

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2023 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Разработка математической модели сверхширокополосного сигнала для
ретрансляции информации между космическими аппаратами»
тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»
код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»
код и наименование магистерской программы

Руководитель	_____	доцент МБК ПФиКТ, канд. техн. наук	Е.А. Шангина
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		Д.И. Анисимов
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	начальник сектора отдела 105 АО «РЕШЕТНЁВ», канд. техн. наук	И.И. Шилко
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	профессор МБК ПФиКТ, д-р техн. наук, доцент	В.Е. Чеботарёв
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2023

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2023 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Красноярск 2023

Студенту: Анисимову Даниилу Игоревичу

Группа КИ21-03-6М Направление (специальность) 27.04.03

«Системный анализ и управление».

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка математической модели сверхширокополосного сигнала для ретрансляции информации между космическими аппаратами».

Утверждена приказом по университету № 16528/с от 23.10.2021.

Руководитель ВКР: Е.А. Шангина канд. техн. наук, доцент МБК ПФиКТ СФУ.

Исходные данные для ВКР: в рамках ВКР разрабатывается математическая модель сверхширокополосного сигнала для ретрансляции информации между космическими аппаратами.

Перечень разделов ВКР: введение; космические системы связи, основные проблемы, сверхширокополосные системы и сигналы; математическое описание и модель сверхширокополосного сигнала; генерация и анализ сигналов в пакете программ MATLAB; заключение.

Перечень графического материала: презентация PowerPoint.

Руководитель ВКР

подпись

Е.А. Шангина
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

Д.И. Анисимов
инициалы и фамилия

« ____ » _____ 2023 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка математической модели сверхширокополосного сигнала для ретрансляции информации между космическими аппаратами» содержит 74 страниц текстового документа, 4 таблицы, 29 рисунков, список литературы из 25 использованных источников.

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПОКАЗАТЕЛЬ ШИРОКОПОЛОСНОСТИ, РЕТРАНСЛЯЦИЯ, ФИЛЬТРАЦИЯ.

Целью диссертационного исследования является разработка усовершенствованной математической модели сверхширокополосного сигнала, для ретрансляции информации между космическими аппаратами.

Задачи диссертационного исследования:

- исследовать и проанализировать математическое представление сверхширокополосного сигнала в области применения при ретрансляции информации между космическими аппаратами, выявить недостатки;
- разработать математическую модель сверхширокополосного сигнала с возможностью корректировки показателя широкополосности во время передачи радиосигнала;
- применить разработанную математическую модель при моделировании сверхширокополосных сигналов в пакете программ MATLAB;
- сравнить полученные значения с аналогичными сигналами применяющимися в космических системах связи.

В результате исследования было предложено математическое описание сверхширокополосного сигнала применяющегося в космических системах связи для ретрансляции информации между космическими аппаратами. Проведено моделирование применяемых сигналов в пакете программ MATLAB на устойчивость к зашумлению и результат отфильтрованных прошедших фильтрацию сигналов применительно к СШПС.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 Космические системы связи, основные проблемы, сверхширокополосные системы и сигналы.....	9
1.1 Принципы построения космических систем связи с использованием сверхширокополосных систем связи.....	9
1.2 Основные проблемы спутниковых систем связи.....	13
1.3 Сверхширокополосные системы и сигналы.....	14
1.4 Формирование сверхширокополосных сигналов.....	16
1.5 Основные виды сверхширокополосных сигналов.....	20
1.6 Основные методы описания сверхширокополосных сигналов.....	22
1.7 Преимущества применения сверхширокополосных сигналов.....	22
1.7 Преимущества применения сверхширокополосных сигналов.....	34
2 Математическое описание и модель сверхширокополосного сигнала.....	36
2.1 Построение и разработка математической модели.....	366
2.2 Способ передачи данных в радиоканале в космических системах связи .	40
2.3 Выводы по главе.....	46
3 Генерация и анализ сигналов в пакете программ MATLAB.....	48
3.1 Исследование влияния частотно-избирательных устройств и спектрально-корреляционных характеристик сигналов.....	48
3.2 Моделирование наиболее распространенных в использовании в космических системах связи типов сигналов.....	59
3.3 Выводы по главе.....	67
Заключение.....	69
Список сокращений и обозначений.....	72
Список использованных источников.....	73

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В последнее время отмечается рост числа различных систем связи, и в частности, спутниковых систем связи (ССС). В связи с этим возникают проблемы, связанные с нехваткой частотных диапазонов для работы новых СССР. Обычно такие проблемы решаются путем координации параметров СССР. Однако в некоторых специальных случаях для решения проблемы нехватки частотных диапазонов необходимо применение специальных спутниковых систем связи, использующих сверхширокополосные (СШП) сигналы (СШП СССР) [1].

СШП сигналы представляют собой последовательности импульсов с длительностью порядка наносекунды или дискретно-частотные сигналы, относительная ширина спектра которых больше 0.25. Следовательно, такие сигналы обладают очень широким спектром, что позволяет при излучении распределять энергию передатчика в широком диапазоне частот до уровней, безопасных для работы систем связи, работающих в том же диапазоне. Таким образом, применение специальных СШП СССР позволяет вторично использовать диапазоны частот и решать проблему нехватки диапазонов.

До 1989 года для обозначения сверхширокополосных систем, применяющих СШПС, пользовались понятиями сигналов «без несущей», «импульсных», «несинусоидальных» и других [2].

Целью диссертационного исследования является разработка усовершенствованной математической модели сверхширокополосного сигнала, для ретрансляции информации между космическими аппаратами.

Задачи исследования:

– исследовать и проанализировать математическое представление сверхширокополосного сигнала в области применения при ретрансляции информации между космическими аппаратами, выявить недостатки.

– в пакете программ MATLAB применить блок фильтрации с целью анализа помехоустойчивости сигнала.

– разработать усовершенствованную математическую модель СШПС с возможностью корректировки показателя широкополосности во время передачи радиосигнала.

- применить разработанную математическую модель при моделировании сверхширокополосных сигналов в пакете программ MATLAB;

- сравнить полученные значения с аналогичными сигналами применяющимися в космических системах связи.

Достоверность результатов. Полученные в диссертационной работе результаты согласуются с известными теориями распространения сигналов космической связи, а также теориями передачи и приема информации, в рамках норм работы СШП систем. Также достоверность результатов была доказана.

Достоверность результатов данной диссертационной работы заключается в согласованности полученных соискателем экспериментальных данных с известными теоретическими положениями других авторов и с обоснованными и согласованными теоретическими решениями, полученными лично соискателем

Теоретическая и практическая значимость работы. Для использования в специальной СШП ССС рекомендованы СШП сигналы в виде кодированных последовательностей СКИ, обеспечивающие вторичное использование спектра и кодово-временное разделение абонентов.

Произведен расчет искажений СШП сигнала при распространении в космическом радиоканале. Получены оценки влияния этих искажений на работу СШП ССС и определены параметры корректора канала.

Оценка электромагнитной совместимости СШП ССС с существующими радиотехническими системами космического и наземного базирования показывает, что помехи, создаваемые СШП системой узкополосным системам, допустимы с точки зрения требований МККР.

Предложена структурная схема СШП ССС и рассмотрены варианты ее реализации на имеющейся элементной базе.

Методология и методы исследования. Результаты диссертационного исследования используются АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева» при решении проектно-конструкторских задач системы в стандартах, основанных на рекомендациях международного консультационного комитета по космическим системам данных (CCSDS), выполняемого по договору с Министерством образования и науки России №02.G25.31.0041 от 12.02.2018 г.

Так же результаты диссертационного исследования были использованы в рамках совместного проекта РФФИ и Правительства Красноярского края № 16-47-243054 «Разработка высокоточных методов оценки отношения сигнал/шум для космических систем связи и управления».

[изъято 1-3 главы, страницы 9-68, в соответствии с заявлением Приложения Б к ВКР].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью диссертационного исследования являлась разработка усовершенствованной математической модели сверхширокополосного сигнала, для ретрансляции информации между космическими аппаратами позволяющая корректировать показатель широкополосности

В работе было исследовано и проанализировано математическое представление сверхширокополосного сигнала в области применения ретрансляции информации между космическими аппаратами, выявлены недостатки данной математической модели.

Разработана математическая модель СШПС с возможностью корректировки показателя широкополосности во время передачи радиосигнала.

В пакете программ MATLAB была смоделирована разработанная математическую модель сверхширокополосного сигнала. С целью анализа проведено аналогичное моделирование других сигналов применяющихся для ретрансляции информации в космических системах связи (BPSK, QPSK, 16QAM, FSK-10)

Проведено моделирование методом адаптивной обработки сигналов в космических системах связи применяемых сигналов в пакете программ MATLAB на устойчивость к зашумлению и результат отфильтрованных прошедших фильтрацию сигналов применительно к СШПС.

Полученные результаты значения отношения сигнал/шум после фильтрации СШПС показывают лучшие результаты по сравнению с другими сигналами, что свидетельствует об эффективности применения математической модели (3.3) с возможностью изменения показателя широкополосности сигнала.

Результаты моделирования указывают на перспективы и преимущества использования сверхширокополосных сигналов в космических и спутниковых системах связи. Одним из основных направлений космических систем связи является радиолокация.

Использование на практике СШП сигналов ограничено. Это связано с трудностями по формированию, излучению и обработке таких сигналов. На современном этапе трудности, связанные с формированием и обработкой СШП сигнала удается преодолеть. Но излучать такие сигналы без искажения спектра сложно.

В то же время массовое развитие СШП систем связи только начинается. Поэтому в нашей стране необходимо как можно скорее создать нормативную базу для массового применения СШП систем различного назначения, чтобы в очередной раз не отдать перспективное направление на откуп американским корпорациям. Тем более что задел отечественных исследователей и разработчиков в СШП системах весьма серьезен и признан во всем мире.

В диссертационной работе рассматривались особенности генерации, приема и распространения СШПС наряду с другими сигналами. В процессе проведенного анализа были выделены следующие особенности. Во-первых, спектры всех рассмотренных моделей явно несимметричны относительно центральной частоты. Это является принципиальной особенностью СШП сигналов относительно узкополосных. Вследствие несимметричности спектра при демодуляции возможны искажения и это обстоятельство необходимо учитывать при построении аппаратуры. Во-вторых, из-за того, что формирователи СКИ и антенны не пропускают составляющие спектра СШП сигнала лежащие примерно до 500 МГц, нецелесообразно использовать СШП сигналы со спектром, сосредоточенным в диапазоне до 500 МГц. Поэтому, реальные СКИ будут искажаться в значительно меньшей степени, чем СКИ, у которых основная энергия СКИ сосредоточена в области низких частот (0-1 ГГц).

Принципы построения космических систем связи с использованием сверхширокополосных систем связи и способы передачи данных по радиоканалу сверхширокополосными импульсными сигналами в космических системах связи также были отражены в работе.

По результатам проведенной работы СШПС показали свою высокую эффективность применения и внушительную информативность сигнала в виду наименьшей вероятности ошибки в соотношении сигнал/шум, в то время как узкополосный сигнал имеет вероятность 10^{-6} .

Результаты анализа обработки СШПСс помощью применяемых программных фильтров встроенных в пакет программ MatLab показывают, что передаточная функция согласованного фильтра СШП сигнала отличается от передаточной функции согласованного фильтра узкополосного сигнала. Синтез согласованного фильтра можно проводить на нерегулярных линиях передачи (НЛП), которые представляют собой линии с неодинаковым по длине волновым сопротивлением. Изменение волнового сопротивления достигается или изменением поперечного сечения одного проводника, или изменением расстояния между проводниками, или использованием неоднородной диэлектрической среды.

В целом, проведенное исследование доказывает принципиальную возможность и перспективность использования СШП сигналов в спутниковых системах связи.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АО	–	Акционерное общество;
ДПФ	–	Дискретное преобразование Фурье;
КА	–	космический аппарат;
РФ	–	Российская Федерация;
СМО	–	система массового обслуживания;
FCC	–	Федеральная комиссия связи (США);
UWB	–	Сверхширокополосные сигналы;

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Б. Скляр. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2–е, испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003 г. – 1104 с.
- 2 Щербак Н. Сверхширокополосная Радиолокация – Электроника: наука, технология, бизнес – № 3 2002г.
- 3 Иммореев И., Судаков А. Сверхширокополосные и узкополосные системы связи. Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2003.
- 4 Анисимов Д.И., Асланян Р.О., Кузовников А.В., Кашкин В.Б., Леонов С.Н. Сверхширокополосные сигналы используемые в космических системах управления и связи// Ultrawideband signals used in spacecontrol and communication systems/ статья из журнала «Решетневские чтения» № 21-1 // 261-263с г. Красноярск. Входит в базу данных РИНЦ
- 5 Чеботарев В.Е., Косенко В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб, пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. - Красноярск, 2011. – 488 с.;
- 6 Чеботарев В.Е. Проектирование космических аппаратов систем информационного обеспечения: учеб. пособие. В 2 кн. Кн. 2. Внутреннее проектирование космического аппарата / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2006. – 140 с.;
- 7 Патраев, В. Е. Надежность космических аппаратов информационного обеспечения : учебн. пособие / В. Е. Патраев, В. И. Халиманович ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – 208 с.
- 8 Линников О. Н., Сосулин Ю. Г., Суворов В. И., Трусов В. Н., Юфряков Б. А.. Особенности сверхширокополосной ближней радиолокации Материалы Второй Всероссийской научной конференции семинара “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике”, 4-7 июля 2006 г., Муром, Россия. – Муром: МИ ВлГУ, 2006. – С. 420-424.

- 9 Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Методы теоретического и экспериментального исследования нестационарного рассеяния и излучения электромагнитных волн // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. – №9. – С. 3-27.
- 10 Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Сверхширокополосные радиолокационные измерители. –М.: Воениздат, 1983. – 221 с.
- 11 Линников О. Н., Сосулин Ю. Г., Суворов В. И., Трусов В. Н., Юфряков Б. А.. Особенности сверхширокополосной ближней радиолокации
Материалы Второй Всероссийской научной конференции семинара “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике”, 4-7 июля 2006 г., Муром, Россия. – Муром: МИ ВлГУ, 2006. – С. 420-424.
- 12 Иванов В.И., Гордиенко В.Н., Попов К.Н. и др. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов. – 2-е изд. Под ред. В.И. Иванова. – М.: Горячая линия - Телеком, 2003. – 232 с.: ил.
- 13 Афонский А.А. Дьяконов В.П.Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики– М.: Солон – Пресс - Телеком, 2009. – 247 с.: ил.
- 14 Щербак Н. Сверхширокополосная Радиолокация – Электроника: наука, технология, бизнес – № 3 2002г.
- 15 Патент. Джордж Фредерик Росс (USA), Стародубцев Юрий Иванович (RU), Сухорукова Елена Валерьевна (RU). «Передающие и приемные системы, применяющие ультракороткие импульсные сигналы для передачи информации без искажений» Заявка: 198105312, 12.02.1983г.
- 16 Лукьяненко, М. В. Моделирование систем и процессов : учебное пособие / М. В. Лукьяненко, Е. В. Пашенко, Н. П. Чурляева : под ред. Н. П. Чурляевой; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – 394 с.
- 17 Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. Основные понятия, модели и методы описания // Радиофизика и радиоастрономия. № 2. 2008. с. 166-194.
- 18 Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.:Радио и связь, 1989 – 192с.

19 Линников О. Н., Сосулин Ю. Г., Суворов В. И., Трусов В. Н., Юфряков Б. А.. Особенности сверхширокополосной ближней радиолокации. Материалы Второй Всероссийской научной конференции семинара “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике”, 4-7 июля 2006 г., Муром, Россия. – Муром: МИ ВлГУ, 2006. – С. 420-424.

20 Косичкина Т. П., Сперанский В. С. Сравнительный анализ сверхширокополосных многочастотных систем связи и систем связи со сверхкороткими импульсами // Труды Российского НТОРЭС им. А. С. Попова, серия “Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике”. Выпуск I. – М.: Радиотехника, 2005. – С. 146-147.

21 Калинин В. В.. Сверхширокополосная передача цифровой информации на основе шумовых сигналов // Труды Российского НТОРЭС им. А. С. Попова, серия “Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике”. Выпуск I. – М.: Радиотехника, 2005. – С. 29-32.

22 Андреев Ю. В., Дмитриев А. С., Клецов А. В., Коротеев М. В., Лактюшкин А. М.. Эффект многолучевого усиления в сверхширокополосной беспроводной системе связи // Труды Российского НТОРЭС им. А. С. Попова, серия “Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике”, Выпуск I. – М.: Радиотехника, 2005. – С.147-150

23 Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Методы теоретического и экспериментального исследования нестационарного рассеяния и излучения электромагнитных волн // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. – №9. – С. 3-27.

24 Кельнер С. Р., Соколов А. А. Описание процесса передачи сверхкоротких импульсов в радиоканале. - В кн.: Исследование нестационарных электромагнитных полей. – М.: Атомиздат, 1977. – С. 5-16.

25 Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Сверхширокополосные радиолокационные измерители. –М.: Воениздат, 1983. – 221 с.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой


В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
«29» 06 2023 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Разработка математической модели сверхширокополосного сигнала для
ретрансляции информации между космическими аппаратами»
тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»
код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»
код и наименование магистерской программы

Руководитель


подпись, дата

доцент МБК ПФиКТ,
канд. техн. наук
должность, ученая степень

Е.А. Шангина
инициалы, фамилия

Выпускник


подпись, дата

Д.И. Анисимов
инициалы, фамилия

Рецензент


подпись, дата

начальник сектора
отдела 105
АО «РЕШЕТНЁВ»,
канд. техн. наук
должность, ученая степень

И.И. Шилко
инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата

профессор
МБК ПФиКТ,
д-р техн. наук, доцент
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарёв
инициалы, фамилия

Красноярск 2023