О., Семенова О.В., Милорадов Г.А. Перспективы развития лаборатории мониторинга окружающей среды и космического пространства // Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции «Радиоинфоком-2022», г. Москва, РТУ МИРЭА: сборник научных статей. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. – С. 126-131. – EDN GVVBNZ.
- [11] Сайт МИРЭА — Российский технологический университет «РТУ МИРЭА — победитель конкурса программы «Дежурный по планете», [Электронный ресурс] // URL: <https://www.mirea.ru/news/rtu-mirea-pobeditel-konkursa-programmy-dezhurnyy-po-planete/> (Дата обращения: 26.10.2023).
- [12] МИРЭА и Геоскан // Space-п. Дайджест №11 апрель 2022, стр. 9.
- [13] Горбунов Р.В., Скрипачев В.О., Литвинов С.В., Тарадаев С.В. «Возможности малых космических аппаратов для проведения радиозатменных измерений ионосферы» // Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции «Радиоинфоком-2022», г. Москва, РТУ МИРЭА: сборник научных статей. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. - С 80-85
- [14] Сигов А.С., Кудж С.А., Замуруев С.Н., Куликов Г.В., Андреев Г.И. Учебно-научный Центр космического мониторинга - новый высокотехнологичный этап взаимодействия Московского технологического университета и ЦНИРТИ им. Академика А.И. Берга // Вестник РАЕН. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 10-15. – EDN XRELXF.
- [15] Прикладной потребительский центр Роскосмоса // [Электронный ресурс] URL: <https://www.glonass-iac.ru>.
- [16] Гаджиев Э.В., Скрипачев В.О., Генералов А.Г., Полушковский Ю.А. К вопросу о построении антенн для радиозатменного метода диагностики ионосферы. Тезисы докладов Шестой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». 2018. С. 129–131.
- [17] Программа разработки, создания и эксплуатации учебно-научного центра космического мониторинга "Космоцентр" на базе Московского технологического университета / А. С. Сигов, С. А. Кудж, А. В. Рагуткин [и др.] // Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции, Москва, 13–17 ноября 2017 года / Московский технологический университет (МИРЭА). – Москва: Московский технологический университет (МИРЭА), 2017. – С. 7-18.

DEVELOPMENT OF MONITORING OF THE STATE OF THE EARTH'S IONOSPHERE BY GROUND-BASED RADIO-TECHNICAL SYSTEMS

Litvinov S.V.

Institute of Radioelectronics and Informatics

Department of Radioelectronic Systems and Complexes RTU MIREA

Moscow, Russia

Litvinov_S@mirea.ru

Abstract — The article gives a brief review of methods of ionosphere research and its influence on radio wave propagation. The article considers the addition to the functionality of ground-based vertical ionosondes with the possibility of receiving and processing signals of inclined sounding and combining these methods (so-called complex sounding). Modernization of the ionosonde hardware is proposed by applying a multi-frequency structure. The possibilities of the Space Center RTU MIREA to receive and process signals of ground-based ionosondes, as well as to work with spacecraft, in particular, RTU MIREA1 spacecraft, which is being developed in RTU MIREA, are considered.

Keywords — ionosphere, vertical sounding, inclined sounding, ionosonde, spacecraft.

УДК 551.466 + 621.396

РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СВЧ-РАДИОМЕТРИИ И ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО И ОКЕАНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Барсуков И.А.
Отдел 6010

АО «Российские космические системы»
г. Москва, Россия
*e-mail: barsukovIA@spacecorp.ru

Гаврилов М.И. *
Отдел 6010

АО «Российские космические системы»
г. Москва, Россия

Зубков И.А. *
Отдел 6020

АО «Российские космические системы»
г. Москва, Россия

Черный И.В. *
Отдел 60

АО «Российские космические системы»
г. Москва, Россия

Стрельцов А.М.
Отдел 6020

АО «Российские космические системы»
г. Москва, Россия
e-mail: streltcov.AM@spacecorp.ru

Болдырев В.В. *
Отдел 6020

АО «Российские космические системы»
г. Москва, Россия

Евсеев Г.Е. *
Отдел 6020

АО «Российские космические системы»
г. Москва, Россия

Яковлев В.В. *
Отдел 6020

АО «Российские космические системы»
г. Москва, Россия

Аннотация — СВЧ-радиометр позволяет получать данные независимо от облачности (погоды) и времени суток, которые обычно используются для определения стандартных метеорологических параметров. Одним из современных бортовых приборов является микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ разработанный для метеорологического спутника третьего поколения «Метеор-М», который совмещает в своей конструкции функции сканера, температурного и влажностного зондировщиков. Рассматриваются технические характеристики прибора, схема кругового конического сканирования и особенности его функционирования. Анализируются вопросы калибровки радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ для представления данных в шкале антенных и яркостных температур. Также рассмотрены вопросы построения и развития космических

гидрометеорологических программ США и Европейского космического агентства.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), СВЧ-радиометрия, микроволновый сканер/зондировщик, поляриметр, антенна, внутренняя калибровка, антенные температуры, спутник, космический аппарат, радиометр, обработка данных ДЗЗ.

ВВЕДЕНИЕ

Главной задачей спутникового дистанционного зондирования Земли является получение количественных сведений о явлениях и процессах в атмосфере и на поверхности на различных пространственно-временных масштабах. Эти сведения необходимы для понимания взаимосвязей между различными сферами Земли и для принятия важных решений, влияющих на условия жизни людей. Одним из важнейших спутниковых методов

изучения окружающей среды является пассивное (радиометрическое) микроволновое зондирование, обеспечивающее получение количественной информации о характеристиках и эволюции среды независимо от времени суток и облачности.

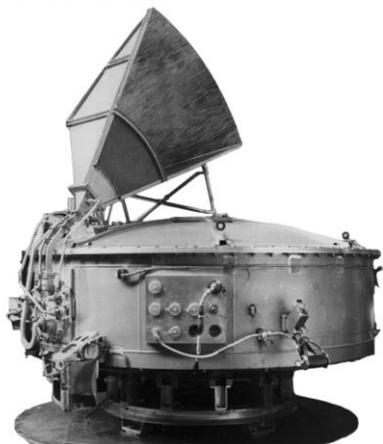


Рис. 1. Внешний вид радиометра, установленного на КА «Космос-243»

Первые в мире микроволновые измерения Земли были осуществлены 55 лет назад с отечественного спутника "Космос-243", запущенного 23 сентября 1968 года (см. рис. 1). Измерения велись на частотах 3.4, 9.6, 22.2 и 37.0 ГГц в трассовом режиме [1]. В конце 70-х годов в США был запущен спутник Nimbus-7 с первым сканирующим микроволновым радиометром SMMR на борту.

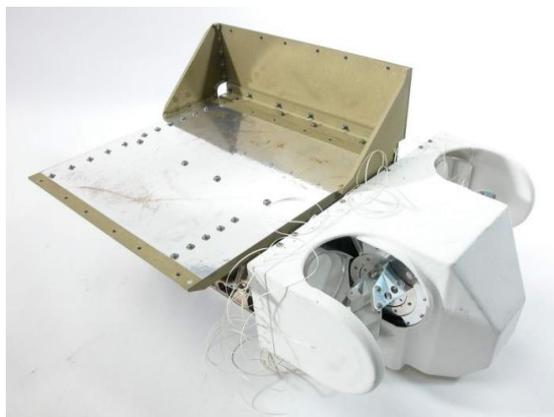


Рис. 2. Радиометр MSU КА «NOAA-6»

Однако широкое практическое применение микроволновых радиометров началось в 1979 году со спутника NOAA (США), на котором был установлен зондировщик Microwave Sounding Unit (MSU) (см. рис. 2) для измерения профиля температуры атмосферы на частотах 50-58 ГГц [2].

В 1987 г. на орбиту Земли в рамках метеорологической спутниковой программы министерства обороны США был запущен КА DMSP F08 с микроволновым сканером SSMI на борту. Сканирующий радиометр SSMI принимал излучение Земли на частотах 19,3; 22,2; 37,0 и 85,5 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях. По данным измерений определялись параметры подстилающей поверхности и

интегральные параметры атмосферы. В настоящее время диапазоны рабочих частот орбитальных средств пассивной радиометрии определяются рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ) [3, 4].

Установленный на КА DMSP F11, запуск которого состоялся в 1991 г., комплекс приборов, кроме сканера SSM/I, включал в своем составе зондировщики SSM/T-1 и SSM/T-2, предназначенные для определения профиля температуры тропосферы и стратосферы по измерениям на нескольких частотах в диапазоне 50-59 ГГц и профиля влажности в тропосфере по измерениям в области сильной линии поглощения водяного пара на 183,31 ГГц, соответственно [5]. С 1998 г. на спутниках серии NOAA также устанавливаются температурный AMSU-A и влажностный AMSU-B зондировщики [6], предназначенные для обеспечения стран - членов ВМО стандартной гидрометеорологической информацией. Включение данных AMSU-A/-B в схемы численного прогноза погоды привело к существенному повышению качества прогнозов.

Первый отечественный сканер «Икар-Дельта» был выведен на орбиту в 1996 г. в составе модуля «Природа» орбитального комплекса «Мир» и был предназначен для проведения научных экспериментов по определению интегральных параметров атмосферы [7]. Затем на орбиту был выведен сканер МИВЗА в составе КА «Метеор-3М» [8].

В России спутниковая СВЧ-радиометрия является одной из немногих динамично развивающихся технологий ДЗЗ благодаря исследованиям и разработкам ФГУП «Центр космических наблюдений» (впоследствии — Научно-технологический центр «Космонит», а ныне - отделение 60 АО «Российские космические системы»).

За указанный период коллективом были созданы приборы для КА «Метеор-3М» (МТВЗА, запуск осуществлен в 2001 году), КА «Сич-1М» (МТВЗА-ОК, запуск осуществлен в 2004 году), КА «Метеор-М» (МТВЗА-ГЯ, запуск КА №1 осуществлен в 2009 году, запуск КА №2 осуществлен в 2014 году, запуск КА №2-1 в 2017 году был аварийным, запуск КА №2-2 осуществлен в 2019 году, а запуск КА №2-3 был осуществлен в 2023 году), [8-10].

I. РАДИОМЕТРЫ СЕМЕЙСТВА МТВЗА.

В декабре 2001 г. начались летные испытания КА «Метеор-3М», в состав бортового измерительного комплекса которого входил многофункциональный Модуль Температурно-Влажностного Зондирования Атмосферы, сокращенно - СВЧ-радиометр МТВЗА (см. рис. 3.). Приемные устройства МТВЗА осуществляли регистрацию восходящего излучения атмосферы в 21 канале в диапазоне рабочих частот от 18 до 183 ГГц [8]. Такие характеристики озаменовали окончание монополии США в области спутниковой микроволновой метеорологии.



Рис. 3. Антенный модуль СВЧ-радиометра МТВ3А КА «Метеор-3М»

К моменту запуска на орбиту конструкция прибора МТВ3А не имела аналогов и являлась уникальной, так как впервые в одном приборе были конструктивно объединены функции сканера аналогичного SSM/I и зондировщиков таких, как SSM/T-1/T-2 и AMSU-A/-B. Прибор стал первым в мировой практике спутниковым сканером/зондировщиком, предназначенным для определения стандартного набора гидрометеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности в квазиреальном масштабе времени и в единой системе сканирования. Два года спустя в 2003 г. был выведен на орбиту американский аналог МТВ3А – сканер/зондировщик SSMIS в составе КА DMSP F16 [14]. Опыт проведения летных испытаний и эксплуатации МТВ3А в условиях реального полета позволил выявить недостатки доработать конструкцию прибора для метеорологических космических аппаратов следующего поколения.

В настоящее время микроволновый сканер/зондировщик МТВ3А-ГЯ является одним из основных видов целевой аппаратуры на борту метеорологических спутников серии «Метеор-М». По данным МТВ3А-ГЯ могут быть восстановлены паросодержание атмосферы, водозапас облаков, скорость приводного ветра, вертикальные профили температуры и влажности атмосферы и др.[26]

По информационным характеристикам и области применения радиометр МТВ3А-ГЯ соответствует зарубежным аналогам – зондировщикам AMSU-A, AMSU-B (спутники NOAA, США; MetOp, ЕС), ATMS (спутник SNPP, США) [15], сканерам AMSR-E (спутник Aqua, США), AMSR2 (спутник GCOM-W1, Япония) [13] и сканеру/зондировщику SSMIS (спутники DMSP F16–F19, США) [14]. Основные технические характеристики

микроволнового сканера-зондировщика МТВ3А-ГЯ приведены в таблице 1, а внешний вид на рис. 4.

ТАБЛИЦА 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МТВ3А-ГЯ

Параметр	Значение
Диапазон, ГГц	10.6, 18,7, 23, 8, 31.5, 36.5, 42, 48, 52-57, 91, 65, 183, 31
Количество каналов	29
Апертура антенны, м	0.65
Угол визирования, град.	53.3
Угол падения, град.	65
Пространственное разрешение, км	16–198
Чувствительность, К/пиксель	0.3–0.9
Полоса обзора, км	1500–2500
Сканирование	коническое, круговое
Режим работы	непрерывный
Период сканирования, с	2,5
Нестабильность вращения сканера	10^{-04}
Поток данных, Кбит/с	35
Объем ЗУ, Мбайт	256
Масса, не более, кг	94
Потребление, не более, Вт	80

Радиометрические каналы сканера МТВ3А-ГЯ включают рабочие частоты в окнах прозрачности атмосферы 10,6, 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42; 48 и 91 ГГц, а зондировщика — в полосе поглощения кислорода 52–57 ГГц и в области резонансной линии водяного пара 183,31 ГГц. Информационные характеристики радиометрических каналов МТВ3А-ГЯ для орбиты КА "Метеор-М" высотой 830 км приведены в таблице 2.

Антенная система МТВ3А-ГЯ представляет собой однозеркальную антенну с боковым облучением параболического зеркала апертурой 0.65 м. Групповой многочастотный антенный облучатель находится в фокальной плоскости и включает четыре рупора, каждый из которых оптимизирован в диапазоне 10,6–23,8, 31,5–48, 52–91 и 176–190 ГГц [26].

ТАБЛИЦА II. ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ
МТВЗА-ГЯ, ПРИВЕДЕННЫЕ К ОРБИТЕ КА "МЕТЕОР-М"
(ВЫСОТА 830 КМ)

Центральная частота, ГГц	Поляризация	Количество полос	Ширина полосы, МГц	Пространственное разрешение (антенное пятно), кмхкм	Приведенный пиксель изображения,	Чувствительность не хуже, $\frac{Классов}{Классов}$	Высота максимума весовой функции
10,6	V, H	1	100	89×198	32×32	0.5	-
18.7	V, H	1	200	52×116	32×32	0.4	-
23.8	V, H	1	400	42×94	32×32	0.3	-
31.5	V, H	1	1000	35×76	32×32	0.3	-
36.5	V, H	1	1000	30×67	32×32	0.3	-
42.0	V, H	1	1000	26×60	32×32	0.4	-
48.0	V, H	1	1000	24×43	32×32	0.4	-
91.655	V, H	2	2500	14×30	16×16	0.6	-
52.80	V	1	400	21×48	48×48	0.4	2
53.30	V	1	400	21×48	48×48	0.4	4
53.80	V	1	400	21×48	48×48	0.4	6
54.64	V	1	400	21×48	48×48	0.4	10
55.63	V	1	400	21×48	48×48	0.4	14
Fo±0.1	H	4	50	21×48	48×48	0.4	20
Fo±0.05	H	4	20	21×48	48×48	0.7	25
Fo±0.025	H	4	10	21×48	96×96	0.5	29
Fo±0.01	H	4	5	21×48	96×96	0.7	35
Fo±0.005	H	4	3	21×48	96×96	0.9	42
183.31±1.4	V	2	500	9×21	32×32	0.8	4.7
183.31±3.0	V	2	1000	9×21	32×32	0.6	2.9
183.31±7.0	V	2	1500	9×21	32×32	0.5	1.5

Fo=57.2903±0.3222 ГГц, V – вертикальная поляризация, H – горизонтальная поляризация

В сканерных каналах измерения проводятся на двух ортогональных поляризациях. Кросс-поляризационная развязка составляет не хуже -23 дБ.



Рис. 4. СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» №1

К достоинствам МТВЗА-ГЯ следует отнести комбинацию в одном приборе каналов сканера и зондировщика, наличие новых частот 42,0 и 48,0 ГГц и зондирование под углом 65°, что открывает дополнительные возможности для оценки гидрометеорологических параметров и наблюдения внутриокеанических процессов [20], а также расширение полосы обзора потенциально до 2500 км.

Схема кругового конического сканирования МТВЗА-ГЯ построена таким образом, что визирование производится в направлении кормы КА (рис. 5). Направление скана - слева направо с рабочим сектором 105° (от -90° до 15° относительно трассы спутника), что обеспечивает полосу обзора 1500 км. Угол визирования составляет 53,3°, а угол падения 65°. Несимметричность сектора сканирования связана с максимальной реализацией поля «незатенения» элементами конструкции КА.

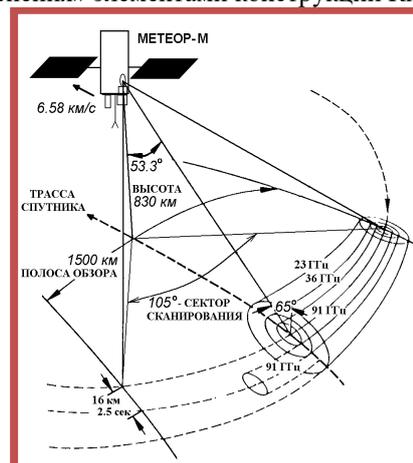


Рис. 5. Схема сканирования МТВЗА-ГЯ

За период сканирования 2,5 с, перемещение нормали спутника составляет 16 км, что сравнимо с элементом пространственного разрешения микроволнового радиометра в каналах 91 ГГц и 183 ГГц. Поэтому масштаб 16×16 км выбран в качестве пространственного элемента квантования сигнала (для всех радиометрических каналов).

На этапе предварительной обработки данных в

наземных условиях, производится процедура пространственного усреднения (сглаживания) изображений в отдельных каналах до размеров пикселя 32×32 км и 48×48 км (табл. 2), что обеспечивает повышение чувствительности в два и три раза, соответственно. С этой целью, для стратосферных каналов (высота максимума весовой функции 29–42 км), информация которых используются, главным образом, для климатических исследований, приведенный пиксель имеет размер 96×96 км.

Система сканирования представляет собой прецизионную вращающуюся платформу, на которой размещены: параболическая антенна, облучатели, приемники СВЧ-излучения, микропроцессорный блок предварительной обработки данных и вторичные источники питания. Данная конструкция необходима для того, чтобы обеспечить постоянство угла визирования и положения поляризационного базиса прибора на протяжении всего рабочего сектора, что **ИМЕЕТ** принципиальное значение для каналов в окнах прозрачности атмосферы (сканерные каналы), где доминирующий вклад составляет поляризованное излучение подстилающей поверхности. Организованная таким образом схема сканирования позволяет исключить влияние третьего параметра Стокса на результаты поляризационных измерений, что характерно для схемы линейного кругового сканирования, которая применяется в зондировщиках [17].

II. ПРОЦЕДУРА ВНУТРЕННЕЙ И ВНЕШНЕЙ КАЛИБРОВКИ [26]

В спутниковом СВЧ-радиометре МТВЗА-ГЯ реализован оригинальный метод внутренней калибровки [13,14], учитывающий особенности построения и функционирования прибора (компенсационная схема построения приемников, режим конического кругового сканирования, многочастотный режим измерений).

Внутренняя (бортовая) калибровка радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ с целью определения шкалы антенных температур проводится по двухточечной схеме на каждом периоде сканирования вне рабочего сектора. Блок калибровки МТВЗА-ГЯ обеспечивает измерение интенсивности излучения двух согласованных нагрузок с известными яркостными температурами («горячей» и «холодной»). В качестве «горячей» нагрузки используется бортовой калибратор - имитатор абсолютно черного тела, яркостная температура которого находится в пределах 240–300 К.

В качестве «холодной» нагрузки используется фоновое реликтовое излучение Вселенной с яркостной температурой 2,73 К [13,14], которое принимается калибровочной антенной, ориентированной в космическое пространство.

I. В предположении линейности калибровочной функции (функции перехода от сигнала U_c^i к антенным температурам) величина T_a^i для каждого пикселя в рабочем секторе определяется выражением:

$$T_a^i = (T_c - T_x) \frac{(U_c^i - U_x^i)}{U_c^i - U_x^i} + T_x \quad (1)$$

где $T_c = \varepsilon t_c$ – яркостная температура калибратора («горячей» нагрузки) в Кельвинах, t_c – физическая температура калибратора, ε – излучательная способность калибратора (составляет не менее 0.999), i – индекс радиометрического канала, $T_x = 2,73$ К – яркостная температура реликтового фона («холодной» нагрузки), U^i – выходное напряжение в мВ.

Для уменьшения погрешности внутренней калибровки величины T_c^i , U_c^i , U_x^i и их разности в выражении (1) усредняются по данным измерений на m последовательных сканах ($10 < m < 60$, величина m уточняется на этапе летных испытаний прибора).

В качестве примера на рис. 6 приведены записи калибровочных сигналов МТВЗА-ГЯ в канале $183,31 \pm 7,0$ ГГц для трех витков КА «Метеор-М» №2-2 за 06 августа 2019 г. Физическая температура калибратора при переходе с солнечной стороны орбиты на теневую меняется от -27 до -31°C . Яркостная температура калибратора изменяется соответствующим образом в пределах от 242 до 246 К. При этом яркостная температура космического пространства регистрируется на всех витках спутника на уровне 2,73 К. Известно [21, 22], что яркостная температура реликтового излучения характеризуется высоким постоянством и изотропностью: вариации излучения не превышают $\pm 0,1$ мК.

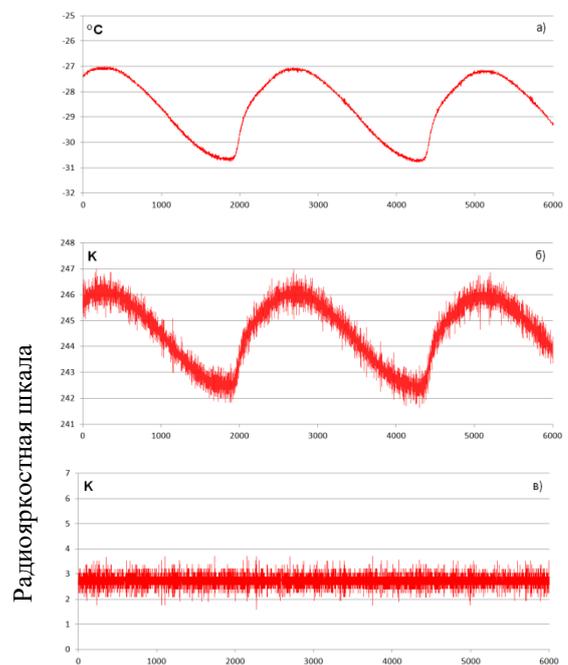


Рис. 6. Опорные калибровочные сигналы СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ в канале $183,31 \pm 7,0$ ГГц (КА «Метеор-М» №2-2, 06 августа 2019 г., витки 452, 453 и 454): а) физическая температура калибратора; б) яркостная температура калибратора; в) яркостная температура космического пространства. Регистрограммы получены для постоянного времени $\tau=30$ мс. Дисперсия шумов на «горячей» нагрузке - 0,37 К ($\tau=30$ мс), что соответствует чувствительности канала 0,065 К ($\tau=1$ с) и 0,45 К/пиксель

Положительные приращения в пределах 3-8 мК обусловлены излучением Млечного Пути и из-за малости величины по сравнению с собственными шумами СВЧ-радиометра их можно не учитывать.

Погрешность измерения физической температуры калибратора не превышает 0,05°C. Поэтому погрешность (стабильность) яркостной шкалы определяется в основном инструментальным шумом (величиной «шумовой дорожки» при соответствующей постоянной времени). Для всех радиометрических каналов прибора МТВЗА-ГЯ погрешности шкалы антенных температур составляет 0.5-1.2 К [11,24].

Таким образом, в соответствии с выражением (1) яркостная шкала СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ привязана к уровню реликтового излучения космического пространства. Можно поэтому обоснованно утверждать, что измерения МТВЗА-ГЯ характеризуются высокой абсолютной стабильностью (рис. 6).

В действительности зависимость (1) является нелинейной из-за наличия квадратичного детектора в тракте микроволнового радиометра. Погрешность, обусловленная нелинейностью радиометрического тракта, является, однако, систематической и не превышает 0,4 К. Ею, как правило, пренебрегают, поскольку, измерения яркостной температуры производятся со случайной погрешностью 0,5–1,5 К на пиксель и, кроме того, систематическая погрешность абсолютной калибровки бортовых микроволновых радиометров составляет порядка 2–3 К [5, 8]. Отметим здесь, что в зарубежном аналоге МТВЗА-ГЯ — радиометре ATMS на спутнике SNPP — впервые использована нелинейная процедура внутренней калибровки [18].

В период летных испытаний космических аппаратов «Метеор-М» проводится оценка параметров радиометрических каналов и диаграммы направленности антенны МТВЗА-ГЯ, в том числе, каналов зондировщика с помощью уникальной процедуры лимбовых измерений. Данная процедура включает временное изменение орбитальной ориентации КА (на нескольких витках) таким образом, чтобы рабочий сектор сканирования частично захватывал космическое пространство, и обеспечивалась возможность лимбовых измерений. При этом, анализируя характер изменения излучения на границах таких контрастных областей как диск планеты, радиогоризонт и космический реликтовый фон, можно оценить ширину главного лепестка диаграммы направленности антенны ее потоковую эффективность и уровень боковых лепестков [24], а также определить погрешность внутренней калибровки шкалы антенных температур [24].

Подобная методика оценки технических характеристик микроволновых радиометров в орбитальных условиях, связанная с маневром космического аппарата, применялась для многих микроволновых радиометров, например, AMSR-E (спутник Aqua), TMI (спутник TRMM), SSMIS (спутники DMSP), WindSat (спутник Coriolis), ATMS (спутник Suomi NPP) [18, 26-28].

Переход от шкалы антенных температур СВЧ-радиометра к шкале яркостных температур осуществляется на основе учета параметров диаграммы направленности антенны с помощью линейной функции вида:

$$T_{я}^n = A^n T_a^n + C^n \quad (2)$$

где A^n , C^n – коэффициенты, которые характеризуют, соответственно, потоковую эффективность антенны и вклад фонового излучения, принимаемого через боковые лепестки. Они определяются при абсолютной (внешней) калибровке с использованием модельных данных, полученных по радиационной модели системы «атмосфера - подстилающая поверхность». Входными данными в модели служат результаты подспутниковых (полигонных) измерений.

Выражение (2) справедливо для антенн с потоковой эффективностью не менее 90% [24]. Следовательно, сами параметры антенны не входят в выражение (2), а должны лишь подтверждать достаточную потоковую эффективность антенны. Здесь также не учитывается паразитный уровень сигнала с ортогональной поляризацией, поскольку, для антенны с кроссполаризационной развязкой менее -23 дБ им можно пренебречь.

Процедура абсолютной калибровки СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ подробно рассмотрена в работах [28-30]. Результаты сравнения временных рядов МТВЗА-ГЯ и СВЧ-радиометра AMSR-2 (на японском спутнике GCOM-W1) над тестовыми областями в лесах Амазонки, в Антарктиде и Гренландии демонстрируют высокую долговременную стабильность работы МТВЗА-ГЯ [30].

Следует отметить, что систематические погрешности, которые возникают при внутренней и абсолютной калибровке спутникового СВЧ-радиометра в конечном итоге могут быть скорректированы при валидации восстановленных метеопараметров на этапе тематической обработки данных с учетом результатов численного моделирования на основе радиационной модели и информации наземных буйковых и радиозондовых измерений [32-34].

Микроволновый сканер-зондировщик МТВЗА-ГЯ в комплексе с процедурой предварительной обработки его данных представляет систему с измерительными свойствами, которая предназначена для получения количественных характеристик гидрометеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности на основе измерений интенсивности восходящего излучения Земли в СВЧ-диапазоне.

Как известно [35], в СВЧ-диапазоне не существует национальных (государственных) стандартов яркости, в отличие от видимого и ИК диапазонов. Тем не менее, вопросы метрологического обеспечения СВЧ-измерений успешно решаются, и пассивные микроволновые методы широко применяются в спутниковой метеорологии уже на протяжении последних 40 лет [2-5].

Успешность решения указанных задач определяется, как техническими характеристиками аппаратуры, так и методическим и алгоритмическим обеспечением и является результатом применения комплексного подхода, включая вопросы калибровки аппаратуры, тематической обработки данных и валидации полученных продуктов.

Таким образом, схема метрологического обеспечения СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ включает три уровня.

Первый уровень – внутренняя калибровка и представление данных в шкале антенных температур.

Второй уровень – абсолютная (внешняя) калибровка и представление данных в шкале яркостных температур.

Третий уровень – получение гидрометеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности в соответствующих единицах измерений на основе алгоритмов тематической обработки спутниковой информации и процедуры валидации восстановленных параметров в соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации и Росгидромета [26].

В соответствии с Федеральной космической программой планируется осуществить восемь запусков КА «Метеор-М» (табл. 3). Таким образом, с учетом срока активного существования, который составляет не менее 5 лет, использование СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ по целевому назначению в составе КА «Метеор-М» планируется вплоть до 2030 года. При этом, будет осуществляться эксплуатация космической системы из двух спутников, находящихся на утренней и послеполуденной орбитах.

Рассмотренная выше (рис. 52 схема сканирования МТВЗА-ГЯ с полосой обзора 1500 км была реализована на КА «Метеор-М» №1 и №2, которые функционировали на солнечно-синхронной утренней орбите с временем пересечения экватора 09:00.

На самом деле, существует потенциальная возможность реализовать полосу обзора СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ с орбиты высотой 830 км, шириной не менее 2000 км. Учитывая тот факт, что КА «Метеор-М» №2-2 выведен на послеполуденную орбиту (15:00), в период летних испытаний МТВЗА-ГЯ проведены исследования положения солнечных панелей КА на витке в зависимости от местоположения Солнца и их влияние на затенение рабочего сектора МТВЗА-ГЯ.

В результате отмечено, что затенение рабочего сектора МТВЗА-ГЯ происходит только на нисходящих витках и полезная зона по-прежнему ограничивается сектором 105°. В тоже время на восходящих витках положение солнечных панелей открывает обзор более 120°, что позволяет реализовать полосу обзора вплоть до 2500 км.

В качестве примера на рис. 3 и рис. 4 приведены изображения Земли для нисходящих и восходящих витков. На нисходящих витках полоса обзора МТВЗА-ГЯ составляет 1500 км, на восходящих витках полоса обзора достигает 2500 км.

Данные результаты будут учитываться при создании СВЧ-радиометров МТВЗА-ГЯ-МП для КА «Метеор-МП» [12] с целью реализации полосы обзора 2500 км в штатном режиме.

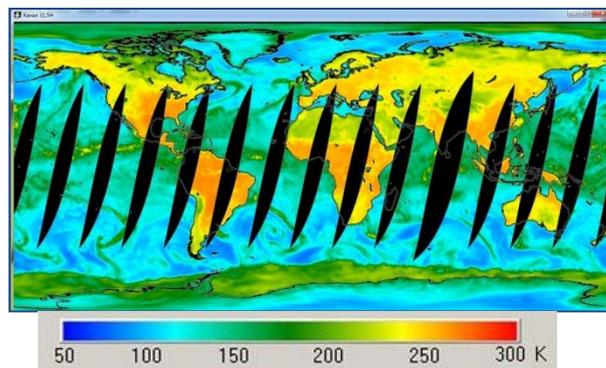


Рис. 7. СВЧ-изображение Земли в канале 31,5 ГГц (ПП) МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» №2-2, 30.09.2019 г. Нисходящие витки. Полоса обзора 1500 км

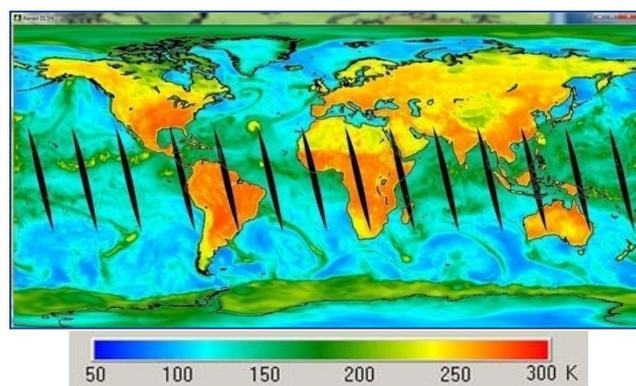


Рис. 8. СВЧ-изображение Земли в канале 31,5 ГГц (ПП) МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» №2-2, 30.09.2019 г. Восходящие витки. Полоса обзора 2500 км

II. ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ БОРТОВЫХ СВЧ-РАДИОМЕТРОВ В ИНТЕРЕНСАХ МИНИСТЕРСТВ И ВЕДОМСТВ РОССИИ.

Основные задачи:

- задачи численного прогноза погоды;
- мониторинг, прогнозирование и контроль чрезвычайных ситуаций; (экстремальные осадки, водозапас снежного покрова и прогноз паводковой ситуации, зарождение и развитие тайфунов и пр.)
- мониторинг снежного и ледового покрова (границы и характеристики льда: возраст, зоны торошения и пр.)
- информационное обеспечение судоходства в масштабах мирового океана.
- Влажность почв и прогнозирование параметров сельскохозяйственной деятельности и пр.

III. НОВЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ СПУТНИКИ США [16-19].

Программа следующего поколения Weather System Follow—on-Microwave (WSF-M) будет предоставлять актуальные метеорологические данные американским военным и их союзникам. Система будет использовать пассивные микроволновые датчики для измерения скорости и направления ветра на поверхности океана

(поляриметр, 18,7 и 37ГГц), толщины льда, глубины снега и влажности почвы (6,9 – 7,3 ГГц, 89-91 ГГц). Он также будет предоставлять данные о космической погоде, снимая показания на энергетически заряженных частицах вокруг космического аппарата (аналогичная аппаратура стояла на DMSP).

Спутник, предназначен для оперативного обеспечения космического мониторинга окружающей среды для военных самолетов. Проект прошел два основных этапа: критический (экспертный) обзор (анализ) конструкции и сертификацию Milestone B, объявленную космическими силами США 19 мая 2020 года (получил специальный сертификат). Запуск запланирован на январь 2024 года, начало эксплуатации в 2024 г.



Рис. 9. Радиометр MWI KA WSF-M

Функции: сканер, поляриметр - сканирование – коническое; - разрешение – 4-5 км; - полоса обзора – 1700 км

Для получения полного объема стандартных метеорологических параметров необходимо получение и обработка данных от оптико-электронных приборов видимого и ИК-диапазонов

В июне 2020 года Консорциум Space Enterprise заключил контракты на сумму 309 миллионов долларов с тремя компаниями: Raytheon Technologies, General Atomics и Atmosphere & Space Technology Research Associates, на разработку их концепций и прототипов КА для оперативной группировки EO/ IR Weather System (EWS). Raytheon предполагает использовать свой опыт в создании датчиков для спутников JPSS NOAA, чтобы быстро внедрить концепцию EWS, которую она называет TWICC (сокращение от Theater Weather Imaging и Cloud Characterization).

TWICC будет нести уменьшенную версию прибора Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), первоначально разработанного в рамках NPOESS, который в настоящее время используется на спутниках NOAA Suomi NPP и JPSS-1 и установлен на спутнике JPSS-2, запускаемом в следующем году.

Прибор Raytheon будет интегрирован в небольшую спутниковую платформу (ориентировочно массой около 200 кг), пригодную для запуска в качестве дополнительной полезной нагрузки на одной из ракет-носителей Космических сил (USSF), таких как Falcon 9 SpaceX или Atlas 5 United Launch Alliance. По последним сообщениям орбитальная группировка может составлять 15-16 спутников с приборами, функционирующими в видимом и инфракрасном диапазонах. Кроме этого EO Vista, которая является участником проекта General Atomics для программы службы EO/IR Weather System (EWS), разработала электронно-оптический инфракрасный датчик, который предоставит военным пользователям важные погодные снимки и данные о характеристиках облаков.

USSF выделили второй транш финансирования Raytheon и General Atomics и планируют выбрать одну компанию для демонстрации своего спутника на орбите [28-30].



Рис. 10. Предполагаемый вид КА программы TWICC

IV. НОВЫЕ ПРОГРАММЫ ПРОГРАММЫ ЕВРОПЕЙСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА [31]

Развитие европейской космической гидрометеорологической программы хорошо просматривается в материалах по программе метеорологических спутников второго поколения MetOP-SG. В этой программе просматриваются следующие новые концептуальные подходы:

- размещение целевой аппаратуры на двух платформах КА;
- специальное орбитальное построение для обеспечения получения синхронных подспутниковых данных;
- развитие функциональных возможностей за счет применения новых бортовых приборов с широким спектром технических характеристик;
- применение в бортовой аппаратуре новейших технических решений (квазиоптическая шина передачи данных и т.п.) и конструктивных решений [16-17].

Кроме этого создаются новые космические системы ДЗЗ, которые расширяют функциональные возможности гидрометеорологических наблюдений и ДЗЗ.

LSTM: Мониторинг Температуры Поверхности Земли по программе Copernicus [34]

Миссия LSTM поможет фермерам добиться устойчивого сельскохозяйственного производства в полевых условиях в условиях растущего дефицита воды.

Два спутника смогут определять температуру отдельных полей и делать снимки Земли каждые три дня с разрешением 50 метров. Это примерно в 400 раз больше деталей, чем в настоящее время можно получить из космоса.



Рис. 11. Внешний вид КА LSTM

ROSE-L: Радар с синтезированной апертурой L-диапазона [35,36]

Поскольку более длинные сигналы L-диапазона могут проникать через многие природные материалы, такие как растительность, сухой снег и лед, миссия ROSE-L дополнит информацию, собранную радиолокационной миссией Copernicus Sentinel-1 С-диапазона, поддерживая управление лесами, точное земледелие и продовольственную безопасность, а также мониторинг океана. Антенна радара будет самой большой плоской антенной, когда-либо построенной, с впечатляющими размерами 11 на 3,6 метра.



Рис. 12. Внешний вид КА ROSE-L

Миссия по высотометрии полярных льдов и снега Copernicus CRYSTAL [37]

Два космических аппарата CRYSTAL производства Airbus будут отслеживать толщину морского льда и толщину снежного покрова, используя двухчастотный радиолокационный высотомер и **технологии микроволновой радиометрии от Airbus.**

Эти данные будут поддерживать морские операции в полярных акваториях и способствовать лучшему пониманию климатических процессов. CRYSTAL также будет поддерживать приложения, связанные с прибрежными и внутренними водами и наблюдением за топографией океана.



Рис. 13. Внешний вид КА Copernicus CRYSTAL

Миссия – сканирующий микроволновый радиометр Copernicus CIMR [39]

CIMR - это микроволновый радиометр с коническим сканированием, который включает каналы, в том числе – поляризметрические, на частотах 1,4, 6,9, 10,65, 18,7 и 36,5 ГГц на солнечно-синхронной полярной орбите высотой 817 км для определения температуры морской поверхности - SST, скорости океанского ветра, солёности морской поверхности - SSS и сплоченности (концентрации) морского льда - SIC с повышенной точностью и пространственным разрешением. (до 4 км). Диаметр антенны – 7,5 м, полоса обзора 1900 км, Запуск первого спутника запланирован в 2028 году, второго – несколько лет спустя.



Рис. 13. Предполагаемый внешний вид КА с радиометром CIMR

Миссия микроволнового радиометра Copernicus Imaging (CIMR) посвящена действиям ЕС по охране Арктики и мониторингу изменения климата, выраженным в Арктической политике ЕС по созданию безопасной, стабильной, устойчивой, мирной и процветающей Арктики.

Миссия была разработана для проведения измерений, которые позволят лицам, принимающим решения, получить доказательства изменений и воздействия в полярных регионах с акцентом на Арктику в глобальном контексте. CIMR оснащен большой вращающейся антенной с золотой сеткой для конического сканирования поверхности Земли и получения результатов измерений с высоким разрешением, связанных с морским льдом,

океаном, снегом и ледяными покровами, и все это с повторным посещением Арктического региона раз в неделю.

Он использует несколько частотных диапазонов для получения этих измерений, а именно:

L-диапазон (1,4135 ГГц), который позволяет измерять соленость поверхности моря, влажность почвы и векторы ветра над океаном,

S-диапазон (6,9 ГГц), который позволяет измерять температуру поверхности моря, температуру суши и льда, а также поддерживает параметры морского льда,

X-диапазон (10,65 ГГц), который позволяет измерять температуру поверхности моря, суши и льда, а также поддерживает параметры морского льда,

K-диапазон (18,7 ГГц), позволяющий измерять параметры морского льда и снега,

Ka-диапазон (36,5 ГГц), который также позволяет измерять параметры морского льда и снега.

В статье «От науки к эксплуатации микроволнового радиометра Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR)» 10-12 мая 2021 года отмечалось: «Миссия CIMR является одной из шести спутниковых миссий, разрабатываемых для расширения текущих возможностей европейской программы Copernicus – системы мониторинга окружающей среды Земли в поддержку европейской политики и на благо граждан Европы и за ее пределами. CIMR разрабатывается в ответ на Комплексную политику ЕС в отношении Арктики, региона, где происходят глубокие изменения, которые имеют глобальные последствия для нашей погоды и климата. Эта встреча является первой возможностью для сообщества пользователей CIMR внести свой вклад в преодоление разрыва между научными измерениями, которые будут выполнены миссией, и подготовкой к их применению в оперативных службах Copernicus и научных приложениях».

Канада и Европейское космическое агентство решили создать арктическую метеогруппировку. [38]. По мере того как в арктическом регионе наращивается активность в области морских и авиационных перевозок, Европа решила нарастить возможности своих метеогруппировок. Для этого они заказали у возглавляемого ОНВ Swedeb AB за 32,5 млн. евро прототип спутника, который будет использоваться для отработки конструкции аппаратов 16-ти спутниковой группировки. Сообщается, что запланированный к запуску в 2024 году арктический метеорологический спутник ЕКА (AWS) будет оснащен датчиками микроволнового зондирования, поставляемыми Omnisys Instruments. За наземный сегмент будет отвечать Thales Alenia Space. Шведско-британский производитель малых спутников AAC Clyde Space заключил условное соглашение о покупке частной компании Omnisys Instruments, шведского разработчика и производителя датчиков для космических проектов, в рамках сделки стоимостью около 8,7 миллионов долларов. Специально для миссии был разработан пассивный микроволновый радиометр, который будет предоставлять данные

для численного прогнозирования погоды. Микроволновый радиометр сконструирован по схеме сканирования поперек трассы, по характеристикам аналогичен ATMS (NOAA) или MWS (Metop-SG). По функциональному назначению – зондировщик, объединяющий функции температурного и влажностного зондировщиков. На рис. 14 представлены возможные варианты компоновки аппаратов.

“Арктический метеорологический спутник является флагманским проектом для AAC Clyde Space и для Северного региона в целом. Его цель - значительно улучшить прогнозирование погоды в Арктическом регионе и значительно улучшить наше понимание изменения климата. Это иллюстрирует главное преимущество использования небольших спутников для сбора данных наблюдения Земли, поскольку это позволяет осуществлять более частый и менее дорогостоящий сбор данных при том же качестве.” — Луис Гомес, генеральный директор AAC Clyde Space.



Рис. 14. Предполагаемый внешний вид и варианты компоновки КА AWS с СВЧ-зондировщиком

Относительно деятельности Канады можно отметить, что она планирует выведение двух радиолокационных спутников на высокоэллиптическую орбиту (ВЭО).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974.187с.
- [2] Spencer R.W., Christy J.R. Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU: Technique, validation, and results 1979-91. Journ. Climate, 1993, N6, pp.1194-1204.
- [3] Рекомендации МСЭ-R RS.1861 (редакция от 01/2010). Типовые технические и эксплуатационные характеристики систем спутниковой службы исследования Земли (пассивной), использующих распределения между 1,4 и 275 ГГц. Серия RS. Системы дистанционного зондирования. (МСЭ-R, Сектор радиосвязи МСЭ)
- [4] Holinger J.P., Pierce J.L. and Poe G.A. SSM/I Instrument and Evaluation. IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing. vol. 28, N5, pp.781-790, 1990.
- [5] Falcone V.J., Griffin M.K., Isaacs R.G. et al. SSM/T-2 Calibration Data Analyses. Proceedings of CO-MEAS'93 Symposium, Albuquerque, NM, 1993, pp.165-168.

- [6] Rosenkranz P.W. Retrieval of Temperature and Moisture Profiles From AMSU-A and AMSU-B Measurements // IEEE Geosci. and Rem. Sens. 2001. V. 39. № 11. P. 2429–2435.
- [7] Jackson P. T. J., Hsu A. Y., Armand N., Kutuza B., Shutko A., Tishchenko Y., Petrenko B., Evtushenko A., Smirnov M., Savorskij V., Sorokin I., Nikolaev A., Sidorenko A. Priroda passive microwave observations in the Southern Great Plains 1997 hydrology experiment // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'98). 1998. P. 1568–1570.
- [8] Черный И.В., Чернявский Г.М., Успенский А.Б., Пегасов В.М. СВЧ-радиометр МТВЗА спутника «Метеор-3М» №1: предварительные результаты летных испытаний // Исследование Земли из космоса, 2003. №6. С.1-15
- [9] Наконечный В. П., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Черный И. В., Чернявский Г. М., Данилов С. Г., Казанцев О. Ю. Оптико-микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ОК // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т 1. С. 197–203.
- [10] Болдырев В.В., Ильгасов П.А., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса Сборник научных статей, Выпуск 5, Том 1, М.: 2008, С. 243-248.
- [11] Барсуков И.А., Никитин О.В., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М. Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» №1. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. трудов Всероссийской научной конференции. –М: «ДоМира», 2011, Том 8, №2, С.257-264.
- [12] Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. Advanced Microwave Imager/Sounder MTVZA-GY-MP for New Russian Meteorological Satellite // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2017. P. 1220–1223.
- [13] Kunee D. B., Y. Hong, D. A. Thompson, M. F. Werner, and G. A. Poe. Analysis of the Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) fields-of-view on DMSP F-16. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 46, no. 4, pp. 934–945, Apr. 2008.
- [14] Weng F., Zou X., Sun N. Et al. Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) // J. Geophys. Res. Atm. 2013. 118. P. 1–14. doi 10.1002/ jgrd. 50840
- [15] Джулия Pica, G. Альберти, А. Memoli, Santovito p. м., S.Varchetta, б. Burallf, S. D'Addio, V. Кангас, «MetOp-SG - совместная миссия ЕКА/EUMETSAT для прогноза погоды и мониторинга климата по данным радиометра», «труды 63 IAC (Международный Конгресс Astronautica), Неаполь, Италия, Октябрь.1-5, 2012, бумага: Мак-12-В1.3.10
- [16] Ville Кангас, Salvatore D'Addio, Маурицио Бетто, Hubert Барре, Марк Loiselet, Грэм Мейсон, «Metop второго поколения Микроволновая звучание и микроволновой обработки изображений миссий,» труды конференции 2012 года EUMETSAT метеорологической спутниковой, Сопот, Польша, Сентябрь.3-7, 2012
- [17] Митник М.Л., Митник Л.М. Алгоритм оценки приводного ветра по данным микроволнового радиометра amsr-e и его применение к анализу погодных систем в тропической зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 297-303.
- [18] Г.М.Чернявский, Л.М.Митник, В.П. Кулешов, М.Л. Митник, И.В.Чёрный. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника Метеор-М №2. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Сборник научных статей. 2018. Т.15, №4, С.78-100. DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
- [19] А. Б. Успенский, В. В. Асмус, А. А. Козлов, Е. К. Крамчанинова, А. М. Стрельцов, Г. М. Чернявский, И. В. Черный. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ. Исследование Земли из космоса, 2016, № 5, с. 57–70.
- [20] Барсуков И.А., Болдырев В.В., Гаврилов М.И., Евсеев Г.Е., Егоров А.Н., Ильгасов П.А., Панцов В.Ю., Стрельников Н.И., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Спутниковая СВЧ-радиометрия для решения задач ДЗЗ. РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, 2021, том 8, выпуск 1, с. 11–23.
- [21] Л.М. Митник, И.В. Чёрный, М.Л. Митник, Г.М. Чернявский, В.П. Кулешов, А.В. Баранюк Микроволновое зондирование различных климатических зон Земли со спутника «Метеор-М № 2» Доклад на XXI Симпозиуме по радиолокационному зондированию природных сред, Санкт-Петербург 20-21 апреля 2016 г.
- [22] Г.М. Чернявский. Целевое использование СВЧ-радиометра в составе КА. Аэрокосмический курьер, №6 2010 с.2

THE DEVELOPMENT OF SPACE-BASED MICROWAVE RADIOMETRY AND THE USE OF SATELLITE MICROWAVE DATA TO SOLVE PROBLEMS OF HYDROMETEOROLOGICAL AND OCEANOLOGICAL SUPPORT: THE CURRENT STATE IN RUSSIA AND ABROAD

Barsukov I.A.
Department 6010
RSS "Russian Space Systems"
Moscow, Russia
*e-mail: barsukovIA@spacecorp.ru

Streltsov A.M.
Department 6020
RSS "Russian Space Systems"
Moscow, Russia
e-mail: streltcov.AM@spacecorp.ru

Gavrilov M.I. *
Department 6010
RSS "Russian Space Systems"
Moscow, Russia

Boldyrev V.V. *
Department 6020
RSS "Russian Space Systems"
Moscow, Russia

Zubkov I.A. *
Department 6020
RSS "Russian Space Systems"
Moscow, Russia

Evseev G.E. *
Department 6020
RSS "Russian Space Systems"
Moscow, Russia

Cherniy I.V. *
Department 60
RSS "Russian Space Systems"
Moscow, Russia

Yakovlev V.V. *
Department 6020
RSS "Russian Space Systems"
Moscow, Russia

Abstract — The microwave radiometer allows you to obtain data regardless of clouds (weather) and time of day, which are usually used to determine standard meteorological parameters. One of the modern on-board devices is the MTVZA-GYA microwave scanner/probe developed for the Meteor-M third generation meteorological satellite, which combines the functions of a scanner, temperature and humidity probes in its design. The technical characteristics of the device, the scheme of circular conical scanning and the features of its functioning are considered. The issues of calibration of the radiometric channels of the MTVZ for data representation in the scale of antenna and brightness temperatures are analyzed. The issues of building and developing space hydrometeorological programs of the United States and the European Space Agency were also considered.

Keywords — remote sensing of the Earth (remote sensing), microwave radiometry, microwave scanner/probe, polarimeter, antenna, internal calibration, antenna temperatures, satellite, spacecraft, radiometer, remote sensing data processing.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛОВ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Куликов Г.В.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
kulikov@mirea.ru

Данг Суан Ханг

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
Dangxuankhang147@gmail.com

Аннотация — В последние годы возрастает потребность в разработке и проектировании спутниковых каналов высокой пропускной способности при эффективном использовании частотного ресурса. Вместо фазовой манипуляции более часто используется амплитудно-фазовая манипуляция (АФМ), что связано с рядом ее преимуществ перед другими видами модуляции в спутниковых линиях связи. В статье представлены результаты исследования влияния нефлуктуационных помех и аппаратных погрешностей при приеме сигналов 16-АФМ и 32-АФМ.

Ключевые слова — многопозиционная амплитудно-фазовая манипуляция, вероятность битовой ошибки, нефлуктуационные помехи, аппаратные погрешности.

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые системы позволяют значительно улучшить качество радиосвязи и расширить перечень возможных услуг для подвижных объектов, обеспечивая надежность и доступность связи в самых удаленных территориях и экстремальных условиях.

Мобильные системы спутниковой связи (ССС) с подвижными объектами первого поколения строились с использованием геостационарных космических аппаратов (КА) с прямыми ретрансляторами и имели низкую пропускную способность. В этих системах спутниковые сети предназначались для связи ведомственных и корпоративных организаций с удаленными и подвижными объектами (кораблями, самолетами, автомобилями и поездами). При внедрении цифровых методов передачи данных мобильные ССС используются не только для передачи служебной информации, но и для предоставления пассажирам воздушного, железнодорожного и морского транспорта различных услуг во время движения. Из-за аппаратных ограничений в спутниковых системах в течение многих лет использовали только фазовую манипуляцию. С появлением малошумящих приемников, а также с улучшением линейности и энергетичности передатчиков спутниковых ретрансляторов в таких системах стали широко применяться многопозиционные

сигналы с амплитудно-фазовой манипуляцией (АФМ) с кольцевой формой сигнального созвездия [1,2].

В современных спутниковых системах большой пропускной способности в Ku- и Ka-диапазонах активно внедряются стандарты DVB-S2 и DVB-S2X, и использование видов модуляции 16 и 32-АФМ гарантирует достаточно высокую скорость передачи. Такая техническая реализация позволяет предоставлять пассажирам услуги широкополосного доступа, в том числе Интернет по время движения по доступной цене.

Для оценки возможности приема и качества связи, кроме уровня принимаемого сигнала, необходимо рассматривать наличие и уровень помех в каналах, а также возможные аппаратные погрешности. Средний срок службы спутников на геостационарном орбите обычно составляет около 15 лет и выше. При длительной эксплуатации с минимальным обслуживанием износ компонентов со временем вызывает в системе различные искажения.

Целью данной работы является анализ влияния нефлуктуационных помех и аппаратных погрешностей при приеме сигналов с многопозиционной амплитудно-фазовой манипуляцией в перспективных мобильных спутниковых системах связи.

I. МОДЕЛИ СИГНАЛА, ПОМЕХ И АППАРАТНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

A. Влияние нефлуктуационных помех на помехоустойчивость приема сигналов АФМ

На длительности канального символа T_s сигнал АФМ на несущей частоте ω_0 может быть представлен в виде:

$$s_i(t) = A_{cp} r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i), t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M - 1,$$

где $A_{cp} = \sqrt{2E_s / T_s}$ – средняя амплитуда сигнала,

$E_s = E_b \log M$ – средняя энергия канального символа, r_i – коэффициент, который определяет амплитуду сигнальной посылки, φ_i – фаза сигнальной посылки, M – позиционность сигнала.

Рассмотрим следующие основные виды помех:

1. Фазоманипулированная помеха:

$$s_n(t) = \mu A_{cp} a_j \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_n)t + \varphi_n],$$

$$\text{при } t \in ((j-1)T_n, jT_n], j=1, \dots, N,$$

где φ_n – случайная начальная фаза помехи, $\Delta\omega_n$ – расстройка помехи относительно центральной частоты спектра сигнала АФМ, μ – относительная интенсивность помехи, $a_j = \pm 1$ – случайный дискретный символ, T_n – длительность импульса помехи, $N = T_n / T_s$ – относительная скорость передачи помехи.

2. Ретранслированная помеха:

$$s_n(t) = \begin{cases} \mu A_{cp} r_\tau \cos(\omega_0(t-\tau) + \varphi_\tau + \varphi_n), & 0 < t \leq \tau, \\ \mu A_{cp} r_i \cos(\omega_0(t-\tau) + \varphi_i + \varphi_n), & \tau < t \leq T_s, \end{cases}$$

где r_j и φ_j – амплитудная и фазовая составляющая предыдущей отраженной посылки; τ – время запаздывания посылки.

3. Частотно-манипулированная помеха:

$$s_n(t) = \mu A_{cp} \cos[(\omega_0 + a_j \Delta\omega_d + \Delta\omega_n)t + \varphi_n],$$

$$t \in ((j-1)T_n, jT_n], j=1, \dots, N,$$

где $\Delta\omega_d$ – девиация частоты помехи,

4. Сканирующая по частоте помеха:

$$s_n(t) = \mu A_{cp} \cos(\omega_n(t)t + \varphi_n).$$

Для помехи с частотой, изменяющейся по пилообразному закону за период T_n :

$$\omega_n(t) = \omega_{n0} + \Delta\omega_d - 2\Delta\omega_d t/T_n,$$

где $\omega_n(t)$ – закон изменения частоты помехи, ω_{n0} – центральная частота помехи.

Расчеты помехоустойчивости проведены при интенсивности помех относительно амплитуды сигнала $\mu = 0.1$ и воздействии на центральной частоте спектра сигнала. Фазоманипулированная помеха имеет скорость передачи $N = 2$. Частотно-манипулированная помеха имеет такую же скорость передачи и девиацию частоты $\Delta\omega_d T_s = 2$.

Ретранслированная помеха имеет относительную задержку $\tau/T_s = 0.1$. Сканирующая помеха имеет девиацию частоты $\Delta\omega_d T_s = 6$.

Зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 показаны на рис. 1 и 2.

Из рисунков видно, что ретранслированная помеха наиболее опасна: при вероятности ошибки 10^{-4} потери энергии составляют 3-4 дБ. ЧМ помеха менее опасна по сравнению с другими видами помех, но потери энергии тоже существенны, они составляют 1-1.5 дБ. При увеличении интенсивности помех энергетические проигрыши существенно возрастают [3-6].

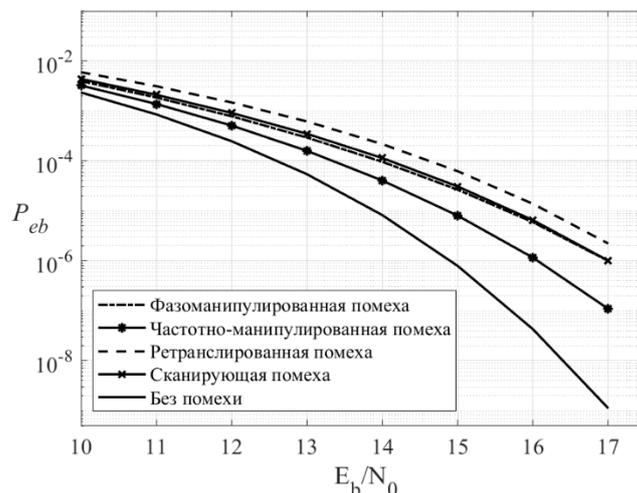


Рис. 1. Зависимость вероятности битовой ошибки для 16-АФМ при наличии нефлуктуационных помех

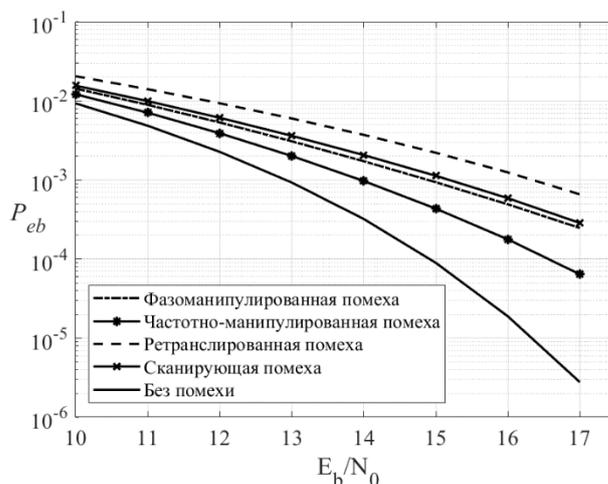


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки для 32-АФМ при наличии нефлуктуационных помех

В. Влияние аппаратных погрешностей на помехоустойчивости приема сигналов АФМ

В процессе эксплуатации радиоэлектронных устройств происходят непреднамеренное отклонение параметров модуляции от нормы, в частности, амплитуды, фазы, частоты, временных соотношений и т.д. Причинами этих явлений могут быть неидеальные и устаревшие компоненты, температурные и механические воздействия, нелинейности каскадов усиления, неустойчивость питания и др.

В приемном устройстве применяются две основные схемы для демодуляции АФМ сигналов: многоканального типа с принятием решения о принимаемом символе по максимуму правдоподобия и квадратурного типа. Каждый тип демодулятора имеет свои особенности.

Неточности работы опорных генераторов могут привести к рассинхронизации, амплитудному и фазовому искажениям, что непосредственно приводит к ошибкам в обнаружении передаваемых посылок и ухудшает помехоустойчивость демодуляторов.

II. ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНОГО И ФАЗОВОГО РАЗБАЛАНСА КВАДРАТУРНОГО ПРИЕМНИКА НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛОВ АФМ

Сигнал АФМ может быть представлен в квадратурном виде:

$$s_i(t) = A_{cp} r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i) = I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t,$$

$$t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M - 1,$$

$$I_i = A_{cp} r_i \cos \varphi_i, \quad Q_i = A_{cp} r_i \sin \varphi_i;$$

или $A_i = A_{cp} r_i = \sqrt{I_i^2 + Q_i^2}, \quad \varphi_i = \arctg \frac{Q_i}{I_i}.$

При прохождении через фазовращатели со сдвигом на 90° квадратурный и синфазный каналы могут оказаться неидеально ортогональными. Этот факт можно учесть в модели опорного сигнала в приемнике с помощью коэффициентов амплитудных (a) и фазовых (θ) искажений:

$$s_{oni}(t) = I_i \cos \omega_0 t - a Q_i \sin(\omega_0 t + \theta).$$

Зависимости P_{eb} от амплитудного и фазового разбаланса при отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 13$ дБ для сигналов 16-АФМ и 32-АФМ показаны на рис. 3 и 4. Для обоих сигналов малый разбаланс квадратурных каналов ниже 10% по амплитуде и 3° (0.05 рад) по фазе незначительно сказывается на качестве приема информации.

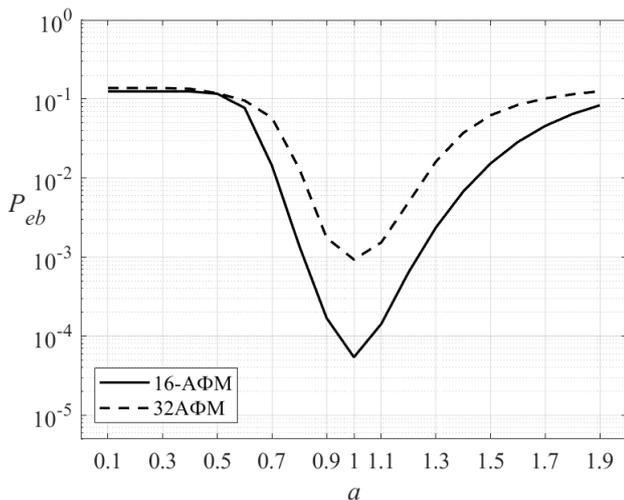


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки для АФМ сигналов при наличии амплитудного разбаланса a квадратурных каналов

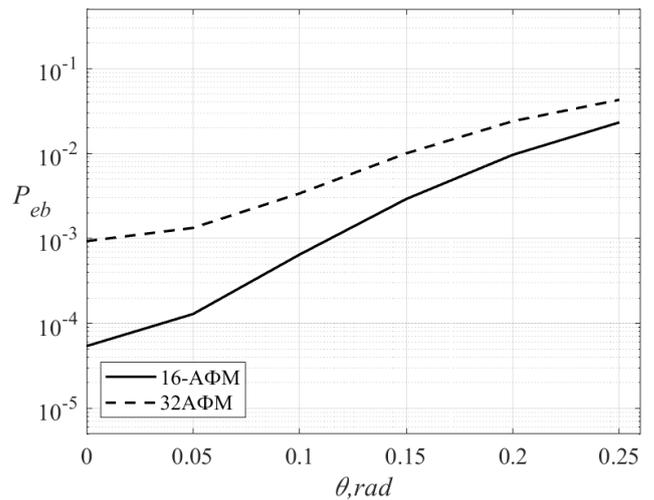


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки для АФМ сигналов при наличии фазового разбаланса θ квадратурных каналов

III. ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ОПОРНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛОВ АФМ

Фазовая погрешность блока формирования опорных колебаний вызвана дополнительным фазовым сдвигом ϕ [7]:

$$s_{oni}(t) = A_{cp} r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \phi), \quad i = 0, 1, \dots, M - 1.$$

При наличии такого сдвига созвездие АФМ сигнала смещается по окружности на величину сдвига ϕ (рис. 5).

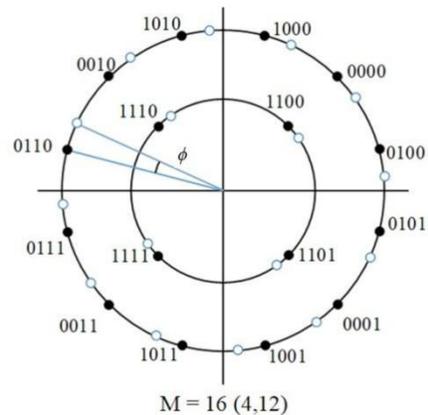


Рис. 5. Сигнальное созвездие 16-АФМ при наличии фазового сдвига ϕ

Графики зависимости P_{eb} от величины фазового сдвига генератора опорных колебаний показаны на рис. 6. Видно, при фазовом сдвиге менее 2° вероятность битовой ошибки снижается незначительно.

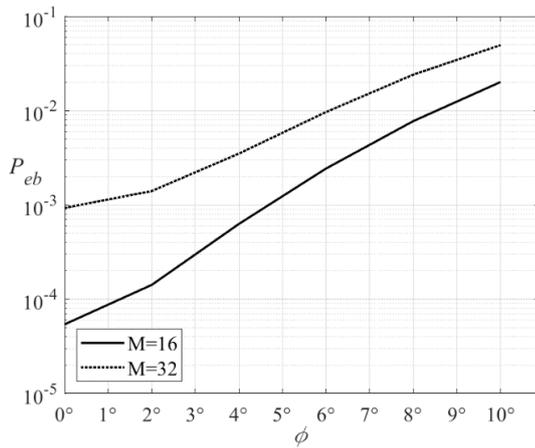


Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки от величины фазового сдвига генератора опорных колебаний ϕ

IV. ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛОВ АФМ

Наличие погрешности в работе блока тактовой синхронизации приемника может привести к временному сдвигу работы корреляторов на некоторое значение ξ . В этом случае за время канального символа на входе корреляторов присутствуют два разных символа – текущий $s_i(t)$ и соседний $s_j(t)$:

$$s(t) = \begin{cases} A_{cp} r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i), & t \in (\xi, T_s), \\ A_{cp} r_j \cos(\omega_0 t + \varphi_j), & t \in [T_s, T_s + \xi), \end{cases}$$

а опорным сигналом для переданного символа $s_i(t)$ является колебание:

$$s_{опi}(t) = A_{cp} r_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i), t \in (\xi, T_s + \xi).$$

Рассчитанные зависимости вероятности битовой ошибки от относительного тактового смещения ξ/T_s показаны на рис. 7. Из рисунка видно, что помехоустойчивость приема сигнала АФМ заметно снижается при тактовом смещении более 5%.

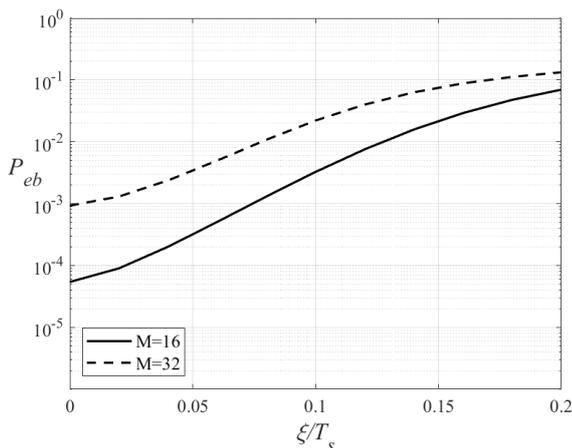


Рис. 7. Зависимости вероятности битовой ошибки от смещения тактовых моментов ξ/T_s

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что помехоустойчивость приема сигналов АФМ с кольцевой формой сигнального созвездия в системах спутниковой связи существенно зависит от помеховой обстановки в радиоканале и наличия аппаратных погрешностей. Показано, что качество связи ухудшается незначительно, если:

- относительная интенсивность нефлуктуационных помех не превышает 0.1;
- разбаланс квадратурных каналов составляет по фазе не более 3° , а по амплитуде – не более 10%;
- фазовая погрешность генератора опорных колебаний в приемнике составляет менее 2° , а погрешность тактовой сетки – менее 3-4%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2- издание. 2003. - 1100 с.
- [2] Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ./ Под ред. Д.Д. Кловского - М.: Радио и связь 2000. - 800 с.
- [3] Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в присутствии фазоманипулированной помехи // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov21/7/text.pdf>.
- [4] Куликов Г.В., Данг С.Х., Стариковский А.И. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией на фоне частотно-манипулированной помехи // Вопросы радиоэлектроники. Серия: техника телевидения. 2022. № 4. С. 44-51.
- [5] Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в двухлучевом канале связи // Вопросы радиоэлектроники. Серия: техника телевидения. 2022. №2. С. 43-49.
- [6] Куликов Г.В., Данг С.Х., Зунг Н.В. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией на фоне сканирующей помехи // Вопросы радиоэлектроники. Серия: техника телевидения. 2022. №3.
- [7] Куликов Г.В., Данг С.Х., Куликов А.Г. Влияние погрешностей системы синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией // Российский технологический журнал. 2023. №3. С. 30-37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-30-37>

NOISE IMMUNITY OF RECEIVING SIGNALS WITH MULTI-POSITION AMPLITUDE-PHASE SHIFT KEYING IN SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Kulikov G.V.

Institute of Radio Electronics and Informatics
Department of Radio Electronic Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
kulikov@mirea.ru

Dang Xuan Khang

Institute of Radio Electronics and Informatics
Department of Radio Electronic Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
Dangxuankhang147@gmail.com

Abstract — In recent years, there has been an increasing need for the development and design of high-bandwidth satellite channels with efficient use of the frequency resource. Instead of phase manipulation, amplitude-phase shift keying (APSK) is more often used, which is due to a number of its advantages over other types of modulation in satellite communication lines. The article presents the results of a study of the influence of non-fluctuation interference and hardware errors when receiving 16-APSK and 32-APSK signals.

Keywords — multi-position amplitude-phase shift keying, bit error probability, non-fluctuating interference, hardware inaccuracies.

УДК 550.388.2

GPS-ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДРОН DJI PHANTOM 3. УЯЗВИМОСТЬ ЕГО СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Панов Е.А.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
super-mehan@mail.ru

Клопова А.П.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
nastyk.0908@gmail.com

Аннотация — Воздействие на беспилотный летательный аппарат (БПЛА) — это метод, используемый для остановки или затруднения работы системы БПЛА. Он может быть использован для определения уязвимостей в системе безопасности БПЛА. БПЛА DJI Phantom 3 Standard — это квадрокоптер с поддержкой Wi-Fi. В данном исследовании на навигационную систему DJI Phantom 3 Standard проведено воздействие в виде GPS-глушения и GPS-спуфинга. Цель данной работы заключается в определении и анализе степени уязвимости GPS коммерческого дрона DJI Phantom 3 Standard. С помощью приложения GNU Radio Companion (GRC) производится глушение сигналов. Для воздействия с подменой GPS используются средства GPS-SDR-SIM. В качестве основного устройства используется программно-определяемое радио (SDR) BladeRF X40. Результаты данного исследования показали, что использование GPS-помех и GPS-спуфинга могут нарушить работу БПЛА.

Ключевые слова — БПЛА, глушение GPS, подмена GPS, уязвимость, дрон.

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), также известные как беспилотники, в последние годы стали все чаще использоваться в научных и гражданских целях, которые ранее были ориентированы только на военное применение [1]. Данная технология привлекает большое внимание из-за своей эффективности. Многие потребители используют коммерческие беспилотники для обеспечения общественной безопасности или совершения преступлений [2]. Растущая доступность коммерческих беспилотников поставила новые задачи в области безопасности и наблюдения.

Значительная часть исследований посвящена изучению уязвимостей безопасности БПЛА, и позволяет сделать вывод о наличии уязвимостей в отношении угроз безопасности, связанных с передачей данных БПЛА [4]. Кроме того, существует исследование, в котором проведены эксперименты по поиску уязвимостей в безопасности беспилотников DJI Phantom 4 (P4P) и Bebop 2 путем изменения прошивки дрона, удаления аутентификации из DJI SDK, спуфингом системы

глобального позиционирования (GPS) на P4P и воздействий на беспроводные сети [5].

В 2016 году изучены детали безопасности нового семейства беспилотников [3]. Были реализованы и протестированы несколько воздействий, такие как удаленный доступ к дрону для видеосъемки, его угон и захват во время полета. Была представлена подборка фатальных воздействий, анализ безопасности и связанные с ними уязвимости дрона DJI Phantom 3. Затем дали ряд рекомендаций, выполнение которых повышало безопасность дрона. В 2018 году предложен эффективный протокол для постановки помех [6]. Предложена эффективная система глушения дистанционного управления БПЛА с учетом протокола. Ее успешно реализовали с использованием SDR-платформы. Для осуществления помехового воздействия на БПЛА и его пульт дистанционного управления необходимо использовать правильное значение частоты [6]. Это затрудняет проведение помеховых воздействий на пульт управления и БПЛА. Поэтому проводится GPS-воздействия, так как ее частота имеет уже определенные значения. В исследовании Хортон подробно описана пошаговая реализация недорогого воздействия на спуфинг GPS, для которого разработали специальный аппарат, успешно примененный для глушения GPS и GPS-спуфинга на DJI Matrice 100 [9].

Глушение — это процесс с использованием частотных передающих устройств для блокирования или нарушения радиосвязи. К ее типам относятся телефонные звонки, системы GPS и сети Wi-Fi. Обычно такое воздействие осуществляется путем подачи на определенный объект сигнала с частотой, превышающей уровень сигнала. Изначально данная технология глушения разработана военными для введения противника в заблуждение относительно географического положения и целей [6]. Из всех воздействий глушения считается, что GPS обладает наибольшей уязвимостью перед помехами [7].

Спуфинг — это процесс, в которой человек или программа идентифицируют себя за какой-либо надежный источник, чтобы получить доступ к важным

данным или информации. Он может осуществляться через сети, электронную почту, компьютеры, сотовую связь или системы GPS [8] и представляет собой попытку радиопередатчиков, расположенных вблизи цели, создать помехи исходному сигналу в системе GPS. Злоумышленники могут передавать неточные координаты. Воздействие обманывает оригинальный GPS-приемник, транслируя поддельный GPS-сигнал.

I. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

Система, которая рассмотрена в данном исследовании, представляет собой комплексирование глушения и спуфинга GPS, в которой используется BladeRF X40. В некоторых из необходимых компонентов используется аппаратное и программное обеспечение. Данная система позволяет тестировать воздействия на DJI Phantom 3 Standard для анализа защищенности данных и уязвимости GPS. Устройство BladeRF X40 использует программное обеспечение GPS-SDR-SIM для генерации потока данных базового диапазона сигнала GPS, преобразуется в радиочастотный с помощью платформы SDR. Кроме того, BladeRF X40 использует GNU Radio Companion для обработки сигнала и при глушении сигнала. Обзор предлагаемой схемы системы представлен на рис. 1.

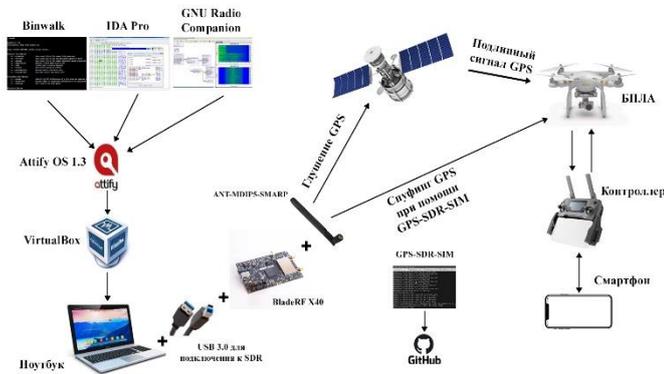


Рис. 1. Предлагаемая система.

На рис. 1 показано, что для построения системы будет использоваться операционная система Attify OS 1.3 на базе Ubuntu (Linux). Данная операционная система обладает большой гибкостью в использовании команд в терминале и имеет большое количество инструментов для проведения специфического тестирования на проникновение в раздел "Интернет вещей" (IoT). При глушении GPS предложенная схема требует наличия встроенного в операционную систему приложения GNU Radio Companion, а для подмены GPS система строится путем клонирования системы с Github.

а. Постановка помех GPS

Блок-схема постановки помех п на рис. 2.

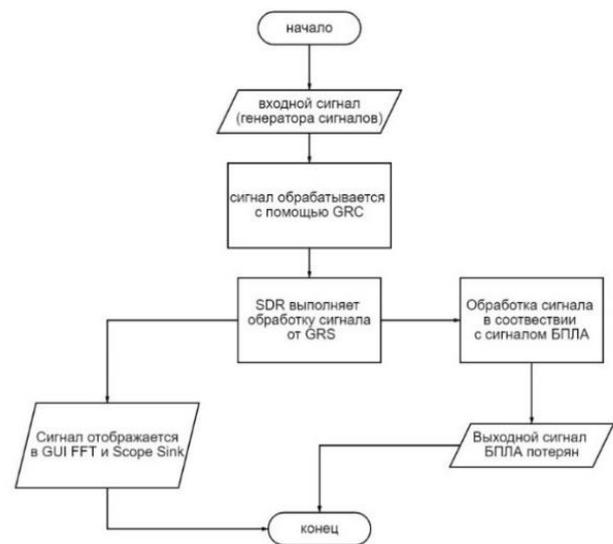


Рис. 2. Блок-схема постановки помех GPS

Первое, что необходимо сделать — это создать блок ввода волны сигнала из библиотеки приложений GNU Radio Companion. Генераторы сигналов имеют несколько входных сигнальных волн. В данном исследовании устройство BladeRF X40 будет использоваться как часть цифровой обработки сигнала, а WX GUI Scope Sink и FFT Sink - как вывода потока сигнальных волн. После выбора блока ввода сигнальной волны данные о сигнале поступают на устройство BladeRF X40. Оно передаст поддельный сигнал в GPS-навигатор дрона DJI Phantom 3 Standard. По результатам этой передачи GPS-сигнал дрона будет потерян а на выходе будут получены результаты отображения волны сигнала из WX GUI Scope Sink и WX GUI FFT Sink.

б. GPS-спуфинг

Блок-схема спуфинга GPS показана на рис. 3.

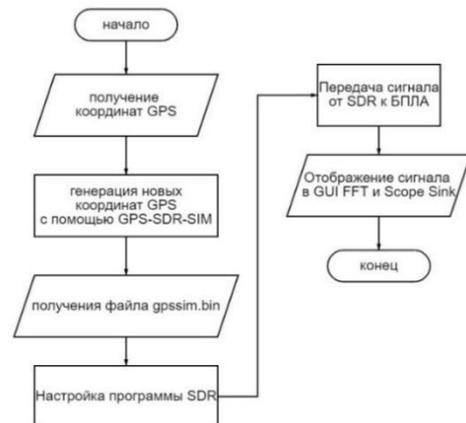


Рис. 3. Блок-схема GPS-спуфинга

Из рис. 3 видно, что сначала определяются ложные GPS-координаты через Google Maps. Эти координаты

являются исходными для ввода в приложение GPS-SDR-SIM. После их ввода GPS-SDR-SIM сформирует ложный сигнал и отправляет его на устройство BladeRF X40 для обработки. После чего результаты будут переданы на беспилотник DJI Phantom 3 Standard, чтобы он выдал на выходе изменение местоположения GPS-сигнала в приложении для дронов DJI GO. Система управления инструментами GPS-SDR-SIM осуществляется через командную строку в ОС Attify.

II. РЕАЛИЗАЦИЯ

Требования к аппаратному обеспечению для данного процесса реализации приведены в таблице I.

ТАБЛИЦА I. ТРЕБОВАНИЯ К ОБОРУДОВАНИЮ

Оборудование	Технические характеристики	Всего
1. Ноутбук	Операционная система Ubuntu (Attify OS 1.3)	1 шт.
2. SDR BladeRF X40	Тип: Small Rev. 2	1 шт.
3. Беспилотник	Бортовой контроллер 5,8 ГГц системы передачи данных для летательных аппаратов	1 шт.
4. пульт дистанционного управления	2,4 ГГц Wifi передача видеоданных	1 шт.
5. Смартфон	Приложение DJI поддерживает iOS 8.0 и Android 4.1.2 или более поздние версии	1 шт.

Требования к программному обеспечению для данного процесса реализации приведены в таблице II.

ТАБЛИЦА II. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

Программное обеспечение	Технические характеристики
1. Операционная система Attify OS (Ubuntu 14.04)	1.2
2. GNU Radio Companion	3.7.10
3. GPS-SDR-SIM	-
4. VirtualBox	6.0.18

а. Реализация GPS-помех

В GNU Radio Companion компоненты для построения блок-схемы используются из библиотеки GNU Radio Companion. Некоторые из них объединяются или соединяются в последовательность, которая используется в качестве GPS-помехи. В качестве входного сигнала выбирается источник шумовой волны в меню генераторов сигналов библиотеки GNU Radio Companion. После этого строим блоки, которые будут использоваться в виде Osmocom Sink, WX GUI Scope Sink, WX GUI FFT Sink. Osmocom Sink используется для обработки данных с помощью прибора BladeRF X40, а WX GUI Scope Sink и FFT Sink - для вывода осциллограмм. Перед запуском программы необходимо проверить наличие устройства BladeRF X40, подключенного к виртуальной машине (VirtualBox). Сначала вводим в командную строку "bladeRF-cli-i", затем "version". Это нужно для проверки успешной загрузки ПЛИС в программу bladeRF.

Запускаем полученную систему для того, чтобы начался процесс отправки цифровых сигналов на BladeRF X40, которые будут направлены на дрон DJI Phantom 3 Standard. Получаем результат, представленный на рис. 4.

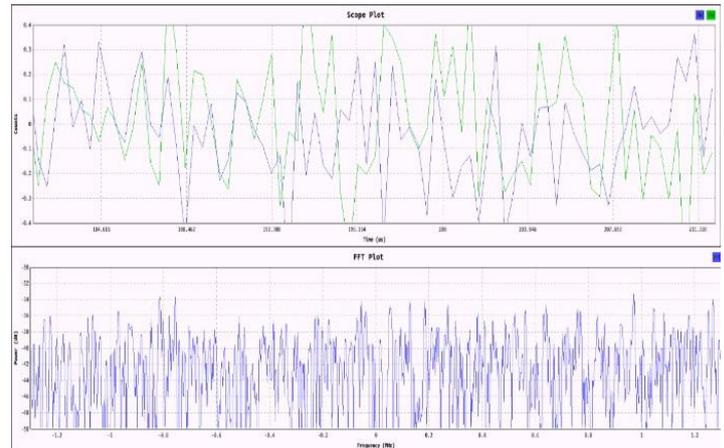


Рис. 4. Отображение системы постановки помехи

Из рис. 4 видно, что на графиках Scope Plot (вверху) и FFT Plot (внизу) помехи, передаваемые от устройства BladeRF X40, успешно выполнены. При выполнении этого глушения дрон пролетает расстояние всего в три метра, а GPS-помехи приводят к тому, что дрон DJI Phantom 3 Standard не может корректно обнаружить сигнал. При этом он продолжает нормально функционировать. Это связано с тем, что нарушается только GPS-сигнал дрона, так как частотный диапазон между GPS и БПЛА различен. Изображение, показывающее потерю положения GPS координат запущенного дрона, показано на рис. 5.

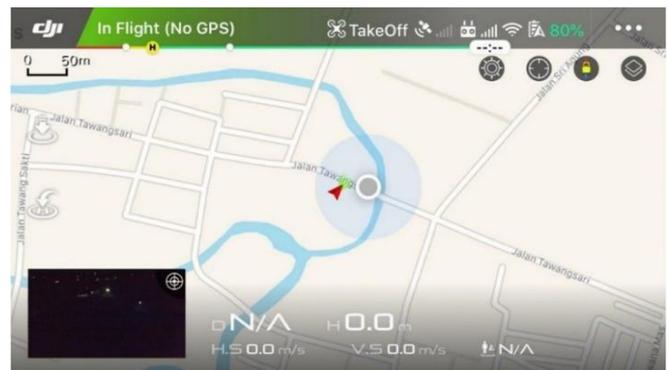


Рис. 5. Потеря GPS-координат и исходной точки дрона

б. Реализация GPS-спуфинга

Система GPS-SDR-SIM нужна для GPS-спуфинга. Убедившись, что устройство BladeRF X40 подключено к виртуальной машине, открываем терминал командной строки и входим в каталог GPS_spoofing, затем снова входим в gps-sdr-sim. Продолжаем совершать наше воздействие на беспилотник, для этого открываем окно сайта Google Maps и находим координаты позиции, которую необходимо подменить. Они используются в

качестве входного значения, которое будет скопировано еще раз для начальной конфигурации GPS-спуфинга. В данном исследовании на Google Maps взяты координаты в районе Соло Сити. После успешного копирования вставляем координаты копии в команду `"/gps-sdr-sim-ebrdc3540.14n-l-7.531252,110.759200,100"`. Приведенная здесь команда предназначена для создания неверных координат карты. На данном этапе в приложении GPS-SDR-SIM осуществляется процесс генерации ложных GPS-сигналов.

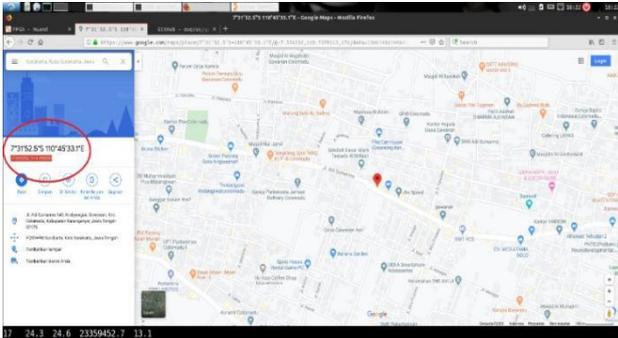


Рис. 6. Определение точек GPS-координат через Google Maps

Воздействие GPS-спуфинга приводит к тому, что маршрут полета беспилотника меняется, так как первоначальные координаты GPS были заменены на фальшивые. Создается впечатление, что беспилотник перелетел из начальной точки в ложную. Из рис. 7 видно, что беспилотник сместился на 79180 м. Он показывает свое «новое» местоположение в Соло. На рис. 7 в левом нижнем углу видно, что дрон летает только в тех местах, которые задаются пользователем.



Рис. 7. Поддельная точка полета беспилотника

III. РЕЗУЛЬТАТ И АНАЛИЗ

В данном разделе будут описаны результаты глушения с помощью GPS-помех и GPS-спуфинга. Исследования проводились в виде тестирования использования процессора, мощности GPS-волн, расстояния передачи и наличия спуфинг-воздействий. Ниже приведены результаты проведенных тестов.

A. Результаты тестирования использования

процессора

Результатом этого тестирования является процентное соотношение ресурсов процессора, используемых при обработке каждой сигнальной волны в приложении GNU Radio Companion. Была составлена сравнительная таблица различных видов волн, чтобы выяснить, насколько сильно каждая из них влияет на производительность процессора операционной системы Attify, это показано в табл. 3.

ТАБЛИЦА III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССОРА

Амплитуда	Использование процессора (%)				
	Косинус	Квадрат	Треугольник	Зуб пилы	Белый гауссовский шум
0,1	38,1	39,5	36,5	38,4	53,5
0,2	38,7	40,2	37,2	39,8	54,5
0,3	39,2	41,0	37,9	41,1	55,5
0,4	39,7	41,7	38,8	42,7	56,5
0,5	40,4	42,7	39,8	43,9	57,5

В табл. III приведено процентное соотношение ресурсов ЦП, используемых при обработке каждого сигнала в приложении GNU Radio Companion. Оно получено в результате тестирования загрузки ЦП в ОС Attify. Из него видно, что увеличение нагрузки процессора зависит от амплитуды и формы сигнала. Для косинусоидального сигнала наблюдается увеличение на 0,5–0,7% при каждом увеличении амплитуды на 0,1. Для сигнальных волн, такие как квадрат и треугольник увеличение составляет 0,7–1%, в то время как амплитуда сигнала зубчатая пила испытывает значительное увеличение и является неустойчивой. В то же время волна сигнала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) имеет стабильный рост с увеличением на 1% на каждое увеличение амплитуды.

Из результатов тестирования использования процессора можно сделать вывод, что наибольшее влияние на производительность работы процессора ноутбука оказывает волна сигнала "Белый гауссовский шум", возникающая на входе источника шума. В табл. III приведены результаты, согласно которым сигнальные волны белого гауссовского шума сильно влияют на работу процессора со средним значением 55%. Это больше, чем производительность ноутбука. Сигнальной волной, оказывающей наименьшее влияние на производительность ноутбука, является треугольная волна. Результаты тестирования показывают, что она требует от процессора в среднем 38% производительности.

B. Результаты тестирования мощности волн GPS

В этом тесте будут создаваться различные виды сигнальных волн, которые формируются с помощью блок-схем из приложения GNU Radio Companion. Блок переменного источника сигнала задает частоту

дискретизации, которая должна быть одинаковой для всех блок-схем. Источник сигнала регулируется на 2,6 млн выборок в секунду. Частота задается равной 1,57542 ГГц для GPS L1, а амплитуда будет приниматься другой со значением 0.1. Смещение равно 0 по умолчанию.

При тестировании всех сигнальной волн была составлена сравнительная таблица, которая измеряется по коэффициенту усиления мощности, формируемому на выходном дисплее БПФ поглощающей волны. Таблица результатов измерений для нескольких волн сигнала приведена в табл. 4.

ТАБЛИЦА IV. УСИЛЕНИЕ МОЩНОСТИ

Амплитуда	Усиление мощности (дБ)									
	Косинус		Квадрат		Треугольник		Зуб пилы		Аддитивный белый гауссовский шум	
0,1	-23	X	-26	X	-26	X	-26	X	-55	X
0,2	-18	X	-20	X	-20	X	-20	X	-50	X
0,3	-14	X	-16	✓	-16	X	-16	X	-45	✓
0,4	-11	X			-14	✓				
0,5	-9	✓								

В табл. IV приведены различные формы сигналов с различными амплитудами, прошедшие испытания. Галочка (✓) в таблице означает, что сигнал GPS был успешно прерван или заглушен, а знак креста (X) означает, что воздействие выполнить не удалось. Косинусоидальный сигнал способен заглушить GPS на дроне DJI Phantom 3 Standard только при увеличении мощности до -9 дБ. Квадратный сигнал и сигнал зуб пилы вызывают глушение при увеличении мощности до -16 дБ, а треугольные сигналы - при увеличении мощности до -14 дБ. Волны АБГШ-сигнала могут остановить работу GPS дрона при усилении мощности -45 дБ. Среди различных видов волн, требующих незначительного увеличения мощности для остановки GPS-сигнала, выделяются волны АБГШ.

При определении мощности, необходимой устройству BladeRF для создания эффективной сигнальной волны, необходимо выполнить пересчет мощности из дБм в милливатты по следующей формуле:

$$P(\text{мВт}) = 10^{\frac{P(\text{дБм})}{10}}, \quad (1)$$

Исходя из формулы (1), полученный результат равен сумме мощности передачи BladeRF X40 и коэффициента усиления мощности. Известно, что максимальная передаваемая мощность BladeRF X40 составляет 6 дБм, поэтому суммарную передаваемую мощность увеличит коэффициент усиления мощности, определяемый по различным источникам сигнала на основе табл. IV. Затем полученная сумма будет переведена из дБм в милливатты. Ниже приведен результат полученной таблицы преобразования.

ТАБЛИЦА V. СУММАРНАЯ МОЩНОСТЬ СИГНАЛА

Волна	TX Power BladeRF X40 (дБм)	Мощность волны Коэффициент усиления (дБ)	Суммарная мощность TX (дБм)	Суммарная мощность TX (мВт)
Косинус	6	-9	-3	0,5
Квадрат		-16	-10	0,1
Треугольник		-14	-8	0,16
Зуб пилы		-16	-10	0,1
АБГШ		-45	-39	0,000126

Из табл. V видно, что косинусоидальная сигнальная волна требует наибольшей мощности по сравнению с АБГШ. Мощность волны косинусоидального сигнала при передаче устройству BladeRF X40 составляет 0,5 мВт, а волны сигнала АБГШ - 0,000126 мВт.

C. Результаты тестирования расстояния передачи

Результатом этого тестирования является расстояние между устройством BladeRX X40 и беспилотным летательным аппаратом DJI Phantom 3 Standard. Таблица результатов измерения расстояния прибора BladeRF X40 до дрона DJI Phantom 3 Standard приведена в табл. VI. В ней показано, что тестировались различные формы сигнала с различными измерениями расстояния. Галочка (✓) в таблице означает, что сигнал GPS по-прежнему создает помехи при индикаторе сигнала GPS на приложении DJI GO от 0 до 5 общих спутников, а крестик (X) означает, что сигнал не создает помех при индикаторе от 5 до 9 спутников.

ТАБЛИЦА VI. ИНДИКАТОР СИГНАЛА

Расстояние (м)	Индикатор GPS-сигнала DJI GO									
	Косинус		Квадрат		Треугольник		Пилообразный сигнал		АБГШ	
1	0	✓	0	✓	0	✓	0	✓	0	✓
2	3	✓	0	✓	2	✓	0	✓	0	✓
3	4	✓	3	✓	3	✓	4	✓	0	✓
4	6	X	5	✓	5	✓	4	✓	0	✓
5	9	X	7	X	7	X	7	X	0	✓

В табл. VI показано, что косинусоидальная форма сигнала не способна помешать на расстоянии 4 м при координатах GPS-сигнала 6 спутников на приложении DJI GO. Квадратная форма сигнала не может помешать на расстоянии 5 метров с координатами GPS сигнала 8. Треугольная форма сигнала не может помешать на расстоянии 5 метров с координатами GPS сигнала 7. Пилообразная форма сигнала не может помешать на расстоянии 5 метров с координатами GPS сигнала 7. Затем последняя АБГШ форма сигнала все еще способна помешать на расстоянии до 5 с результатами, когда координаты спутников оказываются отсутствующими или 0.

По результатам тестирования передачи на расстояние нескольких волн GPS можно проанализировать, что сигнал АБГШ имеет большую помехозащищенность по сравнению с другими. Об этом свидетельствует расстояние, пройденное сильной и дальней АБГШ-волной, так что она все равно создает сигнал помехи для GPS с индикатором 0. Это означает, что она мешает GPS-сигналу. Также к сигнальным волнам, которые считаются слабыми и не способными к дальнейшему глушению, относятся косинусоидальные волны. Известно, что на расстоянии 4 м косинусоидальная волна уже не способна создавать помехи, в то время как другие волны в среднем не создают помехи на расстоянии 5 м.

D. Результаты тестирования на спуфинг GPS

Перед выполнением GPS-подмены необходимо подтвердить начальное положение GPS-координат с помощью смартфона. Результирующее изображение, полученное на основе исходных GPS-координат и местоположения, представлено на рис. 8.



Рис. 8. Исходные координаты GPS-теста

Испытания проводятся в помещении и на открытом воздухе следующим образом:

а. Испытания в помещении

В результате теста в помещении на экране приложения GPS Test отображается фальшивый GPS, как показано на рис. 9.



Рис. 9. Ложные координаты GPS-теста (в помещении)

Судя по приведенному выше изображению приложения GPS Test, GPS-спуфинг успешно осуществлен. На изображении GPS Test слева видно, что обнаружены некоторые сигналы от спутников с хорошим соотношением сигнал/шум (ОСШ). На изображении

справа показаны координаты, соответствующие позициям, смоделированным с помощью прибора BladeRF X40. Неправильное местоположение показано широтой и долготой, а также красной меткой на карте.

б. Испытания на открытом воздухе

На основе теста на открытом воздухе в приложении GPS Test создается фальшивый GPS-дисплей, как показано на рис. 10.

При размещении в помещении изменение GPS-положения дрона происходит быстрее и не занимает много времени. Это связано с тем, что сигнал GPS в помещении не подвержен прямому влиянию исходного сигнала GPS снаружи.



Рис. 10. Ложные координаты при GPS-тестировании (вне помещения)

Судя по рис. 10, воздействие с подменой GPS была проведена успешно. При размещении смартфона на открытом воздухе GPS теряет свое местоположение на 3 минуты из-за влияния ложной GPS-воздействия, передаваемого устройством BladeRF X40. Из изображения GPS Test видно, что на изображении слева значение SNR указывает на хорошие условия, а на изображении справа показаны GPS-координаты в соответствии с конфигурацией устройства BladeRF X40.

По результатам тестирования приложения GPS Test, проведенного в помещении и на улице, можно сделать вывод, что отличие заключается во времени от GPS-сигнала, который начинает пропадать, когда инструмент GPS-SDR-SIM передает поддельный GPS-сигнал через устройство BladeRF X40. Это объясняется тем, что при реализации воздействий на открытом воздухе точность определения GPS-положения каждого приложения от непосредственного реального спутника увеличивается, что приводит к большому времени передачи сигнала. Хотя в разных местах воздействие на подмену GPS-сигнала все равно может быть выполнена.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в ходе исследования, показывают, что БПЛА имеют уязвимые места в системе GPS-связи, так как они подвержены воздействиям GPS-помех и GPS-спуфинга. Воздействие GPS-помех с использованием АБГШ-волн позволила предотвратить

отслеживание приемником реального GPS-сигнала. Воздействия на спуфинг GPS, проводимые как на открытом воздухе, так и в помещении, успешно подделывают GPS-сигнал под сигнал приемника. Эффективность воздействия GPS-помех может быть подтверждена использованием волн GPS, которые дают наилучший эффект помех - волн АБГШ от источника шума. При использовании этой формы волны эффективность использования процессора выше и составляет 57,5% при значении амплитуды 0,5. Мощность результирующей волны меньше - 0,000126 мВт или эквивалентна -39 дБм, но при этом она имеет большую силу шумовой волны и большую дальность передачи помех, которая составляет до 5. Кроме того доказано, что для глушения с подменой GPS размещение в помещении не занимает много времени и быстрее изменяет GPS-положение дрона. Это объясняется тем, что сигнал GPS в помещении не подвержен прямому влиянию исходного сигнала GPS снаружи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] И. Коломина и П. Молина, "Беспилотные авиационные системы для фотограмметрии и дистанционного зондирования: A review," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 92, pp. 79-97, 2014, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- [2] H. Shin, K. Choi, Y. Park, J. Choi, and Y. Kim, "Security Analysis of FHSS-type Drone Controller," *Springer Int. Publ. Switz.*, vol. 1, no. 2, pp. 240-253, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-31875-2.
- [3] J. Валенте и А. А. Карденас, "Понимание угроз безопасности в потребительских дронах через призму семейства квадрокоптеров Discovery", no. Ii, pp. 31-36, 2017.
- [4] L. K. C. G и R. R. Murphy, "Обзор уязвимостей кибербезопасности для беспилотных летательных аппаратов", с. 0-5, 2017.
- [5] V. Dey, V. Pudi, A. Chattopadhyay, Y. Elovici, "Security Vulnerabilities of Unmanned Aerial Vehicles and Countermeasures: An Experimental Study," *Proc. IEEE Int. Conf. VLSI Des.*, vol. 2018- Janua, pp. 398-403, 2018, doi: 10.1109/VLSID.2018.97.
- [6] К. Парлин, М. М. Алам и Й. Ле Муллек, "Постановка помех системам дистанционного управления БПЛА с помощью программно-определяемого радио", *2018 Int. Conf. Mil. Commun. Inf. Syst. ICMCIS 2018*, no. May, pp. 1-6, 2018, doi: 10.1109/ICMCIS.2018.8398711.
- [7] A. F. Van Niekerk и L. Combrinck, "Использование военными GPS-приемников гражданского типа и их уязвимость к помехам", *S. Afr. J. Sci.*, vol. 108, no. 5-6, pp. 4-7, 2012, doi: 10.4102/sajs.v108i5/6.749.
- [8] J. R. Van Der Merwe, X. Zubizarreta, I. Lukčín, A. Rügamer, and W. Felber, "Classification of Spoofing Attack Types", *2018 Eur. Navig. Conf. ENC 2018*, no. July, pp. 91-99, 2018, doi: 10.1109/EURONAV.2018.8433227.
- [9] Е. Хортон и П. Ранганатан, "Разработка устройства GPS-спуфинга для атаки на квадрокоптер DJI Matrice 100", *J. Glob. Position. Syst.*, vol. 16, no. 1, 2018, doi: 10.1186/s41445-018-0018-3.
- [10] D. Silva, "GPS Jamming and Spoofing Using Software Defined Radio", no. October. p. 92, 2017.
- [11] DJI, "Руководство пользователя DJI Phantom 3", с. 55, 2015.
- [12] F. Трухано, Б. Чан, Г. Бимс и Р. Ривера, "Анализ безопасности DJI Phantom 3 Standard", с. 1-11, 2016.
- [13] N. Akadejdechapanich, S. Iwanicki, M. Li, K. Piette, and J. Rogers, "Aerial Software Defined Radio", 2016.
- [14] D. Sinha, A. K. Verma, and S. Kumar, "Software defined radio: Эксплуатация, проблемы и возможные решения", *Proc. 10th Int. Conf. Intell. Syst. Control. ISCO 2016*, no. November, 2016, doi: 10.1109/ISCO.2016.7727079.
- [15] R. Akeela и B. Dezfouli, "Программно-определяемые радиостанции: Архитектура, современное состояние и проблемы", *Comput. Commun.*, vol. 128, no. April, pp. 106-125, 2018, doi: 10.1016/j.comcom.2018.07.012.
- [16] Л. Чжан, "Реализация беспроводной связи на основе программно-определяемого радио", 2013.
- [17] S. Sriram, G. Srivasta, G. R, and S. K P, "Plug-ins for GNU Radio Companion," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 52, no. 16, pp. 11-16, 2012, doi: 10.5120/8285-1678.
- [18] H. Sujadi, I. Sopiandi, and A. Mutaqin, "Sistem Pengolahan Suara Menggunakan Algoritma FFT (Fast Fourier Transform)", *Sintak*, pp. 101-107, 2017.
- [19] T. Ebinuma, "GitHub - osqzss/gps-sdr-sim: Software-Defined GPS Signal Simulator.
- [20] Jabang Aru Saputro, Esa Egistian Hartadi, Mohamad Syahrul «Implementation of GPS Attacks on DJI Phantom 3 Standard Drone as a Security Vulnerability Test», 2020 1st International Conference on Information Technology, Advanced Mechanical and Electrical Engineering (ICITAMEE)

GPS EFFECTS ON THE DJI PHANTOM 3 DRONE. VULNERABILITY OF ITS SECURITY SYSTEM

Panov E.A.

Institute of Radio Electronics and Computer Science

Department of Radio Electronic Systems and
Complexes

RTU MIREA

Moscow, Russia

super-mehan@mail.ru

Klopova A.P.

Institute of Radio Electronics and Computer Science

Department of Radio Electronic Systems and
Complexes

RTU MIREA

Moscow, Russia

nastyk.0908@gmail.com

Abstract — Impact on an unmanned aerial vehicle (UAV) is a method used to stop or impede the operation of a UAV system. It can be used to identify vulnerabilities in the UAV security system. The DJI Phantom 3 Standard UAV is a quadcopter with Wi-Fi support. In this study, the DJI Phantom 3 Standard navigation system was affected by GPS jamming and GPS spoofing. The purpose of this work is to determine and analyze the degree of vulnerability of the GPS of the DJI Phantom 3 Standard commercial drone. The GNU Radio Companion (GRC) application is used to jam the signals. GPS-SDR-SIM tools are used to work with GPS substitution. The bladeRF X40 software-defined radio (SDR) is used as the main device. The results of this study showed that the use of GPS interference and GPS spoofing can disrupt the operation of UAVs.

Keywords — UAV, GPS jamming, GPS substitution, vulnerability, drone.

УДК 621.391

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ДЕМОДУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПРИЁМА MSK СИГНАЛА С РАЗЛИЧНЫМИ СКОРОСТЯМИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Григорян М.А.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
mgrigoryan00@mail.ru

Пыхтина И.Ю.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
pyhtina@mirea.ru

Осипова В.О.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
osipova@mirea.ru

Аннотация — В этой статье рассматривается особенность сигналов с MSK модуляцией, которая заключается в возможности представления сигнала как частотно-манипулированного, так и частного вида квадратурного фазоманипулированного. Затем рассмотрены структурные схемы приемника с использованием пяти методов демодуляции: квадратурный, демодуляции, модифицированное кольцо Костаса, кольцо Костаса для бинарного ФМ, кольцо Костаса для квадратурного ФМ. В заключении, проведён анализ этих пяти методов, по которому выделили их достоинства и недостатки.

Ключевые слова — модуляция, демодуляция, приемное устройство, MSK сигнал, кольцо Костаса.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с бурным развитием в последние десятилетия новейших технологий микроэлектроники, создаются сложные высокоэффективные космические системы наблюдения и дистанционного зондирования Земли, которые приобретают всё большее значение во всех отраслях науки и техники. С помощью спутниковых систем удалось определить точную форму Земли и поверхности океанов, измерить расстояния между континентами и величину их дрейфа. Обнаружены также и совершенно новые свойства земного шара, скрытые от наземного наблюдателя.

Ввиду высокой стоимости и сложности эксплуатации к космическим системам наблюдения Земли предъявляются следующие требования: большой объём передаваемой информации, оперативность трансляции и высокая достоверность получаемой информации, надёжность, помехозащищённость и «живучесть». Наиболее уязвимыми являются земные станции, которые могут выйти из строя из-за технической неисправности, аварии или по другим причинам. Для повышения надёжности целесообразно использовать малогабаритные стационарные и перебазлируемые станции приема

информации. Они позволят увеличить число одновременно работающих КА и сохранить эффективность системы в целом [1].

Основной задачей приемного устройства является выделение передаваемого сообщения из принятого сигнала $u(t)$. В общем случае это достигается выполнением операций демодуляции и декодирования. Операция демодуляции заключается в преобразовании принятого модулированного сигнала, искаженного помехами, в модулирующий сигнал.

Приемное устройство должно обеспечивать посимвольное различение двух сигналов на фоне шумовой помехи (пассивной и активной). Оптимальное решение задачи требует выбора критерия различения и метода обработки сигнала (с учетом аппаратной реализации), удовлетворяющего требованиям этого критерия наилучшим образом.

Согласно теории статистических решений оптимальная решающая схема должна обеспечивать минимум среднего риска при решении задачи различения. В этом случае при шумовой помехе критерий минимума среднего риска сводится к критерию идеального наблюдателя, который гласит, что принимается решение о значении того сигнала, для которого апостериорная вероятность имеет максимальную величину.

Частотно-манипулированным сигналам с непрерывной фазой (ЧМн сигнал) свойственна межсимвольная фазовая связь, которая может быть использована для повышения помехоустойчивости приема сигналов. Для этого необходимо осуществить анализ нескольких следующих подряд информационных символов, после чего принять решение о значении одного из этих символов.

III. ОСОБЕННОСТЬ MSK СИГНАЛА

На основании критерия идеального наблюдателя принцип работы приемного устройства реализуется следующим образом. Выполняется когерентное выделение

последовательности из n символов за время nT , где T - длительность единичного символа, и производится усреднение по всем возможным символам, передаваемым в интервале $T < t < nT$. Окончательное решение принимается о значении первого принимаемого символа. Опорные сигналы, необходимые для реализации такого метода приема, соответствуют всем возможным комбинациям символов ЧМн сигнала в интервале времени, занимаемом информационной последовательностью, принимаемой "в целом". Максимальное значение n , должно быть равно длине интервала межсимвольной фазовой связи. Для сигналов с MSK модуляцией интервал межсимвольной фазовой связи равен длительности двух единичных символов. Поэтому выбирать $n > 2$ нецелесообразно. Для $n = 2$ выражение, описывающее вероятность ошибки, имеет следующий вид [2]:

$$P = \frac{1 - \Phi(\sqrt{2}h)}{2} \quad (1)$$

где $\Phi(\cdot)$ - интеграл вероятности;

h_2 - отношение энергии единичного символа к спектральной плотности мощности шума на входе демодулятора.

В радиосистемах с напряженным энергетическим потенциалом целесообразно использовать когерентные методы приема. При предъявлении менее жестких требований к помехоустойчивости можно использовать более простые неоптимальные некогерентные методы.

Структура когерентного приемника зависит от используемого в радиосистеме сигнала, но в общем случае ее можно разбить на демодулятор, осуществляющий непосредственно прием радиосигнала, и систему синхронизации, формирующую опорные синхросигналы (рис. 1).

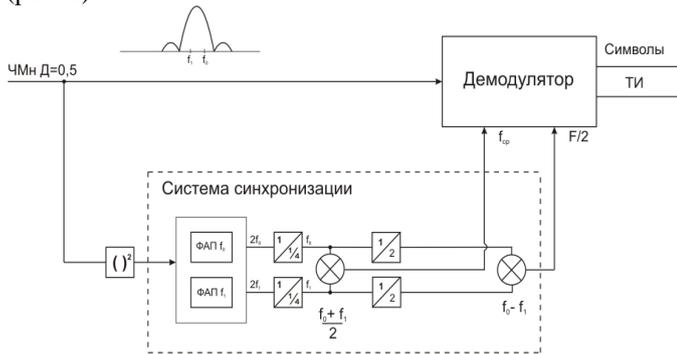


Рис. 1. Структурная схема когерентного приемника

В ряде случаев демодулятор и система синхронизации могут элементарно перекрываться. Таким образом, когерентные методы приема можно подразделять на классы, отличающиеся по структуре демодулятора и по структуре системы синхронизации. При этом в иерархической лестнице демодулятор стоит выше. Сначала выбирается тип демодулятора, а затем определяется структура системы синхронизации [3].

Особенностью MSK сигнала является его двойственная природа, заключающаяся в возможности представления сигнала как ЧМн, так и частного вида квадратурного

фазоманипулированного (ФМн). Последний метод приема является более помехоустойчивым, что указывает на его приоритет в практическом использовании.

Из непосредственного представления MSK сигнала как ФМн сигнал следует, что демодуляцию принимаемого сигнала целесообразно осуществлять квадратурным методом. Этот метод заключается в осуществлении демодуляции двух ортогональных составляющих сигнала и принятии решения о передаваемой информации относительным декодированием. При этом метод демодуляции практически остается неизменным для всех квадратурных методов приема MSK сигнала, а различие заключается в структуре систем синхронизации [4]. Рассмотрим некоторые из них.

IV. ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ДЕМОДУЛЯТОРОВ

A. Метод квадрирования

Наиболее "прозрачная" структура системы синхронизации описана в работе Де Бюде. В этом приемном устройстве (рис. 2.) осуществляется формирование опорных сигналов квадратурных составляющих MSK сигнала, а демодуляция этих составляющих выполняется по оптимальной схеме Котельникова.

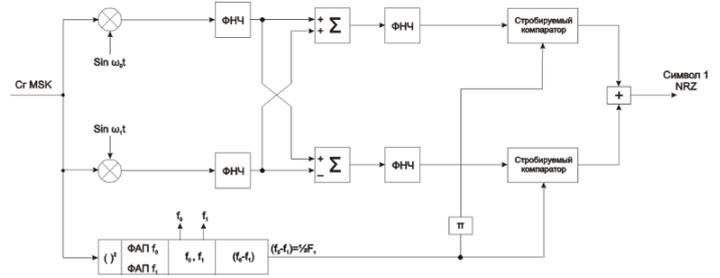


Рис. 2. Структурная схема приемника с квадратором

При формировании опорных сигналов используется свойство наличия монохроматических компонент в спектре удвоенного по частоте ЧМн-сигнала (рис. 3 и 4).

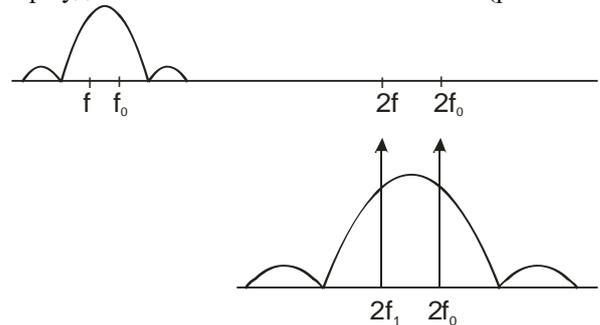


Рис. 3. Спектр MSK-сигнала на двойной частоте

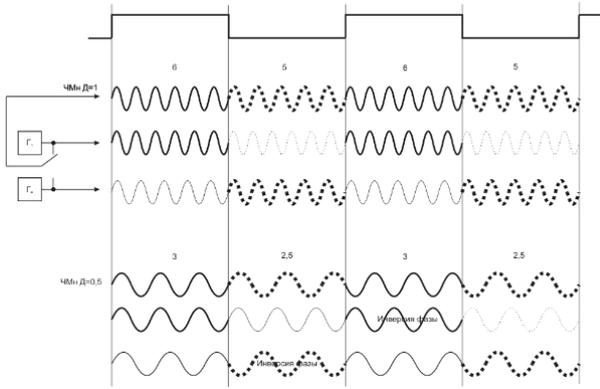


Рис. 4. Принцип формирования ЧМн с $m_f = 0.5$

Опорные сигналы квадратурных составляющих формируются синфазным и противофазным сложением выделенных монохроматических компонент, расположенных на символьных частотах. Получение MSK сигнала на удвоенной частоте (индекс манипуляции равен 1,0) может быть осуществлено с помощью удвоителя частоты. Однако недостатком такого способа является его нелинейность, что приводит к наличию порогового эффекта в зависимости качества выделения опорных сигналов от входного отношения сигнал/шум.

В. Метод ремодуляции

Другим методом формирования сигнала может служить метод ремодуляции, заключающийся в формировании с помощью демодулированной информации сигнала, подобного входному ЧМн-сигналу с индексом манипуляции 0,5. Такой способ близок к методу "с обратной связью по решению". Сущность метода ремодуляции заключается в том, что с помощью управляемого по частоте генератора формируются опорные квадратурные сигналы для демодуляции ЧМн-сигнала. Далее, используя эти сигналы, осуществляется демодуляция принимаемого сигнала. Модулируя демодулированными квадратурными составляющими опорные сигналы, формируется восстановленный ЧМн-сигнал, который сравнивается на фазовом детекторе с задержанным входным MSK сигналом (рис. 5).

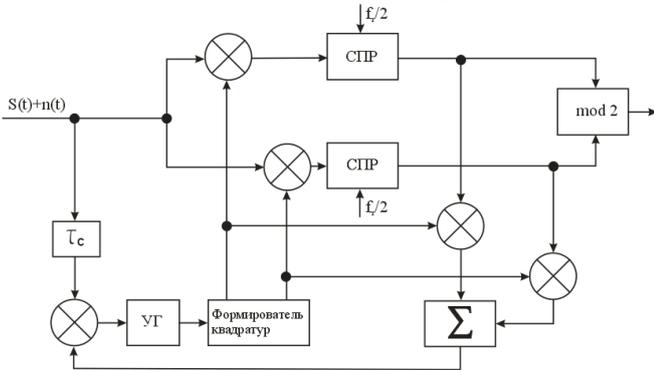


Рис. 5. Метод ремодуляции

Задержка необходима для её же компенсации, возникающей при принятии решения в демодуляторе.

Сигнал, пропорциональный расфазировке между задержанным входным и восстановленным (ремодулированным) ЧМн-сигналами, используется для управления генератора по частоте. При анализе описанной системы авторегулирования несложно заметить, что в данной системе существуют две устойчивые точки: синфазность входного и ремодулированного сигналов и их противофазность. Эта неоднозначность приводит к эффекту «обратной работы», который устраняется относительным декодированием принятой информации.

Преимущества метода ремодуляции перед методом квадрирования (умножения частоты входного сигнала на два) заключается в низком пороге системы синхронизации и в возможности принимать ЧМн-сигнал с длинными последовательностями одноименных символов (при большом времени памяти автономной системы тактовой синхронизации). Недостатками описанного метода являются его сложность, большое время вхождения в синхронизм и большая критичность к неидеальности схемных элементов.

С. Модифицированное кольцо Костаса.

Наиболее интересным и привлекательным методом приема MSK сигнала является квадратурный метод с реализацией системы синхронизации с помощью модифицированного кольца Костаса (рис. 6).

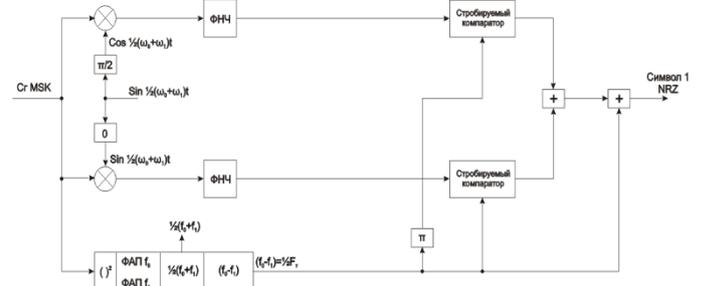


Рис. 6. Система модифицированного кольца Костаса

В этом случае радиочастотные фазовые детекторы кольца Костаса, выполняющего функции синхронизации по радиочастоте, используются и для демодуляции квадратурных составляющих. Тем самым уменьшается аппаратный объем приемного устройства. В качестве опорного сигнала для демодулятора используется монохроматическая составляющая с частотой, равной средней частоте принимаемого MSK сигнала. Квадратурные каналы формируются посредством применения квадратурных опорных сигналов, т. е. монохроматических сигналов, сдвинутых на 90°. Слежение за средней частотой MSK сигнала, отсутствующей в энергетическом спектре этого сигнала, осуществляется с помощью кольца Костаса, предназначенного для слежения за подавленной несущей.

Д. Кольцо Костаса для бинарного ФМ

Другой более простой способ формирования опорного сигнала заключается в формировании монохроматического сигнала не на средней частоте ЧМн-сигнала, а на одной из

его символьных частот. В этом случае блок-схема устройства изображена на рис. 7.

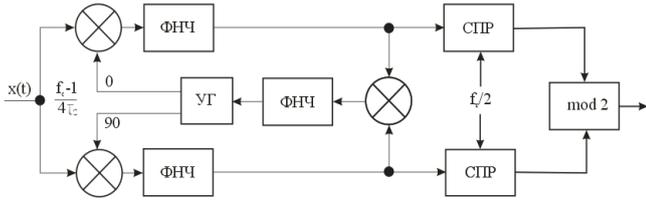


Рис. 7. Система Костаса для приема ЧМн-сигнала по символьной частоте

Е. Кольцо Костаса для квадратурного ФМ

Еще одним из устройств, предназначенных для выделения опорного сигнала из ЧМн-сигнала с индексом манипуляции 0,5, является кольцо Костаса, используемое для слежения за квадратурным фазоманипулированным сигналом. Пригодность такого устройства для работы с MSK-сигналом объясняется тем, что MSK-сигнал является частным видом квадратурного фазоманипулированного сигнала. Блок-схема такого устройства изображена на рис. 8.

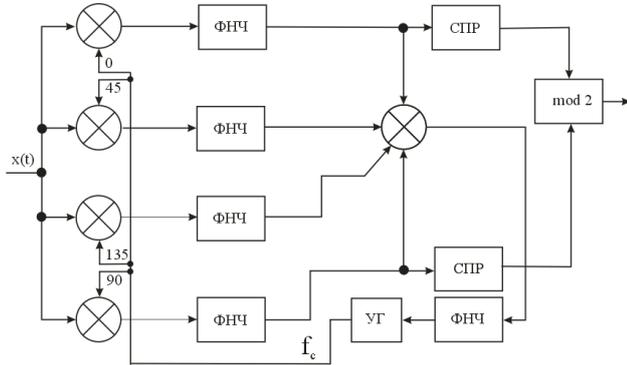


Рис. 8. Кольцо Костаса, используемое для слежения за квадратурным фазоманипулированным сигналом

V. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ

Произведем сравнение различных методов демодуляции.

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ДЕМОДУЛЯЦИИ

Метод демодуляции	Достоинства	Недостатки
С квадратором	Высокое быстродействие Малое время вхождения в связь Простота настройки	Большой аппаратный объем Жесткие ограничения к длине последовательности подряд следующих одноименных символов
С ремодуляцией	Менее жесткие ограничения к длине последовательности	Большой аппаратный объем

	подряд следующих одноименных символов	Большое время вхождения в связь Высокая критичность характеристик к неидеальности элементов Сложность настройки
Кольцо Костаса для бинарного ФМ	Малый аппаратный объем Малое время вхождения в связь Демодулятор и система синхронизации имеют общие элементы В кольце не используется сигнал тактовой частоты	Низкое быстродействие из-за необходимости формирования сдвига сигнала на 90° Относительно высокая критичность к фазовой ошибке формирования опорного сигнала
Кольцо Костаса для квадратурного ФМ	Малое время вхождения в связь Демодулятор и система синхронизации имеют общие элементы В кольце не используется сигнал тактовой частоты	Большой аппаратный объем Низкое быстродействие из-за необходимости формирования сдвига сигнала на 90° Критичность характеристик к неидеальности элементов (сдвига фазы)
Модифицированное кольцо Костаса	Среднее время вхождения в связь Малый аппаратный объем Демодулятор и система синхронизации имеют общие элементы	Низкое быстродействие из-за необходимости формирования сдвига сигнала на 90° В кольце необходимо использовать сигнал тактовой частоты

Таким образом, анализ позволяет сделать вывод о целесообразности использования для приема MSK сигнала со средними и низкими скоростями передачи информации квадратурного приемного устройства, основанного на модифицированном кольце Костаса. Для приема частотно-манипулированного сигнала с большими скоростями передачи информации имеет смысл применять демодулятор Де Буды с квадратором в системе синхронизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Крохин В.В. Информационно-управляющие космические радиолнии./В 2-х частях/ Москва - 1993.
- [2] Линдсей, В. Системы синхронизации в связи и управлении : пер. с англ. / В. Линдсей . – М. : Советское радио, 1978 . – 600 с.
- [3] Бардин В. М., Брагин А. В. Устройства приема и обработки сигналов. Детектирование радиосигналов: Метод. указания /:- Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2012. – 20 с.
- [4] Нефедов, В. И. Основы радиоэлектроники : учебник для студентов вузов, обучающихся по радиотехническим специальностям / В. И. Нефедов ; М-во образования и науки РФ. - М. : Высшая школа, 2000. - 399 с

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION AND FEATURES OF DEMODULATORS FOR RECEIVING MSK SIGNAL WITH DIFFERENT INFORMATION TRANSFER RATES

Grigoryan M.A.
Chair of Telecommunications,
Institute of Radio
Electronics and Computer Science
RTU MIREA
Moscow, Russia
mgrigoryan00@mail.ru

Pykhtina I.Y.
Chair of Telecommunications,
Institute of Radio
Electronics and Computer Science
RTU MIREA
Moscow, Russia
pyhtina@mirea.ru

Osipova V.O.
Chair of Telecommunications,
Institute of Radio
Electronics and Computer Science
RTU MIREA
Moscow, Russia
osipova@mirea.ru

Abstract – This article discusses the peculiarity of signals with MSK modulation, which consists in the possibility of representing a signal both frequency-manipulated and a particular type of quadrature phase-manipulated. Then the structural schemes of the receiver are considered using five demodulation methods: framing, remodulation, modified Costas ring, Costas ring for binary FM, Costas ring for quadrature FM. In conclusion, an analysis of these five methods was carried out, according to which their advantages and disadvantages were highlighted.

Keywords – modulation, demodulation, receiver, MSK signal, Costas ring.

УДК 550.388.2

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДИОСВЯЗИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И НАЗЕМНЫХ РАДИОСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ

Чмеренко М.А.

Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра радиозлектронных систем
и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
alderand23@yandex.ru

Чистяков Е. А.

Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра радиозлектронных
систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
chistyakov@mirea.ru

Лукьянова Е.Г.

Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра радиозлектронных
систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
lenalukanova0159@gmail.com

Аннотация — Функционирование современных линий радиосвязи в интересах как для связи с космическими аппаратами (КА), так и наземных радиозлектронных средств, подвержено воздействию ряда свойств ионосферы Земли. Ионосфера представляет собой слой атмосферы, с повышенной концентрацией ионов и свободных электронов, которые взаимодействуют с электромагнитным полем, влияя на направление его распространения, плотность потока и др. свойства, что сказывается на устойчивости радиосвязи, как вблизи поверхности Земли, так и в околоземном космическом пространстве. В статье рассматривается влияние ионосферы на работу радиозлектронных средств (РЭС) КА. Проводится анализ отдельных свойств ионосферы Земли, показаны дневные и ночные ионограммы, полученные с помощью ионосферных зондов, оценено влияние радиочастотных (РЧ) помех и показано влияние ионосферы на функционирование РЭС КА в зависимости от времени суток, солнечной активности и сезона года.

Ключевые слова — геомагнитное поле, диапазон частот, ионосфера, ионосферное отражение, электронная плотность, зондирование ионосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера, как слой атмосферы Земли, представляет собой динамично функционирующую сложную систему, на которую оказывает влияние множество факторов, начиная от солнечного излучения, межпланетных магнитных полей, геомагнитного поля и последствий антропогенной деятельности. Этот уникальный пласт газов и ионов, расположенный на высотах от 50 до 600 километров и более, обладает способностью изменять свой состав и свойства в зависимости от проявления солнечно-земных взаимодействий, положения земли в пространстве, времени суток, сезонов года и процессов на поверхности земли, обусловленных антропогенной деятельностью. Воздействие ионосферы на электромагнитные сигналы, используемые как для связи

с КА, так и между наземными объектами, характеризуется сложными физическими процессами, анализ которых представлен в настоящей статье.

I. СТРУКТУРА ИОНОСФЕРЫ

Ионизированная атмосфера Земли условно состоит из ряда перекрывающихся слоёв, каждый из которых характеризуется не только газовым составом и плотностью, но и величиной электронной концентрации, постепенно меняющейся в широком диапазоне значений (от 0 до 10^7 и выше см^{-3}). Общий профиль ионизации с условно принятыми слоями показан на рисунке 1.



Рис. 1. Общий профиль ионизации с ионосферными слоями.

Показанный на рисунке 1 профиль действителен преимущественно для средних широт. В экваториальной области профиль искажается геомагнитным полем Земли и крупными магнитными аномалиями, в частности, Бразильской. В полярной области ионосферный профиль ионизацией искажается повышенной напряженностью геомагнитного поля на более низких высотах. Следует отметить, что обозначенная на рисунке 1 область D проявляется в основном только в светлое время суток в

спокойной геомагнитной обстановке. Однако в условиях повышенной геомагнитной возмущенности, значимая электронная концентрация, соответствующая по высоте слою D, может проявляться и в не освещенной стороне Земли (дневное время). Максимальная плотность концентрации ионов и электронов обычно характеризуется высотой от 200 до 400 км – слой F, но в периоды повышенной солнечной активности (выбросы солнечной плазмы, излучение повышенной энергетичности, например, рентгеновское) может опускаться до 100 км и ниже. Максимум электронной плотности в области E приходится на высоту в 80 - 100 км. Однако во время вечернего терминатора электронная плотность соответствующая условно областям E и F, может оказаться существенно ниже чем показано на рисунке 1. Кроме того процессы меридионального и широтного переноса ионосферной плазмы, обусловленные движением заряженных частиц вдоль силовых линий геомагнитного поля, а также возмущения геомагнитного поля в моменты пересечения Землей секторных границ межпланетного магнитного поля (двух- и четырехсекторного в зависимости от фазы 11-летнего периода солнечной активности) существенным образом усложняют процесс прогноза состояния ионосферы и, как следствие, возможности учета ее влияния на обеспечения качества радиосвязи как в приповерхностной зоне Земли, так и на высотах орбит космических аппаратов.

Верхняя ионосфера — это часть ионосферы над максимумом области F. В простой модели ионосферы плотность верхней части ионосферы экспоненциально уменьшается с ростом высоты до тех пор, пока плотность ионизации не станет меньше уровня, который мы можем обнаружить. В ионосфере средних и низких широт геомагнитное поле задерживает ионы, особенно ионы водорода, которые в противном случае улетели бы в космос. Таким образом, между 800 и 2000 км высота шкалы постепенно увеличивается до значения, примерно равного одному радиусу Земли. Если проследовать вдоль линии геомагнитного поля до экваториальной плоскости и обратно в сопряженную ионосферу, то изменение плотности будет незначительным. Изображение верхней части ионосферы и плазмосферы показано на рисунке 2.

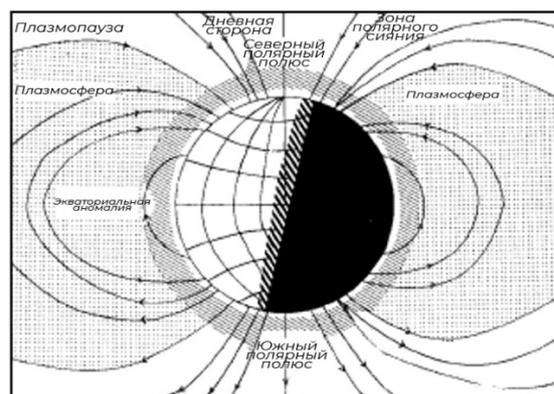


Рис. 2. Представление о ионосфере и плазмасфере
II. ИОНОЗОНД

С середины прошлого века зондирование ионосферы ионосферными зондами или ионозондами было важнейшим методом, разработанным для исследования глобальной структуры ионосферы, изменений ее суточных, сезонных и солнечных циклов, а также ее реакции на солнечные возмущения. Даже появление чрезвычайно мощной радиолокационной техники некогерентного рассеяния, которая позволяет измерять полный профиль электронной плотности, температуру электронов и ионов, а также движение ионосферы, не сделало относительно недорогой и универсальный ионозонд устаревшим. Напротив, современные методы комплексных измерений параметров ионосферы и обработки данных привели к возрождению интереса к зондированию ионосферы как к фундаментальному исследовательскому инструменту [2].

III. ИОНОГРАММА

Ионосферные зонды или ионозонды представляют собой наземные ВЧ-радары, которые регистрируют время распространения, излучаемого ВЧ-сигнала до высоты его отражения и обратно, как меру высоты его ионосферного отражения. Поскольку высота отражения радиосигнала зависит его частоты и плотности электронной концентрации, то посредством изменения частоты излучения, обычно от 0,5 до 20 МГц, ионозонд измеряет высоту ионосферного отражения как функцию частоты. Запись измерения высоты отражения в зависимости от частоты называется ионограммой. Ионограммы можно использовать для определения распределения электронной плотности в зависимости от высоты $N_e(h)$ от высоты, которая соответствует примерно нижней части слоя E, до, как правило, пика слоя F2, за исключением условий распространения F слоя или условий, когда основная ионизация не позволяет измерить пиковую плотность слоя F2. Говоря более конкретно, ионозонды можно использовать для определения условий распространения ВЧ связи.

Две типичные ионограммы, полученные стандартным аналого-ионосферным зондом [1], показан на рисунке 2. В демонстрируемом опыте диапазон частот составляет от 0,25 до 20 МГц (горизонтальная

ось), а отображаемый диапазон высот составляет 600 км с интервалами 100 км. Нижняя ионограмма типична для дневного времени. На ней видны следы отражений от слоев E, F1 и F2. Острия, видимые на различных частотах (где след имеет тенденцию становиться вертикальным), указывают на так называемые критические частоты f_oE , f_oF1 и f_oF2 . Критические частоты — это частоты, на которых сигналы ионосферного зонда проникают в соответствующие слои. Эти частоты являются мерой максимальных электронных плотностей соответствующих слоев. Поскольку плотности меняются со временем, зондирование ионосферы используется для получения информации об изменениях критической частоты и других параметров зависимости электронной плотности от высоты.

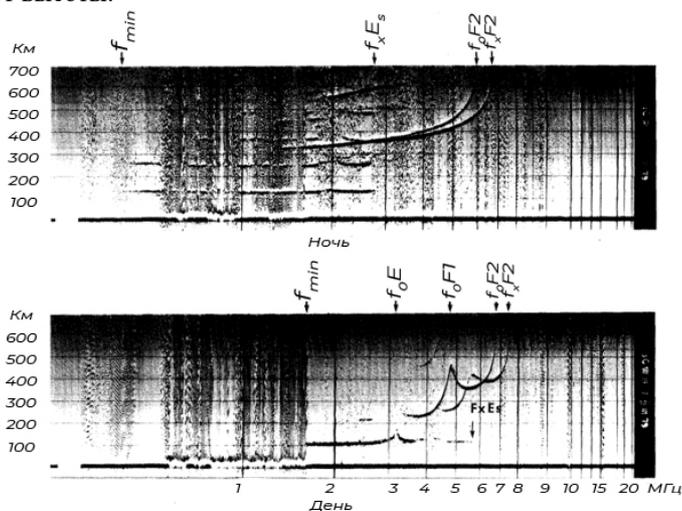


Рис. 3. Типичные дневные и ночные ионограммы средних широт, зарегистрированные ионозондом С-4 в Боулдере, штат Колорадо. На дневной ионограмме показаны отражения от слоев E, Es, F1 и F2; ночные ионограммы — из слоев Es и F2.

На ионограмме (рисунок 3) видны признаки различных явлений, усложняющих процесс зондирования ионосферы или анализ ионограммы. На первичную эхотрассу слоя F накладывается аналогичная, но не идентичная трасса, сдвинутая вверх по частоте: так называемая необыкновенная или X-компонента в противоположность первичному следу, называемому обычным или O-компонентом. Эхо-след разделяется на два следа из-за воздействия магнитного поля Земли. Второй след, аналогичный первичному, виден на удвоенной дальности, как следствие многократного отражения сигнала ионозонда. Учитывая потери мощности сигналов и их переотражение, а также частичное проникновение сквозь ионосферу, лишь небольшая часть энергии волны принимается антенной после ее первичного возвращения из ионосферы. Большая часть возвращаемой энергии отражается обратно от земли и создает первое кратное (эхо второго порядка) на удвоенной дальности. Если ионосфера является хорошим

отражателем, и потери в D-области малы, могут наблюдаться дополнительные отражения. На рисунке 3 (ночь) показано второе кратное (эхо третьего порядка) для части трассы Es. Легко видеть, что наклоны увеличиваются на коэффициент, соответствующий порядку эха.

Наконец, мы видим вертикальные полосы в диапазоне частот от 0,5 до 1,7 МГц, признак радиочастотных помех на ионограмме, из диапазона АМ. РЧ-помехи могут стать настолько сильными, что могут препятствовать регистрации ионосферных эхо-сигналов. Например, помехи маскируют часть или всю трассу уровня E ниже 1,7 МГц.

В верхней части рисунка 3 показана типичная ночная ионограмма. Следы E и F1 исчезли, поскольку эти слои рассеиваются после захода солнца. (Остаточную ночную ионизацию E-области низкой плотности можно наблюдать в отсутствие низких спорадических слоев E на станциях с низкими радиочастотами и большими антеннами.) Эхо от спорадического слоя E (Es) и эхослоев F2 и их кратные хорошо видно на рисунке 3. Иногда наблюдается кистевидное расплывание выступов слоя F2. Это называется распространением F слоя и вызвано мелкомасштабными неоднородностями, встроенными в ионосферу, и рябью в контурах равномерности размером порядка сотен метров и километров.

Это распространение на большие расстояния широко используется для вещания для коротковолновой радиосвязи государственными службами и радиолюбителями. Следует отметить, что собственные эхо-сигналы ионозонда также увеличиваются по амплитуде из-за исчезновения слоя D, что в некоторой степени снижает влияние повышенного распространяющегося шума на общее соотношение сигнал/шум в системе.

Ионосфера оказывает значительное влияние на функционирование радиоэлектроники в составе бортовой научной аппаратуры КА, а также на осуществление радиосвязи между наземными службами и по радиолинии «космос-земля». Воздействие ионосферы может варьироваться в зависимости от времени суток, солнечной активности и сезона. Виды влияния ионосферы можно классифицировать следующим образом.

1. *Изменение характеристик радиосигналов.* Ионосфера может изменять частотные, фазовые и амплитудные характеристики радиосигналов, что в свою очередь приводит к искажениям и интерференции в радиосигналах, и что важно учитывать при проектировании и эксплуатации систем радиосвязи.

2. *Возникновение помех и затухание сигналов.* Заряженные частицы в ионосфере могут вызывать помехи и затухание радиосигналов, особенно в высокочастотных диапазонах, вследствие уменьшения амплитуды сигнала при его прохождении через ионосферу, что также важно учитывать при проектировании систем радиосвязи.

3. *Частотная дисперсия.* Дисперсия сигналов обусловлена разной скоростью распространения компонент сигналов и, следовательно, поступлением их на приёмник с разной временной задержкой, что может вызвать размытие сигнала и затруднить точное определение времени прихода сигнала. Из-за разной скорости распространения сигналов разных частот, общий спектр становится размытым. Вместо чистых и отчетливых частотных компонентов, как ожидается, мы получаем неконтролируемое размытие, что делает демодуляцию и декодирование более сложными. Это может усложнить демодуляцию и декодирование сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ионосфера характеризуется различными свойствами, которые необходимо учитывать при организации радиосвязи как между наземными объектами, так и между наземным объектом и КА. Анализ ионограммы позволяет выразить ряд основных преимуществ в использовании ионосферы в качестве среды для передачи информации. Показаны виды влияния ионосферы на обеспечения качества радиосвязи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Литвинов С.В., Глинкин И.А., Панышин Е.А., Скрипачев В.О. Обработка результатов эксперимента

по совмещенному (вертикальному и наклонному) зондированию ионосферы на ионозондах серии Парус-А // Материалы 20-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 372. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a EDN: JOLZVI

- [2] Полевода Ю. А., Литвинов С. В., Милорадов Г. А. О современном состоянии зондирования ионосферы радиозатменным методом // Сб. науч. ст. по материалам VI Междунар. науч.-практ. конф. "Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем" ("Радиоинфоком-2022"), г. Москва, РТУ МИРЭА: сб. науч. ст. М.: МИРЭА - Российский технологический университет, 2022. С. 102-104. EDN: KZTVQG
- [3] Кинтнер П.М. младший, «Руководство для начинающих по космической погоде и GPS», 2008
- [4] Павельев А. Г., Матюгов С. С., Яковлев О. И., Павельев А. А., Лиу Й., Губенко В. Н. Спутниковая радиоголография и глобальный мониторинг ионосферы // Геомagnetизм и аэрономия. 2017.
- [5] Кузнецов В.Д., «Солнечные источники космической погоды», ИКИ РАН, 2013
- [6] Кузнецов В.Д., «Солнечно-земная физика и ее приложения», УФН, 2012

METHODS AND MEANS OF RADIO COMMUNICATION OF SPACECRAFT AND GROUND-BASED RADIO STATIONS TAKING INTO ACCOUNT THE PARAMETERS OF THE IONOSPHERE

Lukyanova E.G.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Radio Electronic
Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
lenalukanova0159@gmail.com

Chistyakov E. A.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Radio Electronic
Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
chistyakov@mirea.ru

Chmerenko M.A.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Radio Electronic
Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
alderand23@yandex.ru

Abstract — The modern work of spacecraft and radio-electronic means is closely connected with the Earth's ionosphere. The ionosphere is a layer of the atmosphere containing ions and electrons that can affect electromagnetic signals and communications in space and on Earth. This article examines the influence of the ionosphere on the operation of spacecraft (spacecraft) and radio-electronic means (RES). The ionized atmosphere of the Earth is analyzed, day and night ionograms are recorded using ionospheric probes (high-frequency (HF) radars), by transmitting an RF signal and changing the frequency, the influence of radio frequency (RF) interference is evaluated and the dependence of the ionosphere on spacecraft and RES is taken out depending on the time of day, solar activity and season.

Keywords — layer, electron density, frequency range, ionospheric sounding, ionosphere, altitude, frequency, geomagnetic field, ionospheric reflection, maximum density

УДК 550.388.2

МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ ПО ДАНЫМ СИСТЕМ ДЗЗ

Ксендзук А. В.

Институт радиоэлектроники и информатики
Заведующий кафедрой радиоинформационных систем
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
ks_alex@mail.ru

Семин А.В.

Институт радиоэлектроники и информатики
Аспирант кафедры радиоинформационных систем
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
sinritzen@yandex.ru

Аннотация — В работе приведены основные принципы, которые позволяют выполнить оценку эффективности решения задачи классификации для систем дистанционного зондирования земной поверхности с применением глубоких нейросетей. Предложена структура комплексной модели мультимодального машинного обучения для решения задачи классификации объектов, выдвинуты предложения по формированию обучающего набора входных данных, а также описаны рассматриваемые модальности исходных данных получаемых с систем ДЗЗ.

Ключевые слова — система контроля дистанционного зондирования земли, классификация объектов, идентификация, мультимодальное машинное обучение, распознавание образов, искусственная нейронная сеть, оптические снимки, радарные данные.

ВВЕДЕНИЕ

В современной области обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) наблюдается постоянный рост активности: создаются и выводятся на орбиту новые космические аппараты оптического, радиолокационного и радиотехнического наблюдения за земной поверхностью, расширяются наземные сети сбора информации, совершенствуются методы обработки изображений с высоким разрешением. Текущая ситуация характеризуется улучшением технического оснащения космических аппаратов и наземных станций управления, а также расширением функциональных возможностей и спектра задач, связанных с обработкой изображений. Использование данных, полученных КА ДЗЗ позволяет решать множество практических задач: мониторинг лесных, сельскохозяйственных и арктических зон, анализ природных катастроф, охрану окружающей среды, государственную безопасность и другие. Рост объема доступных данных ДЗЗ значительно повысил требования к скорости и качеству их обработки, [1].

Классификация и идентификация объектов, расположенных на поверхности Земли является фундаментальной, важной, но в тоже время сложной темой исследований. В настоящее время традиционные методы практически полностью заменяются нейросетевыми.

Существуют специально настроенные нейросети, которые используются при обработке данных дистанционного зондирования, [2]. Такие нейросети обучаются на наборах данных, например, на EuroSAT dataset, UCMerced-LandUse, NWPU-RESISC45 и других. Набор данных EuroSAT основан на спутниковых снимках Sentinel-2, охватывающих 13 спектральных диапазонов и состоящих из 10 классов с 27000 размеченных и географически привязанных выборок. Предлагаются два набора данных: - rgb: содержит только оптические полосы частот R, G, B, закодированные как изображение JPEG. - all: содержит все 13 полос исходного диапазона значений (float32).

Несмотря на то, что глубокие нейронные сети успешно применяются в задачах классификации, в которых доминирует одномодальный подход (то есть использование только одного типа данных), они не всегда являются эффективно для класса более сложных задач. Тут возникает целесообразность применения мультимодального подхода, позволяющего работать нейронным сетям с двумя и более типами данных, которые в свою очередь повышают качество классификации из-за разнообразия входной информации. В данной работе предлагается базовое решение вышеупомянутой трудности путем разработки общей мультимодальной системы глубокого обучения.

VI. ОБУЧАЮЩИЕ НАБОРЫ ДАННЫХ

При разработке новых или адаптации существующих нейросетей для решения задач системы ДЗЗ необходимо их обучение, которое должно выполняться на большой исходной выборке, характеристики и полнота которой влияют на качество решения задач классификации, [3]. При этом необходимо учитывать, что для системы распознавания не всегда могут быть доступны те или иные данные, достаточные для обучения по всем имеющимся модальностям, поэтому полнота одного типа данных в отсутствие достаточной полноты у другого позволит повысить качество классификации, [4].

Для решения данной проблемы предлагается использовать три типа входной информации – оптические

данные, радиолокационные данные, мультиспектральные данные.

Космическая съемка в оптическом диапазоне наиболее широко распространена и является основным инструментом для изучения земной поверхности. Пространственное разрешение — это показатель детальности снимка, чаще всего измеряющийся в метрах на пиксел. Параметр разрешения говорит о том, сколько метров реальной местности помещается в одной точке цифрового космического снимка. Чем это значение выше, тем хуже качество детализации оптического изображения и чем ниже, тем более оно детально. По пространственному разрешению различают снимки сверхвысокого, высокого, среднего и низкого, все они характеризуются различной степенью качества получаемого снимка. На рисунке 1 представлена кадры оптической съемки в разных пространственных разрешениях.



Рис. 1. Кадры оптической съемки в разном разрешении

Несомненным преимуществом оптических данных является их доступность с глобальным охватом в свободном доступе, а недостатком — зависимость от погодных условий.

Радиолокационная съемка в настоящее время получила широкое распространение, — создаются коммерческие группировки КА с оперативным получением данных и высоким разрешением, реализованы интерферометрический режим съемки, бистатическая и многопозиционная радиолокация [5].

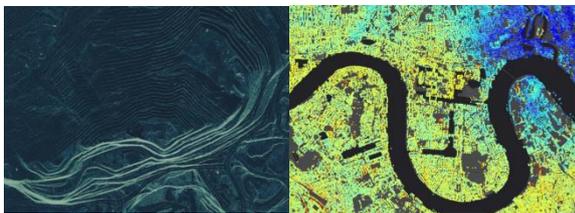


Рис. 2. Кадры радарной съемки

Преимущества радарной съемки является всепогодное наблюдение в любое время суток, в том числе при наличии задымления, тумана и прочих факторов, ограничивающих применение оптической съемки. В отличие от оптической съемки, существует возможность определения изменений в электрофизических характеристиках поверхности, которые не наблюдаются оптическими средствами.

Мультиспектральная съемка из космоса — метод, который анализирует широкий спектр света вместо того, чтобы просто назначать основные цвета (красный, зеленый,

синий) каждому пикселю. Свет, падающий на каждый пиксель, разбивается на множество различных спектральных полос, позволяя получать дополнительную информацию. Собранные спектры используются для формирования изображения таким образом, что каждый пиксель изображения включает полный спектр, рис. 3.

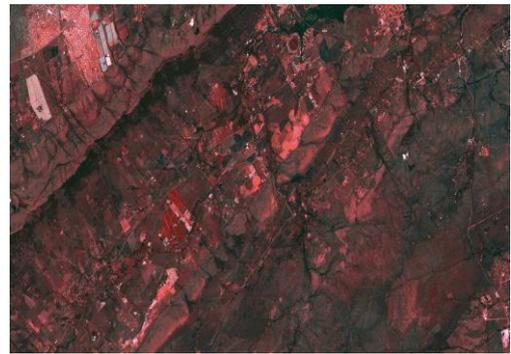


Рис. 3. Кадры мультиспектральной съемки

VII. КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Решение задач классификации, идентификации и распознавания может быть реализовано различными методами, в том числе с применением нейросетей, которые демонстрируют достаточно высокую эффективность в обработке изображений [4].

Классические системы классификации строятся на основе использования одной модальности (униmodalные системы). Модальность отвечает за тип данных, используемый для проверки и классификации объекта. Это могут быть, например, оптические изображения, радарные данные, спектральные данные, поляризационный портрет и т.п. Любая униmodalная система классификации объектов обладает характерным рядом ограничений. Например, подходы на основе анализа оптических изображений требуют наличия предельно большого и качественного датасета всех исследуемых областей земли. Системы распознавания объекта или ситуации по снимку имеют сильную зависимость от уровня освещенности, ракурса, точность привязки, пространственное разрешение оптики, ведь чем более детален снимок, тем проще его описать. Система идентификации по радарным данным зависит от канала передачи информации. Отсюда вытекает целесообразность в применение нового подхода, способного автоматизировать процесс классификации в работе с разнородной информацией, способногократно увеличить надежность и точность процесса распознавания.

Для развития систем распознавания объектов все чаще начинают интегрировать алгоритмы глубокого обучения (Deep learning) в том числе мультимодальные алгоритмы машинного обучения. Идеей данного метода является комплексная обработка множества параметров. Подход мультимодальности подразумевает под собой универсальность, которая в свою очередь позволяет работать с одним или множеством исходных параметров в решении задачи распознавания. Это особенно актуально в

ситуациях, когда объект имеет какие-либо характерные только для него особенности, либо обладает множеством особенностей, где каждая из них является характерной для данного объекта, [6].

По этим причинам предлагается создать комплексную модель мультимодальной нейронной сети, позволяющей обрабатывать различные типы входных данных для дальнейшего решения поставленной задачи. Структура модели представлена на рис. 4.

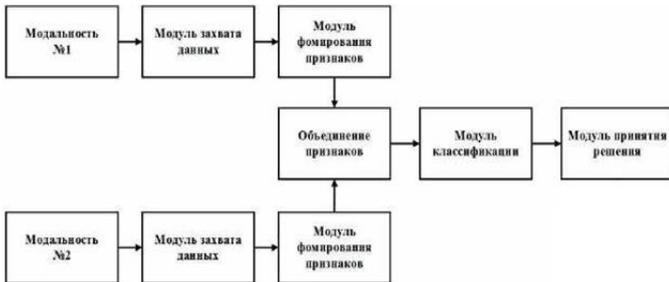


Рис. 4. Комплексная математическая модель для обучения нейросети

На рисунке 4 представлен мультимодальный подход объединения модальностей на уровне признаков. Модель состоит из следующих блоков – первым модулем выступает блок агрегирования данных, второй – модуль отвечающий за непосредственное формирование признаков, третьим является модуль отвечающий за их сравнение и последним выступает модуль определения финального решения, конкретно определение принадлежности к классу того или иного объекта. В процессе анализа данных на входе формируются признаки, характеризующую конкретную модальность. Далее происходит объединение, образуя общий набор признаков, который используется для классификации и принятия итогового решения.

На рисунке 5 изображена архитектура мультимодальной нейронной сети, позволяющей обрабатывать данные трех типов.

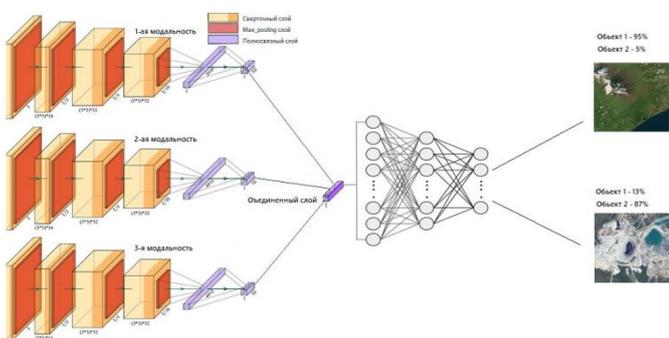


Рис. 5. Архитектура мультимодальной нейросети

В данной архитектуре предлагается выделить три основных входа под каждую из модальностей – оптические, радарные, мультиспектральные данные. Далее с помощью сверточных, max pooling и полносвязных слоев исходные

данные преобразуются в одномерные массивы, которые в свою очередь с помощью процедуры конкатенации объединяются и подаются на скрытые слои нейронной сети. Далее нейронная сеть классифицирует объекты полученные с входных слоев и дает предельно точную оценку качеству классификации.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был предложен подход мультимодального глубокого машинного обучения, которые подразумевает под собой обработку разнородной информации для решения задачи классификации в системе дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Была представлена комплексная модель и архитектура нейронной сети. Хотелось бы отметить, что данный подход активно применяется в настоящее время в различных сферах и зарекомендовал себя в качестве продвинутого аналога, основанного на сверточных нейронных сетях, которые дают качественный результат лишь на одном виде входной информации.

В дальнейшем исследовании предлагается повышения эффективности распознавания за счет разработки методов подготовки обучающих выборок, оптимального конфигурирования и непосредственной реализации мультимодальной нейронной сети. Выполненный сравнительный анализ показал, что мультимодальный подход имеет преимущество в качестве распознавания объектов на снимках ДЗЗ с высокой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/24707/> (дата обращения: 12.11.2023).
- [2] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journalofbigdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40537-023-00772-x> (дата обращения: 12.11.2023).
- [3] Современные методы идентификации систем. Эйххофф П. (ред.). М.: изд-во "Мир". 1983. — 402 с.
- [4] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville Deep Learning || 2016, The MIT Press, Cambridge, MA, USA
- [5] Многопозиционная радиолокационная система с синтезированием апертуры антенны по отраженным сигналам ГНСС «ГЛОНАСС» / В. Ф. Фатеев, А. В. Ксендзук, П. А. Герасимов и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – №5. – С. 62-68.
- [6] Стефаниди А.Ф., Приоров А.Л., Топников А.И., Хрящев В.В. Применение сверточных нейронных сетей в задаче мультимодальной идентификации // Цифровая обработка сигналов. – 2020.
- [7] Sanjekar P.S., Patil J.B. An overview of multimodal biometrics // Signal & Image Processing. – 2013.

MULTIMODAL NEURAL NETWORKS IN TASKS OF OBJECT CLASSIFICATION BASED ON THE DATA OF REMOTE SENSING SYSTEMS

Ksendzuk A. V.

Institute of Radioelectronics and Informatics
Head of the Department of Radio Information Systems
RTU MIREA
Moscow, Russia
ks_alex@mail.ru

Semin A.V.

Institute of Radioelectronics and Informatics
Post-graduate student of radio information systems
department
RTU MIREA
Moscow, Russia
sinritzen@yandex.ru

Abstract — The paper considers the basic principles that allow us to evaluate the efficiency of the classification task for remote sensing systems using deep neural networks. The structure of a complex model of multimodal machine learning for solving the problem of object classification is proposed, proposals for the formation of a training set of input data are put forward, and the considered modalities of the input data received from remote sensing systems are described.

Keywords — remote sensing control system, object classification, identification, multimodal machine learning, pattern recognition, artificial neural network, optical images, radar data.

УДК 681.327

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

Александров К.М.

Институт радиоэлектроники и информатики

Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
Kostyaalex@gmail.com

Чистяков Е. А.

Институт радиоэлектроники и информатики

Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
chistyakov@mirea.ru

Левченков А.С.

Институт радиоэлектроники и информатики

Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
Levchenkov.2003@mail.ru

Аннотация — В научной статье приведены результаты исследования влияния солнечного ветра на космические аппараты (КА) и радиоэлектронные системы (РЭС). Солнечный ветер, состоящий из заряженных частиц, оказывает существенное влияние на околоземное пространство. КА, находясь в зоне влияния солнечного ветра, подвергаются различным физическим и электромагнитным воздействиям. В статье рассматриваются механизмы взаимодействия солнечного ветра с поверхностью и электроникой КА, а также оценивается влияние на их орбитальные параметры. Обсуждаются методы прогнозирования солнечно-ветровых условий и возможные стратегии для защиты искусственных спутников от негативных воздействий солнечного ветра. Это исследование важно для повышения устойчивости и эффективности работы КА в условиях влияния солнечного ветра.

Ключевые слова — магнитное поле, межпланетная среда, солнечный ветер, солнечный цикл, солнечная активность

ВВЕДЕНИЕ

Солнечный ветер, представляющий собой непрерывный поток заряженных частиц и электромагнитного излучения, является одним из ключевых факторов в околоземном космическом пространстве (ОКП). Этот невидимый поток солнечных частиц, исходящих из Солнца, оказывает глубокое воздействие на окружающую среду в ближней космической области, а также на космические аппараты (КА).

Данная научная статья посвящена изучению влияния солнечного ветра на КА. Важно понимать, что воздействие солнечного ветра на КА может проявляться в различных аспектах, включая изменения в их орбитальной динамике, радиационные эффекты, коррозию поверхности и многие другие. Эти факторы могут существенно влиять на работоспособность и долговечность КА, что является важным аспектом для обеспечения функционирования множества современных технологий и научных исследований, в которых они задействованы.

В данной статье мы рассмотрим механизмы воздействия солнечного ветра на КА, методы исследования

этого воздействия, а также возможные пути минимизации рисков и повышения устойчивости спутников в условиях солнечной активности. Выводы данного исследования могут иметь важное значение для обеспечения надёжности космической инфраструктуры и поддержания стабильного функционирования спутниковых систем в будущем.

I. СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

Солнечный ветер или межпланетная среда — это полностью ионизированная, электрически нейтральная плазма, образуемая солнечной короной, и взаимодействующая с магнитным полем. Солнечный ветер обладает изменчивостью своих параметров как во времени, так и в пространстве и заполняет межзвёздную область вблизи Солнца. В статье описываются наблюдаемые свойства солнечного ветра вблизи Земли, включая вариации, сопряжённые с солнечным циклом, а также показано его влияние на КА, находящиеся на околоземной орбите.

Солнечная корона — это верхний слой атмосферы Солнца, который из-за его невысокой яркости можно увидеть без аппаратуры лишь во время полных солнечных затмений. Солнечный ветер — это внешняя часть солнечной короны, проходящая мимо Земли. Физик Паркер Ю.Н. предположил, что корона не находится в гидростатическом равновесии, и что на самом деле её плазма непрерывно формируется потоками вещества и излучения из Солнца [1]. Паркер Ю.Н. рассматривал солнечную корону, как процесс непрерывного сферически-симметричного расширения жидкости.

Солнечный ветер оказывает значительное влияние на радиоэлектронные системы и электромагнитные коммуникации в космосе и на Земле. Основными аспектами этого воздействия являются:

1. *Ионосферные изменения.* Солнечный ветер влияет на ионосферу Земли, вызывая временные изменения в её плотности и составе. Это может привести к искажению радиосвязи, спутниковых систем;
2. *Риски для КА.* Солнечный ветер создаёт условия для возникновения высокоэнергетических частиц, которые могут повредить электронику и сенсоры КА;

3. *Солнечные вспышки и выбросы массы вещества.* Солнечные вспышки и выбросы массы могут привести к увеличению уровня радиационной активности в космическом пространстве, что представляет опасность для космонавтов и РЭС.

Все эти факторы обуславливают необходимость тщательного мониторинга солнечной активности и разработки защитных мер для радиоэлектронных систем.

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Поскольку проводимость солнечного ветра чрезвычайно высока, диффузия плазмы поперек магнитного поля практически отсутствует, и говорят, что поле "приморожено" к потоку. Из-за этого плазма уносит поле с собой в окосолнечное пространство. Если бы Солнце не вращалось, поле бы простиралось во всех направлениях. Вращение приводит к тому, что поле выглядит спиралеобразным.

Скорость текущего элемента, несущего поле, определяется формулой:

$$\begin{aligned} U_r &= u \\ U_\phi &= -\omega \sin \theta \\ U_\theta &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где u - скорость ветра, а ω - угловая скорость вращения Солнца ($\omega = 2,7 * 10^{-6}$ рад/с).

Скорость ветра изменяется очень медленно при радиусе, превышающем в несколько раз критический радиус, и будет практически постоянной. Траектория, по которой движется элемент, определяется формулой

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{d\phi} = \frac{U_r}{U_\phi} = \frac{u}{-\omega \sin \phi} \quad (2)$$

Для константы u , превышающей r_0 , это интегрируется для получения:

$$r - r_0 = \frac{-u}{\omega \sin \theta} (\phi - \phi_0) \quad (3)$$

Тогда для сферически симметричной геометрии $\nabla \cdot B = 0$ дает:

$$\begin{aligned} B_r(r, \phi, \theta) &= B(r_0, \phi_0, \theta) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \\ B_r(r, \phi, \theta) &= -B(r_0, \phi_0, \theta) \frac{\omega r_0}{ur} \sin \theta \\ B_\theta &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Преобразование в стационарную систему координат оставляет конфигурацию магнитного поля неизменной, но в стационарной системе присутствует электрическое поле:

$$E = -u \times B \quad (5)$$

Таким образом, направление потока плазмы направлено вдоль радиальных, а не силовых линий поля.

Эта простая сферически симметричная модель солнечного ветра оказалась успешной в предсказании существования ветра и оценке его скорости и плотности, но предсказанная скорость была ниже наблюдаемой, а предсказанная плотность была слишком велика.

Наблюдения за магнитным полем вблизи Земли показывают, что поле в среднем имеет спиральное направление, предсказанное моделью стационарного

состояния, но часто наблюдаются большие вариации. Вариации объясняются несколькими источниками, в том числе волнами, разрывами и некоторыми крупномасштабными возмущениями.

Магнитное поле в солнечном ветре вытянуто по спирали таким образом, что угол, который поле образует с линией Земля-Солнце, является функцией скорости, низкие скорости солнечного ветра приводят к плотной спирали и более высоким скоростям в более радиально выровненном поле.

Таким образом, стоит учитывать вышеперечисленные характеристики солнечного ветра при разработке различных электронных устройств и КА в целом.

III. СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ

Предварительные наблюдения указывали на изменения в межпланетной среде в зависимости от солнечного цикла. Считалось, что солнечный ветер является источником различных вариаций геомагнитной активности и полярных сияний, связанных с вариациями солнечного цикла.

В общем виде характеристику солнечного цикла можно свести к следующему:

1. Изменение солнечной активности в течение одиннадцатилетнего солнечного цикла имеет множество проявлений: количество солнечных пятен, крупные вспышки на Солнце и скорость солнечного ветра.

2. Общепринятой практикой является использование вариаций числа солнечных пятен в качестве стандарта для солнечного цикла и сравнение изменений всех других величин с солнечными пятнами.

3. Прямые наблюдения также выявили, что условия минимального солнечного цикла наступают на орбите Земли примерно через 1-1,5 года после минимума солнечных пятен.

4. Геомагнитные бури были чаще всего обнаружены при максимуме солнечных пятен, в то время как повторяющиеся бури проявлялись примерно через три года после максимума.

5. Внезапные вспышки связаны с ударами солнечного ветра, более характерными для максимума солнечных пятен, в то время как повторяющиеся штормы связаны с устойчивыми высокоскоростными потоками солнечного ветра, особенно в фазе уменьшения числа солнечных пятен.

За время исследования солнечной активности были установлены вариации нескольких параметров солнечного цикла. На рисунке 1 показаны долгосрочные их колебания. На рисунке 1a показано среднегодовое количество солнечных пятен за период с 1962 по 1978 год. На рисунке 1b показана среднегодовая скорость солнечного ветра.

Существует также изменение величины межпланетного поля в зависимости от солнечного цикла, которое наиболее отчетливо видно по среднегодовому значению логарифма IBI , как показано на рисунке 1c.

Среднегодовые значения усредненной по часам магнитуды $Bz(|Bz|)$ также сравниваются с числом солнечных пятен на рисунке 1d.

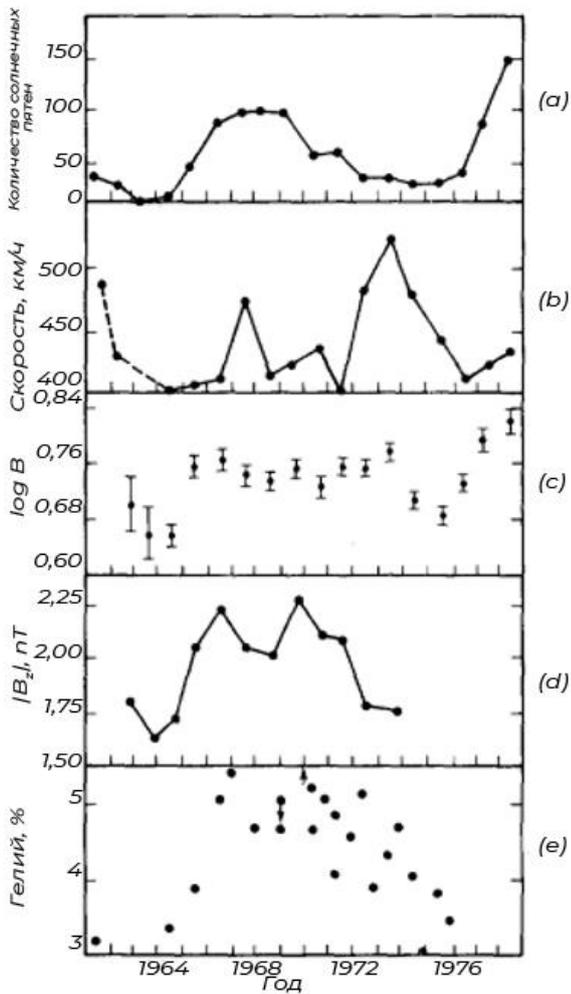


Рис. 1. Долгосрочные колебания выбранных параметров. На рисунке (a) показано среднегодовое количество солнечных пятен. Вторая панель (b) показывает среднюю годовую скорость. На рисунке (c) показаны усредненные за год значения логарифмов почасовых величин межпланетного магнитного поля. Наблюдаемое распределение почасового IMF является логарифмически нормальным. Рисунок (d) показывает среднегодовые почасовые значения величины z-компонента МВФ. На рисунке (e) указано процентное содержание гелия в разбивке по числам. Стрелки указывают на то, что могут быть определены только пределы значений

По полученным данным можно понять, что значения параметров, влияющих на КА, постоянно меняются, и это нужно учитывать при их разработке.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе статьи были рассмотрены характеристики солнечного ветра, а также их влияние на КА и РЭС. Были сделаны выводы, что данные параметры имеют свойство изменяться в ходе солнечных циклов и динамично вносить изменения в работу космических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Соловьев А.А., Хохлов А.В., Жалковский Е.А., Березко А.Е., Лебедев А.Ю., Харин Е.П., Шестопалов И.П., Мандеа М., Кузнецов В.Д., Бондарь Т.Н., Нечитайленко В.А., Рыбкина А.И., Пятыхина О.О., Шibaева А.А., «Атлас магнитного поля Земли», ГЦ РАН, 2012
- [2] Гавриленко В.Г., Яшнов В.А. Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме: Учебное пособие. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. - 101 с.
- [3] Маров М.Я., Кузнецов В.Д. «Солнечные вспышки и их воздействие на Землю», 2014
- [4] Кузнецов В.Д., «Солнечно-земная физика и ее приложения», УФН, 2012
- [5] Кузнецов В.Д., «Солнечные источники космической погоды», ИКИ РАН, 2013

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF SOLAR WIND ON ARTIFICIAL EARTH SATELLITES

Alexandrov K.M.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Radio Electronic
Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
Kostyaalex@gmail.com

Chistyakov E. A.
Institute of Radio Electronics
and Computer Science
Department of Radio Electronic
Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
chistyakov@mirea.ru

Levchenkov A.S.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Radio Electronic
Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
Levchenkov.2003@mail.ru

Abstract — A scientific article investigates the influence of the solar wind on artificial Earth satellites (ISS) and radio-electronic systems (RES). The solar wind, consisting of charged particles, is a significant factor affecting near-Earth space. Artificial satellites, being in the zone of influence of the solar wind, are exposed to various physical and electromagnetic influences. The article discusses the mechanisms of interaction of the solar wind with the surface and electronics of satellites, and also assesses the impact on their orbital parameters. Methods of forecasting solar-wind conditions and possible strategies for protecting artificial satellites from the negative effects of solar wind are discussed. This research is important for improving the stability and efficiency of artificial satellites under the influence of solar wind.

Keywords — Solar wind, Solar cycle, magnetic field, spot, pattern, interplanetary medium, Solar activity.

УДК 550.388.2

ЧАСТНОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 25 ОКТЯБРЯ 2022 ГОДА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИОНОСФЕРУ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ

Литвинов С.В.

Институт радиоэлектроники и
информатикиКафедра радиоэлектронных систем и
комплексов

РТУ МИРЭА

Москва, Россия

Litvinov_S@mirea.ru

Скрипачев В.О.

Институт радиоэлектроники и
информатикиКафедра радиоэлектронных систем и
комплексов

РТУ МИРЭА

Москва, Россия

skripatchevv@inbox.ru

Семенова О.В.

Институт радиоэлектроники и
информатикиКафедра радиоэлектронных систем и
комплексов

РТУ МИРЭА

Москва, Россия

Semyonova@mirea.ru

Аннотация — В статье рассматриваются подробности частного солнечного затмения, прошедшего 25.10.2022 и изменения ионосферы, обусловленные этим событием. Параметры ионосферы анализируются по данным результатов вертикального зондирования ионосферы станциями Росгидромета, оснащенными ионозондами «Парус-А». Демонстрируются изменения критических частот foE и foF2 и минимальной действующей высоты слоя F2 во время солнечного затмения на некоторых ионозондах, попавших в область тени.

Ключевые слова — ионосфера, вертикальное зондирование, частное солнечное затмение, ионосферные эффекты.

ВВЕДЕНИЕ

Реакции ионосферы на солнечные затмения отслеживаются достаточно давно. Солнечные затмения, даже не полные, оказывают влияние на ионосферу, порой достаточно значительное [1]. Во время таких событий

отмечается уменьшение критических частот, увеличение действующих высот отражений от слоев, уменьшение полного электронного содержания (ПЭС) [2]. При этом максимальная реакция ионосферы может отставать от максимальной фазы затмения до получаса. Аналогично наступлению сумерек, во время солнечного затмения снижается ионизирующая радиация и, как следствие, соответствующее изменение параметров. Возмущение ионосферы во время неординарных и нерегулярных ситуаций (солнечные затмения, падения метеоритов, землетрясения, вспышки на Солнце и т.д.) находится под пристальным наблюдением исследователей [3, 4]. Исследования осложняются относительно редкой частотой солнечных затмений и наличием средств измерения параметров ионосферы в интересующей области. Из-за этого на данный момент отсутствует общепринятая модель реакции среднеширотной ионосферы на такие события.

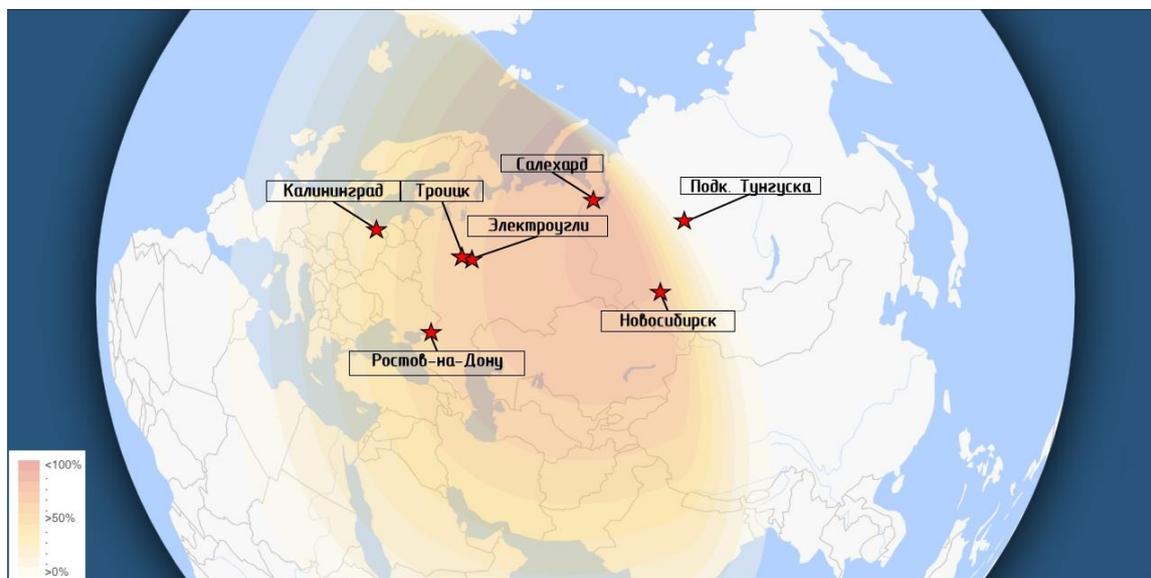


Рис. 1. Карта частного солнечного затмения 25 октября 2022 года и расположение ионозондов «Парус-А»

ТАБЛИЦА 1. ОБСТОЯТЕЛЬСТВА ВИДИМОСТИ ЗАТМЕНИЯ НА ИОНОЗОНДАХ «ПАРУС-А»

Параметры ионозонда		Параметры солнечного затмения			
Название	Координаты	Первое касание, UTC	Максимальная фаза, UTC	Размер максимальной фазы	Последнее касание, UTC
Kaliningrad	54,40 с.ш. 20,10 в.д.	09:11:47	10:20:40	0,5425	11:30:11
Moscow	55,49 с.ш. 37,29 в.д.	09:24:38	10:38:54	0,7094	11:51:30
Elektrougli	55,80 с.ш. 38,30 в.д.	09:24:38	10:38:54	0,7094	11:51:30
Rostov	47,20 с.ш. 39,70 в.д.	09:35:54	10:53:07	0,6705	12:07:21
Salekhard	66,50 с.ш. 66,50 в.д.	09:38:18	10:46:34	0,8454	11:28:03
Tunguska	61,34 с.ш. 90,02 в.д.	10:00:09	10:12:50	0,7094	10:17:48
Novosibirsk	54,80 с.ш. 83,20 в.д.	10:08:29	11:02:44	0,7509	11:06:45

I. СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 25 ОКТЯБРЯ 2022 Г.

Частное солнечное затмение 25 октября 2022 года по данным астрономического ежегодника имело максимальную фазу 0,8619 в Ханты-Мансийском автономном округе севернее Нижневартовска в 14.00 MCK (<http://planetarium-moscow.ru/about/news/chastnoe-zatmenie-solntsa-25oktyabrya-2022/>). Карта солнечного затмения, составленная по данным портала TimeAndData (<https://timeanddate.com>), приведена на рис. 1 (<https://www.timeanddate.com/eclipse/solar/2022-october-25>).

В Европейской части России сложились благоприятные условия для наблюдения за частным солнечным затмением, поскольку прошло оно днем, когда Солнце достаточно высоко над горизонтом, а максимальная фаза составила более 0,6.

Области тени частного солнечного затмения охватила всю Европейскую часть России и Западную Сибирь, таким образом параметры ионосферы регистрировались на ионосферных станциях в Подкаменной Тунгуске (Красноярский край), Новосибирск, Салехард, Ростов-на-Дону, Электроугли, Троицк, Калининград. Координаты ионозондов «Парус-А», размер максимальной фазы и время охвата солнечным затмением приведены в таблице 1. Схематичное расположение упомянутых ионозондов и интенсивность солнечного затмения показаны на рисунке 1.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Ионозонды серии «Парус-А» зарегистрированы как средство измерения, внесены в Госреестр СИ по номером 51425-12 и проходят поверку согласно документу «Инструкция. Станции вертикального радиозондирования ионосферы наземные «Парус-А». Методика поверки. 100269 МП», утвержденному ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» 20 апреля 2012 г. (Минлигареев, 2013). Разработанные в 2010 году эти отечественные ионозонды проводят сеансы вертикального зондирования каждые 15 минут с ручной обработкой каждой часовой ионограммы. Во время поверочных работ ионозонды прошли модернизацию и с 2017 года способны проводить наклонное зондирование (Литвинов и др., 2019).

Результатом работы вертикального ионозонда является частотно-высотная характеристика - ионограмма, показывающая зависимость высоты отражающих слоев от частоты зондирования. В дополнение к ионограмме идут численные характеристики отражающих слоев (критические частоты, высоты и пр.).

Ионозонда серии «Парус-А» синхронизированы и способны осуществлять комплексное зондирование - совмещение вертикального и наклонного зондирования на одной ионограмме. Во время частного солнечного затмения такие результаты достигнуты на ионозондах в Новосибирске (рисунок 2, сверху) и Салехарде (рисунок 2, снизу).

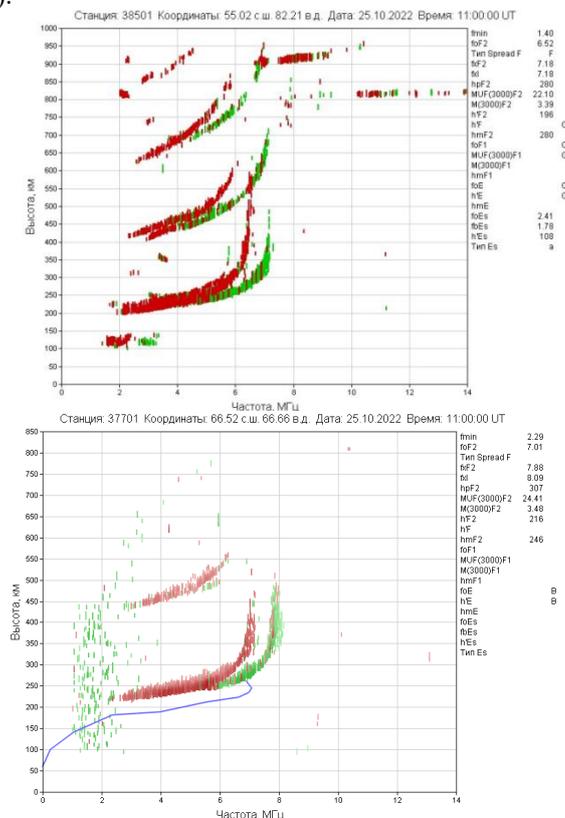


Рис. 2. Результаты комплексного зондирования во время солнечного затмения на ионозондах в Новосибирске (сверху) и Салехарде (снизу)

Влияние частного солнечного затмения на ионосферу особенно явно регистрируется в изменениях критических частот и действующих высот отражающих слоев ионосферы. По эффекту солнечное затмение можно сравнить с наступлением сумерек, поскольку снижается воздействие солнечной радиации на заряженные частицы в атмосфере Земли. В тех случаях, когда солнечное затмение примерно совпадает с наступлением реальных сумерек, эффекты затмения теряются на фоне естественных изменений, характерных для этого времени суток. Именно такая ситуация произошла в Западной Сибири, в то время как в Европейской части России влияние затмения четко прослеживалось.

На рис. 3 приведены зависимости критических частот слоев E и F2 (сверху) и минимальной действующей высоты слоя F2 (снизу), полученные по ионограммам «Парус-А» (г. Троицк), снятым с интервалом 15 минут 25 октября 2022 года. Период солнечного затмения отмечен вертикальными линиями на оси времени: Н - начало, М - максимум, К - конец. Штриховыми линиями показано изменение тех же параметров днем ранее (24 октября 2022 года).

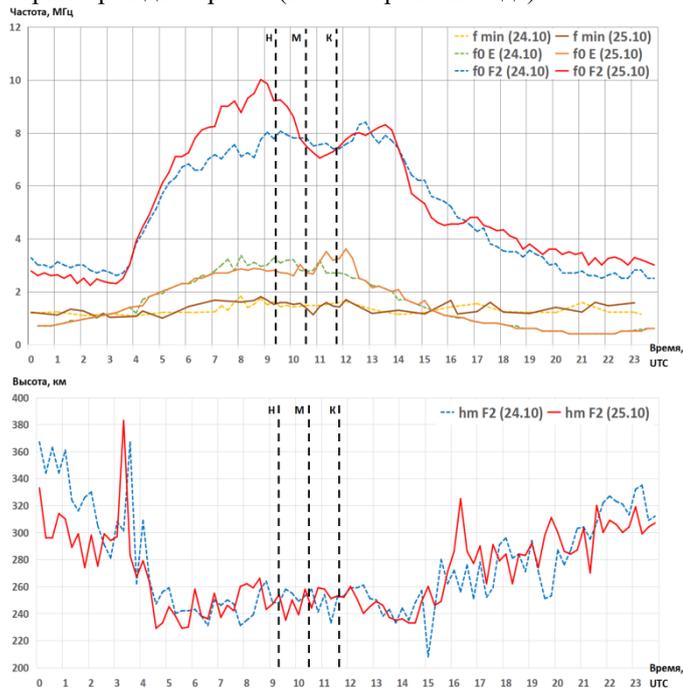


Рис. 3. Изменение критических частот f_oE и f_oF2 (сверху) и минимальной действующей высоты слоя F2 (снизу) во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (г. Троицк)

Из графиков видно, что реакция ионосферы совпадает с ожидаемой для случаев прохождения лунной тени в верхних слоях атмосферы: возрастание минимальной высоты F-слоя и действующих высот отражения, падение концентрации в максимуме F-слоя, обычно характерных для ночной ионосферы.

На рисунке 4 приведены зависимости критических частот ионосферы на ионозондах, поавших в область лунной тени.

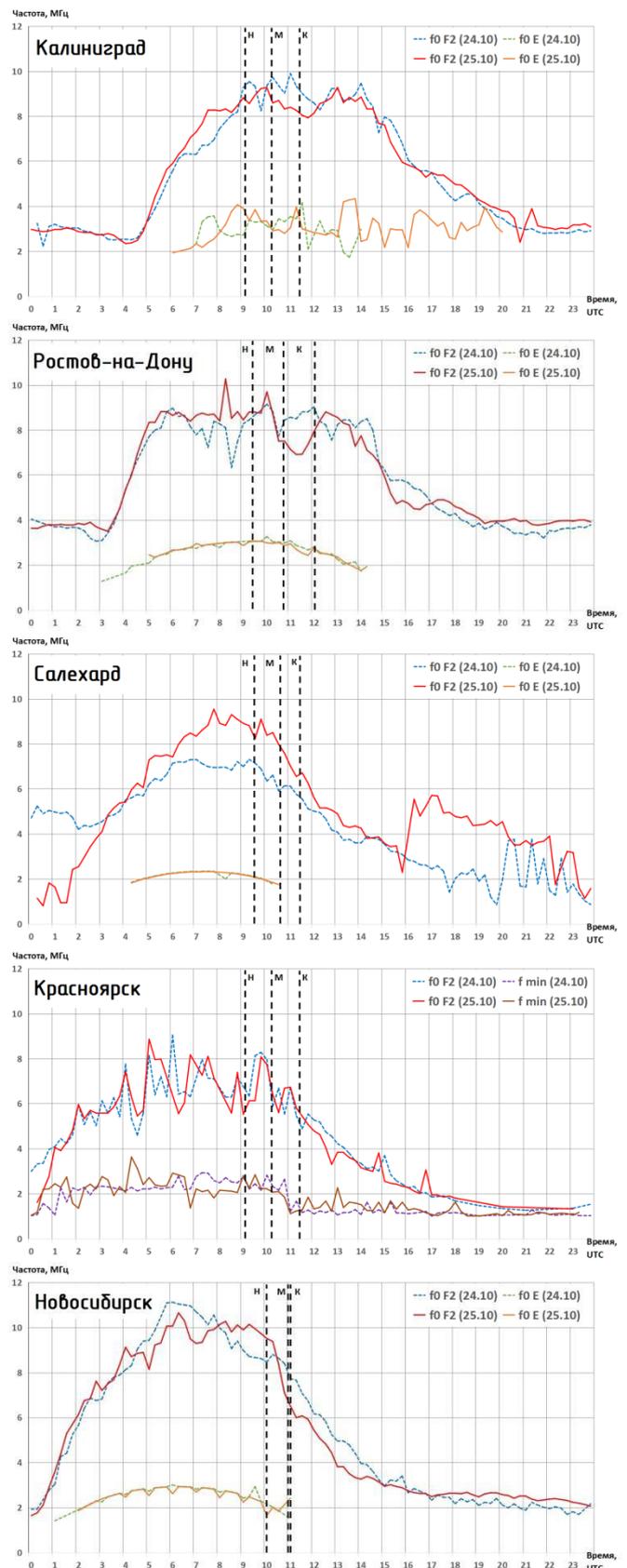


Рис. 3. Изменение критических частот во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г.

Полученные данные о реакции ионосферы на солнечное затмение 25 октября 2022 года согласуются с ионосферными эффектами, о которых сообщалось при аналогичных предыдущих солнечных затмениях. Т.е. характерное для наступления сумерек и захода Солнца снижение критических частот отражающих слоев ионосферы. В случае совпадения времени наступления сумерек с временем солнечного затмения наблюдались интересные эффекты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для более детального анализа ионосферных эффектов, вызванных солнечным затмением, требуется привлечение дополнительного материала и результатов измерений других параметров околоземного космического пространства, выполненные, в первую очередь, средствами космического базирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора 94C2/МОЛ/73887 от 25.03.2022г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Edemskiy I.K., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and

phenomena // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2013. – Vol. 3. – P. A27. – DOI 10.1051/swsc/2013049. – EDN SLNJET.

[2] Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 5. С. 1-33. – EDN RXNVEV.

[3] Белинская А.Ю. Тренд ионосферы над Новосибирском в 23-м и 24-м солнечных циклах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 269-272. DOI 10.21046/2070-7401-2019-16-2-269-272.

[4] Карелин А.В., Скрипачев В.О., Туманов М.В., Жуков А.О. Методика формирования состава бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов для мониторинга радиоактивного загрязнения Земли // Труды МАИ. 2018. № 103. С. 22. – EDN POHVZR.

[5] Литвинов С.В., Скрипачев В.О., Замуруев С.Н. Ионосферные эффекты частного солнечного затмения 25 октября 2022 года по данным ионосферной сети Росгидромета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 325-333. – DOI 10.21046/2070-7401-2023-20-4-325-333. – EDN WLYQIV.

PRIVATE SOLAR ECLIPSE OCTOBER 25, 2022 AND ITS INFLUENCE ON THE IONOSPHERE OVER THE TERRITORY OF RUSSIA

Litvinov S.V.

Institute of Radioelectronics and Informatics

Department of Radioelectronic Systems and Complexes RTU MIREA

Moscow, Russia

Litvinov_S@mirea.ru

Skripachev V.O.

Institute of Radioelectronics and Informatics

Department of Radioelectronic Systems and Complexes RTU MIREA

Moscow, Russia

SkripachevV@inbox.ru

Semenova O.V.

Institute of Radioelectronics and Informatics

Department of Radioelectronic Systems and Complexes RTU MIREA

Moscow, Russia

semyonova@mirea.ru

Abstract — The paper considers the details of the private solar eclipse that took place on 25.10.2022 and the ionospheric changes due to this event. The ionosphere parameters are analyzed from the data of the results of vertical sounding of the ionosphere by Roshydromet stations equipped with "Parus-A" ionosondes. The changes of the critical frequencies foE and foF2 and the minimum effective height of the F2 layer during the solar eclipse at some ionosondes that fell into the shadow region are demonstrated.

Keywords — ionosphere, vertical sounding, private solar eclipse, ionospheric effects.

УДК 621.396.933

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРЕНИЯ МЕЖСПУТНИКОВОЙ ДАЛЬНОСТИ ЧАСТЬ I

Булычев Г.Г.

Кафедра высшей математики
Институт искусственного интеллекта
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
bulychev@mirea.ru

Федоров В.Б.

Кафедра высшей математики
Институт искусственного интеллекта
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
feodorov@mirea.ru

Аннотация — Существует ряд возникающих и важных эксплуатационных сценариев, в которых может быть желательна относительная навигация с использованием только измерений дальности, таких как формирование космических аппаратов, способных выполнять определение межспутникового расстояния по линии связи УВЧ/ОВЧ-диапазона. Несмотря на существование таких сценариев, существует мало опубликованных работ по проблеме относительной навигации только по дальности. В настоящей работе исследуется задача относительной навигации только по дальности и устанавливается, что существуют четыре возможные относительные траектории для общего трехмерного движения, которые приведут к точно таким же временным последовательностям измерений дальности. Различные специальные относительные орбиты могут создавать другие множества возможных относительных траекторий, такие как две, восемь или бесконечно много. После установления того, что существует множество решений (два, четыре, восемь или бесконечно много), описывается метод быстрого вычисления этих решений для первоначального определения относительной орбиты. Другим существенным результатом работы является возможность сокращения вычислений путём разбиения задачи на две независимых задачи меньшей размерности. Этот факт позволяет ограничить данные, вычисления и, следовательно, вычислительные ресурсы, если не требуются все данные состояния спутника при относительной навигации. Третьим важным результатом является возможность сокращения количества кадров и промежутков считывания информации в случае, если спутник не подвергался каким-либо внешним возмущениям.

Работа написана исключительно по данным зарубежных источников.

Ключевые слова — satellite; spacecraft; orbital constellation; navigation; satellite ranging.

ВВЕДЕНИЕ

Относительная навигация космических аппаратов (RelNav) остается важнейшей задачей для множества важных применений в космических полетах. В результате за последние полвека была проделана большая работа по общей проблеме относительной навигации [1]. В последнее время интерес к ней проявился также, в связи с использованием ограниченного класса типов измерений — в частности, использования относительной навигации для измерения малых углов [2] при предварительном грубом наведении спутников друг на друга. Однако строение современных датчиков и архитектура миссий начинают предполагать, что использование только межспутниковых измерений дальности также может быть важным сценарием как для изучения, так и для ряда практических задач. Рассмотрим следующий пример в качестве иллюстрации.

Предположим, что на низкой околоземной орбите существует группа космических аппаратов, способных поддерживать связь друг с другом. Для космических аппаратов с ограниченными ресурсами (примером чего являются CubeSats и другие небольшие спутники) простой и недорогой формой измерений относительной навигации является вычисление дальности между спутниками с использованием канала связи.

Если это радиометрическое определение местоположения выполняется с помощью всенаправленных антенн (как это типично для линий УВЧ/УКВ-связи ближнего радиуса действия), то информация о пеленге недоступна — измеряется только дальность от антенны одного космического корабля до антенной другого, в процессе их связи. В таком сценарии необходимо выполнить относительную навигацию только для оптического диапазона, т.к. сам лазерный луч определенной частоты, отраженный зеркалом другого спутника даст информацию о дальности, а вращение передающего лазера на небольшой угол (при

предварительной грубой взаимной ориентации спутников, например, по солнцу) позволит точно сориентироваться по углу.

Использование межспутниковых измерений дальности для космических аппаратов RelNav хорошо зарекомендовало себя, хотя большинство предыдущих авторов предполагали эксплуатационные сценарии, в которых измерения дальности дополняют другие типы измерений (например, инерциальные, GPS, пеленг) [3]. В качестве особенно примечательного примера, включение таких межспутниковых измерений дальности (и связанных с ними скоростей) имело решающее значение для миссии Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)[4]. Однако немногие тщательно рассмотрели концепции формирования космических аппаратов, в которых RelNav выполняется с использованием только межспутниковых измерений дальности. Такая возможность особенно привлекательна по двум причинам. Во-первых, это могло бы обеспечить групповой полет с использованием недорогого оборудования, которое, вероятно, уже имеется на каждом космическом аппарате (радиоприемник). Во-вторых, межспутниковое определение местоположения по каналу связи УВЧ/УКВ не требует знания ориентации или контроля ориентации. Это второе преимущество могло бы позволить осуществлять групповые полеты с дешевыми CubeSats или даже с очень большими роями ChipSats [5], как это выполняется ныне для обзора местности наноспутниками. Авторы надеются, что эта работа послужит отправной точкой для обсуждения того, какие типы полетов в составе группы могли бы выполняться только с учетом дальности полета.

Определение начальной относительной орбиты только по дальности (IROD) проблема, определяемая здесь как пакетная обработка измерений дальности для решения для относительной орбиты без априорной информации, обсуждалась для двумерного (2—D) случая в [6] и для трехмерного (3-D) случая в [7]. И наоборот, если существует хорошая априорная оценка относительного состояния, относительное состояние может быть улучшено путем пакетной [8] или последовательной [9] обработки измерений дальности. Нами предпринята попытка устранить этот недостаток путем всестороннего рассмотрения только инструментария RelNav. Поэтому работа начинается с краткого обзора динамики Клохесси–Уилтшира (CW) и некоторых ключевых наблюдений, которые важны для решения проблемы RelNav только для оптического диапазона. Далее рассматривается возможность глобального наблюдения относительного движения, учитывая только временную историю измерений дальности, и решение RelNav только для дальности оказывается неединичным. В частности, показано, что всегда существует по крайней мере два возможных решения, что общая трехмерная траектория обычно имеет четыре решения и что в некоторых особых случаях может быть получено больше решений (например, восемь, бесконечно много). Хотя проблема RelNav, связанная только с общим диапазоном, не поддается

глобальному наблюдению, сделаны некоторые краткие замечания по обеспечению глобальной наблюдаемости с помощью известного маневра. За обсуждением наблюдаемости следует доступный метод нахождения семейства допустимых решений для IROD только для диапазона и соответствующей ковариации.

I. ДИНАМИКА КЛОХЕССИ–УИЛТШИРА

В этой работе предполагается, что относительное движение между парой космических аппаратов определяется CW динамикой (динамикой Клохесси–Уилтшира) [1]. Здесь соблюдается соглашение о кадрах из [10], где начало координат непрерывного кадра совпадает с “главным” космическим аппаратом, при этом ось x направлена по радиусу от центра Земли, ось z направлена вдоль вектора углового момента орбиты (здесь она направлена внутрь рисунка), а ось y завершает правую систему координат. Таким образом угловая скорость в CW динамике (т.е. локальной динамике) это просто ω вдоль оси z .

На рис. 1 А – это спутник с которого проводятся измерения, он расположен в начале координат и касательная к его траектории в момент t_i совпадает с осью x , В – это второй спутник, относительно которого проводятся наблюдения, он движется на расстоянии z_i от плоскости (x, y) , в которой движется первый спутник, и на расстояниях x_i и y_i в проекциях на плоскость (x, y) . Таким образом расстояние между спутниками $\rho = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$; это расстояние и определяется по отраженному сигналу лазера или по электромагнитным импульсам.

Угловая скорость движения спутников по траекториям считается одинаковой и равной ω . Расстояния от каждого из спутников до центра Земли, обозначаемые R_A и R_B , соответственно, много больше ρ , $t_i \ll T$, где T - период обращения каждого из спутников. Считается, что кривизной траекторий можно пренебречь. Относительная скорость спутника В в момент времени t_i считается равной $v_i = \omega z_i$, при этом спутник пройдет расстояние $l_i = \omega z_i t_i$.

При выборе непрерывной динамики возникает ряд важных допущений и ограничений. Во-первых, предполагается, что главный космический аппарат находится на приблизительно круговой орбите. Во-вторых, предполагается, что ни на спутник А, ни на спутник В не действуют возмущающие силы (например, несферическая гравитация, лобовое сопротивление, давление солнечной радиации). Это предположение часто является хорошим приближением для относительно коротких периодов времени.

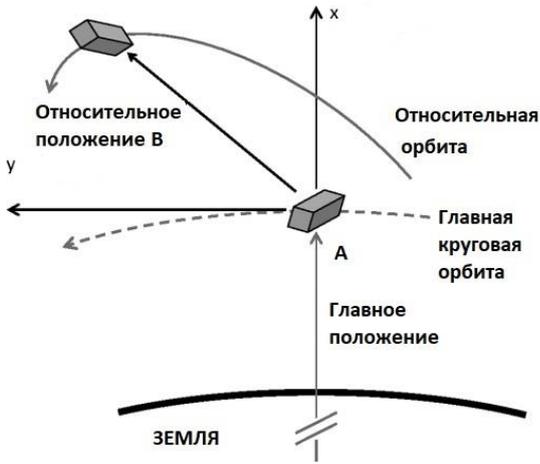


Рис. 1. Относительное положение спутников и Земли, ось z направлена перпендикулярно плоскости страницы

Хотя существующая литература содержит некоторое обсуждение расширения непрерывной динамики для учета таких возмущений [11], эти расширения здесь не рассматриваются. В-третьих, предполагается, что спутник В должен находиться в непосредственной близости от спутника А. Если расстояние между спутниками А и В становится большим, то линеаризация в выводе СВ оказывается неравномерной и для правильного описания относительного движения требуется рассмотрение, выходящее за рамки статьи. Хотя аналитические выражения более точного описания траектории для относительного движения действительно существуют [12], их использование значительно усложняет анализ. Таким образом, авторы обращаются исключительно к классической непрерывной динамике, которая позволяет глубоко проникнуть в проблему относительной навигации при использовании только оптической или радио связи.

Решение непрерывных уравнений движения, которое описывает отображение из относительного состояния в момент времени $t_0 = 0$ в относительное состояние в момент времени t_i , может быть записано как

$$\hat{x}_i = \Phi_i \hat{x}_0 \quad (1)$$

где Φ_i краткое обозначение матрицы 6×6 переноса состояния (STM) от t_0 к t_i

$$\Phi_i = \Phi(t_0, t_i) = \begin{bmatrix} \Phi_{rr_i} & \Phi_{rv_i} \\ \Phi_{vr_i} & \Phi_{vv_i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

а само относительное состояние равно

$$\tilde{x}_i = \begin{bmatrix} \vec{r}_i \\ \vec{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

где x_i, y_i, z_i - относительные координаты i -го кадра, $\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i$ - соответствующие компоненты вектора скорости.

Таким образом,

$$\begin{bmatrix} \hat{r}_i \\ \hat{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{rr_i} & \Phi_{rv_i} \\ \Phi_{vr_i} & \Phi_{vv_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{r}_0 \\ \hat{v}_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

где матрицы $\Phi_{rr_i}, \Phi_{rv_i}, \Phi_{vr_i}, \Phi_{vv_i}$ ортогональные 3×3 матрицы вращения, соответствующей повороту спутника В относительно спутника А за время t_i . Пусть промежуток $0 \leq t \leq t_i$ разбит на i частей: $(t_{k-1}; t_k)$ $k = 1, 2, \dots, i$. Тогда, очевидно, имеем $\Phi(t_0, t_i) = \Phi(t_0, t_1)\Phi(t_1, t_2) \dots \Phi(t_{i-1}, t_i)$.

Динамика в плоскости, касательной к траектории спутника, нормальной к направлению на центр Земли (Земля считается шаром), при сделанных предположениях может быть отделена от динамики по ортогональной к этой плоскости оси.

Положим

$$\xi_i = \begin{bmatrix} \zeta_i \\ \nu_i \end{bmatrix}, \zeta_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}, \nu_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

Тогда

$$\begin{bmatrix} \zeta_i \\ \nu_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{rr_i} & \phi_{rv_i} \\ \phi_{vr_i} & \phi_{vv_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_0 \\ \nu_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

и

$$\begin{bmatrix} z_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{zz_i} & \phi_{z\dot{z}_i} \\ \phi_{\dot{z}_z_i} & \phi_{\dot{z}\dot{z}_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_0 \\ \dot{z}_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

II. НЕ ЕДИНСТВЕННОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ, НАЛИЧИЕ ЗЕРКАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ

Любое 3-D задание начальных условий, которое создаст траекторию, удовлетворяющую временной истории измерений дальности, имеет три зеркальных начальных условия, которые также создают точно такую же временную историю измерений дальности. Таким образом, действительные трехмерные начальные условия всегда появляются в наборах из четырех. Любое двумерное (в плоскости) начальное условие имеет одно зеркальное начальное условие. Таким образом, действительные двумерные начальные условия всегда появляются в наборах из двух.

Покажем существование таких зеркальных решений. Относительное положение космического аппарата-преследователя в момент времени t_i задается в виде

$$\hat{r}_i = [\Phi_{rr_i} \quad \Phi_{rv_i}] \hat{x}_0 \quad (8)$$

таким образом, что соответствующий диапазон просто $\rho_i = \sqrt{\hat{r}_i^T \hat{r}_i}$.

Поскольку расстояние всегда неотрицательно, $\rho_i > 0$, часто проще просто иметь дело с его квадратом: $\rho_i^2 = \hat{r}_i^T \hat{r}_i$, что в расширенной матричной форме эквивалентно

$$\rho_i^2 = x_0^T \begin{bmatrix} \Phi_{rr_i}^T \\ \Phi_{rv_i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{rr_i}^T & \Phi_{rv_i}^T \end{bmatrix} x_0 \quad (9)$$

Если определить матрицу состояния Z_i как симметричную матрицу размером 6×6 и ранга 3

$$Z_i = \begin{bmatrix} \Phi_{rr_i}^T \\ \Phi_{rv_i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{rr_i}^T & \Phi_{rv_i}^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

то можно записать

$$\rho_i^2 = x_0^T Z_i x_0 \quad (11)$$

Отсюда сразу следует, что как x_0 , так и $-x_0$ будут обеспечивать одинаковую историю вычислений за все время, разделимость динамики в плоскости и вне плоскости внесет дополнительную неопределенность. Таким образом, продолжая разделять вклады в плоскости и вне плоскости в историю вычислений для i -го измерения получаем очевидное:

$$\rho_i^2 = x_0^T Z_i x_0 = (x_i^2 + y_i^2) + z_i^2 = r_i^2 \quad (12)$$

Состояния в плоскости (x, y) траектории и перпендикулярно к ней разделились, т.е.

$$\rho_i^2 = \xi_0^T \begin{bmatrix} \phi_{rr_i}^T \\ \phi_{rv_i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{rr_i}^T & \phi_{rv_i}^T \end{bmatrix} \xi_0 + z_0^T \begin{bmatrix} \phi_{zz_i}^T \\ \phi_{zv_i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{zz_i}^T & \phi_{zv_i}^T \end{bmatrix} z_0 \quad (13)$$

Чтобы упростить форму записи, определим M_i как симметричную матрицу размером 4×4 и N_i , как симметричную матрицу размером 2×2

$$M_i = \begin{bmatrix} \phi_{rr_i}^T \\ \phi_{rv_i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{rr_i}^T & \phi_{rv_i}^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$N_i = \begin{bmatrix} \phi_{zz_i}^T \\ \phi_{zv_i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{zz_i}^T & \phi_{zv_i}^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

таким образом, что уравнение (13) упрощается, оставаясь разделенным на две части: в плоскости орбит (x, y) и перпендикулярно к ней, запишем условие

$$\rho_i^2 = \xi_0^T M_i \xi_0 + z_0^T N_i z_0 \geq 0 \quad (16)$$

где

$$x_i^2 + y_i^2 = \xi_0^T M_i \xi_0 \geq 0; \quad (17)$$

$$z_i^2 = z_0^T N_i z_0 \geq 0; \quad (18)$$

Отсюда очевидно, что M_i - это 4×4 , симметричная, положительно полуопределенная матрица с рангом 2. Аналогично, N_i - это симметричная положительная полуопределенная матрица размером 2×2 с рангом 1.

Кроме того, следует учесть, что оба уравнения (17) и (18) являются уравнениями для квадратичных поверхностей.

Легко заметить, также, что, как ξ_0 , так и $-\xi_0$ дадут эквивалентные последовательности (t_1, t_2, \dots, t_i) для компонентов состояния в плоскости (x, y) ,

$$x_i^2 + y_i^2 = \xi_0^T M_i \xi_0 = (-\xi_0^T) M_i (-\xi_0) \quad (19)$$

Соответственно, z_0 и $-z_0$ являются решениями $z_i^2 = z_0^T N_i z_0 = (-z_0^T) N_i (-z_0)$ (20)

Таким образом, следующие 4 набора \hat{x}_0 будут давать одинаковые временные последовательности измерений для трёхмерной орбиты:

$$\begin{aligned} \hat{x}_0 &= [x_0 \ y_0 \ z_0 \ \dot{x}_0 \ \dot{y}_0 \ \dot{z}_0]^T \\ \hat{x}_0 &= [-x_0 \ -y_0 \ z_0 \ -\dot{x}_0 \ -\dot{y}_0 \ \dot{z}_0]^T \\ \hat{x}_0 &= [x_0 \ y_0 \ -z_0 \ \dot{x}_0 \ \dot{y}_0 \ -\dot{z}_0]^T \\ \hat{x}_0 &= [-x_0 \ -y_0 \ -z_0 \ -\dot{x}_0 \ -\dot{y}_0 \ -\dot{z}_0]^T \end{aligned} \quad (21)$$

или в случае плоской орбиты, с учетом того, что $z_0 = 0$

$$\begin{aligned} \hat{\xi}_0 &= [x_0 \ y_0 \ \dot{x}_0 \ \dot{y}_0]^T \\ \hat{\xi}_0 &= [-x_0 \ -y_0 \ -\dot{x}_0 \ -\dot{y}_0]^T \end{aligned} \quad (22)$$

В дальнейшем начальные условия, описываемые формулами (21) и (22) называются зеркальными.

III. НЕЕДИНСТВЕННОСТЬ НАБОРА СОСТОЯНИЙ В ОТНОСИТЕЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ, МНОЖЕСТВЕННЫЕ И НЕ ЗЕРКАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ

Относительные орбиты, управляемые классической непрерывной динамикой, создают историю определения дальностей, которая может быть объяснена рядом различных решений для начальных условий. Для общей относительной орбиты зеркальные решения, по-видимому, являются единственными начальными условиями, которые будут точно соответствовать последовательности измерений дальности за все время. Таким образом, трехмерный относительный траектории обычно имеют четыре допустимых решения, а двумерные относительные траектории обычно имеют два решения. Однако существуют особые случаи, в которых существует дополнительная множественность. Последующее обсуждение показывает, при каких условиях (относительных ограничениях начального состояния) существуют незеркальные решения и множество решений при этих условиях.

Выражение для диапазона в уравнении (9) может быть расширено, а затем интерпретировано как квадратичный многочлен в шести начальных состояниях с коэффициентами, зависящими от времени. В качестве альтернативы это можно рассматривать, как линейную комбинацию базисных функций во времени с постоянными коэффициентами. Второй подход оказался более продуктивным. В этом случае следует обратить внимание на то, что история любого диапазона может быть

описана суммированием девяти линейно независимых базисных функций:

$$\rho_i^2 \omega^2 = At^2 + Bt^2 + Ct \sin(\omega t) + Dt \cos(\omega t) + E \sin(\omega t) + F \cos(\omega t) + G \sin(2\omega t) + H \cos(\omega t) + I. \quad (23)$$

Важно отметить, что все коэффициенты A, \dots, I являются функциями только начального состояния и, следовательно, являются константами для любой конкретной орбиты и для любого сценария. Поскольку девять базисных функций в уравнении (23) линейно независимы друг от друга, история конкретного состояния имеет уникальный набор коэффициентов. Таким образом, любые две траектории, создающие одну и ту же историю состояния за все время, должны давать одинаковые значения для коэффициентов A, \dots, I . Более подробно этот подход будет изложен во второй части этой работы.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены возможности межспутниковой навигации с использованием измерения только межспутниковой дальности. Предложено матричное покадровое описание процесса взаимодействия. Показано, что в отсутствие внешних воздействий измерения можно производить значительно реже. Указано на возможности значительного уменьшения информации, передаваемой в кадре, в случае плоских орбит. Предлагается альтернативный подход к определению межспутникового расстояния, который будет рассмотрен во второй части статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Clohessy, W., and Wiltshire, R., "Terminal Guidance for Satellite Rendezvous," *Journal of the Aerospace Sciences*, Vol. 27, No. 9, 1960, pp. 653–658. doi:10.2514/8.8704
- [2] Woffinden, D., and Geller, D., "Observability Criteria for Angles-Only Navigation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 45, No. 3, 2009, pp. 1194–1208. doi:10.1109/TAES.2009.5259193
- [3] Herklotz, R. L., "Incorporation of Cross-Link Range Measurements in the Orbit Determination Process to Increase Satellite Constellation Autonomy," Ph.D. Dissertation, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA, Dec. 1987.
- [4] Cheng, M. K., "Gravitational Perturbation Theory for Intersatellite Tracking," *Journal of Geodesy*, Vol. 76, No. 3, 2002, pp. 169–185. doi:10.1007/s00190-001-0233-6-001-0233-6
- [5] Peck, M., "Chips in Space," *IEEE Spectrum*, Vol. 48, No. 8, 2011, pp. 42–47. doi:10.1109/MSPEC.2011.5960166
- [6] Rundberg, C., and Lovell, T. A., "Relative Spacecraft Navigation via Inter-Satellite Range Measurements," 39th AAS Guidance, Navigation, and Control Conference, AAS Paper 2016-016, Feb. 2016.
- [7] Christian, J., "Observability and Solution Technique for Range-Only Relative Navigation," 39th AAS Guidance, Navigation, and Control Conference, AAS Paper 2016-132, Feb. 2016.
- [8] Maessen, D., and Gill, E., "Relative Orbital Element Estimation and Observability Analysis for Formation Flying Satellites Using InterSatellite Range Measurements Only," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA Paper 2010-7885, Aug. 2010. doi:10.2514/6.2010-7885
- [9] Wang, J., Butcher, E. A., and Lovell, T. A., "Use of Nonlinearities for Increased Observability in Relative Orbit Estimation," AAS Astrodynamics Specialist Conference, AAS Paper 2015-623, Aug. 2015. [24] Wang, J., Butcher, E. A., and Lovell, T. A., "Analysis of Ambiguous Orbits in Sequential Relative Orbit Estimation with Range-Only Measurements," AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, AAS Paper 2016-375, Feb. 2016.
- [10] Vallado, D., *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, 3rd ed., Springer, New York, 2007, pp. 389–417.
- [11] Carter, T., and Humi, M., "Clohessy–Wiltshire Equations Modified to Include Quadratic Drag," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 6, 2002, pp. 1058–1063. doi:10.2514/2.5010 [27] Schweighart, S. A., and Sedwick, R. J., "High-Fidelity Linearized J2 Model for Satellite Formation Flight," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 6, 2002, pp. 1073–1080. doi:10.2514/2.4986
- [12] London, H. S., "Second Approximation to the Solution of the Rendezvous Equations," *AIAA Journal*, Vol. 1, No. 7, 1963, pp. 1691–1693. doi:10.2514/3.1896

RELATIVE NAVIGATION USING INTER-SATELLITE RANGE MEASUREMENT

PART 1

Bulychev G.G.
Department of Higher Mathematics,
Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA
Moscow, Russian Federation
bulychev@mirea.ru

Fedorov V.B.
Department of Higher Mathematics,
Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA
Moscow, Russian Federation
feodorov@mirea.ru

Abstract – There are a number of emerging and important operational scenarios in which relative navigation using only ranging measurements may be desirable, such as the formation of spacecraft capable of performing inter-satellite ranging over a UHF/VHF link. Despite the existence of such scenarios, there is little published work on the problem of range-only relative navigation. This work examines the problem of range-only relative navigation and establishes that there are four possible relative trajectories for general 3D motion that would result in exactly the same temporal sequences of range measurements. Various special relative orbits can create other sets of possible relative trajectories, such as two, eight, or infinitely many. Once it has been established that there are many solutions (two, four, eight, or infinitely many), a method is described to quickly calculate these solutions to initially determine the relative orbit. Another significant result of the work is the possibility of reducing computations by splitting the problem into two independent problems of smaller dimension. This fact makes it possible to limit the data, calculations, and therefore the computational resources, unless all satellite state data are required for relative navigation. The third important result is the possibility of reducing the number of frames and information reading intervals if the satellite was not subject to any external disturbances. The work was written exclusively based on data from foreign sources.

Keywords – expert inspection; printed circuit board; topology; printing module; flaw detection; X-ray analysis; microvision analysis.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРЕНИЯ МЕЖСПУТНИКОВОЙ ДАЛЬНОСТИ

ЧАСТЬ II

Булычев Г.Г.

Кафедра высшей математики
Институт искусственного интеллекта
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
bulychev@mirea.ru

Федоров В.Б.

Кафедра высшей математики
Институт искусственного интеллекта
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
feodorov@mirea.ru

Аннотация — Существует ряд возникающих и важных эксплуатационных сценариев, в которых может быть желательна относительная навигация с использованием только измерений дальности, таких как формирование космических аппаратов, способных выполнять определение межспутникового расстояния по линии связи УВЧ/ОВЧ-диапазона. Несмотря на существование таких сценариев, существует мало опубликованных работ по проблеме относительной навигации только по дальности. В настоящей работе исследуется задача относительной навигации только по дальности и устанавливается, что существуют четыре возможные относительные траектории для общего трехмерного движения, которые приведут к точно таким же временным последовательностям измерений дальности. Различные специальные относительные орбиты могут создавать другие множества возможных относительных траекторий, такие как две, восемь или бесконечно много. После установления того, что существует множество решений (два, четыре, восемь или бесконечно много), описывается метод быстрого вычисления этих решений для первоначального определения относительной орбиты. Другим существенным результатом работы является возможность сокращения вычислений путём разбиения задачи на две независимых задачи меньшей размерности. Этот факт позволяет ограничить данные, вычисления и, следовательно, вычислительные ресурсы, если не требуются все данные состояния спутника при относительной навигации. Третьим важным результатом является возможность сокращения количества кадров и промежутков считывания информации в случае, если спутник не подвергался каким-либо внешним возмущениям.

Работа написана исключительно по данным зарубежных источников.

Ключевые слова — **satellite; spacecraft; orbital constellation; navigation; satellite ranging.**

ВВЕДЕНИЕ

В конце первой части данной статьи был указан альтернативный подход к определению межспутникового расстояния с помощью квадратичного инварианта: кинетической энергии $W = \rho^2 \omega^2 / 2$ спутника В, относительно спутника А, проводящего измерения; при этом сам спутник А постоянно находится в начале координат. Такая система координат называется орбитальной.

Напомним, что в орбитальной системе координат предполагается, что расстояние между спутниками много меньше радиуса Земли и их расстояния до земной поверхности, поэтому сила земного притяжения действует на них одинаково и её влиянием можно пренебречь.

Также предполагается, что никаких внешних воздействий на спутники не оказывается. При таких предположениях кинетическая энергия W является инвариантом, полностью определяемым взаимным расположением, относительными скоростями и взаимным вращением спутников.

Эта энергия может быть описана с помощью коэффициентов A, \dots, I , образованных степенями времени t^2 (при учете ускоренного продольного движения), t (при учете равномерного продольного движения) и тригонометрическими функциями $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$, связанными с вращением спутника в плоскости, перпендикулярной направлению движения, константа I соответствует начальному состоянию спутника. Такой набор коэффициентов позволяет описать динамику спутника В в любой момент и, в отсутствие внешних воздействий, может быть определён через начальные координаты и скорости спутника, а также через угловую скорость его вращения.

Эти соображения и положены в основу данной работы

I. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

В конце первой части данной статьи был указан альтернативный подход к определению межспутникового расстояния с помощью инвариантных коэффициентов A, \dots, I , образованных степенями времени t^2 (при учете ускоренного продольного движения), t (при учете равномерного продольного движения) и тригонометрическими функциями $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$, связанными с вращением спутника в плоскости, перпендикулярной направлению движения, константа I соответствует начальному состоянию спутника. Такой набор коэффициентов позволяет описать любую динамику спутника и, в отсутствие внешних воздействий, может быть определён через начальные координаты и скорости спутника, а также через угловую скорость его вращения.

Напомним общий вид этого уравнения

$$\rho_1^2 \omega^2 = At^2 + Bt + Ct \sin(\omega t) + Dt \cos(\omega t) + E \sin(\omega t) + F \cos(\omega t) + G \sin(2\omega t) + H \cos(\omega t) + I \quad (1)$$

где, в общем случае, коэффициенты A, \dots, I имеют вид

$$A = 9\omega^2(\dot{y}_0 + 2\omega x_0) \quad (2)$$

$$B = 6\omega(\dot{y}_0 + 2\omega x_0)(2\dot{x}_0 - \omega y_0) \quad (3)$$

$$C = -12\omega(\dot{y}_0 + 2\omega x_0)(2\dot{y}_0 + 3\omega x_0) \quad (4)$$

$$D = -12\dot{x}_0(\dot{y}_0 + 2\omega x_0) \quad (5)$$

$$E = 4[y_0\omega(2\dot{y}_0 + 3\omega x_0) - \dot{x}_0(3\dot{y}_0 + 4\omega x_0)] \quad (6)$$

$$F = 4\dot{x}_0(\omega y_0 - 2\dot{x}_0) - 4(2\dot{y}_0 + 3\omega x_0)(\dot{y}_0 + 2\omega x_0) \quad (7)$$

$$G = \dot{x}_0\dot{y}_0 + 9\omega\dot{x}_0x_0 + \omega\dot{z}_0z_0 \quad (8)$$

$$H = \frac{1}{2}(3\dot{x}_0^2 + \omega^2\dot{z}_0^2 - 27\omega^2x_0^2 - \dot{z}_0^2) - 6\dot{y}_0^2 - 18\omega x_0\dot{y}_0 \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{2}(13\dot{x}_0^2 + \dot{z}_0^2 + 77\omega^2x_0^2 + \omega^2z_0^2) - 4\omega\dot{x}_0y_0^2 + 14\dot{y}_0^2 + 46\omega\dot{y}_0x_0 + \omega^2y_0^2 \quad (10)$$

Важно отметить, что коэффициенты от A, \dots, I являются функциями только начального состояния и, следовательно, являются константами для любой конкретной орбиты. Поскольку девять базисных функций в уравнении (8) линейно независимы друг от друга, история конкретного состояния имеет уникальный набор коэффициентов. Таким образом, любые две траектории, создающие одну и ту же историю состояния за все время, должны давать одинаковые значения для коэффициентов от A, \dots, I . Беглый просмотр уравнений (2-10) показывает, что все зеркальные решения из уравнения (1) в части I работы будут выдавать идентичные коэффициенты и, следовательно, будут выдавать идентичные истории измерений дальности за все время. Это альтернативный вывод о существовании зеркальных решений. Девять базовых функций в уравнении (1) также дают представление об определенных частотах измерений, которых следует избегать. Чтобы гарантировать, что функции периодической базы предоставляют уникальную

информацию, важно избегать совместного использования измерения с интервалами $\Delta t = \frac{n\pi}{\omega} = \frac{nP}{2}$ (для коэффициентов E и F) или с интервалами $\Delta t = \frac{n\pi}{2\omega} = \frac{nP}{4}$ (для коэффициентов G и H), где n - любое целое число, а P - период обращения главного космического аппарата. Поскольку первое является частным случаем второго, ограничение заключается просто в том, чтобы избежать выборки, кратной одной четвертой периода обращения основного космического аппарата ($\Delta t = \frac{nP}{4}$), что реально всегда выполняется.

Следующим шагом является изучение возможности допустимых дополнительных относительных траекторий, которые не являются истинной относительной траекторией или одним из ее зеркальных решений. Девять уравнений (1-10) могут быть использованы, чтобы показать, что 1) зеркальные решения являются единственными допустимыми траекториями для произвольного трехмерного относительного движения; и 2) существуют специальные ограничения, которые вводят возможность не зеркальных решений, 3) при некоторых соотношениях между параметрами количество допустимых траекторий становится бесконечным.

II. ЗЕРКАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ - ЭТО ЕДИНСТВЕННЫМИ РЕШЕНИЯМИ ДЛЯ НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ ОРБИТ

Зеркальные решения - это единственный набор относительных траекторий, который будет отображать одну и ту же историю дальности за все время, если относительная орбита непериодическая (дрейфующая) но межспутниковое расстояние сохраняется. Из этого следует, в частности, что незеркальные решения возможны только для периодических (не дрейфующих) относительных орбит, которые существуют всякий раз, когда выполняется ограничение относительного состояния $\dot{y}_0 = -2\omega x_0$. Несложно показать, что соотношение $\dot{y}_0 = -2\omega x_0$ является необходимым условием существования без зеркальных решений, использующих ограничения в уравнениях (2-10).

Начнём с манипулирования выражением для A из уравнения (2):

$$A = 9\omega^2(\dot{y}_0 + 2\omega x_0)^2 \quad (11)$$

После предположения, что ω является постоянным для любой данной задачи, это ограничение может быть упрощено до

$$(\dot{y}_0 + 2\omega x_0)^2 = c_1^2 \rightarrow \dot{y}_0 + 2\omega x_0 = \pm c_1 \quad (12)$$

где c_1 - константа, которая должна быть одинаковой для всех траекторий, дающих одинаковые измерения дальности за все время. Тот же метод может быть использован для получения еще трех ограничений на начальные условия в плоскости:

$$D = 12\omega\dot{x}_0(\dot{y}_0 + 2\omega x_0) \rightarrow c_1\dot{x}_0 = \pm c_2 \quad (13)$$

$$\frac{A}{3} + \frac{C}{8}\omega = \frac{1}{2}[3\omega^2 x_0(\dot{y}_0 + 2\omega x_0)] \rightarrow c_1 x_0 = \pm c_3 \quad (14)$$

$$B = \omega(\dot{y}_0 + 2\omega x_0)(2\dot{x}_0 - \omega y_0) \rightarrow c_1(2\dot{x}_0 - \omega y_0) = \pm c_4 \quad (15)$$

где c_2, c_3 и c_4 - дополнительные константы, которые должны быть одинаковыми для всех допустимых относительных траекторий. В уравнениях (12-15) следует обратить внимание, что оба знака плюс и минус (которые получаются в результате извлечения квадратного корня из уравнения (12) допускают зеркальные решения. Этой двузначностью можно пренебречь при поиске незеркальных решений, поскольку подходящее зеркальное решение всегда может быть выбрано для анализа без потери общности.

Теперь легко показать, что незеркальные решения не могут существовать, если $c_1 = 0$. Рассмотрим две траектории, x_0 и x'_0 , которые генерируют одни и те же последовательности измерений за все время. Из уравнения (12) ясно, что оба дают одинаковое значение для c_1 (которое, как упоминалось ранее, временно отбрасывается при поиске незеркальных решений):

$$\dot{y}_0 + 2\omega x_0 = \dot{y}_0 + 2\omega x'_0 = c_1 \quad (16)$$

Теперь рассмотрим каждый компонент в плоскости. Например, рассмотрим значение, не являющееся зеркальным \dot{x}_0 , используя уравнение (13):

$$c_1 \dot{x}_0 = c_1 \dot{x}'_0 = c_2, \quad \dot{x}_0 \neq \dot{x}'_0 \rightarrow c_1 = 0 \quad (17)$$

Аналогично, для незеркального x_0 рассмотрим уравнение (14) [и заметим из примечания к уравнению (12), что $x_0 \neq x'_0 \leftrightarrow y_0 \neq y'_0$]

$$c_1 x_0 = c_1 x'_0 = c_3, \quad x_0 \neq x'_0 \rightarrow c_1 = 0 \quad (18)$$

Тот же результат для незеркального y_0 следует из уравнения (15). Таким образом, установлено, что незеркальные решения могут существовать только в том случае, если $c_1 = 0$.

Это приводит к следующему ограничению:

$$\dot{y}_0 = -2\omega x_0 \quad (19)$$

что является хорошо известным ограничением для строго периодической (не дрейфующей) относительной орбиты [10].

III. ВОСЕМЬ РЕШЕНИЙ ОБЩИХ ТРЕХМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ОРБИТ

Типичная трехмерная периодическая орбита допускает восемь возможных относительных траекторий (две разные группы по четыре). Один набор из четырех – это истинная относительная орбита и ее зеркала, тогда как другой набор из четырех - это какая-то другая траектория и ее зеркала.

Это другое семейство из четырех не зеркальных решений называется деформированными орбитами. Существование этих восьми решений легко показать, упростив ограничения, введенные в предыдущем разделе.

Цель состоит в том, чтобы упростить девять ограничений, представленных в уравнениях. (2–10) при условии, что $\dot{y}_0 = -2\omega x_0$. К счастью, тогда все значительно упрощается. Поскольку $\dot{y}_0 = -2\omega x_0$ создает не дрейфующую относительную орбиту, неудивительно, что коэффициенты всех вековых членов равны нулю:

$$A = B = C = D \quad (20)$$

а остальные коэффициенты становятся равными

$$E = 8\omega x_0 \dot{x}_0 - 4\omega^2 x_0 y_0 \quad (21)$$

$$F = 4\omega y_0 \dot{x}_0 \quad (22)$$

$$G = \omega \dot{z}_0 z_0 - 3\omega \dot{x}_0 x_0 \quad (23)$$

$$H = \frac{1}{2}(3\dot{x}_0^2 - \dot{z}_0^2 - 3\omega^2 x_0^2 + \omega^2 z_0^2) \quad (24)$$

$$I = 1/2(13\dot{x}_0^2 - 8\omega \dot{x}_0 y_0 + \dot{z}_0^2 + 5\omega^2 x_0^2 + 2\omega^2 y_0^2 + \omega^2 z_0^2) \quad (25)$$

Но можно сделать и гораздо больше. Во-первых, несмотря на кажущуюся сложность, обратите внимание, что коэффициент I может быть переписан следующим образом

$$I = \omega^2(x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) - F - H \quad (26)$$

или, что эквивалентно

$$I + F + H = \omega^2(x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) \rightarrow \rho_0^2 = (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) \quad (27)$$

что просто подтверждает, что $\rho_0^2 = (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2)$ должно быть константой среди всех решений. Если действительные относительные траектории всегда дают одни и те же измерения дальности, они должны давать один и тот же диапазон при $t = 0$. То, что это довольно очевидное ограничение отпадает естественным образом, является обнадеживающим признаком. Это простое ограничение может полностью заменить довольно громоздкое ограничение в уравнении (25). Ограничения из E, F, G и H также могут быть упрощены (наряду с заменой I):

$$E = 4\omega x_0(2\dot{x}_0 - \omega y_0) \rightarrow x_0(2\dot{x}_0 - \omega y_0) = c_3 \quad (28)$$

$$F = -4\omega \dot{x}_0(2\dot{x}_0 - \omega y_0) \rightarrow \dot{x}_0(2\dot{x}_0 - \omega y_0) = c_6 \quad (29)$$

$$G = \omega \dot{z}_0 z_0 - 3\omega \dot{x}_0 x_0 \rightarrow \dot{z}_0 z_0 - 3\dot{x}_0 x_0 = c_7 \quad (30)$$

$$H = \frac{1}{2} (3\dot{x}_0^2 - \dot{z}_0^2 - 3\omega^2 x_0^2 + \omega_0^2 z_0) \rightarrow$$

$$3\dot{x}_0^2 - \dot{z}_0^2 - 3\omega^2 x_0^2 + \omega_0^2 z_0 = c_8 \quad (31)$$

$$\rho_0^2 = (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) \quad (32)$$

Как можно видеть, в результате получается пять квадратных уравнений с пятью неизвестными.

Можно показать, что эта система из пяти уравнений может быть решена для x_0 . Результатом является многочлен восьмого порядка для x_0 , который содержит только четные степени x_0 . Таким образом, многочлен может быть переписан как квадратичный (многочлен четвертого порядка) для $\xi = x_0^2$ и всегда может быть решено аналитически. Решение квадратичной задачи приводит к четырем возможным значениям для ξ . Когда $x_0 = \pm\sqrt{\xi}$ подставляется обратно в исходные уравнения для решения для оставшегося начального относительного состояния, только два из четырех решений для ξ приведет к реальным значимым начальным состояниям. Кроме того, следует обратить внимание, что переход от ξ обратно к x_0 позволяет существовать зеркальным решениям.

Следовательно, существует только два физически реализуемых значения ξ , каждое из которых приводит к семейству зеркальных решений. Одно семейство содержит истинную относительную орбиту, в то время как другое - нет. Семейство из четырех относительных орбит, которые не являются зеркалами истинной орбиты, называется деформированными орбитами. Поскольку зеркальные решения появляются в наборах по четыре для общей трехмерной орбиты, это приводит к восьми возможным относительным орбитам. Таким образом, любая типичная трехмерная периодическая орбита допускает восемь относительных траекторий, которые дают одну и ту же историю дальности за все время.

Этот факт является, в некотором смысле, очевидным, т.к. $2^3 = 8$ и служит подтверждением нашим выводам. Можно достроить недостающие четыре матрицы столбца в соотношении (21) из части 1 данной работы, где будут меняться пары (x, z) и (y, z) .

Наконец, заметим, что деформированные орбиты зависят от взаимодействия между движением в плоскости и вне плоскости. В результате наблюдается, что семейство деформированных орбит может встречаться только для трехмерных относительных орбит. Деформированные орбиты не существуют в двумерном случае (только в плоскости).

IV. ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ ЦЕНТРИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОРБИТ И КОЛЕБЛЮЩИХСЯ ОРБИТ

Хотя типичная трехмерная периодическая орбита имеет восемь решений, особые ограничения на начальные условия могут привести к большему количеству решений. В частности, теперь покажем, что центрированные периодические орбиты ($2\dot{x}_0 = \omega y_0$) имеют бесконечное число решений. Также можно показать, что эти орбиты

неотличимы от осциллирующих орбит (x_0 и $\dot{x}_0 = 0$), при использовании только измерения дальности.

Предположение $2\dot{x}_0 = \omega y_0$ явно приводит к исчезновению как E , так и F [см. уравнения (28) и (29)]. Для плоского случая ($z_0 = 0$ и $\dot{z}_0 = 0$) это "футбольная орбита" с центром вокруг главного космического аппарата. В более общем плане, $2\dot{x}_0 = \omega y_0$ просто описывает эллиптическую периодическую относительную орбиту, центр которого совпадает с началом координат (местоположением главного космического корабля) [10]. В результате при $E = 0$ и $F = 0$ получаются три квадратные уравнения с четырьмя неизвестными — что приводит к бесконечному числу правдоподобных начальных условий для определения дальности полета — которые относятся только к центрированной периодической орбите. С применением этих условий к уравнениям. (28-32), тремя оставшимися ограничениями являются

$$c_7 \rightarrow 2z_0\dot{z}_0 - 3\omega x_0 y_0 = c_9 \quad (33)$$

$$c_8 \rightarrow 3\omega^2 y_0^2 - 4z_0^2 - 12\omega^2 x_0^2 + 4\omega^2 z_0^2 = c_{10} \quad (34)$$

$$\rho_0^2 = (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) \quad (35)$$

Эта система уравнений с x_0 в качестве независимой переменной и остальными параметрами начальные состояния в качестве зависимых переменных решаются аналитически. При этом оказывается, что существует восемь различных многообразий, содержащих бесконечно много решений. В частности, каждая из восьми относительных орбит, найденных для общего периодического случая (истинная орбита и ее зеркала, а также деформированная орбита и ее зеркала), теперь становится множеством возможных относительных орбит. Интересно, что тот же результат (E и F равны нулю) также может быть получен путем задания $x_0 = 0$ и $\dot{x}_0 = 0$. В сочетании с ограничением периодической орбиты ($\dot{y}_0 = -2\omega x_0$) это приводит к относительной орбите, которая остается на фиксированном расстоянии понижения от основной и совершает колебания взад-вперед по прямой линии во внеплоскостном направлении. (Такие относительные орбиты обычно называются колеблющимися орбитами.) Поэтому, возвращаясь к уравнениям (25-39) и полагая $x_0 = 0$ и $\dot{x}_0 = 0$, приходим к трем уравнениям для трех оставшихся неизвестных:

$$2z_0\dot{z}_0 = c_9 \quad (36)$$

$$4\omega^2 z_0^2 - 4z_0^2 = c_{10} \quad (37)$$

$$\rho_0^2 = y_0^2 + z_0^2 \quad (38)$$

Коэффициенты c_9 и c_{10} для колеблющейся орбиты могут быть сделаны идентичными коэффициентам для центрированной периодической орбиты (ограничение $2\dot{x}_0 = \omega y_0$) путем соответствующего выбора y_0 , z_0 и \dot{z}_0 . Это означает что история определения дальности для

внеплоскостных колебаний на постоянном отклонении от центра неотличима от истории дальности для централизованной периодической орбиты.

Таким образом, если периодическая относительная орбита ($\dot{y}_0 = -2\omega x_0$) также ограничена либо центрированной ($2\dot{x}_0 = \omega y_0$), либо колеблющейся ($x_0 = 0$ и $\dot{x}_0 = 0$), то существует восемь многообразий из бесконечно большого числа допустимых центрированных периодических орбит наряду с четырьмя допустимыми колеблющимися орбитами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены возможности межспутниковой навигации с использованием измерения только межспутниковой дальности. Предложено матричное по кадровое описание процесса взаимодействия. Указано на возможности значительного уменьшения передаваемой информации в случае плоских орбит. Рассмотрена возможность описания состояния спутника с помощью скалярных инвариантов, определён их физический смысл и показана сводимость к простейшим известным в ряде частных случаев. Указано также, что вычисление этих коэффициентов может проводиться один раз за всё время движения спутников. Показана причина возникновения зеркальных траекторий, которых в плоском случае 2, а в пространственном 4. Показано, что анализ строения этих коэффициентов позволяет определять особенности траекторий.

К ограничениям, принятым в статье, относятся: предположение о строго круговой орбите спутников, предположение об отсутствии внешних возмущающих факторов и невозможность выбора истинного расположения спутников среди зеркальных траекторий и ограничения в некоторых моментах измерения состояния спутников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Clohessy, W., and Wiltshire, R., "Terminal Guidance for Satellite Rendezvous," *Journal of the Aerospace Sciences*, Vol. 27, No. 9, 1960, pp. 653–658. doi:10.2514/8.8704
- [2] Woffinden, D., and Geller, D., "Observability Criteria for Angles-Only Navigation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 45, No. 3, 2009, pp. 1194–1208. doi:10.1109/TAES.2009.5259193
- [3] Herklotz, R. L., "Incorporation of Cross-Link Range Measurements in the Orbit Determination Process to Increase Satellite Constellation Autonomy," Ph.D. Dissertation, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA, Dec. 1987.
- [4] Cheng, M. K., "Gravitational Perturbation Theory for Intersatellite Tracking," *Journal of Geodesy*, Vol. 76, No. 3, 2002, pp. 169–185. doi:10.1007/s00190-001-0233-6-001-0233-6
- [5] Peck, M., "Chips in Space," *IEEE Spectrum*, Vol. 48, No. 8, 2011, pp. 42–47. doi:10.1109/MSPEC.2011.5960166
- [6] Rundberg, C., and Lovell, T. A., "Relative Spacecraft Navigation via Inter-Satellite Range Measurements," 39th AAS Guidance, Navigation, and Control Conference, AAS Paper 2016-016, Feb. 2016.
- [7] Christian, J., "Observability and Solution Technique for Range-Only Relative Navigation," 39th AAS Guidance, Navigation, and Control Conference, AAS Paper 2016-132, Feb. 2016.
- [8] Maessen, D., and Gill, E., "Relative Orbital Element Estimation and Observability Analysis for Formation Flying Satellites Using InterSatellite Range Measurements Only," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA Paper 2010-7885, Aug. 2010. doi:10.2514/6.2010-7885
- [9] Wang, J., Butcher, E. A., and Lovell, T. A., "Use of Nonlinearities for Increased Observability in Relative Orbit Estimation," AAS Astrodynamics Specialist Conference, AAS Paper 2015-623, Aug. 2015. [24] Wang, J., Butcher, E. A., and Lovell, T. A., "Analysis of Ambiguous Orbits in Sequential Relative Orbit Estimation with Range-Only Measurements," AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, AAS Paper 2016-375, Feb. 2016.
- [10] Vallado, D., *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, 3rd ed., Springer, New York, 2007, pp. 389–417.
- [11] Carter, T., and Humi, M., "Clohessy–Wiltshire Equations Modified to Include Quadratic Drag," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 6, 2002, pp. 1058–1063. doi:10.2514/2.5010 [27] Schweighart, S. A., and Sedwick, R. J., "High-Fidelity Linearized J2 Model for Satellite Formation Flight," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 6, 2002, pp. 1073–1080. doi:10.2514/2.4986
- [12] London, H. S., "Second Approximation to the Solution of the Rendezvous Equations," *AIAA Journal*, Vol. 1, No. 7, 1963, pp. 1691–1693. doi:10.2514/3.1896

RELATIVE NAVIGATION USING INTER-SATELLITE RANGE MEASUREMENT PART 2

Bulychev G.G.
Department of Higher Mathematics,
Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA
Moscow, Russian Federation
bulychev@mirea.ru

Fedorov V.B.
Department of Higher Mathematics,
Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA
Moscow, Russian Federation
feodorov@mirea.ru

Abstract – There are a number of emerging and important operational scenarios in which relative navigation using only ranging measurements may be desirable, such as the formation of spacecraft capable of performing inter-satellite ranging over a UHF/VHF link. Despite the existence of such scenarios, there is little published work on the problem of range-only relative navigation. This work examines the problem of range-only relative navigation and establishes that there are four possible relative trajectories for general 3D motion that would result in exactly the same temporal sequences of range measurements. Various special relative orbits can create other sets of possible relative trajectories, such as two, eight, or infinitely many. Once it has been established that there are many solutions (two, four, eight, or infinitely many), a method is described to quickly calculate these solutions to initially determine the relative orbit. Another significant result of the work is the possibility of reducing computations by splitting the problem into two independent problems of smaller dimension. This fact makes it possible to limit the data, calculations, and therefore the computational resources, unless all satellite state data are required for relative navigation. The third important result is the possibility of reducing the number of frames and information reading intervals if the satellite was not subject to any external disturbances. The work was written exclusively based on data from foreign sources.

Keywords – expert inspection; printed circuit board; topology; printing module; flaw detection; X-ray analysis; microvision analysis.

УДК 62-529

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВИБРОИСПЫТАНИЙ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА STM32

Груненко Н.В.
кафедра «Автоматика и управление»
Московский Политех
Москва, Россия
grunenkovnv@yandex.ru

Аннотация — Данная статья посвящена разработке системы вибрационных испытаний на базе микроконтроллера (МК) STM32F407 для выявления виброустойчивости печатных плат с целью повышения надежности производимой электронной продукции. МК используется в качестве задающего, сравнивающего и управляющего (корректирующего) устройства. Приводится функциональная схема самонастраивающейся системы и ее функционирование в различных режимах работы подсистем (поиска и поддержания резонанса). Рассматриваются сигналы на выходе инфракрасного датчика в режиме поиска резонансной частоты до фильтрации шумов и после. Был собран прототип системы. Приводится преимущество использования метода прямого цифрового синтеза (DDS) над методом изменения значений регистра таймера МК. В рассматриваемой системе виброиспытаний используется теневой оптический датчик колебаний и электродинамический вибронный стенд (ЭДВ).

Ключевые слова — вибрационные испытания, печатные платы, Stm32, NI Multisim.

ВВЕДЕНИЕ

Системы электроники и автоматики во многом влияют на управляемость транспортом и безопасность его эксплуатации, поэтому их совершенствование является основной задачей в автомобиле и авиационной технике.

Для повышения надежности производимой электронной продукции разрабатываются специальные методы и средства испытаний для выявления дефектов.

Основными механическими воздействиями являются вибрационные и ударные нагрузки. Одним из наиболее опасных видов воздействия на электронику в режиме эксплуатации является вибрация. Вибрация вызывает деформацию и механические напряжения в элементах РЭА, что может привести к отслаиванию паяных соединений от диэлектрического основания, разрыву проводника, разрушению выводов и мест паяных элементов, нарушению контактов разъемов [1].

Для таких испытаний применяют вибрационные установки, обладающие широким частотным диапазоном. В процессе испытаний проводят контроль параметров с учетом критериев годности изделия [2].

На вибрационных установках используют различные типы датчиков параметров колебаний электронных плат или возбудителей колебаний.

В рассматриваемой системе используется теневой оптический датчик колебаний [3].

I. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Электронные печатные платы активно используются в автомобилестроении, авиационной технике, а также в космической технике. В процессе эксплуатации на них воздействуют удары, вибрации и статические нагрузки. При повышенных механических нагрузках на плату наблюдается нарушение целостности паяных соединений. Особо опасными видами механических нагрузок являются вибрации, далеко не каждое устройство способно их выдерживать.

Для возможности введения устройства в эксплуатацию необходимо проводить тестирования на виброустойчивость. В процессе испытаний проводят контроль параметров с учетом критериев годности изделия.

II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

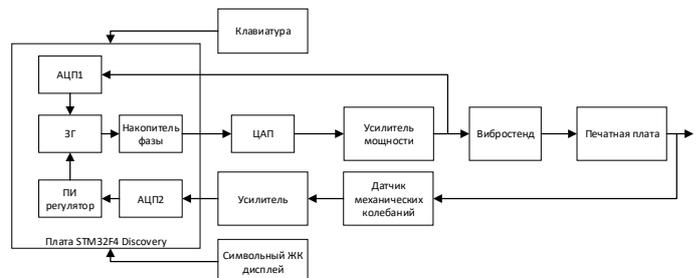


Рис. 1. Функциональная схема самонастраивающейся системы

Система построена на базе микроконтроллера STM32F407, выступающий в роли задающего генератора и сравнивающего устройства, внешнего цифро-аналогового преобразователя, усилителя мощности, электродинамического вибростенда и инфракрасного оптического датчика механических колебаний. Большие возможности микроконтроллера позволяют ему выполнять функции задающего, сравнивающего и управляющего устройства, а также позволяют использовать его для вычисления регулируемой величины или некоторого косвенного критерия качества регулирования.

Алгоритм работы системы следующий. Оператором задается начальное значение частоты синусоидального сигнала и шаг, с которым будет производиться поиск, а затем производится запуск системы. Контроллер

генерирует синусоидальный сигнал определенной частоты и меняет ее с установленным ранее шагом, при этом получая на вход АЦП сигнал с выхода датчика колебаний. Полученный аналоговый сигнал сохраняется в память микроконтроллера для дальнейшего его разложения на спектр быстрым преобразованием Фурье [4]. Это позволяет определить не только основную гармонику, но и выявить дополнительные, если объект многорезонансный. При приближении к резонансу, микроконтроллер уменьшает шаг поиска вдвое.

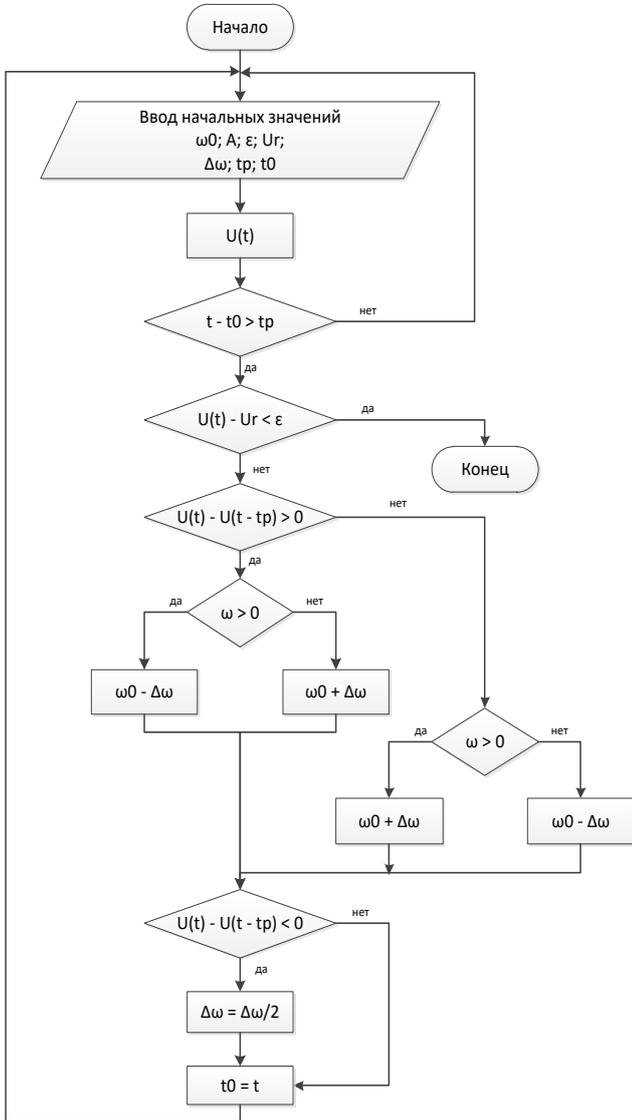


Рис. 2. Блок схема алгоритма поиска резонанса

Когда была найдена резонансная частота колебаний испытуемого изделия, система переходит в режим поддержания резонанса. В этом режиме контроллер увеличивает амплитуду выходного сигнала и делает пробные шаги с минимальным значением установки частоты [5].

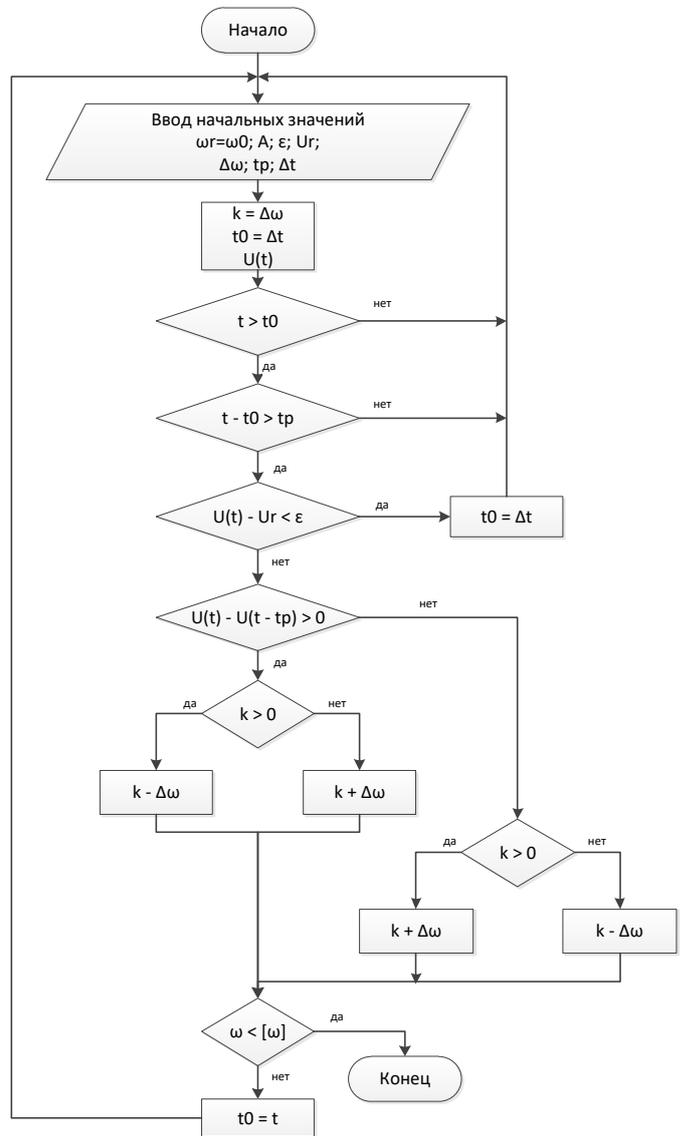


Рис. 3. Блок схема алгоритма поддержания резонанса



Рис. 4. Сигнал на выходе ЦАП микроконтроллера

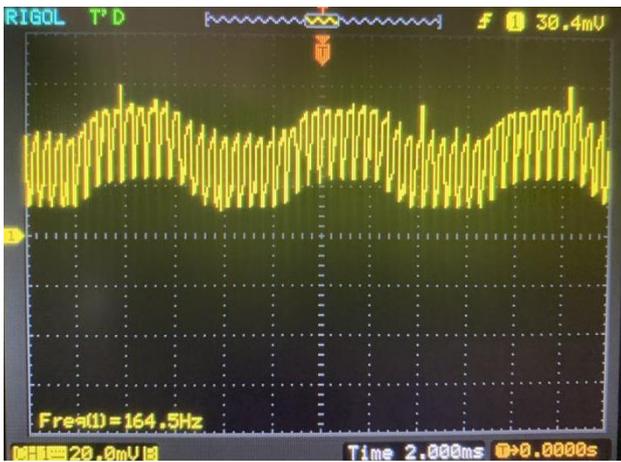


Рис. 5. Сигнал на выходе датчика колебаний

На рисунках 5 и 7 показаны осциллограммы приближения к резонансной частоте. Видна амплитуда колебаний испытуемого образца при резонансе и при отдалении от него.



Рис. 6. Сигнал на выходе ЦАП при поиске резонанса



Рис. 7. Сигнал на выходе датчика при поиске

На рисунках 4 и 6 можно заметить дискретность сигнала. Связано это с использованием внутреннего таймера микроконтроллера и таблицы из 64-х значений

мгновенной фазы синусоидального сигнала для изменения частоты при поиске. Данный вид синтеза на частотах свыше 1000 Гц дает шаг установки частоты 0.3 Гц, а на частотах от 10 до 200 Гц – 0.001 Гц, так как количество значений фазы фиксировано. Решением данной проблемы стало применение метода прямого цифрового синтеза с использованием 20-разрядного аккумулятора фазы и внешнего 10-разрядного ЦАП. Этот метод не имеет ограничения в размерности таблицы значений фазы, но для экономии памяти используется только четверть периода синусоиды. Такой подход позволил увеличить точность установки частоты в 0.02 Гц.

III. ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛА С ДАТЧИКА

Сигнал на выходе оптического датчика имеет значительную зашумленность, которую необходимо отфильтровывать, а полезный сигнал усилить до приемлемых для микроконтроллера значений. Фильтр был собран на операционных усилителях и проверен в режиме моделирования в программе Multisim.

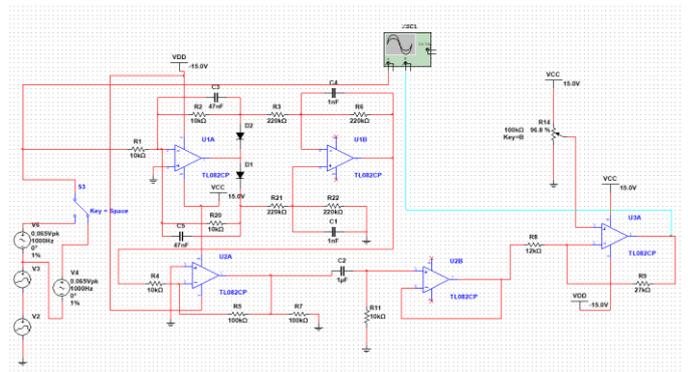


Рис. 8. Схема фильтрации и усиления аналогового сигнала с датчика

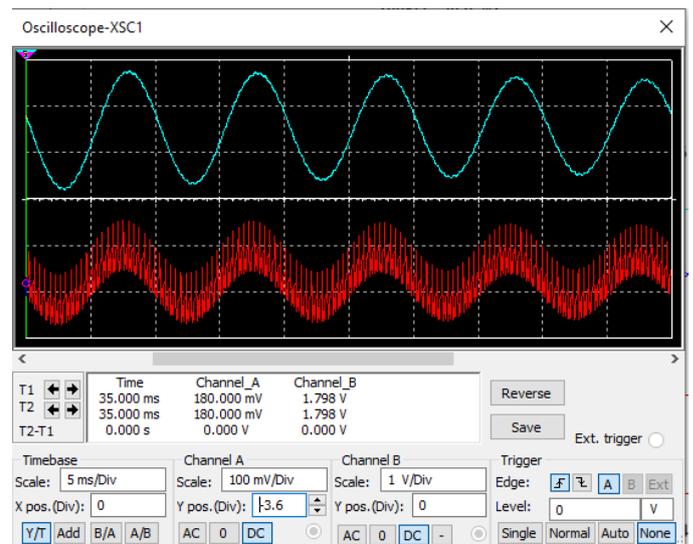


Рис. 9. Проверка работоспособности схемы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

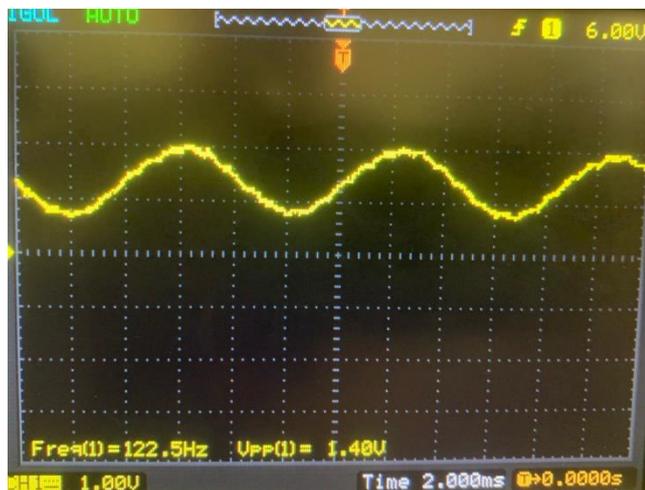


Рис. 10. Отфильтрованный сигнал с датчика

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система была проверена и показала свою работоспособность. Были получены следующие результаты:

- Переход с внутреннего ЦАП микроконтроллера на внешний с использованием метода накопления фазы повысил точность установки частоты с 0.3 Гц на 0.02 Гц;
- Проведено моделирование фильтрации сигнала на выходе датчика регистрации положения объекта и проверена работоспособность схемы.

- [1] Набоких В.А., Испытания автомобильной электроники: учебник – М.: ИНФРА-М, 2018. – 296 с.
- [2] Оценка виброустойчивости и вибропрочности печатных плат с помощью системы управления виброиспытаниями ZET 028, Журнал “ИСУП” № 1(91)_2021, С. 143-145.
- [3] Палагута К.А., Шаталов Д.А., Груненко Н.В., «Разработка и исследование теневого оптического датчика для усталостных вибрационных испытаний», В сборнике: Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Сборник научных статей 5-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Редколлегия: А.А. Горохов. 2020. С. 208-211.
- [4] Palaguta K.A.; Grunenko N.V.; Shiryaev V. A., Shadow optical sensor of linear dimensions and displacements based on a charge-coupled photodetector // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Sochi, 15-19 May 2023)
- [5] K. Palaguta; V. Bebenin; N. Grunenko, Simulation of Subsystem for Providing Resonant Mode of Operation of Automated Installation for Conducting Fatigue Vibration Tests // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Sochi, 18-22 May 2020)

DEVELOPMENT OF A VIBRATION TESTING SYSTEM BASED ON THE STM32 MICROCONTROLLER

Grunenkov N.V.

Department of Automation and Control

Moscow Polytechnic

University Moscow, Russia

grunenkovn@yandex.ru

Abstract — This article is devoted to the development of a vibration testing system based on the STM32F407 microcontroller (MC) to identify the vibration resistance of printed circuit boards in order to increase the reliability of manufactured electronic products. The MC is used as a setting, comparing and controlling (correcting) device. A functional diagram of a self-adjusting system and its functioning in various operating modes of subsystems (search and maintenance of resonance) is given. The signals at the output of the infrared sensor are considered in the resonant frequency search mode before and after noise filtering. A prototype of the system was assembled. The advantage of using the direct digital synthesis (DDS) method over the method of changing the values of the MK timer register is given. The vibration testing system under consideration uses a shadow optical vibration sensor and an electrodynamic vibration stand (EDV).

Keywords — vibration tests, printed circuit boards, Stm32, NI Multisim.

УДК 629.3.066

ГЛОНАСС В СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ДТП С УЧАСТИЕМ ДВУХКОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Никитин В.В.
ООО «ФИКОМ-ИТ»
Москва, Россия
nvv@ficom-it.ru

Аннотация — В статье рассмотрены принципы работы инерциальной системы навигации с использованием датчиков на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС), а также метод комплексирования инерциальной (ИСН) и спутниковой навигационной системы (ГНСС). Описаны основные типы погрешностей датчиков, применяемых в ИСН. Предложен способ их калибровки. С целью исследования точности навигационного решения проведен эксперимент и приведены траектории движения с ИСН и ГНСС системами навигации. Показано, что использование комплексирования навигационного решения позволяет значительно улучшить точность расчета траектории движения двухколесного транспортного средства. Так же показана достаточность использования инерциальной системы навигации совместно с данными одометра для определения координат дорожно-транспортного происшествия.

Ключевые слова — комплексирование; инерциальная навигационная система; фильтр Калмана; МЭМС.

ВВЕДЕНИЕ

В системе вызова экстренных и оперативных служб «ЭРА-ГЛОНАСС» при дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) одним из ключевых параметров является определение координат транспортного средства (ТС) в момент аварии, а также параметров его движения непосредственно перед ДТП. Параметры приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), применяемой в устройствах вызова экстренных и оперативных служб, устанавливаемых в ТС, имеют низкую точность, особенно в плотно застроенной городской среде, а также выдачу навигационного решения не чаще одного раза в секунду. Эти характеристики устройств при использовании на двухколесных ТС не позволяют точно оценить их скорость движения, а следовательно степень ущерба при ДТП. Так же значительное неизвестное влияние окружающей среды на радиосигнал принимаемый приемником ГНСС и низкое соотношение сигнал/шум вносят в навигационное решение ошибку либо делают его не валидным. [2, 3]. Решением данной проблемы может быть использование инерциальной навигационной

системы. Но для инерциальных навигационных систем присутствует эффект накопления ошибки, так как дисперсия ошибки определения координаты пропорциональна кубу времени интегрирования [1]. Поэтому, инерциальные навигационные системы сложно использовать без коррекции в течение продолжительного времени.

1. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

Будет рассмотрена инерциальная система навигации (ИСН) на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС), которые зачастую обладают низкой стоимостью [7] и являются и миниатюрными устройствами [8;9] с низким энергопотреблением [7]. ИСН состоит как минимум из двух датчиков: трехосных акселерометра и гироскопа. Акселерометр измеряет проекции удельных сил, действующих на датчик со стороны других тел. Гироскоп измеряет проекции абсолютной угловой скорости. В обоих случаях все проекции осуществляются на оси чувствительности датчика. У датчиков в идеальном случае оси чувствительности должны быть взаимно перпендикулярными и иметь одинаковую чувствительность, но на практике это не так и для компенсации в модели погрешностей вводятся соответствующие параметры. В системах навигации на базе бытовых МЭМС допустимо использовать метод Эйлера, полагая, что значения линейных ускорений и угловых скоростей постоянны во время всего периода семплирования Δt между эпохами $k-1$ и k .

Результатом работы ИСН являются расчетные значения позиции (p), скорости (v) и ориентации объекта (R). Эти значения можно объединить в вектор, который называется номинальным состоянием [2]:

$$\hat{x}_{ins} = [p, v, R] \quad (1)$$

В дополнении к номинальному состоянию вводят понятие истинного состояния x и ошибок δx .

$$x = \hat{x} \oplus \delta x \quad (2)$$

Погрешности инерциальных датчиков делятся на случайные и систематические. Случайные составляющие также называются случайными ошибками измерений. Их к тому или иному моменту времени нельзя предсказать, но можно описать их поведение. Математическая модель случайных составляющих определяется как последовательность суммы отсчетов белого шума с отсчетами процесса Маркова или фликкер-шума [10]. К систематическим погрешностям инерциальных датчиков относят отклонения действительных значений масштабных коэффициентов, не ортогональность осей, смещение нуля, а также несоосность осей акселерометра и гироскопа в составе ИСН от их номинальных значений. Эти отклонения являются параметрами датчиков. Отклонения масштабных коэффициентов задаются как процент от их номинального значения в 100%: так, отклонение в $\pm 1\%$ означает, что величина на выходе может лежать в пределах $[99, 101]\%$ от измеряемого значения. Определение систематических погрешностей измерительного прибора, а также их компенсация осуществляется калибровкой.

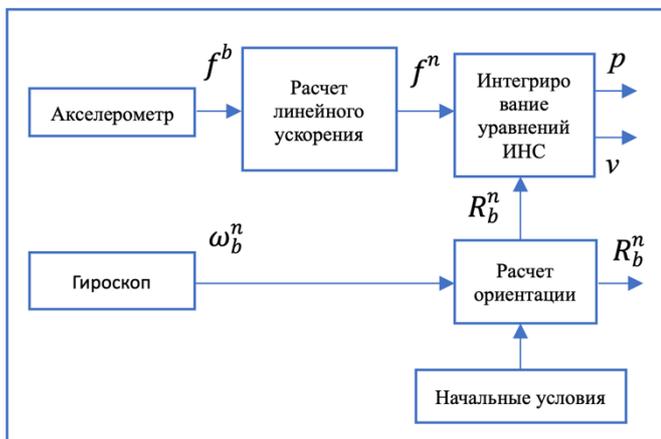


Рис. 1. Схема работы инерциальной системы навигации

II. КАЛИБРОВКА ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

При решении задачи позиционирования ТС применяются недорогие датчики на основе МЭМС. Их параметры приведены в документации производителя. В таблице 1 приведены допустимые отклонения параметров от номинального значения. Как правило параметры датчиков, построенные по одинаковой технологии схожи.

В работе [8] показано, что выполнение калибровки и последующая компенсация систематических погрешностей позволяет значительно снизить ошибки определения ориентации. В основе методов калибровки лежит измерение выходных сигналов при известном эталонном воздействии. Наиболее точные методы

предполагают использование программируемых наклонно-поворотных стенов: блок трехосных акселерометров или гироскопов заданным образом ориентируется в пространстве и/или вращается с известной скоростью. Затем измерения калибруемого прибора сравниваются с эталонными значениями. Данный способ является сложным и дорогим, так как требует специальное оборудование. Благодаря методике авторов работы [11], требования к точности поворотного стола и к количеству вращающихся осей могут быть существенно снижены. С учетом методов, представленных в работе [12] была сделана специальная оснастка для калибровки датчиков на устройстве, представленная на рисунке 2. В нее помещался прибор и выполнялась серия поворотов на каждую плоскость оснастки с паузой 1 секунда. При этом снимались показания датчиков и усреднялись. Исходя из выводов, сделанных в работе [8] для уточнения фактических значений параметров датчиков при их работе достижимая методом точность составляет $\approx 0.06\%$ для масштабных коэффициентов гироскопа, $\approx 0.12\%$ для коэффициентов взаимного влияния осей, $\approx 0.03^\circ$ для несоосности осей акселерометра и гироскопа при 95 % доверительном интервале.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ АКСЕЛЕРОМЕТРА И ГИРОСКОПА LSM6DS ФИРМЫ ST

Параметр	Акселерометр	Гироскоп
Предел измерений	$\pm 156.8 \text{ м/с}^2$	$2000^\circ \cdot \text{с}^{-1}$
Погрешность	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$
Нелинейность шкалы	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.2\%$
Неортогональность осей	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$
Смещение нуля при 25С	$\pm 0.8 \text{ м/с}^2$	$\pm 5^\circ \cdot \text{с}^{-1}$

III. СЛАБОСВЯЗАННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ

При слабосвязанной системе комплексирования навигационного решения ИСН и ГНСС вырабатывают независимые решения. При появлении связующего блока готовое навигационное решение от спутникового датчика уточняется с помощью фильтра Калмана на основе учета показаний инерциальной подсистемы. При этом каждая из составляющих навигационной системы работает отдельно и не влияет на функционирование другой подсистемы.



Рис. 2. Оснастка калибровки датчиков инерциальной системы навигации

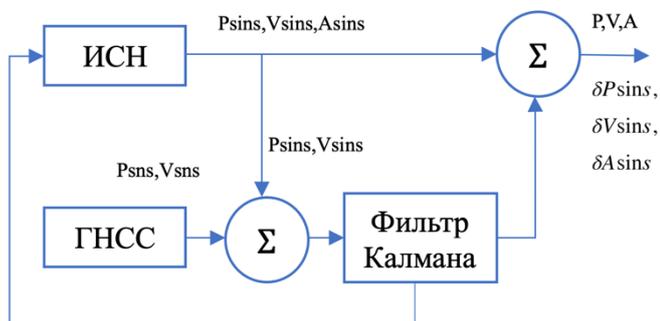


Рис. 3. Интеграция ГНСС и ИСН на основе слабосвязанной системы комплексирования

$P_{sins}, V_{sins}, A_{sins}$ – координаты, скорость и углы ориентации, вычисленные ИСН. P_{sns}, V_{sns} – координаты и скорость, вычисленные ГНСС. $\delta P_{sins}, \delta V_{sins}, \delta A_{sins}$ – оценки погрешностей определения координат, скорости и углов ориентации комплексированной ИСН и ГНСС.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для оценки эффективности алгоритма использовались данные полученные с устройства, оснащенного акселерометром LSM6DS от фирмы ST, навигационным приемником НИИМА ПРОГРЕСС ПРО-04, внешней антенной ГНСС установленном на двухколесном ТС (мотоцикл). Проверочный маршрут составлял порядка 1000 метров. В зоне эксперимента было устойчивое поле ГНСС. Для исключения переключения и одной спутниковой системы на другую, прием всех сигналов ГНСС кроме ГЛОНАСС в приемнике был отключен. Датчики ИСН были откалиброваны способом приведенным выше. По итогам данного эксперимента

были получены результаты представленные на рисунках 4, 5, 6.

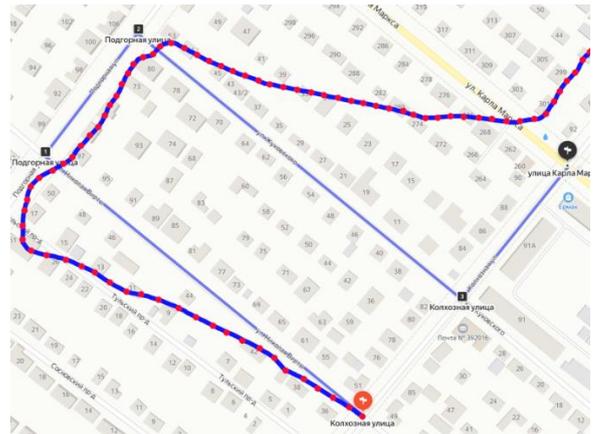


Рис. 4. Проезд по маршруту с использованием только инерциальной системы навигации

При использовании только инерциальной системы навигации, с простыми датчиками базе микроэлектромеханических систем (МЭМС), вычисленная траектория движения очень сильно отклонилась от маршрута (рисунок 4).

При использовании только спутниковой системы навигации вычисленная траектория движения совпадает с маршрутом с учетом погрешности ГНСС для данного типа приемника, что составляет 5–30 метров (рисунок 5).

При использовании комплексированного решения ГНСС и ИСН, а также привязки расчета траектории к графу движения по дорожной сети, результат получился наилучшим (рисунок 6).

После обработки данных полученных с использованием только ИСН, в расчет были добавлены данные с одометра. Данные одометра имеют погрешность до 5%. При этом, рассчитанная траектория получилась с точностью не более 50–60 метров к маршруту (рисунок 7).

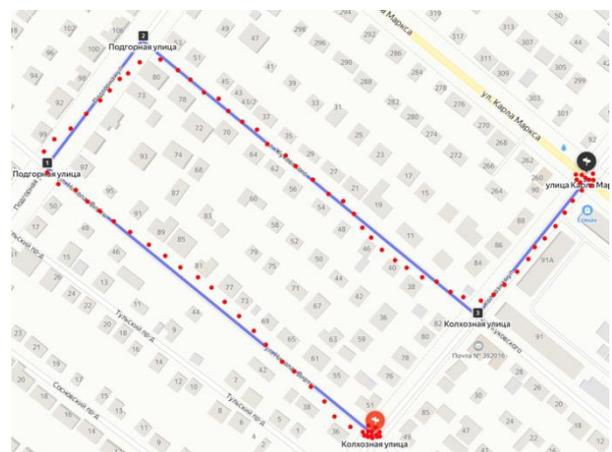


Рис. 5. Проезд по маршруту с использованием только спутниковой системы навигации

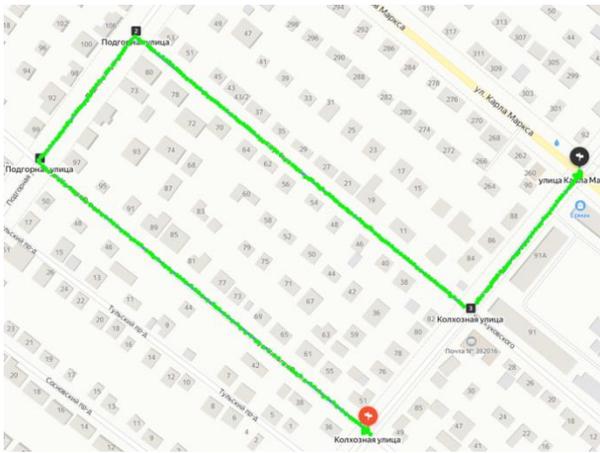


Рис. 6. Проезд по маршруту с использованием инерциальной системы навигации и данных с одометра

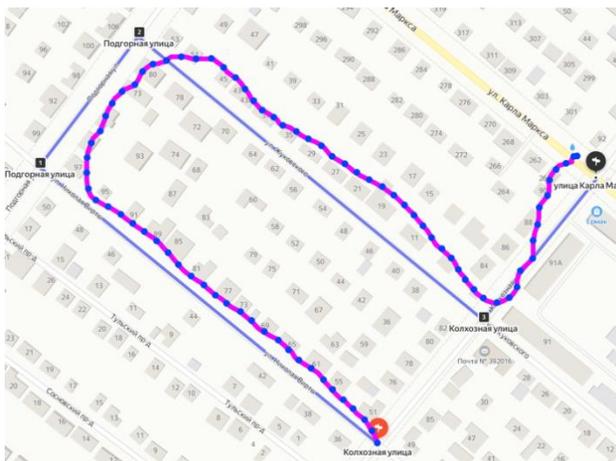


Рис. 7. Проезд по маршруту с использованием инерциальной системы навигации и данных с одометра

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных маршрутов подтверждает, что использование комплексированного навигационного решения с ГНСС и ИСН позволяет получить наилучшую рассчитанную траекторию движения. Но в условиях не стабильно работающего ГНСС (плотная застройка, помехи и т. п.) использование инерциальной системы навигации вместе с данными одометра позволит с достаточной точностью определить координаты места ДТП, а также степень ущерба. Это позволит значительно сократить время до оказания помощи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Salychev O.S. *Inertial systems in navigation and geophysics*. Moscow, Bauman MSTU Press, 1998, 352 p.
- [2] Grewal M.S., Weill L.R., Andrews A.P. *Global positioning systems, inertial navigation, and*

integration. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons, 2007, 408 p.

- [3] Матвеев В.В., Распопов В.Я. *Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем*. Распопов В.Я., ред. Санкт-Петербург, Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»», 2009, 278 с.
- [4] Stern A., Kos A. Positioning performance assessment of geodetic, automotive, and smartphone gnss receivers in standardized road scenarios [Текст] // IEEE access. — 2018. — Т. 6. — С. 41410—41428.
- [5] Fitzgerald A. M. MEMS Inertial Sensors [Text] // Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications. — 2020. — P. 1435—1446.
- [6] Sensortec B. Intelligent 9-axis absolute orientation sensor [Electronic Resource]. — 2019. — URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bno055-ds000.pdf> (visited on 01/10/2021).
- [7] Brodie M., Walmsley A., Page W. The static accuracy and calibration of inertial measurement units for 3D orientation [Text]. — 2008.
- [8] Возможности коррекции инерциальных навигационных систем на основе гравиметрических карт Земли [Текст] / В. В. Попадъев, А. И. Сорока, А. И. Полубехин, В. Ю. Цыганков [и др.] // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2015. — 222 (12).
- [9] Kempe V. *Inertial MEMS: principles and practice* [Text]. — Cambridge University Press, 2011.
- [10] A comparison between different error modeling of MEMS applied to GPS/INS integrated systems [Text] / A. G. Quinchia, G. Falco, E. Falletti, F. Dovois, [et al.] // Sensors. — 2013. — Vol. 13, no. 8. — P. 9549—9588.
- [11] Калибровка в инерциальной навигации [Текст] / Н. Б. Вавилова, И. А. Васинёва, А. А. Голован, А. В. Козлов [и др.] // Фундаментальная и прикладная математика. — 2018. — Т. 22, No 2. — С. 89—115.
- [12] Tedaldi D., Pretto A., Menegatti E. A robust and easy to implement method for IMU calibration without external equipments [Текст] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — IEEE. 2014. — С. 3042—3049.

GLONASS IN THE ACCIDENT PREVENTION SYSTEM INVOLVING TWO-WHEEL VEHICLES

Nikitin V.V.
FICOM-IT LTD
Moscow, Russia
nvv@ficom-it.ru

Abstract – The article discusses the principles of operation of an inertial navigation system using sensors based on microelectromechanical systems (MEMS), as well as a method for integrating an inertial navigation system (INS) and a satellite navigation system (GNSS). The main types of sensor errors used in ANN are described. A method for their calibration is proposed. To study the accuracy of the navigation solution, an experiment was carried out and movement trajectories with ISN and GNSS navigation systems were presented. It is shown that the use of integrated navigation solutions can significantly improve the accuracy of calculating the trajectory of a two-wheeled vehicle. The sufficiency of using an inertial navigation system together with odometer data to determine the coordinates of a traffic accident is also shown.

Keywords – integration; inertial navigation system; Kalman filter; MEMS.

УДК 621.396.969

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Корляков Д.С.

Институт радиоэлектроники
и информатики
Кафедра радиоэлектронных
систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
korlyakov@mirea.ru

Батейкина А.Л.

Институт информационных
технологий
Кафедра практической и
прикладной информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
anbatejkina@gmail.com

Шпак А.В.

Институт радиоэлектроники
и информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
shpak_a@mirea.ru

Аннотация — Рассмотрены методы обработки радиолокационных данных для формирования радиолокационного изображения поверхности Земли при помощи космических летательных аппаратов с синтезированной апертурой. Проведен сравнительный анализ алгоритмов построения изображения. Рассмотрены алгоритмы для построения объемного радиолокационного изображения.

Ключевые слова - радиолокация; данные; синтезированная апертура; объемные изображения

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные системы с синтезированной апертурой (в дальнейшем РСА) являются одним из эффективных способов получения изображений поверхности Земли. Радиолокационные изображения в отличие от оптических изображений могут быть получены независимо от времени суток или погодных условий, что является важным плюсом в изображениях РСА. Для этого необходимо обеспечивать возможности обработки больших потоков данных в реальном времени. Для этого предъявляют высокие требования к аппаратуре систем дистанционного зондирования Земли (в дальнейшем ДЗЗ). С выполнением данных требований и улучшением качества получаемого радиолокационного изображения увеличивается и количество данных необходимых для обработки, записи и передачи. Обработанные данные могут быть использованы, как для построения карты местности, так и для создание объемной структуры местности.

1. ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Существуют два метода получения радиолокационных данных применимых для построения радиолокационного изображения.

Простейшим методом со своими недостатками является метод реального излучения, излучения в текущий промежуток времени. Для этого на бортовой части летательного аппарата размещают радиолокационную станцию (в дальнейшем РЛС), которая осуществляет сбор информации с поверхности путем сканирования антенной в перпендикулярной плоскости относительно вектора направления скорости. Данные собираемые в результате

сканирования имеют разрешающую способность равную сектору с максимальным радиусом дальности действия РЛС. Недостатком такого метода является зависимость от ширины диаграммы направленности реальной антенны, т.к. разрешающая способность по азимуту в результате некогерентной обработке зависит от размеров антенны. Размер антенны ограничен габаритными возможностями размещения на борту летательного аппарата. Для увеличения разрешающей способности по азимуту, используются когерентные режимы работы, позволяющие сформировать синтезированную апертуру большего размера.

Другим методом для получения радиолокационных данных используется радиолокатор с синтезированной апертурой, который является бортовой когерентной радиолокационной системой бокового обзора. Эта система может быть размещена на летательных аппаратах таких, как авиационные или космические, движение которых используется для создания электронного моделирования чрезвычайно большой апертуры. Именно с помощью радаров получают радиолокационные данные, которые используют для построения двухмерных и трехмерных изображений высокого качества ДЗЗ. [3]

Суть метода синтеза апертуры заключается в том, что радиолокационные данные, полученные в каждом отдельном периоде зондирования, сохраняются совместно с данными о местоположении платформы, соответствующими этим периодам. Все эти данные сохраняются в течение определенного интервала времени. Расстояние, на которое переместится платформа в течение этого интервала, определяет размер синтезированной апертуры. Так на рисунке 1 показана зондирующая область с разных точек траектории полета. По окончании интервала все сохраненные на промежутке времени данные обрабатываются с помощью алгоритмов. Принцип похож на работу антенной решетки, элементы которой имеют те же позиции, что и положения летательного аппарата в моменты съемки. В дальнейшем данные, полученные в результате съемки за интервал, передаются для дальнейшей обработки и анализа.

На орбите размещены многие спутники, которые осуществляют сбор и передачу радиолокационных данных. Объем данных зависит от направленности деятельности и

точности ДЗЗ. В общедоступных сведениях есть данные со спутников sentinel и landsat.[6]

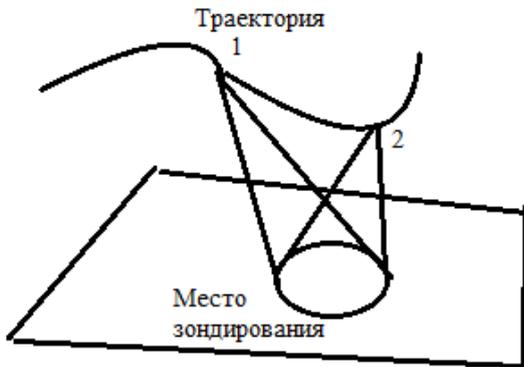


Рис. 1. Зондирующая область с разных точек

II. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Для обеспечения возможности РСА в режиме формирования трехмерной карты местности на носителе на некотором расстоянии от первой антенны устанавливается вторая антенна. Разнесение может выполняться, как правило, либо по высоте, либо в горизонтальной плоскости перпендикулярно направлению полета.

Для реализации качественной передачи данных должны выполняться требования по быстродействию и достоверности передаваемой информации. Передача данных от космического или летательного аппарата к приемнику наземного пункта используется сжатие исходных данных, пакетирование и помехоустойчивое кодирование.

В соответствии с рекомендациями консультативного комитета по космическим системам передачи данных (CCSDS) [2] синтезирована модель обработки данных РСА космического аппарата (рисунок 2), которая включает блок основных данных РСА и метаданных, кодер источника, блок перестановки данных, формирователь пакетов, помехоустойчивый кодер, блок формирования сигналов синхронизации, формирователь кадра, модулятор, блок генерации ошибок, демодулятор, блок выделения синхросигналов, помехоустойчивый декодер, блок восстановления пакета, блок перестановки данных, декодер источника, блок фокусировки данных.

Кодер источника предназначен для сокращения объема передаваемой информации. Для обеспечения надежности и достоверности передачи используется пакетная передача и помехоустойчивое кодирование. Формирователь пакетов создает пакет данных РСА, который передается на базовую станцию для дальнейшей обработки алгоритмами.



Рис. 2. Метод обработки данных РСА

III. АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Программы автоматизированного проектирования упрощают этапы обработки большого массива данных. С помощью них строятся матрицы, которые в дальнейшем преобразуются в радиолокационные изображения, которые могут быть получены в таких средах автоматизированного проектирования, как Matlab. Ранее в работах других людей, уже использовались алгоритмы для представления двумерных радиолокационных изображений. [1] Примером радиолокационного двумерного изображения может послужить рисунок 3, где слева изображена карта оптического диапазона, а справа уже карта построения в результате анализа радиолокационных данных. Качество изображения зависит от многих показателей.

Проникновение радиолокационного сигнала в почвенный покров зависит от параметров среды, влияющей на поглощение и рассеяние электромагнитного излучения. Интенсивность цветовой гаммы зависит от величины отраженной энергии, вернувшейся обратно к радиолокатору. Так на изображении (рисунок 3) видно, что в местах воды, яркость изображения практически нулевая из-за воздействия среды, а также можно увидеть пробелы в виде почвенного покрова. Критериев влияющих на построение изображения много. Основные можно выделить на три группы:

- Шероховатость поверхности
- Геометрия радиолокационного обзора и геометрия поверхности
- Влажность и электрические свойства поверхности

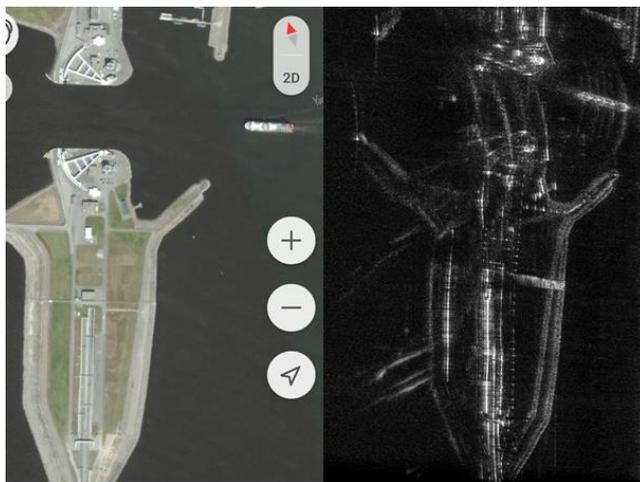


Рис. 3. Двумерное радиолокационное изображение

Более же показательным будет представление информации о местности в результате трехмерного построения. Использование этих данных возможно с использованием матрицы высот о исследуемой местности. Или же наоборот создание этой матрицы на основе радиолокационных данных. Методы расчета высоты представлены в работе [8]. Где рассматривают два варианта работы РСА в трехмерном режиме:

- 1) Получение радиолокационных данных осуществляется через два передатчика и два приемника.
- 2) Осуществление радиолокационных данных с помощью системы – один передатчик, два приемника.

Трехмерное представление данных показано на рисунке 4. Так ранее в работах людей [4] был построен рельеф местности с учетом реки.

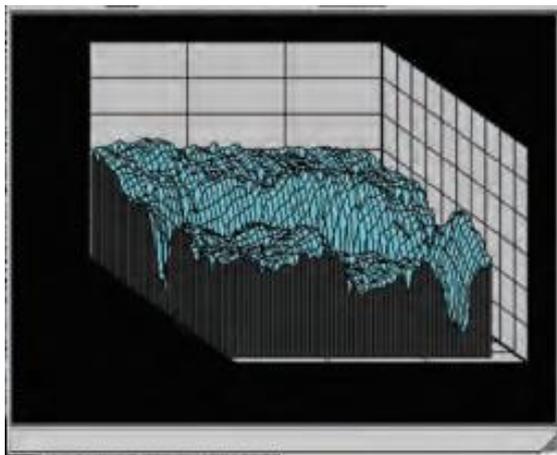


Рис. 4. Трехмерное представление данных

На ранее просмотренных примерах, можно заметить, что качество и доступность радиолокационных изображений ещё требует развития. Количество спутников на орбите не позволяет вести ДЗЗ в режиме реального

времени. Качество изображений требует улучшений, которые можно достичь внедрением новых методов обработки радиолокационных данных, приема и передачи данных, фильтрации шумов. Также высока актуальность развития трехмерных изображений, для последующего использования в программах для 3d проектирования, таких как КОМПАС-3D.

Результатом данного исследования является анализ методов и рассмотрение перспектив развития радиолокационного изображение. Перспективами развития являются:

- 1) Увеличение качества изображения
- 2) Разработка новых информационных представлений данных
- 3) Разработка точного 3-х мерного представления изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Богущ Р.П., Захарова И.Ю., Чертков В.М. Моделирование алгоритмов обработки данных радара с синтезированной апертурой космического аппарата для их передачи и формирования радиолокационного изображения//Вестник полоцкого государственного университета. Серия с, 2018
- [2] CCSDS 130.3-G-0.2 : CCSDS Draft Green Book. – Iss. 0.2. – Sagamihara, Japan, 2004.
- [3] Пурик Д.В. Оптимальный алгоритм формирования радиолокационного изображения в поляризационных радиолокационных системах с синтезированной апертурой// Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 8
- [4] Доросинский Л.Г., Виноградова Н.С., Иванов О.Ю., Обработка радиолокационных изображений: монография – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2021. – 334 с.
- [5] Деркачев В.А. Модель рассеяния радиолокационных сигналов от беспилотных летательных аппаратов// Известия ЮФУ. Технические науки
- [6] Рязанцев Л.Б., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Гнездилов М.В., Алгоритм формирования радиолокационных изображений с субметровым разрешением в малогабаритных РЛС с синтезированной апертурой//Цифровая обработка сигналов №2, 2018
- [7] Боргоякова А.А., Чермошенцев А.Ю. Методика создания цифровой модели местности по данным радиолокационной съемки со спутника sentinel-1/DOI: 10.33764/2618-981X-2019-6-2-120-127
- [8] Рожнецов А. А., Леухин А. Н., Безродный В. И., Воронин А. А., Коковихина Н. А. Формирование 3d-радиолокационных изображений в режиме сар// Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 8. С. 1173-1176.

METHODS FOR PROCESSING RADAR DATA

Korlyakov D.S.

Institute of Radio Electronics and
Informatics
Department of Radioelectronic Systems
and Complexesline RTU MIREA
Moscow, Russia
korlyakov@mirea.ru

Bateykina A.L.

Institute of Information Technologies
Department of Practical and Applied
Informatics
RTU MIREA
Moscow, Russia
anbatejkina@gmail.com

Shpak A.V.

Institute of Radio Electronics and
Informatics
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
shpak_a@mirea.ru

Abstract — Methods for processing radar data to form a radar image of the Earth's surface using synthetic aperture spacecraft are considered. A comparative analysis of image construction algorithms was carried out. Algorithms for constructing a three-dimensional radar image are considered.

Keywords - radar; data; synthetic aperture; volumetric images.

УДК 621.398

СИСТЕМЫ СБОРА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Третьякова Д.В.

Институт радиотехнических и
информатики

Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов

РТУ МИРЭА

Москва, Россия

chitaevadalila@gmail.com

Чистяков Е.А.

Институт радиотехнических и
информатики

Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов

РТУ МИРЭА

Москва, Россия

chistyakov@mirea.ru

Аннотация — В работе рассказана история о начале использования телеметрии в космосе. Рассмотрен принцип работы импульсно-кодовой манипуляции (PCM) и ее генерация. Описаны процессы мультиплексирования и демуплексирования. Также рассмотрен наиболее распространенный тип аналого-цифровых преобразователей, использующихся в телеметрических системах для измерения параметрических значений датчиков - АЦП последовательного приближения и проведено сравнение с АЦП параллельного типа.

Ключевые слова — телеметрия, космос, импульсно-кодовая модуляция, мультиплексирование, демуплексирование, АЦП последовательного приближения.

ВВЕДЕНИЕ

Окружающий нас мир содержит огромное количество различных объектов и явлений, которые могут быть охарактеризованы набором тех или иных параметров. Большинство таких параметров носят количественный недискретный, так называемый аналоговый характер. Развитие науки и техники сделало возможным изучение физических величин, недоступных для восприятия человеческими органами чувств. В таких случаях измерение параметров изучаемых процессов возлагается на специализированную аппаратуру. При этом для анализа, оперирования, передачи и хранения количественной параметрической информации результатов измерений используется числовой вид.

Например, для приема параметрической информации, ее обработки, упорядочивания и передачи в удобном для получателя (в подавляющем большинстве случаев) цифровом виде предназначена отдельная категория устройств — системы телеметрии. В частности, телеметрические системы космических аппаратов служат для приема параметрической аналоговой информации датчиков, преобразования данной информации, как правило, в цифровой вид и передачи ее в форме телеметрических кадров для анализа на Землю посредством радиопередающих устройств либо в бортовой комплекс управления аппаратом для выработки соответствующих решений в процессе штатного функционирования.

I. ПОНЯТИЕ ТЕЛЕМЕТРИИ

Телеметрия — это набор методов сбора информации и измерения параметров, позволяющих отслеживать необходимые данные об объектах, которые находятся непосредственно рядом либо удаленно. Определяемое значение трансформируется в сигнал, передаваемый по каналу связи [1].

Телеметрия широко используется в сельском хозяйстве, водоснабжении и водоотведении, медицине, военном деле, авиации, космонавтике, автомобильном и железнодорожном транспорте, системах глобального позиционирования и т.д. [2]

Космическая телеметрия: использование телеметрии для передачи с космической станции результатов измерений, проведенных на космическом корабле, включая данные, относящиеся к работе космического корабля.

История телеметрии в ракетной технике берет свое начало с исследования немецкой баллистической ракеты V-2, части которой впервые попали в руки советских инженеров в 1944 г. Огромный интерес представляло все попадавшееся на глаза, в том числе организация системы управления, двигательная установка, использованные компоненты топлива, а также система телеизмерений «Мессина». В связи с тем, что на борту советских ракет аппаратуры, выполняющей подобные функции, не было, было принято решение досконально изучить принцип ее действия, входящие узлы, а также оборудования для приема и обработки снятой информации на Земле[4].

Таким образом, за точку отсчета в становлении отечественной телеметрии следует принять анализ немецкой ракеты V-2 телеметрической системы (ТС) «Мессина» (1944 г.). Данная система обладала следующими параметрами:

- Включала четыре измерительных канала;
- Имела частотное разделение каналов;
- Обладала частотой опроса одного канала 2 кГц;
- Регистрировалась наземной аппаратурой на фотоленте.

Конечно, после освоения иностранной ТС сразу приступили к созданию отечественной. Первая система получила название «Бразилионит», главным разработчиком которой являлся Г.И. Дегтяренко. Новая ТС была подобной изученной, но вместо четырех в ней присутствовало уже восемь измерительных каналов. Естественно, такого малого количества каналов катастрофически не хватало для обеспечения полета ракеты измерениями, в связи с чем попутно велись разработки новых ТС. В это время еще не применялись коммутаторы, реализующие функции подключения нескольких параметров (датчиков) на один канал, к реализации чего быстро пришли, ведь «медленные» параметры (температура, давление) незачем измерять с такой частотой. Разработанные коммутаторы позволяли реализовывать циклическое подключение до 20 параметров на один измерительный канал. Отсюда вторым

этапом развития отечественной телеметрии стало создание первой ТС «Бразилионит» 1947 г.

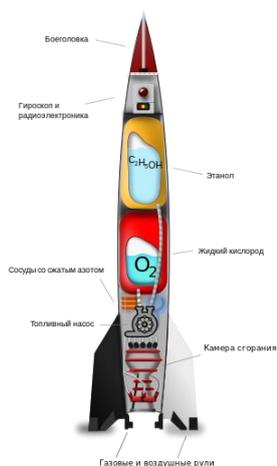


Рис. 1. Строение баллистической ракеты V-2

II. ИМПУЛЬСНО-КОДОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Принцип работы импульсно-кодовой модуляции (PCM), используемый для передачи данных в телеметрических системах КМТ:

Для беспроводной передачи нескольких аналоговых сигналов необходимы несколько различных частот передачи, а также множество приемников, работающих на разных частотах. Такая организация системы является невероятной сложной, дорогой и ее габариты не позволят разместить ее на валу. Для решения этой проблемы при передаче данных с нескольких измерительных каналов сигнал необходимо обрабатывать таким образом, чтобы его передача была возможна на одной частоте с очень высокой скоростью.

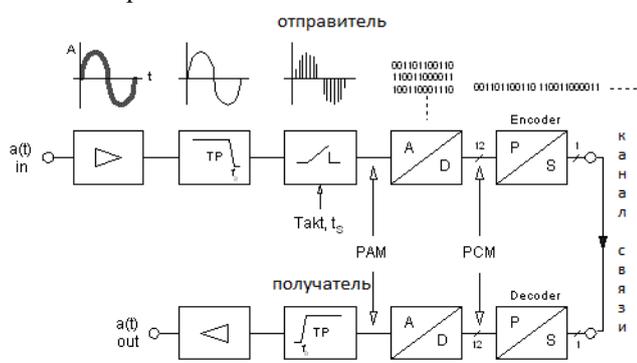


Рис. 2. Генерация PCM сигнала

Аналоговый сигнал $a(t)$ первоначально усиливается и фильтруется в его полосе пропускания (рис. 2). За этим следует важный шаг - дискретизация непрерывного измерительного сигнала. Электронный переключатель, управляемый генератором тактовых импульсов, принимает отдельные отсчеты от сигнала, тогда как амплитуда импульса во времени соответствует мгновенному значению аналогового входного напряжения. Выход электронного переключателя представляет собой

импульсный модулированный сигнал, сигнал РАМ. Теорема выборки указывает минимальную частоту, с которой должен отбираться аналоговый сигнал, чтобы исходный сигнал можно было восстановить из шаблонов без потери информации [5].

Частота дискретизации (f_s) должна превышать вдвое наибольшую частоту, содержащуюся в аналоговом сигнале (f_g):

$$f_s > 2 \cdot f_g \quad (1)$$

На практике от 4 до 5 выборок принимается на полосу пропускания ГГц. Эффект импульсной амплитудной модуляции становится более ясным, если смотреть на сигналы во временной и частотной области. Во время сканирования создается последовательность импульсов, которая после анализа Фурье может быть представлена компонентом постоянного тока и суммой синусоидальных напряжений, которые являются целыми и кратны основной частоте. В частотной области импульсы выборки систематически генерируют спектральные линии f_s друг от друга. Справа и слева от этих несущих частот появляются боковые полосы модуляции - аналогичные амплитудной модуляции - с верхними и нижними боковыми полосами в $f_s - f_g$, $f_s + f_g$, $2f_s + f_g$, $2f_s - f_g$ и т.д. Информация находится в каждой боковой полосе, но для дальнейшей передачи используется только базовая полоса. Из частотной области также становится очевидным, что по мере увеличения частоты отсечки сигнала боковые полосы модуляции будут расширяться и разрушаться. В этот момент возникает так называемое «псевдоснижение», которое может быть предотвращено только более высокой частотой дискретизации. На практике эта проблема не возникает, потому что сигнал уже ограничен полосой на входе через фильтр сглаживания.

Импульсно-модулированный сигнал на рис. 2 по-прежнему является аналоговой формой входного сигнала. Тем не менее, лучше всего сигнал передается и обрабатывается в цифровом формате. Для окончательного преобразования и кодирования сигнал РАМ подается на 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь. АЦП преобразует отдельные импульсы РАМ в 12-битные слова в соответствии с их амплитудой тока, цифровое разрешение составляет 1024 точки. Таким образом, импульс РАМ с амплитудой 1 вольт оцифровывается с разрешением < 1 мВ. Оцифрованный сигнал РАМ называется PCM-сигналом. За 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем следует параллельный/последовательный преобразователь, который преобразует 12-разрядные слова в последовательный битовый поток данных и позволяет передавать сигнал по проводам, оптическому волокну или по радиочастотной линии связи. Для того, чтобы приемник мог синхронизироваться с потоком последовательных данных, так называемые биты синхронизации передаются перед каждым словом данных.

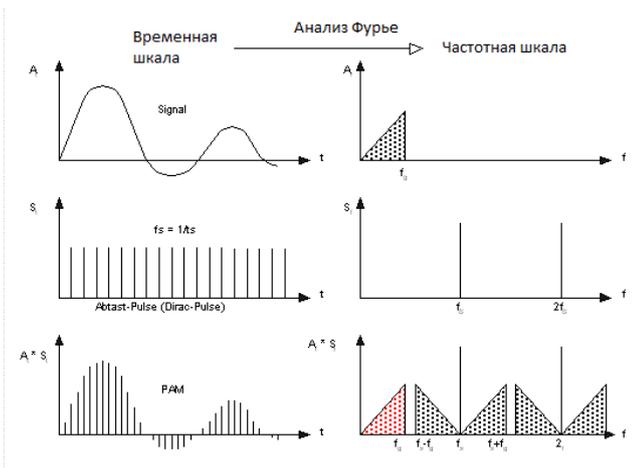


Рис. 3. Отображение произвольного сигнала, его спектра и дискретизации с временной шкалы на частотную

На принимающей стороне происходит то же самое, только в обратной последовательности. После последовательного/параллельного преобразования 12-разрядные слова преобразуются в сигналы PAM с использованием D/A-преобразователей и сглаживаются низкочастотным фильтром дискретного времени до амплитудно-непрерывных сигналов. Каждое отдельное значение сигнала равно среднему значению соответствующего интервала квантования. После усиления и регулировки уровня появляется исходный сигнал измерения $a(t)$.

III. МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ И ДЕМУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ

Мультиплексирование позволяет осуществлять многоканальную синхронную передачу каналов ИКМ. Как можно видеть из рисунков 2 и 3, импульсы выборки каждого канала занимают ограниченный период времени и между ними существуют относительно большие промежутки свободного времени. В соответствии с методом мультиплексирования с временным разделением 12-битные кодовые слова множества сигналов, подлежащих передаче, могут быть переданы последовательно во времени, так что они не влияют друг на друга, а заполняют только свободные промежутки. Это создает мультиплексированный сигнал РСМ. Основной принцип временного чередования нескольких сообщений (кодовых слов) реализуется таким образом, что они могут передаваться по одному радиоканалу, как показано на рисунке 4.

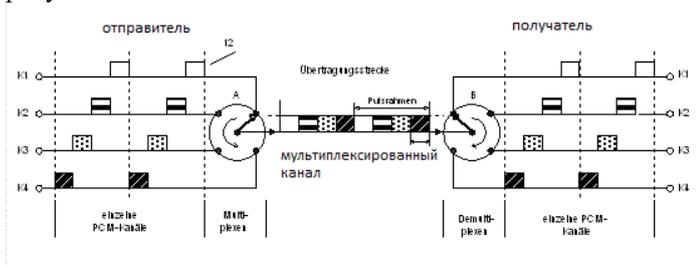


Рис. 4. Мультиплексирование и демультиплексирование

Процессы мультиплексирования обрабатываются полностью в электронном виде. Чтобы объяснить этот принцип, на рисунке 4 показаны четыре блока данных, которые циклически сканируются вращающимся переключателем А. Синхронизируя последовательность входящих кодовых слов, переключатель А переключается на следующий вход. На выходе переключателя А имеется доступный сигнал РСМ. Период времени, в течение которого передается кодовое слово, называется временным интервалом. Битовая последовательность, содержащая кодовое слово каждого входного сигнала, называется импульсным кадром. В примере, показанном на рис. 4, импульсный кадр состоит из четырех кодовых слов входных сигналов K1 ... K4, расположенных рядом друг с другом.

Необходимая частота дискретизации мультиплекса для полной передачи цифровой информации.

$$f_s > 2 \cdot x \cdot f_g, x - \text{количество каналов (2)}$$

На принимающей стороне отдельные сигналы ИКМ восстанавливаются из мультиплексированного сигнала с временным разделением, т.е. 12-битные кодовые слова распределяются на соответствующие выходы. Циркуляционный переключатель В распределяет кодовые слова на четыре выхода в синхронном режиме. Как и в случае мультиплексирования с временным разделением на стороне передатчика, процессы демультиплексирования полностью идентичны.

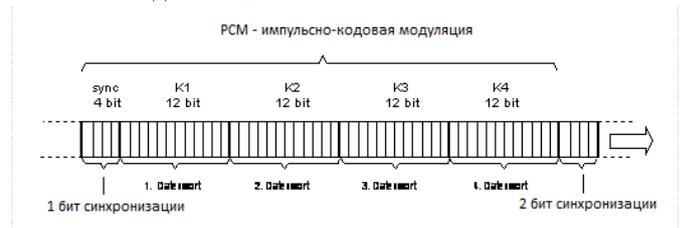


Рис. 5. РСМ импульсно-кодовая модуляция

Параметры, измеряемые телеметрическими системами, могут носить как электрический характер (напряжение, ток, сопротивление, заряд, емкость, частота сигнала и т. д.), так и неэлектрический характер (температура, сила, давление, интенсивность излучения, ускорение, величина длины перемещения, угол поворота и др.). В системах количественной оценки таких параметров сначала производится преобразование неэлектрических величин в электрические — например, температура объекта может характеризоваться сопротивлением установленного на нем терморезистора либо напряжением горячего спая термопары; величину линейного перемещения либо угла поворота можно оценить с помощью напряжения на механически связанном с объектом подвижном выводе переменного резистора, включенного по схеме резистивного делителя; интенсивность излучения можно преобразовать в напряжение с помощью схем на основе фоточувствительных полупроводниковых приборов. Кроме того, многие электрические величины также нуждаются в преобразовании для более удобного измерения. Так, напряженность магнитного поля может характеризоваться

напряжением на выходе датчика Холла, емкость датчика может быть использована в схеме релаксационного генератора, частота сигнала с выхода которого может применяться для непосредственного подсчета колебаний в единицу времени. Как правило, большинство измеряемых параметров преобразуется в пропорциональную величину электрического напряжения: $U = F(A)$, где A — некоторый аналоговый параметр, F — функция преобразования аналогового параметра в электрическое напряжение.

IV. АЦП ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

В процессе преобразования аналоговой информации в цифровой вид участвует одно из наиболее важных устройств — аналого-цифровой преобразователь. На вход аналого-цифрового преобразователя поступает аналоговый сигнал, на выходе пользователь получает цифровой код, пропорциональный отношению уровня входного напряжения к уровню известного опорного напряжения.

Над полученным кодом достаточно просто производить математические операции, в том числе с помощью средств вычислительной техники, сохранять его на носителях информации, передавать в другие системы, а главное — рассчитывать исходное значение измеряемого параметра с помощью обратной функции $A = F^{-1}(U)$.

АЦП различаются по своей архитектуре, в том числе АЦП параллельного типа, АЦП последовательного приближения, интегрирующие АЦП, сигма-дельта АЦП и другие.

Наиболее распространенным типом аналого-цифровых преобразователей, использующихся в телеметрических системах для измерения параметрических значений датчиков, является АЦП последовательного приближения.

Измеряемое входное напряжение поступает на неинвертирующий вход аналогового компаратора C . В начале цикла измерения АЦП подается активный уровень сигнала $START$, по которому происходит установка счетчика CTR в состояние, соответствующее первому коду цикла измерения. Одновременно производится обнуление триггеров T . Дешифратор DC вырабатывает сигнал логической единицы по выходу $Y1$, который позволяет мультиплексору подать на вход старшего разряда данных MSB (most significant bit) встроенного цифро-аналогового преобразователя DAC . Остальные разряды данных ЦАП принимают значение логического нуля, поскольку триггеры результата обнулены. Напряжение с выхода ЦАП подается на инвертирующий вход компаратора C . Если напряжение ЦАП, соответствующее в данном случае $U_{оп}/2$, больше напряжения $U_{вх}$, в первый триггер результата записывается значение логического нуля, иначе — значение логической единицы.

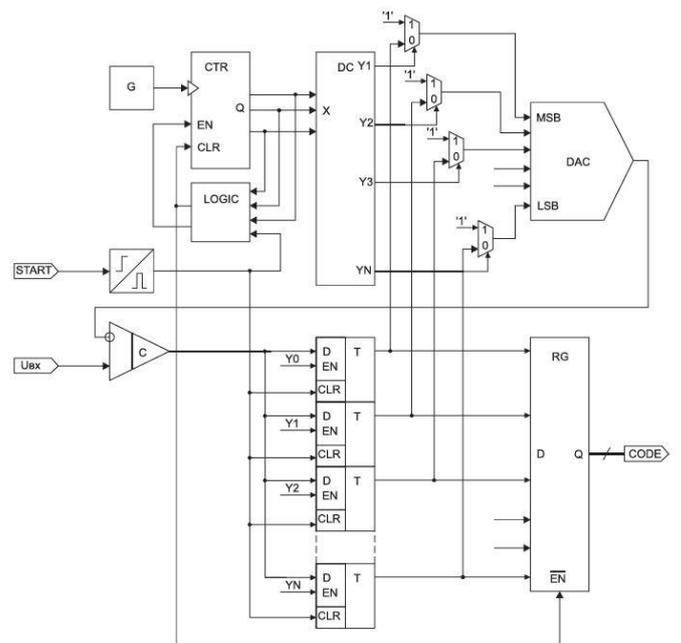


Рис. 6. Упрощенная функциональная схема АЦП с параллельным выходом

После этого АЦП переходит к следующему шагу преобразования. Значение счетчика CTR увеличивается на единицу. Дешифратор устанавливает сигнал логического нуля по выходу $Y1$ и сигнал логической единицы по выходу $Y2$, который позволяет мультиплексору подать на вход разряда DAC , следующего за старшим, сигнал логической единицы. Значение старшего разряда ЦАП при этом соответствует состоянию старшего разряда триггера результата. Оставшиеся младшие разряды данных ЦАП принимают значение логического нуля.

Далее алгоритм работы повторяется вплоть до последнего активного состояния счетчика. Таким образом, производится уравнивание напряжений $U_{вх}$ и ЦАП.

По завершении последнего такта работа схемы прекращается, счетчик переходит в исходное состояние, а выходной регистр RG принимает значение кода результата из триггеров T .

Работу схемы поясняет рис. 7, на котором приводятся измеряемое напряжение $U_{вх}$, изменение напряжения на выходе ЦАП и вырабатываемый выходной код АЦП.

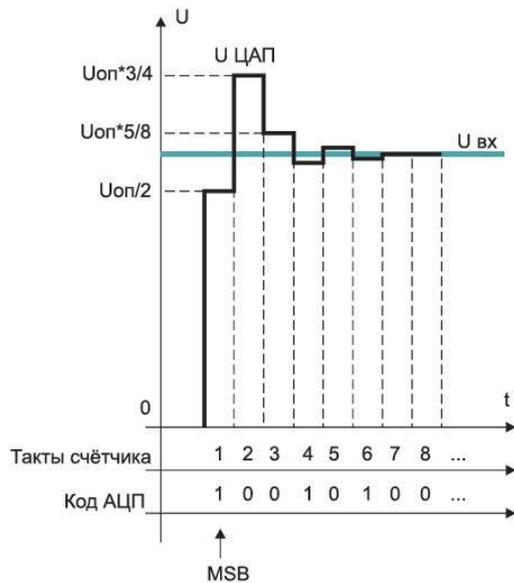


Рис. 7. Схема формирования выходного кода

Достоинство АЦП данного типа заключается в том, что преобразование всегда выполняется за известное количество тактов, равное разрядности выходного кода.

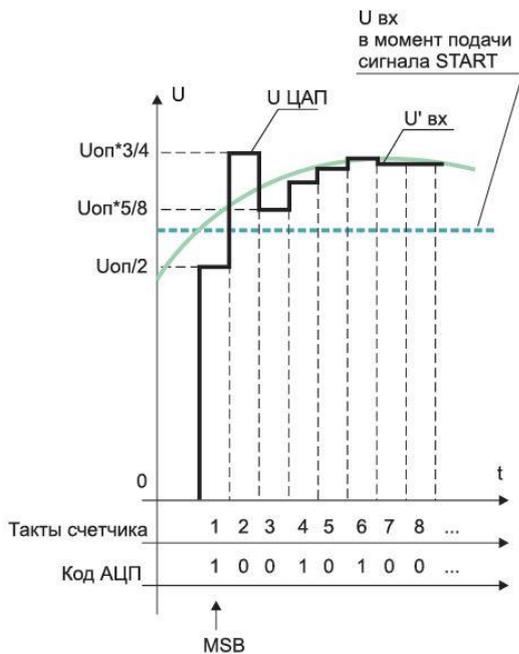


Рис. 8. Динамическая погрешность преобразования

Недостаток подобной схемы в том, что при изменении входного напряжения во время преобразования выходной код АЦП становится непропорциональным мгновенному значению $U_{вх}$ в момент подачи сигнала START, то есть появляется динамическая погрешность преобразования, что поясняет рис. 8.

Для устранения данного недостатка в схему АЦП вводится схема выборки/хранения (Т/Н — track and hold). Этот узел позволяет сохранять неизменным значение

измеряемого напряжения $U_{вх}$, поданного на АЦП в момент начала преобразования, на время полного цикла преобразования.

Для сравнения рассмотрим АЦП параллельного типа [7].

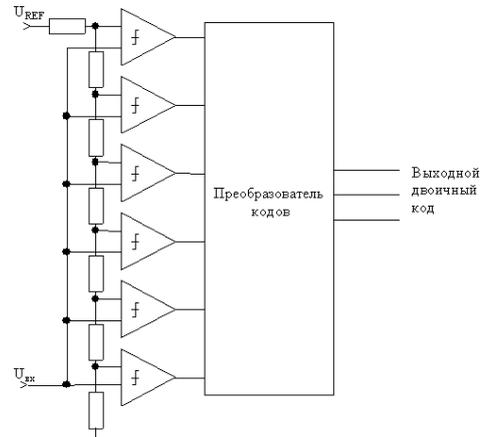


Рис. 9. Принципиальная схема трехразрядного параллельного АЦП

В этой схеме аналоговый сигнал $U_{вх}$ подается на соответствующий вход АЦП. Одновременно на другой его вход подается опорное напряжение U_{REF} . Это напряжение при помощи резистивного делителя, состоящего из резисторов с одинаковым сопротивлением, делится на семь одинаковых уровней.

Основой параллельного аналого-цифрового преобразователя являются семь аналоговых компараторов, которые сравнивают входной сигнал АЦП с опорным напряжением, подаваемым на их второй вход. Если напряжение на входе компаратора превышает напряжение на его инвертирующем входе, то на выходе компаратора формируется напряжение логической единицы. Аналоговые компараторы по внутреннему устройству очень похожи на операционные усилители с дифференциальным входом. Отличием является наличие цифрового выходного каскада (с ТТЛ или ЭСЛ логическими уровнями).

Если напряжение на входе аналого-цифрового преобразователя меньше всех напряжений, подаваемых на опорные (инвертирующие) входы компараторов, то на всех выходах компараторов формируются нулевые уровни сигналов. Код на выходе линейки компараторов будет равен 000000_б.

Постепенно повышая уровень входного сигнала можно превысить напряжение на опорном входе нижнего компаратора. В этом случае на его выходе сформируется уровень логической единицы. Код на выходе линейки компараторов примет значение 0000001. При дальнейшем увеличении уровня сигнала на входе параллельного АЦП код будет принимать значения 0000011, 0000111, и так далее. Максимальное значение кода 1111111 будет выдано на выходе линейки компараторов параллельного аналого-цифрового преобразователя при превышении входным сигналом значения сигнала на опорном входе самого верхнего компаратора.

Достоинство такого АЦП высокое быстродействие, достигающее десятков наносекунд.

Недостатки АЦП параллельного типа являются большая сложность, высокая стоимость (из-за количества деталей) и, как следствие, невысокая точность [8].

В итоге, подходящей архитектурой АЦП для использования телеметрии в космосе является АЦП последовательного приближения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для эффективного сбора информации по процессам на Земле с помощью космической телеметрии следует использовать принцип работы импульсно-кодовой модуляции для беспроводной передачи данных, мультиплексирование для осуществления многоканальной синхронной передачи каналов ИКМ, его обратный процесс - демultipлексирование и измерение параметрических значений датчиков с помощью АЦП последовательного приближения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Новософт: [сайт].
URL: <https://www.novosoft.ru/glossary/telemetriya>
- [2] Дюсембаев А. Обзор технологии телеметрии // Режим доступа: <https://kazatu.edu.kz/assets/i/science/sf15-digit-124.pdf>
- [3] К. Богенс Регламент Радиосвязи // Режим доступа: https://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/workshops/RRS-15-Eastern-Europe/Documents/MondayOpening/K_Bogens_02_RR_RoP_ru.pdf
- [4] Поленов, Д. Ю. Эволюция телеметрии в ракетной технике / Д. Ю. Поленов.
- [5] URL: <https://www.prom-tex.org/solutions/mnogokanalnyy-sbor-dannykh/kak-rabotaet-telemetriya-kmt/>
- [6] Константин Черных Построение системы телеметрии космического назначения на базе безлицензионных радиационно-стойких компонентов STMicroelectronics. Часть 2 // Вестник Электроники №2 2018. Режим доступа: <https://ptelectronics.ru/stati/>
- [7] URL: <https://digteh.ru/digital/FlashADC/>
- [8] URL: https://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?index=24&laye

TELEMETRY DATA COLLECTION SYSTEMS

Tretyakova D.V.
Institute of Radio Engineering and
Computer Science
Department of Radio Electronic Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
chitaevadalila@gmail.com

Chistyakov E.A.
Institute of Radio Engineering and
Computer Science
Department of Radio Electronic Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
chistyakov@mirea.ru

Abstract — The paper tells the story of the beginning of the use of telemetry in space. The principle of operation of pulse code manipulation (PCM) and its generation are considered. The processes of multiplexing and demultiplexing are described. The most common type of analog-to-digital converters used in telemetry systems for measuring parametric values of sensors - ADCs of sequential approximation is also considered and compared with parallel-type ADCs.

Keywords — telemetry, space, pulse-code modulation, multiplexing, demultiplexing, sequential approximation ADC.

УДК 681.327

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИЙ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Легкий Т. Н.

Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
legky.tim@yandex.ru

Чистяков Е. А.

Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
chistyakov@mirea.ru

Аннотация — В настоящее время вопросы связи и передачи информации стоят особенно остро. Стремительное развитие, как техники в общем случае, так и летательных аппаратов, разного класса, в частности ставит перед разработчиками РЭА требования к максимальной надежности и простоте изготавливаемой аппаратуры. Одним из возможных способов решения этих проблем является использование амплитудной манипуляции для систем связи.

Ключевые слова — амплитудная манипуляция, системы связи, летательные аппараты.

ВВЕДЕНИЕ

Первые системы связи появились более 100 лет назад. За это время технологии связи сделали большой шаг вперед. Развитие как элементной базы [1], так и разных алгоритмов приема и передачи информации. Амплитудная модуляция была одним из самых первых видов модуляции. Как один из самых простых видов модуляции, она обладает рядом существенных недостатков: низкая помехоустойчивость, широкий радиоспектр передаваемой информации. Именно ряд этих существенных недостатков способствовал вытеснению, сначала частотной модуляцией, а потом и фазовой, как лишенных этих недостатков [2]. Но с активным развитием цифровых приемников, передатчиков и в целом цифровых систем связи использование амплитудной манипуляции обретает чуть больше смысла, так как цифровой сигнал более помехоустойчивый. Приемники, используемые для декодирования амплитудных сигналов, как правило более дешевые и более простые в создании.

IV. МНОГОПОЗИЦИОННАЯ АМПЛИТУДНАЯ МАНИПУЛЯЦИЯ

Для аналоговых сигналов справедлив процесс модуляции – это процесс изменения одного или нескольких параметров модулируемого несущего сигнала при помощи модулирующего сигнала в общем виде формулу для модулированного сигнала можно записать так:

$$S(t) = A(t)\sin(\omega(t) \cdot t + \varphi(t)).$$

Для цифровых сигналов процесс манипуляции – это процесс преобразования последовательности кодовых символов в последовательности сигналов.

Амплитудная манипуляция – изменение сигнала, при котором амплитуда несущего сигнала меняется скачкообразно. Многопозиционная манипуляция означает что сигнал меняется более двух раз. Процесс амплитудной манипуляции можно описать формулой:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2A_i(t)}{T}} \sin(\omega_0 t + \varphi),$$

где $i = 1, 2, \dots, M \in \mathbb{Z}$, обозначает количество позиций при многопозиционной манипуляции.

Для анализа манипуляций удобнее всего использовать сигнальные созвездия. Сигнальное созвездие – представление всех возможных значений комплексной амплитуды манипулированных сигналов на комплексной плоскости. На рисунке 1 представлено сигнальное созвездие для $M = 2$.

На рисунке 2 представлено сигнальное созвездие для $M = 4$.

На рисунке 3 представлен демодулированный сигнал для $M = 2$.

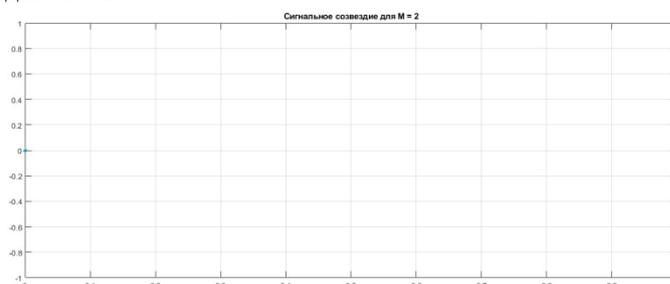


Рис. 1. Сигнальное созвездие для $M = 2$

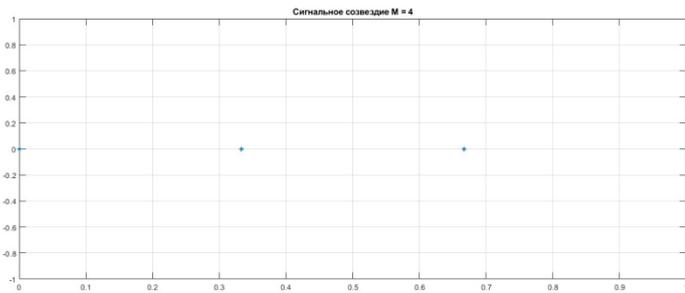


Рис. 2. Сигнальное созвездие для $M = 4$

На рисунке 3 представлен демодулированный сигнал для $M = 2$.

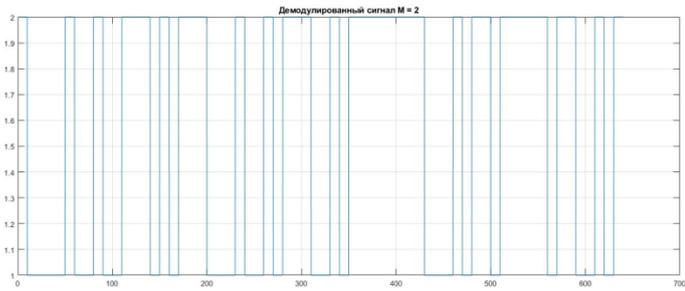


Рис. 3. Демодулированный сигнал $M = 2$

На рисунке 4 представлен демодулированный сигнал для $M = 4$.

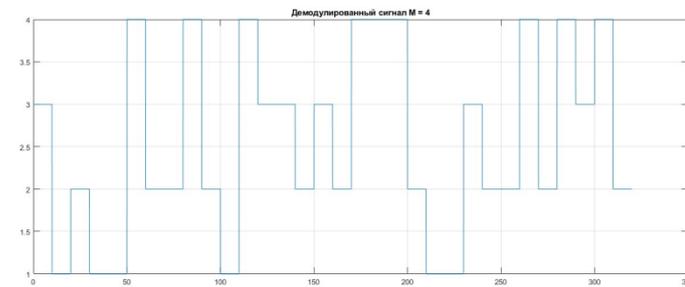


Рис. 4. Демодулированный сигнал $M = 2$

Добавим к исследуемой системе генератор белого шума. С возможностью изменения соотношения сигнал/шум. Сигнал шум – безразмерная величина, которая показывает отношение мощности сигнала к мощности шума:

$$SNR = \frac{P_{\text{сигнал}}}{P_{\text{шум}}} = \frac{A_{\text{сигнал}}^2}{A_{\text{шум}}^2}$$

Рассмотрим сигнальные созвездия при разных SNR и разных M .

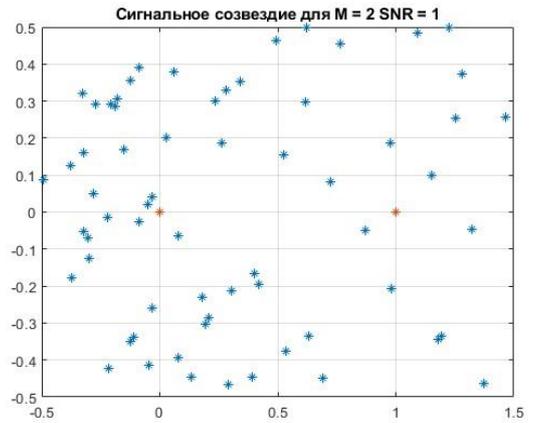


Рис. 5. Сигнальное созвездие для $M = 2$ и $SNR = 1$

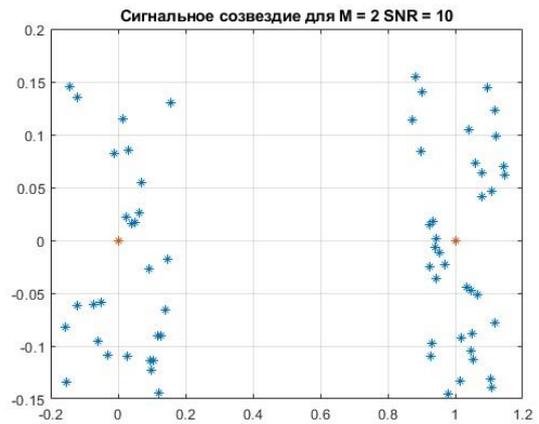


Рис. 6. Сигнальное созвездие для $M = 2$ и $SNR = 10$

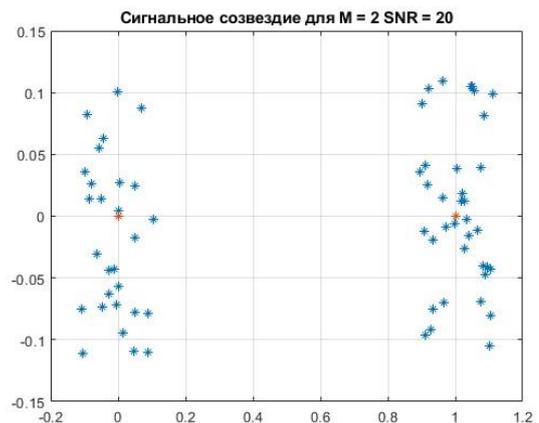


Рис. 7. Сигнальное созвездие для $M = 2$ и $SNR = 20$

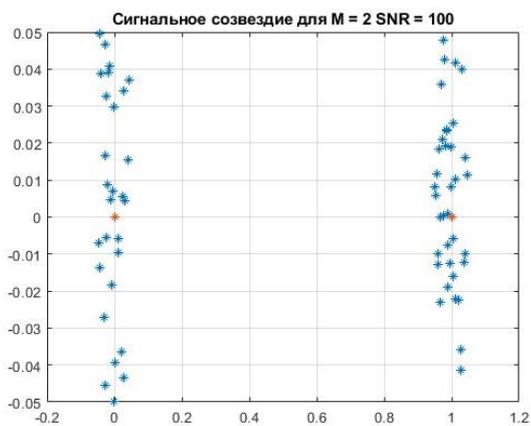


Рис. 8. Сигнальное созвездие для $M = 2$ и $SNR = 100$

Рассмотрим для $M = 4$.

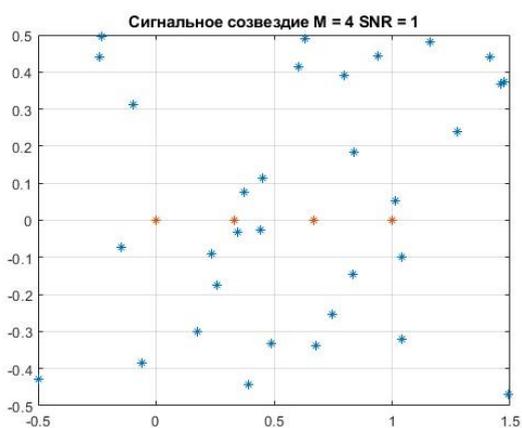


Рис. 9. Сигнальное созвездие для $M = 4$ и $SNR = 1$

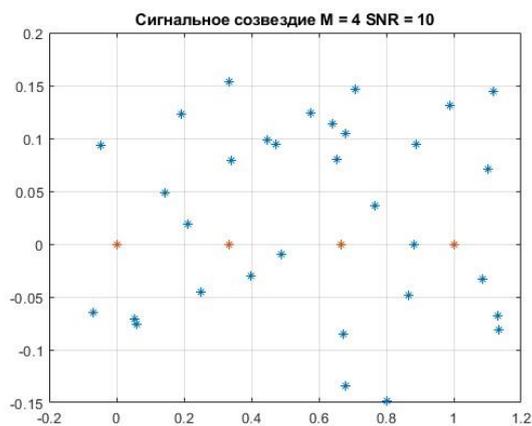


Рис. 10. Сигнальное созвездие для $M = 4$ и $SNR = 10$

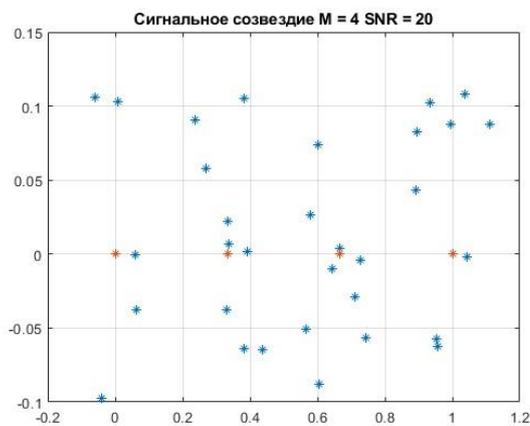


Рис. 11. Сигнальное созвездие для $M = 4$ и $SNR = 20$

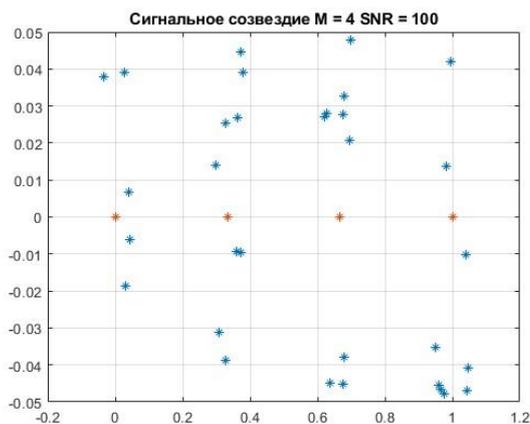


Рис. 12. Сигнальное созвездие для $M = 4$ и $SNR = 100$

Как можно заметить шум вносит отклонения от изначальных значений, на графиках они представлены оранжевым цветом.

Увеличивая M можно добиться более высокой пропускающей способности канала, например при $M = 2$, сигнал принимает только два значения 0 или 1 при $M = 4$, сигнал будет состоять уже из 4 уровней, что видно из рисунка 4, то есть при декодировании 1 уровень будет содержать в себе 2 бита информации.

Но при увеличении M будет ухудшаться помехоустойчивость сигнала.

На рисунке 13 представлена вероятность ошибки в зависимости от соотношения сигнал шум.

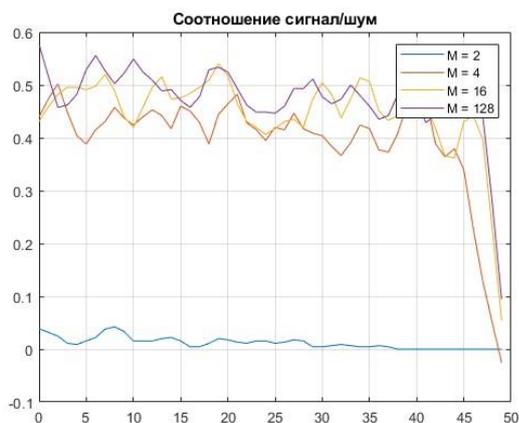


Рис. 12. Вероятность битовой ошибки

Графики приведены для разных значений M : 2, 4, 16, 128. Как можно заметить при увеличении M вероятность ошибки сильно возрастает

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стремительное развитие цифровых систем связи дало амплитудной манипуляции «вторую жизнь», но про активное и повсеместное использование говорить не приходится, так как помехоустойчивость амплитудной манипуляции очень сильно зависит мощности приемника и

передатчика [3]. Поэтому использование амплитудной манипуляции для связи со спутниками и летательными аппаратами дальнего радиуса действия практически не возможно. Но возможность использования АМ-манипуляции для передачи информации на короткие расстояния, малая стоимость приемника, а также скромные масса габаритные параметры, позволяют применить АМ-манипуляцию для связи с различными типами БПЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Легкий Н.М. Тенденции развития технологий производства электроники / Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2018. № 14. С. 312-316.
2. Замуруев С.Н., Легкий Т.Н. Радиолокационные системы с частотно-модулированным сигналом / Естественные и технические науки. 2020. № 9 (147). С. 166-168/
3. Бондарь А.А., Авдеев К.В., Легкий Т.Н., Татаринев Д.И., Кострюков А.С. Построение модели линии связи для исследования алгоритмов помехоустойчивого кодирования и декодирования / В сборнике: Радиолокация и связь - перспективные технологии. XX Всероссийская молодежная научно-техническая конференция. Москва, 2023. С. 34-38.

THE USE OF MULTI-POSITION AMPLITUDE MANIPULATION IN AIRCRAFT COMMUNICATION SYSTEMS

Legkiy T.N.

Department of Radioelectronic Systems and Complexes
Institute of Radioelectronics and Informatics
RTU MIREA
Moscow, Russia
legky.tim@yandex.ru

Chistyakov E.A.

Department of Radioelectronic Systems and Complexes
Institute of Radioelectronics and Informatics
RTU MIREA
Moscow, Russia
chistyakov@mirea.ru

Abstract — Currently, the issues of communication and information transmission are particularly acute. The rapid development of both equipment in general and aircraft of different classes, in particular, puts before the developers of REA requirements for maximum reliability and simplicity of manufactured equipment. One of the possible solutions is to use amplitude manipulation for communication systems.

Keywords — amplitude manipulation, communication systems, aircraft.

УДК 621.391

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Бурмистров Ф.А.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра радиоэлектронных
систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
mihajlopotapuc3@gmail.com

Скворцов А.Д.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра радиоэлектронных
систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
skvortsov.a.d@edu.mirea.ru

Чистяков Е.А.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра радиоэлектронных
систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
chistyakov@mirea.ru

Аннотация — В статье рассмотрено применение радиолокационных систем с синтезированной апертурой, прежде всего космического базирования, представлена эволюция некоторых спутниковых систем с синтезированной апертурой как в России, так и за рубежом, предложены новые методы развития спутниковых систем с синтезированной апертурой в России. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью обеспечения быстрого доступа к геoinформации в требуемом регионе.

Ключевые слова — синтезированная апертура; спутниковые системы; радиолокация; геолокация; искусственный спутник; космос; космический аппарат; зондирование; навигация; радиоволны; космические технологии; развитие; космическая программа; низкоорбитальные космические станции.

ВВЕДЕНИЕ

В статье изложены методы развития спутниковых систем дистанционного зондирования Земли с синтезированной апертурой, проанализировано состояние развития спутниковых систем с синтезированной апертурой в России и за рубежом, а также предложены методы развития отечественных спутниковых систем.

I. ОПИСАНИЕ СПУТНИКОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Среди спутников дистанционного зондирования Земли космические аппараты с синтезированной апертурой позволяют вести съемку поверхности с достаточно высоким разрешением (1-3 метра) вне зависимости от погодных условий и освещенности.

Основная идея подобных спутниковых систем заключается в следующем: вместо того, чтобы использовать одну антенну с большой апертурой, спутник сам создает ее по мере продвижения по своему маршруту, отправляя на Землю сигнал из определенных точек. Подобная технология позволяет получить большее разрешение и качество принимаемой информации при меньших массогабаритных параметрах спутника. Это решение сильно облегчает задачу космического зондирования Земли [1].

Также, системам радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) не страшны ни облачность, ни задымленность, ни прочие факторы, затрудняющие работу оптических систем зондирования – радиоволны не чувствительны к объектам, являющимся преградой свету.

Стоит отметить, спутниковые системы дистанционного зондирования с синтезированной апертурой позволяют получать информацию об объектах, скрытых не просто облачностью или задымленностью, но и физическими телами, например, неглубоко расположенных под земной или водной поверхностью [2].

Использование систем с синтезированной апертурой существенно увеличивает разрешающую способность антенн космических аппаратов. При этом, апертуры антенных устройств, установленных на спутниках не нуждаются в физическом увеличении, то есть нет необходимости увеличивать массогабаритные параметры спутника. Данный фактор позволяет зафиксировать изображение с поверхности Земли в очень хорошем разрешении и принять информацию с высоким качеством. Современные спутниковые системы, оснащенные радиолокаторами с синтезированной апертурой, позволяют получить информацию об участках земной поверхности вплоть до одного метра. Это рекордное значение, прочие системы не могут добиться даже приближенных к данным показателям результатов [3, 4].

Из вышеперечисленного видно, что спутники зондирования, использующие радиолокаторы с синтезированной апертурой отличаются в выгодную сторону от конкурирующих систем и дополняют возможности оптических методов дистанционного зондирования.

Система радиолокаторов с синтезированной апертурой была изобретена американским ученым Карлом А. Уайли в 1951 году. Представленные результаты экспериментов, проведенных в лаборатории Иллинойского университета, убедили научное сообщество в перспективности развития данной технологии. К 1960-ым данная система активно внедрена в различные сферы. Первые радиолокаторы с синтезированной апертурой производства компании

«Texas Instruments» были установлены на военные самолеты ВВС США и использовались исключительно в целях военных операций. Позже, с появлением американской космической программы, эта технология получила свое применение и в космических аппаратах. На искусственные спутники Земли начали устанавливать радиолокаторы с синтезированной апертурой, что повысило эффективность их применения, по сравнению с использованием данной системы на самолетах. Это решение позволило значительно увеличить ширину полосы сканирования, а также создать большую площадь синтезированной апертуры, чем площадь синтезированной апертуры авиационных РСА.

Данная технология также получила популярность и за границами США, в том числе – в СССР. Здесь, к середине 1980-ых в военных целях были созданы станции комплекса «Алмаз-Т» - «Алмаз-Т», «Алмаз-1» и «Космос 1870».

Первая попытка вывести на орбиту советский спутник с установленным радиолокатором с синтезированной апертурой произошла в 1986-ом году. Аппарат имел название, соответствующее названию всего комплекса – «Алмаз-Т». Запуск прошел неудачно, система управления ракеты-носителя дала сбой.

В 1987-ом году на орбиту был выведен первый отечественный аппарат «Космос-1870». Информация, полученная с него, использовалась в военных целях. Аппарат был выведен из эксплуатации в 1989-ом году. Третий аппарат комплекса «Алмаз-Т» был запущен в 1991-ом году. Станция «Алмаз-1» была успешно выведена на орбиту, где проработала год. Также, планировался вывод на орбиту еще одного аппарата комплекса, но из-за тяжелой экономической ситуации в СССР от него отказались.

II. РАЗВИТИЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ С РСА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ.

Так как подобные системы имеют большую эффективность, в современном мире активно развивается данное направление. На орбите Земли уже находится большое количество спутников, оснащенных такими РСА-системами, например, ENVISAT, ALOS, Sentinel, COSMO-ScyMed и многие другие. Также, на орбиту выводятся или планируются к выводу новые спутники, оснащенные РСА. 13 августа 2023 Китай запустил первый высокоорбитальный спутник L-SAR4-01 оснащенный радиолокатором с синтезированной апертурой. Стоит отметить, что это первый и единственный искусственный спутник Земли, оснащенный РСА, который работает на геостационарной орбите. Также, следует упомянуть проект NASA «Nissag» – спутник наблюдения Земли с установленными на нем двумя радиолокаторами с синтезированной апертурой.

III. РАЗВИТИЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ С РСА В РОССИИ

В Российской Федерации, к сожалению, в настоящее время подобные спутники не находят столь массового

применения [5]. Почти все спутники, использующие SAR, такие как «Космос-1870» и «Алмаз-1» уже давно выведены из эксплуатации. В 2013 году был запущен спутник «Кондор», который нес на себе радиолокатор с синтезированной апертурой. В 2014 году был выведен на орбиту «Кондор-Э», несущий точно такой же локатор. Оба этих спутника запущены и эксплуатируются в интересах ВС РФ.

В гражданских целях пока запущен только один спутник – «Кондор-ФКА». На его борту установлен радиолокатор с синтезированной апертурой, разработанный концерном «Вега». Данный аппарат был выведен на орбиту 26 мая 2023 года. Спутник имеет высоту орбиты 520 километров и работает в дециметровом S-диапазоне (2-4 ГГц). Ширина полосы обзора составляет ± 500 километров. Разрешение изображения поверхности Земли, предоставляемого спутниками серии «Кондор» составляет 1-2 метра на точку.

На спутниках серии «Кондор» установлен локатор «Стриж» с синтезированной апертурой, разработанный концерном «Вега». Данное предприятие уже имеет опыт разработки подобных систем, его локаторы с синтезированной апертурой использовались, например, на спутниках типа «Космос-1870» и на пилотируемой космической станции «Алмаз-1». Современный РСА, установленный на Кондор-ФКА использует антенну, разработанную в ОКБ Московского энергетического института. Эта антенна радиусом 6 метров имеет эффективную площадь 28 квадратных метров и раскрывается в космосе. Она использует дециметровый S-диапазон, что позволяет комплексу иметь высокую разрешающую способность – до одного метра. Полоса сканирования составляет от 20 до 160 километров. Качество изображения радиолокатора с синтезированной апертурой «Стриж» лучше, чем у аналогичного радиолокатора США TerraSAR-X. Однако, стоит отметить, что количество спутников с данным американским локатором, выведенных на орбиту Земли, много больше, чем спутников, оснащенных локатором «Стриж».

РСА «Стриж» может работать в детальном непрерывном, детальном прожекторном и обзорном режимах. Данные режимы отличаются друг от друга шириной и протяженностью полосы сканирования, разрешением получаемого изображения а также движением сканирующего луча. Также, существуют экспериментальные режимы работы данного радиолокатора.

Радиолокатор «Стриж» в данный момент активно развивается. Разрабатываются новые направления применения данного РСА. Теперь, «Стриж» может выполнять портретирование кораблей и измерять скорости движущихся объектов.

После запусков космических аппаратов серии «Кондор» данный радиолокатор с синтезированной апертурой продемонстрировал свои высокие показатели надежности, качества и эффективности. На данный момент, радиолокатор «Стриж» является основной

отечественной перспективной системой с синтезированной апертурой [1].

IV. ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ С РСА В РОССИИ.

Рассмотрим возможности дальнейшего развития спутниковых систем зондирования на территории Российской Федерации. К 2030 году в нашей стране планируется привести в исполнение целевую программу шифр: «Сфера». Планируется, что в составе данной системы будет насчитываться 640 космических аппаратов. Большинство из них выполняют роль спутников связи. Предполагается, что мощность радиопередающих устройств, установленных на большинстве аппаратов, составит 12 киловатт. Работают данные устройства в S-диапазоне радиочастот, то есть на частотах 2-4 ГГц.

Среди прочих спутников, в данной программе планируются 12 аппаратов системы «Беркут» – «Беркут-Х» и «Беркут-XLP». Данные аппараты будут снабжены радиолокаторами с синтезированной апертурой и предназначены для зондирования Земли.

Однако, как видно из вышеприведенных характеристик современных радиолокаторов с синтезированной апертурой, при площади поверхности Земли в 510 072 000 квадратных километров и площади Российской Федерации в 17 098 246 квадратных километров двенадцати спутников РСА с шириной полосы сканирования ± 500 километров недостаточно. Спутник может сутками добираться до необходимой для срочного зондирования точки.

Чтобы решить эту проблему, предлагается создать подобие системы с синтезированной апертурой на базе спутников программы «Сфера», оснащенных фиксированной аппаратурой. Для этого нужно разработать программное обеспечение, переключающее аппаратуру спутников в определенные моменты времени из штатного режима работы (ретрансляции), в режим работы РСА. Данное решение позволит относительно дешево обеспечить высоким качеством зондирования если не всю поверхность Земли, то хотя бы всю поверхность Российской Федерации.

По нашему мнению, для выполнения данной задачи подойдут спутники связи, задействованные в программе «Сфера». Это такие спутники, как «Марафон IoT». Всего, планируется вывести до 264 таких аппаратов до 2035 года. Это относительно дешевые аппараты, имеющие малые массогабаритные параметры. Работают данные спутники на орбите в 750 километров, что примерно соответствует орбите, на которой работают спутники с радиолокатором с синтезированной апертурой.

Установленные на данных спутниках радиопередающие устройства, как было сказано выше, работают в S-диапазоне и имеют мощность 12 киловатт. Данные характеристики подходят для выполнения поставленной задачи. Разработанное специально для данных аппаратов программное обеспечение позволит превратить их в спутники с РСА.

Таким образом, можно относительно дешево и быстро получить сотни спутников, оснащенных радиолокатором с

синтезированной апертурой. Конечно, качество и разрешение получаемых изображений будут не такими высокими, как, например, у спутников оснащенных локатором концерна «Вега», но данное решение позволит многократно увеличить количество спутников на орбите Земли, оснащенных РСА. Это позволит быстро предоставить необходимые радиолокационные данные из любой точки поверхности Земли, и получить более развёрнутую информацию, чем предоставляют только оптические системы дистанционного зондирования Земли.

V. ВЫВОДЫ

В данной статье проанализировано состояние спутниковых систем дистанционного зондирования с синтезированной апертурой, рассмотрено развитие спутниковых систем с РСА в мире и в России, перечислены существующие спутниковые системы с РСА, описаны некоторые действующие космические аппараты с подобными системами, предложена методика развития данных систем путем увеличения количества аппаратов с РСА за счет стандартных спутников связи при помощи доработки их программного обеспечения.

По нашему мнению, можно предложить следующее направление развития исследования. В данной статье предложен один из вариантов дешевого и относительно простого способа решения данной задачи. В дальнейшем предлагается, при проектировании спутников-ретрансляторов для низких орбит, закладывать в них возможность вести дистанционное зондирование Земли с использованием принципа синтезированной апертуры. Данное решение позволит увеличить количество искусственных спутников Земли, оснащенных радиолокаторами с синтезированной апертурой на основе уже используемых аппаратов. Это позволит избежать долгой и затратной разработки новых спутников. Таким образом, можно обеспечить более быстрый подход аппарата с РСА к требуемому месту, тем самым обеспечив своевременное предоставление радиолокационной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. «Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны».
- [2] Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010. – 686 с.
- [3] В.Э. Турук, В.С. Верба, М.В. Голованова, П.Е. Голубцов, М.В. Евсиков, Л.Б. Неронский, С.Э. Зайцев, Е.Ф. Толстов РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э».
- [4] Спутниковая связь и навигация, Тимошкин А.И., Костюк Д.В., 2018
- [5] В.В. Костров, Е.Ф. Толстов «Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения»

SYNTHETIC APERTURE SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH

Burmistrov F.A.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Radio Electronic
Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
mihajlopotapyc3@gmail.com

Skvortsov.A.D.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Radio Electronic
Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
skvortsov.a.d@edu.mirea.ru

Chistyakov E.A.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Radio Electronic
Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
chistyakov@mirea.ru

Abstract — The article discusses the concept of synthesized aperture, the development of satellite systems with synthesized aperture in the world and in Russia, methods of development of satellite systems with synthesized aperture in Russia. The relevance of the study of this topic lies in the need to provide quick access to information about the situation in a given region.

Keywords — synthesized aperture; satellite systems; radar; geolocation; artificial satellite; space; spacecraft; sensing; navigation; radio waves; space technologies; development; space program; low-orbit space stations.

УДК 654.165

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ ТРАНКИНГОВОЙ СИСТЕМ СВЯЗИ

Иванов В.С.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра конструирования и
производства радиоэлектронных
средств
Москва, Россия
ivanov_vs@mirea.ru

Бутышев Н.С.
ФГБУ «Центр Экспертизы и
Координации Информатизации»
Москва, Россия
butyshevnickolay@mail.ru

Хаджийская Е.Ю.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра конструирования и
производства радиоэлектронных
средств
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
hadzhijskaya@mirea.ru

Аннотация - в статье рассмотрена возможность объединения транкинговой и спутниковой систем связи для взаимодействия удаленных друг от друга групп абонентов. Описана спутниковая сеть VSAT, этапы ее развития и существующие топологии. Рассмотрены принципы организации транкинговой связи между абонентами. Предложен метод автоматического размещения базовых станций транкинговых систем связи, позволяющий минимизировать количество базовых станций, необходимых для покрытия территории связью, и сократить процесс проектирования зон покрытия. Показаны результаты компьютерного моделирования в разработанном программном обеспечении, реализующем автоматическое размещение базовых станций внутри требуемой территории на основе разработанных метода и алгоритмов автоматического размещения.

Ключевые слова- транкинговая связь, спутниковая связь, автоматическое размещение базовых станций, радиосвязь.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря подвижной связи абонент может связываться с другим абонентом или группой абонентов по радиоканалу без проводного соединения. К сетям подвижной связи относятся сети сотовой подвижной связи, сети персонального радиовызова, сети транкинговой связи (ТСС) и сети спутниковой связи. Во многих городах, деревнях и селах нашей страны функционирует сотовая связь. Операторы мобильной связи устанавливают базовые станции (БС), через которые абоненты могут выйти на связь. В малонаселенных территориях базовые станции не устанавливают из-за низкой прибыли, вследствие чего лишь 30% нашей страны покрыты сотовой связью.

В настоящее время предлагаются различные проекты, в числе которых проект «Сфера», подразумевающий запуски на орбиту более 150 космических аппаратов, которые позволят преодолеть цифровое неравенство

регионов России [6]. Разрабатываемая группировка «Гонец-М1» планирует обеспечить своих абонентов не только полноценной телефонной спутниковой связью, но и транкинговой [7]. Благодаря чему транкинговая связь будет поддерживаться базовой станцией через спутниковый канал, к которому одновременно сможет подключаться группа абонентов, находящихся в определенном районе. Таким образом, за счет одной спутниковой линии пользователи получают оперативную связь друг с другом (рис. 1).

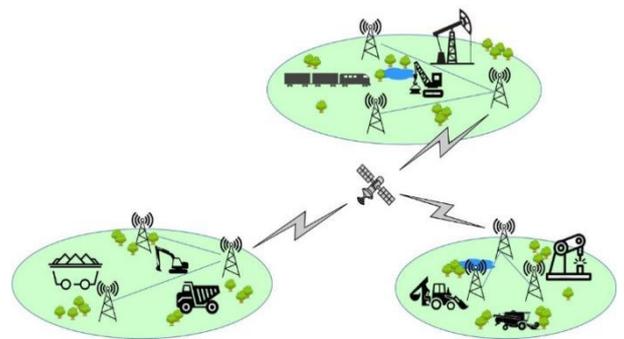


Рис. 1. Транкинговая связь через спутниковый канал

1. СПУТНИКОВАЯ СЕТЬ VSAT

Наличие спутникового канала в базовой станции позволяет установить соединение между абонентами удаленных друг от друга зон на расстоянии тысяч километров, что является несомненным преимуществом. В отличие от радиорелейных линий (РРЛ), где нужна прямая видимость между БС, и волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), где есть ряд ограничений в плане выбора маршрута прокладки кабеля, спутниковая связь менее прихотливая.

Рассмотрим подробнее спутниковую сеть VSAT (Very Small Aperture Terminal) – терминал с очень маленькой апертурой. Впервые технология применялась на Аляске для обеспечения населенных пунктов надежной связью. Далее интерес к технологии VSAT возрастал и стали появляться фирмы, предлагавшие

оборудование на базе VSAT, среди которых: Equatorial, Hughes Network Systems, ViaSat, Gilat, iDirect. В России в 2010г. технология VSAT впервые применялась для организации индивидуальных и групповых вызовов абонентских радиостанций стандарта TETRA, находящихся в Москве и Санкт-Петербурге [8].

Самым простым вариантом сети VSAT является SCPC- технология выделенных спутниковых каналов. Для организации связи между БС необходимо наличие специального оборудования, модемов, которые напрямую связываются через спутник. Для передачи и приема используются две разнесенные на определенный шаг частоты. Ограничением данной технологии является то, что она используется для передачи информации между двумя абонентскими терминалами [9].

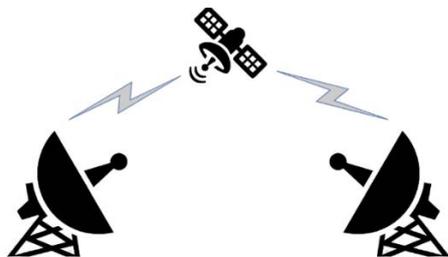


Рис. 2. Технология SCPC

Следующим этапом развития технологий VSAT является появление топологии «Star». В данной топологии используется центральная земная станция, которая выступает в роли посредника. Данные с одной абонентской станции передаются на центральную станцию, а затем поступают на другую абонентскую станцию.

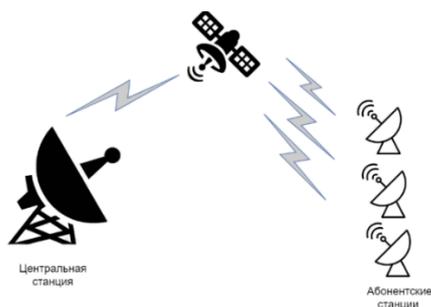


Рис. 3. Топология STAR

Последнее слово в технологиях VSAT- это топология «Mesh». Она использует временное разделение каналов связи (TDMA) и предполагает наличие центральной станции, которая используется для согласования служебной информации, и абонентских станций, которые могут передавать данные между собой без использования центральной станции.

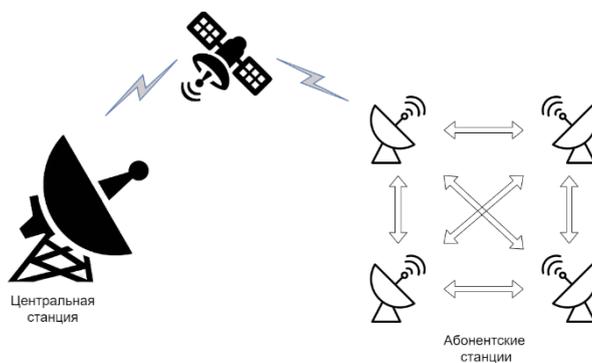


Рис. 4. Топология Mesh

II. ТРАНКИНГОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Транкинговая связь автоматически распределяет частотный ресурс между абонентами [1]. Связь абонентов организовывается по принципу зонного радиодоступа, где соединения между абонентами осуществляются через базовую станцию, принципа прямых связей между абонентами в пределах прямой видимости и комбинированного принципа организации связи между абонентами [2]. Активными пользователями транкинговых систем связи являются крупные добывающие полезные ископаемые компании, службы спасения, государственные и коммерческие службы безопасности.

Подробнее остановимся на принципе зонного радиодоступа. В центре однозональной территории устанавливается базовая станция, в состав которой входит набор приемопередающего оборудования, антенны, устройство объединения радиосигналов, позволяющее использовать одно и то же антенное оборудование для одновременной работы приемников и передатчиков на нескольких частотных каналах, коммутатор, который обслуживает весь трафик зоны и устройство управления, которое обеспечивает взаимодействие всех узлов. Для приема и передачи сигналов используются две разнесенные между собой частоты, обеспечивающие одновременную передачу в обоих направлениях. Это позволяет избежать наложения сигналов друг на друга.

Для покрытия связью больших территорий используют многозональные транкинговые системы. В этом случае несколько базовых станций обеспечивают качественную связь на определенных участках территории. Между собой они объединены межзональным коммутатором, который обрабатывает все виды межзональных вызовов.

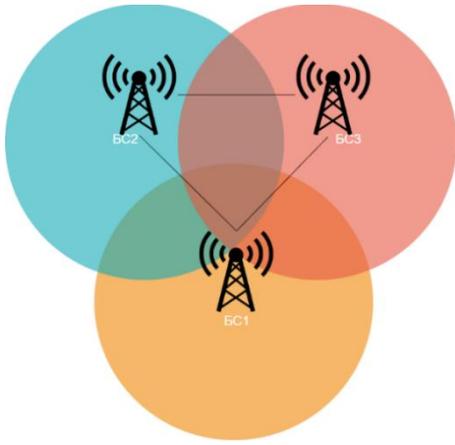


Рис. 5. Многозоновая транкинговая система

III. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

Прогноз зон радиопокрытия ведется на основе статистических и детерминированных методов. В статистических методах зона обслуживания моделируется окружностью, на границе которой обеспечивается качественная связь. Данные методы основаны на презентативной выборке измерений реальных сигналов. Детерминированные методы прогноза основаны на учете реальных условий распространения радиоволн на месте нахождения базовой и портативной станций. Моделирование зон покрытия осуществляется в различных современных программных обеспечениях, которые позволяют на цифровой карте местности определить места размещения базовых станций, покрывающих требуемую территорию связью. Также ведется работа над автоматическим размещением базовых станций, которое позволило бы сократить процесс проектирования зон покрытия транкинговых систем связи и минимизировать количество базовых станций, необходимых для обеспечения качественного уровня связи. Работа Л.Л. Егорова посвящена решению автоматического размещения БС на основе метода наименьших квадратов [3]. В работах Р.Р. Мухаджинова, К.А. Павловской предлагаются решения с использованием генетического алгоритма [4,5].

В настоящее время разрабатывается метод автоматического размещения, который на первом этапе рассчитывает предварительную зону обслуживания БС по модифицированной модели Хата, на втором этапе проводится уточняющий расчет с учетом потерь на дифракцию, тропосферное рассеивание и потери в атмосферном волноводе, а на третьем этапе определяется зона гарантированного обслуживания, внутри которой обеспечивается качественный уровень связи.

На языке Python разработан веб-сайт, позволяющий провести проектирование зон покрытия БС ТСС. Пользователю доступна топографическая карта России, геометрический инструмент для выделения на карте территории, которую необходимо покрыть связью, и

территорий, установка БС в которых невозможна. После заполнения технических характеристик приемопередающего оборудования, пользователь запускает расчет. С помощью разработанных метода и алгоритма автоматического размещения БС пользователю выводятся на карте координаты мест установки БС (рис. 6).

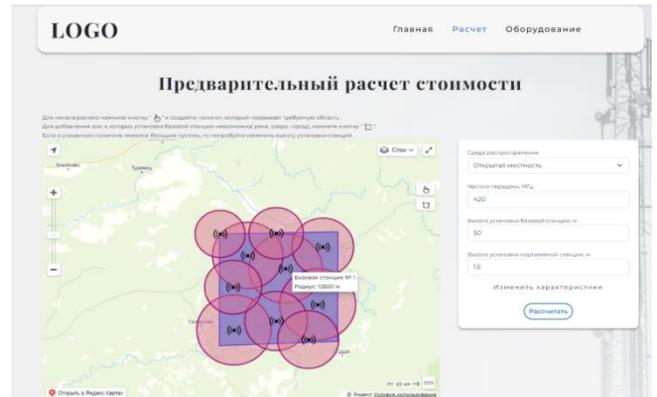


Рис. 6. Результаты автоматического размещения в программном обеспечении

График зависимости скорости расчета от площади территории представлен на рисунке 7.

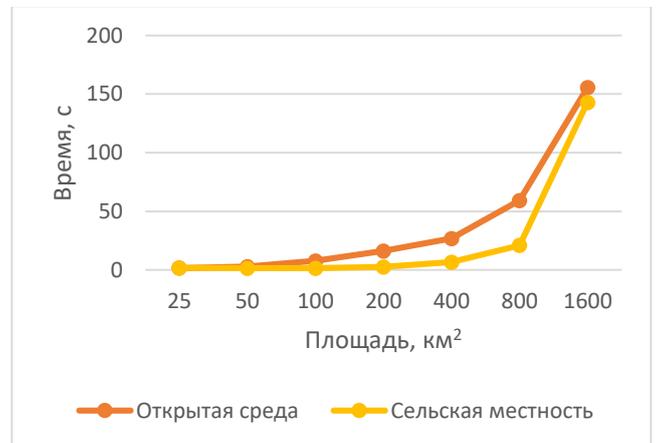


Рис. 6. Зависимость скорости расчета от площади территории

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подключение базовых станций через спутниковый сегмент открывает широкие возможности для создания глобальных транкинговых систем. Внедрение подобной разработки позволяет не только расширить зону покрытия транкинговой связи, но и позволит более эффективно координировать взаимодействие различных служб во время проведения совместных операций. При этом автоматическое размещение базовых станций позволяет сократить процесс проектирования зон покрытия транкинговых систем связи и получить решение, в котором требуемая территория покрывается

связью с помощью минимального количества базовых станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сакалема Д. Ж. Подвижная радиосвязь. - М.: Горячая линия-Телеком, 2012. — 512 с.
- [2] Бабков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. -Изд. 2-е, испр. - М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 224с.
- [3] Егоров Л. Л., Кологривов В. А., Мелихов С. В. Алгоритм расчета зон покрытия базовых станций сотовой связи // Доклады Томского Государственного Университета систем управления и радиоэлектроники. №1 (19), 2009. С. 15-19. [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithm-rascheta-zon-pokrytiya-bazovyh-stantsiy-sotovoy-svyazi/viewer> (дата обращения 15.05.2023).
- [4] Мухаджинов Р. Р. Применение генетического алгоритма к решению задачи «Размещение станций систем мобильной связи» // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. 2009. С.165-167. [Электронный ресурс]. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11728619> (дата обращения 16.05.2023).
- [5] Павловская К. А. Применение генетического алгоритма для решения задач размещения базовых станций в сетях пятого поколения // Информатика и кибернетика. 2019. С.29-34. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42559264> (дата обращения 17.05.2023).
- [6] «Сфера»: спутниковая группа цифрового прорыва// Ростех: сайт- URL: <https://rostec.ru/news/sfera-sputnikovaya-gruppa-tsifrovogo-proryva/?ysclid=ln4dr6qobk227947222> (дата обращения: 28.09.2023г.).
- [7] Группировка «Гонец-М1» обеспечит абонентов спутниковой рацией// ТАСС: [Электронный ресурс]- URL: https://tass.ru/kosmos/16843199?utm_source=ixbtcom (дата обращения: 28.09.2023г.).
- [8] Спутниковая связь открывает новые возможности сетей профессиональной цифровой радиосвязи TETRA// spbIT.ru: [Электронный ресурс]- URL: <https://spbIT.ru/news/sputnikovaya-svyaz-otkryvaet-novye-vozmozhnosti-setey-professionalnoy-cifrovoy-radiosvyazi-tetra-160397?ysclid=ln1ugrtg2r587345627> (дата обращения: 29.09.2023г.).
- [9] Обзор спутниковых сетей VSAT различных топологий// seacomm.ru: [Электронный ресурс]- URL: <https://seacomm.ru/dokumentaciya/stati/obzor-sputnikovykh-setey-vsata-razlichnykh-topologiy/?ysclid=ln4dymz237413903335> (дата обращения: 29.09.2023г.).

INTEGRATION OF SATELLITE AND TRUNKING COMMUNICATION SYSTEMS

Ivanov V.S.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Design and
Production of Electronic Means
RTU MIREA
Moscow, Russia
Ivanov_vs@mirea.ru

Butyshev N.S.
FSBI "Center for Expertise and
Coordination of Informatization"
Moscow, Russia
butyshevnickolay@mail.ru

Hadzhiskaya E.Yu.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Design and
Production of Electronic Means
RTU MIREA
Moscow, Russia
hadzhiskaya@mirea.ru

Abstract- The article considers the possibility of combining trunking and satellite communication systems for the interaction of remote groups of subscribers. The VSAT satellite network, the stages of its development and the existing topologies are described. The principles of the organization of trunking communication between subscribers are considered. The method of automatic placement of base stations of trunking communication systems is proposed, which allows to minimize the number of base stations needed to cover the territory with communication, and to shorten the process of designing coverage areas. The results of computer modeling in the developed software that implements the automatic placement of base stations inside the required territory based on the developed method and algorithms of automatic placement are shown.

Keyword- *trunking communication, satellite communication, automatic placement of base stations, radio communication.*

УДК 51-74, 539.1.074.55

РАЗРАБОТКА БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Алтухов А.А.

Лаборатория «Алмазная СВЧ-электроника»
«МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА)
Москва, Россия
altuhov_a@mirea.ru

Аннотация — Приведены результаты исследований по созданию радиоэлектронных устройств на основе алмазных детекторов для контроля ионизирующих и космических излучений. Разработанные конструктивно-технологические решения и созданные устройства были использованы для оснащения отечественных космических аппаратов.

Ключевые слова — алмаз, детектор, ионизирующее излучение, космические излучения

ВВЕДЕНИЕ

Алмаз является широкозонным полупроводником (ширина запрещенной зоны 5.47 эВ) с удельным сопротивлением $10^{11} \div 10^{16}$ Ом·см. Сочетание таких электрофизических параметров алмаза, как радиационная стойкость, суммарная подвижность носителей заряда, дрейфовая скорость носителей, теплопроводность, позволяют создавать детекторы ионизирующих излучений (ИИ) с уникальными параметрами радиационной и тепловой стойкости, высоким быстродействием для применения в экстремальных условиях внешних воздействий [1] - [3], см. рисунок 1.

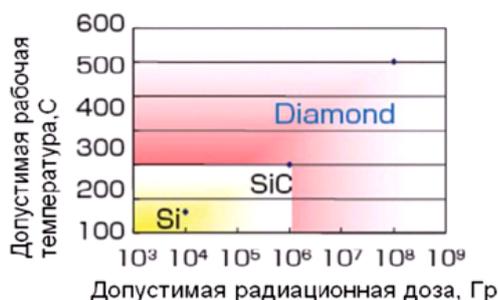


Рис. 1. Возможности использования алмаза и других полупроводников в экстремальных условиях

Время жизни неравновесных носителей заряда в алмазе не превышает 10 нс. К появлению свободных носителей приводит облучение алмаза ультрафиолетовым, рентгеновским и γ -излучением, а также быстрыми частицами (электронами, протонами, α -частицами и др.).

I. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОСТРОЕНИЯ СРК НА ОСНОВЕ АД

Для обеспечения создания бортовых радиоэлектронных устройств контроля ионизирующих и космических излучений (КИ) на основе алмазных детекторов (АД) для ракетно-космической техники (РКТ), нами были разработаны базовые конструктивно-технологические решения [4] – [11], к которым относятся:

- (1) использование многодетекторной системы АД;
- (2) разделение потока ИИ в многодетекторной системе на энергетические поддиапазоны;
- (3) использование комплекса программно-аппаратных методов и искусственных нейронных сетей (ИНС) для селектирования и анализа ИИ и КИ.

На рисунке 2 показана фотография комплекта АД (в бескорпусном исполнении) [12], предназначенный для применения в составе многодетекторного модуля (МДМ) и многодетекторных систем (МДС) на основе АД.

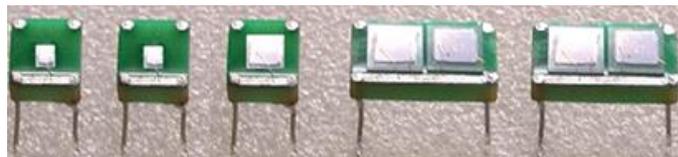


Рис. 2. Бескорпусные алмазные ДИИ для МДМ

Разделение потока ИИ на энергетические поддиапазоны используется для выделения исследуемых энергетических параметров ИИ и для упрощения решения задачи контроля количества и параметров частиц ИИ в выделенном диапазоне энергий. На рисунке 3 приведена структурная схема МДМ с селективными фильтрами (СФ) [13] – [16].

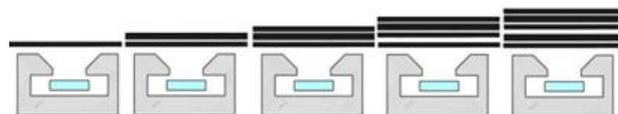


Рис. 3. Схема МДМ на основе АД с СФ

Конструктивно-технологические решения по разделению потока ИИ на энергетические поддиапазоны были предложены и обоснованы в работах [4], [8] – [10], в

рамках которых были выполнены экспериментальные и теоретические исследования, обосновывающие применение набора СФ, обрезаящих входящий поток ИИ по энергии, в сочетании с решением системы уравнений, определяющих границы диапазона энергий ИИ после прохождения таких фильтров.

Нами были исследованы и внедрены методы аппаратно-программной обработки (АПО) данных от дискретных АД и МДМ с СФ. Разработанные методы АПО используют алгоритмы амплитудно-временной селекции (АВС) сигналов на выходе алмазных ДИИ, после прохождения частиц ИИ через их объем. В результате обработки данных АВС обеспечивается диагностика типов ИИ и количественные расчеты характеристик ИИ. Описание методов АПО и алгоритмы АВС спектров ИИ можно найти в [17], [18]. В целом, эти методы представляют собой самостоятельные и достаточно сложные задачи, решение которых позволяет получить раздельные значения потоков КИ по различным энергетическим диапазонам из суммарного значения потоков электронов, протонов и ТЗЧ с различными энергиями.

При разработке методов АПО нами, совместно с коллегами (д.т.н. проф. Кулагин В.П., д.т.н. проф. Каперко А.Ф. и др.), были рассмотрены математические модели и алгоритмы оптимизации нестационарных систем управления, измерение состояния которых производится на фоне помех [13]–[15], [17]. Алгоритмы параметрической оптимизации организуются, в частности, с помощью модифицированного уравнения Винера–Хопфа и функций чувствительности. Комплекс методов и алгоритмы адаптивной фильтрации в задаче восстановления параметров потоков КИ (ПКИ) по измерительным данным для применения в бортовой радиоэлектронной аппаратуре (БРЭА), в т.ч. в транспортных космических системах с длительным сроком функционирования, рассмотрены в [18], [19].

Задача восстановления параметров ПКИ по измерительным данным модуля контроля параметров ПКИ является математически некорректной, так как измерительные данные определяются интегральными спектрами КИ, а восстановлению подлежат дифференциальные спектры этого излучения (или их функции). Узел восстановления параметров ПКИ представляет собой аппаратно-программный комплекс (АПК), выполняющий математическую обработку входного сигнала – измерительных данных от модуля контроля параметров ПКИ, являющихся выходным сигналом узла предварительной цифровой обработки информации [19], [20].

Учитывая, что физическое моделирование ПКИ на Земле весьма проблематично, для отработки программ восстановления и получения количественных оценок их метрологических характеристик целесообразно использовать синтез моделей принятия решений [21] и физико-математическое моделирование (ФММ) [22].

Таким образом, проблема построения оценки предполагаемого полезного процесса по производимым измерениям может быть представлена решением ряда подзадач [21], [22]. Нами были выполнены исследования математических алгоритмов и методов АПО информации

от алмазных ДИИ, включая задачу восстановления дифференциальных спектров КИ на основе нейросетевых алгоритмов. Для решения этой задачи была предложена и исследована [6], [14], [22], [29] ФММ преобразования информации о полях КИ в тракте регистрации спектрометра КИ на основе АД с последующим восстановлением дифференциальных спектров КИ с помощью искусственной нейронной сети (ИНС), что позволяет обеспечить минимальную погрешность восстановления спектров КИ. Модель преобразования информации в тракте регистрации спектрометра использует алгоритм моделирования в программном пакете Geant 4, который позволяет моделировать частицы с энергиями от единиц эВ до ГэВ, в т.ч. для моделирования твердотельных детекторов, см. [23].

С помощью созданной модели было проведено моделирование преобразования информации о полях КИ в тракте регистрации МДС измерением электронных потоков в диапазоне энергий от 0,1 до 5 МэВ и протонных потоков в диапазоне (5 ÷ 500) МэВ. Так в работе [22] представлена и описана ФММ, экспериментально определены её параметры. Проведено имитационное моделирование работы АД, рассчитаны спектры выходного сигнала при воздействии электронов и протонов ЕРПЗ, а также протонов СКЛ. Показано, что анализ выходного сигнала АД позволяет разделить вклад электронов и протонов, а также вклад протонов высоких и низких энергий. Для восстановления энергетических спектров электронов необходимо использование нескольких каналов регистрации. Полученные результаты [22] использованы при обучении ИНС для решения задач восстановления спектров регистрируемых КИ. Подробный разбор разработанных нами математических и физических моделей, включая методы и алгоритмы оптимизации, не являются предметом исследований настоящей работы, а их подробное описание можно найти в наших работах и работах наших коллег, см., например, [13], [14], [25], [26].

II. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ МДС НА ОСНОВЕ МДМ.

В МДМ используются набор различных АД, которые функционально выделены для контроля конкретного типа ИИ. Эти АД могут конструктивно отличаться друг от друга, например, по площади и по объему ЧЭ детектора, конструкции СФ и т.п. Описание предложенных и реализованных нами конструктивно-технологических решений и примеров построения МДМ приведены в работах [4], [7]–[9], [16], [17]. МДМ включает submodule питания, управления, сбора-обработки информации, а также интерфейсы передачи информации на периферийные устройства по внутренним интерфейсам и/или с помощью передачи телеметрической информации. Функциональная схема МДС, выполняющей функции спектрометра КИ на основе алмазных АД, и показана на рисунке 4, см. [13], [14], [24].

Как видно из рисунка 4, ИИ после прохождения СФ попадает в алмазный ЧЭ (АЧЭ), в котором возникают свободные носители заряда, и во внешней цепи протекает импульс тока, который поступает на

зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ), где преобразуется в импульс напряжения, амплитуда которого пропорциональна заряду Q . Выходной сигнал ЗЧУ подаётся на пиковый детектор (ПД), после чего преобразуется с помощью АЦП в цифровые коды амплитуды и подаётся в микроконтроллер (МК) для обработки. Таким образом, выходной сигнал АД представляет собой спектр амплитуд напряжения, пропорциональных энергии, переданной ионизирующей частицей АЧЭ.

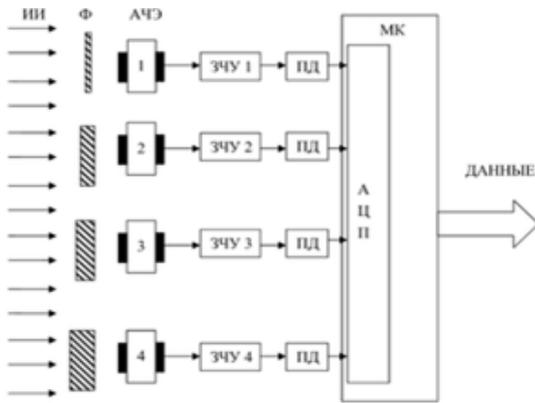


Рис. 4. Функциональная схема построения МДС на основе АД для реализации спектрометра КИ

Каналы регистрации АД отличаются друг от друга материалом и толщиной входных фильтров, которые служат для смещения спектров энерговыделения ионизирующих частиц в АД (предварительная селекция по энергии).

Измерение эффективности сбора заряда АЧЭ (параметр ССЕ) представляет достаточно сложную задачу. В связи с этим проводилась экспериментальная калибровка спектров выходного сигнала АД по энергии. Калибровка проводилась путём измерения спектров выходного сигнала ЗЧУ АД при воздействии нейтронного излучения D-T генератора (энергия нейтронов 14,1 МэВ). Спектры измерялись при помощи процессора импульсных сигналов (ПИС) GreenStar, который обеспечивает высокую пропускную способность, в т.ч. что при работе с высокими (более $5 \cdot 10^4$ имп/с) интенсивностями КИ.

III. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СРК НА ОСНОВЕ АД

В работах [15] – [22] представлены основные положения разработанных нами конструктивно-технологических решений СРК на основе МДМ, а также описание физико-математической модели и основных элементов функционирования данной системы.

Нами были экспериментально определены параметры модели, и использованием которой было проведено имитационное моделирование работы СРК на основе АД, рассчитаны спектры выходного сигнала при воздействии электронов и протонов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), а также протонов СКЛ. Показано, что анализ выходного сигнала СРК на основе АД позволяет разделить вклад от электронов и протонов, а также вклад

от протонов высоких и низких энергий. Для восстановления энергетических спектров электронов необходимо использование нескольких каналов регистрации. Полученные результаты могут быть использованы при обучении нейронных сетей для решения задачи восстановления спектров регистрируемых космических излучений.

Рассмотрим основные особенности полученных спектров энерговыделения.

Во-первых, спектры электронов и протонов существенно различаются по энерговыделению. Для высокоэнергетичных протонов (100 МэВ и более) энерговыделение больше, чем для электронов в 3÷4 раза, а для низкоэнергетичных – почти на порядок, что позволяет эффективно разделять вклад протонов и электронов в выходной сигнал АД. Во-вторых, положения максимумов энерговыделения для протонов сильно зависят от их энергии. Это упрощает процедуру восстановления спектров протонов. Для электронов форма спектров энерговыделения практически не зависит от исходной энергии, что позволяет оценить их интегральный поток.

Энерговыделение нейтронов в алмазе изучено [16], что даёт возможность идентифицировать пики спектров и определить значения поглощённой энергии. Экспериментально полученный спектр выходного сигнала ЗЧУ показан на рисунке 5, где стрелкой показан высокоэнергетичный пик, соответствующий реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ (энерговыделение в алмазе 8,4 МэВ).

Положение данного пика позволяет откалибровать шкалу ПИС в единицах энергии, поглощённой АЧЭ. На рисунке 6 по оси ординат приведены данные скорости счета (с^{-1}), а по оси абсцисс - номер канала ПИС.

Сравнение спектров выходного сигнала АД и спектров сигнала ЗЧУ, зарегистрированных с помощью ПИС, позволяет откалибровать спектры АД в единицах поглощённой энергии. Также возможно проведение калибровки с использованием β и протонного излучения. На рисунках 6 и 7 показаны спектры энерговыделения электронов и протонов, рассчитанные в среде в среде Geant 4 для АЧЭ первого канала регистрации.

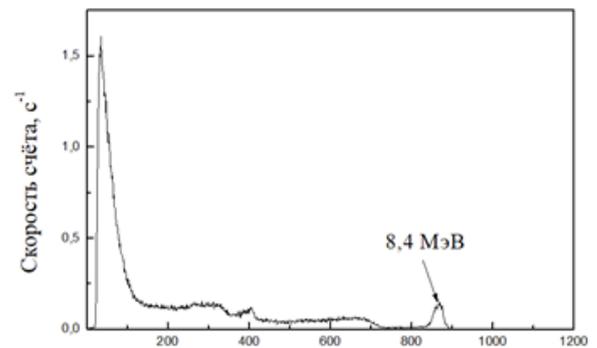


Рис. 5. Спектр энерговыделения нейтронов в АЧЭ

Рассмотрим основные особенности полученных спектров энерговыделения. Во-первых, спектры электронов и протонов существенно различаются по энерговыделению. Для высокоэнергетичных протонов (100 МэВ и более) энерговыделение больше, чем для электронов в 3÷4 раза, а для низкоэнергетичных – почти на порядок,

что позволяет эффективно разделять вклад протонов и электронов в выходной сигнал АД. Во-вторых, положения максимумов энерговыделения для протонов сильно зависят от их энергии.

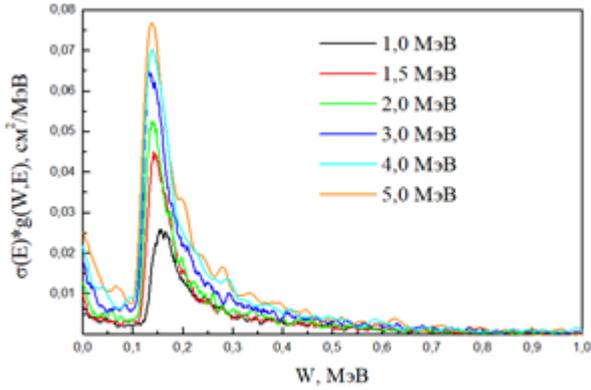


Рис. 6. Спектры энерговыделения электронов с различными исходными энергиями в АЧЭ первого канала

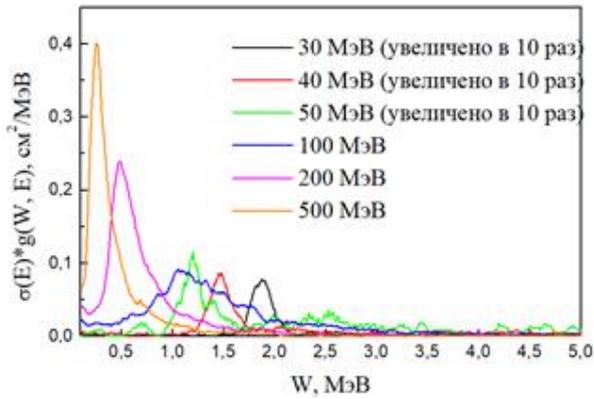


Рис. 7. Спектры энерговыделения протонов с различными исходными энергиями в АЧЭ первого канала

Это упрощает процедуру восстановления спектров протонов. Для электронов форма спектров энерговыделения практически не зависит от исходной энергии, что позволяет оценить их интегральный поток

IV. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АД

Цель имитационного моделирования АД – получение совокупности выходных его сигналов при воздействии КИ различного спектрального состава. Полученные результаты использованы при обучении нейронных сетей для восстановления спектров регистрируемых детектором КИ. Описание имитационного моделирования работы АД при воздействии электронов и протонов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), а также протонов солнечных космических лучей (СКЛ) приведено в работе [22]. Спектры электронов и протонов ЕРПЗ, а также протонов СКЛ, использованные при моделировании, приведены на рисунках 8-10.

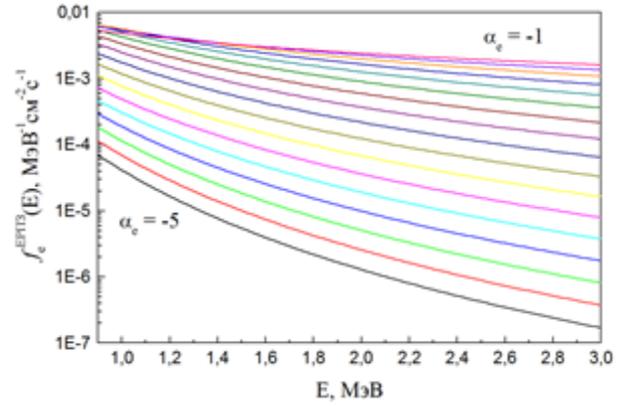


Рис. 8. Спектры электронов ЕРПЗ, использованные в расчётах

Результаты моделирования выходного сигнала АД при воздействии электронов ЕРПЗ приведены на рисунке 11.

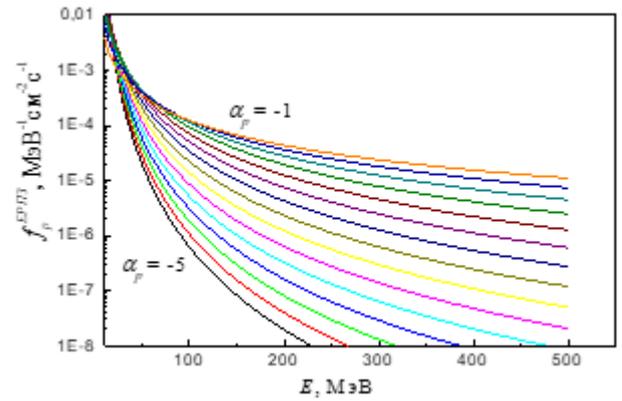


Рис. 9. Спектры протонов ЕРПЗ, использованные в расчётах

Из рисунка 11 видно, что форма спектров выходного сигнала АД практически не изменяется при изменении жёсткости энергетических спектров электронов ЕРПЗ, – меняется только амплитуда спектров. Это означает, что с помощью одного канала регистрации невозможно восстановить исходный энергетический спектр электронов.

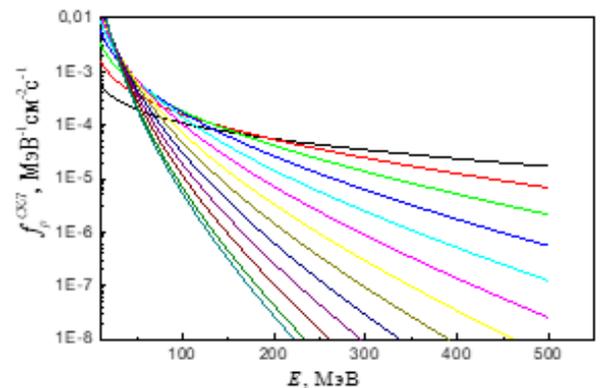


Рис. 10. Спектры протонов СКЛ, использованные в расчётах

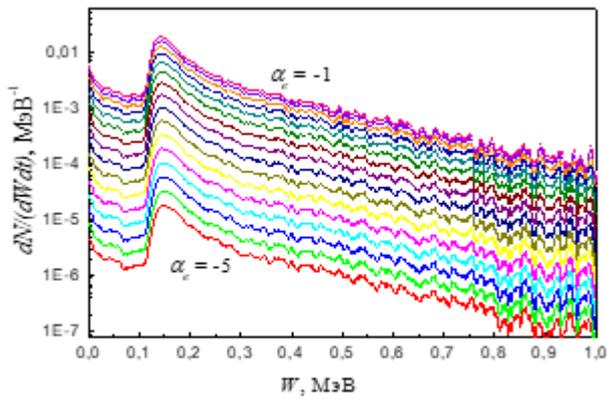


Рис. 11. Спектры выходного сигнала АД при воздействии электронов ЕРПЗ

Для корректного восстановления спектров КИ в АД используется четыре канала регистрации, отличающихся толщиной входных СФ, которые отсекают низкоэнергичное КИ, осуществляя физическое разделение частиц по энергии. На рисунках 12 и 13 приведены спектры выходного сигнала АД при воздействии протонов ЕРПЗ и СКЛ. Следует отметить две важные особенности полученных спектров:

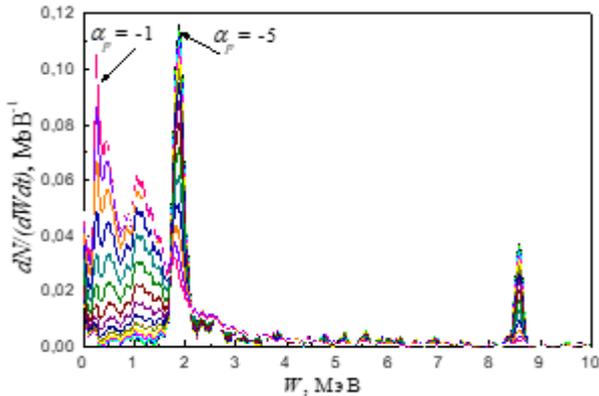


Рис. 12. Спектры выходного сигнала АД при воздействии протонов ЕРПЗ

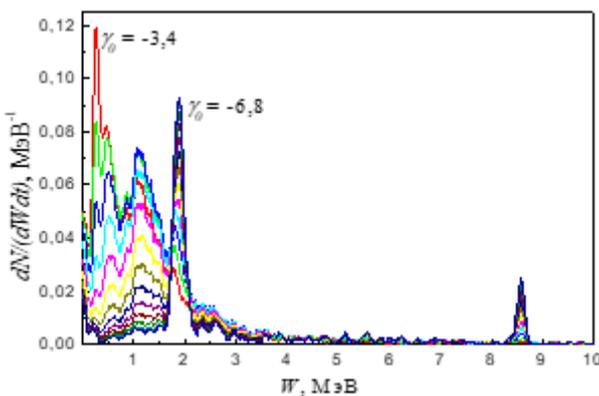


Рис. 13. Спектры выходного сигнала АД при воздействии протонов СКЛ

1) энергия, передаваемая протонами АЧЭ, в 3÷4 раза выше, чем энергия, передаваемая электронами (в среднем по спектрам),

2) спектры выходного сигнала АД сильно различаются при изменении жёсткости энергетического спектра протонов. Высокоэнергичные протоны дают сигнал с меньшей амплитудой, чем низкоэнергичные. Указанные особенности позволяют разделить выходные сигналы, полученные при воздействии электронов и протонов, а также получить информацию о форме энергетического спектра протонов. Тем не менее, для повышения точности восстановления так же, как и для электронов, будут использованы сигналы 4-х каналов регистрации, которые позволят физически разделить низкоэнергичные и высокоэнергичные протоны.

Таким образом, была разработана физико-математическая модель АД КИ и ИИ, экспериментально определены её параметры. С использованием разработанной модели проведено имитационное моделирование работы АД, рассчитаны спектры выходного сигнала при воздействии электронов и протонов ЕРПЗ, а также протонов СКЛ.

Показано, что анализ выходного сигнала АД позволяет разделить вклад от электронов и протонов, а также вклад от протонов высоких и низких энергий. Для восстановления энергетических спектров электронов необходимо использование нескольких каналов регистрации.

Полученные результаты могут быть использованы при обучении нейронных сетей для решения задачи восстановления спектров регистрируемых КИ.

V. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СРК НА ОСНОВЕ АД ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ РКТ

Результаты исследований и разработки конструктивно-технологических основ МДМ на основе АД обеспечили создание МДС, как основы базовых многофункциональных СРК КИ, объединяющих в своем составе алмазные МДМ и АПС. Созданные СРК в совокупности обеспечивают выполнение функций диагностики дозовых и спектрометрических характеристик КИ различного типа.

Выполненные исследования и разработки обеспечили создание первых в стране образцов БРЭА на основе АД для контроля КИ. За последние годы нами были разработаны и изготовлены образцы РЭА и БРЭА на основе алмазных ДИИ для контроля различных типов ИИ для ведущих предприятий ракетно-космической промышленности страны.

Растущий интерес к использованию радиоэлектронных бортовых устройств на основе АД для контроля КИ связан с рядом причин, включая задачи по увеличению длительности эксплуатации (сроков активного существования, САС) изделий РКТ. Проблемы обеспечения САС связаны, в том числе, с негативным воздействием радиационных факторов на БРЭА РКТ, к которым относятся ИИ как естественного, так и техногенного происхождения. К последним, в частности, относятся ИИ от энергетических и двигательных установок

КА, использующих ядерные энергетические установки (ЯЭУ) и ядерные энергодвигательные установки (ЯЭДУ).

В условиях реального применения, базовые конструктивно-технологические решения многофункциональных МДС диагностики КИ дорабатывались и адаптировались применительно к практическим задачам и требованиям потребителей конечных систем, см., например, работы [18], [27], [28].

Применение в составе РКТ распределенных малогабаритных бортовых СРК (БСРК) позволит не только обеспечить получение новой информации о параметрах радиационной активности космической, среды, воздействующих факторов ИИ, но и повысить надежность таких систем в 5÷6 раз по отношению к существующим прототипам, обеспечит их стойкость к воздействию ВВФ, представляемых к аппаратуре двойного назначения.

Рассмотрим практическую реализацию конструктивно-технологических решений для построения многофункциональной СРК на основе АД на примере блока селективного регистратора КИ для РКТ, см. [28].

На рисунке 14 представлен внешний вид блока регистратора КИ. На рисунке 15 представлены конструкция и компоновка его основных узлов, в котором установлено два идентичных спектрометрических субмодуля регистрации, один из которых является рабочим, а второй используется в качестве резервного.

Спектрометрический узел (поз. 5 – 7 на рисунке 15) состоит из платы модуля усиления (поз. 7), платы интерфейса модуля цифровой обработки (поз. 6), платы модуля питания (поз. 5). АД (поз. 4) установлены на плате модуля усиления и располагаются под коллимационными окнами корпуса. В коллимационные окна установлены селективные фильтры (поз. 1), которые обеспечивают разделение КИ по диапазонам. На торцевых сторонах корпуса установлены разъем питания (поз. 2) и интерфейсный разъем (поз. 10).

В приборе используются дискретные АД в виде бескорпусных сборок, аналогичные тем, которые показаны на рисунке 2. Конструкция модуля позволяет располагать ЧЭ в непосредственной близости к преусилителям сигнала, чем обеспечивается минимизация шумов электронного тракта усиления и влияние электромагнитных помех.



Рис. 14. Внешний вид (фотография) блока селективного регистратора КИ

ЧЭ используемых АД отличаются друг от друга по конструктивным и функциональным характеристикам, при этом два ЧЭ используются для регистрации суммарного потока электронов, протонов и тяжелых ионов; два ЧЭ - для регистрации низкоэнергетических протонов и электронов (с энергиями более 3 МэВ); два ЧЭ с увеличенной рабочей площадью используются для регистрации протонов (с энергиями более 30 МэВ) и тяжелых ионов. Селекция электронов и протонов по энергиям обеспечивается за счет применения АД, перед которыми установлены СФ различной толщины. Расчеты показали, см. [4], [28], [29], что при использовании данного регистратора КИ статистические погрешности измерения потоков ИИ в различных энергетических диапазонах находятся в пределах 10 % (при времени измерения от 5 до 10 мин).

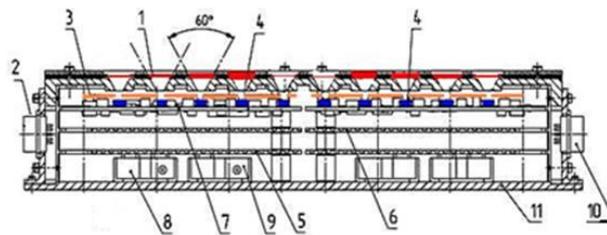


Рис. 15. Конструкция и компоновка основных узлов селективного регистратора КИ

Экспериментальные проверки конструктивно-технологических решений и АПС построения регистратора КИ путем сравнения теоретических значений с экспериментальными данными (по скорости счета образца АД потока β -частиц от источника ^{90}Sr - ^{90}Y), показали [9], [29], что отклонение расчетных значений скорости счета β -частиц не превышает 10 % от экспериментальных значений. На рисунках 16 - 18 представлены графики, демонстрирующие селекцию частиц КИ различных типов и энергий, полученные в ходе измерения при применении набора фильтров [18], [28].

На рисунке 16 показаны графики энергетической селекции потока электронов КИ при использовании 4-х СФ с толщинами от 0,24 до 4,4 мм. На рисунке 17 показаны графики энергетической селекции потока протонов КИ при использовании 4-х СФ с разными толщинами, от 0,24 до 4,4 мм. На рисунке 18 показаны графики для 4-х типов заряженных ионов (кислород, аргон, железо, ксенон) с различными энергиями.

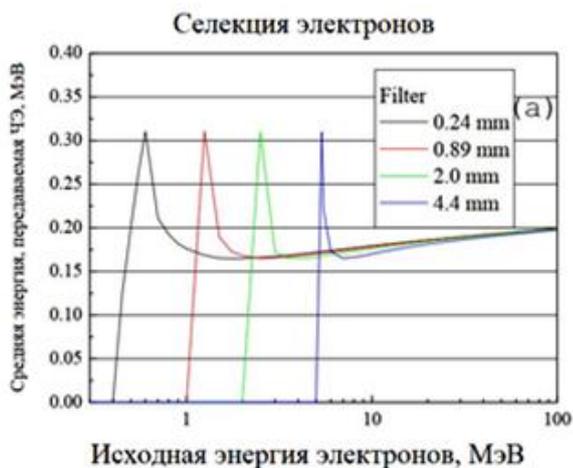


Рис. 16. Графики энергетической селекции потока электронов КИ

Из представленных на рисунках 16 и 17 графиков видно, что спектры сигналов, получаемые на выходе 1-го, 2-го, 3-го и 4-го алмазных ЧЭ смещены по энергетической шкале в соответствии с увеличением толщины СФ. Такое смещение позволяет в каждом канале регистрации фиксировать частицы заданного диапазона энергий.

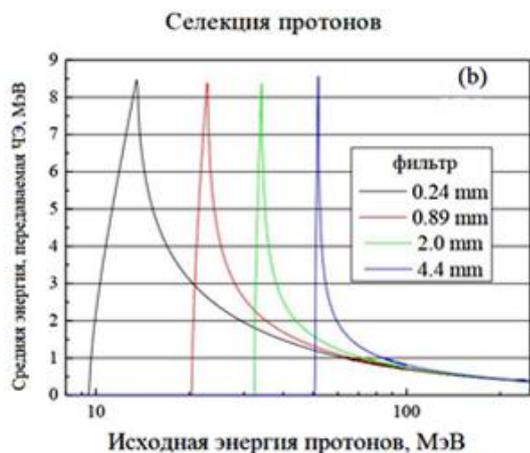


Рис. 17. Графики энергетической селекции протонов КИ

Из графиков также видно, что сигналы от электронов и протонов имеют разные амплитуды, что позволяет разделить эти сигналы между собой с помощью амплитудной дискриминации. Регистрация электронной компоненты КИ в данном блоке производится в энергетическом диапазоне (0,2 ÷ 0,3) МэВ; регистрация протонной компоненты - в энергетическом диапазоне (2 ÷ 10) МэВ.

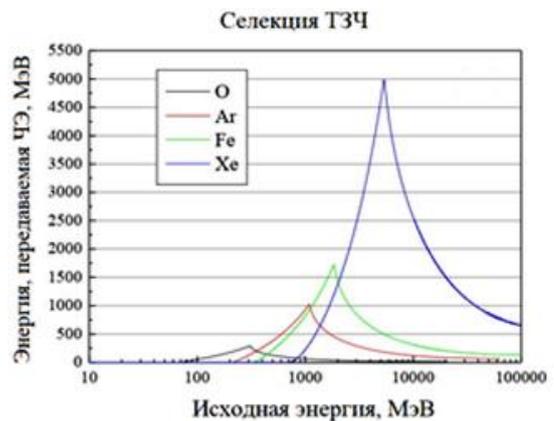


Рис. 18. Графики энергетической селекции ТЗЧ

Для регистрации тяжелых ионов используется 5-й канал, в котором ионы селективируются с помощью амплитудного отбора в диапазоне от 100 до 1000 МэВ, см. графики на рисунке 18. Амплитудные диапазоны сигналов даны в энергетическом эквиваленте. Поглощенная доза от электронной и протонной компонент и тяжелых ионов КИ определяется расчетным путем на основании полученных спектров излучений, см., [16], [22].

VI. БОРТОВЫЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ КИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПИЛОТИРУЕМОГО КОРАБЛЯ

В настоящее время выполняются работы по изготовлению спектрометрических блоков (СБ) для многофункционального контроля параметров радиационной обстановки с использованием АД для пилотируемого многоразового космического корабля, разрабатываемого в ПАО «РКК «Энергия». Нами были выполнены разработка, изготовление, испытания спектрометра заряженных частиц для системы контроля радиационной обстановки (СКРО) для пилотируемого космического корабля и контрольно-проверочной аппаратура (КПА) для спектрометра СКРО (выпущена рабочая документация, проведены полностью автономные испытания, присвоена литера «О», изготовлены лётные образцы спектрометра).

Работы по изготовлению СБ контроля радиационной обстановки выполняются с учетом конструктивно-технологических решений по созданию бортового регистратора потоков КИ для перспективных образцов РКТ, см. [17], [12]. Бортовой регистратор потоков КИ представляет собой радиоэлектронную модульную конструкцию, в которой используется комплекс АД, предназначенных для селективной регистрации различных типов (компонент) КИ.

На рисунке 19 показаны фотографии СБ контроля потоков КИ.

На рисунке 20 показана фотография СБ: вид блока без защитной крышки.

На рисунке 21 показана фотография СБ: сечение блока с перечнем конструктивных элементов.

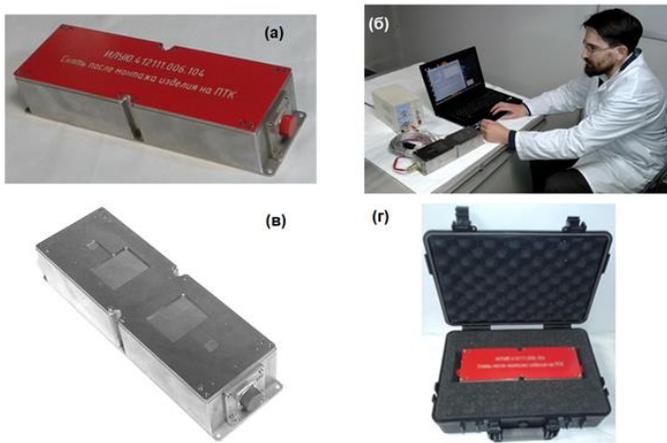


Рис. 19. Фотографии СБ контроля КИ: (а) готовый блок (вид с защитной крышкой); (б) блок, подключенный к КПА; (в) вид блока без защитной крышки; (г) изготовленный блок в укладочном ящике

На рисунке 21 цифрами обозначены элементы блока: 1– фильтр селективный; 2– разъем питания; 3– экран узла детектирования; 4– АД; 5 – плата узла питания; 6– плата узла интерфейса; 7– плата узла детектирования; 8 – разъем интерфейса; 9 – корпус; 10 – крышка с коллимационными отверстиями; 11 – планки.

СБ полностью выполнен на отечественной ЭКБ, без применения зарубежных комплектующих изделий. СБ формирует измерительные данные (ИД) о параметрах потоков КИ, которые передаются в блок обработки данных.

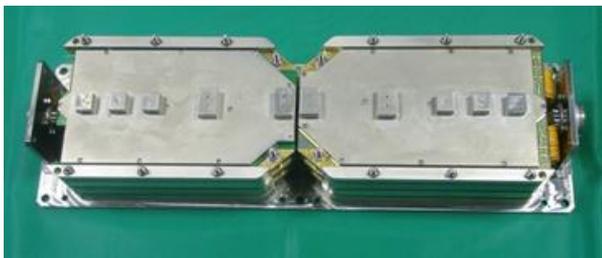


Рис. 20. Спектрометрический блок: вид спектрометра без защитной крышки

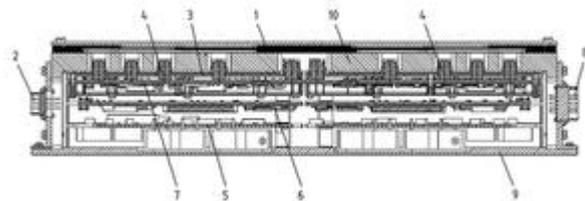


Рис. 21. Спектрометрический блок: сечение блока с перечнем конструктивных элементов

Разработанные совместно со специалистами РКК «Энергия» конструктивные и технологические решения позволили создать первый в стране образец селективного регистратора (спектрометра) КИ на основе АД для непрерывного контроля радиационной обстановки на внешней стороне пилотируемого многоразового космического корабля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Впервые в стране и одними из первых в мире были выполнены исследования, разработка, изготовление и поставки для оснащения изделий РКТ бортовых систем контроля КИ и ИИ на основе АД для многофункциональной диагностики дозовых и спектрометрических характеристик КИ различного типа.

Впервые в стране и одними из первых в мире были исследованы, разработаны и внедрены в промышленность оригинальные конструктивно-технологические решения бортовых СРК на основе использования многодетекторной системы на основе АД, разделения потока ИИ в многодетекторной системе на энергетические поддиапазоны; использование ИНС и оригинальных программно-аппаратных методов обработки поступающих данных для селектирования и анализа КИ, в совокупности обеспечившие создание первых в стране и в мире серийных и опытных образцов БРЭА для контроля КИ на основе АД.

Разработанные конструктивно-технологические решения и созданные на их основе образцы РЭА были использованы для оснащения отечественных КА, включая:

- блоки типа «АДИИ» для многофункционального контроля радиационной обстановки и уровня поглощенной дозы КИ снаружи негерметичного приборного отсека КА серии «Глонасс» производства АО «ИСС им. М.Ф.Решетнева»,
- блоки контроля КИ для отечественных КА двойного применения производства АО «ИСС им. М.Ф.Решетнева»,
- спектрометрических блоков многофункционального контроля параметров радиационной обстановки с использованием АД для пилотируемого многоразового космического корабля, в интересах ПАО «РКК «Энергия».

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № F5FZ-2022-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] P. Bergonzo, R.V. Jackman. Semiconductors and Semimetals. Ch.6 Diamond-based radiation and photon detectors. 2004. V. 77, P. 197-309. doi: 10.1016/S0080-8784(04)80018-8.
- [2] Metcalfea, G.R. Fern, P.R. Hobson, T. Ireland, A. Salimian, J. Silver, D.R. Smith, G. Lefeuve, R. Saengerd. Development of high temperature, radiation hard detectors based on diamond. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Volume 845, 11 February 2017, P. 128-131 doi: 10.1016/j.nima.2016.06.091
- [3] Bossini E. and Minafra N. (2020) Diamond Detectors for Timing Measurements in High Energy Physics. Front. Phys. 8:248. doi: 10.3389/fphy.2020.00248/3.2
Kozlov S., Radiation detectors on the diamond // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. V. NS-22, No.1. P.160.
- [4] Алтухов А.А., Кадилин В.В., Колубин В.А., Львов С.А., Недосекин П.Г., Тюрин Е.М, Самосадный В.Т. Опыт применения алмазных детекторов для временного и спектрального мониторинга

- ионизирующих излучений. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техническая физика и автоматизация. 2013.- Вып.67 (часть 2).- С.92-101.
- [5] Алтухов А.А., Кулагин В.П., Чумаченко Е.Н., Львов С.А., Недосекин П.Г. Новые структуры на основе алмазных детекторов для космических транспортных систем // Авиакосмические технологии 210 (АКТ-2014): Труды XV Всероссийской научно-технической конференции. – Воронеж. 2014, С.7-9.
- [6] Кадилин В.В., В.А. Колюбин, С.А. Львов, П.Г. Недосекин, В.А. Идалов, Е.М. Тюрин, С.В. Колесников, В.Т. Самосадный. Перспективы применения алмазных детекторов для регистрации заряженных частиц космического излучения // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – т. 5, №2. – С. 138–144.
- [7] Алтухов А.А., Балашов С.В., Авдюшкин С.А., Тихомиров Р.Е., Деревянко Ю.Б., Захарченко К.В., Колюбин В.А., Львов С.А., Недосекин П.Г. Испытания опытного образца блока регистрации космических частиц на основе алмазных чувствительных элементов. //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2017.- № 4.- С.20-25.
- [8] Алтухов А.А., Герасимов О.Ф. Герасимов Ю.В. Гостев М.Г. Ситников А.В. Митёнкин. Дозиметр электронного и протонного излучений с алмазным чувствительным элементом. //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру.- Вып.3.- 2009.- С.80-81.
- [9] Алтухов А.А., Герасимов О.Ф., Гостев Ю.В., А.В. Митёнкин. Дозиметр электронного и протонного излучений с алмазным чувствительным элементом. // Программа XI Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» (СТОЙКОСТЬ-2008) 3–4 июня 2008 года, Лыткарино, Московская обл.
- [10] Алтухов А.А., Анашин В.С., К.Н. Зяблюк, В.А. Колюбин, С.А. Львов, М.Г. Ситников, В.А.Скуратов. Экспериментальные исследования алмазного детектора в пучке циклотрона тяжелых ионов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. ISSN: 1997-2830. 2011.- Вып.1.- С.56-58.
- [11] Алтухов А.А., Анашин В.С., Емельянов В.В., Козюков А.Е., Колюбин В.А., С.А. Львов, Недосекин П.Г., М.Г. Ситников. Исследования алмазного спектрометра в пучке ускоренных тяжелых ионов канала В5 циклотрона У-400М. Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2013.- № 1.- С. 85-86.
- [12] Altukhov A.A., K.V. Zaharchenko, V.A. Kolyubin, S.A. Lvov, P.G. Nedosekin, E.M. Tyurin, R. F. Ibragimov, V.V. Kadilin and I.V. Nikolaev. Selective detector of cosmic particles based on diamond sensitive elements. International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2015) IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series 675 (2016) 042027 doi:10.1088/1742-6596/675/4/042027.
- [13] Afanasiev V., Kaperko A., Kulagin V., Kolyubin V. Method of Adaptive Filtering in the Problem of Restoring Parameters of Cosmic Radiation Automation and Remote Control, 2017, Vol. 78, No. 3, pp. 397-412. / Automation and Remote Control. 2017. No. 3. P. 397-412.
- [14] Каперко А.Ф., Кулагин В.П. Интеллектуальные методы и информационные технологии в процессах контроля и управления потоками ионизирующего излучения. Информационные технологии в науке, образовании и управлении (ИТНОУ).- 2017.- №2.- С.30-35.
- [15] Zakharchenko K.V., Kaperko A.F., Kolyubin V.A., Kulagin V.P., L'vov S.A., Nedosekin P.G. Modeling the Operation of a Sensor Unit in a Monitoring Device for the Parameters of Cosmic Ray Fluxes. Measurement Techniques, 2016, T.59.- N.8.- P. 884-891.
- [16] Алтухов А.А., Захарченко К.В., Ибрагимов Р.Ф., Колюбин В.А., Львов С.А., Тюрин Е.М. Калибровка энергетической шкалы блока регистрации космических частиц на основе алмазных чувствительных элементов с использованием нейтронного излучения // Сб. трудов 22 Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» - «Стойкость 2019». 2019. С. 79–80.
- [17] Zakharchenko K.V., Kaperko A.F., V.A., V.P. Kulagin, L'vov S. A., Kolyubin, Nedosekin P.G. & Chumachenko E. N.. Spectrometric Diamond Detector of Fluxes of Ionizing Radiation for Space Transportation Systems. Measurement Techniques. V.58, P. 713–718 (2015).
- [18] Zakharchenko K.V., Altukhov A.A., Ibragimov R.F., Kolyubin V.A., Lvov S.A., Tyurin E.M. Characterization of space radiation monitor based on diamond sensitive elements for future interplanetary missions. The Tenth Moscow Solar system symposium 2019. (10 MS-PS-14). P.P. 285-287.
- [19] Микрин Е.А., Кульба В.В., Павлов Б.В. Разработка моделей методов проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов // АиТ. 2013. № 3. С. 38–50.
- [20] Е. В. Гладченков, К. В. Захарченко, Р. Ф. Ибрагимов, А. Ф. Каперко, В. А. Колюбин, В. П. Кулагин, П. Г. Недосекин, Е. М. Тюрин. Экспериментальные исследования и математическое моделирование работы алмазных детекторов ионизирующих излучений. //Приборы и техника эксперимента, 2017.- № 3.- С. 37–42.
- [21] Захарченко К.В., Каперко А.Ф., Колюбин В.А. и др. Спектрометрический алмазный детектор потоков ионизирующего излучения для транспортных космических систем // Измерительная техника. 2015.- No 6.- С. 63–67.

- [22] Алтухов А.А., Захарченко К.В., Колюбин В.А. Имитационное моделирование работы алмазного детектора ионизирующих излучений // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2021. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИПИМ РАН, 2021. Вып. IV. 218 с. С.56-51 DOI: 10.31114/2078-7707-2021-4-46-51.
- [23] Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce P, et al. Geant4 - a simulation toolkit. Nuclear Instrum Methods Phys Res Sec A. (2003) 506:250–303. doi: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8
- [24] Altukhov, A.A. Diamond-Based Detectors of Ionizing Radiation. Russ Microelectron 52, 205–212 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063739723700312/>
- [25] K.V. Zakharchenko, A.A. Altukhov, R.F. Ibragimov, V.A. Kolyubin, S.A. Lvov, E.M. Tyurin. Diamond detectors of space radiation: the ways to counter the polarization effect. The Eleventh Moscow solar system symposium 11M-S3 October 5-9, 2020. Space Research Institute Of Russian Academy Of Sciences MOSCOW, RUSSIA 11M-S3-Abstract_book_full_version_04.pdf (p.87-88). В книге: The Eleventh Moscow Solar System Symposium 11M-S3. Москва, 2020.- С. 92-93.
- [26] Истратов А.Ю., Захарченко К.В., Каперко А.Ф., Колюбин В.А., Кулагин В.П., Курочкин Р.И. Применение нейросетевого подхода к измерениям потоков космического излучения // Измерительная техника. 2016. №3. С. 49–54.
- [27] Захарченко К.В., Каперко А.Ф., Колюбин В.А. и др. Спектрометрический алмазный детектор потоков ионизирующего излучения для транспортных космических систем // Измерительная техника. 2015.- № 6.- С. 63–67.
- [28] Алтухов, А. А. Сравнительные исследования детекторов ионизирующих излучений, изготовленных на основе алмазных пластин различного типа / А. А. Алтухов // Нано- и микросистемная техника. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 68-75. – DOI 10.17587/nmst.23.68-75. – EDN WBVKHM.
- [29] Ibragimov R.F., Kadilin V.V., Tyurin E.M., Gladchenkov E.V., Kolyubin V.A., Nedosekin P.G., Zaharchenko K.V. Experimental checking results of mathematical modeling of the radiation environment sensor based on diamond detectors. 2017 J. Phys.: Conf. Ser.798. 012180. doi: 10.1088/1742-6596/798/1/012180.

DEVELOPMENT OF ONBOARD RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS FOR MONITORING IONIZING RADIATION BASED ON DIAMOND DETECTORS

Altukhov A.A.

Laboratory "Diamond Microwave Electronics"
"MIREA - Russian Technological University" (RTU MIREA)
Moscow, Russia
altuhov_a@mirea.ru

Abstract – The results of research on the creation of radio-electronic devices based on diamond detectors for monitoring ionizing and cosmic radiation are presented. The developed design and technological solutions and created devices were used to equip domestic spacecrafts.

Keywords – diamond, detector, ionizing radiation, cosmic radiation

УДК 621.374.33

МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ШУМОПОДАВЛЕНИИ

Костин М.С.

Кафедра радиоволновых процессов и технологий
Институт радиоэлектроники и информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
kostin_m@mirea.ru

Шильцин А.В.

Кафедра радиоволновых процессов и технологий
Институт радиоэлектроники и информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
adaptox@gmail.com

Аннотация — радиоволновые особенности диффузного отражения и формовременной деформации сверхкороткоимпульсных сигналов (СКИ) СВЧ-диапазона представляют научный интерес для практической реализации сигнального распознавания объектов по их радиофизическим идентификаторам в задачах ближнего радиодобружения ввиду того, что относительная сверхширокополосность наносекундных импульсов позволяет с априорной достоверностью по восстановленным локализованным в частотно-временной области импульсным характеристикам определять параметры облучаемых сред и материальных объектов. При этом научный интерес к радиоволновым особенностям формоизменения отраженных от облучаемых поверхностей или прошедших через различные среды, такие как среды с динамически меняющимися показателями диэлектрической и магнитной проницаемости (тропосфера, плазма) наносекундных радиоимпульсов требует поиска быстродействующих комбинированных решений аналого-цифрового преобразования СКИ-сигналов с целью их восстановления и сигнальной постобработки. Решением, сочетающим в себе сверхширокополосность и относительно низкие частотные искажения, является радиофотонное преобразование, обеспечивающее электрооптическую модуляцию лазерного излучения радиочастотным СКИ, с его последующим преобразованием и радиофотонным дублированием, которое делает возможным его восстановление стробоскопическими методами.

Ключевые слова — радиофотонный мультиплекс-преобразователь, СКИ-сигнал, радиосенсорная система, радиоизображение, генерация СКИ, райсовская помеха.

ВВЕДЕНИЕ

Научный интерес к радиоволновым особенностям формоизменения отраженных от облучаемых поверхностей или прошедших через различные среды, такие как среды с динамически меняющимися показателями диэлектрической и магнитной проницаемости (тропосфера, плазма) наносекундных радиоимпульсов требует поиска быстродействующих комбинированных решений аналого-цифрового

преобразования (АЦП) сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов с целью их восстановления и сигнальной постобработки [1, 2]. Известно, что прямая оцифровка и программная обработка наносекундных радиоимпульсов с субнаносекундным разрешением невозможна ввиду низкой частоты дискретизации и недостаточной широкополосности существующих параллельных АЦП. Стробоскопические методы восстановления СКИ отличаются широкополосностью, а также возможностью пикосекундной дискретизации сигнала в эквивалентном времени. Однако методы масштабно-временной трансформации требуют многократного зондирования объектов СКИ для восстановления радиоизображения. Облучение исследуемого объекта серией зондирующих СКИ приводит к проблеме, обусловленной интерференцией нескольких СКИ между собой из-за многолучевого распространения данных сигналов [3]. При интерференции искажается временной профиль сигнального радиоизображения, полученного от объекта.

Установлено, что существующие методы и средства обработки наносекундных СКИ, отличаются рядом недостатков: использование сверхбыстродействующих параллельных АЦП не эффективно вследствие низкой частоты дискретизации (менее 6 ГГц) и ограниченного числа уровней квантования (менее 8) [4] для восстановления СКИ-сигналов с субнаносекундным разрешением; технология масштабно-временного преобразования (МВП) не позволяет восстанавливать редко повторяющиеся СКИ без использования регенераторов, а также предъявляет жесткие требования к стробирующим импульсам [5]; технология строб-фрейм-дискретизации (СФД) позволяет исключить недостатки высокочастотного стробирования метода МВП, за счет селективного тактирования счетной цифровой логики [6], но не дает возможности восстановить финитный СКИ без использования радиофотонного повторителя (РФП); регенератор СКИ с усиленно-задержанной обратной связью имеет недостаток, связанный накоплением внутренних и внешних шумов через цепь обратной связи,

который не позволяет восстановить СКИ с субнаносекундной точностью в условиях многолучевых помех. Следует отметить, что ни одно из известных решений АЦП не позволяет с коэффициентом корреляции более 0,9 оцифровать финитный СКИ-сигнал, однако схемы стробоскопического МВП и СФД позволяют их использовать совместно с повторителями СКИ [7].

I. МЕТОД РАДИОФОТОННОГО МУЛЬТИПЛЕКС-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Решение задачи минимизации интерференционного многолучевого воздействия предполагает использование сверхширокополосного повторителя импульсных сигналов. Действительно, в активном радиовидении повторитель сигналов является наиболее эффективным радиотехническим решением клонирования радиоимпульсов, позволяющим восстановить финитный СКИ-сигнал при помощи последующего стробоскопического преобразования.

Радиофотонный мультиплекс-преобразователь СКИ-сигналов сочетает в себе преимущества схем с петлей обратной связи и дробным мультиплексированием [8]. Предлагается дополнить петлю обратной связи массивом линий задержки. Здесь в отличие от регенератора с петлей обратной связи [9] СКИ-сигнал после операций усиления и задержки во времени попадает сразу не на ФД и далее на СФД, а на каскад линий задержки, аналогичный такому в схеме с дробным мультиплексированием.

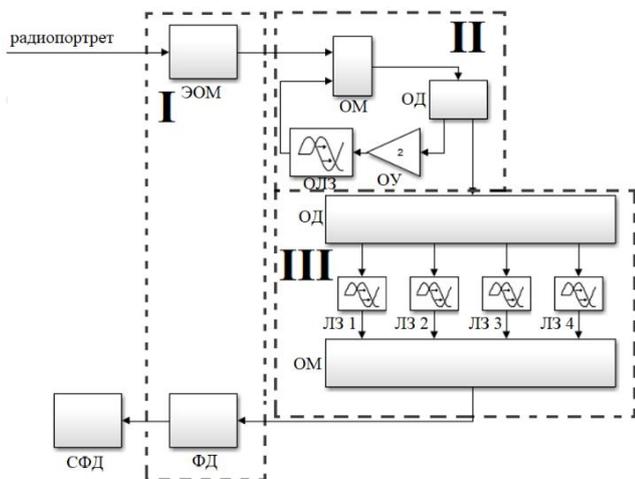


Рис. 1. Модель РФМП СКИ-сигналов с обратной задержанной связью, дробным мультиплексированием и массивом из 4 линий задержки

На рисунке 1 позиция I – модуль радиофотонного преобразования, состоящий из ЭОМ – электрооптического модулятора и ФД – фотодиода, позиция II – модуль радиофотонного дублирования, состоящий из ОМ – оптического мультиплексора, оптического делителя (ОД), оптического усилителя (ОУ) и ОЛЗ – оптической линии задержки, позиция III – модуль радиофотонного мультиплексирования, состоящий из оптического делителя, оптического мультиплексора и массива линий задержки.

За счет меньшего количества операций дублирования сигнала (в число раз равное количеству линий задержки в массиве РФМП) в петле обратной связи уменьшается мультипликативный эффект внутренних шумов усилителя,

что позволяет выставлять большее количество уровней квантования, чем в схеме с обратной связью, это положительно сказывается на качестве восстановления оцифровываемого сигнала. Так же, в отличие от схемы с дробным мультиплексированием становятся ненужными большие массивы линий задержки, распределение мощности сигнала по которым приводит к деградации сигнала, обусловленному работой делителя оптического потока.

В ходе аналитических расчетов получена передаточная функция РФМП с массивом из N линий задержки

$$W_{\text{рфмп}}(j\omega, N) = \frac{1}{2N} \left[\frac{1 + \sum_{i=2}^N \exp(-j\omega\tau_{(i-1)})}{1 - \frac{1}{2} \exp(j\omega N \tau_{\text{ав}}) K_y} \right], \quad (1)$$

где N – число линий задержки в массиве РФМП, $K_{\text{ус}}$ – это коэффициент усиления усилителя, $\tau_{\text{глз}}$ – величина линии задержки в петле обратной связи, τ_i – величина i-й линии задержки в массиве. Для схемы РФМП параметры устойчивости в соответствии с передаточной функцией (1) – $K_{\text{ус}} < 2$, запас устойчивости по фазе = π .

II. АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИООТКЛИКА СИГНАТУРЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Для создания заданного исходного репера в среде программно-численного электродинамического моделирования Altair Feko [10, 11] построен цифровой двойник модификации беспилотника самолетного типа «Альтиус», внешняя поверхность которого представлена идеальным проводящим слоем, облучаемого СКИ-сигналом (рисунок 2).

Так, на рисунке 2 отчетливо виден радиоимпульс, прошедший через модель беспилотника, и отраженные радиоимпульсы – рассеянные радиотклики, сформированные исследуемым объектом в результате обратного отражения СКИ-сигнала от ее внешней поверхности. Несмотря на «наносекундный» характер длительности зондирующего радиоимпульса, важно отметить, что частотно-временная детализация сформированного профиля напряженности электрической компоненты СКИ-сигнала – принимаемого от цели радиоизображения, будет носить субнаносекундное распределение, частота верхних формант в спектре которого будет строго определена фронтами (крутизной спада и нарастания) гауссиана.

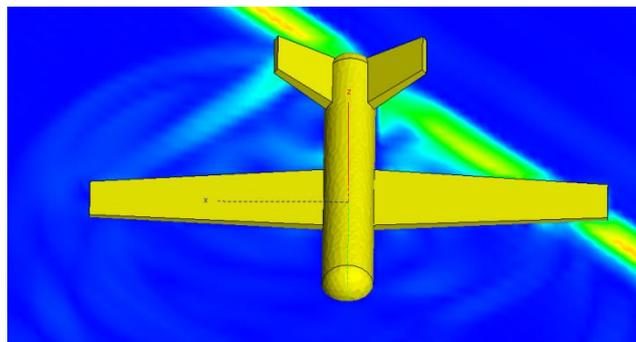


Рис. 2. Модель распределения электрического поля, рассеянного объектом сигнального радиоизображения

Произведем пространственно-временную селекцию интересующего сигнального радиоизображения цели (рисунок 3). Именно в таком виде анализируется полученное радиоизображение для оценки его воспроизводимости СФД, ранее рассмотренном в работе [12], при его моделировании в среде Simulink.

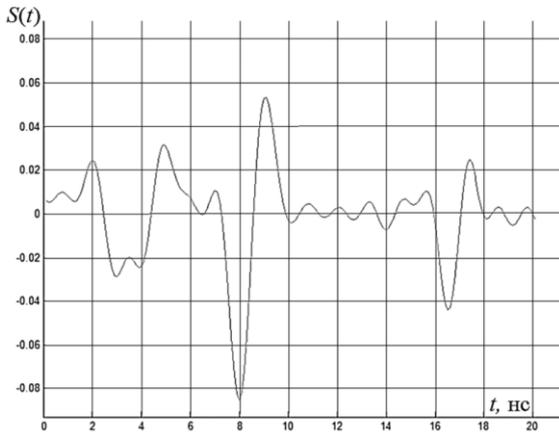


Рис. 3. Сигнальное радиоизображение сигнатуры БПЛА после облучения СКИ

III. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РАЙСОВСКОЙ ПОМЕХИ

В сигнальном радиовидении важной задачей является обеспечение надежного функционирования системы в условиях воздействия различных шумов и помех. Одним из таких мешающих воздействий является помеха, обусловленная многолучевым распространением зондирующего СКИ и полученного от исследуемого объекта сигнального радиоизображения.

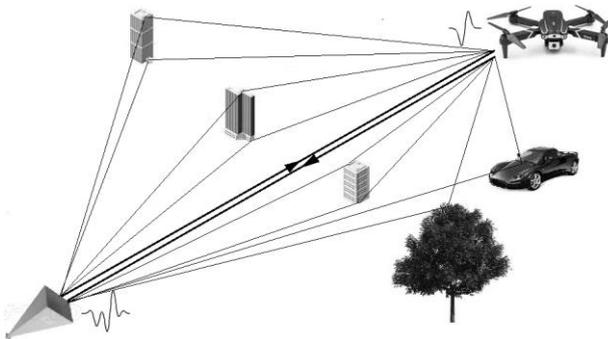


Рис. 4. Схематичное изображение многолучевого распространения, зондирующего СКИ и рассеянного исследуемым объектом сигнального радиоизображения

Воздействие такой помехи обычно моделируют при помощи Райсовской модели помехи, в котором помимо основного пути распространения сигнала в направлении прямой видимости еще присутствует побочный канал, представляющий собой суперпозицию из всех сигналов, обусловленных многолучевым распространением. Таким образом на входном тракте РФМП будет сумма из регулярной и случайной компоненты, которая подчиняется Райсовскому распределению [13].

$$S(t) = \begin{cases} \frac{t}{\sigma^2} I_0\left(\frac{mt}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{t^2 + m^2}{2\sigma^2}\right), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

где σ - среднееквадратическое отклонение шумового воздействия, m - математическое ожидание детерминированной компоненты шума,

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{x \cos t} dt - \text{функция Бесселя нулевого порядка.}$$

Для моделирования воздействия помехи, обусловленной многолучевым распространением сигнала, будет использоваться РФМП с каскадом из 8 и 16 линий задержки в диапазоне ОСШ (3...15) и ОСП (6...15) при 25 уровнях компаратора. На рисунке 5 и 6 представлены математические ожидания 30 измерений коэффициента корреляции между реперным и восстановленным сигнальным радиоизображением БПЛА.

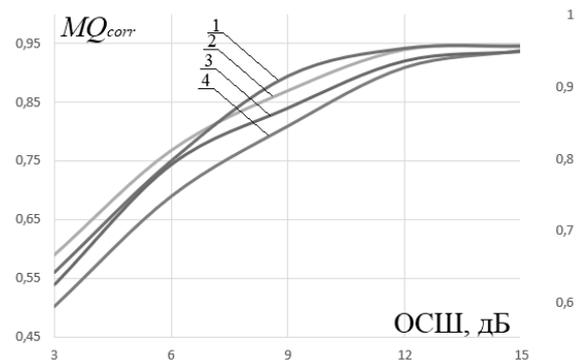


Рис. 5. Распределение математического ожидания коэффициента корреляции между реперным и восстановленным импульсом в зависимости от ОСШ на входе приемника для РФМП с каскадом из 8 линий задержки (кривые 1 – при ОСП 6 дБ, кривые 2 – при ОСП 9 дБ, кривые 3 – при ОСП 12 дБ, кривые 4 – при ОСП 15 дБ)

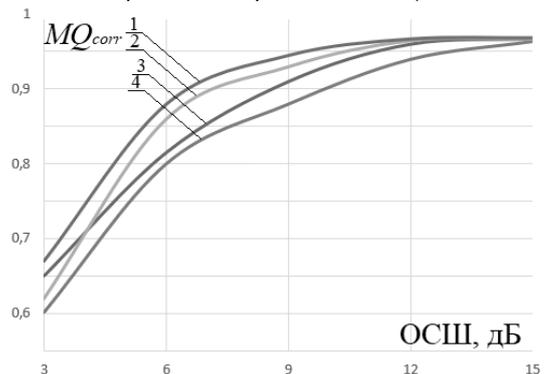


Рис. 6. Распределение математического ожидания коэффициента корреляции между реперным и восстановленным импульсом в зависимости от ОСШ на входе приемника для РФМП с каскадом из 16 линий задержки (кривые 1 – при ОСП 6 дБ, кривые 2 – при ОСП 9 дБ, кривые 3 – при ОСП 12 дБ, кривые 4 – при ОСП 15 дБ)

Из анализа полученных при численном моделировании результатов видно, что РФМП с 16 линиями задержки показывает лучшие результаты, чем РФМП с 8 линиями задержки. Связано это с тем, что для восстановления радиоизображения при помощи СФД с установленными 25 уровнями компаратора РФМП с 16 линиями задержки требуется 2 цикла радиофотонного мультиплекс-преобразования, тогда как РФМП с 8 линиями задержки уже требуется 4 таких цикла. Большее количество циклов радиофотонного мультиплекс-преобразования приводит к многократному усилению не только помехи связанной с многолучевым распространением СКИ, но и многократному усилению шумов усилителя.

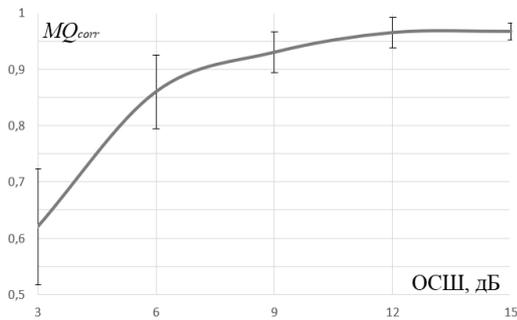


Рис. 7. Математическое ожидание коэффициента корреляции (с 95% доверительным интервалом) между реперным и восстановленным импульсом в зависимости от ОСШ на входе приемника, показанный схемой с 16 линиями задержки при ОСП 12 дБ

По результатам численного моделирования установлено, что РФМП с каскадом из 16 линий задержки в состоянии восстановить сложное сигнальное радиоизображение с коэффициентом корреляции более 0,9 с 95% достоверностью в условиях воздействия многолучевой помехи при ОСШ 9 дБ и ОСП 12 дБ.

IV. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА РФМП НА БАЗЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Стробоскопические методы обработки позволяют работать с эквивалентным временем, благодаря чему становится возможным планирование и проведение киберфизического эксперимента в области эквивалентных частот 10...150 МГц, связанное с ограничениями работы I/Q модулятора векторного генератора, что также не противоречит достоверности проведенного эксперимента, как и в случае замены радиофотонной составляющей схемы РФМП на ее программно-численный прототип реального времени (отмечен пунктиром на рисунке 11а), учитывающий шумы, искажения и затухания радиофотонной элементной базы. На рисунке 8: 1 – векторный генератор, 2 – стробоскопический осциллограф, 3 – передающая антенна, 4 – приемная антенна, 5 – программно-численный прототип.

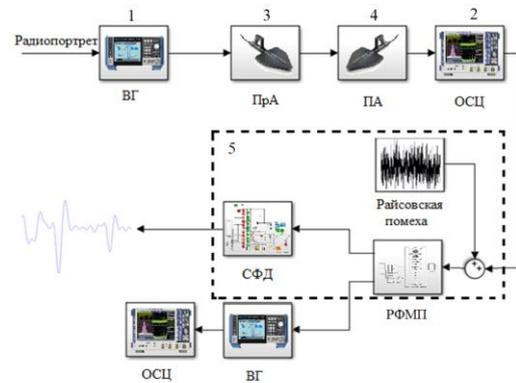


Рис. 8. Киберфизическая схема экспериментального прототипа, пунктиром отмечен программно-численный прототип реального времени (ВГ – векторный генератор, БГШ – генератор белого гауссовского шума, ПрА – передающая антенна, ПА – приемная антенна, ОСЦ – осциллограф, РФМП – модель радиофотонного мультиплекс-преобразователя СКИ, СФД – строб-фрейм-дискретизатор)

Сформированное генератором сложное сигнальное радиоизображение БПЛА с аддитивным белым гауссовским шумом, было излучено при помощи передающей антенны и принято приемной антенной, чем было сымитировано рассеяние радиоизображения исследуемым объектом при его облучении зондирующим СКИ. Стробоскопическим осциллографом сформирован массив отсчетов, подвергшийся воздействию райсовской помехи, который передан на программно-численный прототип РФМП, при помощи которого удалось получить устойчивую затухающую последовательность дублированных радиоизображений БПЛА (рисунок 9), поданную на СФД, для восстановления принятого сигнального радиоизображения (рисунок 10). При ОСШ 9 дБ и ОСП 12 дБ между реперным и восстановленным импульсом коэффициент корреляции составил 0,9.

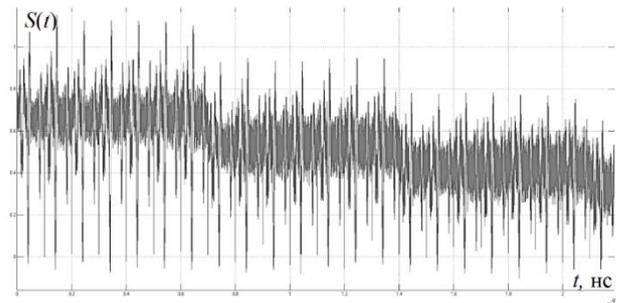


Рис. 9. Формируемая в результате работы программно-численного прототипа РФМП затухающая последовательность СКИ

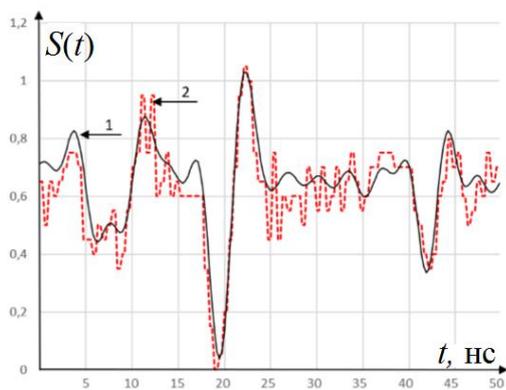


Рис. 10. Восстановленный СКИ-сигнал, кривая 1 – реперный СКИ, полученный путем моделирования, кривая 2 – оцифрованный СКИ, при помощи РФМП и СФД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи киберфизического прототипа РФМП показана воспроизводимость метода дублирования сигнального радиоизображения модели БПЛА в условиях райсовской помехи, полученного путем численного моделирования, что по реперной корреляции подтверждает его адекватность. Сформированное генератором сложное сигнальное радиоизображение с аддитивным белым гауссовским шумом, было принято антенной. Стробоскопическим осциллографом сформирован массив отсчетов, подвергшийся воздействию райсовской помехи, который передан на программно-численный прототип РФМП, при помощи которого удалось получить устойчивую затухающую последовательность дублированных радиоизображений БПЛА (рисунок 9), поданную на СФД, при помощи которого удалось восстановить исходное сигнальное радиоизображение (рисунок 10). При ОСШ 9дБ и ОСП 12 дБ между реперным и восстановленным импульсом коэффициент корреляции составил 0,90.

Результаты моделирования были подтверждены практической реализацией РФМП. Сложное сигнальное радиоизображение может быть восстановлено с высокой точностью. Сильная корреляционная связь между реперным и оцифрованным СКИ при проведении эксперимента, моделирования в среде Matlab/Simulink, а также соответствие теоретических расчетов с результатами экспериментов, показывают работоспособность метода дублирования СКИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Будагян И.Ф., Костин М.С. Радиоволновая сверхкороткоимпульсная виброметрия механизмов и конструкций РЭС. // Сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем». – М.: МГТУ МИРЭА, 2015. Ч.2 – С.151-155.

- [2] Тимановский А.Л., Пирогов Ю.А. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. Монография. – М.: Радиотехника, 2017. – 160 с.
- [3] Зайко Ю. Интерференция волновых импульсов. // Восточно-европейский научный журнал. 2016. Том. 8, № 6, с. 143-146.
- [4] High Speed ADC. [электронный ресурс]. Сайт компании Analog Devices Inc. Режим доступа: <http://www.analog.com/en/products/ad9213.html>. Дата доступа: 25.11.2022 г.
- [5] Кольцов Ю.В. Методы и средства анализа и формирования сверхкороткоимпульсных сигналов. Монография. // М.: Радиотехника, 2004. – 128 с.
- [6] Будагян И.Ф., Костин М.С. Фрейм-дискретизация сверхкороткоимпульсных сигналов // Сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем». – М.: МГТУ МИРЭА, 2015. Ч.1. – С.393-398.
- [7] Костин М.С., Бойков К.А. Циклогенеративные системы высокоскоростной оцифровки нестационарных субнаносекундных процессов. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/8/text.pdf>. Дата доступа: 25.11.2022 г.
- [8] Шильцин А.В., Марков Д.В., Латышев К.В., Петленко Д.Б. Моделирование электрооптических повторителей субнаносекундных импульсов с обратной задержанной связью и дробным мультиплексированием. // Межотраслевой научно-технический журнал «Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России», 2020. – №2 (146). – с. 51-57.
- [9] Бойков К.А. Регенерация одиночных сверхкоротких радиоимпульсов для стробоскопического преобразования: Дис. канд. тех. наук. Москва. 2018. – 134 с.
- [10] Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучаемых структур с помощью ФЕКО. // М., ЗАО «НПП «РОДНИК», 2008. – 246 с.
- [11] Банков С.Е., Курушин А.А. Практикум проектирования СВЧ структур с помощью ФЕКО. // М., ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. – 200 с.
- [12] Костин М.С., Бойков К.А., Котов А.Ф. Высокоточные методы циклоподобной атактовой оцифровки субнаносекундных сигналов. // Радиотехника и электроника. 2019. Т.64. № 2. С. 191-194.
- [13] Башаринов А.Е., Флейшман Б.С. Методы статистического последовательного анализа и их радиотехнические приложения. // М.: Советское радио, 1962. — 352 с.

MULTIPLEXING OF SIGNAL RADIO IMAGES WITH INTERFERENCE NOISE CANCELLATION

Kostin M.S.

Department of Radio Wave Processes and Technologies
Institute of Radio Electronics and Informatics

RTU MIREA

Moscow, Russia

kostin_m@mirea.ru

Shiltsin A.V.

Department of Radio Wave Processes and Technologies
Institute of Radio Electronics and Informatics

RTU MIREA

Moscow, Russia

adaptox@gmail.com

Abstract — Radio wave features of diffuse reflection and shape-time deformation of ultrashort pulse (USP) signals in the microwave range are of scientific interest for the practical implementation of signal recognition of objects by their radiophysical identifiers in short-range radio detection tasks due to the fact that the relative ultra-broadband of nanosecond pulses allows with a priori reliability based on reconstructed localized in frequency time domain impulse responses determine the parameters of irradiated environments and material objects. At the same time, scientific interest in the radio wave features of the shape change of nanosecond radio pulses reflected from irradiated surfaces or passed through various media, such as media with dynamically changing dielectric and magnetic permeability (troposphere, plasma) requires the search for high-speed combined solutions for analog-to-digital conversion of USP signals in order to their restoration and signal post-processing. A solution that combines ultra-wideband and relatively low frequency distortion is radio-photon conversion, which provides electro-optical modulation of laser radiation by radio-frequency USP, with its subsequent conversion and radio-photon duplication, which makes it possible to restore it using stroboscopic methods.

Keywords — radio-photon multiplex converter, USP signal, radio sensor system, radio image, USP generation, rice interference.

621.396.678

РАЗВОРАЧИВАЕМЫЕ ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Зябриков С.Ю.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
zyabrikov@mirea.ru

Трефилов Н.А.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
trefilov@mirea.ru

Шпак А.В.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
shpak@mirea.ru

Аннотация — В работе рассмотрены способы и механизмы развертывания зеркальных антенн космического базирования. Рассмотрены зонтичные, лепестковые, ребристо-стержневые, веерные и цилиндрические типы рефлекторов. Анализируются преимущества различных конструкций.

Ключевые слова — *зеркальная антенна, разворачиваемая зеркальная антенна, механизмы развертывания, коэффициент наковки, фазовые ошибки в раскрыве.*

ВВЕДЕНИЕ

В космическом сегменте систем радиолокации, радиосвязи, мониторинга земной поверхности используются зеркальные антенны. Для систем, работающих в реальном масштабе времени, например, для систем связи, для измерения параметров быстро протекающих или однократных процессов необходимо использование антенн с большим коэффициентом усиления, что требует применения антенн с большим диаметром рефлектора. Это приводит к необходимости использования конструкций антенн, разворачиваемых в рабочее состояние после выхода космического аппарата на основную орбиту. Перед запуском космического аппарата в наземных условиях антенна переводится в транспортное состояние, при котором она занимает малый объем и имеет малые габаритные размеры. При переводе антенны в рабочее состояние под действием исполнительных механизмов и приводов форма рефлектора антенны должна теоретически иметь форму параболоида вращения. В реальных конструкциях разворачиваемых зеркальных антенн форма поверхности отличается от теоретической и аппроксимирует заданную форму с точностью, зависящей от типа применяемой конструкции механизмов развертывания. Из-за несовершенства формы рефлектора на нем под воздействием поля облучателя создаются наведенные токи, закон распределения которых отличается от предполагаемого распределения тока в применяемой модели антенны. Это приводит к отличию реальных характеристик и параметров антенны от заданных в техническом задании на проектирование антенны. Главными особенностями излучения разворачиваемых зеркальных антенн по сравнению с антеннами со

сплошными рефлекторами часто являются:

- снижение коэффициента усиления или эффективной площади поверхности антенн;
- существенное повышение уровня бокового излучения антенн;
- повышение уровня кроссполяризованного излучения антенн и появление большей зависимости поляризации излучения от конструктивных особенностей;
- появление большей зависимости параметров от частоты.

Эти негативные проявления обычно связывают с изменением фазового распределения тока в раскрыве рефлектора, что приводит к снижению апертурного коэффициента использования поверхности. Это обычно наиболее сильно проявляется в зеркальных антеннах с большим диаметром рефлектора, что ограничивает максимальные размеры рефлектора, которые составляют величину порядка 10 м. Но существуют задачи, для которых необходимо применение антенн с большими размерами рефлекторов, к ним относятся проблемы повышения разрешающей способности РЛС космического базирования, задачи радиоастрономии и т.д.

I. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОНСТРУКЦИЙ РАЗВОРАЧИВАЕМЫХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

По способу приведения рефлекторов разворачиваемых зеркальных антенн в рабочее состояние из транспортного положения применяемые типы конструкций разделяются на антенны зонтичного типа [1] и антенны панельного типа [2]. Также применяются ребристо-стержневые разворачиваемые конструкции рефлекторов [3]. Авторами предложены конструкции рефлекторов веерного типа для офсетных антенн [4] и разворачиваемые рефлекторы с формой параболического цилиндра [5], облучаемые специальным типом облучателя [6]. Рассмотрим эти типы антенн с целью анализа механизмов развертывания, воспроизводимости формы рефлектора и приближения ее к теоретически предполагаемой форме.

Антенны зонтичного типа применяются для систем связи в наземном и космическом сегментах. Внешний вид

антенны для транспортируемых наземных средств связи показан на рис. 1.



Рис. 1. Разворачиваемая антенна зонтичного типа

Механизм разворачивания таких антенн включает направляющую осевую штангу, при разворачивании по ней движется ползун, передающий усилия на секторные упоры. Под действием упоров ребра жесткости, первоначально ориентированные вдоль штанги, приподнимаются, поворачиваясь на шарнирах, до выхода в рабочее положение. Ограничение угла раскрытия ребер жесткости производится как за счет упоров в шарнирах, так и за счет натяжения в крайнее положение контурных канатов, связывающих по периметру все соседние ребра жесткости. Ребра жесткости имеют параболическую форму с одинаковым фокусным расстоянием. Отражающая поверхность рефлектора создается поверхностью сетеполотна, закрепленного на ребрах жесткости и растягиваемого ими в процессе разворачивания рефлектора. Облучатель антенны или малое зеркало для двухзеркальных систем располагаются на штанге. На практике встречаются также другие вариации построения механизма разворачивания [1].

Применение простого и надежного механизма раскрытия рефлектора приводит одновременно к ряду антенных проблем. Сегменты сетеполотна, расположенные между ребрами жесткости имеют форму параболических цилиндров, что приводит к отличию формы отражающей поверхности от теоретической, задаваемой соотношением [7]

$$R = \frac{2f}{1 + \cos \theta'}$$

используемые здесь величины соответствуют рис. 2.

В зонтичной форме рефлектора длина хода луча, исходящего из фокуса и отражающегося от середины сегмента меньше теоретического на величину Δr

$$\Delta r \approx R \cos \theta' (1 - \cos(\pi/N)),$$

где N - число сегментов рефлектора.

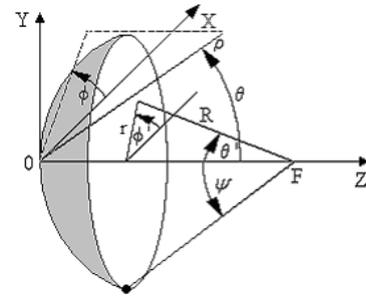


Рис. 2. Координаты однозеркальной антенны

Это приводит к появлению фазовых ошибок в раскрытии рефлектора. Причем, величина фазовых ошибок возрастает при перемещении точки наблюдения к периферии рефлектора. Это или ограничивает размеры рефлектора или требует использования разворачиваемых антенн с большим числом ребер жесткости, что усложняет конструкцию антенны. Есть также ряд других проблем, затрудняющих построение зонтичных антенн с зонтичным рефлектором.

Для улучшения параметров разворачиваемых антенн используют рефлекторы панельного или лепесткового типа, в которых отражающая поверхность рефлектора формируется из жестких сегментов, имеющих форму параболоида вращения [2], схема построения которого показана на рис. 3.

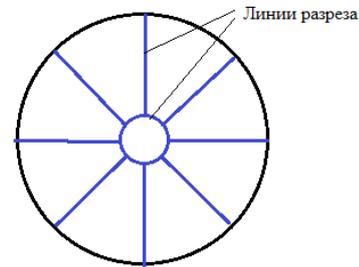


Рис. 3. Схема построения лепесткового рефлектора

В таком рефлекторе отдельные сегменты отделенные от других радиальными разрезами, имеющие жесткую форму, крепятся к центральной части рефлектора шарнирными соединениями, что позволяет наклонять их к оси антенны при ее упаковке. При этом боковые стороны рефлектора накладываются друг на друга. В такой конструкции рефлектора при обеспечении взаимной фиксации сегментов в развернутом положении не возникают фазовые ошибки, типичные для зонтичных конструкций рефлекторов. Конструкция рефлектора является более жесткой, что важно при необходимости совершать повороты антенны при движении по орбите. Некоторыми недостатками такой конструкции является меньший коэффициент паковки, оценивающий изменение объемов антенны в развернутом и в сложенном состояниях. Кроме того, на краях линий разреза образуются прерывания линий поверхностных токов, образующих излучение антенны, что оказывает влияние на параметры антенны. На рис. 4 показан внешний вид такой антенны в рабочем

состоянии на орбите и в сложенном состоянии на этапах сборки. Рисунки заимствованы с сайта Радиоастрона.

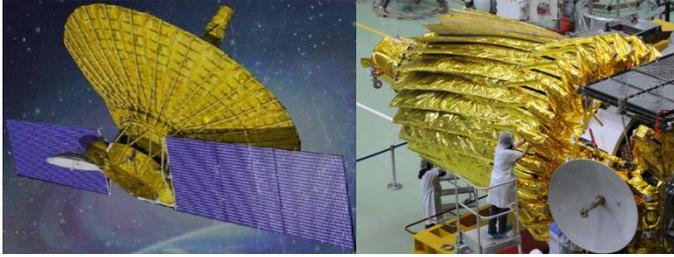


Рис. 4. Внешний вид рефлектора панельного типа в раскрытом и свернутом состояниях

Авторами предложена конструкция разворачиваемого рефлектора лепесткового типа, которая имеет другую схему раскрытия панелей [4]. Такие рефлекторы применимы в зеркальных антеннах, построенных по офсетной схеме. Схема построения такого рефлектора показана на рис. 5.

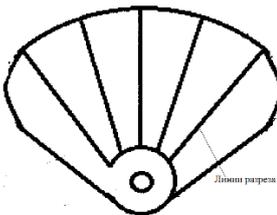


Рис. 5. Схема построения лепесткового рефлектора веерного типа

Разворачиваемый рефлектор зеркальной антенны, содержащий лепестки, имеющие параболическую форму в продольном сечении с отражающей зеркальной поверхностью, обращенную на фронтальную сторону рефлектора, а также механические средства, обеспечивающие поворот и фиксацию лепестков при разворачивании рефлектора, отличающийся тем, что лепестки в нижней части закреплены неподвижно на соответствующих им планшайбах, которые установлены последовательно на поперечной оси рефлектора, при этом планшайба лепестка, установленного первым на фронтальной стороне рефлектора, имеет параболическую форму в продольном сечении и отражающую зеркальную поверхность, обращенную на фронтальную сторону рефлектора, а с тыльной стороны имеет посадочный Г-образный в сечении выступ, выполненный с возможностью крепления планшайбы соседнего лепестка, причем в планшайбах лепестков, установленных на поперечной оси рефлектора за первым лепестком, выполнены отверстия, обеспечивающие возможность поворота и смещения на оси с помощью механических средств при разворачивании и сворачивании рефлектора, а на их фронтальных и тыльных сторонах выполнены посадочные Г-образные в сечении выступы, выполненные с возможностью крепления планшайб соседних лепестков.

Альтернативной конструкцией разворачиваемого рефлектора зеркальной антенны является рефлектор с каркасом ребристо-стержневой конструкции, реализованный в антеннах проекта Турайя [3]. В такой конструкции часть стержней, нагружаемых растяжением,

может быть заменена контурными канатами. Схема построения каркаса рефлектора такой конструкции показана на рис. 6.

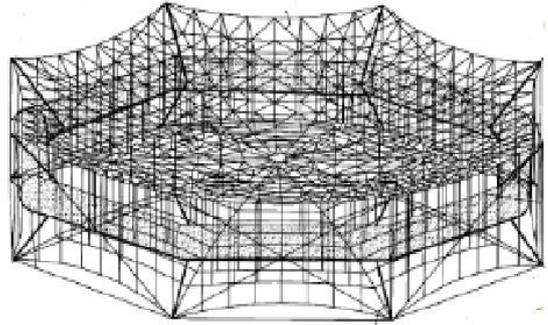


Рис. 6. Схема разворачивания каркаса антенны проекта Турайя

Отражающее сетеполотно рефлектора в конструкциях такого типа крепится в отдельных точках каркаса, координаты которых совпадают с координатами поверхности параболоида вращения. Точки крепления являются вершинами треугольников, поэтому отражающая поверхность рефлектора может быть представлена в виде системы плоских треугольников, общая поверхность которых аппроксимирует форму параболоида вращения. Внешний вид антенны в развернутом положении на орбите показан на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид антенны в развернутом состоянии

По сравнению с конструкцией рефлектора зонтичного типа ребристо-стержневая форма каркаса создает фазовые ошибки в раскрыве антенны, величина которых не зависит от местоположения отражающего сегмента, а определяется только размерами треугольного сегмента. Это позволяет строить антенны, имеющие большие размеры диаметра раскрыва. Некоторым недостатком такой конструкции является нарастание сложности конструкции при увеличении габаритов антенны, а значит, снижение надежности механизмов разворачивания.

Увеличение коэффициента усиления разворачиваемой зеркальной антенны можно получить, используя конструкцию рефлектора, предложенного в [5]. Такой рефлектор имеет форму параболического цилиндра, облучаемого секториальной зеркальной антенной [6]. Формирование диаграммы направленности антенны в одной плоскости происходит за счет рефлектора, а в другой плоскости за счет облучателя. Схема построения разворачиваемого рефлектора показана на рис. 8.

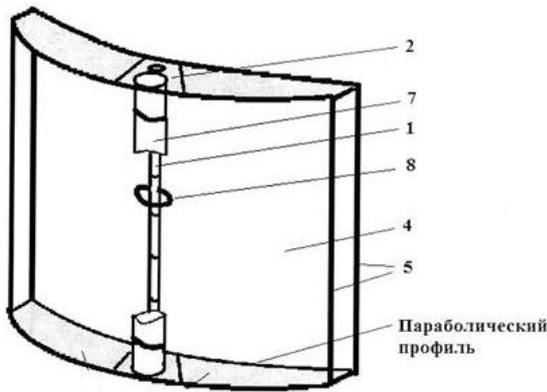


Рис. 8. Схема построения разворачиваемого цилиндрического рефлектора

На рисунке обозначено: 1 -раздвижная телескопическая стойка; 2 - крепежный фланец, закрепленный на торце стойки 1; 3 - ребра жесткости имеющие параболическую форму; 4 – отражающее сетеполотно; 5 – контурные канаты; 8 – стягивающая пружина; 7 - надувной цилиндр..

Зеркальная антенна с разворачиваемой системой зеркал, содержит раздвижную телескопическую стойку, верхнее и нижнее ребра жесткости, имеющие параболический профиль, радиоотражающее сетеполотно, закрепленное на ребрах жесткости, свободные края которого закреплены на контурных шнурах. Концы шнуров закреплены на ребрах жесткости. Ребра жесткости предполагаются разворачивающимися, в исходном положении скреплены фиксирующим креплением, с возможностью разворачивания ребер жесткости с параболическим профилем при размыкании фиксирующего крепления. В конструкцию введены крепежные фланцы, которые закреплены на раздвижной телескопической стойке, а также надувной цилиндр, выполненный с возможностью надува под давлением, достаточным для раздвижки телескопической стойки в крайнее развернутое положение при разворачивании рефлектора, причем для сохранения формы надувного цилиндра он снабжен охватывающими кольцами или пружинами.

Предложенная конструкция разворачиваемой зеркальной антенны обеспечивает теоретически правильную форму отражающей поверхности, наибольший коэффициент паковки, не создает кроссполаризационного излучения, позволяет строить разворачиваемые антенны с большими габаритами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные варианты построения разворачиваемых зеркальных антенн, включая новые предложенные типы, позволяют получать в космическом сегменте антенны с большими габаритами, большим коэффициентом усиления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гряник М.В., Ломан В.И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. – М.: Радио и связь, 1987. - 72 с.
- [2] Карташов Н.С., Алакоз А.В., Ковалев Ю.Ю., Попов М.В., Соболев А.М., Соколовский К.В. «Радиоастрон»: итоги выполнения ноаучной программы исследований объектов вселенной со сверхвысоким разрешением // Вестник НПО им. Лавочкина, №3(24), 2014. – с.4-11.
- [3] Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки в мобильной спутниковой связи // Первая миля, №4, 2008. – с. 10-15.
- [4] Лобанов Б.С., Трефилов Н.А., Нефедов В.И., Шпак А.В., Разворачиваемый рефлектор зеркальной антенны / патент РФ на полезную модель № 148683,опубл. 12-11-2014
- [5] Шпак А.В., Трефилов Н.А., Дементьев А.Н. Зеркальная антенна с разворачиваемой системой зеркал / Патент на полезную модель № 158 915, опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.
- [6] Дементьев А.Н., Трефилов Н.А., Шпак А.В. Облучатель зеркальной антенны с цилиндрическим рефлектором // Радиоэлектронная техника: Межвузовский сборник научных трудов. – Ульяновск: Изд. УлГТУ, 2022. – с. 73-78.
- [7] Антенны и устройства СВЧ/ под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Сов. Радио, 1972.

DEPLOYABLE SPACE-BASED MIRROR ANTENNAS

ММ НТК «Космические технологии-2023»

Zyabrikov S.Yu.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
zyabrikov@mail.ru

Trefilov N.A.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
trefilov@mirea.ru

Shpak A.V.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
shpak@mirea.ru

Abstract — The paper considers the methods and mechanisms of deployment of space-based mirror antennas. Umbrella, petal, ribbed-rod, fan and cylindrical types of reflectors are considered. The advantages of various designs are analyzed.

Keywords — mirror antenna, deployable mirror antenna, deployment mechanisms, packing coefficient, phase errors in the opening.

621.396.678

МАЛОГАБАРИТНЫЕ АНТЕННЫ АБОНЕНТСКИХ УСТРОЙСТВ

Туров Д.А.
Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
turov@mirea.ru

Трефилов Н.А.
Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
trefilov@mirea.ru

Аннотация — В работе рассмотрены варианты построения конструкции и результаты моделирования малогабаритных антенн абонентских устройств. Моделирование выполнялось при использовании вычислительных средств CST STUDIO SUITE.

Ключевые слова — абонентские устройства связи, малогабаритная антенна, полосковая антенна, мобильная антенна, моделирование антенн.

ВВЕДЕНИЕ

Под абонентскими устройствами беспроводной связи понимаются средства связи индивидуального использования, формирующие сигналы радиосвязи для передачи или приема информации между абонентом и устройствами операторов связи, не имеющее постоянного местоположения в областях обслуживаемой территории, работающее в сетях подвижной связи. Такие устройства используются в различных видах связи: сотовая, транкинговая, спутниковая виды мобильной связи. Они применяются для передачи информации между различными носимыми устройствами ноутбуки, устройства безналичной оплаты, устройства системы «умный дом» и для приема сигналов спутниковой навигации. Такие устройства используют в основном радиоволны дециметрового диапазона длин волн, имеют встроенные антенны, должны иметь малые габариты и вес.

В устройствах мобильной связи, работающих в сетях GSM, LTE, WI-FI, WI-MAX, Bluetooth используются малогабаритные абонентские антенны, имеющие малые размеры, которые можно встроить одновременно в сотовые телефоны или другие устройства. Перечисленные сети работают в различных диапазонах частот в РФ, приведенных в таблице 1.

ТАБЛИЦА I. Диапазоны частот

Вид сети	применяемые частоты
GSM	890-915 МГц 935-960 МГц 1710-1785 МГц 1805-1880 МГц
3G	1920 – 1980 МГц 2110 – 2170 МГц

	453-457.5 МГц 463-467.5 МГц
CDMA	453-457.5 МГц 463-467.5 МГц 1920 – 1980 МГц 2110 – 2170 МГц
LTE	791-862 МГц 890–915 МГц 935–960 МГц 1710–1785 МГц 1805–1880 МГц 2500-2700
5G	3,4-3,8 ГГц (проект)
WI-MAX	2500-2600 МГц
Bluetooth	2,4-2,4835 ГГц
Trank (Раиостанции)	144-146 МГц 430-440 МГц 433,075-434,775 МГц, 446,000 - 446,200 МГц
WI-FI	2,4 ГГц
GPS	1575 ГГц 1227 ГГц
ГЛОНАСС	1662 ГГц 1265 ГГц
Турайя	1626-1660 МГц 1525-1559 МГц
Иридиум	1616-1626,5 МГц
NFC	13,56 МГц

Для антенн с малыми габаритами известно мало точных моделей, позволяющих применять их на этапах проектирования. Очевидно, что простые антенны типа четверть-волнового вибратора имеют слишком большие размеры для компактных носимых устройств. Если размеры антенн не превышают половину длины рабочей волны, их принято называть электрически малыми антеннами (electrically small antennas (ELS)) [1,2]. Для них известны ограничения, полученные Чу [3,4]. Такие антенны имеют высокую добротность, а значит, малую полосу рабочих частот, что не позволяет перекрыть все перечисленные диапазоны для работы в разных сетях. Также, ELS антенны характеризуются значительным

уменьшением коэффициента усиления при уменьшении габаритов, что характеризуется графиком, показанным на рис. 1 [4]. На графике в левой части показано изменение коэффициента усиления плоской спиральной антенны при переходе в режим ELS.

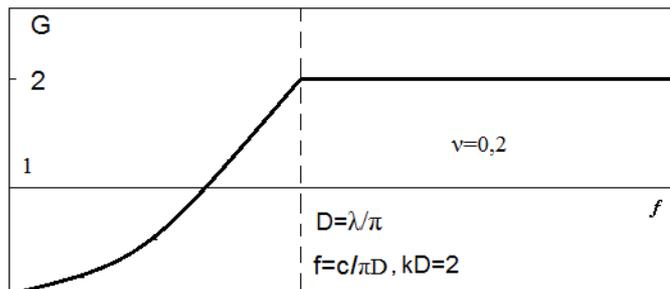


Рис. 1. Изменение коэффициента усиления плоской спиральной антенны при уменьшении габаритов

Учитывая перечисленные факторы следует отметить, что разработка и проектирование малогабаритных антенн абонентских устройств представляет серьезную проблему. Главными направлениями ее решения являются разработка моделей антенн, позволяющих уменьшить габариты антенн, и численные методы моделирования таких антенн.

I. МОДЕЛИ КОНСТРУКЦИИ АНТЕНН С УМЕНЬШЕННЫМИ ГАБАРИТАМИ

Для уменьшения габаритов антенн в первых конструкциях мобильных телефонов использовались четвертьволновые вибраторы, излучающий проводник которых закручивался в спираль малого радиуса намотки [5]. Так как фазовая скорость электромагнитной волны, распространяющейся вдоль импедансного проводника близка к скорости света, при закручивании в спираль физическая длина четвертьволнового отрезка существенно сокращается. В спирали при этом создается волна типа T_0 , длина волны такого колебания определяется геометрическими параметрами спирали. Такой вариант конструкции позволяет уменьшить продольный габарит антенны в 3-5 раз по отношению к прямолинейному вибратору, но требует устройств согласования фидера с излучателем.

Следующей широко применяемой версией малогабаритных антенн стали полосковые антенны (патч антенны), размеры которых удалось уменьшить за счет диэлектрической проницаемости подложки, на которой выполнялась антенна.

Оба рассмотренных варианта не позволяли значительно уменьшить габариты антенн абонентских антенн, поэтому появились варианты конструкций, в которых совмещались оба рассмотренных выше подхода. Также был использован опыт создания антенн в длинноволновом и средневолновом диапазонах длин волн, в которых все используемые антенны являются электрически малыми. Появились различные конструкции инвертированных антенн [2,5], такие как инвертированная L антенна (ILA), инвертированная F антенна (IFA), планарная инвертированная F антенна (PIFA). Для совмещения конструкции таких антенн с конструкцией всего

абонентского устройства такие антенны часто используются в щелевом, а не в вибраторном вариантах. Ряд конструктивных вариантов построения таких антенн показан на рис. 2.

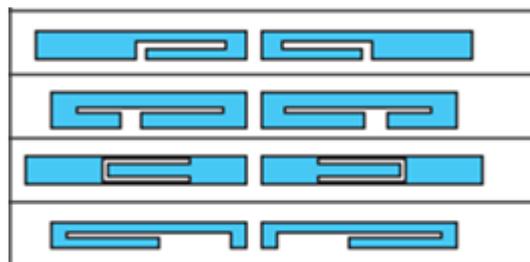


Рис. 2. Варианты конструкций щелевых инвертированных антенн

На рис. 3. показаны конструкции реальных антенн и размещение антенн в старой версии сотового телефона.

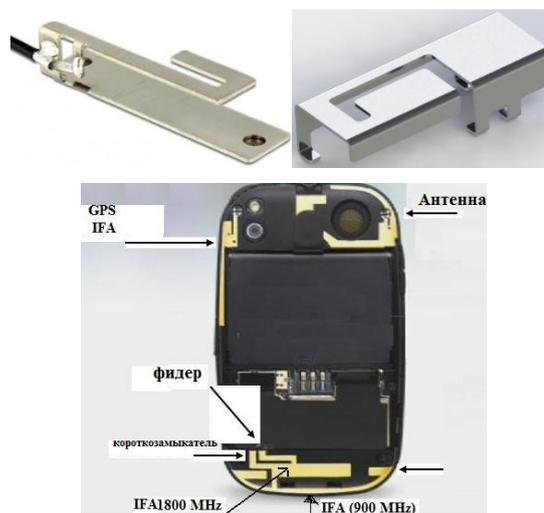


Рис. 3. Конструкции реальных антенн абонентских устройств

Для проектирования малогабаритных антенн абонентских устройств с необходимой точностью используются численные методы, например, реализованные такими средствами, как CST Microwave Studio, входящий в основной пакет CST STUDIO SUITE. Численные методы позволяют уточнить геометрические параметры излучателей, определить с высокой точностью их антенные параметры и характеристики, позволяет выполнять оптимизацию конструкций антенн по заданному конструктивному параметру [6]. Применение таких вычислительных средств позволяет получить результаты, отличающиеся от реально измеренных в пределах 3 – 5 %, что достаточно для инженерной практики.

Для дальнейшего уменьшения габаритов антенн абонентских устройств используется включение в конструкцию антенны вибраторных или щелевых излучателей меандровой формы, а также применение пространственных, а не планарных, конструкций малогабаритных антенн. Это предлагается в [7, 8] для плоских спиральных антенн, но подобный принцип

возможен и для линейных антенн. Например, на рис. 4 показано IFA с меандро подобным проводником.

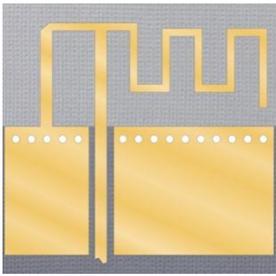


Рис. 4. Инвертированная F антенна с меандровым проводником

Для уменьшения габаритов излучателей также используется включение в состав антенны сосредоточенных емкостей, например в [8].

Новые методы проектирования антенн абонентских устройств, включающие этапы численного моделирования, позволяют решить задачу уменьшения габаритов антенн, размещения множества антенн в одном корпусе. При этом обеспечивается необходимая форма диаграммы направленности, но в соответствии с рис. 1 не удастся обеспечить высокое значение коэффициента усиления таких антенн, что должно учитываться при расчете энергетического бюджета систем связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные варианты построения малогабаритных антенн абонентских устройств систем связи показывают, что для них практически отсутствуют простые аналитические модели, которые можно было бы применить для проектирования антенн. Для проектирования и определения параметров таких антенн используются численные методы моделирования и оптимизации конструкций антенн, которые дают возможность проектировщикам вносить в конструкцию антенн новые элементы, используя физические модели процессов излучения, которые могут улучшить свойства, оценку

воздействия которых практически невозможно выполнить аналитическими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Слюсар В. 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги // Электроника: наука, технология, бизнес, №7, 2006.- с. 10-19.
- [2] Слюсар В. Антенны PIFA для мобильных средств связи Многообразие конструкций // Электроника: наука, технология, бизнес, №1, 2007.- с. 64-74.
- [3] Коган Б.Л. Наибольшее усиление физически реализуемой антенны // Антенны, №2, 2006 . – с.4 – 12.
- [4] Лобанов Б.С., Крутов М.М., Трефилов Н.А., Шпак А.В. Проблемы построения малогабаритных плоских спиральных антенн // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы МНТК "Интерматик - 2014", 02.12.2014 г.- М.: Энергоатомиздат, 2014.
- [5] Компьютерное проектирование полосковых антенн: Учеб. пособие / Шпак А.В., Нефедов В.И., Трефилов Д.Н., Трефилов Н.А. . - М.: Изд-во МИРЭА, 2018 . – 92 с.
- [6] Трефилов Н.А., Нефедов В.И., Селеня К.А., Колесников С.М., Ершов В.Ю. Оптимизация расположения излучателей в полосковых антенных решетках // Материалы МНТК Интерматик-2017, МИРЭА, 2017. - с. 1115-1118.
- [7] Киреев Е.К., Лобанов Б.С., Нефедов В.И., Трефилов Н.А. Способ изготовления спиральной антенны (варианты) // Патент РФ № 2 485 642, опубл. БИ 2013.06.20.
- [8] Лобанов Б.С., Трефилов Н.А., Киреев Е.К., Нефедов В.И., Шпак А.В. Плоская спиральная антенна // патент РФ № 2 565 524, опубл. : 20.10.2015 Бюл. № 29.

SMALL-SIZED ANTENNAS OF SUBSCRIBER DEVICES

Turov D.A.
Institute of Radio Electronics and Computer Science
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
turov@mirea.ru

Trefilov N.A.
Institute of Radio Electronics and Computer Science
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
trefilov@mirea.ru

Abstract — The paper considers the design options and the results of modeling small-sized antennas of subscriber devices. The simulation was performed using CST STUDIO SUITE computing tools.

Keywords — subscriber communication devices, small antenna, strip antenna, mobile antenna, antenna modeling.

УДК 621.391

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕЙКИ ИЗМЕРИТЕЛЯ УРОВНЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

Григорян М.А.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
mgrigoryan00@mail.ru

Осипова В.О.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
osipova@mirea.ru

Аннотация — Статья посвящена разработке и исследованию ячейки измерителя уровня входного сигнала приемного устройства. Рассмотрен состав ячейки измерителя уровня входного сигнала, сама ячейка разработана на современной элементной базе с использованием микроконтроллера и логарифмического усилителя. Был произведен расчет полосового фильтра, а также его макетирование.

Ключевые слова — логарифмический усилитель; фильтр; полосовой фильтр; микроконтроллер.

ВВЕДЕНИЕ

Информационно-коммуникационные технологии тесно связаны с обменом информацией между людьми и используются для передачи информации с помощью мобильных телефонов, Интернета и спутникового вещания. Обмен информацией между людьми через спутник осуществляется с помощью различных технологий, включая спутники связи, интернет-соединения и мобильные устройства. Спутники связи используются для передачи данных между различными точками на Земле, а также для обеспечения доступа к интернету в отдаленных регионах. Интернет-соединения позволяют людям общаться с другими людьми по всему миру, а мобильные устройства позволяют людям оставаться на связи в любом месте и в любое время.

Ячейки измерителя уровня входных сигналов приемных устройств являются важной частью приемного оборудования. Они используются для измерения уровня входного сигнала и обеспечения корректной работы приемного устройства. Ячейки могут быть различных типов, включая вакуумные лампы, транзисторы и интегральные схемы. Они также могут быть использованы для измерения других параметров сигнала, таких как частота и амплитуда.

I. СОСТАВ ЯЧЕЙКИ ИЗМЕРИТЕЛЯ УРОВНЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Приемное устройство выполнено на основе супергетеродинного приемника. Супергетеродинный приемник используется для приема радиосигналов и преобразования их в сигналы, которые могут быть

обработаны приемным оборудованием. Он состоит из нескольких блоков, включая входной блок, гетеродин, смеситель, усилитель и демодулятор. Каждый из этих блоков выполняет свою функцию в процессе приема и обработки сигнала.

Все принимаемые сигналы усиливаются малошумящим входным СВЧ-усилителем, далее преобразуются в промежуточную частоту и подаются на вход ячейки измерителя уровня входного сигнала приемного устройства.

Ячейка измерителя уровня входного сигнала принимает суммарный сигнал после того, как он был преобразован по частоте в приемном устройстве. Измерители уровня входного сигнала используются для определения уровня сигнала, поступающего на вход приемника. Этот уровень сигнала затем используется для настройки параметров приемного устройства, чтобы обеспечить наилучшее качество приема. Ячейка состоит из полосового фильтра (ПФ), логарифмического усилителя (ЛУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), микроконтроллера (МК) и индикатора (рис. 1).

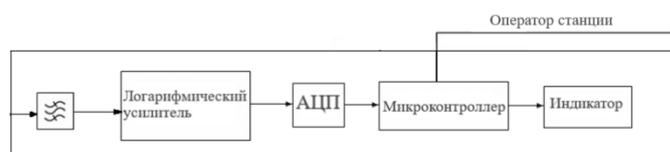


Рис. 1. Структурная схема ячейки

На ячейку поступает сигнал с частотой 250 кГц, который сначала проходит через полосовой фильтр, настроенный на центральную частоту 250 кГц. После фильтрации переменное напряжение необходимо преобразовать в постоянное, для чего используется широкополосный логарифмический усилительный детектор 1313UF1AU. Преобразованный сигнал через АЦП поступает на МК1887BE7Г, где происходит обработка цифрового кода. Микроконтроллер имеет два выхода, которые ведут на разные устройства. Один выход ведет на индикатор, который показывает уровень сигнала, а другой выход на оператора станции, который управляет работой

приемного устройства. Для разработки устройства необходимо разобраться с каждым блоком в отдельности и реализовать их вместе как единую ячейку. [1].

II. РАСЧЕТ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА

Для выделения определённого диапазона частот необходим полосовой фильтр, который удовлетворяет следующим условиям: центральная частота должна равняться 250 кГц и иметь малую полосу пропускания.

Полосовой фильтр состоит из 2 каскадов (рис. 2). Каждый каскад состоит из пяти резисторов, двух конденсаторов и усилителя [2].

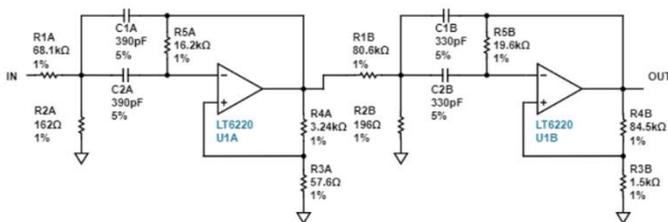


Рис. 2. Принципиальная схема полосового фильтра

Рассчитаем идеальный полосовой фильтр в программе ADI Precision Studio. Для этого необходимо выбрать конденсатор, резистор со значением, наиболее близким к номиналу, из числа имеющихся и операционный усилитель.

Аналогом операционного усилителя LT6260 является отечественный операционный усилитель 140УД20.

Элементы первого каскада:

- C1A=C2A – конденсатор номиналом 390 пФ±5%;
- R1A – резистор номиналом 68.1 кОм±1%;
- R2A – резистор номиналом 162 Ом±1%;
- R3A – резистор номиналом 57.6 Ом±1%;
- R4A – резистор номиналом 3.24 кОм±1%;
- R5A – резистор номиналом 16.2 кОм±1%.

Элементы второго каскада:

- C1B=C2B – конденсатор номиналом 330 пФ±5%;
- R1B – резистор номиналом 80.6 кОм±5%;
- R2B – резистор номиналом 196 Ом±5%;
- R3B – резистор номиналом 1.5 кОм±5%;
- R4B – резистор номиналом 84.5 кОм±5%;
- R5B – резистор номиналом 19.6 кОм±5%.

Питание осуществляется от источников постоянного тока +15В и -15В.

Амплитудно-частотная характеристика фильтра представлена на рис. 3.

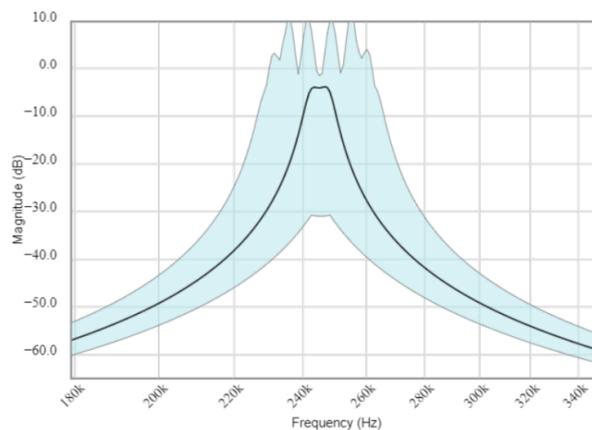


Рис. 3. АЧХ полосового фильтра

На рисунке можем видеть два пика, причиной которого является наложение двух каскадов. Данные каскады фильтра настроены на свою частоту. Для того чтобы определить центральную частоту фильтра, необходимо посчитать среднеарифметическую сумму центральных частот двух каскадов, она будет равняться 250 кГц.

Полосовой фильтр, собранный в соответствии с принципиальной схемой (рис. 2), представлен на рис. 4.



Рис. 4. Макет полосового фильтра

АЧХ полученная на этапе моделирования, представлена на рис. 3 отличается от АЧХ полосового фильтра, полученного в результате макетирования (рис. 5), так как у реальных элементов есть отклонения от номинальных емкостей и сопротивлений. или заголовках, если они не являются неизбежными.

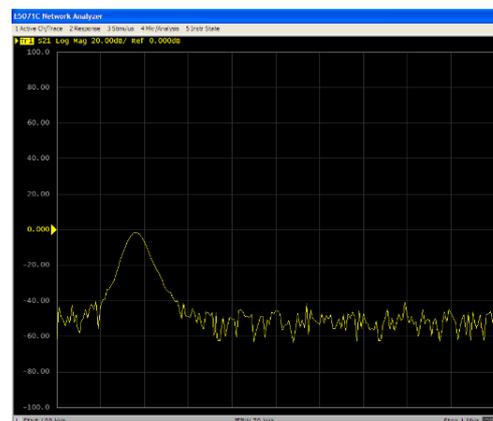


Рис. 5. АЧХ фильтра, реализованного на практике

III. ВЫБОР ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ-ДЕТЕКТОРА

Следует отметить, что прибор используется и как логарифмический усилитель, и как детектор. Вариантов широкополосных логарифмических усилителей на рынке не так много. Отечественный производитель ОАО «НПП ПУЛЬСАР» предлагает выбор ЛУ среди трех моделей: 1313УФ1АУ, 1313УФ1БУ и 1313УФ2. Рассмотрим два из них (таблица 1).

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ 1313УФ1

Параметры, единица измерения	Условия	Норма параметра			
		1313УФ1АУ		1313УФ1БУ	
		Не менее	Не более	Не менее	Не более
Максимальное выходное напряжение, В	$U_{\text{вх}} = 2$, $f = 10$ МГц	1,6	-	1,6	-
Ток потребления, мА	$U_{\text{вх}} = 0$	-	30	-	30
Динамический диапазон входного сигнала, дБ	$f = 100$ МГц	80	-	50	-
Коэффициент преобразования, мВ/дБ	$f = 100$ МГц	16	24	14	26
Точность преобразования, дБ	$f = 100$ МГц	-	3	-	3
Максимальная частота входного сигнала, МГц		500	-	1500	-

При сравнении параметров ЛУ, наиболее подходящей является модель 1313УФ1АУ, представленная на рис. 6.



Рис. 6. Логарифмический усилитель 1313УФ1АУ

Модель 1313УФ1АУ перекрывает динамический диапазон уровня входного сигнала в 60 дБ.

IV. ОПИСАНИЕ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Микросхема 1887BE7T является микроконтроллером отечественного производства компании АО «НИИЭТ» и построен на базе 8-битного микропроцессора, который включает в себя различные блоки, такие как арифметико-логическое устройство (АЛУ), блок управления памятью

(MMU), блок управления вводом-выводом (I/O), а также блоки для работы с периферией и коммуникационными интерфейсами.

Из-за отсутствия данного устройства все работы были проведены на полном аналоге микроконтроллера 1887BE7T – микроконтроллере ATmega128 (рис. 7) [3].



Рис. 7. Микроконтроллер ATmega128

Программирование микроконтроллера возможно на двух языках: Assembler и C.

Для корректной работы программы необходимо подключить библиотеку индикаторов, данные ввода/вывода и задержки, а также установить тактовую частоту. Затем вычисляется входная величина в дБВт, с помощью команд ADCSRA и ADMUX настраивается работа АЦП, подключается SPI-интерфейс для передачи данных на индикатор. Настройка SPI-интерфейса производится с помощью функции voidSPI_Master (void), которая содержит команды DDRB и SPCCR. Передача данных по интерфейсу SPI осуществляется с помощью функции void SPI_out (char data) [4].

V. РЕЗУЛЬТАТ МАКЕТИРОВАНИЯ ЯЧЕЙКИ ИЗМЕРИТЕЛЯ УРОВНЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Результатом работы является сборка ячейки измерителя уровня входного сигнала в единое устройство. Макет ячейки (рис. 8) состоит из полосового фильтра, логарифмического усилителя, микроконтроллера и индикатора.

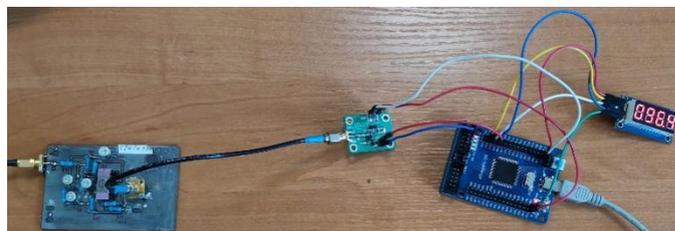


Рис. 8. Макет ячейки измерителя уровня входного сигнала

Функциональное назначение индикатора - отображение обработанного сигнала. Все значения, отображаемые на индикаторе, являются отрицательными, но для большей точности знак минус на индикаторе не отображается.

Полученные результаты могут быть рекомендованы при обновлении ячеек измерителя уровня входного сигнала приемного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Осадченко В.Х., Волкова Я.Ю. Операционные усилители: Учеб. По-сobie: - Екб., 2020 – 160 с
- [2] Куцко Т.Ю. Расчет полосовых фильтров. – М., Ленинград.: Энергия, 1965. – 193 с.
- [3] Белов А.В. Разработка устройств на микроконтроллерах AVR. – СПб.: Наука и Техника, 2013. – 528 с
- [4] Ревич Ю. Практическое программирование микроконтроллера Atmel AVR. – 2-е изд., испр. – СПб.: БХВ- Петербург, 2011 – 352 с.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE CELL OF THE INPUT SIGNAL LEVEL METER OF THE RECEIVING DEVICE

Grigoryan M.A.

Chair of Telecommunications, Institute of Radio
Electronics and Computer Science
RTU MIREA
Moscow, Russia
mgrigoryan00@mail.ru

Osipova V.O.

Chair of Telecommunications, Institute of Radio
Electronics and Computer Science
RTU MIREA
Moscow, Russia
osipova@mirea.ru

Abstract – The article is devoted to the development and research of the cell of the input signal level meter of the receiving device. The composition of the cell of the input signal level meter is considered, the cell itself is designed on a modern element base using a microcontroller and a logarithmic amplifier. The bandpass filter was calculated, as well as its layout.

Keywords – bandpass filter; logarithmic amplifier; microcontroller; input signal level meter cell.

621.396.678

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ В РАСКРЫВЕ РАЗВОРАЧИВАЕМЫХ АНТЕНН ЗОНТИЧНОГО ТИПА

Зябриков С.Ю.

Институт радиоэлектроники и
информатикиКафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА

Москва, Россия

zyabrikov@mirea.ru

Трефилов Н.А.

Институт радиоэлектроники и
информатикиКафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА

Москва, Россия

trefilov@mirea.ru

Шпак А.В.

Институт радиоэлектроники и
информатикиКафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА

Москва, Россия

shpak@mirea.ru

Аннотация — В работе рассмотрена модель поверхности разворачиваемой зеркальной антенны зонтичного типа. В приближении геометрической оптики рассмотрено формирование амплитудно-фазового распределения поля в раскрытии антенны при различном числе ребер жесткости для модели формы диаграммы направленности облучателя. В апертурном приближении рассмотрена форма диаграммы направленности зеркальной антенны. Приведены результаты анализа диаграммы направленности для антенны с различным числом ребер, полученные в среде Mathcad.

Ключевые слова — зеркальная антенна, разворачиваемая зеркальная антенна, апертурное распределение поля, модель формы поверхности, моделирование антенн.

ВВЕДЕНИЕ

В космическом сегменте систем радиосвязи с наземными устройствами применяются зеркальные антенны. Для перевода их из режима вывода космического аппарата на орбиту в рабочее состояние производится трансформация формы рефлектора и всей антенны. Для этого часто используется механизм, так называемого, зонтичного типа, в котором форма рефлектора отражающей поверхности зеркальной антенны обеспечивается за счет ребер жесткости, имеющих параболическую форму, между которыми натягивается гибкое сетеполотно, обладающее высокими отражательными свойствами для электромагнитного поля, излучаемого облучателем антенны [1,2].

Конкретная конструктивная реализация механизма развертывания, форма ребер жесткости, тип и свойства сетеполотна, места установки дополнительных контурных канатов в сетеполотне могут быть различными [1], но вся конструкция зеркальной антенны должна обеспечивать аппроксимацию отражающей поверхности рефлектора с малым допустимым отклонением от формы параболоида вращения в условиях, существующих на рабочей орбите космического аппарата. Внешний вид рефлектора зеркальной антенны в развернутом состоянии в наземном положении на монтажном столе показан на рисунке 1 [2].

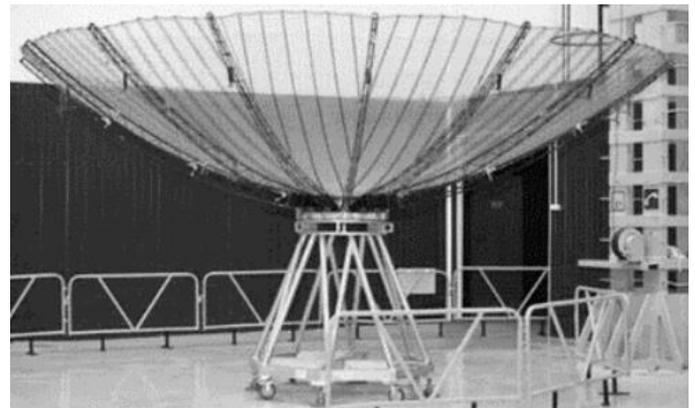


Рис. 1. Внешний вид разворачиваемого рефлектора зеркальной антенны спутника Луч на монтажном столе

В таких разворачиваемых зеркальных антеннах отличие формы отражающей поверхности от необходимой зависит от количества используемых ребер жесткости. Увеличение числа ребер приводит к улучшению формы рефлектора, но одновременно снижается надежность разворачивания конструкции, увеличивается ее вес, повышается сложность. Уменьшение числа ребер увеличивает отличие формы рефлектора от параболической, что приводит к увеличению фазовых ошибок в распределении электромагнитного поля в раскрытии зеркальной антенны и к снижению технических параметров антенны [3]. Наибольшие фазовые ошибки создаются участками рефлектора, расположенными на его периферии, имеющими большую площадь. Это приводит к тому, что разворачиваемые зеркальные антенны с большим диаметром рефлектора практически не используются, так как увеличение размеров рефлектора с одновременным ростом фазовых ошибок не позволяет увеличить коэффициент усиления или эффективную площадь поверхности антенн. С увеличением размеров антенны наблюдается увеличение уровня боковых лепестков диаграммы направленности, что приводит к снижению коэффициента направленного действия. Поэтому

определение минимально допустимого числа ребер жесткости является важной технической задачей.

I. МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ РАЗВОРАЧИВАЕМОГО РЕФЛЕКТОРА

Геометрический анализ поверхности, образуемой сетеполотном при натяжении на ребра жесткости, имеющие параболическую форму, позволяет считать, что отражающая поверхность сетеполотна на участках между ребрами жесткости образует сегменты, которые можно представить частями поверхности в виде параболических цилиндров. Влияние такой формы отражающих сегментов на амплитудно-фазовое распределение поля в раскрыве рефлектора можно оценить, используя приближение геометрической оптики [4]. Такой подход является типовым для зеркальных антенн. Фаза колебаний в точке прихода луча определяется траекторией и длиной хода луча. Амплитуда колебаний при отсутствии потерь в рассматриваемой модели связана с изменением площади лучевой трубки, расположенной между источником излучения и точкой наблюдения. При приходе в одну и ту же точку наблюдения различных лучей амплитуда и фаза результирующего колебания определяется суммой комплексных амплитуд составляющих. Необходимость этого связана с тем, что в ряд участков раскрыва зеркальной антенны при использовании модели параболических цилиндров для отдельных сегментов рефлектора, расположенных между ребрами жесткости приходят лучи, отраженные от соседних сегментов. На рис. 2. показана форма используемой модели разворачиваемой антенны и ход лучей.

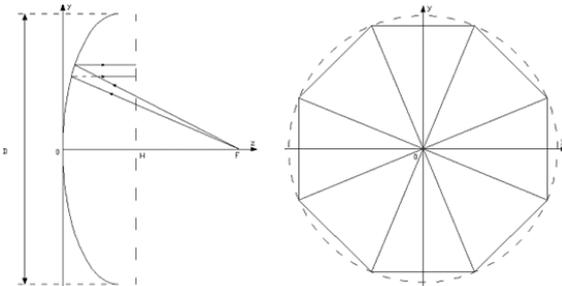


Рис. 2. Геометрическая форма модели рефлектора зонтичного типа

На рис. 3 показано построение лучевой трубки в приближении геометрической оптики

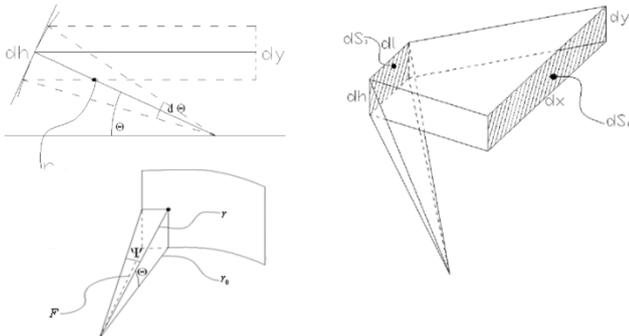


Рис. 3. Форма лучевой трубки для модели рефлектора зонтичного типа

Взаимосвязь диаграммы направленности облучателя с амплитудным распределением поля в раскрыве антенны определяется соотношением

$$E_2 = F(\Psi, \Theta) \cdot \frac{(1 + \cos \Psi) \sqrt{\cos \Theta}}{2F \sqrt{1 + \frac{H}{2F}(1 + \cos \Psi) \cos \Theta \cos \Psi}}$$

Так как форма сегмента является частью параболического цилиндра, фазовое распределение в раскрыве апертуры после отражения лучей от сегмента поверхности рефлектора в плоскости параболы будет синфазным, как и в рефлекторе в виде параболоида вращения. В ортогональной плоскости в направлении угла Θ фаза изменяется в соответствии с соотношением

$$\varphi(\Theta) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{H + F}{\cos \Theta} + \pi$$

Угловые величины в записанных соотношениях связаны с геометрическими параметрами раскрыва рефлектора соотношениями

$$\Psi = \pm 2 \arctg \left(\frac{\rho}{2F} \cos \varphi \right),$$

$$\Theta = \pm \arctg \left(\frac{\rho}{F + H} \sin \varphi \right),$$

где ρ и φ полярные координаты точки апертуры.

Диаграмма направленности разворачиваемой зеркальной антенны зонтичного типа в апертурном приближении в векторном виде находится через интеграл Кирхгофа - Коттлера

$$\dot{\mathbf{E}} = \frac{k^2}{j\omega\epsilon_0} \int [\mathbf{J}_S - (\mathbf{J}_S \vec{r}_0) \vec{r}_0] dS$$

или приближенно в скалярном виде может быть найдена через интегрирование полей элементарных излучателей Гюйгенса, распределенных по поверхности апертуры [6]

$$\Delta \bar{E} = A \cdot \frac{e^{-ikR_f}}{R_f} \cdot \bar{E}_0(\theta, \varphi) \cdot E_A(x', y') \cdot \Delta x' \Delta y'$$

Такой подход будет проще и позволяет учесть симметрию модели конструкции антенны. Так как все сегменты имеют одинаковую геометрию, то при осе симметричной диаграмме облучателя при определении диаграммы направленности всей антенны можно интеграл вычислять только по одному сегменту, а общее поле антенны найти суммированием полей всех сегментов. При таком подходе диаграмма направленности всей зонтичной зеркальной антенны, рефлектор которой состоит из N сегментов будет определяться выражением

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \int_0^{\frac{D}{2}} \int_{\frac{2\pi}{N}(n-1)}^{\frac{2\pi}{N}n} \bar{E}_A(\Psi, \Theta) \cdot \exp[ik\rho \sin \theta \cos(\varphi' - \varphi)] \rho d\rho d\varphi'$$

Рассмотренная модель разворачиваемой зеркальной антенны с рефлектором зонтичного типа является простой, но позволяет оценить влияние числа ребер жесткости каркаса рефлектора на параметры антенны.

При усложнении геометрии модели можно использовать более точное представление процессов излучения электромагнитного поля, например, использовать метод моментов для нахождения закона распределения тока, создаваемого облучателем на

поверхности рефлектора [7] или использовать комплексные модели, использующие метод физической оптики и метод моментов.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АНТЕННЫ

Моделирование зеркальной антенны зонтичного типа проводилось в среде Mathcad путем вычисления формы диаграммы направленности при различном числе ребер жесткости. При этом для уменьшения вычислительной сложности предполагалось, что диаметр рефлектора антенны в развернутом положении составляет 20 длин волн. Диаграмма направленности облучателя предполагалась осесимметричной, ее форма задавалась в виде

$$F(\Psi) = \cos\Psi.$$

Угол раскрыва рефлектора из геометрического фокуса выбирался оптимальным по коэффициенту направленного действия зеркальной антенны. Также рассчитывалась диаграмма направленности антенны в предположении, что форма рефлектора является идеальным параболоидом. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

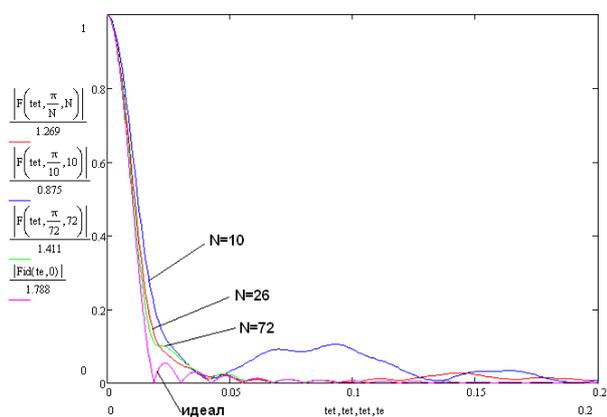


Рис. 4. Результаты моделирования формы диаграммы направленности зеркальной антенны при различном числе ребер жесткости

Угловая координата по оси абсцисс приведена в радианах, так как эти значения не влияют на результаты анализа.

III. ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты моделирования зеркальной антенны с рефлектором зонтичного типа в целом подтверждают теоретические предположения. Увеличение числа ребер жесткости приближает форму диаграммы направленности антенны к форме диаграммы направленности идеального параболоида.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный подход позволяет оценить необходимое число ребер жесткости в конструкции антенны при заданных требованиях к уровню боковых лепестков антенны. Заданная точность моделирования обеспечивает достоверность полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гряник М.В., Ломан В.И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. – М.: Радио и связь, 1987. – 72 с.
- [2] Евдокимов А.С., Пономарев С.В., Буянов Ю.И. Совместный расчет напряженно-деформированного состояния и диаграммы направленности космических рефлекторов // Вестник томского государственного университета. Сер. Математика и механика, № 1(13) – Томск: Изд. ТГУ, 2011, с. 74-82.
- [3] Антенны и устройства СВЧ/ под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Сов. Радио, 1972.
- [4] Корнблит С. СВЧ оптика: Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн. – М.: Связь, 1980. – 360 с.
- [5] Сканирующие антенные системы СВЧ. Том 1.//под ред. Р.К. Хансена. - М.: Сов. Радио, 1966.- с. 538.
- [6] Лобанов Б.С., Нефедов В.И., Трефилов Н.А. Прикладная электродинамика. – М.: изд. МИРЭА, 2011. – 136 с.
- [7] Harrington R.F. Field Computation by Moment Method. – N.Y.: IEEE Press Inc. – 1968. -p. 211.

AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTION OF THE FIELD IN THE OPENING OF THE DEPLOYED UMBRELLA- TYPE ANTENNAS

Zyabrikov S.Yu.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
ssr.kgd@mail.ru

Trefilov N.A.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
trefilov@mirea.ru

Shpak A.V.
Institute of Radio Electronics and
Computer Science
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
shpak@mirea.ru

Abstract — The paper considers a model of the surface of an umbrella-type unfolded mirror antenna. In the approximation of geometric optics, the formation of the amplitude-phase distribution of the field in the opening of the antenna with a different number of stiffeners for the model of the shape of the radiation pattern of the irradiator is considered. The shape of the directional pattern of a mirror antenna is considered in the aperture approximation. The results of the analysis of the radiation pattern for an antenna with a different number of edges obtained in the Mathcad environment are presented.

Keywords —mirror antenna, deployable mirror antenna, aperture field distribution, surface shape model, antenna modeling.

УДК 621.385.6:621.3.01

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ФОРМАЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОВАКУУМНОМ ТРИГГЕРЕ СВЧ

Волощенко П.Ю.
Институт нанотехнологий,
электроники и приборостроения
Кафедра радиотехнической электроники и
наноэлектроники
ЮФУ
Таганрог, Россия
puvoloshhenko@sfnu.ru

Волощенко Ю.П.
Институт радиотехнических
систем и управления
Кафедра электротехники и мехатроники
ЮФУ
Таганрог, Россия
voloschenkoyup@sfnu.ru

Аннотация — В работе описывается инженерная методика формирования математических моделей нелинейных электрических процессов в микровакуумном триггере микроволнового диапазона длин волн.

Ключевые слова — интегральная схема; вакуумная электроника; волновой нелинейный элемент; триггер.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стандартные инженерные расчеты и алгоритмы верификации вакуумных интегральных схем (ВИС) игнорируют соотношение амплитуд и фаз когерентных сигналов, инерционно передаваемых гальваническими и беспроводными соединениями электронных приборов (ЭП), расположенных снаружи обшивки космического объекта [1-6]. Вместе с тем явление преобразования энергии СВЧ в постоянном и переменном электрическом поле ВИС при автоэлектронной эмиссии и движении отрицательных элементарных зарядов перманентно меняет граничные условия, задающие КПД и теплоотвод конформной электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА).

I. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ НЕАВТНОМНЫХ БЛОКОВ

Целью работы является разработка этапов инженерного моделирования микровакуумного триггера «открытой» радиационно-стойкой ВИС.

Считаем, что общее электромагнитное (ЭМ) поле системы ЭП, проектируемой феноменологическим способом как совокупность неавтономных блоков, описывается уравнениями Лоренца и Максвелла, законами Кулона и Кирхгофа и т.п. [5-12]. Однако принцип суперпозиции и подробная конкретизация материалов катода и анода, количества сеток и конструктивных емкостей микроламп не применяется. Начальный символичный анализ граничных условий и энергетики в инженерной модели ЭВА проводим одновременно

методами эквивалентных схем и синусоид, комплексных амплитуд и двух узлов в одноузловом приближении за два характерных временных $T/2$ и $T=\tau$ интервала. Регулировка режима насыщения ЭП с электростатическим управлением соответствует тактовой частоте $f = 1/4\tau$ сигнала и уменьшенному (в 1,5 раза и более) времени τ пролета электронов диодов и триодов, тетродов и т.п., имеющих термокатод и объемный заряд между электродами [6,11]. В этом случае когерентные ЭП, объединяемые положительной и (или) отрицательной обратной связью, представляются резистивно-негатронными инвариантами теории электронной цепи (ЭЦ) [5-10]. Аналитическое решение экспоненциальных и тригонометрических уравнений нелинейных волн тока и напряжения, бегущих в ней, осуществляется методами гармонической линеаризации и баланса, а устойчивые и нестационарные состояния оцениваются неравенствами Пирса и Котельникова в импедансной форме [5-11]. Оптимизация электрической структуры триггера, возникающей в его конструкции при воздействии окружающего ЭМ поля, достигается путем диагностики корректности расположения ЭП в пучностях и узлах мгновенного электрического поля, модернизацией её исходного строения в рамках групповой технологии изготовления микроволновой ЭВА космического назначения.

Для иллюстрации актуальности применения нового метода неавтономных блоков, оригинальной методики символического анализа связи строения и энергетики ЭЦ в монохроматическом приближении, воспользуемся изображением триггера СВЧ (рис. 1). Эскиз прототипа радиационно-стойкой ВИС, выполнен на основе известной визуализации микровакуумных ламп, имеющих одну сетку [7,13]. Идеализированный чертеж «открытого» макета симметричного триггера (рис. 1) опирается на условные модели линии передачи с малыми потерями и планарной RC структуры, отвечающих комбинации медной и алюминиевой проволоки, золотой «плющенко» и

полоскового соединения, имеющего разное погонное затухание.

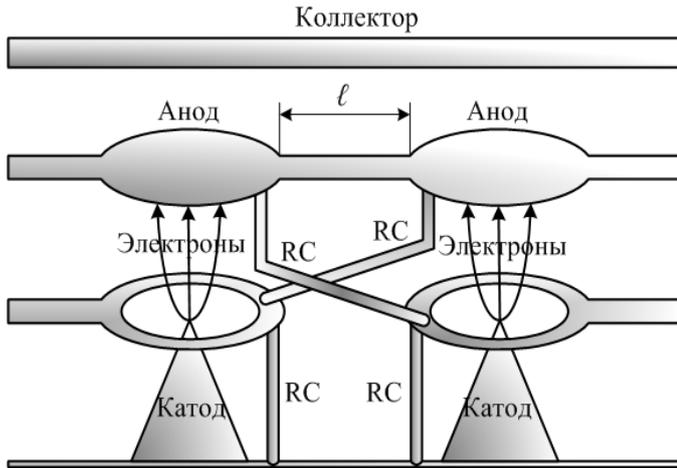


Рис. 1. Изображение симметричного триггера СВЧ

II. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА

Идеализированная электрическая схема триггера, находящегося в ЭМ поле, трактуемая как наглядный графический оператор волнового нелинейного элемента (ВНЭ) модернизированной теории ЭЦ на резонансной частоте ω_0 [5-12], приведена на рис. 2.

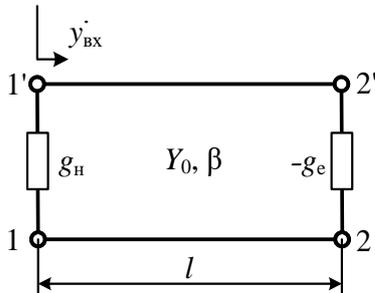


Рис. 2. Схема замещения анодного участка электронной волновой цепи.

Здесь $-g_e = G_e(U_2, \omega_0)/Y_0$ – нелинейная негatronная проводимость микротриода, размещенного в сечении 2–2' эквивалентной двухпроводной линии; $g_n = G_n(\omega_0)/Y_0$ – линейная проводимость резистивной нагрузки на зажимах 1–1' схемы замещения «длинной» электрической цепи, расположенной справа от клемм 1–1'; l – продольный размер проводника, подающего питание на электроды ламп. Одновременно металлический провод является распределенной ЭЦ или электронной волновой цепью (ЭВЦ) трансформации амплитуды и фазы сигнала без энергоемких элементов, дисперсии и потерь, создающей обратную связь в ЭМ поле. Все вышеупомянутые импедансные параметры инженерной математической модели триггера нормированы по положительной волновой (характеристической) Y_0 проводимости участка, объединяющего микротриоды в единое целое.

При корректном символьном анализе преобразования колебательной энергии ЭВЦ в монохроматическом приближении с учетом явлений дифракции и интерференции считаем, что

1) диаметр электронных потоков мал по сравнению с длиной волны колебаний СВЧ. Поэтому рассматриваем пространство между электродами как нелинейный элемент (НЭ) и двухполюсник с сосредоточенными параметрами, фильтрующий гармоники переменного тока и напряжения на сетках и анодах ЭП.

2) В отрезке l однородной двухпроводной линии, селекционирующем моды СВЧ колебаний, распространяются только ЭМ волны основного типа; параметры RC ветвей определяются по постоянному U_0 и переменному напряжению U_1, U_2 без конкретизации связей, создаваемых ими.

3) Правый ЭП (рис. 1) обладает частотно-независимой отрицательной вещественной составляющей импеданса СВЧ, а его зависимость от действительной амплитуды U_2 напряжения определяется алгебраическим соотношением:

$$-G_e(U_2) = -G_{e0}(U_0)(1 - \nu U_2). \quad (1)$$

Кроме того, обозначения на рис. 2 идентифицируют: G_{e0} – малосигнальную активную проводимость НЭ; U_1, U_2 – напряжение между точками 1–1', 2–2' макромодели триода, ν – размерный коэффициент нелинейности колебательной характеристики ЭП, соответствующий применяемому методу гармонической линеаризации [5-11, 14].

Диапазонные амплитудно-зависимые граничные условия в триггере первоначально рассматриваем с помощью аналитического оператора относительной комплексной входной проводимости ВНЭ

$$\dot{y}_{вх}(U_1, \omega) = \dot{Y}_{вх}(U_1, \omega)/Y_0 \quad (2)$$

кондуктивного соединения анодов микроламп, на конце которого находится негatron. Величина $y'_{вх}$ схемы триггера равна:

$$\dot{y}'_{вх}(U_1, \omega_0) = \frac{-g_e(U_1, \omega_0) + j \operatorname{tg} \theta}{1 - j g_e(U_1, \omega_0) \operatorname{tg} \theta}, \quad (3)$$

где $\theta = \beta l$ – электрическая длина отрезка линии передачи, ν_ϕ , $\beta = \omega/\nu_\phi$ – фазовая скорость и постоянная распространения волны напряжения и тока вдоль участка цепи с распределенными линейными параметрами. Предложен алгоритм использования трансцендентной и алгебраической комплексной формы записи передачи сигнала для нахождения соответствия конструктивной реализации (рис. 1) и сосредоточенной эквивалентной схемы триггера.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая феноменологическая методология и инженерная формализация нелинейных процессов в ЭВЦ позволяют корректно прогнозировать мгновенную реакцию совокупности одномерных проводников, объединяющих дискретные микроламп, на

гармоническое воздействие согласованного генератора мощности [11,12] при многомоновых колебаниях в участках гальванической или беспроводной обратной связи и регулировке питания ВИС.

Установлено, что: 1) действительная амплитуда и фаза когерентных сигналов ЭП, интегрируемых металлическими и RC линиями, определяется явлениями контролируемой дифракции и интерференции, вызванных эффектами нелинейной композиции и регенерации энергии колебаний в ЭВЦ; 2) цилиндрические и ленточные провода различной электропроводности и конфигурации в регистрах, счетчиках и т.д., изготовленных на основе триггеров микроволнового диапазона (рис. 1), обязательно модулируют интенсивность общего ЭМ поля ЭВА.

Проведенное теоретическое исследование верификационного макета конформной системы триодов с автоэлектронной эмиссией и электростатическим управлением направлено на одновременное повышение быстродействия и КПД, надежности и минимизации нагрева микропроцессоров ГГц и ТГц без изменения технологии производства ВИС, используемых в экстремальных условиях космоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сеницын Н.И. Возможности вакуумной микроэлектроники на пути к построению СВЧ-вакуумных интегральных схем. /Н.И. Сеницын, Ю.В. Гуляев, Н.Д. Девятков и [др.] //Радиотехника, 1999. Москва: С. 8 – 18.
- [2] Татаренко Н.И., Петров А.С. Вакуумная микроэлектроника: реальность и перспективы. //Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, 1998. №7. С.10-31.
- [3] Татаренко Н.И. Степень интеграции и быстродействие наноструктурных автоэлектронных микротриодов // Успехи современной радиоэлектроники, 2005. Москва: С. 3 – 10.
- [4] Zhu, Wei. Vacuum microelectronics. – New York:Wiley-Interscience publication, 2001. –396 с. ISBN: 047132244X
- [5] Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Моделирование нелинейных электрических процессов в элементах электронной волновой цепи: учебное пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: ЮФУ, 2018. – 116 с. EDN: YTPREQH
- [6] Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Моделирование переноса электрических зарядов в электровакуумных приборах с электростатическим управлением: учебное пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: ЮФУ, 2019. – 110 с. EDN: ZNYSFK
- [7] Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P. Researching the transformation of signal amplitude in the microwave logical element // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018) Abstracts & Schedule. Busan, Republic of Korea, 09-11 august 2018. - Busan: Korea Maritime and Ocean University, 2018. - p. 377-378. EDN: YMGBYT
- [8] Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Основы теории одномерной нелинейной электрической и электронной волновой цепи: учебное пособие.– Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2015. – 100 с. EDN: VGYXNH
- [9] Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Моделирование электронных компонентов интегральных схем методами теории электрических цепей. –Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2017. – 111 с. EDN: YHOZPL
- [10] Волощенко Ю.П., Волощенко П.Ю. Нелинейные электрические колебания в электронной цепи: учебное пособие.– Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2020. 106 с. EDN: WKEESE
- [11] Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ /Под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с
- [12] Ортюзи, Ж. Теория электронных цепей: Пер. с фр. / Под ред. Л. Р. Явича. - Москва : Мир, 1970-1971. - 2 т.
- [13] Kosmahl H.G. A wide-bandwidth high-gain small-size distributed amplifier with field -emission triodes (FETRODE's) for the 10 to GHz frequency range // IEEE Trans. on ED. 1989. Vol. ED-36, №. (November). P. 2728–2737.
- [14] Андреев, В. С. Теория нелинейных электрических цепей. – Москва: Радио и связь, 1983. – 280 с.

ENGINEERING METHOD OF FORMALIZATION OF NONLINEAR PROCESSES IN A MICROWAVE MICRO- VACUUM TRIGGER

Voloshchenko P.Y.
Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment
Engineering
Department of Radioengineering Electronics and
Nanoelectronics
Taganrog, Russia
pvoloshhenko@sfedu.ru

Voloshchenko Y.P.
Institute of Radio Engineering Systems and Control
Department of Electrical Engineering and Mechatronics
Taganrog, Russia
voloshchenkoyup@sfedu.ru

Abstract – The paper describes an engineering technique for the formation of mathematical models of nonlinear electrical processes in a microvacuum trigger of the microwave wavelength range.

Keywords – integrated circuit; vacuum electronics; wave nonlinear element; trigger.

УДК 621.396.677

ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В S ДИАПАЗОНЕ

Демин О.А.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоволновых процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
demin_o@mirea.ru

Иванцов М.О

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоволновых процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
ivancov@mirea.ru

Корчагин А.С.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоволновых процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
korchagin@mirea.ru

Никашин А.К.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоволновых процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
nikashin_a@mirea.ru

Аннотация — в работе представлены результаты прототипирования широкополосной антенны Вивальди, программно-численное моделирование с использованием метода моментов. На основе результатов моделирования производится редактирование и настройка топологии антенны и оценка получаемых характеристик. Формирование малоэлементной антенной решетки, увеличивающей направленность системы и обеспечивающей повышение энергетических характеристик связи.

Ключевые слова — программно-численное моделирование, антенна Вивальди, сверхширокополосная антенна, S-диапазон, антенная решетка.

ВВЕДЕНИЕ

Широкополосные системы позволяют одновременно использовать много больший диапазон частот чем стандартные или узкополосные. Это открывает возможность расширения емкости канала связи, повышения скорости и достоверности передачи, а также использования для передачи сигналов с широкой базой. Также широкополосные системы более помехоустойчивы в условии наличия узкополосных внутриволновых помех. Однако при приеме сигналов с использованием широкополосных систем возникает закономерная проблема, связанная с наличием в принимаемой полосе побочных излучений от иных радиотехнических систем.

S диапазон используется большим количеством систем различного назначения, среди которых можно выделить как глобально популяризированные многопоточные системы передачи данных, так и медицинские аппараты для микроволновой диатермии.

Стандартная проблема радиосвязи с использованием S-диапазона заключается в том, что спутниковые зеркальные антенны данного диапазона имеют сравнительно большие

размеры. Также масса таких антенн превышает десятки килограмм, что может быть критичным при разработке спутниковых систем [1].

Один из способов понижения габаритных характеристик антенной системы – использование малогабаритных печатных излучателей. Однако для печатных излучателей характерна малая направленность. Отдельная категория печатных излучателей – широкополосные излучатели, которые сохраняют критически важные характеристики диаграммы направленности и параметры входного согласования, такие как коэффициент стоячей волны или же коэффициент отражения. Среди характеристик диаграммы направленности выделяют ширину диаграммы направленности, коэффициент направленного действия и уровень боковых лепестков. Повышение направленности возможно при использовании нескольких излучателей с когерентными передатчиками (приемниками), другими словами, при применении теории антенных решеток. Совмещение теории антенных решеток и широкополосных излучателей позволит увеличить характеристики и возможности применения систем космической радиосвязи.

Для оценки характеристик антенного устройства возможно применение математического анализа, аналитического расчета параметров и математического моделирования. В рамках данной работы представляет интерес анализ широкополосной антенны. Как правило - аналитический расчет такой антенны в высокой степени затруднен наличием большого числа переменных, зависящих от конструктивных особенностей конкретного образца, таких как сложная форма раскрытия антенны, система запитки антенны, взаимодействие возбуждаемого поля с материалом диэлектрика, характерные для любой печатной антенны.

Для электродинамического моделирования применяются готовые системы автоматизированного проектирования, такие как: Altair Feko, Ansys HFSS, Simulia CST, MathWorks Matlab [2].

Altair HyperWorks FEKO – система автоматизированного проектирования (САПР), которая способна в трехмерном масштабе моделировать и решать разнообразные задачи, связанные с электродинамикой и распространением радиоволн на основе построенных трехмерных структур. Реализует методы: моментов (МоМ), конечных разностей во временной области (FDTD), конечных элементов (FEM) и быстрых мультиполей (MLFMM).

ANSYS HFSS – САПР программного трехмерного моделирования для высокочастотных сигналов. Данная система имеет уникальную особенность: автоматическое, адаптивное генерирование сетки. Вместо определения её заранее, физика модели влияет на формирование сетки, что гарантирует точность вычислений. Такой подход к моделированию выгодно отличает HFSS от других программ электромагнитного моделирования СВЧ-устройств и обеспечивает высокую универсальность анализа. Данный программный пакет реализует метод конечных элементов, заключающийся в дискретизации пространства.

Matlab – пакет прикладного ПО для проведения вычислений, который имеет возможность проведения математического моделирования. Приложение Antenna Toolbox – специальный пакет, расширяющий возможности программы для моделирования конструкций антенн и получения их характеристик. Использование matlab позволяет достичь быстрого получения диаграмм направленности программно-заданных моделей антенн, а также определить их входных характеристики, такие как входное сопротивление, коэффициент стоячей волны (КСВ) и параметры матрицы рассеяния.

Среди всех описанных САПР, выделяется Altair Feko, как постоянно развивающаяся система автоматизированного проектирования, с возможностью использования нескольких методов расчета в рамках одной задачи. Среди них метод моментов, метод конечных разностей во временной области, метод конечных элементов и многоуровневый метод быстрых полей.

I. МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННЫ

В качестве широкополосной антенны, удовлетворяющей указанным ранее критериям, была выбрана антенна Вивальди. Используемая вариация этой антенны представляет собой двухслойную печатную плату, на одной стороне которой располагается раскрыв антенны и замыкающая окружность, а на другой – элемент питания, согласующий волновое сопротивление в раскрыве антенны и волновое сопротивление разъема [3].

Для моделирования антенны, в среде Altair Feko была построена модель антенны Вивальди, представленная на рисунке 1.

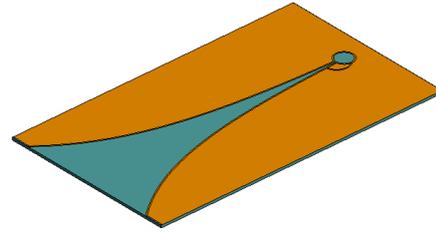


Рис. 1. Антенна Вивальди

Для проведения расчетов, поверхность модели разбивается на элементарные треугольные полигоны, размеры которых должны быть на порядок меньше минимальной длины волны. Это необходимо для точного решения электродинамической задачи излучения антенны. Решение получено с помощью совместного использования методов моментов и конечных элементов. Метод моментов позволяет находить плотности токов и зарядов на границах полигонов модели, а метод конечных элементов находит сходящееся в пространстве решение системы уравнений, при условии отсутствия зависимости по времени [4]. Поле, возбуждаемое каждым элементарным элементом, образует поле излучения всей антенны.

В результате моделирования были получены характеристики распределения поля в пространстве (рис. 2,3) и зависимости коэффициента стоячей волны от частоты (рис. 5) в полосе частот от 2 до 4 ГГц.

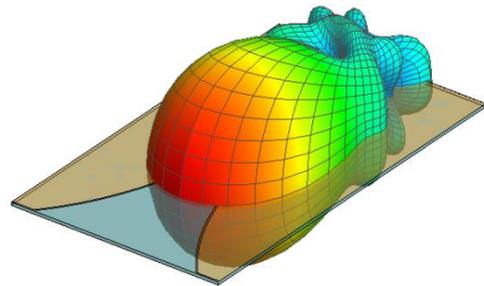


Рис. 2. Пространственная диаграмма направленности антенны на частоте 2 ГГц

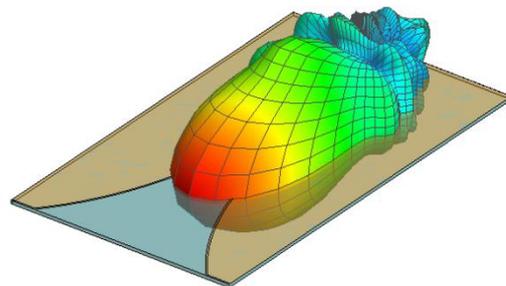


Рис. 3. Пространственная диаграмма направленности антенны на частоте 4 ГГц

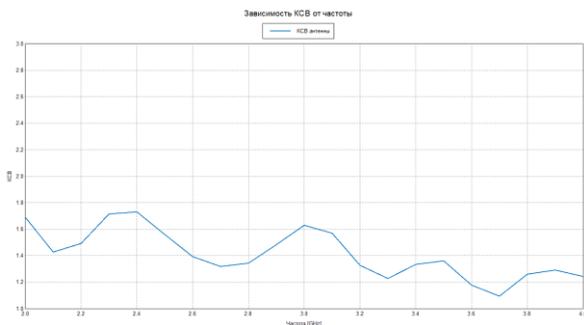


Рис. 4. Зависимость КСВ от частоты по входу антенны

По полученным распределениям поля можно отметить хорошую направленность антенны и малый уровень бокового излучения. Чем меньший уровень бокового излучения, тем меньше антенна будет влиять на соседние излучатели в антенной решетке. КСВ антенны

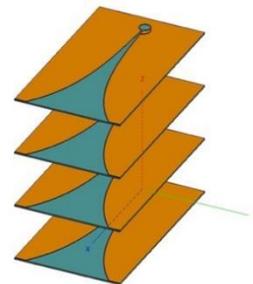


Рис. 6. Антенная решетка из антенн Вивальди

Использование антенной решетки не только повышает коэффициент усиления антенны, но также сужает диаграмму направленности, что может привести к уменьшению покрытия. В некоторых случаях многопоточковой системы связи наоборот применяются узкие диаграммы направленности, для точечной передачи информации. В случае использования линейной антенной решетки, диаграмма направленности по одной оси (ось y на рис. 6) будет сужаться с увеличением количества излучателей, а по другой (ось z на рис. 6) останется неизменной (рис. 7, 8).

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ

На основе результатов моделирования была изготовлена антенна Вивальди путем травления фольгированного текстолита FR4 по форме топологии модели. Результаты векторного анализа в виде графика зависимости КСВ от частоты приводятся на рисунке 5. Как видно по графику, все значения КСВ меньше 1,9, что говорит о широкой полосе согласования антенны. Дополнительные пульсации вызваны неидеальностью тракта между векторным анализатором и измеряемой антенной.

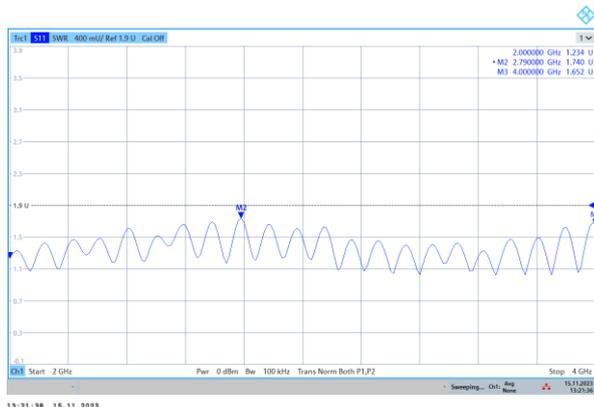


Рис. 5. Значение КСВ, полученное на векторном анализаторе

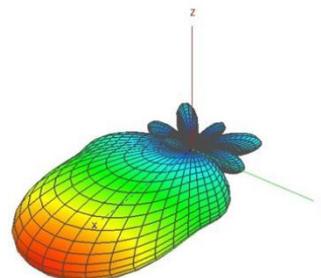


Рис. 7. Пространственная диаграмма направленности на частоте 2 ГГц

III. ПРИМЕНЕНИЕ РАССЧИТАННОЙ АНТЕННЫ В АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ

Как было сказано в введении, для использования антенны в спутниковой радиосвязи требуется большой коэффициент усиления. Для повышения коэффициента усиления имеющейся антенны (~9 дБ) имеется возможность создания антенной решетки в двух плоскостях. В рамках данной статьи рассматривается антенная решетка, в которой элементы располагаются в параллельных плоскостях как представлено на рисунке 6. Расстояние между элементами выбрано как $0,75\lambda$, где λ –

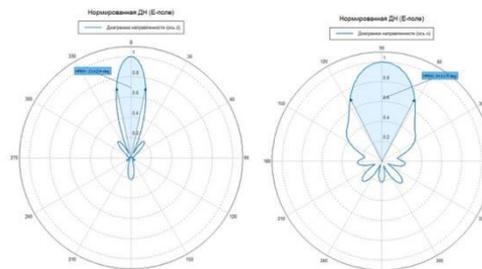


Рис. 8. Диаграммы направленности антенной решетки в двух плоскостях

Также по рисунку 7 наглядно видно возникновение дополнительных направлений приема в виде боковых лепестков. Моделирование позволяет контролировать уровень боковых лепестков (УБЛ), что представлено на рисунке 8. Максимальный УБЛ возникает при излучении сигнала с частотой 4 ГГц и составляет -14,1 дБ по мощности от основного направления излучения.

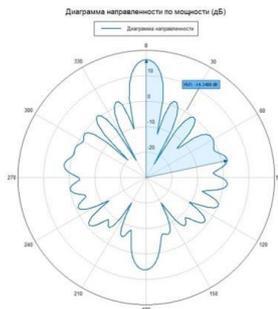


Рис. 9. Диаграммы направленности антенной решетки по мощности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численного моделирования с использованием САПР, были получены пространственные характеристики антенны Вивальди и линейной антенной решетки. Для рассчитанных структур характерно возникновение малых боковых лепестков, не более 14,1 дБ для антенной решетки. Коэффициент усиления антенны сравнительно высокий. Результаты расчета были подтверждены прототипированием и измерением характеристик в лабораторных условиях. Полученный прототип обладает хорошими характеристиками входного

согласования и излучаемой мощности (рассчитанный коэффициент усиления антенной решетки 16,1 дБ по сравнению с 10,5 дБ у отдельного элемента).

Исследованная антенна прекрасно проявляет себя и может представлять интерес для разработок в области космической связи. При правильном конструкторском решении, сравнимо высокие габаритные размеры антенны (не менее 15 см в длину и 10 см в ширину) не вызовут проблем с размещением, а проблема малой предельной мощности (связанная с использованием фольгированного текстолита FR4) может быть решена использованием иного материала, либо установкой охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] К.И. Куку. Спутниковая связь. Прошлое, настоящее, будущее. М. Горячая линия- Телеком. 2015.
- [2] Alex N Jensen Introduction to Monopole Antenna Design with Ansys HFSS (High Frequency Structure Simulation): Demystifying the HFSS setup and analysis process Independently published; 2022 – 123 с.
- [3] Boris Levin. Antennas: Rigorous Methods of Analysis and Synthesis/ CRC Press, 2023 – 314 с.
- [4] Atef Z. Elsherbeni, Payam Nayeri, C.J. Reddy Antenna Analysis and Design using FEKO Electromagnetic Simulation Software (Electromagnetic Waves) Scitech Publishing, 2014 – 256 с.
- [5] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele Antenna Theory and Design 3rd Edition Wiley; 3rd edition, 2012 – 848 с.

ANALYSIS OF VIVALDI ANTENNA CHARACTERISTICS USING THE METHOD OF MOMENTS

Demin Oleg Alexandrovich

Institute of Radio Electronics and Computer Science
Department of Radio Wave Processes and Technologies
Moscow, Russia
Demin_o@mirea.ru

Ivantsov Maxim Olegovich

Institute of Radio Electronics and Informatics
Department of Radio Wave Processes and Technologies
Moscow, Russia
ivancov@mirea.ru

Korchagin Alexander Semyonovich

Institute of Radio Electronics and Informatics
Department of Radio Wave Processes and Technologies
Moscow, Russia
korchagin@mirea.ru

Nikashin Alexander Kirillovich

Institute of Radio Electronics and Computer Science
Department of Radio Wave Processes and Technologies
Moscow, Russia
nikashin_a@mirea.ru

Abstract — the paper presents the results of prototyping a broadband Vivaldi antenna, software-numerical modeling using the method of moments. Based on the simulation results, the antenna topology is edited and configured and the resulting characteristics are evaluated. Formation of a low-element antenna array that increases the directivity of the system and provides an increase in the energy characteristics of communication.

Keywords – software and numerical modeling, vivaldi antenna, ultra-wideband antenna, S-band, antenna array.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ В ПОСТРОЕНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИЕМА ЦИФРОВЫХ РАДИОСИГНАЛОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Сгибнев А.К.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоволновых процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
zgiba12345@mail.ru

Денисенко В.Д.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
denisenko@mirea.ru

Аннотация — Статья посвящена применению искусственных нейронных сетей для решения задач фильтрации и обработки радиосигналов в спутниковой радиосвязи. В статье рассмотрены основные принципы и преимущества нейросетевой фильтрации радиосигналов, а также примеры ее применения в различных областях. В статье также проанализированы современные стандарты спутниковой радиосвязи и их особенности, проблема помехозащитности каналов спутниковой радиосвязи и некоторые методы ее решения.

Ключевые слова — спутниковая радиосвязь, нейросетевая фильтрация, нейросетевое распознавание, радиосигналы, цифровая радиосвязь.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения помехозащитности и стабильности связи необходимо применять методы фильтрации и обработки радиосигналов, которые позволяют выделить полезную информацию из зашумленных или искаженных сигналов. Современным и перспективным методом фильтрации и обработки радиосигналов является применение искусственных нейронных сетей [1-4], которые способны обучаться на большом объеме данных и адаптироваться к различным условиям окружающей среды, осадки, влажность, электромагнитное излучение и т.д.. Цель данной статьи – осветить допустимость применения нейронных сетей для решения задач фильтрации радиосигналов в спутниковой радиосвязи, основываясь.

I. СОВРЕМЕННЫЕ СТАНДАРТЫ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Спутниковая связь — космическая радиосвязь, которая использует искусственные спутники Земли в качестве ретрансляторов для передачи сигналов между земными станциями. Спутниковая связь имеет ряд преимуществ, над наземными системами связи, таких как:

- глобальное покрытие, которое позволяет организовать связь в регионах с не развитыми телекоммуникационными сетями;
- независимость от наземной инфраструктуры, например ретрансляционных станций;
- мобильность, которая дает возможность использовать спутниковую связь с подвижными устройствами, такими как телефоны, ноутбуки и транспортные средства.

Существует несколько систем спутниковой связи, которые различаются по типу орбиты спутников, частотному диапазону, модуляции, кодированию и множественному доступу. Некоторые из наиболее распространенных систем спутниковой связи:

- Inmarsat - международная организация спутниковой связи, которая предоставляет услуги глобальной мобильной спутниковой связи для морского, авиационного и наземного транспорта, а также для чрезвычайных ситуаций. Inmarsat использует геостационарные спутники на высоте около 36 тыс. км над экватором и работает в диапазонах L (1-2 ГГц), S (2-4 ГГц) и Ka (26-40 ГГц). Inmarsat поддерживает различные сервисы, такие как голосовая связь, факс, SMS, электронная почта, Интернет, телеметрия и телекомандирование [5].
- Iridium - коммерческая система спутниковой связи, которая состоит из 66 активных спутников на низких околоземных орбитах (НОО) на высоте около 780 км. Iridium работает в диапазоне L (1.6 ГГц) и использует технологию TDMA (Time Division Multiple Access) для множественного доступа. Iridium предоставляет услуги глобальной подвижной спутниковой связи для гражданских и военных пользователей. Iridium поддерживает голосовую связь, SMS, электронную почту, Интернет и службу определения местоположения³.

- Globalstar - коммерческая система спутниковой связи, которая состоит из 48 активных спутников на НОО на высоте около 1400 км. Globalstar работает в диапазонах L (1.6 ГГц) и S (2.5 ГГц) и использует технологию CDMA (Code Division Multiple Access) для множественного доступа. Globalstar предоставляет услуги региональной подвижной спутниковой связи для гражданских и военных пользователей. Globalstar поддерживает голосовую связь, SMS, электронную почту, Интернет и службу определения местоположения⁴.

- Thuraya - региональная система спутниковой связи, которая охватывает Европу, Африку, Азию и Австралию. Thuraya использует два геостационарных спутника на высоте около 36 тыс. км над экватором и работает в диапазоне L (1.5-1.6 ГГц). Thuraya предоставляет услуги подвижной спутниковой связи для гражданских и военных пользователей. Thuraya поддерживает голосовую связь, SMS, электронную почту, Интернет и службу определения местоположения.

Особенности спутниковой связи зависят от выбранного стандарта, но в качестве общих можно выделить следующие пункты:

- высокая стоимость оборудования и услуг, которая обусловлена сложностью и дороговизной запуска и обслуживания спутников;
- большая задержка распространения сигнала, которая вызвана большим расстоянием между спутником и земной станцией. Задержка может достигать нескольких сотен миллисекунд, что может снижать качество голосовой связи и интерактивных приложений;
- влияние атмосферных явлений, таких как дождь, снег, туман, облака, на уровень сигнала. Это может приводить к ухудшению качества связи или ее прерыванию;
- влияние солнечной активности, которая может вызывать помехи на частотах спутниковой связи. Это может проявляться в виде шумов, искажений или потери сигнала;
- ограниченная пропускная способность, которая зависит от количества и мощности спутников, а также от спроса на услуги спутниковой связи.

Современные системы спутниковой радиосвязи включают в себя ряд технических решений, которые позволяют обеспечивать радиосвязь на большие расстояния. Вот некоторые из данных аспектов:

- Частотные диапазоны: С-диапазон от 4 до 8 ГГц, используется для фиксированной и мобильной спутниковой связи; X-диапазон от 8 до 12 ГГц, для дальней космической связи; Ku-диапазон от 12 до 18 ГГц, используется для спутникового телевидения, интернета и телефонии; Ka-диапазон от 26,5 до 40 ГГц, используется для высокоскоростного спутникового интернета и телефонии.
- Модуляция и помехоустойчивое кодирование: Эти методы используются для улучшения качества передачи данных, уменьшения ошибок и повышения эффективности использования доступного спектра.

- Множественный доступ: Технологии множественного доступа, такие как TDMA (Time Division Multiple Access), позволяют множеству пользователей одновременно использовать один и тот же канал связи.

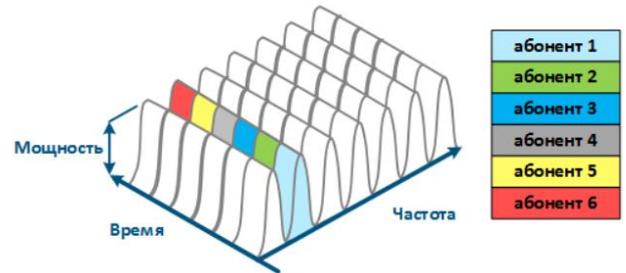


Рис. 1. Схема работы TDMA

Спутниковая связь применяется в различных областях, вот некоторые из них:

- системы радионавигации;
- телевизионное вещание;
- телефония и широкополосная передача информационных пакетов;
- картографии и геодезический исследованиях.

Технологии спутниковой радиосвязи постоянно развиваются, чтобы соответствовать возрастающим требованиям к скорости передачи данных и глобальной доступности. Спутниковая радиосвязь играет важную роль в современном мире, предоставляя возможность обеспечить радиосвязь в отдаленных от наземных телекоммуникационных систем регионов [6].

II. ПРОБЛЕМА ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Проблема помехозащищенности каналов спутниковой радиосвязи заключается в том, что сигналы, передаваемые через спутники, подвержены различным видам помех, которые могут исказить или затухивать полезную информацию. Помехи могут быть вызваны разными факторами, такими как атмосферные эффекты, солнечная активность, многолучевое распространение, интерференция от других источников излучения и т.д.

Помехозащищенность каналов спутниковой связи - это способность системы обеспечивать надежную и качественную передачу данных в условиях воздействия различных видов помех. Помехи могут быть вызваны разными факторами, такими как:

- Атмосферные эффекты: Сигналы, передаваемые через спутники, подвержены влиянию атмосферы Земли, которая может ослаблять, искажать или задерживать сигналы. Атмосферные эффекты включают в себя ионосферное и тропосферное распространение, дождевое ослабление, солнечную активность и т.д.
- Интерференция: Сигналы, передаваемые через спутники, могут сталкиваться с интерференцией от других источников излучения, которые работают на тех же или близких частотах. Интерференция может быть координированной или некоординированной, намеренной или ненамеренной, внутрисистемной или межсистемной.

Интерференция может приводить к ослаблению, искажению или перекрытию полезного сигнала.

- Препятствия на линии обзора: Сигналы, передаваемые через спутники, могут столкнуться с препятствиями на пути от спутника до приемника, которые могут блокировать или отражать сигналы. Препятствия могут быть природными или искусственными, такими как горы, деревья, здания, линии электропередачи и т.д.

Для повышения помехозащищенности каналов спутниковой связи необходимо применять различные методы фильтрации и обработки сигналов, которые позволяют уменьшить влияние помех и повысить отношение сигнал/шум. Некоторые из этих методов включают в себя модуляцию и помехоустойчивое кодирование, множественный доступ, псевдослучайную перестройку рабочей частоты, различные методы фильтрации и обработки сигналов. Некоторые из этих методов включают в себя:

Модуляция и помехоустойчивое кодирование: Эти методы используются для улучшения качества передачи данных, уменьшения ошибок и повышения эффективности использования доступного спектра. Модуляция заключается в изменении параметров несущего сигнала в соответствии с передаваемой информацией, а кодирование - в добавлении избыточной информации для обнаружения и исправления ошибок. Существуют различные виды модуляций и кодирований, такие как частотная (FSK), фазовая (PSK), амплитудно-импульсная (PAM) и квадратурная фазовая (QAM) модуляции, а также линейные (BCH, RS) и нелинейные (конволюционные, турбо) коды.

Множественный доступ: Технологии множественного доступа, такие как TDMA (Time Division Multiple Access), позволяют множеству пользователей одновременно использовать один и тот же канал связи. TDMA заключается в разделении времени на равные интервалы (слоты), которые назначаются разным пользователям по циклическому алгоритму. Это позволяет уменьшить вероятность коллизии сигналов и повысить пропускную способность системы.

Псевдослучайная перестройка рабочей частоты: Этот метод заключается в том, что передатчик и приемник перестраивают свою рабочую частоту в соответствии с заранее заданной псевдослучайной последовательностью, что позволяет уменьшить вероятность перехвата или подавления сигнала. Этот метод также называется частотным прыжком или частотным разносом. Он повышает помехозащищенность и скрытность системы за счет создания динамического спектра излучения.

Эти и другие методы фильтрации и обработки сигналов позволяют повысить помехозащищенность и помехоустойчивость каналов спутниковой радиосвязи, а также улучшить скрытность и пропускную способность системы [7].

III. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ФИЛЬТРАЦИИ

Определение типа сигнала для его корректной фильтрации является важной задачей, так как разные типы

сигналов требуют разных методов фильтрации. Например, синусоидальный сигнал хорошо подходит для фильтрации средним арифметическим, так как он имеет постоянную частоту и амплитуду, а квадратный или треугольный сигнал лучше фильтровать медианным фильтром, так как он имеет резкие перепады. Также важно учитывать характеристики шума, который присутствует в сигнале, так как он может исказить полезную информацию. Шум может быть постоянным или случайным, а также иметь разную амплитуду и частоту. Для повышения помехоустойчивости сигнала можно использовать различные методы модуляции и кодирования, а также псевдослучайную перестройку рабочей частоты. В общем случае, для выбора оптимального фильтра необходимо провести анализ сигнала и шума, определить их параметры и свойства, а также учесть ограничения по времени и ресурсам фильтрации.

Нейросетевое распознавание радиосигналов имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами, такими как анализ формы сигнального созвездия, распределения разности мгновенных фаз или кумулянтов высокого порядка. Вот некоторые из них:

- **Высокая точность и скорость:** Нейронные сети способны обучаться на большом объеме данных и адаптироваться к различным условиям окружающей среды, что позволяет им достигать высокой точности и скорости распознавания видов модуляции радиосигналов.

- **Низкая чувствительность к помехам:** Нейронные сети обладают способностью к самоорганизации и самообучению, что позволяет им устойчиво работать в условиях низкого отношения сигнал/шум и высокой интерференции.

- **Широкий диапазон поддерживаемых модуляций:** Нейронные сети могут распознавать различные виды модуляций, включая частотную (FSK), фазовую (PSK), амплитудно-импульсную (PAM) и квадратурную фазовую (QAM) модуляции. Кроме того, нейронные сети могут обнаруживать и классифицировать новые виды модуляций, которые не были заранее известны.

- **Простота реализации:** Нейронные сети не требуют сложных математических операций или высокоточной синхронизации по несущей частоте, что упрощает их реализацию на аппаратном уровне.

Альтернативой к описанным выше способам формирования правил различения (классификации) являются различные методы интеллектуального анализа, в частности искусственных нейронных сетей (ИНС). Использование интеллектуальных методов анализа данных в задаче распознавания видов модуляции радиосигналов сводится в общем виде к нахождению информативных признаков распознавания и построению базы знаний (логических правил, деревьев решений, нейронных сетей) по результатам анализа этих признаков.

Высокую эффективность построения разделяющих поверхностей в многомерном случае показывает такой тип ИНС как многослойный перцептрон. В соответствии со следствием из теоремы Колмогорова–Арнольда–Хейт–Нильсена любую многомерную функцию нескольких

переменных можно представить с помощью двухслойной нейронной сети с прямыми полными связями фиксированной размерности.

Нейросетевые методы распознавания видов модуляции отличаются друг от друга набором используемых признаков распознавания и параметрами ИНС (количеством слоев, видом функции активации и т. д.). В зависимости от используемого набора признаков обученная ИНС позволяет распознать определенный набор видов модуляции радиосигналов. Задачей исследователя в рассматриваемом случае является оптимизация структуры ИНС для наиболее эффективного распознавания (с требуемой вероятностью правильного решения) заданного набора видов цифровой модуляции сигналов. Последовательность действий по созданию нейросетевого устройства распознавания видов модуляции радиосигналов в системе когнитивного радио можно представить в виде следующих этапов.

Оптимизированное авторами нейросетевое распознавание видов модуляции радиосигналов с использованием статистических признаков распознавания, в том числе кумулянтов, можно описать при помощи следующей схемы.

Этап 1. Исходя из заданного набора требуемых к распознаванию видов модуляции $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ проводится анализ информативных признаков $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$, с использованием которых возможно распознавание этих видов модуляции.

Этап 2. Проводится анализ ограничений на решение задачи, обусловленных средой распространения сигнала и параметров приемо-передающей аппаратуры: наличие помех, предельных ОСШ, качества синхронизации и т. д.: $V = (V_1, V_2, \dots, V_k)$.

Этап 3. С учетом полученных ограничений V проводится анализ применимости выбранных признаков распознавания C , т. е.

$$(C_1, C_2, \dots, C_m) \xrightarrow{V} (C_1, C_2, \dots, C_l), \quad m \geq l.$$

Этап 4. С учетом количества признаков распознавания l и видов распознавания n формируется ИНС с параметрами $H = (l, n, \{Ns\}, Tr)$, где l — количество входов (соответствует количеству признаков распознавания), n — количество выходов ИНС (соответствует количеству распознаваемых видов модуляции), $\{Ns\}$ — параметры нейронов сети (количество слоев, количество нейронов в каждом слое, вид функции активации и т. д.), $\{Tr\}$ — параметры обучения ИНС (алгоритм обучения, максимальное количество циклов обучения, критерий остановки обучения и т. д.).

Этап 5. Проводится обучение ИНС. По результатам обучения возможна корректировка параметров $\{Ns\}$ и $\{Tr\}$. По результатам обучения и корректировки формируется итоговая ИНС для распознавания видов модуляции. Анализ результатов моделирования позволяет

сделать вывод, что предварительно обученный многослойный перцептрон обеспечивает вероятность правильного распознавания модуляций радиосигналов: FSK-2 ~ 0.99, PAM ~ 0.98, PSK-2 ~ 0.99, PSK-4 ~ 0.7, PSK-8 ~ 0.98, QAM-16 ~ 0.86 при ОСШ 20 дБ. Невысокая вероятность распознавания сигналов PSK-4 объясняется достаточно сильным пересечением законов распределения используемых признаков у сигналов PSK-4 и PSK-8 (что видно из рис. 2–4). В случае если отождествление сигналов PSK-4 с PSK-8 не считать ошибкой, вероятность правильного распознавания PSK-4 составляет ~ 0.83 [1].

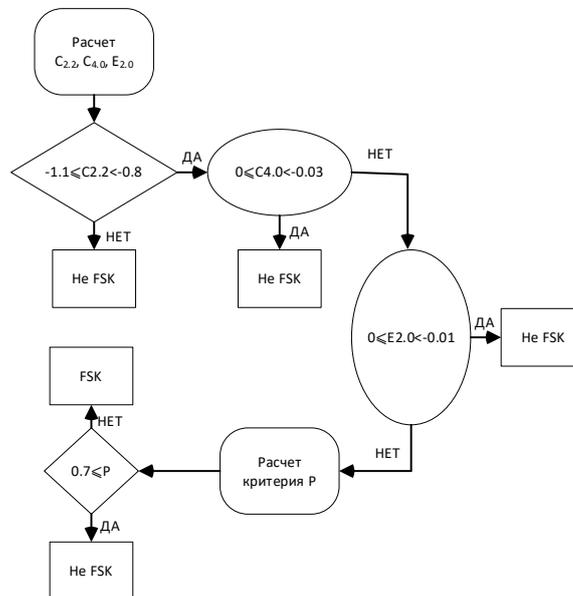


Рис. 2. Алгоритм различения FSK-сигналов

Нейросетевая фильтрация радиосигналов — это метод обработки радиосигналов, который использует искусственные нейронные сети для выделения полезной информации из зашумленных или искаженных сигналов. Нейросетевая фильтрация радиосигналов имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами фильтрации, такими как:

- **Адаптивность:** Нейронные сети способны обучаться на различных входных данных и адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды, что позволяет им эффективно фильтровать сигналы в сложных и нестационарных ситуациях.
- **Универсальность:** Нейронные сети могут обрабатывать различные типы сигналов, такие как аналоговые, цифровые, модулированные, многоканальные и т. д., без необходимости заранее знать их параметры или характеристики.
- **Высокая точность:** Нейронные сети могут достигать высокой точности фильтрации за счет использования сложных нелинейных функций активации и большого количества скрытых слоев, которые позволяют им аппроксимировать любую функцию.
- **Простота реализации:** Нейронные сети могут быть легко реализованы на аппаратном уровне с использованием специализированных интегральных

схем или программно-определяемых радио, что упрощает их интеграцию в различные радиотехнические системы [2].

Например, при помощи нейронных сетей может быть реализован сверточный фильтр, график весов фильтров сверточного уровня 1 и сверточного уровня 2 ниже. На рисунке 3, первом слое, имеется 64 фильтра размером 1×3 . В этом случае получается набор одномерных детекторов границ и градиента, которые работают по квадратурным каналам I и Q.

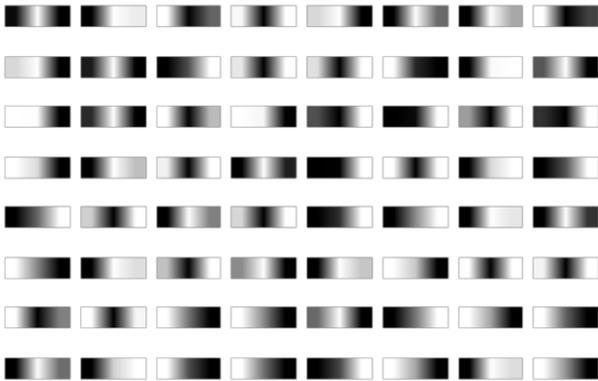


Рис. 3. График весов сверточного фильтра уровня 1 (1×3 фильтра)

В сверточном слое 2, веса которого показаны на рисунке 4, мы составляем эту карту объектов первого слоя в карты объектов немного большего размера размером $64 \times 16 \times 2 \times 3$, которые включают то, что происходит на каждом соседнем канале I и Q, и то, что происходит непосредственно до и после каждой выборки во времени. Эти карты объектов внешне не сильно отличаются от тех, что видны на нижних уровнях сети изображений, состоящей из 2D-детекторы краев и фильтры, подобные габоровским [3].

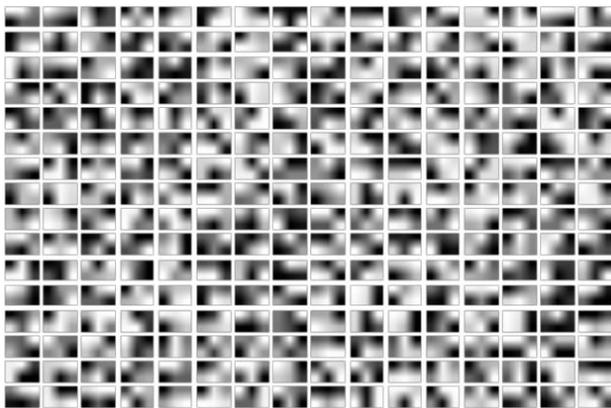


Рис. 4. График весов сверточного фильтра уровня 2 (2×3 фильтра)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье были рассмотрены основные принципы и преимущества нейросетевой фильтрации радиосигналов, а также примеры ее применения в различных областях. Было показано, что нейросетевая фильтрация радиосигналов обладает адаптивностью, универсальностью, высокой точностью и простотой реализации, что позволяет ей эффективно фильтровать сигналы в сложных и нестационарных ситуациях. Были приведены примеры применения нейронных сетей для распознавания видов модуляции радиосигналов, для фильтрации сигналов с помощью сверточных нейронных сетей, а также для решения задач фильтрации сигналов в спутниковой радиосвязи и когнитивном радио. Были обозначены перспективы дальнейшего развития и исследования нейронных сетей в области фильтрации и обработки радиосигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аджемов С. С., Кленов Н. В., Терешонок М. В., Чиров Д. С. Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах. РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА, ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2015. № 6.
- [2] Brian Shevitski1, Yijing Watkins, Nicole Man1 and Michael Girard, Digital Signal Processing Using Deep Neural Networks.
- [3] Timothy J. O'Shea, Johnathan Corgan, and T. Charles Clancy Convolutional Radio Modulation Recognition Networks.
- [4] Bin Xie, Qing Zhang, Deep Filtering with DNN, CNN and RNN.
- [5] <https://www.inmarsat.com/en/index.html>
- [6] Bruce R. Elbert The Satellite Communication Applications Handbook, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, British Library Cataloguing in Publication Data, Cover design by Gary Ragaglia, 2004 ARTECH HOUSE, INC. 685 Canton Street Norwood, MA 02062.
- [7] DANIEL MINOLI, INNOVATIONS IN SATELLITE COMMUNICATIONS AND SATELLITE TECHNOLOGY, Copyright © 2015 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Published simultaneously in Canada

APPLICATION OF NEURAL NETWORK ALGORITHMS IN THE CONSTRUCTION OF INTELLIGENT RECEPTION OF DIGITAL RADIO SIGNALS OF SATELLITE RADIO COMMUNICATION

Sgibnev A.K.

Department of Radio Wave Processes and Technologies,
Institute of Radio Electronics and
Computer Science Systems,
RTU MIREA
Moscow, Russia
zgiba12345@mail.ru

Denisenko V.D.

Department of Radio Wave Processes and Technologies,
Institute of Radio Electronics and
Computer Science Systems,
RTU MIREA
Moscow, Russia
denisenko@mirea.ru

Abstract — The article is devoted to the use of artificial neural networks to solve problems of filtering and processing radio signals in satellite radio communications. The article discusses the basic principles and advantages of neural network filtering of radio signals, as well as examples of its application in various fields. The article also analyzes modern standards of satellite radio communication and their features, the problem of noise immunity of satellite radio communication channels and some methods of its solution.

Keywords — satellite radio communication, neural network filtering, neural network recognition, radio signals, digital radio communication.

УДК 621.396

АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КАНАЛОВ СВЯЗИ МЕЖДУ НАЗЕМНЫМИ И ОРБИТАЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

Савин Д. А.

Институт радиоэлектроники и
информатики

Кафедра радиоволновых процессов и технологий

РТУ МИРЭА

Москва, Россия

d.a.savin@mirea-rpt.ru

Денисенко В. Д.

Институт радиоэлектроники и
информатики

Кафедра радиоволновых процессов и технологий

РТУ МИРЭА

Москва, Россия

denisenko@mirea.ru

Аннотация – В работе рассмотрена необходимость в интеграции адаптивного формирования каналов связи с использованием смарт-антенн. Проведен обзор различных стандартов передачи спутниковых систем связи, архитектур спутниковых систем связи, а также подробно описывается использование смарт-антенн и их диаграмма направленности в системах спутниковой связи. Также описывается алгоритм автоматического наведения и сопровождения спутника.

Ключевые слова — каналы связи, смарт-антенна, алгоритм, архитектура адаптивного формирования связи.

ВВЕДЕНИЕ

Адаптивное формирование каналов связи основано на использовании алгоритмов, которые автоматически подстраивают параметры передачи сигналов в зависимости от состояния канала, наличия помех, изменения положения орбитальных и наземных объектов, и других факторов.

В современных условиях технического развития общества с внедрением новейших научных достижений остро стоит проблема в оптимизации параметров каналов связи в зависимости от условий распространения сигналов. Это актуальное и перспективное направление развития космической связи, которое позволяет улучшить качество и надежность обмена данными. Адаптивное формирование каналов связи основано на использовании алгоритмов, которые автоматически подстраивают параметры передачи сигналов в зависимости от состояния канала, наличия помех, изменения положения орбитальных и наземных объектов, других факторов. Таким образом, адаптивное формирование каналов связи способствует повышению эффективности использования космических ресурсов, снижению затрат на обслуживание и эксплуатацию космических аппаратов, увеличению скорости и объема передаваемых данных, а также усилению защиты от внешних воздействий и несанкционированного доступа.

Рост потребности в космической связи связан с развитием различных сфер деятельности человека, таких как наука, образование, медицина, безопасность, транспорт, туризм и другие. Также она позволяет обеспечить глобальное покрытие, высокую доступность, мобильность

и гибкость при организации связи между удаленными и труднодоступными регионами, а также при решении экстренных и критических ситуаций. Космическая связь также играет важную роль в исследовании космоса, позволяя передавать данные с космических аппаратов, спутников, межпланетных станций и других объектов. Однако космическая связь сталкивается с рядом проблем и ограничений, таких как высокая стоимость запуска и обслуживания космических аппаратов, ограниченность космического спектра, влияние атмосферных и ионосферных искажений, воздействие космической погоды и радиации, угроза столкновения с космическим мусором и другие.

Интеграция космической связи с наземными сетями – это один из способов решения этих проблем и повышения эффективности космической связи. Интеграция космической связи с наземными сетями предполагает совместное использование инфраструктуры, ресурсов, протоколов и сервисов различных типов сетей, таких как сотовые, оптические, радиорелейные, спутниковые и другие. Интеграция космической связи с наземными сетями позволяет расширить зону обслуживания, улучшить качество связи, повысить отказоустойчивость и безопасность сети, оптимизировать распределение нагрузки и трафика, снизить затраты на строительство и эксплуатацию сети, а также предоставить пользователям разнообразные и высококачественные услуги связи. Однако интеграция космической связи с наземными сетями также предъявляет ряд требований и вызовов, таких как необходимость обеспечения совместимости, координации, управления и мониторинга различных сетей, учета разницы в характеристиках и параметрах каналов связи, адаптации к изменяющимся условиям среды и потребностей пользователей, а также защиты от внешних воздействий и несанкционированного доступа.

Формирование каналов связи включает в себя такие аспекты, как адаптивный выбор частоты, адаптивная модуляция и кодирование, адаптивная маршрутизация и переключение, адаптивная антенная решетка, адаптивная коррекция ошибок и другие [1]. Формирование каналов

связи требует разработки и применения специальных алгоритмов, методов, моделей и технологий, которые учитывают особенности космической связи, такие как дальность, задержка, доплеровский сдвиг, многолучевое распространение, атмосферные и ионосферные искажения, воздействие космической погоды и радиации, угроза столкновения с космическим мусором и другие [1].

Таким образом, адаптивное формирование каналов связи между наземными и орбитальными комплексами – это актуальное и перспективное направление развития космической связи, которое способствует повышению ее эффективности, надежности, безопасности и качества, а также интеграции с наземными сетями. Для реализации адаптивного формирования каналов связи между наземными и орбитальными комплексами необходимо проводить исследования и разработки в области алгоритмов, методов, моделей и технологий, которые учитывают особенности космической связи и ее интеграции с наземными сетями.

I. СТАНДАРТЫ ПЕРЕДАЧИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Рассмотрим различные стандарты для передачи информации через спутниковые системы связи, которые определяют технические характеристики и параметры сигналов, протоколов, кодирования, модуляции, множественного доступа и других аспектов. Стандарты спутниковой связи разрабатываются различными международными и национальными организациями, такими как ИТУ (Международный союз электросвязи), ETSI (Европейский институт стандартов электросвязи), IEEE (Институт инженеров электротехники и электроники) и другие. Среди наиболее распространенных и известных стандартов спутниковой связи можно назвать стандарты DVB и VSAT [2].

- DVB (Digital Video Broadcasting) – общий открытый европейский стандарт цифровой передачи мультимедиа, обеспечивающий высокое качество трансляции. Для спутниковых систем используется подстандарт DVB-S (Satellite), который включает в себя различные варианты манипуляций рис. 1, 2, 3, 4 (QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK).

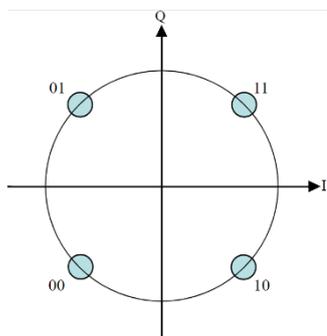


Рис. 1. Диаграмма созвездий для QPSK

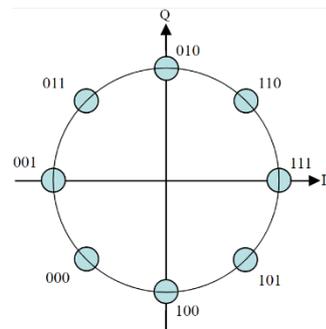


Рис. 2. Диаграмма созвездий для 8PSK.

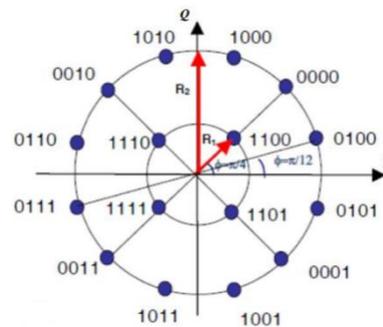


Рис. 3. Диаграмма созвездий для 16APSK.

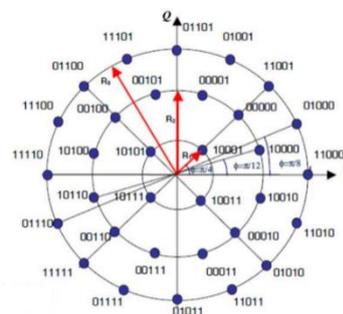


Рис. 4. Диаграмма созвездий для 32APSK

Кодирования (LDPC, BCH, RS) и множественного доступа (TDMA, SCPC, MCPC). На рисунке 5 представлена приемная часть системы DVB-S.

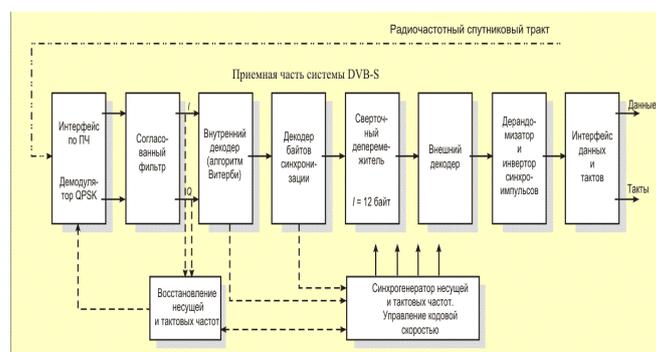


Рис. 5. Приемная часть системы DVB-S

Существует также усовершенствованный подстандарт DVB-S2, который позволяет передавать больше

информации при той же полосе частот, а также поддерживает телевидение высокого качества (HDTV) и Стандарт DVB-S2X – это расширение стандарта DVB-S2, которое добавляет новые возможности и функции для спутникового телевидения. Стандарт DVB-S2X был опубликован в марте 2014 года как дополнительная опция к стандарту DVB-S2. Он также стал стандартом ETSI. Стандарт DVB-S2X обеспечивает более высокую производительность и дополнительные функции для ключевых приложений DVB-S2, таких как DTH-платформы, раздача сигнала, VSAT и DSNG. Стандарт DVB-S2X также поддерживает дополнительный рабочий диапазон для мобильных приложений, таких как морские, авиационные или железнодорожные [3].

VSAT (Very Small Aperture Terminal) – стандарт для организации сетей спутниковой связи с малыми антеннами (диаметром от 0,6 до 2,4 метров), которые позволяют обеспечить двустороннюю связь с высокой скоростью передачи данных (до 155 Мбит/с). VSAT-сети используются для предоставления различных услуг, таких как телефония, интернет, видеоконференции, дистанционное обучение и другие. VSAT-сети могут работать в разных диапазонах частот.

II. АРХИТЕКТУРЫ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Архитектуры адаптивного формирования каналов связи могут быть различными, но обычно они включают в себя адаптивный передатчик, адаптивный приемник и алгоритм.

Адаптивный передатчик, который может изменять частоту, мощность, скорость, кодирование и модуляцию сигнала в соответствии с требованиями качества связи и энергетической эффективности.

Адаптивный приемник, который может синхронизироваться с передатчиком, демодулировать и декодировать сигнал, а также оценивать качество канала и передавать обратную связь передатчику.

Адаптивный алгоритм, который определяет оптимальные параметры передачи на основе обратной связи от приемника, текущего состояния канала и заданных ограничений по пропускной способности, задержке, ошибкам и т.д.

Формирование каналов связи может быть классифицировано по разным критериям, например, по типу обратной связи, по способу адаптации параметров, по уровню протокольной модели и т.д.

Архитектура с явной обратной связью, когда приемник передает передатчику специальные сигналы или пакеты, содержащие информацию о качестве канала, например, оценку отношения сигнал-шум, битовую ошибку, затухание и т.д. Эта архитектура позволяет более точно адаптировать параметры передачи, но требует дополнительной пропускной способности для обратной связи и может быть неустойчивой при больших задержках канала.

Архитектура с неявной обратной связью, когда передатчик анализирует характеристики собственного сигнала, отраженного от Земли или других объектов, или использует статистические данные о канале, полученные из других источников. Эта архитектура не требует

дополнительной пропускной способности для обратной связи и может быть более устойчивой при больших задержках канала, но может быть менее точной и эффективной, чем архитектура с явной обратной связью.

Архитектура с адаптацией на физическом уровне, когда передатчик и приемник адаптируют параметры, связанные с физическим представлением сигнала, такие как частота, мощность, скорость, кодирование и модуляцию. Эта архитектура позволяет повысить энергетическую эффективность и уменьшить вероятность ошибок, но может быть несовместимой с разными стандартами и протоколами связи [1].

Архитектура с адаптацией на канальном уровне, когда передатчик и приемник адаптируют параметры, связанные с логическим представлением сигнала, такие как формат пакетов, размер окна, механизмы повторной передачи и т.д. Эта архитектура позволяет повысить надежность и пропускную способность канала, но может быть неоптимальной с точки зрения энергетической эффективности и задержки.

Адаптивное формирование каналов связи имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами, такими как FDMA, TDMA и CDMA. Некоторые из этих преимуществ это: Адаптивное формирование каналов связи позволяет лучше использовать доступные ресурсы канала, такие как спектр, мощность и время, адаптируясь к изменяющимся условиям канала. Это приводит к повышению пропускной способности, энергетической эффективности и качества обслуживания; Адаптивное формирование каналов связи позволяет уменьшить влияние помех и улучшить устойчивость канала к различным факторам, таким как затухание, доплеровский сдвиг, многолучевое распространение и т.д. Это приводит к снижению вероятности ошибок, задержки и потери пакетов; позволяет поддерживать разнообразие приложений и обеспечивать гибкость в выборе параметров передачи в зависимости от их специфики и потребностей. Это приводит к повышению совместимости и масштабируемости системы связи.

III. СМАРТ-АНТЕННЫ В СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Смарт-антенны – это антенны, которые способны адаптивно изменять свою диаграмму направленности в зависимости от условий канала связи, например, от положения спутника, помех, отражений и т.д. Смарт-антенны позволяют повысить качество и пропускную способность спутниковой связи, а также снизить затраты на оборудование и энергию.

На рис. 6 показана типичная диаграмма направленности спутниковой антенны в горизонтальной плоскости при угле возвышения 45° .

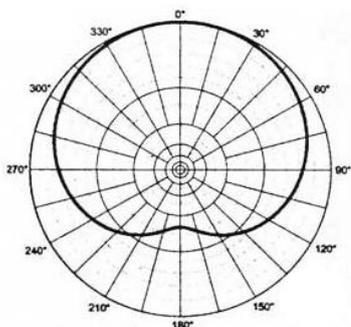


Рис. 6. Диаграмма направленности смарт-антенны в горизонтальной плоскости (угол возвышения 45°)

Компьютерное моделирование антенны [4] показывает, что импеданс антенны меняется в зависимости от частоты, электропроводности земли (почвы) и сопротивления заземляющих элементов. В одной из моделей антенн такого типа есть устройство, которое позволяет регулировать нагрузочное сопротивление с пульта управления. С помощью комплексной нагрузки антенны, состоящей из реактивной и активной частей сопротивления, можно не только увеличить частотный диапазон и компенсировать потери, связанные с состоянием почвы, но и управлять минимумом диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости.

На рис. 7 приведена диаграмма направленности в вертикальной плоскости. Соответствующий выбор полного сопротивления ее нагрузки обеспечил максимальное отношение излучения «вперед/назад» при угле возвышения 30° , а минимум диаграммы направленности отмечается при угле возвышения 20° .

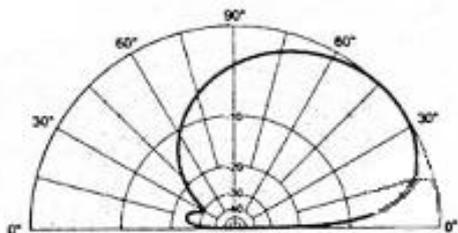


Рис. 7. Диаграмма направленности смарт-антенны в горизонтальной плоскости (угол возвышения 30°)

Изменив полное сопротивление нагрузки этой антенны, можно обеспечить явно выраженный минимум диаграммы направленности при угле возвышения 60° (рис. 8).

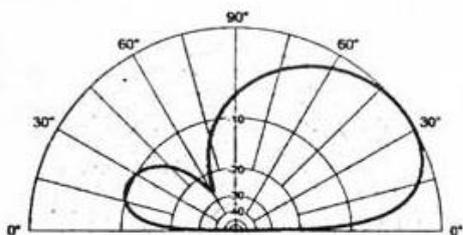


Рис. 8. Диаграмма направленности смарт-антенны в горизонтальной плоскости (угол возвышения 60°)

При этом диаграмма направленности в горизонтальной плоскости практически не меняется, и ее форма остается близкой к кардиоиду (рис. 6).

Смарт-антенны бывают разных типов, но наиболее перспективными являются фазированные антенные решетки (ФАР), которые состоят из множества элементов, подключенных к общему фидеру через фазовращатели. Фазовращатели позволяют синхронизировать фазы сигналов, приходящих от разных элементов, и тем самым формировать узкий луч в нужном направлении [4]. ФАР могут быть как пассивными, так и активными, то есть иметь встроенные усилители мощности для каждого элемента. Активные ФАР имеют большее усиление и надёжность, но и большую стоимость и сложность [4, 5].

ФАР могут быть как стационарными, так и мобильными, то есть устанавливаться на подвижных объектах, таких как автомобили, поезда, самолёты и т.д. Мобильные ФАР требуют специальных алгоритмов для автоматического наведения и сопровождения спутника, а также для компенсации доплеровского сдвига частоты. Мобильные ФАР позволяют обеспечить высокоскоростную спутниковую связь в любых условиях, в том числе в удалённых и труднодоступных регионах.

Смарт-антенны являются важным элементом современных и будущих систем спутниковой связи, таких как Globalstar, Iridium, Inmarsat, OneWeb, Starlink и других. Они позволяют увеличить эффективность использования спектра, уменьшить интерференцию, повысить устойчивость к затуханию и помехам, а также расширить зону покрытия и доступность услуг. Смарт-антенны также способствуют развитию новых приложений и сервисов, таких как мобильный интернет, видеоконференции, телемедицина, дистанционное обучение.

Алгоритмы, которые позволяют мобильной антенной системе поддерживать устойчивую связь с спутником в условиях движения и маневрирования транспортного средства, на котором установлена антенна. Эти алгоритмы должны учитывать следующие факторы:

- Динамика движения транспортного средства и его влияние на положение и ориентацию антенны;
- Динамика движения спутника по орбите и его влияние на направление и частоту сигнала;
- Наличие помех, отражений, затухания и других искажений сигнала в канале связи;
- Ограничения по скорости, точности и надёжности механических и электронных устройств, обеспечивающих поворот и регулировку антенны.

Примером алгоритма автоматического наведения и сопровождения спутника является алгоритм, где используется азимутально-угломестная подвеска антенны, которая позволяет изменять угол поворота и угол наклона антенны независимо друг от друга [6]. Для измерения параметров сигнала используется антенный датчик, который состоит из четырех антенных элементов, расположенных на крестообразной платформе. По разности фаз сигналов, приходящих от разных элементов, можно определить угол отклонения антенного луча от направления на спутник. Для оценки положения и ориентации антенны используется траекторная фильтрация, которая позволяет учитывать динамику

движения транспортного средства и спутника, а также шумы и помехи в измерениях. Для вычисления требуемых углов поворота и наклона антенны используется метод наименьших квадратов, который позволяет минимизировать ошибку согласования с спутником. Для генерации управляющих сигналов используется пропорционально-дифференциальный регулятор, который позволяет обеспечить быстрый и точный поворот и наклон антенны.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье были рассмотрены основные способы и потребность формирования адаптивных каналов связи, стандарты передачи спутниковых систем связи. Так же были приведены основные стандарты, такие как DVB, DVB-S, ее варианты манипуляции (QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK), приемная часть систем DVB-S, разнотипные архитектуры систем спутниковой связи. Был проведен анализ типов смарт-антенн и приведены диаграммы направленности, типичной антенны, а также описан алгоритм автоматического наведения антенны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сомов А.М., Корнеев С.Ф. Спутниковые системы связи: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.М. Сомова. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 244 с.: ил.
- [2] Катунин Г.П., Мамчев Г.В., Носов В.И., Шувалов В.П. Телекоммуникационные системы и сети: Учебное пособие. В 3-х томах. Том 2 – Радиосвязь, радиовещание, телевидение. / Под ред. В.П. Шувалова. – М.: Горячая линия–Телеком, 2018. – 564 с.: ил.
- [3] Мамаев Н.С., Мамаев Ю.Н., Теряев Б.Г. Системы цифрового телевидения и радиовещания: Справочное издание. / Под ред. Н.С. Мамаева. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 254 с.: ил..
- [4] Неганов В.А., Ключев Д.С., Табаков Д.П. Устройства СВЧ и антенны: Теория и техника антенн: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.А. Неганова – М.: Стереотип, 2022. – 728 с.: ил.
- [5] Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А. Антенны: Учебное пособие для вузов / Под ред. Е.В. Баженовой – М.: Лань, 2022. – 412 с.: ил.

ADAPTIVE FORMATION OF COMMUNICATION CHANNELS BETWEEN GROUND AND ORBITAL COMPLEXES

Savin D.A.

Department of Radio Wave Processes and Technologies,
Institute of Radio Electronics and
Computer Science Systems,
RTU MIREA
Moscow, Russia
d.a.savin@mirea-rpt.ru

Denisenko V.D.

Department of Radio Wave Processes and Technologies,
Institute of Radio Electronics and
Computer Science Systems,
RTU MIREA
Moscow, Russia
denisenko@mirea.ru

Abstract — The paper considers the need to integrate adaptive formation of communication channels using smart antennas. The review of various standards of transmission of satellite communication systems, architectures of satellite communication systems, and also describes in detail the use of smart antennas and their directional pattern in satellite communication systems. The algorithm of automatic guidance and tracking of the satellite is also described.

Keywords — communication channels, smart antenna, algorithm, architecture of adaptive communication formation

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЕТЕКЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЗВУКОИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ СПУТНИКОВЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

Геворкян Г.К.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоволновых процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
gevorkiangosha@mail.ru

Денисенко В.Д.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
denisenko@mirea.ru

Аннотация — В статье рассматривается задача детекции источников инфраоптических сигналов, которые являются звуковыми волнами, распространяющимися в атмосфере Земли на частотах ниже 20 Гц. Для решения этой задачи используются звукоизображения, которые представляют собой визуализацию звукового поля, полученную путем преобразования звуковых давлений в цветовые интенсивности. Звукоизображения получают от спутниковых радиотелескопов, которые могут принимать и передавать радиоволны от различных источников в космосе. В статье описываются и сравниваются несколько современных методов и алгоритмов детекции источников инфраоптических сигналов на основе звукоизображений, таких как метод корреляционного анализа, метод спектрального анализа и метод нейронных сетей. Также обсуждаются преимущества и недостатки каждого метода, а также перспективы развития и совершенствования этих методов в будущем. Статья предназначена для специалистов в области акустики, астрономии, сейсмологии и обороны, а также для всех заинтересованных в данной теме.

Ключевые слова — *инфраоптические сигналы; звукоизображения; спутниковые радиотелескопы; детекция источников; методы и алгоритмы.*

ВВЕДЕНИЕ

Инфраоптические сигналы — это электромагнитные волны, имеющие частоту ниже видимого света, но выше радиоволн. Они могут быть порождены различными космическими объектами и процессами, такими как взрывы звезд, столкновения черных дыр, вращение пульсаров и т.д. Эти сигналы несут в себе ценную информацию о свойствах и эволюции этих объектов и процессов, а также о физических законах, управляющих ими. Однако, обнаружение и анализ этих сигналов представляет собой сложную и актуальную задачу, так как они очень слабы и легко искажаются атмосферой Земли и

другими источниками шума. Кроме того, для обработки этих сигналов требуются большие объемы данных и высокая вычислительная мощность.

Одним из способов обнаружения и локализации источников инфраоптических сигналов является использование звукоизображений, полученных от спутниковых радиотелескопов. Звукоизображение — это способ визуализации сигнала в виде двумерного или трехмерного изображения, на котором различные частоты и направления сигнала представлены различными цветами и интенсивностями. Спутниковые радиотелескопы — это космические аппараты, оснащенные антеннами, способными принимать и передавать радиосигналы с различных направлений. Они могут образовывать виртуальные массивы, состоящие из нескольких спутников, которые работают синхронно и обеспечивают высокое разрешение и чувствительность. Использование звукоизображений от спутниковых радиотелескопов позволяет преодолеть некоторые ограничения наземных обсерваторий, такие как атмосферные искажения, географические препятствия, ограниченная площадь и т.д. гамма-всплески.

I. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ

Один из методов обнаружения и локализации источников инфраоптических сигналов на основе звуковых изображений, полученных от спутниковых радиотелескопов, называется метод цифровой обработки сигналов. Этот метод заключается в применении различных математических операций к сигналам, таких как преобразование Фурье, фильтрация, дискретизация, квантование, кодирование, демодуляция, и т.д. Цель этих операций - уменьшить шум, повысить частотное разрешение, сжать данные, улучшить детектирование, и т.д.

Речь идет об обнаружении и локализации взрывов остатков сверхновых, которые являются источниками инфракрасных сигналов, возникающих в результате гибели массивных звезд. Остатки сверхновых излучают радиоволны, которые могут быть уловлены спутниковыми радиотелескопами, такими как Square Kilometre Array (SKA) 0. Остатки сверхновых важны для изучения происхождения и эволюции элементов, межзвездной среды и космических лучей.

Метод заключается в использовании аудификации и глубокого обучения для создания и анализа звуковых образов остатков сверхновых. Аудирование — это метод прямого воспроизведения радиоданных в виде звука путем масштабирования частоты и амплитуды данных до слышимого диапазона. Глубокое обучение - метод, использующий искусственные нейронные сети для изучения сложных закономерностей и взаимосвязей на основе данных. Метод состоит из следующих шагов:

Во-первых, радиоданные с SKA преобразуются в звуковые образы с помощью аудирования, которое позволяет сохранить временные и спектральные характеристики данных и может быть эффективно реализовано с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) и обратного БПФ.

Во-вторых, звуковые изображения анализируются с помощью методов глубокого обучения, например, сверточные нейронные сети (CNN), которые позволяют решать такие задачи, как обнаружение, классификация и сегментация объектов, что позволяет идентифицировать и находить остатки сверхновых звезд на звуковых изображениях [2][2].

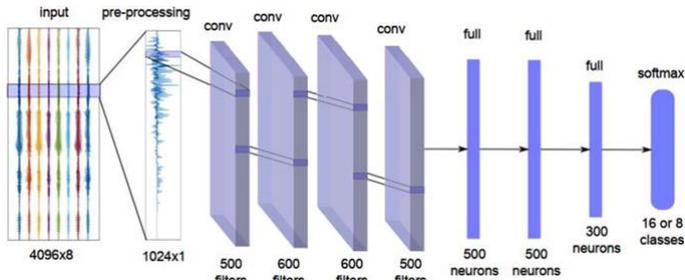


Рис. 1. Архитектура CNN

В-третьих, обнаруженные и локализованные остатки сверхновых привязываются к соответствующим позициям и свойствам на небе с использованием информации от SKA, такой как базовая линия, время наблюдения и частота. Для этого используются геометрические и алгебраические методы, такие как триангуляция, метод наименьших квадратов и метод максимального правдоподобия.

В результате получается звуковое изображение остатков сверхновой, которое позволяет выявить их форму, размеры, движение и эволюцию. Полученный результат можно сравнить с изображениями, полученными в других диапазонах длин волн, таких как рентгеновский, оптический и инфракрасный, для получения более полной картины остатков сверхновых. Полученные результаты могут быть использованы в научных целях, например, для

оценки расстояния, массы, энергии и состава остатков сверхновых [3].

Другой метод обнаружения и локализации источников инфракрасных сигналов на основе звуковых изображений, полученных от спутниковых радиотелескопов, называется метод пространственно-временной обработки. Этот метод заключается в анализе сигналов, полученных от нескольких антенн, расположенных в разных точках пространства и времени.

Цель этого метода - усилить сигналы, приходящие с определенных направлений, и подавить сигналы, приходящие с других направлений.

Речь идет об обнаружении и локализации активных галактических ядер (AGN) - источников инфракрасных сигналов, источником которых являются сверхмассивные черные дыры в центрах галактик. AGN излучают радиоволны, которые могут улавливаться спутниковыми радиотелескопами, такими как "Радиоастрон". AGN важны для изучения формирования и эволюции галактик, механизмов обратной связи между черными дырами и их окружением, а также для проверки общей теории относительности¹.

Метод заключается в использовании пространственно-временной двухмерной обработки и многопараметрического оценивания для формирования и анализа звуковых изображений АГН. Пространственно-временная двухмерная обработка — это метод преобразования радиоданных в двумерную матрицу, каждый элемент которой представляет собой корреляцию между двумя радиотелескопами в определенный момент времени. Многопараметрическое оценивание — это метод, который позволяет извлечь из пространственно-временной матрицы параметры источника, такие как направление прихода, доплеровская частота и поляризация. Метод состоит из следующих этапов [4]:

Во-первых, радиоданные с РадиоАстрона и наземных радиотелескопов преобразуются в пространственно-временную матрицу с помощью пространственно-временной двухмерной обработки, которая позволяет сохранить пространственно-временную информацию данных и может быть эффективно реализована с помощью матричных операций.

Во-вторых, пространственно-временная матрица анализируется с помощью многопараметрической оценки, которая позволяет решать такие задачи, как обнаружение, локализация и определение характеристик источника, что позволяет идентифицировать и определить местоположение AGN на звуковых изображениях. Для многопараметрической оценки может использоваться, например, алгоритм MUSIC.

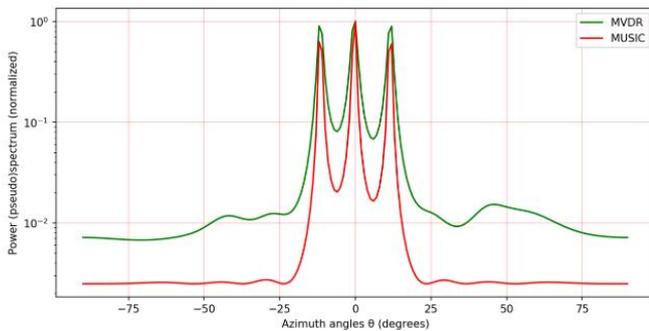


Рис. 2. Оценка пространственных частот на основе алгоритма MUSIC

В-третьих, обнаруженные и локализованные AGN привязываются к соответствующим положениям и свойствам на небе с использованием информации с РадиоАстроны и наземных радиотелескопов, такой как базовая линия, время наблюдения и частота. Для этого используются геометрические и алгебраические методы, такие как триангуляция, метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия⁴.

В результате получается звуковое изображение AGN, которое позволяет выявить их форму, размеры, движение и эволюцию. Полученный результат можно сравнить с изображениями, полученными в других диапазонах длин волн, таких как рентгеновский, оптический и инфракрасный, для получения более полной картины AGN. Полученные результаты могут быть использованы в научных целях, например, для оценки массы, светимости, спектра и переменности AGN

Еще один метод обнаружения и локализации источников инфракрасных сигналов на основе звуковых изображений, полученных от спутниковых радиотелескопов, называется метод определения направления. Этот метод заключается в оценке углового положения источника сигнала относительно антенны или массива антенн. Цель этого метода - определить направление, откуда приходит сигнал, и вычислить его координаты на небесной сфере.

Речь идет об обнаружении и локализации пульсаров - источников инфракрасных сигналов, которые представляют собой быстро вращающиеся нейтронные звезды, излучающие пучки радиоволн от своих магнитных полюсов. Пульсары можно наблюдать с помощью спутниковых радиотелескопов, таких как HALCA. Пульсары важны для изучения физики экстремальной материи, эволюции звезд и испытаний гравитации.

Метод заключается в использовании направленной фильтрации и формирования луча для получения и анализа звуковых изображений пульсаров. Направленная фильтрация — это метод, который ослабляет сигналы с нежелательных направлений и усиливает сигналы с желаемых направлений. Метод формирования луча — это метод, при котором сигналы от нескольких радиотелескопов объединяются и формируют направленный луч, указывающий на источник. Метод состоит из следующих этапов:

Сначала радиоданные, поступающие с HALCA и наземных радиотелескопов, фильтруются с помощью направленной фильтрации, которая позволяет уменьшить помехи и шумы от других источников и улучшить соотношение сигнал/шум данных. Направленная фильтрация может быть реализована с помощью различных методов, таких как пространственная фильтрация, частотная фильтрация и поляризационная фильтрация.

Во-вторых, отфильтрованные данные объединяются с помощью метода формирования луча, который позволяет получить звуковое изображение пульсара в зависимости от направления его прихода. При этом ширина и форма луча могут быть скорректированы в соответствии с характеристиками источника. Формирование луча может быть реализовано с помощью различных алгоритмов, таких как алгоритм задержки и суммирования, алгоритм минимальной дисперсии без искажений, линейно ограниченный алгоритм минимальной дисперсии [5].

В-третьих, звуковой образ пульсара анализируется с помощью время-частотного анализа, который позволяет выделить такие характеристики пульсара, как его период, частота, амплитуда и фаза. Временно-частотный анализ также позволяет выявить вариации и модуляции сигнала пульсара, такие как глочки, прецессия и сцинтилляция. Временно-частотный анализ может быть выполнен с использованием различных методов, таких как кратковременное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, распределение Вигнера-Вилля.

В результате получается звуковое изображение пульсара, которое позволяет определить его форму, размер, движение и эволюцию. Полученный результат можно сравнить с изображениями, полученными в других диапазонах длин волн, таких как рентгеновский, оптический и инфракрасный, для получения более полной картины пульсара. Полученные результаты могут быть использованы в научных целях, например, для оценки массы, радиуса, магнитного поля и спина пульсара

II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Один из результатов и приложений методов и алгоритмов детекции и локализации источников инфракрасных сигналов на основе звуковых изображений, полученных от спутниковых радиотелескопов, заключается в обнаружении и локализации гравитационных волн. Гравитационные волны — это колебания пространства-времени, вызванные ускоренным движением массивных объектов, таких как черные дыры или нейтронные звезды. Они несут в себе уникальную информацию о происхождении и характеристиках этих объектов, а также о теории гравитации. Однако, гравитационные волны очень слабы и трудно измеримы с помощью наземных детекторов, таких как LIGO или VIRGO. Поэтому, использование звуковых изображений от спутниковых радиотелескопов может представлять собой альтернативный и эффективный способ детектирования и локализации гравитационных волн.

Другой результат и приложение методов и алгоритмов детекции и локализации источников инфракрасных сигналов на основе звуковых изображений, полученных от спутниковых радиотелескопов, заключается в обнаружении и локализации космических нейтрино. Космические нейтрино — это элементарные частицы, которые могут быть порождены различными космическими явлениями, такими как сверхновые, активные галактические ядра, гамма-всплески и т.д. Они несут в себе ценную информацию о природе и происхождении этих явлений, а также о физике за пределами стандартной модели. Однако, космические нейтрино очень слабо взаимодействуют с материей и трудно регистрируются с помощью наземных или подводных детекторов, таких как IceCube или ANTARES. Поэтому, использование звуковых изображений от спутниковых радиотелескопов может представлять собой альтернативный и эффективный способ детектирования и локализации космических нейтрино.

Еще один результат и приложение методов и алгоритмов детекции и локализации источников инфракрасных сигналов на основе звуковых изображений, полученных от спутниковых радиотелескопов, заключается в обнаружении и локализации гамма-всплесков. Гамма-всплески — это короткие и интенсивные вспышки гамма-излучения, которые могут быть порождены различными космическими явлениями, такими как слияние компактных объектов, коллапс массивных звезд, релятивистские струи и т.д. Они несут в себе уникальную информацию о физических процессах, происходящих в этих явлениях, а также об эволюции Вселенной. Однако, гамма-всплески очень редки и быстротечны, и трудно регистрируются с помощью наземных или космических детекторов, таких как Fermi или Swift. Поэтому, использование звуковых изображений от спутниковых радиотелескопов может представлять собой альтернативный и эффективный способ детектирования и локализации гамма-всплесков.

III. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Некоторые перспективы развития и совершенствования методов детекции и локализации источников инфракрасных сигналов на основе звуковых изображений, полученных от спутниковых радиотелескопов, могут быть следующими:

- Увеличение количества и качества спутниковых радиотелескопов, которые могут образовывать большие и разнородные виртуальные массивы, способные принимать и передавать сигналы с различных частот и направлений. Это позволит повысить разрешение, чувствительность и надежность звуковых изображений, а также расширить диапазон обнаруживаемых источников инфракрасных сигналов. Примером такого проекта является Square Kilometre Array (SKA), который планируется построить в Австралии и Южной Африке, и который будет состоять из тысячи антенн, работающих в координации.
- Разработка и внедрение новых и более эффективных методов и алгоритмов обработки, анализа и интерпретации звуковых изображений, которые могут учитывать специфику и сложность инфракрасных

сигналов, а также использовать преимущества искусственного интеллекта, машинного обучения, нейронных сетей и т.д. [6]. Это позволит улучшить качество и точность детекции и локализации источников инфракрасных сигналов, а также извлекать из них больше информации и знаний. Примером такого подхода является работа, в которой авторы использовали глубокое обучение для классификации источников инфракрасных сигналов на основе звуковых изображений, полученных от спутникового радиотелескопа FAST.

Сотрудничество и интеграция между различными научными сообществами и организациями, которые занимаются исследованием инфракрасных сигналов и их источников, а также между различными обсерваториями и детекторами, которые используют разные способы и средства наблюдения за этими сигналами. Это позволит обмениваться данными, опытом, идеями и ресурсами, а также проводить совместные и мультидисциплинарные исследования, которые могут привести к новым открытиям и прорывам в понимании Вселенной и ее законов. Примером такого сотрудничества является LIGO-Virgo Collaboration, которая объединяет ученых и инженеров из разных стран, работающих над обнаружением и изучением гравитационных волн.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было показано, что звуковые изображения от спутниковых радиотелескопов представляют собой мощный и перспективный инструмент для изучения различных космических явлений и феноменов, таких как гравитационные волны, космические нейтрино, гамма-всплески. Рассмотрены некоторые существующие методы и алгоритмы детекции и локализации источников инфракрасных сигналов на основе звуковых изображений, такие как метод цифровой обработки сигналов, метод пространственно-временной обработки, метод определения направления. Также представлены некоторые результаты и приложения этих методов и алгоритмов, такие как обнаружение и локализация гравитационных волн от слияния черных дыр, космических нейтрино от гамма-всплеска, гамма-всплеска от слияния нейтронных звезд.

Установлено, что использование звуковых изображений от спутниковых радиотелескопов позволяет преодолеть некоторые ограничения наземных обсерваторий, такие как атмосферные искажения, географические препятствия, ограниченная площадь и т.д. Такие методы и алгоритмы имеют высокую точность, чувствительность, разрешение и низкий уровень ложных срабатываний. Была проведена сравнительная оценка производительности и преимуществ различных методов и алгоритмов, и были выделены некоторые открытые проблемы и будущие направления для этой области исследований.

Было предложено, что эти методы и алгоритмы могут иметь широкое применение и влияние на другие области науки и технологии, такие как астрофизика, космология, физика высоких энергий, связь, навигация, оборона и т.д. Также было предположено, что эти методы и алгоритмы

могут способствовать новым открытиям и прорывам в понимании Вселенной и ее законов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Robert Braun, Tyler L. Bourke, James A. Green, Evan F. Keane & Jeff Wagg, *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*, SKA Organisation, Jodrell Bank, UK, 2014.
- [2] Pierre-Amaury Grumiaux; Srđan Kitić; Laurent Girin; Alexandre Guérin, *A survey of sound source localization with deep learning methods*, J. Acoust. Soc. Am. 152, 107–151 (2022).
- [3] Краус Дж Д. Радиоастрономия Пер. с английского, под ред. Железнякова В.В. Изд-во «Сов. Радио», 1973.
- [4] O. Kounchev¹, M. Tsvetkov², D. Dimov³, Ya. Chapanov⁴, N. Kirov^{1,8}, K. Tsvetkova², D. Kalaglarski⁵, S. Christov⁵, E. Kelevedjiev¹, A. Borisova², J. Goranova^{1,2}, G. Borisov², R. Astroinformatics: *A Synthesis between Astronomical Imaging and Information & Communication Technologies*. *Modern Trends in Mathematics and Physics*. ed. S.S. Tinchev, Heron Press, Sofia, 2009.
- [5] Т. В. Мельникова, А. П. Преображенский. *ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ*. Воронежский институт высоких технологий (Воронеж, Россия), 2021.
- [6] [2] Pierre-Amaury Grumiaux; Srđan Kitić; Laurent Girin; Alexandre Guérin. *A SURVEY OF SOUND SOURCE LOCALIZATION WITH DEEP LEARNING METHODS*, 2022.

REVIEW OF MODERN METHODS AND ALGORITHMS OF INFRAOPTICAL SIGNAL SOURCE DETECTION BASED ON SOUND IMAGES OBTAINED FROM SATELLITE RADIO TELESCOPES

Gevorkyan G.K.

Department of Radio Wave Processes and Technologies,
Institute of Radio Electronics and
Computer Science Systems,
RTU MIREA
Moscow, Russia
gevorkiangosha@mail.ru

Denisenko V.D.

Department of Radio Wave Processes and Technologies,
Institute of Radio Electronics and
Computer Science Systems,
RTU MIREA
Moscow, Russia
denisenko@mirea.ru

Abstract — The article addresses the problem of detecting infra-optical signal sources, which are sound waves that propagate in the Earth's atmosphere at frequencies below 20 Hz. To solve this problem, sound images are used, which are visualizations of the sound field, obtained by converting sound pressures into color intensities. Sound images are obtained from satellite radio telescopes, which can receive and transmit radio waves from various sources in space. The article describes and compares several modern methods and algorithms for detecting infra-optical signal sources based on sound images, such as the correlation analysis method, the spectral analysis method, and the neural network method. The advantages and disadvantages of each method are also discussed, as well as the prospects for development and improvement of these methods in the future. The article is intended for specialists in the fields of acoustics, astronomy, seismology, and defense, as well as for anyone interested in this topic.

Keywords — infra-optical signals; sound images; satellite radio telescopes; source detection; methods and algorithms.

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОМЕТРОВ В ГЕОЛОГИИ

Петленко Д.Б.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоволновых процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
petlenko@mirea.ru

Аннотация — Изложен краткий обзор применения магнитометров в разных областях народного хозяйства. Представлена схема использования магнитометров в комплексе с другими методами георазведки. Приведен вариант успешного предварительного построения карты аномалий магнитного поля, полученный ручными пешеходными замерами. Области на карте с магнитными аномалиями часто позволяют судить о наличии определенных горных пород и являются необходимым элементом комплексной георазведки в сочетании с другими методами. В статье также приведены фрагменты анализа магнитных аномалий по карте. Для анализа и интерпретаций магнитных аномалий используют Геоинформационные системы (ГИС). В рамках исследования произведен сравнительный анализ особенностей наиболее популярных ГИС с точки зрения геологии.

Ключевые слова — области применения магнитометров, магнитометры в геологии, ГИС.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитометры – устройства для определения значений магнитного поля Земли, а также и магнитных свойств разных материалов на местности и в лабораторных условиях. Применяются для детального изучения магнитного поля разных уголков земного шара в интересах разных областей человеческой деятельности [1, 2]. В этой статье речь пойдет главным образом о применении магнитометров в интересах геологии.

I. НЕКОТОРЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОМЕТРОВ

В геологии, археологии роль магнитометров сложно переоценить [3, 4]. Актуальность их применения обусловлена экономией ресурсов в плане поиска полезных ископаемых и предметов поисков археологов (древних городов, мест стоянок людей). Использование магнитометров в геологии позволяет осуществлять поиск полезных ископаемых без забора образцов разных горных пород, т. е. без пробного бурения. Появляется возможность определять предположительное местонахождение залежи и производить оценку целесообразности разработки этого участка местности в геологическом плане. Разные минералы и горные породы обладают разными магнитными свойствами [5, 6]. Это можно использовать для разведки полезных ископаемых. Поиск мест для оборудования колодцев и скважин также облегчается при

использовании магнитометров. Подземные воды часто характеризуются повышенными концентрациями оксидов железа. Чувствительные магнитометры позволяют выявлять локацию таких источников подземных вод.

Известно, что такая человеческая деятельность, как, например, постройка крупных объектов с мощными фундаментами искажает магнитное поле Земли, также как и залежи полезных ископаемых, имеющих собственное магнитное поле. Магнитометр отслеживает эти искажения. Магниторазведка – один из основных методов при поиске алмазов [8].

Поиск месторождений полезных ископаемых – комплексное мероприятие. При разведке на больших площадях вначале определяют аномальные зоны, в пределах которых производится детальная магнито, электро и гравиторазведка. По показаниям магнитометров строятся магнитные карты. Развитие БПЛА [13], средств телеметрии и геоинформационных систем позволяют автоматизировать этот процесс.

Результаты магнитометрических наблюдений оформляются в виде графиков и изолиний магнитного поля. После завершения замеров строится карта аномального участка. При наличии карты после проведения дополнительных исследований можно делать предварительные выводы о наличии и глубине залегания различных пород, переходить к отбору образцов. Окончательные выводы о вещественном составе проб производятся после лабораторных исследований.

Магниторазведка позволяет картировать карстовые полости в районах активного выщелачивания (растворения) горных пород, выявлять разломы.

В археологии магнитометры используются при раскопках древних городов и других исторических объектов, которые часто глубоко покрыты культурным слоем. Например, обожжённый кирпич, старинные печи имеют повышенную остаточную намагниченность [4].

Еще одна область использования магнитометров - навигация [2]. Известно, что географические и магнитные полюса не совпадают [10]. С помощью магнитометра можно определять направление движения относительно магнитных полюсов. Расхождение направления движения относительно географического и магнитного полюсов меняется от экватора к полюсу, что вполне корректируется для получения информации о направлении движения. Особенно актуально для авиации, морского транспорта и

для космических аппаратов в случае, когда не работает GPS.

В сейсмологии [10] магнитометры, отслеживающие магнитное поле Земли, позволяют оценивать вероятность землетрясений и появления трещин/разломов в земной коре. При тектонических сдвигах и перед извержением вулканов меняются обычные показатели магнитного поля Земли.

Палеомагнитные исследования широко используются в стратиграфии (геохронологии) для уточнения относительного возраста горных пород, сформировавшихся в условиях определенного геомагнитного поля.

II. УСЛОВНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТОМЕТРОВ

По принципу действия магнитометры разделяют на несколько основных видов:

1. Магнитостатические.
2. Индукционные.
3. Квантовые.
4. Протонные и Оверхаузера.
5. Криогенные.

Каждая группа использует определенный физический принцип. В определенных условиях обеспечиваются более точные измерения для специализированных магнитометров на базе этих групп. Различают скалярные и векторные магнитометры. Скалярные магнитометры позволяют измерять общую напряженность магнитного поля. Векторные магнитометры - напряженность поля в определенном направлении. Такая возможность появляется за счет использования датчиков, расположенных ортогонально. Некоторые разновидности этого класса приборов фиксируют конкретные значения параметров магнитного поля, а другие показывают градиент, т.е. изменение магнитного поля в пространстве. Чтобы эту возможность реализовать, необходимо несколько датчиков, разнесенных в пространстве. Магнитное поле часто изменяется с течением времени (как в течение года, так и посуточно). Иногда бывает необходимо отслеживать это изменение.

Геомагнитное поле Земли представляет собой неоднородную пространственную структуру с широким спектром временных вариаций. Это объясняется тем, что оно создается за счет источников различной природы, расположенных внутри Земли, а также в магнитосфере и ионосфере. Более чем на 90 процентов оно формируется во внешнем ядре Земли [14]. Изменения магнитного поля (вариации) могут происходить с периодичностью от долей секунды до сотен лет. Вариации могут возникать как по внешним (магнитные бури), так и по внутренним причинам. Геомагнитное поле пронизывает все оболочки Земли: литосферу, гидросферу и атмосферу, оказывая влияние на геофизические, биофизические и технологические процессы [12]. Кроме того, влияние оказывают и залегающие в недрах Земли различные горные породы. Визуализация магнитного поля на участке земной поверхности с помощью ГИС – важная задача для анализа процессов, происходящих в недрах Земли [14].

III. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

На рисунке 4 представлены магнитная карта местности, выполненная с помощью

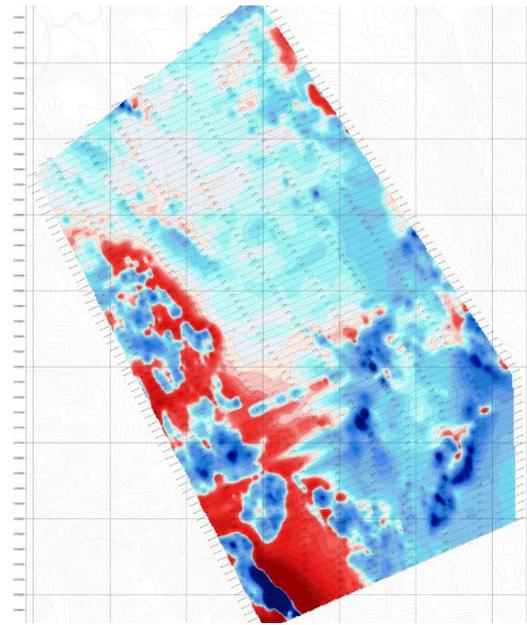


Рис. 4. Магнитная карта местности

одноканального оверхаузеровского магнитометра ММПОС-1 [7]. Полевые работы проводились в Магаданской области несколько лет назад. Шаг по профилю (направление движения) 20 метров, расстояние между профилями 100 метров. Результаты магнитометрических наблюдений оформлены в виде графиков и изолиний магнитного поля. После завершения замеров была построена карта аномального участка. С помощью специальной программы Surfer файл с точечными замерами в нТл в конкретных точках профиля представляется в виде цветовой гаммы соответственно значениям магнитного поля. Между точками производится аппроксимация. В итоге строится контурная карта (с более ярко выраженными аномалиями). При наличии такой карты и проведении дополнительных исследований (например, электрических) можно делать предварительные выводы о наличии и глубине залегания различных пород и переходить к отбору этих пород. Уточнения по составу отобранных пород обычно производятся в лабораторных условиях.

Интерпретация магнитных карт земной поверхности включает в себя анализ профилей слабых и сильных магнитных полей на поверхности Земли. Для этой цели используется аппроксимация между точками замера магнитных полей. Кроме того, полученные данные используются для построения контурной карты магнитного поля по глубине, а иногда и по площади. Информация может быть использована для анализа надземного, подземного и подводного магнитных полей, а также для поиска магнитных минералов.

Магнитную карту можно использовать для оценки глубины слоя магнитного фундамента, глядя на

интенсивность и форму магнитного поля. Интенсивность магнитного поля напрямую связана с глубиной слоя, а по форме поля можно сделать вывод о геологическом строении фундамента.

На рис. 5 (а) представлены результаты моделирования для модели синклинали складки (разновидность изгибов слоев земной коры в виде складки с характерной вогнутой формой).

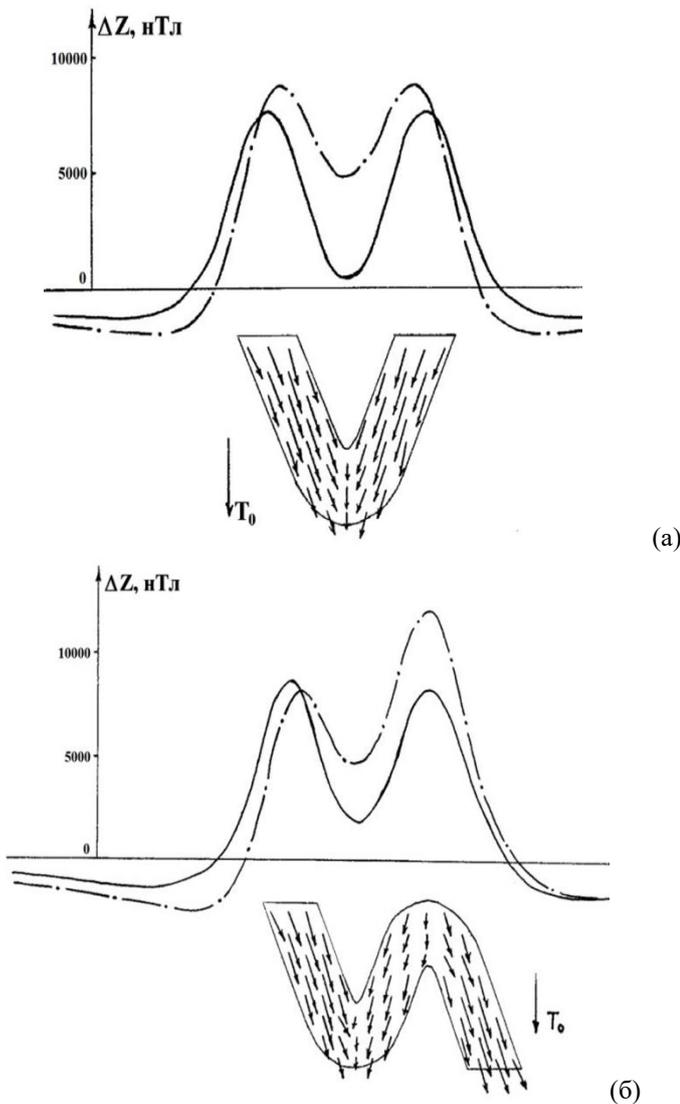


Рис. 5. Намагниченность и магнитные аномалии модели синклинали складки(а) и более сложной S-образной складки(б)

Главные компоненты тензора магнитной восприимчивости модели в каждой точке были выбраны $k_t=3,770$ СИ и $k_n=0,628$ СИ; однородное первичное поле с индукцией 50 мкТл ориентировалось вертикально вниз. В совокупности эти эффекты значительно изменяют форму графиков аномального поля. Для сопоставления на рис. 5(а) показана аномалия той же модели с изотропной магнитной восприимчивостью 3,770 СИ. Рис. 5(б) содержит результаты вычислений намагниченности и аномального

поля более сложной S-образной складки с теми же главными компонентами тензора магнитной восприимчивости.

Интерпретация магнитных аномалий может помочь в выявлении областей повышенной магнитной активности, что, в свою очередь, может быть использовано для оценки предположительных объемов месторождения. В самом примитивном случае, когда идет уже оценка именно месторождения, можно использовать магнитную карту для оценки объема залежи, измеряя длину, ширину и глубину залежи, а затем подставляя эти числа в формулу для определения объема. Эти параметры иногда можно определить по магнитной карте.

IV. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Сегодня на рынке доступно множество программ для ГИС (Географические информационные системы). В рамках исследования изучена возможность использования в интересах геологии нескольких геоинформационных систем: Surfer, Database Map, QGIS, и Autodesk Civil 3D. ГИС— это инструмент, используемый для создания и анализа цифровых карт. Database Map, Surfer, Autodesk Civil 3D и QGIS — популярные программы ГИС. Каждая программа имеет свои уникальные функции и возможности. Далее приводится сравнительный анализ этих программ.

Database Map — это продукт для управления данными, который позволяет пользователям хранить, упорядочивать, обновлять геоданные и производить простейший анализ. Среди характерных особенностей можно выделить возможность легко визуализировать, запрашивать, создавать собственные карты и выполнять анализ данных. Пользовательский интерфейс программы прост и удобен, а также предоставляет некоторый набор интерактивных картографических инструментов. Database Map также поддерживает создание пользовательских тематических карт и имеет большую библиотеку доступных тем. По сравнению другими программными пакетами ГИС возможности визуализации для анализа ограничены. Вместе с тем простота использования делает привлекательным для людей с небольшим опытом работы с ГИС.

Surfer — это программный пакет, предоставляющий более мощные инструменты для создания контурных карт и карт поверхностей с координатной сеткой. Программа имеет расширенные функции, включая интерполяцию данных, обработку изображений и многое другое. Полный пакет — платный. Surfer — это комплексная ГИС-программа, предназначенная для создания карт профессионального уровня. Она предоставляет мощные картографические инструменты, такие как интерактивный стиль карты и макет, мощное трехмерное представление и расширенный анализ данных. В отличие от Database Map Surfer требует некоторых технических знаний для настройки и эффективного использования.

Autodesk Civil 3D— программный продукт, более сопоставимый с Surfer, чем с Database Map. Этот продукт

позволяет выполнять расчеты для динамического планирования, анализа и моделирования различных метрик и отчетов. Он позволяет пользователям создавать 3D-модели и исследовать ландшафты. Этот программный пакет активно используется картографами, архитекторами и геодезистами. С помощью Autodesk Civil 3D можно создавать динамические модели среды.

В Autodesk Civil 3D и Surfer предоставляется возможность отображать и анализировать различные виды данных, включая данные о погоде, данные по различным физическим процессам и другие данные. Также инструменты Autodesk Civil 3D и Surfer предоставляют автоматическую генерацию данных и позволяют создавать динамические визуализации. Это значительно облегчает и визуализирует процесс анализа.

QGIS — это условно бесплатный программный пакет ГИС (некоторые компоненты являются платными) с открытым исходным кодом, который предлагает широкий спектр инструментов для управления, анализа и визуализации геоданных. Он имеет широкий спектр дополнительных функций, включая поддержку картографических веб-сервисов и возможность создавать цифровые модели рельефа. QGIS имеет широкий спектр расширенных функций ГИС, включая визуализацию данных, анализ, обработку и

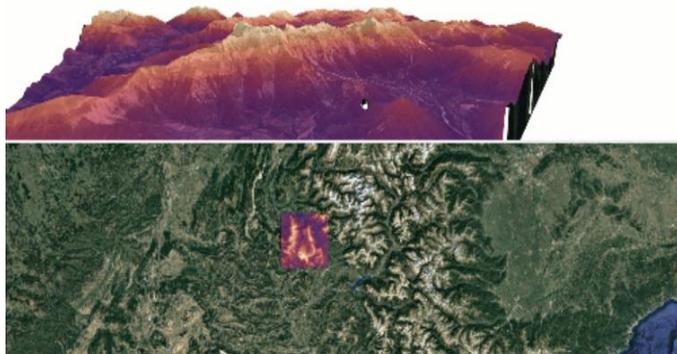


Рис. 6. Пример 3d модели в QGIS

автоматизацию. Он также поддерживает API (программный интерфейс пользователя) для аналитики, визуализации и прогнозов. Идеально подходит для людей, которые умеют программировать и хотят создавать собственные карты или проводить сложный анализ.

Autodesk Civil 3D, Surfer и QGIS - это три популярные программы для географического моделирования и анализа. Autodesk Civil 3D и Surfer имеют более высокую стоимость, чем QGIS. Поэтому, если цена является критерием выбора, то QGIS может быть наиболее привлекательным вариантом.

Ниже показаны возможности визуализации для рассмотренных ГИС. Для Database

ТАБЛИЦА I. ЗНАЧЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В НТЛ В ТОЧКАХ ИЗМЕРЕНИЙ НА МЕСТНОСТИ

ПРОФИЛЬ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	-7.3	-10.2	-13.5	-17.4	-21.8	-26.6	-31.8	-35.6	-38.4	-33.2	-27	-20.1	-13.7	-8.5	-4.2	-0.8	1.9	4.1	6	7.6	8.9
1	-10.7	-13.8	-17.6	-22.3	-27.9	-34.8	-42.9	-50.2	-52.4	-47.3	-37.4	-27.3	-19	-12.9	-8.4	-5.1	-2.8	-2.7	0.4	1.5	2.3
2	-21	-24.6	-29	-34.1	-40.5	-48.5	-58.9	-69.1	-68.6	-63.3	-47.6	-32.7	-21.1	-13.4	-7.7	-3.8	-0.8	1.1	2.6	7	4.2
3	-20.3	-25.7	-32	-38.9	-46.6	-55.3	-66.3	-77.7	-80.8	-69.4	-50.3	-32.9	-19.9	-10.4	-5.8	-1.1	4.8	7.8	10.1	12	13.4
4	-16.1	-23.7	-32.6	-42.3	-51	-58.6	-66.6	-74.2	-75.1	-64.8	-48.4	-33.2	-21.6	-13.5	-7.6	-3.4	-0.1	2.2	4.3	5.9	7.2
5	-18.5	-27.4	-38.7	-50.8	-59.5	-62.8	-62.9	-62.2	-58.3	-49	-36.4	-24.6	-15.1	-8.3	-3.4	-0.1	2.3	4.1	5.3	6.2	6.9
6	-24.9	-35.7	-50.1	-65.9	-75.3	-72.4	-65.1	-56.4	-48	-38.7	-28.5	-19	-12.7	-8	-0.1	3.4	6.1	8	9.5	10.6	11.3
7	-23.9	-36.1	-52.5	-70.7	-80.9	-76.6	-64.2	-52.1	-42.2	-33.7	-25.8	-18.6	-12.4	-7.3	-3.3	0.1	2.8	5	7	8.6	10.1
8	-3.4	-14.5	-29.1	-44.5	-53.1	-49.6	-39	-28.3	-19.9	-13.4	-8.1	-3.6	0.1	2.9	-5.1	6.7	8	9.1	9.9	10.8	11.4
9	-18.3	-26.4	-36.3	-45.8	-50.7	-48.2	-40.8	-30.6	-25.7	-20.1	-15.7	-12.2	-9.5	-7.5	-6	-5	-4.3	-3.9	-3.5	-3.2	-3
10	-33.7	-39.6	-45.9	-51.6	-54.4	-53	-48.7	-43.2	-38.1	-33.6	-30	-26.8	-24.4	-22.4	-20.9	-19.7	-18.6	-17.7	-16.7	-15.6	-10.9
11	-32.1	-36.4	-40.8	-44.5	-46.6	-46.4	-44.6	-42	-39.1	-36.6	-34.4	-32.8	-31.5	-30.6	-30	-29.5	-29	-28	-26.6	-24.8	-22.8
12	-26.5	-28.8	-31.2	-32.9	-33.9	-33.8	-32.8	-31.4	-29.8	-28.5	-27.6	-27.2	-27.3	-28	-29	-30.2	-31	-31.1	-30.2	-28.4	-26.3
13	-24.2	-25.2	-26.1	-26.6	-26.5	-26	-24.8	-23.5	-21.9	-20.7	-19.9	-19.6	-20.1	-21.4	-23.4	-25.8	-27.7	-28.2	-26.9	-24.1	-20.7
14	-16.8	-17.9	-18.8	-19.4	-19.7	-19.5	-18.9	-18.2	-17.4	-16.7	-16.5	-16.9	-18.2	-20.3	-23.5	-28	-31.6	-32.3	-29.4	-23.8	-17.6
15	3	1.9	1	0.2	-0.4	-0.7	-1	-1.1	-1.1	-1.6	-2.4	-4	-6.6	-10.9	-17.1	-25.1	-32.7	-35.5	-30.9	-21.7	-12.1
16	4	3.8	3.5	3.2	2.8	2.6	2.3	1.8	1.2	0.2	-1.4	-4.1	-8.1	-14.3	-23.3	-36	-49.1	-55.1	-48.8	-33.7	-22.9
17	-0.7	-0.3	0	0.5	0.9	1.3	1.7	1.9	1.9	1.4	0.2	-2	-5.9	-13.3	-22.2	-36.3	-51.6	-59.2	-48.3	-36.1	-22.1
18	-0.1	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	0	0.1	0.2	0.2	-0.3	-1.2	-3.2	-6.4	-11.9	-20.1	-32	-44.2	-49.6	-42.9	-29.1	-16
19	10	9.8	9.5	9.2	8.9	8.6	12.1	7.5	6.8	5.8	4.2	2	-1.4	-6.3	-13.1	-21.6	-29.4	-32.7	-28.4	-19.5	-9.9
20	19.2	19.7	20.2	20.5	20.9	21	21.1	20.9	20.5	19.6	18.3	16.3	13.5	9.6	4.6	-1.1	-6	-8.1	-6.3	-1.7	-4

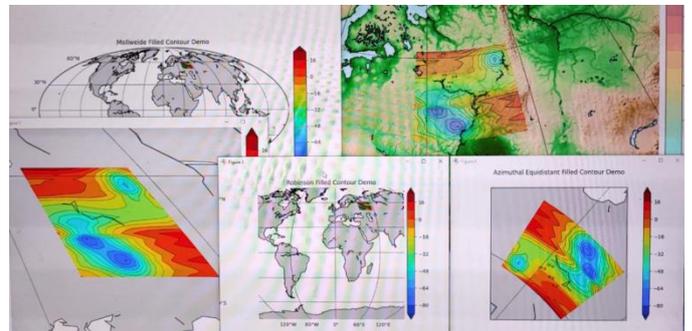


Рис. 7. Представление данных таблицы 1 в Database Map

Map, Surfer, Autodesk Civil 3D построены магнитные карты по результатам одних и тех же измерений, представленных в виде таблицы. В таблице 1 значения по вертикали – номер профиля (направление движения), а по горизонтали – номер пикета на профиле (точка замера магнитного поля).

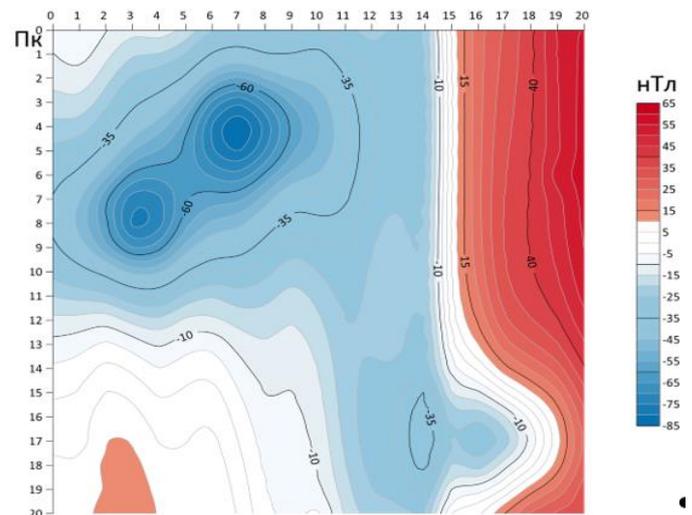


Рис. 8. Представление данных таблицы 1 в Surfer

Database Map позволяет делать визуализацию магнитных карт в простейших случаях. На рисунке 7 видно, что аномалии магнитного поля отображаются. Более профессиональная программа Surfer строит эту же карту более удобно для дальнейших геофизических исследований. Четко видно, что аномалии, расположенные между 2м и 10м профилями и между 2м и 10м пикетом представляют единственный объект. Можно оценить размеры

аномальной зоны. Если расстояния между профилями 50 метров и расстояния между пикетами по профилю 50 метров, то размеры аномальной зоны 400м на 400м (см рис. 8).

На рисунке 9 показана легенда для магнитных карт, выполненных в Autodesk Civil 3D. На рисунках 10 и 11- магнитные карты по таблице 1 на плоскости и в объемном представлении.

Таблица данных магнитного поля			
Номер диапазона	Минимальное значение	Максимальное значение	Цвет
1	-80.900	-62.800	■
2	-62.800	-50.300	■
3	-50.300	-44.600	■
4	-44.600	-36.600	■
5	-36.600	-33.200	■
6	-33.200	-30.600	■
7	-30.600	-28.200	■
8	-28.200	-26.100	■
9	-26.100	-23.500	■
10	-23.500	-20.300	■
11	-20.300	-18.300	■
12	-18.300	-14.300	■
13	-14.300	-9.500	■
14	-9.500	-4.800	■
15	-4.800	-1.700	■
16	-1.700	-0.100	■
17	-0.100	1.400	■
18	1.400	3.400	■
19	3.400	6.900	■
20	6.900	10.100	■
21	10.100	54.700	■

Рис. 9. Легенда для магнитных карт, выполненных в Autodesk Civil 3D

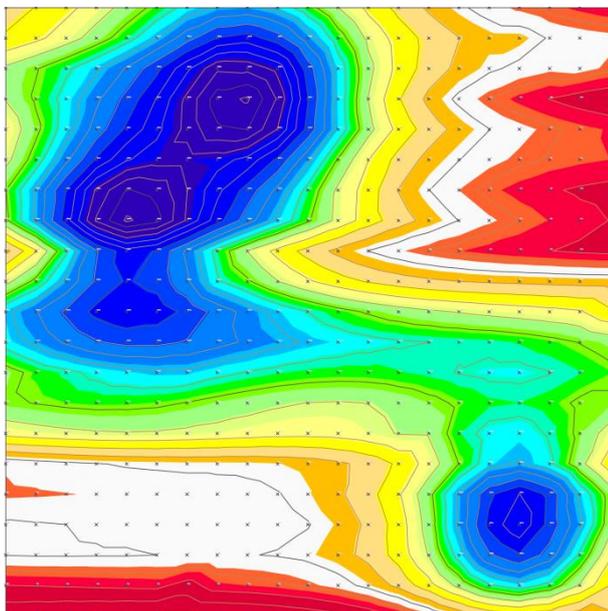


Рис. 10. Представление данных таблицы 1 в Autodesk Civil 3D

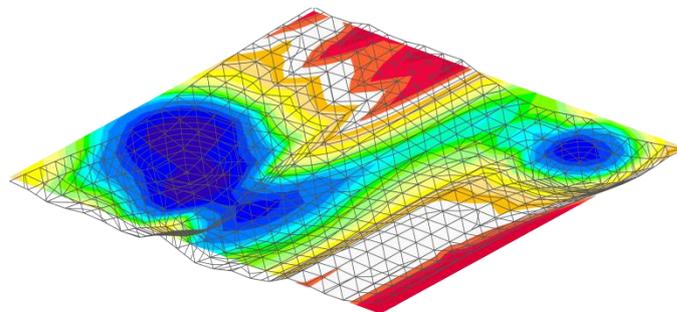


Рис. 11. Объемное представление данных таблицы 1 в Autodesk Civil 3D

Необходимо отметить, что разрабатываются и отечественные программные продукты для анализа результатов магниторазведки. Например, в 2015 году на рынке появилась ГИС INTEGRO [11]. Этот продукт импортозамещения также позволяет (хотя и с некоторым отставанием по времени по сравнению с зарубежными аналогами) визуализировать и анализировать магнитные карты местности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование магнитометров в геологии - необходимый и актуальный этап работы, позволяющий экономить время и ресурсы в совокупности с другими методами георазведки. Развитие БПЛА, средств телеметрии и геоинформационных систем существенно расширяют возможности магниторазведки. После завершения замеров обычно строится карта аномальных участков. Поиск и оценка предположительных объемов месторождения выявляются в определенных случаях в областях с повышенной магнитной активностью. Анализ магнитных карт местности - важный этап в поиске ряда полезных ископаемых. Для подобного анализа уместно использование разных программных пакетов ГИС.

При сравнении Database Map, Surfer, Autodesk Civil 3D и QGIS важно учитывать функции, возможности и уровни производительности каждого из них. Каждый из этих пакетов программ имеет свои сильные и слабые стороны. Пользователь должен решить, какой из этих программных пакетов лучше всего соответствует его потребностям. Например, Database Map отлично подходит для управления данными, но ее возможности визуализации данных ограничены. Surfer и Autodesk Civil 3D обладает намного большими возможностями визуализации. QGIS при относительно недорогом бюджете предлагает неплохое сочетание возможностей управления данными и визуализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Новиков К.В. Магниторазведка: Учебное пособие. Часть 1. - М. МГРИ-РГГРУ. : 2013. - 141 с.
- [2] Платт Ч., Янссон Ф. Энциклопедия электронных компонентов. Том 3.: - Спб.: Бхв-Петербург, 2020. - 288 с.: ил.
- [3] Егорова Н.Е., Тонких М.Е. Общая геология: учебное пособие. - Иркутск: Издательство Иркутского государственного технического университета, 2010. - 79 с.

- [4] Журбин И.В. Археология и геофизика: принципы комплексных исследований // Российская археология. - Ижевск: Физико-технический институт УрО РАН, 2004. - С. 79-88
- [5] Нагата Т. Магнетизм горных пород. – М.: Мир, 1965. – 247 с
- [6] Паркинсон У. Введение в геомагнетизм: пер с англ. – М.: Мир, 1986. – 582 с.
- [7] Магнитометр ММПОС. // Геодевайс. – 2020. – URL: <https://geodevice.ru/main/magnetometers/mmpos1/>. Дата обращения: 15.12.2022.
- [8] Контарович Р.С., Цыганов В.А. Проблемы и перспективы развития геофизических технологий при поисках коренных месторождений алмазов (опубликовано в 2000 г.). – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23719801>. Дата обращения: 15.12.2022.
- [9] Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: ЛГУ, 1978. - 592с.
- [10] Дьяченко А. И., Магнитные полюса Земли. – М.: МЦНМО, 2003. – 48 с.
- [11] Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Любимова А.В. ГИС INTEGRО – импортозамещающий программно-технологический комплекс для решения геолого-географических задач // Информационные системы в геологии и геофизике. – 2018. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35605011>. Дата обращения: 15.12.2022.
- [12] Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: российский сегмент. // Физика Земли. - 2015 № 2, с. 3–20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22994988>. Дата обращения: 10.06.2023.
- [13] Ткачев А. А., Морозов М. И., Меренов И. А., Саркисян А. М., Эль Кабаби Яссин. Подбор копитера для решения задач получения геопространственных данных в оперативном режиме.// МАТЕРИАЛЫ 8-й региональной научно-практической конференции «КУЛЬТУРА УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЕЙ: Экономические и социальные аспекты, кадастр и геоинформатика».- 2019 г. – URL: https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/land_registry/874158.pdf#page=91. Дата обращения: 04.07.2023.
- [14] Vorobev Andrei V., Shakirova Gulnara R. Web-Based Geoinformation System for Exploring Geomagnetic Field, Its Variations and Anomalies// Geographical Information Systems Theory, Applications and Management// First International Conference, GISTAM 2015 Barcelona, Spain, Revised Selected Papers, 2015.- p.22-32. – URL: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/37627/1/70.Cédric%20Grueau.pdf#page=32>. Дата обращения: 04.07.2023.

APPLICATION OF MAGNETOMETERS IN GEOLOGY

Petlenko D. B.

Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems

Department of Radio Wave Processes and Technologies

RTU MIREA

Moscow, Russia

petlenko@mirea.ru

Abstract — A brief overview of the use of magnetometers in various areas of the national economy is presented. A scheme for using magnetometers in combination with other geoexploration methods is presented. A variant of the successful preliminary construction of a map of magnetic field anomalies obtained by manual pedestrian measurements is presented. Areas on a map with magnetic anomalies often provide clues to the presence of certain rocks and are a necessary element of complex geological exploration in combination with other methods. The article also provides fragments of the analysis of magnetic anomalies on the map. Geographic information systems (GIS) are used to analyze and interpret magnetic anomalies. As part of the study, a comparative analysis of the features of the most popular GIS from a geological point of view was carried out.

Keywords — areas of application of magnetometers, magnetometers in geology, GIS.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В СОВРЕМЕННЫХ ВООРУЖЕННЫХ КОНФЛИКТАХ. ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕР БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ И ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОБЩЕСТВЕННОСТЬЮ

Чухарев Е.С.

Кафедра геоинформационных систем
Институт радиоэлектроники и информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
chukharev.e.s@edu.mirea.ru

Ануфриев С.О.

Кафедра геоинформационных систем
Институт радиоэлектроники и информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
anufriev_s@mirea.ru

Аннотация — В статье рассматривается спутниковая и беспилотная разведка местности как способ получения пространственных данных для геоинформационных систем (ГИС), анализируются преимущества и недостатки различных способов. Также рассмотрены специализированные ГИС военного назначения и влияние их применения на характер современных военных действий.

Ключевые слова — беспилотные летательные аппараты, геоинформационная система, Единая система управления тактическим звеном, система дальнего радиолокационного обнаружения и управления

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития средств спутниковой, беспилотной и авиационной разведки, их массового внедрения как государственными, так и коммерческими структурами, их удешевления и доступности, а также усиления мировой напряженности, вследствие возникновения вооруженных конфликтов, встаёт вопрос о влиянии геоинформационных систем на современные военные конфликты. Существует концепция т. н. «сетевидной» войны, впервые использованная в военной доктрине США «Joint Vision 2010», определение которой для нас будет звучать так: «сетевидной» войной понимаются не новые специфические способы и формы ведения войны, а лишь способ интеграции технических средств разведки, автоматизации управления и огневого поражения посредством информационно-телекоммуникационных сетей связи и передачи данных в целях повышения эффективности ведения боя путем согласования и координации действий имеющихся сил и средств на основе единого информационного пространства (рис. 1) [1]. То есть, согласно данной концепции, возможно использование данных о свойствах местности,

расположении своих войск и войск противника, об изменении погодных условий и другой необходимой для пользователей различных уровней и специальностей информации. Озвученные выше средства разведки могут предоставлять данные для специализированной ГИС, представленной в российском информационном сегменте как Единая система управления тактическим звеном (ЕСУ ТЗ) [2].

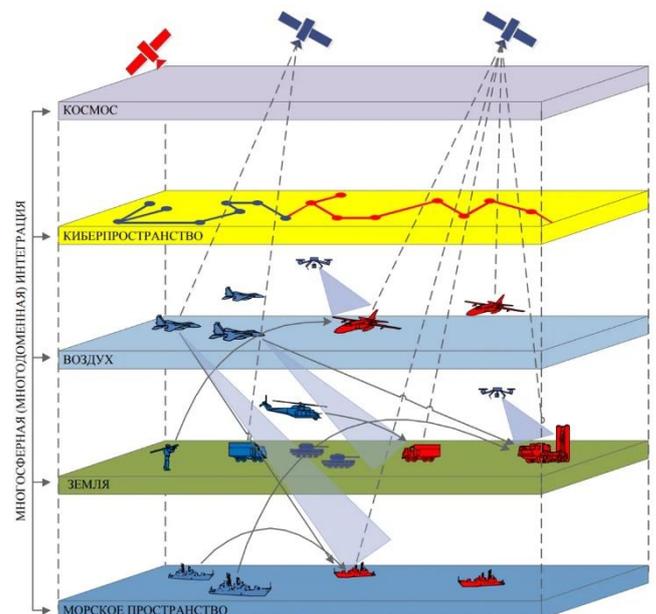


Рис. 11. Взаимодействие различных родов войск в сетевидной войне

Ещё до начала специальной военной операции (СВО) средствам разведки уделялось повышенное внимание [1], однако, как показала практика, беспилотных средств разведки в подразделениях критически не хватало. Речь

идёт о беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) всех уровней и разновидностей. Их было либо мало, как в случае с БПЛА самолетного типа, либо их вообще не было, как военно-учётной специальности (ВУС) оператор БПЛА или должности оператора БПЛА на уровне рот и взводов.

В ходе СВО спутниковая разведка для ВСУ обеспечивается странами НАТО [3], помимо этого, активно используются данные с открытых некоммерческих и коммерческих источников. Как пример – использование энтузиастами информации из карты мировых пожаров, для подтверждения попадания снарядов по объектам (https://t.me/Mestb_Dobroj_Voli/8364?single).

Авиационная разведка осуществляется самолетами и вертолетами с системой дальнего радиолокационного обнаружения и управления (ДРЛО), радиолокационные станции (РЛС) которых определяют координаты цели, измеряя дальность цели и два угла: по горизонтали и по вертикали (азимут и угол места). Оптическая разведка самолетами была вытеснена БПЛА и спутниковыми снимками.

В данной статье анализируется спутниковая и беспилотная разведка как способ получения данных для ГИС в армиях различных стран, ведущих или проводивших боевые действия во втором и третьем десятилетии XXI века, а также её влияние на характер проведения военных и психологических операций.

I. ОСОБЕННОСТИ ВЕДЕНИЯ СПУТНИКОВОЙ И БЕСПИЛОТНОЙ РАЗВЕДКИ

На сегодняшний день в составе орбитальной группировки России 192 космических аппарата, из которых около 70% находится в управлении Главного испытательного космического центра Минобороны.

Группировку составляют космические аппараты:

- связи;
- навигации;
- метеорологические;
- топогеодезического назначения;
- дистанционного зондирования Земли;
- мониторинга состояния её поверхности.

Для сравнения: против нашей СВО развернуты сотни космических аппаратов. “Работает практически вся натовская спутниковая группировка. По нашим оценкам, больше 70 военных и свыше 200 гражданских спутников работают на то, чтобы разведывать месторасположение наших подразделений”, – заявил министр обороны России Сергей Шойгу в интервью телеканалу “Россия-24” (<https://tass.ru/armiya-i-opk/15817057>). Это не учитывая гражданские спутники связи, такие как Starlink, которые обеспечивают связь на линии боевого соприкосновения.

С помощью дешифрирования спутниковых снимков получается информация о:

- местоположении пунктов постоянной и временной дислокации противника (ППД и ПВД противника соответственно);
- фортификационных сооружениях (линии траншей, заградительные сооружения);
- скоплении и расположении техники (например, самолетов на аэродромах вне крытых укрытий),

личного состава (по косвенным признакам – казармы, плац, протоптанные тропы);

- местоположении стратегически важных объектов (штабы, аэродромы, склады ГСМ и БК, ремонтные заводы, военные заводы);
- актуальных путей сообщения и логистики (актуальная информация о ж/д путях, целые мосты, автодороги);
- о рельефе и характере местности (характер растительности и грунта, перепады высот);
- актуальное расположение объектов (города и поселения, здания, авто- и ж/д дороги и др.);
- возгораниях на какой-либо территории (что может свидетельствовать о попадании снаряда в цель);
- иных объектах и событиях.

Важность спутниковых снимков заключается в том, что появляется возможность получать наиболее актуальные данные (по сравнению с бумажными картами) и, самое главное, любому, кому они необходимы. Важно учесть, что для разных специальностей необходим свой набор информации, который позволит работать в своей предметной области и не будет перегружать процесс. Так, командующему армией нет необходимости знать расположение каждого солдата или информации о чужом участке ответственности.

Если говорить о средствах беспилотной разведки, то их главное преимущество состоит в скорости получения актуальных данных, а также относительной простоте и дешевизне, по сравнению с получением космических снимков. Таким образом, в зависимости от величины района исследования, можно запустить как БПЛА ближнего действия, в интересах подразделений, так и БПЛА большой дальности, в интересах Верховного Главнокомандования и командований на стратегических направлениях. [8].

Преимущества беспилотной и спутниковой разведки неоспоримы:

- уменьшение потерь личного состава;
- повышение эффективности решения задач Сухопутными войсками за счет обеспечения ударных средств разведывательной информацией в режиме онлайн;
- наблюдение за полем боя и передача этой информации на пункты управления;
- повышение устойчивости управления войсками при использовании летательных аппаратов для ведения ретрансляции сигналов и многое другое.

Таким образом, при применении данных средств разведки встаёт вопрос: “С какой частотой мы можем актуализировать данные?”. Если данные с БПЛА мы можем получать чуть ли не непрерывно, соблюдая условия ротации самих летательных аппаратов, а также их пилотов, то на частоту получения спутниковых снимков оперативно повлиять в данном случае невозможно. Так, в случае утери, поломки или отсутствия БПЛА, есть возможность оперативно запросить или приобрести необходимую модель или запчасти, которых на гражданском рынке предостаточно.

Спутниковые аппараты дороги, их количество исчисляется сотнями (тогда как БПЛА – десятками тысяч), их ремонт сложен и затратен. Поднять в воздух БПЛА и вывести на орбиту спутник совершенно несопоставимые задачи в области финансов, трудозатрат и человеко-часов работы. Однако, пусть крупные страны и ведут разработки в области противоспутникового оружия (<https://russian.rt.com/world/article/354017-sputniki-oruzhie-ssha-rossiya-kitai>), на данный момент не было фактов сбита им военных или гражданских спутников.

Также спутниковые аппараты могут беспрепятственно проводить съёмку территории на всём земном шаре, тогда как дальность полёта беспилотников зависит от ёмкости аккумулятора и средств противодействия. С другой стороны, частота получаемых снимков со спутников зависит от частоты их пролёта над исследуемой территорией, а также времени, затрачиваемому на передачу и обработку снимков.

II. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС ВООРУЖЕННЫМИ СИЛАМИ РАЗЛИЧНЫХ СТРАН

Грамотное и эффективное управление войсками всегда было важным аспектом, ведущим к победе. Средства управления и связи постоянно совершенствовались, пройдя путь от барабанов и знамён, до радиосвязи и приложений на портативных мультимедийных устройствах (телефонах, планшетах, компьютерах и их вариациях). Скорость реакции выросла в разы, как и осведомлённость в событиях. К примеру, существует тенденция к уменьшению боевых единиц. Тактика боевых действий начинает учитывать всё более малочисленные подразделения (пример: боевые тройки). Причина тому, усовершенствование средств взаимодействия, облегчение контроля и возросшая огневая мощь отдельного пехотинца.

Для эффективного управления войсками в передовых армиях мира приступили к разработке и внедрению в войска программы для управления боем и осведомления тактической обстановкой. Рассмотрим некоторые из них.

ГИС «Оператор» ВС РФ. Геоинформационная система «Оператор», которая принята на снабжение ВС РФ приказом министра обороны РФ от 15 августа 2013 г. № 598, имеет обширный функционал. По словам начальника Военно-топографического управления Генерального штаба Вооружённых Сил РФ генерал-майора Александра Николаевича Зализнюка, «система предназначена для решения задач изучения и оценки свойств местности, информационного обеспечения учений и командно-штабных тренировок, ведения дежурных и оперативных карт и схем, автоматизации процессов управления войсками, создания виртуальных 3D-макетов местности, информационного обеспечения боевого применения высокоточного оружия, навигационного обеспечения транспортных средств и других специальных задач». (<https://www.gistoolkit.ru/download/prezents/operatormew.pdf>, <https://structure.mil.ru/structure/forces/ground/news/more.htm?id=11829464%40egNews>)

DELTA армии США. У армии США для управления используется программа DELTA (Рис. 2). Все войска объединены в одну информационную сеть, всё оборудование имеет соответствующее ПО для работы в системе. У всех есть возможность получать, передавать и использовать информацию в своих целях. Система DELTA также внедрена в вооружённых силах Украины (ВСУ).



Рис. 12. Взломанная во время СВО программа DELTA

ГИС «Крапива» ВСУ. Вооружённые силы Украины ещё с учений со странами НАТО начали внедрять в структуру управления войсками американскую DELTA, но, помимо этого, в войска поступил свой аналог программы. Как отмечают хакеры, которые занимаются взломом различных приложений, в «Крапиве» (Рис. 3), в отличие от DELTA, все данные хранятся не на общем сервере, а на локальных серверах на своих направлениях. Такая структура позволяет при взломе основного сервера не потерять и не выдать хакерам всю важную информацию.



Рис. 3. ГИС «Крапива»

В России такая программа называется Единая система управления тактическим звеном, работы над которой ведутся ещё с конца 90-х годов прошлого столетия. (<https://russian.rt.com/russia/article/823816-setecentricheskie-ucheniya-esu-tz>)

III. Влияние ГИС НА СОВРЕМЕННЫЕ БОЕВЫЕ ДЕЙСТВИЯ

В связи с упрощением получения снимков местности, более остро встал вопрос маскировки войск и объектов. От радиолокационных спутников патентуются аэрозоли, распыляемые над объектами, которые необходимо скрыть (<https://iz.ru/1076994/2020-10-22/minoborony-zapatentovalosposob-maskirovki-dvigaiushchikhsia-obektov-ot-sputnikov>), создаются макеты техники, как кустарно (в основном для сокрытия и запутывания БПЛА), так и фабрично, с разной степенью детализации, уголки отражатели, для противодействия радиолокационной разведке противника. Из-за частоты обновления данных становится тяжело, если не практически невозможно, скрывать перемещения крупных подразделений, стратегически важные объектов контролируются постоянно. Всё это ложиться на плечи планировщиков операций.

Говоря о нынешней информационной среде, невозможно не отметить, что наличие данных из открытых источников позволяет создавать ГИС энтузиастам (Рис. 4). Например, проект «Z комитет + карта СВО» (Рис. 5), проект «MilitaryMaps» (Рис. 6) и т. п. Эти проекты получают информацию из открытых источников, содержат ссылки на них, а также предусматривают функционал для работы с картами и их элементами. У «MilitaryMaps» есть бесплатная бета-версия, полные версии программ необходимо будет приобретать. Тем не менее, это может сделать любой желающий, что увеличивает круг людей, информированных о происходящих событиях.



Рис. 4. Отображение военной обстановки

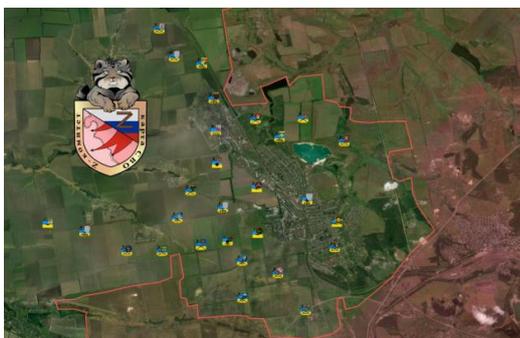


Рис. 5. Проект «Z комитет + карта СВО»



Рис. 6. Проект «MilitaryMaps»

В мирное время и при ведении боевых действий необходимо также учитывать моральное состояние войск и общества. Картографический материал зачастую понятен любому, т. к. он нагляден и прост, а из этого следует возможность как информирования, так и манипуляции большим количеством людей. За время проведения СВО не раз наблюдалось использование непроверенных данных, как пример, наступление ВС РФ на Авдеевском участке было воспринято некоторыми Телеграмм-каналами как прорыв (Рис. 7). Непроверенная информация может навредить людям, которые не разбираются в обсуждаемой теме, а ложное восприятие информации может сложить негативное впечатление о возможностях ВС своей страны. Аналогичным образом это действует и на противника. В целом, если информационное поле содержит большое количество негативных новостей, это влияет на способность общества к борьбе, а наглядная информация с ГИС может служить рычагом давления на мнение людей.



Рис. 7. Авдеевское направление

IV. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ГИС ИЗВНЕ

Сетевая война предполагает большую роль информатизации и соответственно компьютеризации информации. Из этого вытекает необходимость сохранности данных. При взломе системы противник

может получить ценные, а иногда и секретные данные, что может сильно повлиять на ход боевых действий. Поэтому неслучайно армии различных стран проводят учения по кибербезопасности.

Возвращаясь к разговору о системах «DELTA» и «Крапива» следует отметить, что большая часть информации из них была получена благодаря действиям групп хакеров. Помимо этого, они утверждают, что в критически важные моменты имело место быть отключение системы разработчиками из-за поступивших заявлений о её взломе, что помогло нарушить управление в войсках противника.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Говоря о перспективах развития БПЛА, следует привести официальную оценку спроса на беспилотники до 2030 года, составляющую почти 1 трлн рублей согласно интервью ТАСС замглавы Минпромторга Василия Шпака в рамках форума «Армия-2023».

В отношении длительности действия БПЛА необходимо отметить, что в августе 2022 г. в Военно-воздушной академии им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина была создана система дозаправки БПЛА в полёте.

Разработанная российскими военными система позволяет производить дозаправку в любое время года и суток в автоматическом режиме. Дозаправку БПЛА будет осуществлять беспилотник-заправщик. В комплект запатентованной заправочной полётной системы входит оборудование как беспилотного заправщика, так и заправляемого БПЛА.

Изобретение позволит улучшить эффективность применения БПЛА, увеличит время их пребывания в воздухе, радиус боевого применения и массу полезной нагрузки при взлёте.

Использование ГИС сильнейшими армиями мира является результатом перехода к сетцентрической войне. При ведении боевых действий теперь также учитывается возможность получать актуальные данные, обновлять и манипулировать ими, эффективно использовать боевые единицы в системе управления боем, грамотно управлять подразделениями, когда время на ответную реакцию неминуемо сокращается.

Встаёт вопрос в безопасности таких систем, в которые занесена информация о своих войсках и о войсках противника, как результат нашей осведомленности. Также открываются возможности во взломе систем противника. В силу распространения информации большее внимание следует уделять на связи с общественностью. Решением данных вопросов приходится заниматься во время ведения

СВО. И правильное решение может спасти жизни и быстрее привести к разрешению конфликта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] М. Гудков и др. Новые технологии информационно-организационного процесса/Армейский сборник № 3 2022
- [2] С. Горбачёва. Спустя 18 лет с начала разработок воронежское «Созвездие» близко к старту поставок системы управления войсками/Бизнес-издание Абирег. URL: https://abireg.ru/n_71358.html (дата обращения: 13.11.2023)
- [3] В. Ковалев и др. Концепция «сетцентрической» войны для армии России: «множитель силы» или ментальная ловушка?/ Умные сети № 5, 2013, С. 40-45
- [4] НАТО обеспечивает Украину развединформацией. URL: <https://ria.ru/20221102/nato-1828622432.html> (дата обращения: 13.11.2023)
- [5] России нужен 1 млн разработчиков и операторов дронов/Ведомости 17 марта 2023 г. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/03/17/966901-rossii-nuzhen-1-mln-razrabotchikov-i-operatorov-dronov> (дата обращения: 13.11.2023)
- [6] Военные дроны в России/ TADVISER 13.11.2023. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%92%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%8B_%D0%B2_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8 (дата обращения: 13.11.2023)
- [7] Замглавы Минпромторга: производство беспилотников будет только расти/ Интервью ТАСС 22.08.2023 URL: <https://tass.ru/interviews/18551027> (дата обращения: 13.11.2023)
- [8] С.И. Безруков и др. Классификация беспилотных летательных аппаратов (в контексте современных войн в арабском мире). Научно-практический электронный журнал «Оригинальные исследования» (ОРИС) № 4, 2020. URL: https://ores.su/media/filer_public/13/ff/13ff0c83-e6e7-4e89-a258-06fc95685ce3/10_klassifikatsiia_bespilotnykh летательных аппаратов.pdf

USAGE OF GEOINFORMATION SYSTEMS IN MODERN ARMED CONFLICTS. INFLUENCE ON THE NATURE OF COMBAT OPERATIONS AND FEATURES OF INTERACTION WITH THE PUBLIC

Chukharev E.S.
Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
chukharev.e.s@edu.mirea.ru

Anufriev S.O.
Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
anufriev_s@mirea.ru

Abstract— The article examines satellite and unmanned terrain reconnaissance as a way to obtain spatial data for geographic information systems (GIS), and analyzes the advantages and disadvantages of various methods. Specialized GIS for military purposes and the impact of their use on the nature of modern military operations are also considered.

Keywords — geographic information system, long-range radar detection and control system, unmanned aerial vehicles, Unified tactical command system.

УДК 004.04

БИОМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ В ВС РФ

Петросян Л.Э.

«Информационные системы и цифровые технологии»
МГУТУ им. К.Г.Разумовского
Москва, Россия
l.petrosyan@mgutm.ru

Шенбергер А.А.

«Информационные системы и цифровые технологии»
МГУТУ им. К.Г.Разумовского,
Москва, Россия
shenberger.a@yandex.ru

Аннотация - С целью роста качественных характеристик и целостного развития служебной деятельности в ВС РФ министерство обороны Российской Федерации активно внедряет политику цифровизации. В рамках проводимой цифровизации присутствует введение биометрических технологий, которые подразумевают биометрию. Биометрия, в свою очередь, является оценкой характеристик человека, которые отличают его от других. Каждый человек получает индивидуальные параметры при рождении, а также формирует их по мере взросления. Для создания методов управления идентификаторами доступа используется ряд индивидуальных параметров или характеристик человека. В данном исследовании присутствует анализ процесса использования биометрических данных и технологий Министерством обороны РФ.

Ключевые слова: Министерство обороны, цифровые технологии, биометрическая идентификация.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие цифровых технологий ведёт к значительному росту количества данных. В то же время, осуществляется развитие носителей информации, а также появляются новые методы обработки. Все эти носители не дают полной гарантии защиты информации. Информационная безопасность является важной частью всех информационных систем. В связи с этим, актуальность демонстрирует вопрос организации мониторинга в отношении доступа к информации и различным ресурсам.

Принято различать такие системы контроля доступа, как:

- Считыватели штрих-кодов;
- Считыватели ключа «тач-мемори»;
- Кодонаборные устройства;
- Считыватели бесконтактных смарт-карт;
- Биометрические считыватели.

Чтобы достичь модернизации системы контроля управления доступом были сформированы специальные мероприятия, направленные на внедрение технологии биометрических данных со стороны Министерства обороны РФ. Система контроля и управления доступом - представляет собой комплекс программно-технических средств и организационно-методических мероприятий, назначением которых является контроль помещений, оперативный контроль перемещения персонала, управление доступом посещения помещений, зданий, зон

и территорий. Но, стоит отметить, что формирование специальной математической базы, а также прочие детали указывают на необходимость в повышении финансового обеспечения для данного направления. Однако, технологии, внедряемые в систему контроля управления доступом, не имеют возможности для работы на каждом из уровней жизнедеятельности ВС РФ.

I. БИОМЕТРИЯ В МИНИСТЕРСТВЕ ОБОРОНЫ

В настоящее время направлением, которое можно назвать ведущим, является использование технологий в процессе организации питания в столовые воинские части ВС РФ. Биометрическая идентификация, кроме вышеупомянутой области, используется в системе пропускного режима на контрольных пунктах, в частности, применяется ряд технических средств, среди которых:

Устройства, преграждающие управляемые (УПУ). Например, турникеты, двери, оборудованные управляемыми замками, ворота, шлагбаумы, шлюзы. Контроллеры СКУД. Электронные микропроцессорные модули, задачей которых является осуществление аутентификации объектов доступа, также они занимаются логикой авторизации для доступа в различные помещения, управление УПУ.

Чтобы осуществлять управление системами следует использовать оптимальное программное обеспечение, которое дает возможность для централизованного управления. Централизованное управление необходимо осуществлять с рабочих мест операторов. Задача внедрения биометрических систем в комплекс элементов контрольно-пропускного режима является сложно осуществимой на практике.

В современное время нет актуальных приказов в отношении использования биометрических данных для контроля доступа МО РФ. Если опираться на действительные законодательные акты РФ, выделяются в «Угрозах нарушения целостности (подмены, удаления), конфиденциальности (компрометации), достоверности при обработке и передаче биометрических данных»:

- между структурными подразделениями;
- возможности передачи информации в отношении соответствия, либо несоответствия биометрических данных физического лица тем данным, которые имеются в единой биометрической системе, при этом,

биометрические данные физического лица фиксируются на пользовательском оборудовании, обладающем идентификационным модулем физического лица;

- в рамках непосредственной идентификации данных физического лица;
- в процессе обработки данных, что входит в аутентификацию данных;
- в процессе обработки или хранения биометрических персональных данных, а также при оформлении или переносе данных в отношении соответствия, либо не соответствия информации биометрическим данным единой биометрической системе, кроме того в случаях взаимодействия с системой идентификации и аутентификации.

II. БЕЗОПАСНОСТЬ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Безопасность конфиденциальных данных достигается за счёт:

- использования мер технического и организационного характера, направленных на обеспечение мер безопасности в отношении персональных данных;
- использования персональных данных, содержащихся в машинных носителях;
- наличия возможности восстановления данных, которые были потеряны или изменены в виду получения незаконного доступа злоумышленниками;
- организации специальных правил доступа к данным, которые попадают в информационную систему и обрабатываются в ней, а также за счёт

наличия возможности для регистрации всех действий, которые совершаются пользователями;

- осуществление мониторинга мероприятий, направленных на повышение безопасности защиты данных и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно заключить, что биометрическая идентификация в ВС РФ используется в качестве новшества, что указывает на недолгосрочность сложностей с её правильным использованием на практике. Впоследствии, следует уделять внимание определению принципов работы с СКУД, а также заняться их законодательным подкреплением. Следует уделить внимание изменению параметров и требований, предъявляемых к применению биометрии. В настоящее время нельзя увидеть перспективы развития технологий системы контроля управления доступом, а также возможность их законодательного утверждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Приказ Министра обороны РФ от 21.06.2011 N 888 (ред. от 16.12.2020) "Об утверждении Руководства по продовольственному обеспечению военнослужащих Вооруженных Сил Российской Федерации и некоторых других категорий лиц, а также обеспечению кормами (продуктами) и подстилочными материалами штатных животных воинских частей в мирное время" (Зарегистрировано в Минюсте России 18.08.2011 N 21665)
- [2] Котляров А.Н. Биометрия. Москва: Издательство МГУ, 2005.

BIOMETRIC IDENTIFICATION IN THE ARMED FORCES OF THE RUSSIAN FEDERATION

Petrosyan L.E.

"Information systems and digital technologies"
MGUTU named after K.G.Razumovsky
Moscow, Russia
l.petrosyan@mgut.ru

Schoenberger A.A.

"Information systems and digital technologies"
MGUTU named after K.G.Razumovsky,
Moscow, Russia
shenberger.a@yandex.ru

Annotation - In order to increase the quality characteristics and holistic development of service activities in the Armed Forces of the Russian Federation, the Ministry of Defense of the Russian Federation is actively implementing a digitalization policy. As part of the ongoing digitalization, there is the introduction of biometric technologies that imply biometrics. Biometrics, in turn, is an assessment of a person's characteristics that distinguish him from others. Each person receives individual parameters at birth, and also forms them as they grow up. To create methods for managing access identifiers, a number of individual parameters or characteristics of a person are used. In this study, there is an analysis of the process of using biometric data and technologies by the Ministry of Defense of the Russian Federation.

Keywords: Ministry of Defense, digital technologies, biometric identification.

REALISTIC PLANETARY LANDSCAPE SIMULATION FOR SPACE EXPLORATION

Nosrati Mehrdad

Postgraduate student in the specialty “Design, construction, Production, Testing and Operation of Aircraft, Engineering and Technology Academy of the Southern Federal

University,

Taganrog, Russia

Nosrati.mehrdad.7@gmail.com

Abbasov Iftikhar B.

Doctor of Tech. Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Graphics and Computer Design, Engineering and Technology Academy of the Southern

Federal University,

Taganrog, Russia

Iftikhar_abbasov@mail.ru

Abstract — Space exploration is a fundamental human demand that make scientific advancement and expands our horizons. Accurate planetary simulations are crucial for preparing upcoming space missions. This study explores how Unreal Engine, a robust gaming platform, can be used to create lifelike planetary environments for space exploration simulations. It investigates the integration of real-world data from planetary missions and telescopic observations to replicate various celestial bodies. By seamlessly integrating empirical data, like topographic maps and atmospheric profiles, the research offers practical insights for generating high-resolution planetary terrains. Unreal Engine's integration of Digital Terrain Models (DTMs) enables the development of interactive simulations, facilitating exploration of distant planets and simulating space exploration challenges. This study shows potential in enhancing the precision and realism of simulations, thus aiding planetary environment simulation training and fostering public interest in space exploration.

Keywords — Simulations of Planetary Environments; Space Exploration; Mars Terrain; Planetary Topography.

INTRODUCTION

The exploration of outer space has always fascinated humanity, and with advancements in space technology, we are now entering the phase of sophisticated space missions. To prepare for these challenging endeavors, creating accurate simulations of planetary environments becomes essential. Simulators make it possible to operate in environments that have the physical characteristics of target locations without the expense of extensive physical testing[1]. Realistic simulations are crucial for Space explorer training, simulating mission scenarios, and understanding the complexities of space exploration. For simulation of a scenario in space missions, we can use Unreal Engine software. Unreal Engine is a game engine produced by Epic Games that is famous for its realistic and interactive 3D environments. The company has developed since 1998 and it has revolutionizing visual experiences in video games, movies and across platforms[2]. Today Unreal Engine transcends its gaming origins to become a versatile commercial game engine applied across architecture, film, TV, events, animation, automotive, and simulation. Chosen for its plugin compatibility, it introduces the innovative Blueprint visual scripting alongside traditional C++ coding, making it

accessible to a variety of users. This engine goes beyond its core features by integrating various plugins that seamlessly merge data and amplify its functionality, enhancing its appeal for a wide range of industries and developers[3]. In recent years, game development engines like Unreal Engine have emerged as potential tools for generating highly detailed and efficient planetary environments, which closely resemble actual conditions. Utilizing simulations like Unreal Engine for rovers in space exploration enhances mission efficiency, reduces risks and costs, improves decision-making, and provides valuable training and testing opportunities for rover operators and engineers. This paper presents a new approach that uses the capabilities of Unreal Engine to enhance space exploration simulations. Figure 1 illustrates a simulation of a Mars rover in Unreal Engine.



Fig.1. Playable Mars Rover, Customizable materials, 3 Wheel types, 4K Textures[4].

I. DATA INTEGRATION AND ENVIRONMENT DEVELOPMENT

a) Data Integration within Unreal Engine Simulation

Achieving scientific accuracy and authenticity in space exploration simulations relies on seamlessly integrating real-world data from space missions, telescopes, and planetary research. This integration draws from diverse sources such as high-resolution topographic maps, geological characterizations, and atmospheric profiles. In Unreal Engine it can be utilized as a terrain generation tool referred to as the Landscape Mode. This feature allows users to easily create worlds via importing source data or using terrain modification tools to sculpt a new landscape from scratch. Using this tool, terrain can be visualized from converted height maps.

Unreal Engine's Landscape Mode is an essential tool for creating and visualizing terrains in space exploration simulations. To comprehend its role in data integration, in the following will examine its basic aspects in detail:

IMPORTING SOURCE DATA

Unreal Engine plays a vital role in simplifying the integration of real-world data, like high-resolution topographic maps, into simulations. This process involves utilizing the data as height maps to define terrain elevation and incorporating it seamlessly within the simulation. Specifically, for celestial bodies like Mars and the Moon, which have undergone extensive study since the 1960s through various spacecraft, the engine necessitates special processing for ground data and depth measurements. The precise import of Digital Elevation Model (DEM) files through Geo Tiff maps or DEM files allows for the creation of highly detailed 3D models, enabling the rendering of intricate planetary features, such as craters, valleys, and mountains, with exceptional precision and clarity[5]. In Figure 2, an Image Mosaic and a high-resolution Topographic Map of the Moon are presented, while in Figure 3, a Digital Elevation Model (DEM) of the Moon is showcased. These real-world datasets are compatible with integration into Unreal Engine, providing an invaluable resource for developing immersive and accurate simulations.

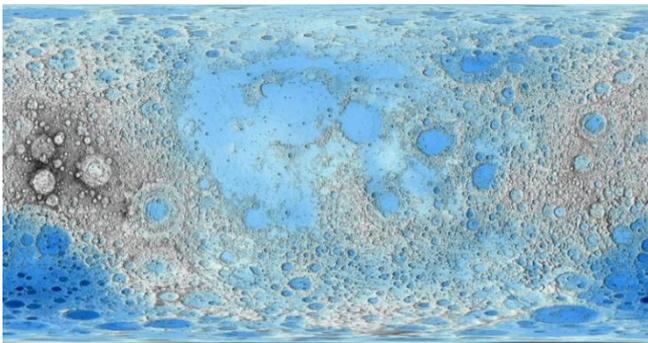


Fig.2. High-Resolution Moon Image Mosaic and Topographic Map provide by NASA's Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) spacecraft's Lunar Orbiter Laser Altimeter [6].

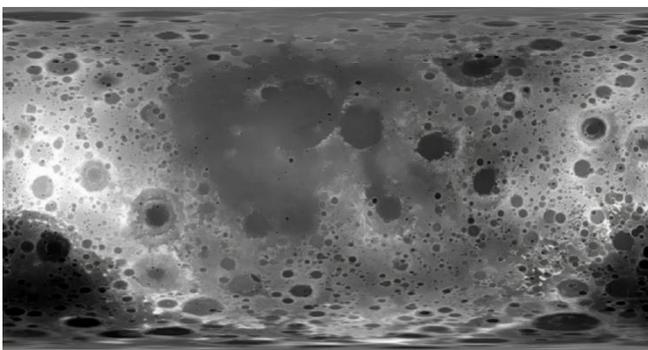


Fig.3. Digital Elevation Model of the Moon provide by NASA's Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) spacecraft's Lunar Orbiter Laser Altimeter [7].

VISUALIZING TERRAIN

Unreal Engine's capacity for visualization elevates simulation realism, employing textures, lighting management, and shading techniques that closely imitate real-world terrain appearances. It boasts a user-friendly interface for material creation, enhancing accessibility for shaders programming and producing impressive lighting effects in both real-time and pre-rendered scenarios. Notably, its built-in post-process effects further enrich the overall visual experience. While widely used for architectural visualizations, it is increasingly employed in the space exploration domain, enabling the development of captivating extraterrestrial landscapes and celestial bodies. Leveraging advanced graphics and physics engines, it simplifies the creation of diverse elements, such as alien terrains and otherworldly atmospheres. Real-time rendering facilitates the observation of these environments under varying lighting conditions, offering crucial insights for space exploration scenarios. Figure 4 illustrates a Visualizing of a Mars Terrain in Unreal Engine.



Fig.4. Visualizing Terrain of the Surface of Mars in Unreal Engine [8].

Here adaptability also extends to creating interactive simulations, enabling users to experience the surface of distant planets, navigate spacecraft, and simulate the challenges of space exploration missions.

Conversion of Height Maps:

Height maps, a practical representation of elevation data, find a smooth transition into 3D terrains within Unreal Engine. This simplifies the process of incorporating elevation data from sources like topographic maps, seamlessly creating a corresponding landscape within our simulation.

To accurately depict the elevation levels, ensure that the height map is saved in an appropriate format like a grayscale image (e.g., PNG, TIFF, BMP, or JPEG). This format represents elevation variations through the pixel brightness, with lighter shades indicating higher elevations and darker shades indicating lower ones[9]. Unreal Engine converts height maps into 3D terrains primarily through the "Landscape" tool. Through the tool, the importation of a height map triggers the automated generation of a corresponding 3D landscape, which is based on the grayscale values embedded in the height map. Figure 5 illustrates a Height Map of Mars.

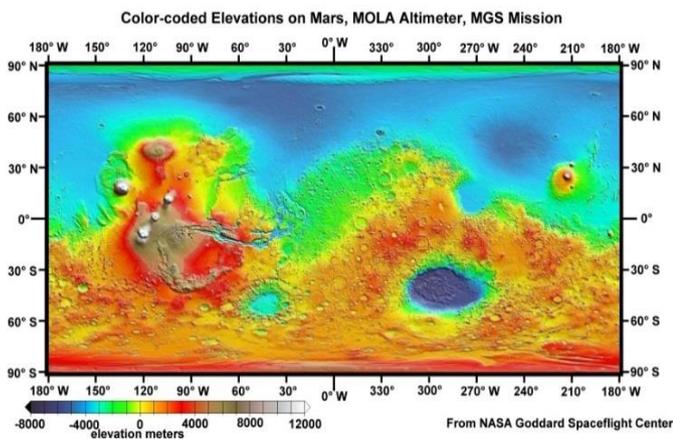


Fig.5. Image Mosaic and Topographic Map of the Mars, This map is based on data from the Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), NASA's Mars Global Surveyor (MGS) spacecraft[10].

Dynamic Atmospheric Profiles

Dynamic atmospheric profiles enable precise and scientifically accurate atmospheric simulations. Parameters such as air density, temperature, and atmospheric composition can be configured to reflect real-world conditions accurately[11]. Furthermore, this feature permits the simulation of atmospheric phenomena like scattering and refraction, enhancing the simulation's authenticity.

Texture Mapping

Texture mapping in Unreal Engine is a sophisticated 3D technique that leverages 2D texture maps to enhance mesh appearances through UV-coordinates projection, providing intricate pixel-based data to shaders. This technique allows for the incorporation of multiple texture maps within a single material for various purposes. Notably, it enables the creation of a highly detailed and realistic model of a planet like Mars, utilizing texture maps derived from the HiRISE camera to establish an expansive exploration area with a remarkable resolution of 1 meter per pixel. This process accounts for geological and topographical features extracted from real-world data, facilitating the creation of a comprehensive representation encompassing various textures, including rocks and soil.

b) Creating a Topography of the Surface of Mars in Unreal Engine by Digital Terrain Models

This section will demonstrate the process of generating the topography of Mars' surface in Unreal Engine. Figure 8 illustrates Pitted Cones in the Utopia Planitia region.

To start the first step prepare a obtain digital terrain models (DTMs) from reliable sources like NASA, JPL-Caltech, or other reputable space agencies. These DTMs provide detailed elevation data of the desired real-world terrain. Once acquired, it should be extract the height map from the DTM data. These elevation maps are a grayscale image where white color represents the highest points and black color represents

the lowest elevation points of the earth. Image processing software can be used to create this height map. After, create a new project in Unreal Engine, choose an appropriate template that suits our project's requirements, such as a Third-Person or First-Person template. In the Content Browser, create a new Landscape and import the previously prepared height map. Unreal Engine will use this height map to generate a 3D terrain. It is crucial to adjust the scale and resolution of the landscape to match the real-world dimensions of the terrain while fine-tuning these settings to achieve the desired level of detail and accuracy. For further realism, should be obtain real-world texture data like satellite imagery or high-resolution photos that correspond to the terrain we are recreating. Then import the texture and apply it to the landscape, resulting in a realistic representation of the environment. Using Unreal Engine's Landscape Sculpting tools, after add details, sculpt hills and valleys, and create realistic geological features, customizing the terrain to match the characteristics of the real-world environment. With further enhance realism by populating the terrain with stones and rocks, or other props, utilizing Unreal Engine's extensive library of assets, or importing custom assets. To achieve an authentic atmosphere, it can configure dynamic lighting and atmospheric effects that match the lighting conditions and atmospheric characteristics of the real planet terrain. Throughout the process, it is crucial to regularly test the environment to ensure it meets visual and performance expectations. Optimization of the terrain and assets may be necessary to achieve smooth performance across various hardware configurations. Importing and creating real-world height maps can be an iterative process. Continuous feedback gathering, adjustments, and refinement are essential until the desired level of realism and accuracy is achieved. Once satisfied with the results, the environment can be utilized for various purposes, such as space exploration simulations, education, or entertainment.

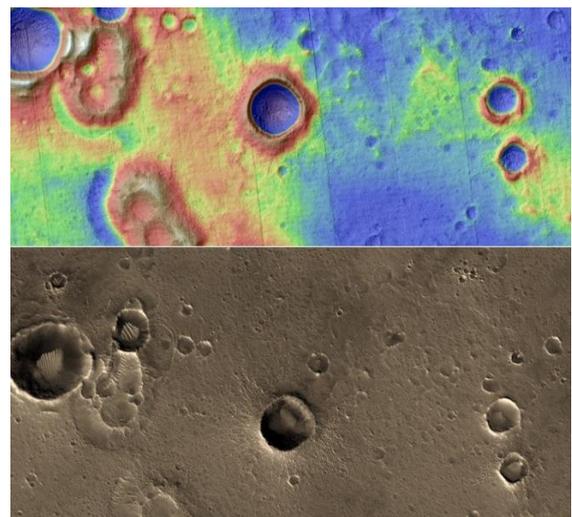


Fig.6. Mars Latitude 28.51°- Longitude 96.74°_Map - North Azimuth270° Pitted Cones in Utopia Planitia (NASA/JPL-Caltech/UArisona)[12].

CONCLUSION

This research has highlighted the impressive capabilities of Unreal Engine as a versatile and dynamic tool for crafting intricate and precise planetary environments conducive to space exploration simulations. By seamlessly integrating real-world data, the engine enables the creation of lifelike terrains, serving as a crucial platform for mission planning, instrument testing, and rover operation in extraterrestrial landscapes. The outlined step-by-step process has illuminated how Unreal Engine adeptly reproduces the intricate topography and atmospheric complexities of planets like Mars, significantly enhancing the accuracy and fidelity of space exploration simulations. This study not only contributes to the practical application of gaming technology in the domain of space science but also lays the groundwork for the development of interactive and captivating simulations that engender public fascination and cultivate a deeper understanding of the marvels of space exploration. As we look ahead, the potential applications of Unreal Engine in space exploration simulations are boundless. It offers not only a vital tool for rigorous training and mission planning but also a captivating medium to engage and educate individuals of all ages about the intricacies and challenges of exploring the universe. This research forms a stepping-stone for further advancements, encouraging ongoing exploration and innovation in the field of space science, and nurturing a deeper appreciation for the boundless mysteries and opportunities that space exploration has to offer.

References

- [1] Xie, Y., Z. Tang, and A. Song, *Motion Simulation and Human–Computer Interaction System for Lunar Exploration*. Applied Sciences, 2022. **12**(5): p. 2312.
Усманов, Д. С. Трофимов // Наукоемкие технологии. – 2020. – № 1. – С. 22–29. DOI 10.18127/j19998465-202001–04.
- [2] Greenwood, M.S.a.S., Michael B., *Method for Visualizing Radiation Data using Unreal Engine*. United States: N. p., Web. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1765492>, 2020.
- [3] Rantanen, T., et al., *Open Geospatial Data Integration in Game Engine for Urban Digital Twin Applications*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2023. **12**(8): p. 310.
- [4] LemmoLab, *Space Scientific Rover, Playable Mars Rover. Customizable materials. 3 Wheel types. 4K Textures. Ready to use as a Pawn*. 2021.
- [5] Lütjens, M., et al., *Virtual reality in cartography: Immersive 3D visualization of the Arctic Clyde Inlet (Canada) using digital elevation models and bathymetric data*. Multimodal Technologies and Interaction, 2019. **3**(1): p. 9.
- [6] By T.M., H., R.K., Blue, J.S., Archinal, B.A., Robinson, M.S., Speyerer, E.J., Wagner, R.V., Smith, D.E., Zuber, M.T., Neumann, G.A., and Mazarico, E, *Image mosaic and topographic map of the moon: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3316, 2 sheets*, <https://dx.doi.org/10.3133/sim3316>. 2015.
- [7] LOLA Science Team, G.S.F.C., *Create a preliminary elevation model for the Moon*. https://astrogeology.usgs.gov/search/details/Moon/LRO/LOLA/Lunar_LRO_LOLA_Global_LDEM_118m_Mar2014/cub. March 2014.
- [8] Jacobs, T., *Mars Landscape, based upon real satellite data*, <http://millionviews.com/v7/>). 2021.
- [9] Ondelettes, C.B., *WAVELET BASED DATA HIDING OF DEM IN THE CONTEXT OF REALTIME 3D VISUALIZATION*.
- [10] USGS Astrogeology Science Center, G.S.F.C., NASA, *Mars Global Surveyor: MOLA MEGDRs, Planetary Data System Geosciences Node*, https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Mars/GlobalSurveyor/MOLA/Mars_MGS_MOLA_ClrShade_merge_global_463m March 2003.
- [11] Sørensen, J.V., Z. Ma, and B.N. Jørgensen, *Potentials of game engines for wind power digital twin development: an investigation of the Unreal Engine*. Energy Informatics, 2022. **5**(4): p. 1-30.
- [12] NASA/JPL-Caltech/UArizona , H.O.C., *High Resolution Imaging Science Experiment*, https://www.uahirise.org/ESP_048894_2090, 2016.

УДК 681.518

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К МОБИЛЬНОМУ ПРИЛОЖЕНИЮ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ЕДИНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ

Машинистов Ф.Б.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра геоинформационных систем
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
mashinistov.f.b@edu.mirea.ru

Ануфриев С.О.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра геоинформационных систем
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
anufriev_s@mirea.ru

Аннотация — Данная работа посвящена разработке требований к мобильному приложению, предназначенному для развития Единой электронной картографической основы (ЕЭКО). ЕЭКО играет важную роль в геоинформационных системах, служит юридически значимой картографической «подложкой» в географических информационных системах (ГИС), предоставляет исходные данные для производных продуктов и качественного исполнения органами власти своих полномочий. Цели разработки включают наполнение ЕЭКО точной информацией, редактирование пространственных данных, увеличение частоты их обновления, возможность применения метода краудсорсинга для внесения актуальных данных, а также обеспечение реализации других проектов на основе ЕЭКО, что в конечном итоге привлечет большее количество пользователей к проекту ЕЭКО. Эти усовершенствования направлены на привлечение большего числа пользователей к проекту ЕЭКО и обеспечение его устойчивого развития.

Ключевые слова — ЕЭКО, мобильное приложение, краудсорсинг, геоданные, картография

ВВЕДЕНИЕ

В современном обществе, на фоне стремительного технологического развития, обеспечение доступа к геоинформационным данным становится ключевой задачей и потребностью для государственных органов, бизнеса и обычных граждан. Особенно актуальной эта проблема становится в условиях стремления к импортозамещению и внедрения последних научных достижений. В рамках национальной программы "Цифровая экономика Российской Федерации" Росреестр инициировал создание Единой электронной картографической основы – систематизированной базы пространственных данных о всей территории России, включающей ортофотопланы и топографические карты.

В связи с тем, что с 01.04.2024 года вступят в силу положения ФЗ от 04.08.2023 №491-ФЗ [1], ЕЭКО будет являться картографической основой государственных геоинформационных систем. Кроме того, органы

государственной власти и органы местного самоуправления, а также подведомственные им организации будут обязаны использовать российские геоинформационные технологии, геоинформационные системы и геоинформационные средства, соответствующие требованиям к российским геоинформационным технологиям, геоинформационным системам геоинформационным средствам, и их разработчикам.

На конец 2022 года, согласно данным Росреестра, покрытие ЕЭКО достигло 51,1% территории России (Табл. 1).

ТАБЛИЦА I. Наполнение Единой электронной картографической основы

Территория	Масштабы
Вся Россия	от 1:2 500 000 до 1:50 000
Территории с высокой плотностью населения	1:25 000
Значительные территории населенных пунктов и агломераций	1:10 000 и 1:2 000
97% территории Москвы	Мультимасштабное покрытие

Этот значительный шаг к импортозамещению подчеркивает стремление к суверенному обеспечению страны геоинформационными ресурсами. Однако, чтобы эффективно реализовать эту задачу, необходимо не только следовать установленному плану, но и внедрять инновационные подходы.

Наш проект направлен на разработку мобильного приложения, которое не только соответствует плану Росреестра, но и внедряет дополнительные функционал, включая WEB-интерфейс для более точного редактирования векторных объектов. Важно отметить, что данные, размещенные на нашем проекте, не обладают юридической силой и рассматриваются как информация, предоставленная в удобоваримом формате и структуре, согласно стандартам ЕЭКО. Проект является средством обогащения данных ЕЭКО, предоставляя пользователям удобный и эффективный способ внесения актуальной информации в картографическую основу. После успешного прохождения модерации, предоставленные данные будут приобретать юридическую значимость в контексте использования в рамках проектов, основанных на ЕЭКО. С учетом стремления к обширному вовлечению общества в формирование геоинформационных данных, в приложении будет использоваться метод краудсорсинга [2.3]. Этот подход позволит пользователям активно участвовать в наполнении базы данных, обеспечивая ее актуальность и широкое покрытие. Таким образом, наш проект не только улучшит доступность геоданных, но и станет инструментом для взаимодействия и вовлечения общества в процесс обогащения данных о территории России.

I. ОБОСНОВАНИЕ

Современные технологии картографии и геоинформационных систем предоставляют разнообразные решения для пользователей, включая мобильные приложения и веб-интерфейсы. Разнообразие доступных ресурсов подчеркивает важность анализа и сопоставления этих средств для обеспечения оптимального выбора при разработке новых геоинформационных проектов.

Существующие мобильные приложения и веб-интерфейсы для картографии и ГИС обладают как своими преимуществами, так и недостатками. Среди преимуществ выделяется удобство использования, широкий функционал и доступность. Однако, многие из них ограничены в возможностях редактирования пространственных данных и внесения собственных изменений в картографическую основу. Некоторые приложения также ограничены географической областью покрытия или имеют ограниченные средства интеграции.

В разработке нашего геоинформационного проекта выделяется критическая потребность в интегрированном подходе, объединяющем функциональность мобильного приложения и WEB-интерфейса. Эта необходимость обусловлена различием в возможностях и преимуществах каждой из платформ, что дает уникальные возможности для более полного и эффективного использования данных.

WEB-интерфейс выступает как инструмент точного редактирования отображения векторных объектов на карте. Его преимущества заключаются в более крупных экранах и богатых интерфейсах, что обеспечивает пользователям более высокую точность и удобство при внесении географических данных. Возможность детального редактирования геопространственных объектов через WEB-интерфейс существенно повышает качество и точность внесенной информации.

С другой стороны, мобильное приложение фокусируется на редактировании атрибутивной информации объектов. Благодаря удобству мобильных устройств, пользователи получают возможность мгновенного доступа к данным на месте события и могут оперативно обновлять атрибутивные характеристики объектов и метаданные (общие, геодезической и гравиметрической, фотограмметрической и картографической информации), необходимые для формирования пакета метаданных электронных (цифровых) карт (рис. 1). Это особенно важно в условиях проведения полевых работ и сбора данных в реальном времени.

Интеграция этих двух платформ в рамках единого проекта позволит наилучшим образом использовать их сильные стороны, создавая комплексное решение для пользователей. Такой подход удовлетворяет разнообразные потребности пользователей и оптимизирует процесс сбора, редактирования и обновления геоинформационных данных, обеспечивая их высокую актуальность и точность.

В контексте стратегии импортозамещения, важно отметить, что многие иностранные сервисы могут быть ограничены в использовании из-за юридических тонкостей и соображений безопасности. В связи с этим, инновационные решения, разрабатываемые внутри страны, не только уменьшают зависимость от иностранных технологий, но и адаптируются к специфическим потребностям российских пользователей и законодательства.



Рис. 1. Виды метаданных

Такой интегрированный подход, основанный на внутренних разработках, не только способствует обеспечению безопасности данных, но и стимулирует технологическое развитие.

II. ТРЕБОВАНИЯ К МОБИЛЬНОМУ ПРИЛОЖЕНИЮ И WEB-ИНТЕРФЕЙСУ

а. Функциональные требования:

Целью нашего мобильного приложения и WEB-интерфейса является активное наполнение Единой Электронной Картографической Основы (ЕЭКО) актуальной и точной информацией. Пользователи мобильного приложения смогут эффективно редактировать атрибутивные данные объектов, обновляя информацию в реальном времени. В то же время, WEB-интерфейс предоставит возможность детального редактирования отображения векторных объектов на карте, обеспечивая высокую степень точности в геопространственных данных.

Мобильное приложение предоставит удобный и интуитивно понятный интерфейс для редактирования атрибутивных характеристик объектов на месте события. WEB-интерфейс же дополнительно предоставит возможность точного редактирования геометрии векторных объектов. Такой интегрированный подход обеспечит полный спектр возможностей по внесению изменений в геоинформационную систему.

Одним из ключевых требований является повышение частоты обновления данных. Мобильное приложение и WEB-интерфейс будут ориентированы на оперативное внесение изменений и обновление информации. Это позволит обеспечить высокую актуальность данных, что крайне важно для эффективного использования геоинформационных ресурсов.

Обеспечение актуальности и полноты данных будет поддерживаться внедрением методов краудсорсинга. Пользователи приложения смогут активно участвовать в процессе сбора и обновления данных, делая систему более динамичной и отзывчивой на изменения в окружающей среде.

б. Технические требования:

Мобильное приложение будет разработано для операционной системы Android, обеспечивая широкий охват аудитории пользователей с устройствами на данной платформе.

Важным аспектом является интеграция с существующими геоинформационными системами (ГИС). Приложение и WEB-интерфейс должны взаимодействовать с уже используемыми платформами, обеспечивая совместимость данных и эффективный обмен информацией.

WEB-интерфейс будет обладать функциональностью векторного рисования для более точного и детального редактирования отображения векторных объектов на карте на основе ортофотопланов, предоставляемых ЕЭКО. Это дополнительное средство инструментов для пользователя, которое значительно улучшит процесс внесения изменений в геоинформационную систему.

III. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

Архитектура мобильного приложения будет основана на использовании языка программирования Kotlin, предоставляя высокую производительность и удобство

разработки. Ключевые компоненты включают в себя модули для редактирования атрибутивной информации и взаимодействия с геоданными. WEB-интерфейс разработан с использованием технологий HTML, CSS и JS, обеспечивая удобное и интуитивно понятное взаимодействие пользователя с системой.

Поддержка базы данных осуществляется с использованием PostgreSQL с расширением PostGIS для обеспечения хранения и эффективного запроса геоданных. Взаимодействие с серверами ГИС осуществляется через стандартные протоколы, обеспечивая плавный обмен информацией между приложением и геоинформационной системой. С помощью базы данных будет осуществляться связь информации между WEB-интерфейсом и мобильным приложением.

База данных реализована на основе PostgreSQL с расширением PostGIS для геоданных. Структура БД соответствует структуре ЕЭКО, обеспечивая удобство интеграции с существующими данными. Это включает в себя таблицы для хранения пространственных и атрибутивных данных, а также механизмы обеспечения целостности и безопасности данных.

Архитектурное решение направлено на обеспечение высокой производительности и масштабируемости системы. Использование Kotlin для мобильного приложения и стандартных технологий веб-разработки для интерфейса позволяет эффективно управлять ресурсами и обеспечивать отзывчивость системы при работе с геоинформационными данными.

Методы краудсорсинга интегрированы в обе платформы для активного вовлечения пользователей в сбор и обновление данных. В мобильном приложении предусмотрены удобные средства для внесения изменений на месте, в то время как WEB-интерфейс предоставляет более широкие возможности для участия сообщества в геоинформационном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В завершение проекта можно отметить его вклад в развитие Единой Электронной Картографической Основы (ЕЭКО). Мобильное приложение и WEB-интерфейс, разработанные в рамках инициативы, предоставляют эффективные инструменты для наполнения ЕЭКО точной информацией, редактирования пространственных данных и активного вовлечения пользователей через методы краудсорсинга.

Значимость предложенных решений проявляется в повышении частоты обновления данных, обеспечении актуальности информации и создании удобных средств для внесения изменений. Мобильное приложение, построенное на языке Kotlin, и WEB-интерфейс, использующий стандартные технологии веб-разработки, гармонично взаимодействуют, обеспечивая пользовательский комфорт и эффективность.

Эти достижения предоставляют перспективы для использования разработанных решений в других проектах, основанных на ЕЭКО. Представленный опыт и технологическая база могут быть успешно

масштабированы и адаптированы для различных геоинформационных задач, внося значительный вклад в цифровую трансформацию в области картографии и геоинформационных систем. В целом, наш проект не только улучшает функциональность ЕЭКО, но и становится перспективным фундаментом для будущих инновационных геоинформационных исследований и разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Федеральный закон от 04.08.2023 № 491-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "О геодезии,

картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" и отдельные законодательные акты Российской Федерации"

Ануфриев С.О. Краудсорсинг в сфере геодезии, картографии и пространственных данных. Журнал «Интернаука». 2020. № 40-1 (169) С. 30-32.

[13] Ануфриев С.О., Ануфриев О.С., Митрофанова С.Г. Геоинформационный краудсорсинг в учебном процессе. Журнал «Научный аспект» № 1-2023. С. 717-721.

EVELOPMENT OF SOFTWARE REQUIREMENTS FOR A MOBILE APPLICATION FOR THE EXTENTION OF A UNIFIED ELECTRONIC CARTOGRAPHIC FRAMEWORK

Mashinistov F.B.
Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
mashinistov.f.b@edu.mirea.ru

Anufriev S.O.
Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
anufriev_s@mirea.ru

Abstract— This paper is devoted to the development of requirements for a mobile application intended for the development of the Unified electronic cartographic framework (EECO). EECO plays an important role in geographic information systems, serves as a legally significant cartographic “substrate” in geographic information systems (GIS), provides source data for derivative products and the high-quality execution by authorities of their powers. Development goals include filling the EEKO with accurate information, editing spatial data, increasing the frequency of their updating, the possibility of using the crowdsourcing method to enter current data, as well as ensuring the implementation of other projects based on the EEKO, which will ultimately attract more users to the EEKO project. These improvements are aimed at attracting more users to the EECO project and ensuring its sustainable development.

Keywords — crowdsourcing, geodata, mobile application, mapping

УДК 614.842; 630*96

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОГ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОСЕТИ U-NET И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ OSM В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ

Кокуркин А.Д.

Институт радиоэлектроники и информатики,
Кафедра геоинформационных систем
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
alexandr.kokurkin@gmail.com

Подольская Е.С.

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов
Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН),
Институт радиоэлектроники и информатики,
Кафедра геоинформационных систем
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
ekaterina.podolskaia@gmail.com

Аннотация — Дешифрирование изображения дорог различных классов представляет актуальный интерес для многих исследовательских направлений. Подавляющее большинство методов распознавания дорог основывается на использовании съемки сверхвысокого пространственного разрешения, доступ и стоимость материалов которой являются ограничивающими параметрами выбора. В статье изучаются возможности архитектуры U-Net для распознавания дорог по космическим снимкам Sentinel-2 в Красноярском крае. Описываются результаты использования классической архитектуры, а также ее модификаций с предобученными энкодерами. Для оценок точности моделей применялись метрика IoU и набор данных обучающей выборки. Согласно полученным результатам, наилучшим результатом по соотношению точности и времени обучения является U-Net и EfficientNetV2B2 encoder со значением метрики 0.84. Для продолжения работы планируется изучение узконаправленных архитектур, предназначенных для распознавания дорог, а также их комбинаций с U-Net. Использование нейросети для распознавания дорог является частью проектов по транспортному моделированию наземного доступа в леса с целью актуализации графа дорог, по которому строятся маршруты движения.

Ключевые слова — сверточные нейронные сети; U-Net; EfficientNet; EfficientNetV2; ResNet50; ГИС; ДЗЗ; дорожная сеть.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы публикуется большое количество работ, посвященных автоматизации дешифрирования многих категорий объектов [1]. Тем не менее, возможность обнаружения таких сложных объектов, как дорожные сети, по-прежнему во многом зависит от пространственного разрешения используемых изображений [2]. Чем выше пространственное разрешение, тем легче обнаружить объекты сложной формы. В подавляющем большинстве работ для распознавания дорог используется съемка уровня разрешения порядка менее 1 м, работы с использованием изображений высокого разрешения (порядка 10 м) не столь многочисленны [3]. Известно, что

повышение пространственного разрешения материалов съемки приводит к увеличению их стоимости и ограничивает применимость.

Европейские данные дистанционного зондирования являются доступным источником данных для геоинформационных проектов благодаря программе Copernicus, которая контролируется и управляется Европейской комиссией в партнерстве с Европейским космическим агентством (ЕКА). Такие данные доступны бесплатно для некоммерческого использования на условиях лицензии открытого доступа. В рамках программы ЕКА в настоящее время разрабатываются программы миссии по мониторингу Земли Sentinel. В данной работе используются материалы спутниковой съемки Sentinel-2 (S2), которая включает в себя мультиспектральный датчик, обеспечивающий получение оптических изображений, состоящих из тринадцати диапазонов (bands). Каналы с самым высоким пространственным разрешением - Red, Green, Blue и NIR (10м). Следует отметить, что S2 позволяет проводить повторные съемки каждые 5 дней на экваторе и каждые 2–3 дня в средних широтах, что позволяет использовать данный продукт для мониторинга природных и антропогенных явлений и процессов.

В предлагаемой работе набор данных был создан вручную на основе изображений Sentinel 2 и векторных данных по дорогам OpenStreetMap (OSM). OSM широко используется для маркировки данных дистанционного зондирования, известны работы, показывающие, что OSM является сравнительно точным открытым источником данных [4]. Кроме того, ошибок в разметке дорог меньше, чем, к примеру, в разметке зданий. Точность обученных моделей измерялась метрикой IoU, которая используется в задачах семантической сегментации изображений для работы с нейросетями.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АРХИТЕКТУРЫ

Сегментация дорог проводилась с использованием популярной архитектуры U-Net, предложенной в 2015 году для решения задачи обнаружения контуров на микрофотографиях биологических препаратов [5] (рис. 1).

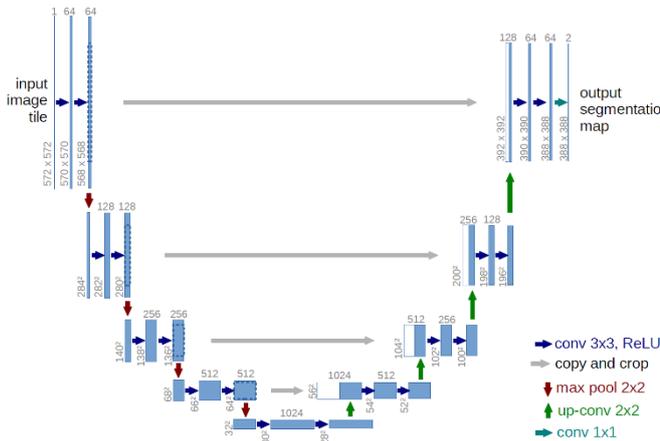


Рис. 1. Оригинальная архитектура U-Net

Каждый синий прямоугольник на Рис. 1 является многоканальной картой признаков распознаваемых объектов. Размер каждой карты и количество каналов (фильтров) указаны рядом с каждым прямоугольником. Операции над данными обозначены стрелками. Сеть U-Net содержит сжимающий изображение путь (энкодер) и расширяющий путь (декодер), и её архитектура похожа на букву U (что и отражено в названии). Сжимающий путь — свёрточная сеть, в которой последовательно чередуются свёртки и линейные выпрямители (ReLU) с оператором извлечения максимальных весов (MaxPooling). Прохождение данных по пути сжатия увеличивает количество информации о признаках (количество фильтров), снижая количество пространственной информации. Сжимающий путь похож на типичную свёрточную сеть: он содержит свёрточные слои со свёртками 3×3 , после которых результат свёртки обрабатывается с помощью функции активации ReLU, а затем поступает на вход объединяющего слоя, на котором вычисляется значение максимума по каждому фрагменту карты размером 2×2 . Расширяющий путь использует серии свёрток и конкатенаций с многомерными признаками сжимающего пути.

Каждый блок расширяющего пути содержит слой, обратный объединяющему, с конкатенацией с картой признаков из сжимающего пути и снова два подряд свёрточных слоя со свёртками 3×3 , после каждого из которых опять вычисляется функция ReLU. Пропускающие соединения (skip-connections) необходимы для комбинирования пространственной и признаковой информации. На последнем слое свёртка 1×1 используется для формирования из каждого полученного вектора признаков требуемого количества выходных классов [6].

Частым вариантом дополнения классической архитектуры U-Net является замена оригинального энкодера на какую-либо другую свёрточную сеть. В пакете Keras (<https://keras.io/>) доступно множество таких энкодеров, в дополнение к этому они заранее предобучены на датасете ImageNet. Теоретически использование предобученных энкодеров поможет быстрее по времени достигнуть минимума функции ошибки и максимума метрики точности.

Одним из вариантов такого предобученного энкодера является ResNet50 [7]. Когда более глубокая сеть начинает «сворачиваться», возникает следующая проблема: с увеличением глубины сети точность сначала увеличивается, а затем быстро ухудшается. Снижение точности обучения показывает, что не все сети легко оптимизировать. Чтобы преодолеть эту проблему, Microsoft ввела глубокую «остаточную» структуру обучения. Вместо того, чтобы надеяться на то, что каждые несколько stacked layers непосредственно соответствуют желаемому основному представлению, они явно позволяют этим слоям соответствовать «остаточному». Формула $F(x) + x$ может быть реализована с помощью нейронных сетей с соединениями для быстрого доступа. Соединения быстрого доступа (shortcut connections) пропускают один или несколько слоев и выполняют сопоставление идентификаторов. Их выходы добавляются к выходам stacked layers. Принцип работы соединений быстрого доступа показан на Рис. 2.

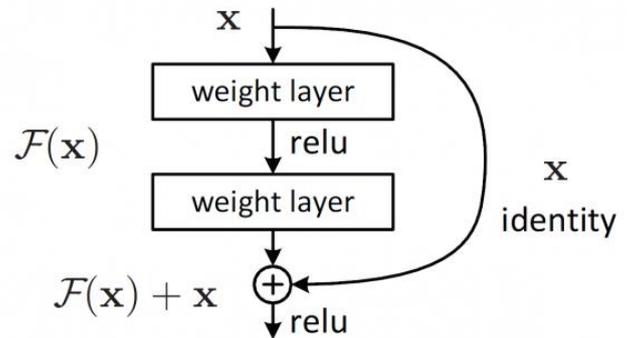


Рис. 2. Архитектура блока свёртки с использованием shortcut connections

Используя ResNet, можно решить следующие задачи:

- ResNet относительно легко оптимизировать: «простые» сети (которые просто складывают слои) показывают большую ошибку обучения, когда глубина увеличивается;
- ResNet позволяет относительно легко увеличить точность благодаря увеличению глубины, чего с другими сетями добиться сложнее [8].

Еще одним вариантом предобученного энкодера могут являться архитектуры EfficientNet [9] и EfficientNetV2 [10]. EfficientNet — это класс новых моделей, который получился из изучения масштабирования (скейлинг, scaling) моделей и балансирования между собой глубины и ширины (количества каналов) сети, а также разрешения изображений в сети. Авторы статьи предлагают метод составного масштабирования (compound scaling method), который равномерно масштабирует глубину/ширину/разрешение с фиксированными пропорциями между ними. Иллюстрация одновременного увеличения точности и сокращения количества тренировочных параметров (соответственно, и времени обучения) представлена рис. 3.

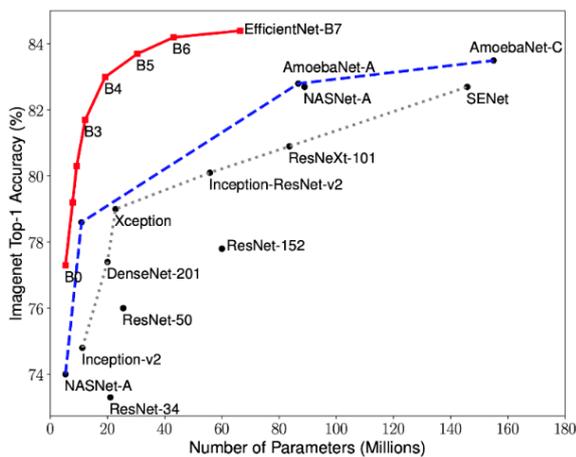


Рис. 3. Сравнительные характеристики семейства сетей EfficientNet

В свою очередь класс моделей EfficientNetV2 является логическим продолжением EfficientNet. Далее в работе будет представлено сравнение точности и времени обучения следующих указанных выше архитектур – Unet, Unet + ResNet50 encoder, Unet + EfficientNetB2 encoder, Unet + EfficientNetV2B2 encoder.

II. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве данных для обучения, валидации и тестирования точности нейросетей, были взяты 5391 спутниковых изображений (256x256) системы Sentinel-2 L1C от 2023-07-10 на юг территории Красноярского края. Данные были разбиты по соотношению 80-10-10 как тренировочная, валидационная и тестовая выборка. Тренировочная выборка посредством аугментации (раздутия) данных была увеличена в 8 раз.

При компиляции моделей использовался алгоритм оптимизации градиентного спуска Adam с learning rate = 0.001. Функция ошибки – это бинарная кросс-энтропия, метрикой точности для обучения был выбран коэффициент Дайса. Количество эпох обучения равно 50. Сравнительные графики функции ошибки и метрики точности представлены на Рис. 4-5.

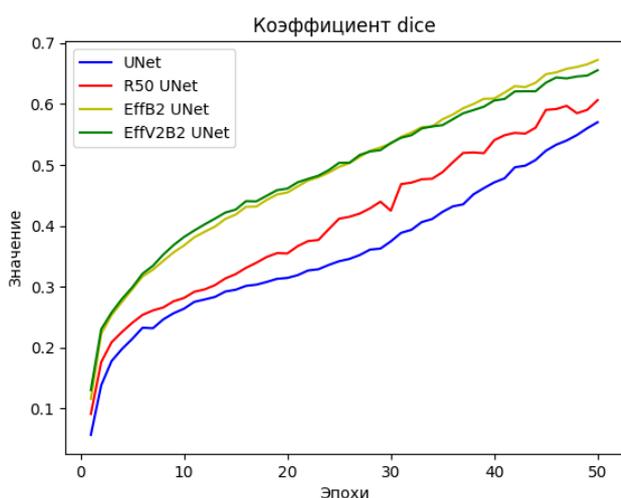


Рис. 4. График значений метрики точности

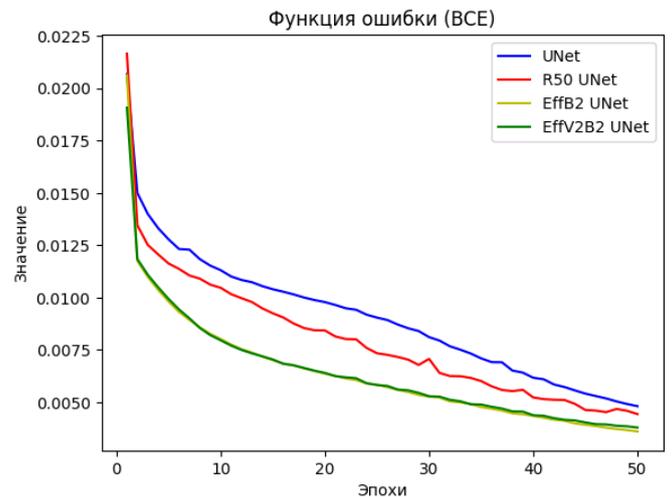


Рис. 5. График значений функции ошибки

Обучение моделей производилось на локальной машине, на графическом процессоре NVidia Geforce Gtx 1080 Ti 11Gb. Время обучения каждой из моделей (часы):

- Unet – 22.63;
- Unet + ResNet50 encoder – 20.67;
- Unet + EfficientNetB2 encoder – 20.53;
- Unet + EfficientNetV2B2 encoder – 16.16.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что использование предобученных энкодеров как модификации к классической архитектуре U-Net, помогает быстрее (и относительно количества эпох обучения, и относительно времени обучения модели) достичь минимального значения функции ошибки и наибольшего значения метрики точности.

Для измерения точности моделей использовались, как было указано выше, метрика IoU и набор данных тестовой выборки. Получены следующие средние значения метрики IoU для набора данных тестовой выборки:

- Unet - 0.76;
- Unet + ResNet50 encoder – 0.67;
- Unet + EfficientNetB2 encoder - 0.84;
- Unet + EfficientNetV2B2 encoder – 0.82.

Промежуточный вывод – наиболее оптимальной с точки зрения соотношения точности и времени обучения показала себя архитектура UNet + EfficientNetV2B2 encoder. Такие высокие показатели точности могут быть достигнуты за счет того, что валидационная, тестовая и тренировочная выборка – это, по сути, части одного и того же спутникового изображения, следовательно, дешифровочные признаки будут схожими, и точность определения данных тестовой выборки будет снижаться не столь значительно.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Архитектура UNet и представленные ее модификации хорошо показали себя в задаче распознавания дорог по снимкам уровня разрешения 10 м. Одним из факторов такой высокой точности может являться специфика датасета обучения OSM. Из-за этого модели лучше всего “подстроились” под распознавание асфальтированных

дорог регионального и местного значения. В свою очередь, такие дороги лучше распознаются и автоматически, и визуально, чем сельские и проселочные.

В качестве дополнительных модификаций могут быть внедрены некоторые приемы и инструменты [11], связанные с настройкой гиперпараметров обучения нейронной сети, использование которых может существенно повысить точность распознавания.

Также существуют и архитектуры, предложенные целенаправленно для распознавания дорог: SPIN Road Mapper [12], D-LinkNet [13] и др. Комбинируя элементы базовых архитектур, таких как UNet, и узконаправленных, например, SPIN Road Mapper, можно будет построить наиболее оптимальную архитектуру для такой узкой задачи.

Еще одним направлением изучения может стать использование Vision Transformers [14] – решения, способного представить вариант замены использования сверточных сетей как класса для компьютерного зрения и сегментации изображений.

Представленный пример использования возможностей технологии нейросетей планируется использовать для дополнения и актуализации набора данных дорожной сети OSM для транспортного моделирования наземного доступа к лесным пожарам и ресурсам леса. Обзор современных программных инструментов с открытым кодом для распознавания дорог дан в работах [2,15].

Благодарности. Исследование проведено в рамках темы Государственного задания ЦЭПЛ РАН «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем», регистрационный номер № 121121600118-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [14] Zhu X. X., Tuia D., Mou L., Xia G., Zhang L., Xu F., Fraundorfer F., Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2017. pp. 8-36.
- [15] Подольская Е. С. Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса для распознавания изображения дорог в лесном хозяйстве // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 4. С. 1-21. DOI 10.31509/2658-607x-202252-115
- [16] Hoeser T., Kuenzer C. Object Detection and Image Segmentation with Deep Learning on Earth Observation Data: A Review-Part I: Evolution and Recent Trends. Remote Sensing. 2020. 12(10). p. 1667. <https://doi.org/10.3390/rs12101667>
- [17] Kaiser P., Wegner J. D., Lucchi A., Jaggi M., Hofmann T., Schindler K. Learning Aerial Image Segmentation From Online Maps. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017. N 55. pp. 6054-6068.
- [18] Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015. Proceedings, Part III 18. Springer International Publishing, 2015. pp. 234-241.
- [19] Ковун В. А., Каширина И. Л. Использование нейронных сетей U-Net и W-Net в металлографическом анализе образцов стали // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 1. С. 101-110.
- [20] He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition," 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA. pp. 770-778. doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [21] ResNet (34, 50, 101): «остаточные» CNN для классификации изображений // <https://neurohive.io/ru/vidy-nejrosetej/resnet-34-50-101/> Автор: Станислав Литвинов (Дата обращения: 20.11.2023)
- [22] Tan M., Le Q. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In International conference on machine learning. 2019. pp. 6105-6114.
- [23] Tan M., Le Q. Efficientnetv2: Smaller models and faster training. In International conference on machine learning. 2021. pp. 10096-10106.
- [24] He T., Zhang Z., Zhang H., Zhang Z., Xie J., Li M. Bag of tricks for image classification with convolutional neural networks. In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2019. pp. 558-567.
- [25] Bandara W. G. C., Valanarasu J. M. J., Patel V. M. Spin road mapper: Extracting roads from aerial images via spatial and interaction space graph reasoning for autonomous driving. 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2022. pp. 343-350.
- [26] Zhou L., Zhang C., Wu M. D-LinkNet: LinkNet with Pretrained Encoder and Dilated Convolution for High Resolution Satellite Imagery Road Extraction, 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Salt Lake City, UT, USA. 2018, pp. 192-1924, doi: 10.1109/CVPRW.2018.00034.
- [27] Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthiner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S., Uszkoreit J., Houlsby N. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. ArXiv, abs/2010. 2020. p.11929.
- [28] Подольская Е. С. Кокуркин А. Д. Опыт применения ГИС-инструментов с открытым кодом для распознавания дорог // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы X Междунар. науч. конф. Красноярск, 12–15 сентября 2023 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. Г. М.

RESULTS OF ROAD RECOGNITION USING U-NET NEURAL NETWORK AND COMPARISON TO OSM DATA FOR THE KRASNOYARSK REGION

A. D. Kokurkin
Institute of Radioelectronics and Informatics,
RTU MIREA
Moscow, Russia
alexandr.kokurkin@gmail.com

E. S. Podolskaia
Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian
Academy of Sciences (CEPF RAS)
Institute of Radioelectronics and Informatics
RTU MIREA
Moscow, Russia
ekaterina.podolskaia@gmail.com

Abstract – Decryption of roads of various classes is of actual interest for many research areas. The vast majority of road recognition methods are based on the use of ultra-high spatial resolution remote sensing data; access and cost of survey limit the choice of these data. Paper examines the possibilities of the U-Net architecture for recognizing roads from Sentinel-2 satellite images in the Krasnoyarsk Territory. The results of using classical architecture, as well as modifications with pre-trained encoders, are described. The IoU metric and training sample data set were used to evaluate the accuracy of the models. The best result in terms of accuracy and training time is U-Net and EfficientNetV2B2 encoder with a metric value of 0.84. It is planned to study narrowly focused architectures designed for road recognition, as well as their combinations with U-Net. Use of neural network for road recognition is a part of forestry transport modeling.

Keywords — convolutional neural network, U-Net, EfficientNet, EfficientNetV2, ResNet50, GIS, remote sensing, road network

УДК 528.9

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ «НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ»

Коврижных Д.Д.
Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра геоинформационных систем
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
kovrizhnykh.d.d@edu.mirea.ru

Ануфриев С.О.
Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра геоинформационных систем
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
anufriev_s@mirea.ru

Аннотация — Правительством была принята программа «Национальная система пространственных данных» в декабре 2021 года. В рамках реализации госпрограммы «Национальная система пространственных данных» к 2030 году планируется создать единую цифровую платформу пространственных данных и единую электронную картографическую основу, которые будут включать в себя сведения об объектах недвижимости, зарегистрированных правах на недвижимое имущество и государственной кадастровой оценке.

Ключевые слова — *информационное общество, Публичная кадастровая карта Росреестра, информационная система, Национальная система пространственных данных, микросервисная архитектура, система электронных карт.*

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире информация является ключевым фактором в экономике в качестве ресурса, источника благосостояния и роста. Идет процесс общественной трансформации, в рамках которого страны переходят к информационному обществу: происходит развития телекоммуникаций и Интернета. Колоссальные объемы информации посвящаются тематике информации и информационного общества. Исследования данного вопроса проводятся в Организации экономического сотрудничества и развития в рамках комитета по политике в области цифровой экономики [1].

Развитие информационного общества, а также цифровой экономики в Российской Федерации является одним из принципов государственной политики. Важной целью Правительства является создание условий для формирования в Российской Федерации общества знаний, что зафиксировано указе Президента РФ от 09.05.2017 N 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы» и на невозможно без повсеместного использования информационных технологий. В целях развития информационного общества государством создаются

условия для формирования пространства знаний и предоставления доступа к нему, совершенствования механизмов распространения знаний, их применения на практике в интересах личности, общества и государства. [2].

I. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Несмотря на приоритеты государства в сфере информационных технологий, а также на наличие информационных ресурсов у государственных органов, нельзя сказать, что информационные ресурсы отвечают современным требованиям.

Так, в сфере геоинформационных технологий наблюдаются проблемы функционирования Интернет-порталов, разобщенность пространственных данных, несогласованность используемых разными ведомствами форматов данных, отсутствие механизмов интеграции между государственными органами. Вышеперечисленные факторы приводят к низкой эффективности использования существующих информационных ресурсов.

В качестве примера можно рассмотреть геоинформационный сервис, в котором представлена информация об объектах и объектах реестра границ на Публичной кадастровой карте (ПКК) Росреестра. Одной из основных проблем данного ресурса является слишком долгая загрузка картографической основы, а также периодические подвисания и лаги сказываются на эффективности работы с сервисом.

Для данной системы необходима модернизация, то есть масштабные изменения, которые заменяют всю систему и необходимы, если приложение больше не соответствует бизнес-требованиям. В рамках модернизации системы все компоненты перерабатываются и развиваются. Можно сказать, что модернизация информационной системы – это технологически эффективный и экономически оправданный способ улучшения устаревших систем [3].

Решением проблемы подвисаний и лагов может являться рехостинг (rehosting) – смена хостинга, на котором располагается сервис, поскольку сам хостинг играет определяющую роль в скорости работы тех сайтов, которые на нем располагаются. Это самый популярный способ модернизации из-за его простоты и доступности. Под рехостингом понимается простое копирование и вставка локальных приложений в облако без внесения серьезных изменений. Миграция приложения без каких-либо модификаций позволяет ускорить процесс модернизации с минимальными затратами ресурсов. При переносе в облако используются базовые облачные функции [3].

Портал слабо адаптирован к мобильным устройствам, соответственно пользователям данных устройств не представляется возможным работать с геоинформационными данными Росреестра. В связи с этим решением может являться внедрение адаптивного веб-дизайна. Это дизайн веб-страниц, обеспечивающий правильное отображение сайта на различных устройствах, подключённых к интернету, и динамически подстраивающийся под заданные размеры окна браузера. Впервые понятие отзывчивого веб-дизайна (англ. responsive web design от responsive architecture) ввёл Итан Маркотт в одной из своих статей в мае 2010 года [4].

В доработке также нуждается база данных публичной кадастровой карты, визуальное отображение данных о границах участков и сроки обновления данных на сайте Росреестра о собственниках после завершения сделок. По информации из разных источников, сроки обновления информации на сайте Росреестра о праве собственности могут занимать до нескольких месяцев. Необходимо пересмотреть процедуру загрузки данных из ЕГРН в базу данных карты, используя более новые технологии, а также уменьшить частоту их обновления.

В свою очередь одним из основных этапов решения проблемы актуальности данных и их визуального отображения должно являться исправление сдвига слоев кадастровой карты относительно подложки (спутниковых снимков). Если участок сместился на несколько десятков метров относительно своего изображения на космоснимке, то скорее всего это реестровая ошибка и необходимо производить переделку работы, ранее выполненной кадастровым инженером. Если участок смещен совсем немного относительно контура, причиной является погрешность подгрузки растрового изображения.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 01.12.2021 N 2148 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных» система сбора информации об объектах недвижимости, пространственных данных в полной мере не обеспечивает достоверность и сопоставимость сведений. Основная проблема заключается в ведомственной разобщенности государственных информационных ресурсов, содержащих сведения о земле как объекте недвижимости, природном ресурсе, лесах и лесных участках, водных объектах, сельскохозяйственных угодьях, иных природных объектах.

Информацию о земле и недвижимости содержат:

1. ЕГРН (Единый государственный реестр недвижимости), Росреестр;
2. Реестр федерального имущества (Федеральное агентство по управлению госимуществом);
3. ИСОГД (Информационные системы обеспечения градостроительной деятельности) субъектов РФ (субъекты РФ);
4. Государственный лесной реестр (ФАЛХ - Федеральное агентство лесного хозяйства);
5. Единая ФИС (Федеральная ИС) о землях сельскохозяйственного назначения и землях, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий (Минсельхоз Российской Федерации);
6. Государственный водный реестр (Федеральное агентство водных ресурсов);
7. Информационная система обеспечения работ по геологическому изучению недр и воспроизводству минерально-сырьевой базы (Федеральное агентство по недропользованию).

Разрозненность информации об объектах недвижимости, пространственных данных, несогласованность форматов и отсутствие механизмов интеграции данных приводят к:

- низкой эффективности использования объектов недвижимости, земельных ресурсов, управления отдельными территориями;
- ограничению данных о неиспользуемых земельных ресурсах для вовлечения их в хозяйственный оборот;
- недостаточному распространению цифровых сервисов для заинтересованных лиц;
- неэффективному расходованию бюджетных средств в связи с необходимостью сбора одних и тех же данных;
- рискам при принятии управленческих решений и осуществлении инвестиционной деятельности.

Низкие темпы сбора и актуализации пространственных данных, отсутствие единой технологической базы свидетельствуют о том, что наполнение единой электронной картографической основы составляет 30% территории России. В мировой практике при создании цифровых карт используется целый набор слоев данных из разных источников (вплоть до подземных коммуникаций). Неполнота данных связана в том числе с отсутствием дополнительных слоев данных, представляющих интерес для заинтересованных лиц, но находящихся в зоне ответственности других ведомств, например, информации о коммуникациях или зонах с особыми условиями использования территории [5].

Ввиду отсутствия сведений о координатах характерных точек границ субъектов Российской Федерации, муниципальных образований, населенных пунктов, территориальных зон и иных территорий (лесничества, особо охраняемые природные территории, зоны с особыми условиями использования территории, сельскохозяйственные угодья) заинтересованное лицо не имеет четкого представления о том, с какими именно

уполномоченными органами власти нужно построить диалог по вопросу приобретения прав на землю.

В условиях цифровизации первоочередное значение для создания новых возможностей динамичного развития страны приобретает сфера оказания услуг в области предоставления пространственных данных, а также создание сервисов, функционирующих на их основе.

С учетом возросшей более чем в 2 раза нагрузки на базы данных Росреестра и необходимости удовлетворения потребностей заинтересованных лиц в услугах по государственному кадастровому учету недвижимого имущества и государственной регистрации прав на недвижимое имущество в части реализации новых электронных сервисов существующие информационные системы требуют модернизации и перепроектирования.

II. МОДЕРНИЗАЦИЯ И ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ

В рамках модернизации и перепроектирования информационных систем возможно рассмотреть переход на более современные средства хранения и обработки пространственных данных. Для создания модернизированной системы возможно использовать способы интеграции уже существующих систем в единую систему пространственных данных.

Возможно использовать разновидность рефакторинга - изменение архитектуры программной системы [6]. Для предприятий, уже работающих в облаке, это идеальный вариант перехода с контейнеров на микросервисы, чтобы повысить масштабируемость и изоляцию компонентов.

Для предприятий, не работающих в облаке, возможно использовать облачный подход (cloud native). Это подход, при котором во всех аспектах IT-систем учитываются возможности и специфика облачных технологий. Согласно данным разработчика Tigera, в 2022 году не менее 75% мировых корпораций были сосредоточены на развитии cloud-native приложений.

Cloud-native — не столько про то, где разворачиваются системы, столько про сам процесс. Приложения обычно строятся как набор отдельных, слабо связанных между собой микросервисов, упакованных в контейнеры. Такой подход обеспечивает существенные преимущества:

- Масштабируемость – системы получают способность подстраивать производительность под задачи бизнеса за счет автоматического масштабирования;
- Отказоустойчивость – облака помогают проектировать системы, которые сохраняют стабильную работу даже в случае отказа любой из исполняемых компонентов;
- Сокращение времени вывода продуктов на рынок – данный подход предполагает переход к микросервисной архитектуре, для которой характерно разделение приложений на более маленькие фрагменты, взаимодействующие между собой по заданным алгоритмам. Это обеспечивает возможность независимой разработки отдельных фрагментов и позволяет сокращать время вывода продуктов на рынок, быстро тестировать и предлагать новые решения;

- Оптимизация – облачная технология опирается на бессерверные вычисления, технологии контейнеризации и виртуализации, которые дают возможность оптимальным образом использовать аппаратные ресурсы за счет балансирования потребления в эластичной архитектуре приложений [7].

У облачного подхода также есть свои нюансы:

- сложность архитектуры – управления множеством микросервисов и контейнеров требует от разработчиков серьезных навыков;
- привязка к провайдеру – зависимость от инфраструктуры конкретного провайдера станет серьезной проблемой, если разработчиков не устроит качество услуг. Поэтому выбор ответственного провайдера для работы по такой модели — задача первостепенной важности [8].

Еще одним аспектом модернизации служит переход к использованию популярных и современных подходов проектирования сервис-ориентированных систем на базе микросервисной архитектуры (MSA) с созданием нескольких сервисов, которые будут объединять разрозненные ресурсы информационных систем государственных и муниципальных органов власти.

В работах [9, 10] подробно описан план миграции унаследованных приложений на микросервисы. Возможно построение унифицированной модели данных на основе онтологии, которая позволяет не только описывать сложные связи между сущностями, но и упрощает процесс взаимодействия и интерпретации данных от одного микросервиса к другому, т. е. упрощает интеграцию между сервисами) [11].

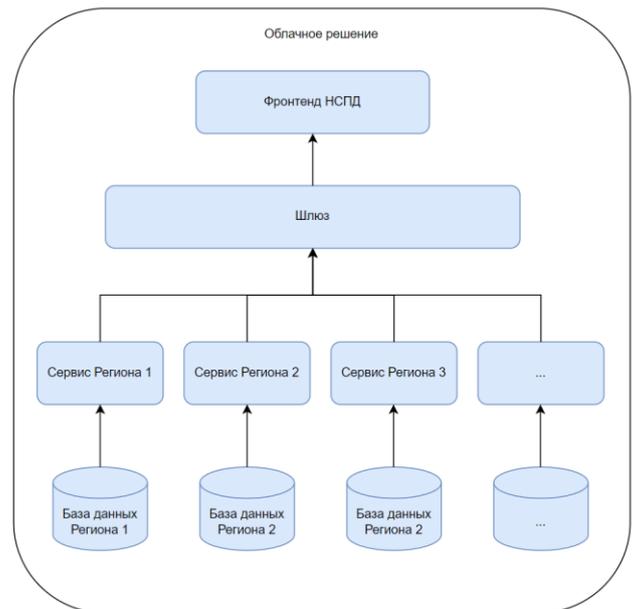


Рис. 1. Архитектурная схема

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие платформ, содержащих пространственные данные, играет ключевую роль в современном

технологическом прогрессе. Эти платформы не только улучшают эффективность решения задач, связанных с пространственной аналитикой, но и способствуют развитию инновационных решений в различных отраслях.

Совершенствование системы сбора и обработки геопространственных данных, в результате которого возможно создание единого геоинформационного пространства России (ЕГИП), будет способствовать экономическому прогрессу страны.

Составными частями ЕГИП станет Национальная система пространственных данных, а также конвергентно развивающиеся другие государственные информационные ресурсы, включая новые решения, такие как информационная система «Цифровая Земля», Банк базовых продуктов и новый геопортал государственной корпорации «Роскосмос».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Организация экономического сотрудничества и развития //Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» URL: <https://globalcentre.hse.ru/oecd/>(дата обращения: 11.11.2022).
- [2] Указ Президента Российской Федерации "О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы" от 09.05.2017 № 203 // Официальный интернет-портал правовой информации. - 2017 г. - Ст. 0001201705100002
- [3] Зарипова В.М., Петрова И.Ю. УНАСЛЕДОВАННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ. Журнал «Инженерно-строительный вестник Прикаспия».
- [4] L. Jeffrey Zeldman, Responsive Design. I don't think that word means what you think it means (англ.) (2011-97-96).
- [5] Постановление Правительства РФ от 01.12.2021 N 2148 (ред. от 25.08.2023) "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Национальная система пространственных данных"
- [6] Ксензов М. Рефакторинг архитектуры программного обеспечения: выделение слоев // Труды ИСП РАН. 2004. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/refaktoring-arhitektury-programmnogo-obespecheniya-vydelenie-sloev> (дата обращения: 12.11.2022).
- [7] Проще, быстрее, облачнее: 3 главных тренда в разработке // Forbes URL: <https://blogs.forbes.ru/2023/04/20/proshhe-bystrye-oblachnee-3-glavnyh-trenda-v-razrabotke/> (дата обращения: 12.11.2023).
- [8] Что такое Cloud first, Cloud only и Cloud native и чем они отличаются? // corpssoft24 URL: <https://www.corpssoft24.ru/about/blog/chto-takoe-cloud-first-cloud-only-i-cloud-native-i-chem-oni-otlichayutsya/> (дата обращения: 12.11.2023).
- [9] Brent Frye 8 Steps for Migrating Existing Applications to Microservices, URL: <https://insights.sei.cmu.edu/blog/8-steps-for-migrating-existing-applications-to-microservices/>, (дата обращения: 22.03.2022).
- [10] Радостев Д.К., Никитина Е.Ю. Стратегия миграции программного кода из монолитной архитектуры в микросервисы // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2021. №2 (53). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategiya-migratsii-programmnogo-koda-iz-monolitnoy-arhitektury-v-mikroservisy> (дата обращения: 31.03.2022).
- [11] Балес А.И. Унифицированная модель данных и её применение в микросервисной архитектуре / DOI 10.25559/SITIT0.16.202002.416-425 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. - 2020. - Т. 16, № 2. - С. 416-425.

***MODERNIZATION OF INFORMATION RESOURCES
WITHIN THE FRAMEWORK OF THE STATE PROGRAM
OF THE RUSSIAN FEDERATION “NATIONAL SPATIAL
DATA SYSTEM”***

Kovrizhnykh D.D.
Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
kovrizhnykh.d.d@edu.mirea.ru

Anufriev S.O.
Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
anufriev_s@mirea.ru

Abstract—The government adopted the “National Spatial Data System” program in December 2021. As part of the implementation of the state program “National Spatial Data System”, by 2030 it is planned to create a unified digital spatial data platform and a unified electronic cartographic basis, which will include information about real estate, registered rights to real estate and state cadastral valuation.

Keywords — information society, Public cadastral map of Rosreestr, information system, National spatial data system, electronic map system, microservice architecture

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРБАНИЗАЦИИ СИБИРИ НА ЭКОЛОГИЮ, ОБЩЕСТВО И ЭКОНОМИКУ

Лукашик М.С.
Кафедра геоинформационных систем
Институт радиоэлектроники и
информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
lukashik.m.s@edu.mirea.ru

Ануфриев С.О.
Кафедра геоинформационных систем
Институт радиоэлектроники и
информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
anufriev_s@mirea.ru

Аннотация — Исследование направлено на комплексную оценку воздействия урбанизации на города Сибири с учетом трех основных аспектов: экологии, общества и экономики. Работа предпринимает анализ динамики урбанизационных процессов в городах региона, оценивая их воздействие на природную среду, социокультурные динамики и экономический потенциал.

Ключевые слова — общество, урбанизация, экология, экономика, SQL.

ВВЕДЕНИЕ

Современное общество сталкивается с вызовом, который имеет глобальное значение и требует непрерывного изучения и анализа. Этим вызовом является урбанизация - процесс увеличения доли городского населения в общей численности населения. Важно отметить, что в настоящее время урбанизация происходит во всем мире, и Россия, в частности, не является исключением.

Города играют важную роль в современном обществе как центры экономического развития, инноваций и социокультурных изменений. Однако рост городского населения, особенно в регионах, таких как Сибирь, сопровождается серьезными проблемами, включая угрозы для экологии, общества и экономики.

Необходимость трезвой оценки ситуации в обществе в начале XXI в. заставляет признать: научные разработки, отвечающие потребностям мест и городов в переходный период, практически отсутствуют. Не выработаны концепции пространственного освоения территории новых, индустриальных, исторически сложившихся, крупнейших городов. Реконструкция старгородских центров в очередной раз оказывается отодвинута до лучших времен.

I. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ

Выработка стратегии пространственного развития Сибири на современном этапе не может быть осуществлена без анализа опыта решения грандиозных организационных и градостроительных проектов XX столетия.

Урбанизация в условиях обширной территории, как Сибирь, представляет сложный исторический процесс.

Сибирь пережила быстрое становление городов как в советскую, так и в современную эпоху. Этот процесс оказал влияние на экологию, общество и экономику региона [1].

Сибирь как провинция

Сибирские земли долгое время считались провинцией, управляемой извне. Однако, они играли важную роль в истории страны, включая период Второй мировой войны, когда стали плацдармом для передислокации военной промышленности.

Вертикальная ось власти

В отличие от европейской части России, в Сибири преобладала вертикальная структура власти, с централизацией всех ресурсов и контроля. Это оказало влияние на развитие региона.

Оставленность глубинки

Сибирская глубинка оставалась отчужденной и оставленной, с недоступностью к ключевым ресурсам, включая деньги, власть и культуру. Сибирь стала местом ссылки непокорных.

Дорожная сеть и иерархия

Сибирь имеет особую структуру дорожной сети, с преобладанием иерархических связей между населенными пунктами. Дороги часто прокладывались через более крупные пункты.

Недоступность провинции

Сибирь была труднодоступной провинцией, с невозможностью влияния большинства на принятие властных решений.

Западная Сибирь

Западная Сибирь, включая Омск, Томск, Новосибирск и другие регионы, составляет крупный экономический регион. Эта территория играет ключевую роль в развитии региона и страны в целом.

В целом, урбанизация в Сибири оказала влияние на структуру власти, социокультурные изменения и экономику региона, а также оставила следы на транспортной инфраструктуре и дорожной сети. Это

представляет интерес для дальнейших исследований в контексте влияния урбанизации на экологию, общество и экономику Сибири.

II. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРБАНИЗАЦИИ

Урбанизация представляет собой процесс нарастания городских территорий и увеличения численности городского населения, который начался в Сибири еще в XIX веке. На сегодняшний день города Сибири являются крупными индустриальными центрами с развитой экономикой и инфраструктурой, однако их урбанизация оказывает значительное влияние на окружающую среду, общество и экономическую ситуацию в регионе. В рамках данной работы будут рассмотрены основные аспекты данного процесса и представлены результаты анализа с использованием языка запросов SQL.

Влияние урбанизации на экологию

Загрязнение окружающей среды является одной из основных проблем, связанных с урбанизацией городов Сибири. Увеличение выбросов парниковых газов и промышленных отходов, загрязнение атмосферного воздуха, воды и почвы, а также повышенный уровень шума и вибрации негативно сказываются на состоянии окружающей среды и здоровье населения.

Использование SQL-запросов позволяет получить подробную информацию о выбросах вредных веществ, состоянии атмосферного воздуха в разных районах городов, а также оценить воздействие урбанизации на зеленые насаждения и водные объекты.

Влияние урбанизации на общество

Урбанизация также оказывает влияние на социальную сферу жизни населения. Увеличение численности населения, изменение демографической структуры, усиление социальной и этнической дифференциации, а также изменение образа жизни и культурных ценностей – все это является результатом развития городов Сибири. Использование SQL позволяет анализировать данные о численности и структуре населения, его миграционных процессах, а также исследовать социальные аспекты урбанизации, такие как образование, здравоохранение, культура и спорт.

Влияние урбанизации на экономику

Наконец, урбанизация влияет и на экономическую сферу жизни общества. Развитие промышленности, увеличение инвестиций, рост объемов производства и расширение торговых связей – все это способствует экономическому развитию городов Сибири.

Анализ данных с использованием SQL позволяет оценить динамику экономического развития, объемы инвестиций и экспорта, а также выявить тенденции и перспективы развития городов в условиях урбанизации.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Для достижения целей данного исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Оценка влияния урбанизации на состояние окружающей среды: анализ данных о выбросах

загрязняющих веществ, загрязнении атмосферного воздуха, водных объектов и почвы, уровне шума и вибрации.

2. Изучение влияния урбанизации на социальную структуру населения: анализ демографических данных, миграционных процессов, социальных показателей (образование, здравоохранение, культура, спорт).
3. Оценка влияния урбанизации на экономическую ситуацию: анализ динамики экономического развития, объемов инвестиций, экспорта и импорта, тенденций и перспектив развития городов.
4. Разработка рекомендаций по снижению негативного влияния урбанизации на окружающую среду, социальную сферу и экономику на основе анализа полученных данных.
5. Определение направлений для дальнейшего развития городов Сибири в условиях продолжающейся урбанизации с учетом экологических, социальных и экономических аспектов.
6. Сбор и анализ данных: провести сбор данных о городах Сибири, включая данные о населении, экологии и экономике, и подготовить их к дальнейшему анализу.
7. Разработка базы данных: создать реляционную базу данных, включающую таблицы с информацией о городах, экологических показателях и экономических показателях.
8. Анализ данных с использованием SQL: с использованием SQL-запросов провести анализ данных с целью выявления влияния урбанизации на экологию, общество и экономику.

Решение данных задач позволит более полно и глубоко понять влияние урбанизации на экологию, общество и экономику городов Сибири, предоставив основу для разработки стратегий и политик, способствующих устойчивому развитию региона.

IV. ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Для решения данной задачи можно использовать различные методы, такие как статистический анализ, социологические исследования, экологические исследования и другие. Однако, наиболее эффективным методом является использование SQL-запросов для анализа данных.

SQL (Structured Query Language) – это язык запросов, который позволяет работать с данными, хранящимися в базах данных. С помощью SQL можно извлекать, изменять и анализировать данные, а также строить различные отчеты. Кроме того, использование SQL позволяет работать с большими объемами данных, что особенно важно при анализе влияния урбанизации на экологию, общество и экономику.

Моделирование и прогнозирование. Использование математических и статистических моделей позволяет прогнозировать будущее влияние урбанизации на регион, исходя из имеющихся данных.

Сравнительный анализ городов. Сравнение различных городов Сибири по различным параметрам с

использованием SQL-запросов позволяет выявить общие тенденции и особенности влияния урбанизации на регион.

Обзор и классификация этих методов позволит выбрать наиболее подходящий подход к анализу влияния урбанизации на экологию, общество и экономику Сибири с учетом конкретных целей и доступных данных.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование SQL для анализа влияния урбанизации на экологические, социальные и экономические аспекты жизни населения городов Сибири позволяет получить подробную и достоверную информацию о динамике развития региона, выявить основные проблемы и определить направления для дальнейшего развития и улучшения качества жизни населения.

Использование SQL в данном исследовании позволяет точно анализировать данные и выявлять взаимосвязи между урбанизацией и ее влиянием на экологию, общество и экономику. Такой многомерный анализ является критически важным для разработки эффективных стратегий и политик, направленных на устойчивое развитие городов Сибири.

Все вышеперечисленное подчеркивает актуальность данной темы для научного исследования и принятия

информированных решений на уровне государственной и региональной политики. Это исследование предоставляет возможность лучше понять сложные взаимосвязи между урбанизацией и ее воздействием на экологию, общество и экономику Сибири, и разработать рекомендации для устойчивого будущего региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Клевакин А.Н. Сибирский город в эпоху перемен. «Наука». Новосибирск: 2020. С. 120.
- [2] Гололобов Е.И., Красовитова Э.С. Экологические факторы урбанизации Севера Западной Сибири и их влияние на развитие городского хозяйства. Вестник Томского государственного университета. История. 2021. № 73
- [3] Клевакин А.Н. Идеи города в Сибири: градостроительные эксперименты и самочувствие жителей/ Проект Байкал. <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/796/1729> [(Дата обращения: 13.11.2023)]

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF SIBERIA URBANIZATION ON ECOLOGY, SOCIETY AND ECONOMY

Lukashik M.S.
Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
lukashik.m.s@edu.mirea.ru

Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
anufriev_s@mirea.ru

Anufriev S.O.

Abstract — The study is aimed at a comprehensive assessment of the impact of urbanization on the cities of Siberia, taking into account three main aspects: ecology, society and economy. The work undertakes an analysis of the dynamics of urbanization processes in the cities of the region, assessing their impact on the natural environment, sociocultural dynamics and economic potential.

Keywords — ecology, economy, society, SQL, urbanization.

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ

Антонова С.Н.
Кафедра геоинформационных систем
Институт радиоэлектроники и информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
limlimom@inbox.ru

Юстус А.А.
Кафедра геоинформационных систем
Институт радиоэлектроники и информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
yustus@mirea.ru

Аннотация — В статье рассматривается важность и перспективы применения данных космической съемки для эффективного управления и улучшения инфраструктуры жилых комплексов в современном обществе. В основе статьи лежит обзор основ космической съемки, включая типы спутников и дронов, используемых для этой цели, а также выделение преимуществ такого подхода. Рассмотрены технические методы и инструменты, такие как геоинформационные системы (ГИС) и машинное обучение, применяемые для обработки данных космической съемки. Статья также предоставляет обзор применения космической съемки в оценке качества дорожной инфраструктуры, мониторинге зеленых зон, оценке загрязнения окружающей среды, определении изменений в строительстве и планировке, а также оценке доступности общественного транспорта.

Ключевые слова — космическая съемка, инфраструктура жилых комплексов, урбанизация, мониторинг изменений, геоинформационные системы (ГИС), технические методы анализа данных, спутники и дроны, экологическая оценка, доступность общественного транспорта, машинное обучение, программное обеспечение для анализа снимков, оценка качества дорожной инфраструктуры.

ВВЕДЕНИЕ

Современное общество сталкивается с нарастающей потребностью в эффективном управлении городской инфраструктурой и жилыми комплексами в условиях постоянного роста населения и урбанизации. В этом контексте космическая съемка выделяется как ключевой инструмент для анализа и оценки состояния жилой инфраструктуры. Это предоставляет уникальную возможность наблюдать и анализировать жилую инфраструктуру с высокой точностью и широким географическим охватом, обеспечивая информацию о текущем состоянии и выявляя изменения, требующие внимания. По сравнению с традиционными методами мониторинга, космическая съемка обладает значительными преимуществами, которые мы рассмотрим

в данной статье, а также проанализируем технические методы, успешные примеры и вызовы данного подхода.

I. ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ В КОНТЕКСТЕ ОЦЕНКИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ

Космическая съемка – это технология, которая позволяет собирать информацию о поверхности Земли с использованием специальных аэрокосмических платформ, таких как спутники и дроны. Эти инструменты создают изображения, которые могут быть использованы для анализа и мониторинга различных аспектов инфраструктуры жилых комплексов. Давайте более подробно рассмотрим основы космической съемки и ее роль в оценке жилой инфраструктуры.

Разрешающая способность: Ключевым параметром космической съемки, определяющий, насколько детально изображение способно представлять объекты на поверхности Земли является *разрешающая способность*. Этот параметр является основополагающим при использовании спутников и дронов, поскольку более высокая разрешающая способность обеспечивает более детальные данные. Разрешающая способность бывает пространственной, определяющей, сколько деталей можно разглядеть на определенной площади, и спектральной, которая определяет в каких спектральных диапазонах излучения собираются данные.

Например, спутники с высоким разрешением, такие как WorldView-3, эксплуатируемый DigitalGlobe, обладают пространственной разрешающей способностью около 31 см. [1]. Это означает, что они способны зафиксировать мелкие детали, такие как индивидуальные здания и дорожные маркировки. Аналогично, французские спутники Pleiades обеспечивают разрешение приблизительно 50 см. [2], а QicBird — приблизительно 61 см. [3]. Это позволяет проводить детальный анализ различных аспектов жилой инфраструктуры, от зданий до дорожной информации.

Спектральные диапазоны: Космические съемки могут быть проведены в различных спектральных диапазонах, включая видимый свет, инфракрасный и радио. Разные спектральные диапазоны позволяют выявлять различные характеристики и состояния объектов на земной поверхности [4].

Например, инфракрасные данные могут использоваться для выявления тепловых характеристик строений и выявления тепловых утечек. В то время как видимый свет может быть полезен для определения растительности и изменений в окраске объектов. Эта спектральная информация позволяет более глубоко анализировать состояние жилых районов [5].

Типы спутников и дронов, применяемых для этой цели:

Оптические спутники, такие как спутники серии Landsat и спутники от компаний, таких как DigitalGlobe, снабжены оптическими камерами, которые снимают изображения Земли в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах [6].

Радарные спутники, например, спутники серии Sentinel от Европейского космического агентства, используют радар для создания изображений даже при плохой видимости и ночью. Это делает их ценными для мониторинга в условиях, где оптические съемки ограничены [7].

Дроны, снабженные различными сенсорами, позволяют проводить детальные наземные анализы конкретных участков жилой инфраструктуры. Их гибкость и способность к целенаправленным миссиям делают их ценными для точных и географически ограниченных исследований [8].

Выбор между спутниками и дронами зависит от конкретной задачи и требований разрешающей способности и охвата. Интеграция различных типов космических съемок может быть эффективным способом для получения более полной информации о состоянии инфраструктуры жилых комплексов.

II. ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Использование геоинформационных систем (ГИС) для обработки данных

Геоинформационные системы (ГИС) являются неотъемлемой частью процесса анализа и интерпретации данных, полученных из космической съемки. В контексте оценки инфраструктуры жилых комплексов ГИС используются для:

- Создания и управления геопространственными базами данных, содержащими информацию о жилых комплексах, дорожной инфраструктуре, зеленых зонах и других объектах.
- Выполнения пространственного анализа данных для выявления взаимосвязей и паттернов между различными элементами инфраструктуры.
- Визуализации результатов анализа с использованием карт и графиков для облегчения принятия решений в управлении инфраструктурой жилых комплексов.

Машинное обучение и искусственный интеллект в анализе космических изображений

Машинное обучение и искусственный интеллект играют значительную роль в анализе данных, полученных из космической съемки. Алгоритмы машинного обучения используются для [9]:

- Автоматического выявления и классификации объектов, таких как здания, дороги, растительность и водоемы на спутниковых снимках.
- Мониторинга изменений в жилой инфраструктуре, выявления новых строительных объектов и изменений в земельном планировании с течением времени.
- Анализа снимков для выявления паттернов и трендов, таких как рост населения или изменения в урбанизации.

Примеры программного обеспечения для анализа снимков

Разнообразие программного обеспечения предоставляет специалистам по оценке инфраструктуры жилых комплексов различные средства для обработки и анализа данных космической съемки. Некоторые из них включают:

- QGIS: Бесплатное и с открытым исходным кодом ГИС-программное обеспечение, предоставляющее средства для анализа и визуализации геопространственных данных [10].
- ArcGIS: Коммерческое ГИС-программное обеспечение, обладающее широким набором инструментов для анализа и управления географическими данными [11].
- Google Earth Engine: Облачная платформа, предоставляющая доступ к огромным объемам космических данных и инструменты для их анализа [12].
- ENVI: Программное обеспечение для анализа многодиапазонных данных, включая спутниковые снимки [13].
- OpenStreetMap (OSM): Открытая и коллаборативная база данных, используемая для создания карт и анализа геопространственных данных [14].

Эти инструменты предоставляют разнообразные возможности для обработки и анализа данных космической съемки, что делает их ценными для исследователей, городских планировщиков и специалистов по оценке инфраструктуры жилых комплексов. Они улучшают точность и доступность данных, необходимых для устойчивого управления инфраструктурой и принятия обоснованных решений в области жилищной инфраструктуры.

III. ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ

Применение космической съемки для анализа и оценки инфраструктуры жилых комплексов представляет собой мощный инструмент, который приносит значительные выгоды и преимущества. В данном разделе мы рассмотрим ключевые преимущества использования этой технологии для более эффективного управления жилыми районами.

1. Высокая разрешающая способность:

Одним из ключевых преимуществ применения космической съемки для оценки жилой инфраструктуры является ее высокая разрешающая способность. Космические спутники и дроны способны зафиксировать детали на земной поверхности с высокой степенью точности [15]. Это позволяет детально анализировать состояние и характеристики жилых комплексов, включая:

- **Архитектурные особенности:** Высокоразрешающие изображения позволяют исследовать архитектурные детали зданий, такие как фасады, крыши, окна и балконы [16].
- **Состояние дорожной инфраструктуры:** Дороги, тротуары и пешеходные дорожки могут быть детально проанализированы, позволяя выявить повреждения и неисправности [17].
- **Зеленые зоны и ландшафт:** Космическая съемка обеспечивает возможность мониторинга состояния парков, садов и других зеленых зон внутри жилых комплексов [18].
- **Изменения в строительстве:** Высокая разрешающая способность способствует отслеживанию изменений в строительстве и расширении жилых комплексов, что имеет значение для городского планирования и управления ростом населения [19].

2. Глобальное охватывание:

Еще одним важным преимуществом космической съемки является ее глобальное охватывание. Спутники и дроны способны охватывать любые уголки Земли, что делает этот метод идеальным для глобального мониторинга и сравнительного анализа жилой инфраструктуры в различных регионах [20]. Это позволяет:

- **Сравнивать различные географические области:** Космическая съемка позволяет сравнивать жилые комплексы в разных частях мира, что полезно для изучения различий в структуре и уровне развития [21].
- **Мониторить изменения в урбанизации:** Спутники могут отслеживать изменения в уровне урбанизации, росте населения и строительстве новых жилых комплексов [22].
- **Обнаруживать географические риски:** Глобальное охватывание позволяет выявлять и анализировать географические риски, такие как прибрежные зоны, наводнения и оползни [23]. Это помогает в разработке стратегий управления рисками и предупреждении бедствий.

3. Возможность анализа изменений во времени:

Космическая съемка также предоставляет возможность анализировать изменения в жилых комплексах со временем. Это важно для:

- **Планирования и управления:** Слежение за изменениями в инфраструктуре позволяет городским планировщикам и управляющим компаниям лучше понимать потребности и эффективно реагировать на изменения. Планирование обновлений и реконструкций становится более информированным и эффективным.
- **Выявления проблем:** Анализ изменений позволяет рано выявлять проблемы, такие как старение инфраструктуры или несанкционированные изменения. Это помогает предотвратить серьезные повреждения и экономические потери.
- **Изучения экологических изменений:** Мониторинг изменений в зеленых зонах и природной среде помогает оценить воздействие на окружающую среду и природные ресурсы. Это важно для устойчивого развития и экологической ответственности.

4. Экономическая эффективность:

Важным аспектом применения космической съемки является ее экономическая эффективность. В сравнении с традиционными методами, такими как наземное обследование или аэрофотосъемка с пилотируемых летательных аппаратов, космическая съемка обычно более экономически выгодна. Это связано с:

- **Снижением затрат на персонал и оборудование:** Не требуется большой штат сотрудников или дорогостоящее оборудование для наземной работы. Это позволяет сократить расходы на человеческий ресурс и техническое оборудование.
- **Экономией времени:** Космическая съемка может быть проведена быстро и в большом масштабе, что сокращает время, необходимое для сбора данных. Это особенно важно при оценке больших территорий или при необходимости быстрого реагирования на изменения.
- **Регулярными обновлениями:** Спутники регулярно пересекают одни и те же местности, обеспечивая регулярные обновления данных. Это позволяет отслеживать динамику изменений во времени и принимать актуальные решения.

Все эти преимущества делают космическую съемку мощным инструментом для оценки и управления инфраструктурой жилых комплексов, а также для поддержки принятия решений в городском планировании и развитии. Эта технология не только обеспечивает точные данные, но и содействует экономически эффективному и устойчивому управлению жилой инфраструктурой.

IV. ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ

Оценка и управление инфраструктурой жилых комплексов являются сложными и ответственными задачами, которые требуют точных и актуальных данных. В этой статье рассмотрим, как космическая съемка может быть использована для более эффективного управления и оценки жилой инфраструктуры, охватывая различные аспекты.

1. Оценка качества дорожной инфраструктуры:

Оценка состояния дорожной инфраструктуры является ключевым аспектом управления жилыми комплексами. Космическая съемка предоставляет ценные инструменты для этой цели:

- **Идентификация дефектов:** Снимки спутников и дронов позволяют выявлять дефекты на дорожной поверхности, такие как ямы, трещины и неровности. Это помогает в поддержании безопасности и комфорта жителей.
- **Оценка состояния дорожных разметок:** Космическая съемка позволяет анализировать состояние линий разметки, знаков и светофоров, что важно для безопасного движения и соблюдения правил дорожного движения.
- **Мониторинг изменений в дорожной инфраструктуре:** Использование многовременных снимков позволяет отслеживать изменения в инфраструктуре, включая ремонтные работы и расширение дорог, что важно для городского планирования и управления ростом населения.

2. Мониторинг зеленых зон и парков:

Зеленые зоны и парки в жилых комплексах играют важную роль в создании комфортной и здоровой среды для жителей. Космическая съемка может быть использована для мониторинга и оценки зеленых зон, включая следующие аспекты:

- **Оценка плотности растительности:** Космическая съемка в инфракрасном спектре позволяет анализировать плотность растительности, что важно для оценки здоровья растений и деревьев.
- **Выявление областей деградации:** Мониторинг изменений в зеленых зонах может помочь выявить области с деградированной растительностью, что может потребовать ухода и восстановления.
- **Планирование ландшафтных работ:** Сбор данных космической съемкой может помочь в планировании работ по зеленому ландшафту и улучшению парков, что важно для повышения качества жизни жителей.

3. Оценка загрязнения окружающей среды:

Космическая съемка также может использоваться для мониторинга загрязнения окружающей среды в жилых районах:

- **Выявление источников загрязнения:** Использование спутниковых данных может помочь идентифицировать источники загрязнения

воздуха и воды, такие как промышленные предприятия и автотранспорт. Это важно для здоровья жителей.

- **Оценка качества воздуха:** Космическая съемка может быть использована для оценки качества воздуха и выявления областей с повышенными уровнями загрязнения.
- **Мониторинг изменений в зоне среды обитания:** Космическая съемка может помочь в отслеживании изменений в окружающей среде и выявлении паттернов загрязнения, что важно для разработки стратегий управления окружающей средой.

4. Определение изменений в строительстве и планировке:

Мониторинг изменений в строительстве и планировке важен для обеспечения соблюдения строительных норм и планов развития:

- **Отслеживание строительства новых объектов:** Спутники и дроны могут регулярно фиксировать изменения в планировке и строительстве новых зданий и жилых комплексов, что важно для контроля за городским развитием.
- **Оценка соответствия строительства планам и разрешениям:** Космическая съемка может использоваться для проверки соответствия строительства разрешениям и планам, что помогает в уменьшении нарушений строительных норм.
- **Мониторинг изменений в зоне благоустройства:** Использование космической съемки может помочь в мониторинге изменений в благоустройстве и обновлениях в жилых районах, что важно для комфорта и безопасности жителей.

5. Оценка доступности общественного транспорта:

Доступность общественного транспорта имеет важное значение для жителей жилых комплексов. Космическая съемка может быть использована для:

- **Анализа маршрутов и остановок:** Спутники и дроны могут помочь в анализе распределения маршрутов и остановок общественного транспорта, что важно для оптимизации маршрутов и расписаний.
- **Оценки качества инфраструктуры транспорта:** Космическая съемка может использоваться для оценки качества дорог, железнодорожных путей и других элементов транспортной инфраструктуры, что важно для безопасности и комфорта пассажиров.
- **Мониторинг переполнения и эффективности транспорта:** Слежение за переполнением и оценка эффективности систем общественного транспорта помогают в улучшении доступности для всех жителей.

Применение космической съемки для оценки инфраструктуры жилых комплексов предоставляет ценные данные и инструменты для улучшения качества жизни жителей, оптимизации управления и устойчивого

городского развития. Эта технология не только обеспечивает точные данные, но и содействует экономически эффективному и устойчивому управлению жилой инфраструктурой.

Давайте рассмотрим примеры успешного использования данных космической съемки для оценки инфраструктуры жилых комплексов, подчеркивая их значимость и разнообразие в управлении рисками и создании экологически более устойчивых городов.

Проект "Urban Atlas" (Городской атлас)

Европейское космическое агентство (ESA) разработало проект «Urban Atlas», который стал ключевым инструментом для картографирования и классификации городской инфраструктуры в Европе [24].

Центральным элементом методологии проекта является использование данных космической съемки, полученных от спутников. Эти данные, включающие изображения с различным разрешением и спектральными характеристиками, обрабатываются с использованием передовых методов обработки изображений. Среди них — сегментация, классификация и фильтрация, что позволяет выделить ключевые элементы городской инфраструктуры, такие как здания, зеленые зоны и дорожная сеть.

Проект внедряет геопространственный анализ для привязки данных к конкретным географическим координатам. Это обеспечивает контекстуализацию информации и открывает возможность анализа пространственных взаимосвязей между различными элементами городской среды.

Система классификации по типам зон является важным аспектом проекта. Городская среда разделяется на различные категории, такие как жилые, коммерческие, промышленные и зеленые зоны. Это предоставляет более глубокое понимание структуры города, что важно для разработки эффективных стратегий урбанистического планирования.

В процессе анализа данных проект использует методы машинного обучения, такие как нейронные сети. Это способствует автоматизации обработки и анализа данных, а также повышает точность распознавания и классификации объектов на изображениях.

Создание базы данных и карт на основе обработанных данных является еще одним важным этапом проекта. Эти инструменты предоставляют информацию о структуре городов, становясь ценным ресурсом для городских планировщиков при принятии обоснованных решений.

Регулярное обновление данных, включая использование новых снимков, обеспечивает актуальность информации и отражает изменения в городской среде. Таким образом, "Urban Atlas" выступает в качестве ключевого инструмента, обеспечивая детализированный и актуальный обзор городской инфраструктуры и способствуя более эффективному урбанистическому планированию в Европе.

Проект "Mapping Slums" (Картирование трущоб)

Проект "Mapping Slums" представляет собой значимую инициативу, ориентированную на использование данных космической съемки для эффективного картирования и

анализа неформальных поселений и трущоб в развивающихся странах. Сфера его деятельности заключается в активном участии в решении жилищных проблем путем предоставления детальных данных о местоположении и структуре этих областей [25].

Основными методами проекта являются использование спутниковой съемки и аэросъемки для получения высокоразрешенных изображений территорий, а также методы обработки и анализа изображений, включая сегментацию и классификацию. Эти подходы позволяют выделить ключевые элементы территорий трущоб, такие как жилые постройки и инфраструктура.

Геопространственный анализ используется для точного привязывания данных к географическим координатам, что обеспечивает более глубокое понимание местоположения трущоб в контексте других элементов городской среды. Проект также включает в себя классификацию и оценку жилищных условий, что позволяет выделить уровень жилищной нестабильности и доступность основных услуг.

Создание карт и баз данных, содержащих информацию о структуре и характеристиках территорий, играет важную роль в предоставлении детального обзора неформальных поселений. Кроме того, сравнительный анализ во времени, основанный на последовательных снимках, помогает отслеживать динамику изменений в территориях трущоб, оценивать эффективность внедрения стратегий улучшения жилищных условий.

Этот проект оказывает существенное воздействие, предоставляя правительствам и международным организациям детальные данные о трущобах, что служит основой для разработки и реализации стратегий по улучшению жилищных условий в уязвимых городских областях.

Проект "Flood Risk Assessment" (Оценка риска наводнений)

В долине реки Миссисипи, где наводнения становятся серьезным вызовом для городов и прилегающих территорий, проект "Flood Risk Assessment" был запущен с использованием данных космической съемки. Спутниковые изображения, охватывающие весь регион с высоким разрешением, предоставили информацию о ландшафте, зданиях и текущем состоянии реки [26].

Геопространственный анализ данных позволил оценить топографию местности и выделить низкие районы, подверженные риску наводнений. Методы обработки изображений, такие как сегментация и классификация, были использованы для выделения зон с высоким риском наводнений и определения высоты зданий.

С использованием данных о топографии и гидрологии проводилось моделирование наводнений, что позволило рассчитать уровни воды в различных условиях и выделить потенциально уязвимые области. Разработанные стратегии предотвращения включали в себя строительство водозащитных сооружений, улучшение дренажных систем и внедрение систем предупреждения и эвакуации.

Результаты оценки риска и предложенные стратегии были переданы городам и регионам вдоль реки Миссисипи, что позволило им лучше подготовиться к потенциальным наводнениям и снизить воздействие природных бедствий

на жителей. Проект "Flood Risk Assessment" в данном контексте продемонстрировал эффективное использование данных космической съемки для анализа и смягчения рисков наводнений, способствуя безопасности жителей региона.

Проект "Smart Cities Development" (Развитие умных городов)

Инициативы по созданию умных городов включают использование данных космической съемки для мониторинга движения, парковки и использования общественного транспорта в реальном времени. Это помогает улучшить общественный транспорт, управление трафиком и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Развитие умных городов — это мировая тенденция, в рамках которой множество стран внедряют инновационные технологии, включая использование данных космической съемки, для повышения эффективности городской инфраструктуры и улучшения качества жизни граждан.

Сингапур активно использует технологии умных городов для решения транспортных проблем и улучшения устойчивости города. Проект "Smart Nation" включает в себя систему мониторинга транспорта и управления парковкой на основе данных космической съемки [27].

Города в Китае, такие как Шэньчжэнь и Шанхай, активно разрабатывают проекты умных городов. Использование космической съемки включает мониторинг транспорта, управление энергопотреблением и принятие решений на основе данных [28].

В городах, таких как Нью-Йорк и Сан-Франциско, реализуются проекты по созданию умных транспортных систем. Это включает в себя использование космической съемки для мониторинга движения, оптимизации парковок и управления общественным транспортом [29].

Эти примеры демонстрируют, как страны в разных регионах мира интегрируют данные космической съемки в проекты умных городов с целью оптимизации городской инфраструктуры и улучшения качества жизни.

V. ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Использование данных космической съемки для оценки инфраструктуры жилых комплексов представляет собой важную и перспективную область исследований. Однако, на пути к достижению полного потенциала этой технологии стоят как технические, так и методологические вызовы. Давайте рассмотрим эти вызовы, а также перспективы развития и улучшения методов анализа данных космической съемки в контексте оценки инфраструктуры жилых комплексов.

Технические ограничения и сложности

1. *Разрешающая способность снимков:* Одним из основных технических ограничений данных космической съемки является разрешающая способность снимков. Несмотря на значительные улучшения в этой области, некоторые детали все еще могут оставаться незамеченными. Это ограничивает возможности для детального анализа состояния инфраструктуры жилых

комплексов, особенно в мегаполисах, где плотность застройки высока.

2. *Облачность и атмосферные условия:* Погодные условия и атмосферные явления могут оказывать существенное влияние на способность получения данных космической съемки. Облачность и даже атмосферные частицы могут мешать получению данных, что затрудняет непрерывное мониторинг и может быть критичным в ситуациях, требующих быстрого реагирования.
3. *Зависимость от поставщиков данных:* Доступ к данным космической съемки ограничен поставщиками, что может создавать зависимость от внешних факторов, таких как коммерческие аспекты и доступность данных. Это может затруднять независимые исследования и анализ инфраструктуры жилых комплексов.

Перспективы развития и улучшения методов анализа

1. *Увеличение разрешающей способности:* Одной из главных перспектив развития в этой области является увеличение разрешающей способности снимков. С развитием технологий и запуском новых спутников, будущее принесет с собой более детальные изображения, что повысит точность и полноту анализа состояния жилых комплексов.
2. *Интеграция с другими данными:* Для улучшения анализа инфраструктуры жилых комплексов можно интегрировать данные космической съемки с информацией, полученной с помощью других источников, таких как дроны, геоинформационные системы (ГИС) и датчики на местности. Это позволит получать более всесторонние и точные данные.
3. *Развитие алгоритмов машинного обучения:* Применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа данных космической съемки обещает автоматизировать процессы выделения и классификации объектов, что увеличит эффективность анализа.
4. *Создание многомерных моделей:* Данные космической съемки могут быть интегрированы в многомерные модели, позволяя анализировать не только текущее состояние инфраструктуры жилых комплексов, но и предсказывать изменения во времени. Это будет полезно для более эффективного управления и планирования жилой инфраструктуры.

Вместе с вызовами существует и значительный потенциал для дальнейшего развития и усовершенствования методов оценки инфраструктуры жилых комплексов с использованием данных космической съемки. С активным развитием технологий и научных исследований, эта область будет продолжать расширяться, предоставляя новые инструменты для урбанистов и городских планировщиков, обеспечивая более качественную и устойчивую жилую среду для будущих поколений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы рассмотрели значительное значение, преимущества и технические аспекты применения данных космической съемки для оценки инфраструктуры жилых комплексов. Изложенные в статье данные и факты подтверждают, что космическая съемка стала важным инструментом для урбанистов, городских планировщиков и исследователей, обеспечивая информацией для более эффективного управления и развития жилых районов. В заключение, представляется ряд ключевых выводов и практической значимости этой технологии:

1. *Точность и высокая разрешающая способность:* Космическая съемка обладает высокой разрешающей способностью, позволяя идентифицировать и анализировать даже мельчайшие детали жилой инфраструктуры. Это существенно улучшает возможности оценки качества дорожной инфраструктуры, мониторинга зеленых зон и других аспектов жилых комплексов.
2. *Глобальное охватывание:* Данные космической съемки позволяют оценивать жилые комплексы практически в любой точке планеты, что делает этот метод универсальным и полезным инструментом как для развитых, так и для развивающихся стран.
3. *Анализ изменений во времени:* Возможность проводить анализ изменений в инфраструктуре со временем позволяет выявлять тренды, изменения в строительстве и планировке, а также риски, связанные с окружающей средой. Это помогает городам и регионам поддерживать актуальные и адаптированные стратегии развития.
4. *Экономическая эффективность:* Применение космической съемки часто оказывается более экономически эффективным по сравнению с традиционными методами сбора данных, позволяя существенно сократить расходы на мониторинг и анализ.

Использование данных космической съемки при оценке инфраструктуры жилых комплексов также имеет высокую практическую значимость:

1. *Улучшение жилищных условий:* Детальная оценка дорожной инфраструктуры и доступности общественного транспорта помогает городам и регионам повысить качество жилищных условий и комфорт горожан.
2. *Экологическая устойчивость:* Мониторинг зеленых зон и оценка загрязнения окружающей среды позволяют разрабатывать стратегии для создания более экологичных и здоровых жилых районов.
3. *Предупреждение рисков:* Оценка риска наводнений и изменения климата помогает городам более эффективно готовиться к бедствиям и минимизировать ущерб.
4. *Умное городское планирование:* Применение данных космической съемки в инициативах по созданию умных городов способствует более

эффективному управлению ресурсами и улучшению качества городской среды.

Подводя итоги хочется сказать, что использование данных космической съемки для оценки инфраструктуры жилых комплексов предоставляет нам мощный инструмент для улучшения жилищных условий, урбанистического планирования и развития устойчивых городов. Это поле продолжает активно развиваться и предоставляет бесценные возможности для исследователей, городских планировщиков и специалистов по оценке жилищной инфраструктуры. Мы можем ожидать, что в ближайшие годы данные космической съемки станут еще более важными для создания современных, комфортных и экологичных городов, способствуя улучшению качества жизни и обеспечению устойчивого будущего для наших городов и их жителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] DigitalGlobe. "WorldView-3 Satellite" URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/worldview-3> (дата обращения: ноябрь 2023)
- [2] CNES. "Pleiades Satellites" URL: <https://pleiades.cnes.fr/en/PLEIADES/index.htm> (дата обращения: ноябрь 2023)
- [3] Ball Aerospace & Technologies Corp. "QuickBird Satellite" URL: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/quickbird/> (дата обращения: ноябрь 2023)
- [4] Воробьева А.А. "Дистанционное зондирование земли-Санкт-Петербург 2012 г." // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2012. – Т. 10. – № 2. – С. 520-525.
- [5] Епринцев С.А., Шекоян С.В. "Изучение параметров качества окружающей среды урбанизированных территорий в условиях повышенной антропогенной нагрузки" // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 520-525.
- [6] "Landsat Missions" // NASA. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/main/index.html (дата обращения: ноябрь 2023)
- [7] "Sentinel Missions" // European Space Agency. URL: <https://www.esa.int/Sentinel> (дата обращения: ноябрь 2023)
- [8] "Drones in Construction – What You Need to Know" // DroneDeploy. URL: <https://www.dronedeploy.com/blog/drones-in-construction/> (дата обращения: ноябрь 2023)
- [9] Lary, D.J., Alavi, A.H., Gandomi, A.H., Walker, A.L. "Machine learning in geosciences and remote sensing" // Geoscience Frontiers. – 2016. – Т. 7. – № 1. – С. 3-10.
- [10] QGIS (Quantum GIS): Официальный сайт QGIS. URL: <https://qgis.org/> (дата обращения: ноябрь 2023)

- [11] ArcGIS: Официальный сайт ArcGIS. URL: <https://www.arcgis.com/> (дата обращения: ноябрь 2023)
- [12] Google Earth Engine: Официальный сайт Google Earth Engine. URL: <https://earthengine.google.com/> (дата обращения: ноябрь 2023)
- [13] ENVI: Официальный сайт ENVI. URL: <https://www.3dharrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI> (дата обращения: ноябрь 2023)
- [14] OpenStreetMap (OSM): Официальный сайт OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: ноябрь 2023)
- [15] Джордж, А. и К. Ричардсон. "Применение космической съемки в гражданском строительстве" // Геоинформатика. – 2012. – Т. 14. – № 3.
- [16] Смит, Б. "Высокоразрешающая космическая съемка для анализа архитектурных особенностей" // Журнал инфраструктурных исследований. – 2015. – Т. 28. – № 2.
- [17] Харрисон, Д. "Методы оценки дорожной инфраструктуры с использованием космической съемки" // Транспортные исследования. – 2018. – Т. 42. – № 4.
- [18] Грин, М. "Мониторинг зеленых зон в городской среде через космическую съемку" // Экология и городская жизнь. – 2017. – Т. 21. – № 1.
- [19] Ли, С. и Ч. Ван. "Отслеживание изменений в строительстве с использованием космической съемки" // Градостроительство и архитектура. – 2019. – Т. 10. – № 3.
- [20] "Спутники: Глобальное охватывание и применение" // Космическая исследовательская агентство. URL: [ссылка] (дата обращения: ноябрь 2023)
- [21] "Глобальное сравнение структуры жилых комплексов" // Институт глобальных исследований. URL: [ссылка] (дата обращения: ноябрь 2023)
- [22] Готтманн Ж. "Мегалополис, или урбанизация северо-восточного побережья США" // География городов. – М., 2008.
- [23] Национальный центр по бедствиям. "Анализ географических рисков с использованием космической съемки" // Бюллетень по управлению бедствиями. – 2020. – Т. 36. – № 4.
- [24] Urban Atlas. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/e006507d-15c8-49e6-959c-53b61facd873> - "Urban Atlas"
- [25] "Mapping and Monitoring of Slums in 5 Steps" URL: <https://www.gim-international.com/content/article/mapping-and-monitoring-of-slums-in-5-steps> -
- [26] MISSISSIPPI'S FEMA Risk MAP & FLOOD MAPPING PROGRAM STATUS - QUARTERLY UPDATE" URL: https://geology.deq.ms.gov/floodmaps/Projects/RiskMAP/docs/Quarterly_Updates/1stQuarter2021.pdf
- [27] Smart Nation Singapore re. URL: <https://www.smartnation.gov.sg>
- [28] China's Smart City Initiatives. URL: https://web.archive.org/web/20220211005434id_/https://www.uscc.gov/sites/default/files/2020-04/China_Smart_Cities_Development.pdf
- [29] Smart Cities Dive. URL: <https://www.smartcitiesdive.com> - "Smart Cities Dive"

APPLICATION OF SATELLITE IMAGERY DATA FOR RESIDENTIAL COMPLEX INFRASTRUCTURE ASSESSMENT

Antonova S.N.
Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
limlimom@inbox.ru

Yustus A.A.
Institute of Radio electronics and Informatics
Department for GIS
RTU MIREA
Moscow, Russia
yustus@mirea.ru

Abstract— The article explores the importance and prospects of utilizing satellite imagery data for the effective management and enhancement of residential infrastructure in contemporary society. The foundation of the article lies in reviewing the fundamentals of satellite imagery, including the types of satellites and drones employed for this purpose, along with highlighting the advantages of such an approach. Technical methods and tools, such as Geographic Information Systems (GIS) and machine learning, applied for processing satellite imagery data, are also examined. The article provides an overview of the application of satellite imagery in assessing the quality of road infrastructure, monitoring green spaces, evaluating environmental pollution, detecting changes in construction and planning, as well as assessing public transport accessibility.

Keywords — satellite imagery, residential infrastructure, urbanization, change monitoring, Geographic Information Systems (GIS), technical data analysis methods, satellites and drones, environmental assessment, public transport accessibility, machine learning, image analysis software, road infrastructure quality assessment.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИКИ НОРМАЛИЗОВАННОГО РАЗНОСТНОГО ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Прядилина А.В.

Кафедра геоинформационных систем
Институт радиоэлектроники и информатики
РТУ МИРЭА
Москва, Российская Федерация
pryadilina@mirea.ru

Аннотация – активизация некоторых экзогенных процессов в зоне распространения многолетнемерзлых пород связана с изменениями в сезонно-талом слое, происходящими на фоне нарушения или полной деградации растительного покрова. Проявления экзогенных процессов могут провоцировать аварии, уменьшать устойчивость зданий и сооружений, сокращать срок их эксплуатации. Сбор данных полевыми методами в труднодоступных регионах со сложными климатическими условиями затруднителен. Оптимизировать накопление и систематизацию информации о проявлениях экзогенных процессов можно с помощью дешифрирования космических снимков.

Ключевые слова – экзогенные процессы, мониторинг, NDVI, динамика, дешифрирование, многолетнемерзлые породы

Российский сектор Арктики – регион особых стратегических экономических интересов Российской Федерации. Интенсивное хозяйственное освоение и уязвимость территории определяют необходимость мониторинга состояния природных и природно-техногенных комплексов для прогноза их изменений и принятия управленческих решений оптимизации системы природопользования региона.

Экзогенные процессы приводят к трансформациям в природных геосистемах, провоцируя аварии, уменьшая устойчивость зданий и сооружений, сокращая период их эксплуатации. Сбор первичной информации о проявлениях экзогенных процессов на территории Арктической зоны Российской Федерации сопряжен с рядом сложностей: труднодоступность многих территорий для полевого обследования, неравномерная сеть мониторинга состояния окружающей среды, пункты которой, как правило, приурочены к техногенным объектам или метеорологическим станциям.

Дешифрирование космических снимков позволит оптимизировать сбор и систематизацию информации о проявлениях экзогенных процессов.

Данные дистанционного зондирования являются источником актуальной информации о состоянии изучаемой территории. Однако, космические снимки не дают возможности непосредственного наблюдения, например, многолетнемерзлых пород, или почвенного покрова. При работе с таким материалом необходимо использовать объекты-индикаторы состояния геосистемы. Растительности и гидрография – два наиболее часто используемых геоиндикатора [7], в первую очередь это связано с тем, что их состояние и динамика может быть определена по данным дистанционного зондирования с помощью визуального или автоматического дешифрирования.

Развитие и активизация криогенных процессов на равнинах Севера России, как правило, связана с изменениями, происходящими в сезонно-талом слое или изменениями свойств многолетнемерзлых пород. Анализ литературных источников показал, что такие изменения возможны при трансформациях окружающей среды, которые оказывают влияние на теплообмен между литосферой и атмосферой [1,2,6]. К таким трансформациям может приводить деградация растительного покрова.

Если говорить об оценке состояния растительного покрова по данным дистанционного зондирования, то наиболее часто используемым подходом является расчет нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) [3,4,5].

Для расчета индекса NDVI необходимо использовать красный и ближний инфракрасный диапазоны мультиспектральной съемки (формула 1).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+Red} \quad (1) \quad [8]$$

где, NIR – спектральная яркость в ближнем инфракрасном канале,

RED – спектральная яркость в красном канале.

Геоинформационный анализ результатов расчета индекса NDVI полученного за несколько лет, позволяет выявить участки, на которых происходит стабильное понижение значений индекса, что косвенно может указывать на деградацию растительного покрова.

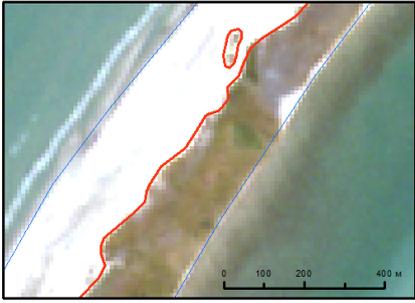
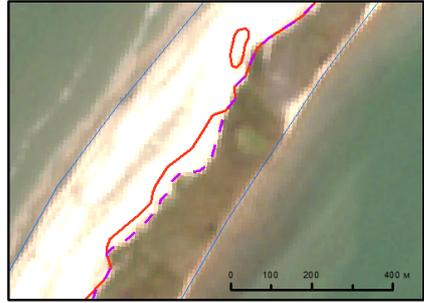
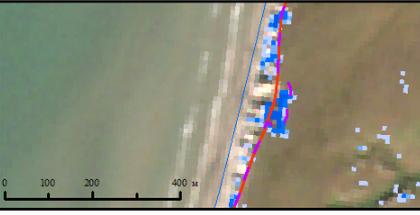
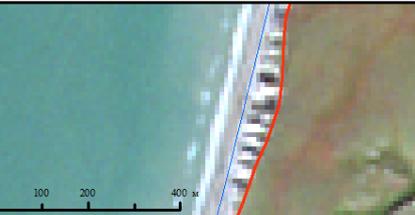
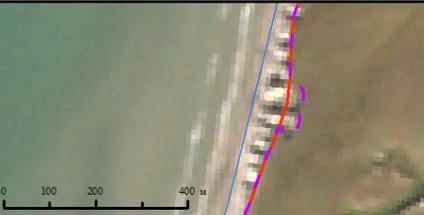
Для выполнения практической части исследования был выбран участок, выходящий к берегам Карского моря на западе полуострова Ямал, от м. Белужий Нос до мыса Маррасале, включая нижнее течение реки Мараяха. В границах исследования расположена полярная станция Маррасале.

В качестве основного источника информации выбраны снимки съемочной системы Sentinel-2, полученные в период активной вегетации растительности (с 15 июля по 10 сентября). Был выполнен поиск всех доступных для скачивания материалов с 2015 (начало миссии) по 2022 год. Даты получения снимков, которые отвечали поставленным условиям: 01.09.2016 и 05.09.2020.

После геометрического согласования снимков и наложения масок облачности, были рассчитаны индексы NDVI, из значений вегетационного индекса за 2020 год были вычтены значения индекса за 2016 год. Отрицательный результат разности означает уменьшение биомассы зеленой растительности.

Некоторые результаты дешифрирования проявлений экзогенных процессов по динамике индекса NDVI представлены в таблице 1

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ДИНАМИКЕ ИНДЕКСА NDVI

№	Результат вычитания значений вегетационного индекса за 2016 из значений вегетационного индекса за 2020	Состояние территории в 2016 году	Состояние территории в 2020 году
1	 <p>Граница пляжа: — 2016 г. - - 2020 г. — Береговая линия</p>		
Эоловые процессы в береговой зоне моря			
2	 <p>Положение бровки склона: — 2016 г. - - 2020 г. — Береговая линия</p>		
Изменение положения бровки склона вследствие абразии			



Отрицательные значения разности индекса NDVI позволяют выявить участки, на которых произошла деградация растительного покрова – индикатор пожаров, эоловых и гравитационных процессов. Расчет динамики вегетационного индекса – возможный подход к автоматизации выявления территорий, на которых активизация экзогенных процессов уже произошла или может произойти, что позволит оптимизировать сбор и систематизацию информации в рамках мониторинга состояния окружающей среды на труднодоступных северных территориях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России // Науч. редак. и предисловие проф. Ю.Г. Симонова. – М.: Изд-во Географического факультета МГУ, 2001. – 262 с.
- [2] Геокриология СССР. Западная Сибирь / (В. Т. Трофимов, Ю. К. Васильчук, В. В. Баулин и др.); под ред. Э. Д. Ершова. - Москва: Недра, 1989. – 453 с.
- [3] Железный О. М., Тутубалина О. В., Кравцова В. И. Оценка изменений растительности Норильского промышленного района по дистанционным данным на основе анализа трендов спектральных индексов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19. – №. 1. – С. 170-178.
- [4] Корниенко С. Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природные ресурсы. – 2011. – №. 1. – С. 67-73.
- [5] Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 28–32.
- [6] Хилимонюк В. Зд., Чеснокова И.В. Эколого-геокриологические последствия урбанизации арктических территорий // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания. ICER – 2022 : сборник трудов V Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры природообустройства, Брест, 26–28 октября 2022 г. : в 2 частях / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет. Брест: БрГТУ, 2022. – Часть 2. – С. 209–216.
- [7] Якубсон К. И., Корниенко С.Г., Разумов С.О., Дубровин В.А., Крицук Л.Н., Ястребова Н.В. Геоиндикаторы изменения окружающей среды в районах интенсивного освоения нефтегазовых месторождений и методы их оценки // Георесурсы, геознергетика, геополитика. – 2012. – №. 2 (6). – С. 22.
- [8] Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., and Deering, D. W. (1973) "Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS," _Third ERTS Symposium, NASA SP-351, vol. 1, pp.309-317

USING THE DYNAMICS OF THE NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX TO DECIPHER THE MANIFESTATIONS OF EXOGENOUS PROCESSES IN THE PERMAFROST DISTRIBUTION ZONE

Pryadilina A.V.
Department of Geoinformation Systems
Institute of Radio Electronics and Informatics
RTU MIREA
Moscow, Russian Federation
pryadilina@mirea.ru

Abstract – activation of some exogenous processes in the permafrost distribution zone is associated with changes in the seasonal thaw layer occurring against the background of disturbance or complete degradation of vegetation cover. Manifestations of exogenous processes can provoke accidents, reduce the stability of buildings and structures, and shorten their service life. Data collection by field methods in hard-to-reach regions with difficult climatic conditions is difficult. It is possible to optimize the accumulation and systematization of information about the manifestations of exogenous processes by decrypting satellite images.

Keywords – exogenous processes, monitoring, NDVI, dynamics, decoding, permafrost rocks

УДК 551.46.077:529.584

БЕСПИЛОТНЫЙ ЭКРАНОПЛАН КАК НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ В СТРОЕНИИ ВОЕННО- МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Джаныбеков Р.Ю.

Военный учебный центр при ЮФУ
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»
Ростов-на-Дону, Россия
dzhanybekov@sfedu.ru

Аббасов И.Б.

кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна
Инженерно-технологической академии ЮФУ
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»
Ростов-на-Дону, Россия
ibabbasov@sfedu.ru

Аннотация — Работа посвящена анализу и определению проблемных вопросов в конструировании современных военно-космических систем с горизонтальным взлетом на базе морских робототехнических комплексов. Для достижения данной цели отмечены некоторые исторические этапы развития, особенности конструирования современных экранопланов. Определена основная концепция и выработаны требования к экраноплану, как стартовой платформе для многоразовых военно-космических систем горизонтального взлета. Отмечены проблемы в разработке современных морских робототехнических комплексов на базе экраноплана, касающихся вопросов надежности, безопасности, управления, эффективности и производительности.

Ключевые слова — морской робототехнический комплекс, прибрежная акватория, управляемые и автономные аппараты, экраноплан, военно-космические системы горизонтального старта.

ВВЕДЕНИЕ

Исторически сложилось так, что морской и речной транспорт в России играют важную роль. В самом деле, с Севера и Востока огромную территорию Российской Федерации окружает множество морей Северного ледовитого и Тихого океанов. С каждым годом все значимее становится эксплуатация Северного морского пути. В связи с этим морской и речной транспорт играют критическую роль в обороне Российской Федерации, особенно учитывая ее обширное географическое пространство и многочисленные водные пути.

Скоростное передвижение водным способом выходит на первый уровень и имеет огромную важность для военно-космической отрасли России. Оно обеспечивает оперативность, гибкость и эффективность военно-космических операций, логистическую поддержку и защиту интересов России на международной арене.

Очень активно рассматриваются суда с динамическими принципами поддержания, такие как суда на воздушной подушке и экранопланы. Эти инновационные концепции и технологии предлагают ряд преимуществ в логистической сфере, а так же, как космические транспортные системы с первой ступенью горизонтального старта. Одним из

главных преимуществ судов с динамическими принципами поддержания является их способность оперировать как на воде, так и на суше. В странах с протяженной морской береговой линией появился интерес к космическим транспортным системам с первой ступенью горизонтального старта, роль которой выступает экраноплан. В добавок данные космические транспортные системы позволят осуществлять запуск и в экваториальных широтах, что значительно повышает массу полезной нагрузки, выводимой на орбиту. Экранопланы, в свою очередь, используют комбинацию гидродинамического подъема и аэродинамической подушки для достижения высокой скорости и маневренности как на воде, так и на суше.

Экранопланы - это тип судов, которые используют эффект «закрытого воздушного подушечного полета» для поднятия корпуса над поверхностью воды и создания подъемной силы. Одной из главных перспектив использования экранопланов является их способность достигать высоких скоростей и осуществлять значительные логистические перевозки с экономией топлива. Экранопланы могут значительно сократить время и расстояние, необходимые для транспортировки ракетно-космических систем, что способствует оперативности и гибкости их использования [1]. Кроме того, экранопланы имеют хорошие маневренные характеристики и способность оперировать на воде, и на суше. Они могут перемещаться по мелководью, снегу, песчаным пляжам и другим неровным поверхностям, что делает их полезными в труднодоступных районах, включая прибрежные зоны и болотистые участки. Экранопланы могут быть задействованы для выполнения поисково-спасательных операций спускаемых аппаратов с космонавтами на борту прибрежных зонах и морских акваториях. Еще одной перспективой использования экранопланов на является их способность оперировать в условиях Арктики.

История создания и развития экранопланов в России имеет глубокие корни и связана с работой ЦКБ по СПК, которым руководил выдающийся конструктор скоростных судов, доктор технических наук Р.Е. Алексеев.

В 1961 году был создан первый прототип экраноплана под названием "Лунь" (Летающий Ударный Носитель).

Этот экраноплан был разработан для военного применения и имел большую грузоподъемность и дальность полета.

В 1980-х годах был создан один из самых известных экранопланов - "Каспийский Монстр". Это был самый большой экраноплан в мире.

Однако после распада Советского Союза и экономических трудностей 1990-х годов развитие экранопланов в России замедлилось.

Сегодня в России проводятся исследования и разработки в области экранопланов, с целью создания более совершенных и эффективных транспортных моделей. Возобновление интереса к этой технологии связано с ее потенциалом в обеспечении быстрой и гибкой транспортировки грузов, а также с возможностью применения в военной- космической отрасли.

I. ТРЕБОВАНИЯ ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МОРСКИМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСАМ НА БАЗЕ КОНЦЕПЦИИ ЭКРАНОПЛАНА

Различают два альтернативных способа запуска космических аппаратов – вертикального и горизонтального старта. Основное распространение получил способ вертикального старта. На данный момент возможности вертикального старта практически исчерпаны, вдобавок с распадом СССР Россия потеряла возможность вывода космических аппаратов на орбиту в приэкваториальной области. Альтернативой может явиться запуск космических систем с акватории мирового океана. Наиболее перспективным направлением становится авиационная линия горизонтального старта воздушно-космического самолета, где в качестве несущей платформы может использоваться экраноплан.

Исходя из вышесказанного морские робототехнические комплексы на базе экраноплана представляют широкий спектр возможностей в военно-космической сфере.

Разработка дизайна проекта морских робототехнических комплексов на базе экраноплана предъявляет ряд требований, которые обеспечивают эффективность, функциональность и безопасность комплекса. Дизайн экраноплана должен обеспечивать оптимальные гидродинамические характеристики для плавания над водной поверхностью. Он должен иметь эффективную форму корпуса, учет взаимодействия с водой и воздухом, чтобы обеспечить минимальное сопротивление и максимальную эффективность движения.

Дизайн экраноплана должен обеспечивать устойчивость и маневренность на морской поверхности. Он должен быть спроектирован с учетом принципов стабильности, чтобы минимизировать крен и качку в условиях волнения. Также важно обеспечить достаточную маневренность для выполнения различных морских задач. Так же он должен обеспечивать высокую прочность и надежность конструкции. Морской робототехнический комплекс должен быть способен выдерживать воздействие морских условий, включая волнение, соленую воду и другие факторы окружающей среды. Для этого требуется

использование прочных материалов и соответствующих технологий сборки.

Дизайн экраноплана должен обеспечивать удобство эксплуатации для операторов и обслуживающего персонала. Он должен предусматривать эргономичное размещение систем управления и оборудования, хорошую видимость и доступность для обслуживания и ремонта.

Эти требования к дизайну обеспечивают оптимальное функционирование и эффективность морских робототехнических комплексов на базе экраноплана и способствуют успешной реализации задач. В связи с этим можно сформулировать техническое задание к разработке бедующего дизайн-проекта современного морского робототехнического комплекса на базе экраноплана.

Объект разработки: морской робототехнический комплекс на базе экраноплана с боевой частью массой до 500 т. Особенности проектной ситуации, объекта, инициативная разработка: экономичное и неприхотливое к инфраструктуре новое морское робототехническое средство с возможностью взлёта и посадки на воду и лёд-снег, маневрирование на ровной площадке суши и поверхностью воды.

Цель проекта: Осуществление ракетно-стартовых действий на морской глади и прибрежных районах с почти авиационной скоростью 500 км/ч и дальностью свыше 2000 км.

Главная задача проекта: гармония технических, функциональных и эстетических качеств машины.

Требования и ограничения к объекту:

Дизайнерское решение дрона-экрanoплана должно обеспечивать выполнение функций доставки полезной нагрузки до места старта, осуществление разгона стартовой части ракетно-космической системы за счет высокой скорости и маневренности, возможность пуска с береговой зоны (суши) [2].

II. КОНЦЕПЦИИ В МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКРАНОПЛАНОВ И ВОЗМОЖНЫЕ ДИЗАЙН-ПРОЕКТЫ

В моделировании дизайна проектов экранопланов существуют различные концепции, которые помогают оптимизировать функциональность, эффективность этих средств.

Вот несколько концепций, используемых при разработке дизайна экранопланов:

- концепция гидродинамики: Эта концепция уделяет особое внимание гидродинамическим характеристикам экраноплана. Она включает в себя изучение формы корпуса, влияние волн на движение, оптимизацию аэродинамических и гидродинамических сил, а также учет взаимодействия воздуха и воды для обеспечения оптимальной производительности экраноплана;

- концепция стабильности и контроля: Эта концепция направлена на обеспечение стабильности и управляемости экраноплана в различных условиях. Она включает в себя разработку систем автоматической стабилизации и контроля, учет динамики корпуса и аэродинамических поверхностей, а также оптимизацию

систем управления для обеспечения точности и предсказуемости движения экраноплана;

- концепция эргономики: Эта концепция уделяет внимание работы обслуживающему инженерно-техническому персоналу;

- концепция энергоэффективности: Эта концепция включает в себя использование энергоэффективных систем движения, снижение выбросов отработанных газов и шума, а также возможность использования возобновляемых источников энергии для питания экраноплана;

- концепция модульности и многофункциональности: Эта концепция предусматривает разработку экранопланов, которые могут быть легко адаптированы для различных задач и функций. Она включает в себя модульную конструкцию, возможность установки различных оборудования и систем в зависимости от потребностей, а также возможность использования экраноплана в различных сферах.

При конструировании робототехнических экранопланов наиболее подходящими дизайн-проектами являются:

- модульные и настраиваемые системы позволяющие легко варьировать конфигурацию и функциональность экраноплана, чтобы адаптироваться к различным ситуациям и задачам. Это включает в себя возможность использования различного класса ракетно-космических систем, датчиков, коммуникационных и управляемых систем в зависимости от условий эксплуатации;

- высокая маневренность и скорость – дроны-экрanoпланы должны обладать высокой маневренностью и скоростью, чтобы быстро перемещаться по морской поверхности и выполнять задачи в различных условиях. Это позволяет им эффективно маневрировать и оперативно доставляться к месту назначения полезную нагрузку. Экрanoпланы, это один из ярчайших примеров межвидового технического скрещивания, в данном случае это симбиоз самолёта и скоростной лодки;

- системы дальней связи и коммуникации - они обеспечивают связь с другими элементами ракетно-космического комплекса, передачу данных, команд и информации в режиме реального времени, а также координацию действий с другими платформами;

- автономные возможности. Дизайн-проекты, которые предусматривают автономные возможности экранопланов, позволяют им выполнять задачи без прямого участия человека. Это включает в себя использование систем искусственного интеллекта, автоматизации и автоматического принятия решений. Это

позволит выполнять ракетно-стартовые действия в автономном режиме и прежде всего обеспечит безопасность обслуживающего персонала;

- информационная интеграция и сетевая связь. Дизайн-проекты, которые обеспечивают интеграцию с другими военными и военно-космическими системами и платформами, а также высокую степень сетевой связи, позволяют экранопланам взаимодействовать и координировать действия с другими военными силами. Это повышает эффективность операций, обеспечивает обмен информацией и позволяет создавать единую обстановку[3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дизайн-проекты на базе экраноплана являются наиболее подходящими при конструировании многоразовых военных-космических систем горизонтального взлета на базе морских робототехнических комплексов, они обладают способностью перемещаться над водной поверхностью на небольшой высоте, что обеспечивает им высокую маневренность и скорость[4]. Это особенно важно в военно-космической сфере, где быстрые реакции и мобильность играют важную роль в успешном выполнении задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Любимов В.И. Анализ тенденций развития экранопланов и перспективы их использования в транспортной системе России /В.И. Любимов, А.А. Гаккель, В.И. Барышев/ Вестник ВГАВТ, выпуск 53, 2017 г. Раздел III. Судостроение, судоремонт и экологическая безопасность судна. С. 69–74.
- [2] Макухин С. Электрический экраноплан “Морской планер” – революция в прибрежном транспорте/Зеленая Точка Старта: [сайт]. 2021. – URL: <https://greenstartpoint.ru>.
- [3] Аббасова И.Б. Компьютерное моделирование в авиакосмической промышленности/ под ред. И.Б. Аббасова. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 300 с.
- [4] Добровольский А. В России завершено проектирование нового морского экраноплана А-050: [Электронный ресурс]. 2021. – URL:<https://fishki.net/1673147-v-rossii-zaversheno-proektirovanie-novogo-morskogo-jekranoplana-a-050.html>

UNMANNED EKRAANOPLANE AS A NEW CONCEPT IN THE STRUCTURE OF NAVAL ROBOTIC COMPLEXES

Dzhanybekov R.Y.
Military Training Center at SFU
Southern Federal University
Rostov-on-Don, Russia
dzhanybekov@sfedu.ru

Abbasov I.B.
Department of Engineering Graphics and Computer Design
of the SFU Academy of Engineering and Technology
Southern Federal University
Rostov-on-Don, Russia
ibabbasov@sfedu.ru

Abstract — The work is devoted to the analysis and definition of problematic issues in the design of modern military space systems with horizontal take-off based on marine robotic complexes. To achieve this goal, some historical stages of development, design features of modern ekranoplans are noted. The basic concept is defined and the requirements for the ekranoplane as a launch platform for reusable military space systems of horizontal take-off are developed. The problems in the development of modern marine robotic systems based on the ekranoplan, concerning issues of reliability, safety, management, efficiency and productivity, are noted.

Keywords — marine robotic complex, coastal water area, controlled and autonomous vehicles, ekranoplan, military space systems of horizontal launch

УДК 621.391

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СВЯЗИ МЕЖДУ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИЕЙ СЛЕЖЕНИЯ И КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Чистяков Е. А.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
chistyakov@mirea.ru

Репин М. М.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
max18441930@gmail.com

Аннотация — Тема данного исследования посвящена анализу методов связи между наземной станцией слежения и космическими аппаратами. Связь с космическими аппаратами является критическим элементом космической миссии, обеспечивая передачу данных, команд и мониторинг состояния аппаратов. В данной работе рассматриваются различные методы и технологии, применяемые для обеспечения связи между наземными станциями и космическими аппаратами, включая радиосвязь, лазерную связь, оптическую связь, а также комбинированные подходы. Исследование включает в себя оценку преимуществ и ограничений каждого метода связи, а также анализ их применимости в различных сценариях и условиях. Также рассматриваются технологические инновации и будущие тенденции в области связи с космическими аппаратами, такие как развитие квантовой связи и многих других аспектов. Цель данного исследования - предоставить комплексное понимание методов связи между наземными станциями слежения и космическими аппаратами, а также их роль в обеспечении надежной и эффективной работы космических миссий. Полученные результаты и выводы могут быть полезными для разработчиков и операторов космических систем, а также для ученых и инженеров, работающих в области космонавтики и связи.

Ключевые слова — *связь, наземная станция слежения, космические аппараты, методы связи, комбинированные методы, преимущества и ограничения, технологические инновации, квантовая связь, космические миссии, надежность, эффективность, исследование, комплексное понимание, работа космических миссий, операторы космических систем, ученые, инженеры, космонавтика, разработчики, тенденции, оптическая связь, лазерная связь, радиосвязь.*

ВВЕДЕНИЕ

Современная космонавтика и исследования космического пространства не могли бы быть возможными без надежных и эффективных методов связи между наземными станциями слежения и космическими аппаратами. Связь с космическими аппаратами является жизненно важным звеном в космических миссиях, обеспечивая не только передачу данных, но и возможность

удаленного управления, мониторинга и диагностики состояния аппаратов. Эффективность и надежность этих методов связи являются критическими факторами успеха в космической отрасли.

Цель настоящего исследования - проанализировать разнообразные методы связи, используемые для обеспечения коммуникации между наземными станциями слежения и космическими аппаратами. В этой работе рассматриваются как классические методы, такие как радиосвязь, так и более современные и инновационные технологии, включая лазерную и оптическую связь. Также будет уделено внимание комбинированным подходам, которые сочетают различные методы для оптимизации связи в разных условиях и с учетом разнообразных потребностей космических миссий.

Кроме того, в данном исследовании будут рассмотрены преимущества и ограничения каждого метода связи, а также их применимость в различных сценариях, начиная от обитаемых космических станций до малых космических аппаратов для научных и коммерческих целей. Исследование также проложит путь к пониманию технологических инноваций и будущих тенденций в области связи с космическими аппаратами, таких как развитие квантовой связи и других передовых технологий.

Полученные результаты и выводы данного исследования будут полезны как для разработчиков и операторов космических систем, так и для ученых и инженеров, работающих в сфере космонавтики и связи, и будут способствовать усовершенствованию связи в космосе, повышению надежности и эффективности космических миссий и в конечном итоге содействовать расширению наших знаний о космической вселенной.

I. РАДИОСВЯЗЬ

Радиосвязь в контексте "Анализа методов связи между наземной станцией слежения и космическими аппаратами" играет ключевую роль в обеспечении надежной и эффективной коммуникации между землей и космосом. Радиосвязь представляет собой один из старейших и наиболее распространенных способов обмена данными и

командами между наземными станциями и космическими аппаратами, и по-прежнему остается важной технологией в космической отрасли.

Основные аспекты радиосвязи в данном контексте включают:

1. Частотный диапазон: Выбор радиочастотного диапазона играет решающую роль в качестве и пропускной способности связи. Разные частоты подходят для разных типов миссий и условий, например, высокие частоты могут обеспечить большую пропускную способность, но могут быть более подвержены атмосферным помехам.

2. Антенные системы: Эффективность связи зависит от качества антенных систем как на наземной станции, так и на космическом аппарате. Это включает в себя диаграммы направленности, усиление и механическое выравнивание антенн.

3. Модуляция и кодирование данных: Радиосигналы могут быть модулированы и закодированы для обеспечения безопасности передачи данных и максимизации использования доступной пропускной способности.

4. Системы слежения и управления: Радиосвязь также позволяет наземным станциям отслеживать положение и состояние космических аппаратов, а также отправлять команды для коррекции их работы.

5. Надежность и резервирование: Радиосвязь часто использует резервирование для обеспечения надежности связи. В случае сбоя в одной частотной полосе, система может автоматически переключиться на другую.



Рис. 1. Классификация радиосвязи в космической отрасли

Анализ радиосвязи в контексте космических миссий включает в себя оценку преимуществ, таких как широкий охват и надежность, а также ограничений, таких как ограничения по пропускной способности и подверженность помехам. Разработка и внедрение передовых технологий, таких как сверхширокополосные системы и разработка новых радиочастотных диапазонов, остаются важными направлениями развития радиосвязи для космических миссий.

II. ЛАЗЕРНАЯ СВЯЗЬ

Лазерная связь в анализе методов связи между наземной станцией слежения и космическими аппаратами представляет собой инновационную и эффективную технологию, которая начинает приобретать все большую популярность в космической отрасли. Она предлагает ряд преимуществ и вызывает интересные вызовы:

1. Высокая пропускная способность: Лазерные системы обеспечивают значительно большую пропускную способность по сравнению с радиосвязью. Это позволяет

передавать большие объемы данных с высокой скоростью, что особенно важно для научных миссий и передачи изображений.

2. Малая задержка: Лазерные лучи движутся со скоростью света, что минимизирует временную задержку в передаче данных между космическими аппаратами и наземными станциями. Это важно для операций, требующих реакции в реальном времени.

3. Большая безопасность: Лазерная связь сложнее подвергнуть перехвату или помехам, что делает ее более безопасной для передачи конфиденциальных данных.

4. Меньшая радиоинтерференция: Лазерная связь менее подвержена радиоинтерференции, что является проблемой для радиосвязи в плотных радиочастотных диапазонах.



Рис. 2. Основные плюсы лазерной связи.

Однако лазерная связь также имеет свои ограничения и вызовы:

1. Линейность и точность выравнивания: Для эффективной работы лазерной связи требуется высокая линейность и точное выравнивание между передающей и принимающей сторонами. Это может быть сложно обеспечить во вращающихся или маневрирующих космических аппаратах.

2. Атмосферные помехи: Атмосферные условия, такие как атмосферная дисперсия и атмосферный турбулентный эффект, могут влиять на качество лазерной связи в различных условиях и высотах.

3. Затраты на разработку и оборудование: Лазерные системы требуют более сложных технологий и оборудования, что может повысить стоимость разработки и эксплуатации.

Анализ лазерной связи в контексте связи с космическими аппаратами включает в себя оценку применимости этой технологии в различных типах миссий, включая научные и коммерческие, и определение сценариев, в которых она наиболее эффективна. Дальнейшее развитие лазерной связи может способствовать более быстрой и надежной связи в космической отрасли.

III. ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

Оптическая связь в контексте анализа методов связи между наземной станцией слежения и космическими аппаратами представляет собой передовую и многообещающую технологию, которая основана на использовании световых лучей, вместо радиоволн. Эта технология предоставляет ряд преимуществ и вызовов:

Преимущества оптической связи:

1. Высокая пропускная способность: Оптическая связь обеспечивает невероятно высокую пропускную способность и позволяет передавать огромные объемы

данных на высоких скоростях. Это важно для передачи высокоразрешающих изображений и научных данных.

2. Малая временная задержка: Световые лучи движутся с практически мгновенной скоростью, что минимизирует временную задержку в передаче данных между космическими аппаратами и наземными станциями.

3. Безопасность и секретность: Оптическая связь менее уязвима к перехвату и вмешательству по сравнению с радиосвязью, что делает ее предпочтительной для передачи конфиденциальных данных.

4. Минимальная радиоинтерференция: Оптическая связь практически не подвержена радиоинтерференции и может работать в окружении с высокой электромагнитной помехой.



Рис. 3. Основные плюсы оптической связи

Ограничения и вызовы оптической связи:

1. Линейность и высокоточное выравнивание: Оптическая связь требует точного выравнивания оптических компонентов на космических аппаратах и на наземных станциях. Это может быть сложно в условиях орбитальных маневров и вибраций.

2. Атмосферные воздействия: Атмосферные явления, такие как атмосферная дисперсия и турбулентность, могут влиять на качество оптической связи, особенно при передаче данных через атмосферу Земли.

3. Затраты на разработку и оборудование: Оптические системы требуют высокотехнологичного оборудования и инфраструктуры, что может увеличить стоимость и сложность проекта.

Анализ оптической связи в контексте связи с космическими аппаратами включает оценку применимости этой технологии для различных видов миссий и учет условий, в которых она наиболее эффективна. Дальнейшее развитие оптической связи может привести к более быстрой и надежной связи в космической отрасли, особенно в миссиях, где высокая скорость передачи данных является критически важной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа методов связи между наземной станцией слежения и космическими аппаратами можно сделать следующие выводы:

1. Радиосвязь: Радиосвязь остается важным и широко используемым методом связи в космической отрасли

благодаря своей надежности и относительной простоте. Она подходит для различных типов миссий, но имеет ограничения по пропускной способности.

2. Лазерная связь: Лазерная связь предлагает высокую пропускную способность и минимальную временную задержку, что делает ее идеальным выбором для миссий, требующих передачи больших объемов данных в реальном времени. Она также обладает более высокой безопасностью и меньшей радиоинтерференцией.

3. Оптическая связь: Оптическая связь представляет собой передовую технологию с высокой пропускной способностью и низкой временной задержкой. Она может обеспечить надежную и быструю передачу данных, особенно в миссиях с высокими требованиями к скорости передачи.

4. Инновации и будущие направления: Развитие квантовой связи и других передовых технологий обещает изменить ландшафт связи в космосе, улучшая безопасность, пропускную способность и надежность связи.

В заключение, выбор метода связи между наземной станцией слежения и космическими аппаратами зависит от конкретных требований миссии, условий окружающей среды и бюджетных ограничений. Каждый из рассмотренных методов связи имеет свои преимущества и ограничения, и оптимальный выбор будет зависеть от конкретных обстоятельств. В будущем, с развитием технологий, мы можем ожидать более интегрированных и усовершенствованных систем связи, что даст новые возможности для исследования космического пространства и проведения успешных космических миссий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ивашкова Т. Б. Освоение Вселенной : [для среднего школьного возраста] / Т. Б. Ивашкова. — Москва : ОЛМА Медиа Групп, 2014. — 127 с. : ил., фот.
- [2] Ликсо В. В. Вселенная и полеты в космос : книга, о которой мечтает каждый мальчишка : [для среднего школьного возраста] / В. В. Ликсо. — Москва : АСТ, 2016. — 159 с. : цв. ил.
- [3] Афонькин С. Ю. Космос : [школьный путеводитель: для среднего и старшего школьного возраста] / С. Ю. Афонькин ; [художник Е. В. Доведова]. — Санкт-Петербург : Балтийская книжная компания, 2012. — 93, [3] с. : цв.ил.
- [4] Тарасов Л. В. Вселенная: в просторы космоса: книга для школьников... и не только / Л. В. Тарасов. — Издание стереотипное. — Москва : Издательство ЛКИ, 2017. — 319 с. : ил.
- [5] Первушин А. И. 108 минут, изменившие мир / А. И. Первушин. — Москва : Эксмо, 2011. — 528 с. : ил.

ANALYSIS OF COMMUNICATION METHODS BETWEEN THE GROUND TRACKING STATION AND SPACECRAFT

Chistyakov E. A.

Institute of Radio Electronics and Computer Science
Department of Radio Electronic Systems and Complexes,
RTU MIREA
Moscow, Russia
chistyakov@mail.ru

Repin M. M.

Institute of Radio Electronics and Computer Science
Department of Radio Electronic Systems and Complexes,
RTU MIREA
Moscow, Russia
max18441930@gmail.com

Abstract — The topic of this study is devoted to the analysis of communication methods between a ground tracking station and spacecraft. Communication with spacecraft is a critical element of the space mission, providing data transmission, commands and monitoring of the state of the vehicles. This paper discusses various methods and technologies used to provide communication between ground stations and spacecraft, including radio communication, laser communication, optical communication, as well as combined approaches. The study includes an assessment of the advantages and limitations of each communication method, as well as an analysis of their applicability in various scenarios and conditions. Technological innovations and future trends in the field of communication with spacecraft, such as the development of quantum communication and many other aspects, are also considered. The purpose of this study is to provide a comprehensive understanding of communication methods between ground tracking stations and spacecraft, as well as their role in ensuring reliable and efficient operation of space missions. The results and conclusions obtained can be useful for developers and operators of space systems, as well as for scientists and engineers working in the field of astronautics and communications.

Keywords — communication, ground tracking station, spacecraft, communication methods, combined methods, advantages and limitations, technological innovations, quantum communication, space missions, reliability, efficiency, research, integrated understanding, space mission operation, space system operators, scientists, engineers, astronautics, developers, trends, optical communication, laser communication, radio communication.

УДК 621.396

СИНХРОНИЗАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПО СИГНАЛАМ ГНСС

Абрамова Е.А.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
liza.abramova23@gmail.com

Кашаева А.В.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
kashchaeva.a.v@edu.mirea.ru

Максимович А.В.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра телекоммуникаций
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
maksimovich.a.v1@edu.mirea.ru

Аннотация — В статье рассмотрен вопрос применения приемников, построенных по технологии программно-определяемого радио - Software Defined Radio (SDR), для работы с сигналами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Приведено краткое описание ГНСС: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. Приведена схема стенда для формирования сигналов синхронизации: 1 PPS и 10 МГц, а также осциллограммы этих сигналов, полученные с применением SDR-приемника HackRF One.

Ключевые слова — глобальные навигационные спутниковые системы, ГНСС, SDR-технологии, синхронизация, ГЛОНАСС.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) — это космическая радионавигационная система и система позиционирования, позволяющая предоставлять пользователям всепогодную трехмерную информацию о координатах, скорости и времени в любой точке земной поверхности или околоземного пространства. В настоящее время технология спутниковой навигации и позиционирования в основном заменила наземную радионавигацию. Традиционные геодезические и астрометрические технологии навигации и позиционирования способствуют новому развитию геодезии, навигации и позиционирования. Сегодня система ГНСС - это не только инфраструктура национальной безопасности и экономики, но и важный символ статуса современной державы и всеобъемлющей национальной мощи страны. Потому что именно в политике, экономике, военном деле и других аспектах она имеет большое значение. Наиболее развитыми на данный момент являются навигационные системы Соединенных Штатов Америки (GPS), Российской Федерации (ГЛОНАСС), Китайской Народной Республики (BeiDou), Европейского Союза (Galileo). Также существуют региональные навигационные системы: QZSS в Японии и IRNSS в Индии, WASS в США, MSAS в Японии, EGNOS в Европейском Союзе. GAGAN в Индии и NIGCOMSAT-1 в Нигерии.

Одновременно с сигналами, позволяющими определить местоположение приемника на Земле, от космических аппаратов передаются сигналы системы единого времени (СЕВ). Эти сигналы получили название секундная метка.

Они используются для синхронизации работы разнесенных устройств, которые невозможно соединить кабельным способом. Синхронизация позволяет устранить различия во времени и фазе между сигналами, что позволяет обеспечить корректную обработку данных и координацию между различными устройствами.

Одной из технологий, применяемых для приема и обработки сигналов, является программно-определяемое радиосистема (Software-Defined Radio - SDR), которая позволяет создавать радиоустройства, использующие программное обеспечение для обработки сигналов. [1]

Эта концепция позволяет использовать мощные специализированные аппаратные средства обработки сигналов для моделирования, реализации и тестирования систем. Реконфигурация SDR позволяет разрабатывать на одном и том же оборудовании широкий спектр приложений, управляемых программно.

Применение SDR-технологий для обработки сигналов ГНСС представляется перспективным с точки зрения синхронизации работы различных распределенных устройств. Так, по сигналы навигационных систем позволяют не только определить координаты приемника, но и использовать систему единого времени (СЕВ) для синхронизации.

Синхронизация по СЕВ используется в различных областях, таких как телекоммуникация, геодезия и геофизика, финансы, навигация, производство.

I. ГЛОБАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ (ГНСС)

ГНСС представляют собой совокупность космических и наземных инфраструктур, способных обеспечивать точное определение координат и времени в любой точке на Земле [2].

В последние годы системы глобального позиционирования широко используются во многих задачах позиционирования, требующих высокой точности. К ним относятся мониторинг деформаций в части картографической деятельности, кадастровые съемки, приложения зонирования, создание цифровых моделей местности. Несмотря на то что в последние годы в картографических приложениях активнее используются беспилотные летательные аппараты и методы

III. ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ГНСС

Для приема и обработки сигналов навигационных систем авторами собран испытательный стенд, за основу которого взят SDR-приемник HackRF One [4] с антенной Baltic Signal. В приемнике программным методом конфигурируется алгоритм обработки сигналов, результатом которого на выходе формируются сигналы 1PPS и 10 МГц. Эти сигналы регистрируются на цифровом осциллографе Rigol DS7024. Схема стенда представлена на рисунке 1 сверху, а фотография собранного стенда на рисунке 1 снизу.

Состав стенда:

- 1) Трансивер HackRF One;
- 2) Антенна GPS-ГЛОНАСС производителя «Baltic Signal»;
- 3) Осциллограф RIGOL DS7024;
- 4) Моноблок HP Pro One 440 G5.

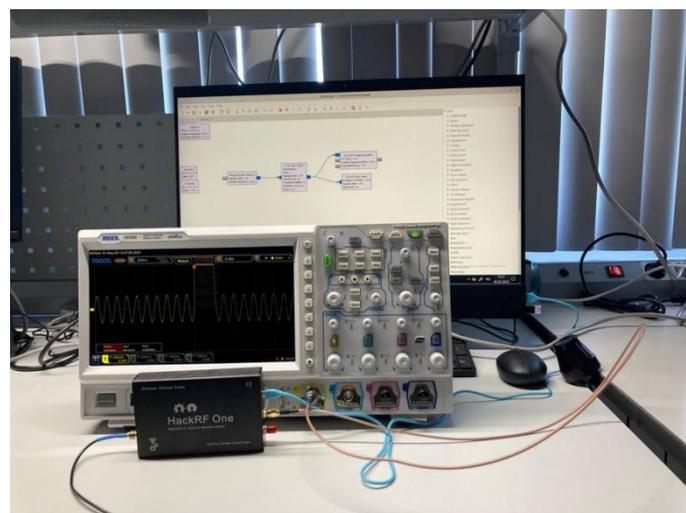
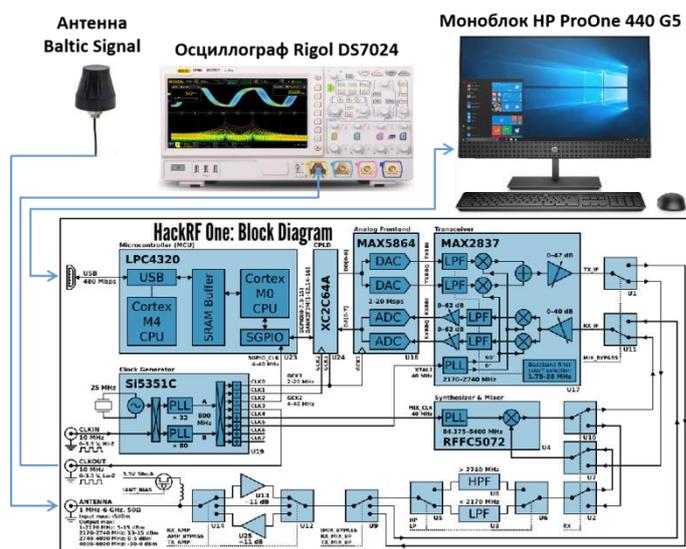


Рис. 1. Схема (сверху) и фотография (снизу) стенда приема и обработки сигналов ГНСС на HackRF One Внешний вид МКА CubeSat

дистанционного зондирования, широкое распространение получила и техника ГНСС. Термин ГНСС возник в связи с появлением Глобальной системы позиционирования (GPS) и Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС). В 2018 г., с учетом выхода на полную мощность в 2020 г. систем Galileo и BeiDou, услуги глобального позиционирования предоставляют четыре спутниковые системы.

GPS использует сигналы L1C/A, L1C, L2C, L2P и L5; ГЛОНАСС - L1C/A, L2C, L2P и L3OC, Galileo - E1, E5a, E5b, E5AltBOC и E6; BeiDou - B1I, B2I, B3I, B1C, B2a и B2b. Хотя все эти сигналы передаются с соответствующих спутников, важно, чтобы приемники ГНСС были способны принимать все эти сигналы для проведения анализа. Кроме того, даже если приемники ГНСС способны принимать эти сигналы, важно, на каком уровне они могут их принимать. Это особенно важно для оценки точного позиционирования точки (PPP) и точного относительного позиционирования с использованием двухчастотных фазовых и кодовых измерений. При определении геодезического положения с использованием двухчастотных измерений требуются фазовые и кодовые измерения на обеих частотах соответствующей эпохи. Из-за некоторых аппаратных и программных ограничений приемников ГНСС данные о фазе и коде для некоторых эпох могут отсутствовать. Это может привести к отсутствию решения в интересующие моменты времени или к уменьшению числа степеней свободы уравнивания, так как уменьшается количество используемых спутников. Это особенно плохо сказывается на измерениях с ограниченной видимостью спутников.

II. СИГНАЛЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

Синхронизацию работы радиоэлектронных устройств возможно организовать путем подключения к единому синхронизирующему генератору. В случае физического разнесения устройств применяется синхронизация по сигналам системы единого времени (СЕВ). В качестве такого сигнала синхронизации применяется т.н. «секундная метка» - 1 PPS (Pulse per second - импульс в секунду). Эти импульсы передаются только через каналы, в которых известна задержка и она постоянная, в таком случае появляется возможность компенсировать ее.

Далее, для синхронизации опорных (тактовых) частот используется сигнал 10 МГц, цель которого не в небольших изменениях частоты и фазы, а сам факт неизменности средней частоты за продолжительный период времени. На практике считается допустимым, если изменение опорной частоты составляет $\pm 1 \times 10^{-9}$ от величины 10 МГц, но при этом среднее значение за длительный период (за 24 часа или более) составляет 10 МГц с точностью 2×10^{-12} .

Накопленная ошибка является значительно более важной, чем мгновенное отклонение частоты. Так, накопленная ошибка в 100 импульсов, следующих с частотой 10 МГц, вызывает рассинхронизацию в 10 мкс. Генераторы 10 МГц в двух радиоустройствах генераторы, один из которых имеет ошибку $+5 \times 10^{-10}$, другой – ошибку -5×10^{-10} накапливают за 3 часа разностную ошибку в 108 импульсов (10,8 мкс).

Для приёма и обработки сигналов с дальнейшим получением синхронизационного сигнала, который будет синхронизировать устройства по времени была построена схема в GNU Radio, представленная на рисунке 2.

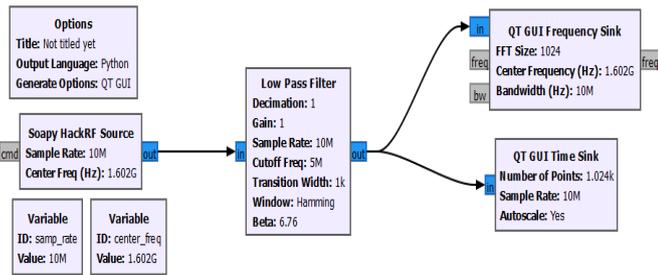


Рис. 2. Схема в GNU Radio

На рисунке 3 приведена осциллограмма, демонстрирующая сигнал 1 PPS, полученная со спутника и обработанная в GNU Radio.

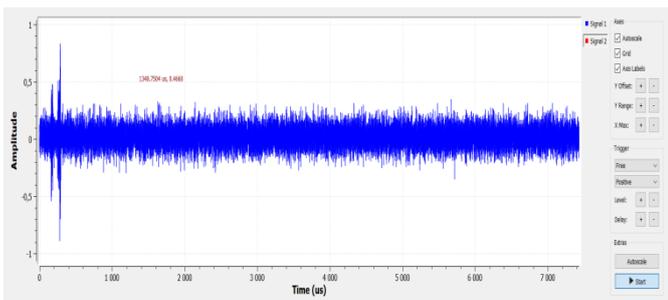


Рис. 3. Осциллограмма сигнала 1 PPS в GNU Radio

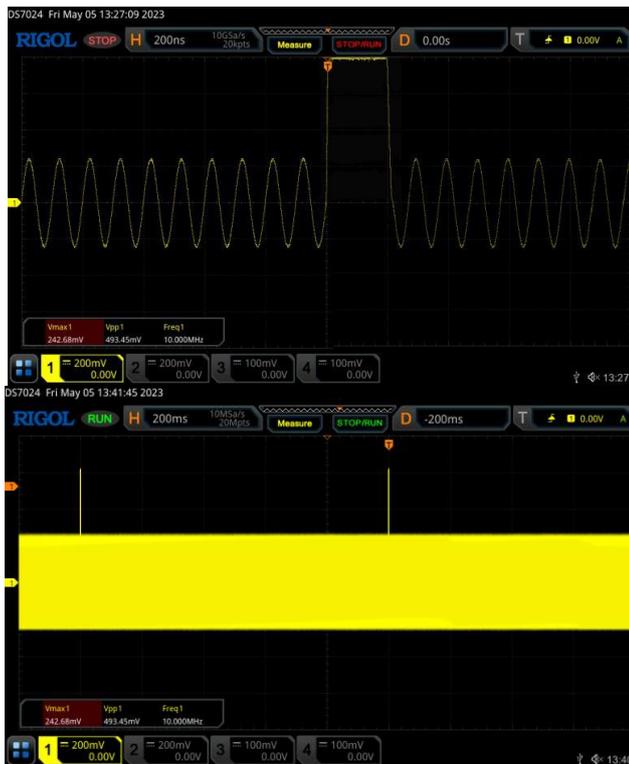


Рис. 4. Осциллограммы сигналов 1 PPS и 10 МГц

Полученный сигнал 1 PPS затем примешивается к опорной частоте 10 МГц, таким образом чтобы каждую секунду появлялся сигнал секундной метки, а затем, сразу после него шел сигнал опорной частоты до следующей секундной метки. На рисунке 4 приведены осциллограммы сформированных сигналов в разном разрешении по времени для наглядного представления опорной частоты и периодичности следования секундной метки. Из рисунков видно, что частота опорного сигнала - 10 МГц, который прерывается т.н. секундной меткой (1 PPS).

IV. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННОГО СИНХРОНИЗАЦИОННОГО СИГНАЛА

Полученные осциллограммы дают основание утверждать, что полученная система может быть применена для синхронизации радиоустройств. Эти сигналы играют ключевую роль в обеспечении точности, согласованности и надежности в радиосистемах, спутниковых связях, радиолокации и других технических приложениях.

Сигнал 1 PPS (импульс в секунду) - это электрический сигнал шириной менее одной секунды с резко нарастающим или резко спадающим фронтом, который с точностью до секунды повторяется один раз в секунду. Сигналы PPS выдаются радиомаяками, стандартами частоты, другими типами прецизионных генераторов и некоторыми GPS-приемниками. Прецизионные часы иногда изготавливаются путем сопряжения генератора сигнала PPS с обрабатывающим оборудованием, которое выравнивает сигнал PPS с секундой UTC и преобразует его в полезный индикатор. Атомные часы обычно имеют внешний выход PPS, хотя внутри они могут работать на частоте 9 192 631 770 Гц. Точность сигналов PPS варьируется от 12 пикосекунд до нескольких микросекунд в секунду или от 2,0 наносекунд до нескольких миллисекунд в сутки в зависимости от разрешения и точности устройства, генерирующего сигнал.

В случае временного отсутствия сигнала 1 PPS от ГНСС устройства способны до нескольких часов удерживать синхронизацию за счет внутреннего генератора частотой 10 МГц. Очевидно, что такой генератор не способен длительное время удерживать синхронизацию, поэтому для каждого такого устройства определяется интервал работы в режиме удержания.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важной задачей остается синхронизация работы распределенных радиоэлектронных систем. Осуществляться такая синхронизация может по сигналам Глобальных навигационных систем. В работе показано, что в качестве приемника сигналов и формирования сигналов (1 PPS и 10 МГц) возможно использовать программно-определяемые радиосистемы (SDR-технологии), в частности распространенные приемо-передатчики HackRF One.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Абрамова Е.А., Литвинов С.В. Технологии программно-определяемого радио и их место в

- разработках настоящего времени // Радиолокация и связь – перспективные технологии. XX Всероссийская молодежная научно-техническая конференция (Москва, 07 декабря 2022 г.) // Сборник трудов конференции – М.: Мир науки, С. 7-12, 2023.
- [2] Прикладной потребительский центр Роскосмоса // [Электронный ресурс] URL: <https://www.glonass-iac.ru>.
- [3] Роберто В. Стабильная синхронизация одночастотных сетей с помощью приемников GPS новой концепции ABE Elettronica // Журнал "Broadcasting. Телевидение и радиовещание" #4+5, С. 52-53, 2014.
- [4] Рядинская Э.А., Полевода Ю.А. Конфигурирование hackrf One на передачу сигнала с АФМ // Сборник трудов Национальной научно-практической конференции, Москва, 10–11 ноября 2022 года / Под редакцией С.У. Увайсова. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2022. – С. 183-187. – EDN OKMDRS.

SYNCHRONIZATION OF RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS USING GNSS SIGNALS

Abramova E.A.

Institute of Radioelectronics and
Informatics
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
Litvinov_S@mirea.ru

Kashchaeva A.V.

Institute of Radioelectronics and
Informatics
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
kashchaeva.a.v@edu.mirea.ru

Maksimovich A.V.

Institute of Radioelectronics and
Informatics
Department of Telecommunications
RTU MIREA
Moscow, Russia
maksimovich.a.v1@edu.mirea.ru

Abstract — The article deals with the issue of using receivers based on Software Defined Radio (SDR) technology to work with signals of Global Navigation Satellite Systems (GNSS). A brief description of GNSS: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou is given. A schematic diagram of the stand for the formation of synchronization signals is given: 1 PPS and 10 MHz, as well as oscillograms of these signals obtained using SDR-receiver HackRF One.

Keywords — global navigation satellite systems, GNSS, SDR-technologies, synchronization, GLONASS.

УЛУЧШЕНИЕ СХОДИМОСТИ РЯДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЕКЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

Ярлыков А.Д.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоволновых процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
yarlykov@mirea.ru

Аннотация — на основе проекционной модели микрополосковой линии получены аналитические выражения для основных электродинамических параметров экранированной микрополосковой линии – коэффициента замедления и волнового сопротивления. Данные выражения получены путем улучшения сходимости ряда в выражении для волнового сопротивления микрополосковой линии. Данные выражения позволяют повысить быстродействие расчета указанных параметров при сохранении высокой точности полученных результатов.

Ключевые слова: микрополосковая линия, проекционная модель, волновое сопротивление, быстро, высокая точность.

ВВЕДЕНИЕ

Микрополосковые линии (МПЛ) конечной длины представляют собой отрезки линий передачи, которые используются для построения интегральных схем СВЧ, а также различных СВЧ-устройств (фильтры, направленные ответвители, аттенюаторы и т.д.). Решение о собственных волнах экранированной микрополосковой линии решается в два этапа. На первом этапе решается задача возбуждения волновода с двухслойным диэлектриком поверхностным током на полосковом проводнике. На втором этапе, согласно проекционному подходу [1], используя граничные условия электродинамики на поверхности полоскового проводника, поверхностную плотность тока можно разложить по базисным функциям в виде полиномов Чебышева, учитывающих особенности поля на краях полоскового проводника. Как следствие, задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно коэффициентов разложения плотности тока по этим базисным функциям.

Точность решения данной СЛАУ и скорость сходимости в случае проекционного метода существенно зависят от выбора системы базисных функций и их числа – K . В работе [2] получено асимптотическое решение бесконечной СЛАУ для микрополосковой линии в многослойной диэлектрической среде, вследствие чего была установлена возможность быстрой сходимости

разложения поверхностной плотности тока по полиномам Чебышева и возможность решения бесконечной СЛАУ путем выбора порядка редуцированной СЛАУ и ее дальнейшего решения.

В [1] было показано, что для одиночной полосковой линии порядок редуцированной СЛАУ – K не превышает пяти в широком диапазоне изменения параметров линии. Но в этом случае также необходимо обеспечить высокую точность расчета матричных коэффициентов СЛАУ, которые представлены в виде медленно сходящихся рядов. Путем улучшения сходимости данных рядов можно существенно повысить эффективность проекционной модели МПЛ, что продемонстрировано в [1] для МПЛ с симметричным расположением полоскового проводника относительно боковых стенок экрана. В результате матричные коэффициенты СЛАУ представляются в виде быстро сходящихся рядов.

Для данного типа полосковой линии в [3] получены выражения для определения основных характеристик экранированной микрополосковой линии – коэффициента замедления n , численного равного нормированной к волновому числу постоянной распространения Γ для основной волны, и волнового сопротивления Z .

I. УЛУЧШЕНИЕ СХОДИМОСТИ РЯДОВ

Нормированная постоянная распространения Γ определяется путем решения дисперсионного уравнения:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\chi_m^2} \left(\Gamma^2 G_m^{\mathcal{E}} + \alpha_m^2 G_m^{\mathcal{M}} \right) J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta) = 0 \quad (1)$$

где

$$G_m^{\mathcal{E}} = \left(\frac{\varepsilon}{\beta_m^I} \operatorname{ctg} \beta_m^I h + \frac{1}{\beta_m^{II}} \operatorname{ctg} \beta_m^{II} (b-h) \right)^{-1},$$

$$G_m^{\mathcal{M}} = \left(\beta_m^I \operatorname{ctg} \beta_m^I h + \beta_m^{II} \operatorname{ctg} \beta_m^{II} (b-h) \right)^{-1}, \quad \beta_m^I = \sqrt{\varepsilon - \chi_m^2},$$

$$\beta_m^I = \sqrt{1 - \chi_m^2}, \quad \chi_m^2 = \alpha_m^2 + \Gamma^2, \quad \alpha_m = \frac{\pi}{k_0 a} m,$$

$\alpha = \frac{\pi W}{2a}$, $\beta = \alpha(1 + \frac{S}{W})$, $k_0 = 2\pi f/c$ – волновое число,

f – частота, c – скорость света в вакууме, W – ширина полоски, a – ширина экрана, S – расстояние от края полоски до стенки экрана.

Улучшить сходимость данного ряда можно определив асимптотику общего члена ряда при $m \rightarrow \infty$.

$$\chi_m^2 = \alpha_m^2 + \Gamma^2 = \left(\frac{\pi}{k_0 a} m \right)^2 + \Gamma^2 \Big|_{m \rightarrow \infty} = \alpha_m^2. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} G_m^\Delta &= \left(\frac{\varepsilon}{\beta_m^I} \operatorname{ctg} \beta_m^I h + \frac{1}{\beta_m^I} \operatorname{ctg} \beta_m^I (b-h) \right)^{-1} = \\ &= \left(\frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon - \chi_m^2}} \operatorname{ctg} \sqrt{\varepsilon - \chi_m^2} h + \frac{1}{\sqrt{1 - \chi_m^2}} \operatorname{ctg} \sqrt{1 - \chi_m^2} (b-h) \right)^{-1} = (3) \\ &= \left(\frac{\varepsilon}{i\alpha_m} (-i \operatorname{cth}(\alpha_m h)) + \frac{1}{i\alpha_m} (-i \operatorname{cth}(\alpha_m (b-h))) \right)^{-1} \end{aligned}$$

При $m \rightarrow \infty$ гиперболический котангенс $\operatorname{cth}(\alpha_m h) \rightarrow 1$. Тогда, устремив $m \rightarrow \infty$ выражение (3) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} G_m^\Delta &= \left(\frac{\varepsilon}{i\alpha_m} (-i \operatorname{cth}(\alpha_m h)) + \frac{1}{i\alpha_m} (-i \operatorname{cth}(\alpha_m (b-h))) \right)^{-1} \Big|_{m \rightarrow \infty} = \\ &= - \left(\frac{\varepsilon + 1}{\alpha_m} \right)^{-1} = - \frac{\alpha_m}{\varepsilon + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

Выполняя аналогичные преобразования для G_m^M получим:

$$\begin{aligned} G_m^M &= \left(\beta_m^I \operatorname{ctg} \beta_m^I h + \beta_m^I \operatorname{ctg} \beta_m^I (b-h) \right)^{-1} \Big|_{m \rightarrow \infty} = \\ &= (i\alpha_m (-i) + i\alpha_m (-i))^{-1} = \frac{1}{2\alpha_m} \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом выполненных в (2) – (5) преобразований дисперсионное уравнение (1) можно переписать в виде:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{0.5 - \Gamma^2 / (\varepsilon + 1)}{\alpha_m} J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta) = 0 \quad (6)$$

К правой части дисперсионного уравнения (1) прибавим и вычтем правую часть уравнения (6):

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\Gamma^2 G_m^\Delta + \alpha_m^2 G_m^M}{\chi_m^2} - \frac{0.5 - \Gamma^2 / (\varepsilon + 1)}{\alpha_m} \right) J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta) + \\ + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{0.5 - \Gamma^2 / (\varepsilon + 1)}{\alpha_m} J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Умножая обе части уравнения (7) на $\frac{\pi}{k_0 a}$ и вынося во втором слагаемом за знак суммирования не зависящий от числа m коэффициент получим:

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{k_0 a} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\Gamma^2 G_m^\Delta + \alpha_m^2 G_m^M}{\chi_m^2} - \frac{0.5 - \Gamma^2 / (\varepsilon + 1)}{\alpha_m} \right) J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta) + \\ + (0.5 - \frac{\Gamma^2}{\varepsilon + 1}) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, дисперсионное уравнение для определения нормированной постоянной распространения Γ можно представить в виде суммы двух бесконечных рядов, первый из которых сходится быстро (коэффициент перед квадратом функции Бесселя убывает как $\frac{1}{m^3}$, а второй ряд сходится медленно, однако и его путем ряда преобразований, рассмотренных в другой статье, можно преобразовать в быстро сходящийся ряд.

Аналогично можно повысить сходимость ряда для определения волнового сопротивления Z полосковой линии, которое в [3] описывается выражением:

$$\begin{aligned} Z = \frac{240\pi}{k_0 a} \sum_{m=1}^{\infty} \left[- \left(\Gamma^2 (G_m^\Delta)' + \alpha_m^2 (G_m^M)' \right) + \frac{\alpha_m^2}{\chi_m^2} (G_m^M - G_m^\Delta) \right] \times \\ \times \frac{1}{\chi_m^2} J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta), \end{aligned} \quad (9)$$

где $(G_m^{\Delta, M})'$ – производная функции $G_m^{\Delta, M}$ по Γ^2 .

Для улучшения сходимости ряда (9) внесем коэффициент $\frac{1}{\chi_m^2}$ в квадратные скобки, раскроем круглые скобки во втором слагаемом в квадратных скобках и вычтем и добавим к выражению (9) величину

$$Z = \frac{240\pi}{k_0 a} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\chi_m^2} G_m^\Delta J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta), \quad (10)$$

которое с учетом (2) – (4) примет вид

$$Z = \frac{240\pi}{k_0 a} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m (\varepsilon + 1)} J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta). \quad (11)$$

В результате получим:

$$Z = \frac{240\pi}{k_0 a} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\begin{array}{c} -\frac{1}{\chi_m^2} \left(\Gamma^2(G_m^{\mathcal{E}})' + \alpha_m^2 (G_m^M)' \right) + \frac{\alpha_m^2}{\chi_m^4} G_m^M - \\ -\frac{\alpha_m^2}{\chi_m^4} G_m^{\mathcal{E}} - \frac{1}{\alpha_m(\varepsilon+1)} \end{array} \right] \times \quad (12)$$

$$\times J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta) + \frac{240\pi}{k_0 a} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m(\varepsilon+1)} J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta).$$

Перепишем выражение (12) в виде:

$$Z = \frac{240\pi}{k_0 a} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\begin{array}{c} -\frac{1}{\chi_m^2} \left(\Gamma^2(G_m^{\mathcal{E}})' + \alpha_m^2 (G_m^M)' \right) + \frac{\alpha_m^2}{\chi_m^4} G_m^M - \\ -\left(\frac{\alpha_m^2}{\chi_m^4} G_m^{\mathcal{E}} - \frac{1}{\alpha_m(\varepsilon+1)} \right) \end{array} \right] \times \quad (13)$$

$$\times J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta) + \frac{240}{\varepsilon+1} S(\alpha, \beta),$$

где $S(\alpha, \beta) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} J_0^2(m\alpha) \sin^2(m\beta)$ – медленно сходящийся ряд.

Таким образом, выражение (9) для определения волнового сопротивления Z можно представить в виде суммы двух рядов (13), первый из которых сходится быстро, а второй сходится медленно, однако и его путем преобразований можно преобразовать в быстро сходящийся ряд.

II. УЛУЧШЕНИЕ СХОДИМОСТИ РЯДА, ВХОДЯЩЕГО В ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ МАТРИЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОЕКЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

Представим функцию $S(\alpha, \beta)$ в виде:

$$S(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} (R(\alpha) - F(\alpha, \beta)), \quad (14)$$

где

$$R(\alpha) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} J_0^2(m\alpha), \quad (15)$$

$$F(\alpha, \beta) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} J_0^2(m\alpha) \cos(2m\beta). \quad (16)$$

Используя формулу (6.519(1)) из [4], представим функцию Бесселя $J_0^2(m\alpha)$ в виде:

$$J_0^2(m, \alpha) = \frac{2}{\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} J_0(2m\alpha \cos \theta) d\theta. \quad (17)$$

Используя интегральное представление для функции Бесселя (формула (8.411(2)) из [4]):

$$J_0(2m\alpha \cos \theta) = \frac{2}{\pi} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \cos(2m\alpha \cos \theta \sin \varphi) d\varphi, \quad (18)$$

получим

$$J_0^2(m\alpha) = \frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \cos(2m\alpha \cos \theta \sin \varphi) d\varphi d\theta. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (15) представим функцию $R(\alpha)$ в виде:

$$R(\alpha) = \frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \cos(mu) d\varphi d\theta, \quad (20)$$

где $u = 2\alpha \cos \theta \sin \varphi$.

Используя формулу (1.441(2)) из [4] суммируем бесконечный ряд:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \cos(mu) = -\ln \left(2 \sin \frac{u}{2} \right) \quad (21)$$

и получаем следующее интегральное представление для функции $R(\alpha)$:

$$R(\alpha) = \frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \ln \left(2 \sin \frac{u}{2} \right) d\varphi d\theta = \quad (22)$$

$$= \frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \ln(2 \sin(\alpha \cos \theta \sin \varphi)) d\varphi d\theta.$$

Воспользовавшись разложением логарифма в степенной ряд (формула (1.518(3)) из [4]):

$$\ln \left(2 \sin \frac{u}{2} \right) = \ln u + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{2^{2k-1}}{(2k)!} B_{2k} \left(\frac{u}{2} \right)^{2k} \quad (23)$$

и формулой (0.233(3)) из [4]:

$$S_{2k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{2k}} = \frac{2^{2k-1} \pi^{2k}}{(2k)!} |B_{2k}|, \quad (24)$$

представим выражение (23) в виде:

$$\ln \left(2 \sin \frac{u}{2} \right) = \ln u - \sum_{k=1}^{\infty} S_{2k} \frac{1}{k} \left(\frac{u}{2\pi} \right)^{2k}, \quad (25)$$

где B_{2k} – числа Бернулли ($B_2 = \frac{1}{6}$, $B_4 = -\frac{1}{30}$, $B_6 = \frac{1}{42}$, ...), $S_2 = \frac{\pi^2}{6}$, $S_4 = \frac{\pi^2}{90}$, $S_6 = \frac{\pi^2}{945}$, ...

Подставляя (25) в (22) и интегрируя почленно, получим следующее выражение для функции $R(\alpha)$:

$$R(\alpha) = \ln \frac{2}{\alpha} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{S_{2k}}{k} \left(\frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \right)^2 \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^{2k}. \quad (26)$$

Рассмотрим теперь вторую функцию $F(\alpha, \beta)$ из (14), определяемую медленно сходящимся рядом (16). Подставляя (17) в (16) получим:

$$F(\alpha, \beta) = \frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \cos(mu) \cos(m2\beta) d\varphi d\theta, \quad (27)$$

$$\cos(m2\beta) \cos(mu) = \frac{1}{2} (\cos(m(2\beta-u)) + \cos(m(2\beta+u))). \quad (28)$$

Используя формулы (21) и (28), суммируем ряд в (27):

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \cos(mu) \cos(m2\beta) &= -\frac{1}{2} \left\{ \ln \left[2 \sin \left(\frac{2\beta-u}{2} \right) \right] + \ln \left[2 \sin \left(\frac{2\beta+u}{2} \right) \right] \right\} = \\ &= -\frac{1}{2} \left\{ \ln \left[2 \left(\sin \beta \cos \frac{u}{2} - \cos \beta \sin \frac{u}{2} \right) \right] + \ln \left[2 \left(\sin \beta \cos \frac{u}{2} + \cos \beta \sin \frac{u}{2} \right) \right] \right\} = \\ &= -\frac{1}{2} \left\{ \ln \left[4 \sin^2 \beta \cos^2 \frac{u}{2} - 4 \cos^2 \beta \sin^2 \frac{u}{2} \right] \right\} = \\ &= -\frac{1}{2} \left\{ \ln \left[4 \sin^2 \beta \cos^2 \frac{u}{2} \left(1 - \frac{tg^2(u/2)}{tg^2 \beta} \right) \right] \right\} = \\ &= -\frac{1}{2} \left\{ \ln \sin^2 \beta + \ln 4 \cos^2 \frac{u}{2} + \ln \left(1 - \frac{tg^2(u/2)}{tg^2 \beta} \right) \right\} = \\ &= - \left\{ \ln \sin \beta + \ln 4 \cos \frac{u}{2} + \frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{tg^2(u/2)}{tg^2 \beta} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (29)$$

Представим в (29) функцию $\ln \left(2 \cos \frac{u}{2} \right)$ в виде:

$$\ln \left(2 \cos \frac{u}{2} \right) = \ln \left(2 \sin \frac{2u}{2} \right) - \ln \left(2 \sin \frac{u}{2} \right). \quad (30)$$

Подставляя (29) в (27), получим, с учетом (30):

$$\begin{aligned} \tilde{F}(\alpha, \beta) &= -\frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \left\{ \ln \left(2 \sin \left(\frac{2u}{2} \right) \right) - \ln \left(2 \sin \frac{u}{2} \right) + \ln \sin \beta + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{tg^2(u/2)}{tg^2 \beta} \right) \right\} d\varphi d\theta = \\ &= -\frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \ln \left(2 \sin \left(\frac{2u}{2} \right) \right) d\varphi d\theta + \frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \ln \left(2 \sin \frac{u}{2} \right) d\varphi d\theta - \\ &\quad - \frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \left\{ \ln \sin \beta + \frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{tg^2(u/2)}{tg^2 \beta} \right) \right\} d\varphi d\theta. \end{aligned} \quad (31)$$

Используя (22), представим выражение (31) в виде:

$$F(\alpha, \beta) = R(2\alpha) - R(\alpha) - \frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \left\{ \ln \sin \beta + \frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{tg^2(u/2)}{tg^2 \beta} \right) \right\} d\varphi d\theta. \quad (32)$$

Подставляя (32) в (14) представим функцию $S(\alpha, \beta)$ в виде:

$$S(\alpha, \beta) = R(\alpha) - \frac{1}{2} R(2\alpha) + \tilde{F}(\alpha, \beta), \quad (33)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{F}(\alpha, \beta) &= \frac{4}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \left\{ \frac{1}{2} \ln \sin \beta + \frac{1}{4} \ln \left(1 - \frac{tg^2(u/2)}{tg^2 \beta} \right) \right\} d\varphi d\theta = \\ &= \frac{1}{2} \ln \sin \beta + \frac{1}{\pi^2} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \ln \left(1 - \frac{tg^2(u/2)}{tg^2 \beta} \right) d\varphi d\theta. \end{aligned} \quad (34)$$

Для широких экранов $\left(\alpha = \frac{\pi W}{2a} \square 1 \right)$ можно при разложении тангенса в степенной ряд оставить только первый член $tg^2 \left(\frac{u}{2} \right) = tg^2(\alpha \cos \theta \sin \varphi) \approx \alpha^2 \cos^2 \theta \sin^2 \varphi$.

Разлагая в (34) логарифм в степенной ряд

$$\begin{aligned} \ln \left(1 - \frac{tg^2 u/2}{tg^2 \beta} \right) &= - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \left(\frac{tg^2 u/2}{tg^2 \beta} \right)^k = \\ &= - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \cos^{2k}(\theta) \sin^{2k}(\theta) \left(\frac{\alpha}{tg \beta} \right)^{2k} \end{aligned}$$

и интегрируя почленно, используя формулу (3.621(3)) из [4], получим следующее выражение для функции $\tilde{F}(\alpha, \beta)$:

$$\tilde{F}(\alpha, \beta) \Big|_{\alpha \square 1} = \frac{1}{2} \ln \sin \beta - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \left(\frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \right)^2 \left(\frac{\alpha}{tg \beta} \right)^{2k}. \quad (35)$$

Из выражения (26) следует, что для широких экранов $(\alpha \square 1)$ функция

$$R(\alpha) \approx \ln \frac{2}{\alpha} \quad (36)$$

Используя (33), (35) и (36), получим следующее выражение для функции $S(\alpha, \beta)$ для широких экранов:

$$\begin{aligned} S(\alpha, \beta)|_{\alpha \gg 1} &= \ln \frac{2}{\alpha} - \frac{1}{2} \ln \frac{2}{2\alpha} + \frac{1}{2} \ln \sin \beta - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \left(\frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \right)^2 \left(\frac{\alpha}{tg \beta} \right)^{2k} = \\ &= \frac{1}{2} \left(\ln \frac{4}{\alpha^2} - \ln \frac{1}{\alpha} + \ln \sin \beta \right) - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \left(\frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \right)^2 \left(\frac{\alpha}{tg \beta} \right)^{2k} = \quad (37) \\ &= \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4}{\alpha} \sin \beta \right) - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \left(\frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \right)^2 \left(\frac{\alpha}{tg \beta} \right)^{2k}. \end{aligned}$$

При симметричном расположении полоскового проводника относительно боковых стенок экрана, т.е. при

$$\begin{aligned} \beta = \alpha \left(1 + \frac{S}{W} \right) &= \frac{\pi W}{2a} \left(1 + \frac{S}{W} \right) = \frac{\pi}{2} \frac{W}{W+S} \left(1 + \frac{S}{W} \right) = \\ &= \frac{\pi}{2} \frac{1}{1+S/W} \left(1 + \frac{S}{W} \right) = \frac{\pi}{2}; \end{aligned}$$

$$S(\alpha, \beta) = S \left(\alpha, \frac{\pi}{2} \right) \Big|_{\alpha \gg 1} \approx \frac{1}{2} \ln \frac{4}{\alpha}. \quad (38)$$

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате основные параметры полосковых линий можно описать в виде быстроходящихся рядов (8) и (13), что, в конечном итоге, позволяет существенно повысить эффективность проекционных моделей полосковых линий, построенных с использованием чебышевского базиса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Коваленко А.Н. Собственные волны микрополосковой линии // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 2. С. 188 – 194.
- [2] Коваленко А.Н. Проекционный метод построения электродинамических моделей полосковых линий // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 2. С. 108–115.
- [3] Коваленко А.Н., Оводенко Г.Б., Ярлыков А.Д. Математическая модель экранированной микрополосковой линии // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 3. С. 552–556.
- [4] Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1963. 1100 с.

IMPROVING THE CONVERGENCE OF SERIES TO DETERMINE THE MAIN CHARACTERISTICS OF STRIP LINE PROJECTION MODELS

Yarlykov A.D.

Institute of Radio Electronics and Informatics
Department of Radiowave Processes and TEchnologies
RTU MIREA
Moscow, Russia
yarlykov@mirea.ru

Abstract — Based on the projection model of a microstrip line, analytical expressions were obtained for the main electrodynamic parameters of a screened microstrip line - the retardation coefficient and wave impedance. These expressions are obtained by improving the convergence of the series in the expression for the characteristic impedance of a microstrip line. These expressions make it possible to increase the speed of calculation of the specified parameters while maintaining high accuracy of the results obtained.

Keywords - microstrip line, projection model, characteristic impedance, fast, high accuracy.

УДК 623.746.4-519

ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ БПЛА

Судаков Д.В.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
denis.sudakov.96@mail.ru

Чистяков Е.А.

Институт радиоэлектроники и информатики
Кафедра радиоэлектронных систем и комплексов
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
chistyakov@mirea.ru

Аннотация – в научной статье представлена информация о методах противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА). Влияние отдельно взятых методов противодействия на системы БПЛА, последствия, положительные и отрицательные стороны.

Ключевые слова — противодействие, БПЛА, беспилотник, средства, дрон, воздействие, квадрокоптер, СВЧ.

ВВЕДЕНИЕ

Технологический прогресс в сфере радиотехники и авиаконструирования позволил инженерам создать миниатюрные летательные аппараты с возможностью их пилотирования на расстоянии, вследствие чего образовалось быстрорастущее направление – конструирование и эксплуатация беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА).

Самыми широко распространёнными аппаратами являются БПЛА самолётного типа, а также управляемые дроны. Первые применяются в широком спектре военных (разведка местности, разминирование дорог, уничтожение вражеских коммуникаций и прочих сооружений) и гражданских задач (разгон облаков, геофизическая разведка, картографирование, развлекательные шоу, спасательные операции). Дроны, зачастую, используют для фото и видеосъёмки, доставки небольших грузов, а в определённых модификациях и в соревнованиях.

В соответствии с пунктом 5 статьи 32 Воздушного кодекса Российской Федерации, любой дрон, коптер или авиамодель считается беспилотным воздушным судном (БВС), а тот, кто управляет им — внешним пилотом [1]. БВС свыше урегулированных законом параметров, подлежат обязательной регистрации, также для использования данной техники требуется разрешение на управление и права. К сожалению, существуют лица, использующие БВС в личных неправомερных целях: вылеты «самопальных» аппаратов, ведение слежки, вандализм, нарушение общественного порядка, влёт в «бесполётные зоны» (рис. 1).

В 2023 году был ужесточён контроль воздушного пространства в 67 регионах РФ [2] и в самой столице – в качестве мер противодействия над структурами государственного и военного назначения применяются

устройства-подавители, не позволяющие пилотируемым летательным аппаратам продолжать управляемый полёт – они либо падают, либо медленно приземляются, если это предусмотрено программным обеспечением и конструкцией.

Для противодействия особо опасным БПЛА, несущим взрывчатые вещества, на небольшом расстоянии (5-10 км) от городских сооружений разворачивают оборонительные позиции: зенитно-ракетные комплексы (ЗРК), противовоздушная оборона (ПВО) и комплексы радиоэлектронного противодействия (РЭП).

Для решения задачи противодействия БПЛА необходимо корректно классифицировать их по массогабаритным характеристикам, скорости и назначению.



Рис. 1. Предупреждение об ограничении использования БВС в городе Москве

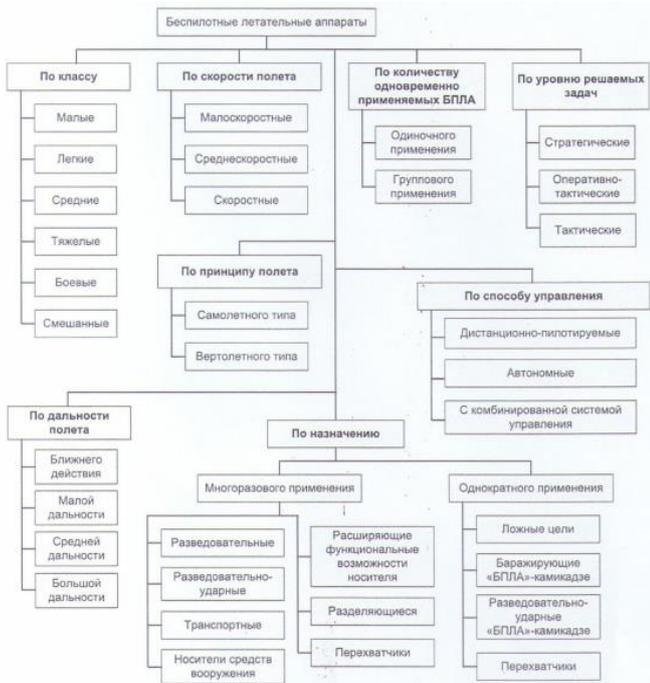


Рис. 2. Классификация БПЛА

I. ЭТАПЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

Первым этапом противодействия БПЛА является обнаружение. Не обнаружив присутствие, невозможно определить траекторию полёта, тип беспилотника и прочие значимые параметры, а, следовательно, противодействие не представляется возможным.

Средствами обнаружения БПЛА, которые используют соответствующие демаскирующие признаки, могут быть: средства радиолокационной разведки (РЛР)

- различные РЛС; средства радио- и радиотехнической разведки (РРТР)
- станции контроля радиоизлучений, пеленгаторные посты; средства оптико-электронной разведки (ОЭР)
- средства теле- и фотонаблюдения в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах; средства акустической разведки (АР)
- микрофоны и звукоулавливатели.

Данные средства, как правило используются комплексно, взаимно дополняя друг друга, при этом основными средствами целеуказания для комплексов ПВО являются средства РЛР – РЛС, а для комплексов РЭП – средства РРТР [3].

Вторым этапом является создание технических средств противодействия БПЛА. В настоящее время активно используются такие ПВО, как пулемётные гнёзда, пусковые зенитно-ракетные комплексы (ПЗРК), зенитные противоракетные комплексы (ЗПРК), а также перспективное лазерное оружие (узконаправленные ЭМИ-генераторы) и дроны-перехватчики.

БПЛА, летящие большой группой, так называемым «роем», способны поразить обширную площадь при помощи переносимого боевого заряда, из-за чего средства ПВО не являются наиболее экономически и тактически

эффективным видом противодействия – из-за этого чаще всего встречаются летящие эскадрильи БПЛА, сбить или перехватить которые является критически важной задачей.

II. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДРОНА, КАК ЦЕЛИ

Рассматривая имитационную модель БПЛА типа «квадрокоптер», как абсолютно твёрдое тело, можно построить примерную траекторию его движения.

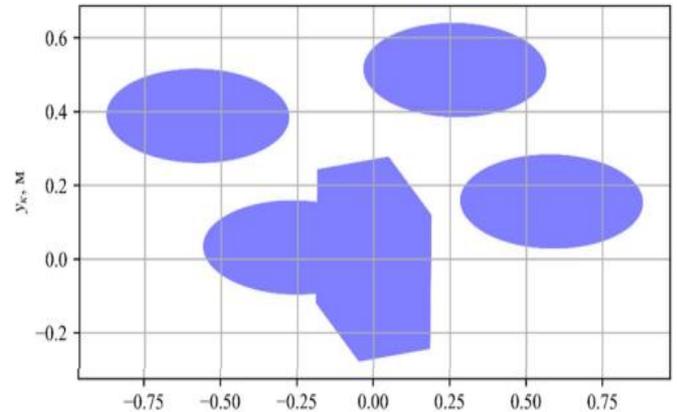


Рис. 3. Проекция БПЛА типа «квадрокоптер» на плоскость

Движение БПЛА в модели представляет собой движение абсолютно жесткого тела в трехмерном пространстве, для которого траектория центра локальной СК описывается с помощью кривой Безье третьего порядка [7-9]. Кривая Безье строится по четырем точкам в пространстве A, B, C, D (рис. 2), где точки A и D являются начальной и конечной точками траектории.

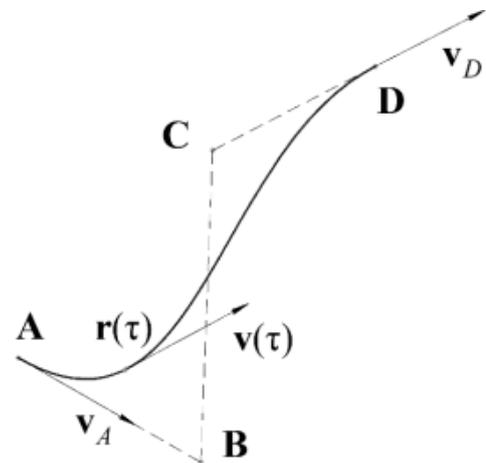


Рис. 4. Построение траектории БПЛА

Процесс противодействия БПЛА при помощи огневых систем ПВО подразумевает обстрел одиночными выстрелами или очередью. Сам выстрел по цели в имитационной модели представляет собой материальную точку p_r , которая движется прямолинейно с одинаковой скоростью v_s (рис. 5) от точки выстрела p_s до пересечения ее с текущей картинной плоскостью цели. Если выстрел попал в проекцию БПЛА на эту плоскость, то

считается, что произошло попадание по БПЛА.

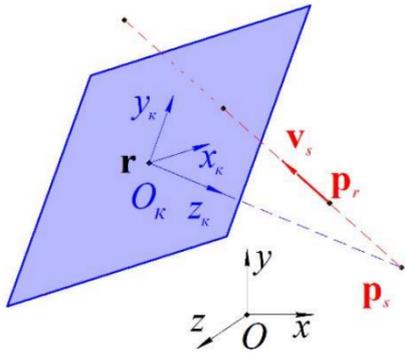


Рис. 5. Определение картинной плоскости

III. СПОСОБЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БПЛА

Всего на данный момент существует пять способов противодействия беспилотникам:

1. Радиоэлектронное воздействие;
2. информационно-программное воздействие;
3. микроволновое воздействие;
4. оптоэлектронное воздействие;
5. механическое воздействие.

Остановимся на каждом методе подробнее.

1. Радиоэлектронное воздействие. Радиоэлектронное противодействие (РЭП) подразумевает использование радиоэлектронной аппаратуры для излучения помеховых сигналов, нарушающих работу большинства систем беспилотного аппарата, таких как:

- система навигации (GPS/ГЛОНАСС и других);
- радиолинии управления БПЛА;

Комбинация двух данных помех так же является частой практикой.

РЭП является основным и достаточно эффективным методом противодействия БПЛА. Чаще всего используется заградительная шумовая помеха, перекрывающая полосу пропускания радиоприемного тракта и превышающая по мощности управляющий сигнал [4].

Важно будет уточнить, что если говорить о БПЛА, например, квадрокоптерах, то радиоэлектронное воздействие будет крайне эффективным, так как пилот полностью теряет контроль над аппаратом.

Главными плюсами данного воздействия является:

- экономическая эффективность. Для применения РЭП расходуется только электроэнергия;
- возможность подавлять несколько целей. В теории, количество целей не ограничено, т.к. условием подавления является только превышение уровня помехи над уровнем полезного сигнала;
- гибкость настройки и большая область применения. В зависимости от сценария функционирования и противодействия, можно использовать различные режимы работы для избирательного подавления бортовых и навигационных систем или заданного БПЛА.

К минусам относится:

- невозможность в покрываемой зоне развёртывать и

продолжать использовать союзные навигационные и бортовые системы;

- радиоподавление бесполезно в отношении БПЛА, функционирующего в режиме «радиомолчания», т.е. летящего с заранее заданным курсом и программой.

- для использования широкополосного радиоподавления требуется предварительное обнаружение и определение технических параметров БПЛА.

2. Информационно-программное воздействие

Любое устройство, использующее в качестве управления радиоканал, может быть проанализировано с помощью РРТР. Если по результатам анализа каналов радиуправления (КРУ) удастся определить не только тип и структуру сигналов, но также вскрыть формат и структуру передаваемых данных, тип используемого протокола управления или кодекса связи [3], то становится возможным подменить исполняемые протоколы БПЛА и нарушить целостность системы – вывести из строя систему навигации, нарушить стабильность полёта.

3. Микроволновое и оптоэлектронное воздействие

Наиболее экономически эффективный метод противодействия, предполагающий использование СВЧ-пушки направленного излучения и лазерного оружия. Основное отличие от механических повреждений заключается в воздействии исключительно на электронную составляющую БПЛА. Микроволновое воздействие уничтожает бортовое оборудование, принудительно перегревая или наводя сильные помехи, несовместимые с исправной эксплуатацией БПЛА. Лазерное воздействие обеспечивает расплавление элементов конструкции объекта или вывод из строя оптоэлектронных сенсоров.

Повреждение целостности корпуса или других жизненно важных элемента БПЛА, а также препятствование полёту при помощи заградительных залпов и ловушек. Как правило, основными средствами противовоздушной обороны являются зенитно-ракетные комплексы (ЗРК), пусковые зенитно-ракетные комплексы (ПЗРК), автоматические пушки и пулемётные точки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] URL: <http://duma.gov.ru/news/46465/> (дата обращения: 03.10.23)
- [2] URL: <https://www.rbc.ru/society/29/09/2023/6405b7949a7947573103d1dc> (дата обращения: 03.10.23)
- [3] Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. □ СПб.: Научно-технические технологии. 2020.- 204 с.
- [3] URL: <https://sky-x.pro/blog/sposoby-protivodeystviya-bespilotnym-letatelynym-apparatam> (дата обращения 31.10.23)
- [4] URL: <https://sky-x.pro/blog/mechanicheskoe--lazernoe-i-mikrovolnovoe-protivodeystvie-bpla-kommercheskogo-tipattps://sky-x.pro/blog/mechanicheskoe--lazernoe-i-mikrovolnovoe-protivodeystvie-bpla-kommercheskogo-tip> (дата обращения: 10.11.23)

COUNTERING UAVS

Sudakov D.V.

Institute of Radio Electronics and Computer Science
Department of Radio Electronic Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
denis.sudakov.96@mail.ru

Chistyakov E. A.

Institute of Radio Electronics and Computer Science
Department of Radio Electronic Systems and Complexes
RTU MIREA
Moscow, Russia
chistyakov@mirea.ru

Abstract – the scientific article contains information on methods of countering unmanned aerial vehicles (UAVs). The impact of individual methods of counteraction on UAV systems, consequences, positive and negative sides.

Keywords: Counteraction, UAV, drone, means, drone, impact.

НАУЧНО МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СОЦИАЛЬНО- ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ОБОРОННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ГОСУДАРСТВ

Пестун У.А.

Институт технологии и управления,
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
pestun@mirea.ru

Эпенетосский В.Б.

ФГБУ «46 Центральный
научно-исследовательский институт» МО РФ
Москва, Россия

Аннотация — в рамках данной статьи отмечена и обоснована необходимость развития научно-методического задела в области обоснования значений социально-экономического и оборонного потенциалов, предложен подход прогнозирования параметров, характеризующих социально-экономическое и оборонное развитие государств.

Ключевые слова — прогнозирование, подход, социально-экономическое и оборонное развитие.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость наращивания социально-экономического и оборонного потенциалов государства для обеспечения военной безопасности подчеркнута в статье Президента Российской Федерации В.В.Путина «Быть сильными: гарантии национальной безопасности для России», опубликованной в Российской газете 20 февраля 2012 г. [1].

Также необходимо отметить, что планирование в области противодействия угрозам национальной безопасности на период от 30 до 50 лет определено указом Президента Российской Федерации от 07.05.2012 №603 «О реализации планов (программ) строительства и развития Вооруженных Сил Российской Федерации, других войск, воинских формирований и органов, и модернизации оборонно-промышленного комплекса».

Прогнозирование угроз национальной безопасности (внешних угроз) на 30-50 лет подразумевает принятие соответствующих мер для их парирования, при этом обоснование таких мер требует разработки соответствующего подхода, позволяющего прогнозировать параметры, характеризующие социально-экономические и оборонные потенциалы государства [2-4].

I. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Предлагаемый подход включает следующие этапы:

Этап 1. Подготовка (сбор) исходных данных.

Этап 2. Сглаживание имеющихся исходных данных, так как они не обладают полнотой и зачастую имеют различные форматы и единицы измерений.

Традиционный метод дополнения и сглаживания параметров является метод скользящей средней, который формально можно записать следующим образом:

$$m_t = \frac{1}{n} \sum_{i=t}^{t-n+1} d_i \quad (1)$$

где:

d – рассматриваемое значение;

n – интервал для усреднения (сглаживания);

m – усредненное (прогнозное) значение;

t – период сглаживания.

Основным недостатком данного метода является то, что более «свежие» данные имеют тот же вес, что и более «старые», вместе с тем понятно, что «свежие» данные имеют более важное значение и поэтому должны иметь больший вес. Одновременно необходимо отметить, что принципы назначения важности в данном методе носят экспертный характер. Это является и преимуществом и недостатком данного метода.

Альтернативным методом дополнение и сглаживание исходных данных является метод экспоненциально взвешенного среднего, где используется целый ряд весов, убывающих во времени по экспоненциальному закону.

$$u_t = \alpha d_t + (1 - \alpha)u_{t-1} \quad (2)$$

где:

u_i – прогнозируемое значение параметра в момент времени i ;

d_i – текущие значения параметра в момент времени t ;

α – коэффициент, характеризующий «гладкость» прогнозной (средней) функции, при малых значениях имеет сильное сглаживание, при значениях близких к 1 сглаженный ряд практически повторяет исходный ряд;

t – период сглаживания.

Этап 3. Построение функции, позволяющей аппроксимировать рассматриваемые параметры, характеризующие социально-экономическое и оборонное (оборонное) развитие государств.

Данный этап заключается в построении функций, позволяющих аппроксимировать рассматриваемые параметры, характеризующие социально-экономическое и военное (оборонное) развитие государств (в том числе эвентуальных противников), осуществляется линейной функцией типа:

$$\hat{y}_t = a + bt \quad (3)$$

Коэффициенты линейной функции:

$$b = \frac{n \sum ty_i - \sum t \sum y_i}{n \sum t^2 - (\sum t)^2} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{n} (\sum y_i - b \sum t) = \frac{\sum y_i}{n} - \frac{b \sum t}{n} \quad (5)$$

Где:

\hat{y}_t – прогнозируемое значение параметра;

y_i – фактическое значение параметра;

a – коэффициент модели, характеризующий начальное значение (свободный член);

b – коэффициент модели, характеризующий наклон функции (угловой коэффициент);

t – параметр времени;

n – параметр количества замеров.

Этап 4. Обоснование адекватности построенных функций, осуществляется через оценку значений общей, объясняемой и остаточной дисперсий, по соответствующим зависимостям:

общая дисперсия

$$\delta_{общая} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \quad (6)$$

объясняемая дисперсия

$$\delta_{объясняемая} = b^2 \cdot (\sum t^2 - \frac{(\sum t)^2}{n}) \quad (7)$$

Оценка адекватности функции, описывающей рассматриваемую регрессию, осуществляется на основании оценки детерминанта, как отношение общей дисперсии к объясняемой (для множественной регрессии, нормированный детерминант) или более формально:

$$r^2 = \frac{b^2 [\sum t^2 - (\sum t)^2 / n]}{\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n} \quad (8)$$

4. Оценка стандартных ошибок прогноза параметров, характеризующих социально-экономическое и оборонное развитие государств осуществляется путем расчета стандартной ошибки прогноза.

$$S_{y_i+\tau} = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - a \sum y_i - b \sum ty_i}{n-2}} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\tau + \frac{n-1}{2})^2}{\sum t^2 - (\sum t)^2 / n}} \quad (9)$$

5. Построение доверительных интервалов для значений аппроксимированных параметров, характеризующих социально-экономическое и оборонное развитие государств, осуществляется с учетом доверительных интервалов [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках данной статьи отмечена и обоснована необходимость развития научно-методического задела в области обоснования значений социально-экономического и оборонного потенциалов. Предложен подход прогнозирования параметров, характеризующих социально-экономическое и оборонное развитие государств, как союзников, так и эвентуальных противников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [5] Путин В.В. Быть Сильными: Гарантии Национальной Безопасности Для России // Вестник Российской нации. 2012. № 2-3 . С. 24-34.
- [6] Боков С.И., Пестун У.А., Поляков В.И. Научно-методические аспекты оценивания соответствия возможностей государства требуемому уровню оборонных расходов // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России 2020 № 3 С. 50-57.
- [7] Боков С.И., Пестун У.А., Поляков В.И. Развитие методологии анализа и прогнозирования зависимостей и обратных связей оборонного и социально-экономического развития государства // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России 2020 № 4 С. 32-38.
- [8] Гилькова О.Н. Милитаризация мировой экономики: сущность, причины и факторы развития. // Диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук / ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов».
- [9] Гладышевский В.Л., Горгола Е.В. Стратегическое управление ресурсным обеспечением Вооруженных Сил в условиях нарастания военной угрозы и использования западом невоенных методов силового давления. М.: Издательство «Канцлер», 2017. – 312 с.

SCIENTIFIC METHODOLOGICAL APPROACH TO FORECASTING PARAMETERS CHARACTERIZING THE SOCIO-ECONOMIC AND DEFENSE POTENTIALS OF STATES

Pestun U.A.
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education
«MIREA - Russian Technological University»,
RTU MIREA
Moscow, Russia
Pestun@mirea.ru

Epenetosky V.B.
Federal State Budgetary Institution "46 Central Research
Institute" of the Ministry of Defense of the Russian
Federation
Moscow, Russia

Abstract – within the framework of this article, the need to develop scientific and methodological groundwork in the field of substantiating the values of socio-economic and defense potentials is noted and justified, an approach is proposed for predicting the parameters characterizing the socio-economic and defense development of states..

Keywords – forecasting, approach, socio-economic and defense development