

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт космических исследований
Российской академии наук
доктор физико-математических наук,
академик РАН



Петрукович А.А.

30 марта 2026 г.

ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Батанова Виталия Викторовича
«Развитие теории передачи цифровых сигналов по спутниковым
радиолиниям с частотной и временной дисперсией», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.4 - Радиофизика

Общая характеристика диссертационной работы.

Диссертационная работа Батанова Виталия Викторовича «Развитие теории передачи цифровых сигналов по спутниковым радиолиниям с частотной и временной дисперсией» связана с тематикой исследования, анализа и организации надежной передачи информации по спутниковым радиолиниям со свойствами частотной дисперсии (зависимость фазовой скорости от частоты) и временной дисперсии (многолучевое распространение сигналов до приемного устройства за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях и гиротропности околоземной ионосферы).

В настоящее время наблюдается рост числа спутниковых информационных систем различного назначения, различных орбитальных группировок и используемых частотных диапазонов (P -, L -, Ku -, Ka -, Q/V -, частотные диапазоны). Примером являются системы фиксированной и

подвижной спутниковой связи, интегрированных с наземными сетями связи, системы глобальных навигационных систем. Потребителям информации этих систем предоставляется широкий спектр коммуникационных услуг независимо от времени и местоположения для обеспечения широкополосного доступа в Интернет, для обеспечения альтернативных средств подвижной связи в любой точке Земли. Устойчивой тенденцией данных спутниковых систем является увеличение информационных скоростей передачи при ограниченной выделяемой частотной полосе. Это достигается, используя класс информационно-емких цифровых сигналов с частотной эффективностью до 6-8 бит/с/Гц и более с различными видами манипуляции с сложными сигнальными «созвездиями» (цифровые сигналы с многопозиционной фазовой (ФМ), квадратурно-амплитудной (КАМ) и амплитудно-фазовой манипуляциями (АФМ)).

Данный класс цифровых сигналов существенно подвержен искажениям «созвездий» за счет влияния физических сред распространения по отношению к «классическим» цифровым сигналам с двоичной фазовой манипуляцией. Суть искажений - случайные изменения комплексных огибающих цифровых сигналов (искажения фазо-частотных и амплитудно-частотных характеристик сигналов) за счет свойств частотной и временной дисперсии физических сред распространения. Эти искажения порождают интерференционные межсимвольные и межканальные помехи при приеме и обнаружении цифровых сигналов в дополнение к тепловым аддитивным канальным шумам, что обуславливает энергетические потери, достаточно существенные при увеличении информационной емкости и увеличении частотной полосы.

Особенностью возникающих интерференционных помех является зависимость их мощности от мощности излучаемых сигналов, поэтому не удастся компенсировать искажающее влияние сред распространения, увеличивая мощность передающих устройств. Данные свойства физических сред распространения определяют задачи количественной оценки влияния рассматриваемых искажений, разработки моделей искажений цифровых

сигналов при распространении, выработки подходов снижения влияния искажений и повышения надежности передачи информации, выполнения экспериментальных исследований с целью натуральных измерений характеристик спутниковых ионосферных радиолиний. Это определяет актуальность задач, решаемых в работе.

Научная новизна. Искажающее влияние околоземной ионосферы характерно для относительно низкочастотных диапазонов (например, *P*-, *L*-частотные диапазоны), для этих диапазонов искажающее влияние ионосферы связано с ее дисперсионными и рассеивающими свойствами. Для более высокочастотных диапазонов (*Ka*-, *Q/V*- частотные диапазоны) существенное искажающее влияние оказывают радиолинии с гидрообразованиями (туман, дождь, облака) со свойством частотной дисперсии и поглощения.

В диссертации рассмотрено искажающее влияние спутниковых радиолиний с околоземной ионосферой и радиолиний с туманом.

Научную новизну диссертационной работы составляют полученные результаты задач по исследованию искажающего влияния рассматриваемых сред распространения:

- разработаны модели спутниковых радиолиний на основе диэлектрической проницаемости сред распространения сигналов, включая модели для изотропных и анизотропных ионосферных радиолиний с частотной дисперсией и многолучевостью распространения и модель радиолинии с туманом со свойством частотной дисперсии и поглощения;

- на основе этих моделей разработаны методы описаний цифровых сигналов с искажениями (во временной и частотной областях) при распространении по рассматриваемым физическим средам: искажающее влияние сред представляется в виде линейной фильтрации цифровых сигналов, импульсные характеристики или комплексные коэффициенты передачи которых определяются характеристиками сред распространения (например, высотным профилем электронной концентрации) и геометрией радиолиний распространения (например, рефракцией для ионосферных спутниковых

радиолиний, высотой тумана для радиолиний с туманом). С использованием разработанных описаний оценены энергетические потери при приеме и обнаружении цифровых сигналов ФМ, КАМ, АФМ по отношению к распространению в свободном пространстве. Показано, что для определенных характеристик радиолиний при увеличении информационной емкости цифровых сигналов и расширении частотной полосы радиолиний энергетические потери достигают 10 дБ, т.е. практически нарушается функционирование информационных систем;

- произведено исследование характеристик спутниковых ионосферных радиолиний со свойством многолучевости распространения сигналов из-за отражений, рассеяний на ионосферных неоднородностях, которая порождает вариации амплитуд и фаз сигналов на входе приемных устройств. Для этих радиолиний произведено оценеи временной стационарности радиолиний, которые являются необходимыми для корректного выполнения схем синхронизации (частотной, тактовой, кадровой) и корреляционного приема. Для этих радиолиний произведено оценивание энергетических потерь при приеме по отношению к распространению в свободном пространстве;

- предложены методы снижения искажающего влияния цифровых сигналов при распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям с частотной и временной дисперсией, основанные на методах оценивания высотного профиля электронной плотности ионосферы с использованием и без использования пилот-сигналов, с использованием 8-ми параметрической глобальной модели ионосферы Клобушара. Предложен метод снижения искажающего влияния цифровых сигналов при распространении по радиолиниям с туманом на основе использования фазометрического метода оценивания водности. Эффективный метод снижения искажающего влияния основан на использовании разработанного в диссертационной работе посимвольного приема сигнальных конструкций на основе информационно-емких цифровых сигналов и корректирующего кодирования в недвоичных полях с объемом, совпадающим с объемом сигнальных «созвездий»;

- экспериментально исследованы ионосферные спутниковые радиолинии P/L - частотных диапазонов на основе разработанной установки с использованием программируемого радио (soft defined radio), выполняющего роль передатчика/приемника. Исследование выполнено с использованием среднеорбитальных спутников-ретрансляторов спутниковой системы Коспас/Саргат. В результате исследований произведено оценивание амплитудных замираний, достигающих 11 дБ для совместной радиолинии P (канал вверх)/ L (канал вниз) и нормальной ионосферы средних широт России.

Методы исследований. Исследования выполнены с использованием теории спутниковых радиолиний, теории распространения радиоволн, статистических решений, теории цифровых сигналов, теории вероятности и математической статистики, теории отождествления радиолиний.

Достоверность научных выводов по главам и заключению диссертационной работы подтверждается согласованностью полученных теоретических результатов и результатов математического моделирования разработанных методов и алгоритмов с известными в литературе результатами, согласованностью экспериментальных исследований с результатами теоретического анализа.

Практическая значимость работы определяется их направленностью по разработке подходов надежной помехоустойчивой передачи информации по спутниковым радиолиниям с частотной и временной дисперсиями, которые вносят искажения комплексных огибающих информационно-емких сигналов при их распространении, что приводит к энергетическим потерям по отношению к распространению в свободном пространстве вплоть до возможного нарушения штатного функционирования спутниковых информационных систем. Полученные результаты и рекомендации являются основой для разработки систем надежной передачи информации по рассматриваемым радиолиниям с использованием класса информационно-емких цифровых сигналов, обеспечивающих требуемую скорость передачи для ограниченных частотных полос выделяемого частотного диапазона и

обеспечения верности передачи информации, сравнимых по данным характеристикам с передачей в свободном пространстве.

Научные результаты, содержащие защищаемые положения диссертации, опубликованы в 25 статьях в рецензируемых журналах, из них 10 статей из списка Web of Science и Scopus.

Апробация результатов. Материалы диссертации докладывались на 33 научных конференциях.

Результаты диссертации использованы при выполнении ряда составных частей опытно-конструкторских работ (в диссертации приведены акты использования результатов диссертации).

Научные исследования по тематике диссертации поддержаны грантами РФФИ (№16-07-00746, №20-07-00525).

Работа состоит из введения, 5 Глав, Заключения, списка литературы и четырех приложений, содержит 157 страниц, включая 59 рисунков и иллюстраций, 13 таблиц и 151 ссылок на источники.

Во введении изложено состояние проблемы, обоснована актуальность проводимых в работе исследований, сформулированы цель и решаемые в диссертации задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, а также приведены сведения об апробации работы.

В главе 1 дан обзор общей теории помехоустойчивой передачи дискретных сообщений, включая модели каналов передачи. Приведены новые результаты по развитию теории посимвольного приема цифровых сигналов с различными видами манипуляций.

В главе 2 рассмотрены модели спутниковых радиолиний с временной и частотной дисперсией, обуславливающие искажения цифровых сигналов из-за взаимодействия радиоволн с атмосферой (модели изотропных и анизотропных спутниковых ионосферных радиолиний с частотной и временной дисперсией; модель дисперсионной и поглощающей спутниковой радиолинии с туманом, учитывающая частотную дисперсию и поглощение). Приведены разработанные

автором методы оценивания фазовых и амплитудных замираний сигналов и вычисленные статистические оценки временной стационарности для ряда параметров радиолиний.

В главе 3 представлены результаты по развитию теории искажений цифровых сигналов при распространении по спутниковым радиолиниям, включая изотропные и анизотропные ионосферные радиолинии со свойством частотной дисперсии; ионосферные радиолинии с временной дисперсией (за счет многолучевого распространения сигналов); радиолинии с туманом со свойствами частотной дисперсии и поглощения. Приведены описания разработанных методов представления искажений цифровых сигналов, основанные на решении волнового уравнения в приближении геометрической оптики для рассматриваемых непрерывных сред распространения, полагая их действие эквивалентным линейной фильтрации. Даны численные оценки энергетических потерь при обнаружении и приеме цифровых сигналов при распространении по спутниковым радиолиниям по отношению к распространению в свободном пространстве.

В главе 4 даны описания и анализ разработанных методов снижения искажающего влияния рассматриваемых спутниковых радиолиний при распространении информационно-емких сигналов, в частности, рассмотрен интенсивно используемый в приложениях метод снижения искажений цифровых сигналов при распространении по ионосферным радиолиниям с временной дисперсией - применение схем корректирующего кодирования в сочетании с временным перемежением символов сигнальных «созвездий» на времени стационарности для борьбы с дружными замираниями. Приведены описания перспективных методов снижения искажений цифровых сигналов при распространении по неоднородным радиолиниям с частотной дисперсией, основанных на формировании линейного дискретного фильтра, инверсного к линейному фильтру радиолинии и на использовании глобальной модели земной ионосферы 8-ми параметрической модели Клобушара.

В главе 5 даны результаты экспериментальных исследований в части амплитудных и фазовых замираний сигналов при их распространении по спутниковым ионосферным радиополосам P -, и L - частотных диапазонов. Экспериментальные исследования выполнены с использованием комплекса передачи/приема сигналов спутниковой информационной системы аварийного оповещения Коспас/Сарсат (P - частотный диапазон радиополосы «вверх», L - диапазон радиополосы «вниз»).

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

В списке литературы приведены источники ссылок на научные работы.

В приложении 1 дан список принятых сокращений.

В приложениях 2, 3, 4 представлены акты об использовании результатов диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе.

1. В диссертации целесообразно было бы привести результирующие рекомендации относительно обеспечения надежности передачи информации по рассматриваемым радиополосам с «жесткими» условиями распространения (например, для случая сильных замираний (индекс сцинтилляций больше 0.6)).

2. Для расчета временных задержек в работе используется достаточно простая 8-параметрическая модель Клобушара, которая позволяет компенсировать в среднем 50–60 % дополнительного ионосферного запаздывания. Очевидно, что в современных условиях такая точность модели не удовлетворительна, также как и использование однослойной модели Чэпмена для описания вертикального профиля электронной концентрации. Вероятно следовало бы попробовать сделать расчеты на основе других моделей ионосферы, таких как IRI и NeQuick.

3. Оценка диапазона значений индекса сцинтилляций S_4 и диапазона замираний сигналов только для средних широт РФ представляется неоправданным ограничением, поскольку основные области интенсивных сцинтилляций находятся в высоких и экваториальных широтах.

Замечания по автореферату.

Замечания касаются оформления текста автореферата, например, на стр.12 в формульных выражениях не даны определения некоторых параметров: $f_p, \Delta, n(f, z)$. Не приведено правило формирования недвоичных полей, требуемое для понимания исследуемого алгоритма приема сигнальных конструкций на основе информационно-емких сигналов и корректирующих кодов в недвоичных полях.

Сделанные замечания по тексту диссертации и тексту автореферата не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Заключение по диссертационной работе.

Диссертационная работа Батанова В.В. по объему результатов исследований, новизне, научной и практической значимости представляет законченный научный труд. Постановка общей проблемы и составляющих задач, изложение результатов по их решению, выводы по главам и в заключении - логичные. Значимость полученных результатов подтверждается публикациями в журналах с высоким индексом цитирования.

Диссертационная работа Батанова Виталия Викторовича «Развитие теории передачи цифровых сигналов по спутниковым радиопередачами с частотной и временной дисперсией», соответствует паспорту специальности 1.3.4 - Радиофизика.

По объему полученных результатов, их новизне и научной и практической значимости диссертация удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» № 842 от 24.09.2023 г.), а ее автор Батанов Виталий Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 Радиофизика.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на семинаре отдела «Исследования Земли из космоса» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований РАН (протокол № 2026-03 от 18 марта 2026 г.).

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Телефон: +7(495) 333-41-00

Эл. почта: pulse@cosmos.ru



Пулинец Сергей Александрович

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

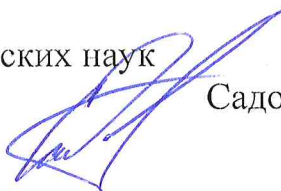
Телефон/факс +7(495) 333-12-48

Адрес электронной почты: iki@cosmos.ru

Подпись Пулинца С.А. заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт космических исследований Российской академии
наук (ИКИ РАН)

Кандидат физико-математических наук



Садовский Андрей Михайлович

Сведения о ведущей организации

1.	Полное название организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук
2.	Сокращенное наименование организации	ИКИ РАН
3.	Ведомственная принадлежность	Российская академия наук
4.	Место нахождения	г. Москва
5.	Почтовый индекс, адрес организации	117997, г. Москва, ул.Профсоюзная, д.84/32
6.	Телефон с указанием кода города	+7 (495) 333-52-12
7.	Адрес электронной почты	iki@cosmos.ru
8.	Адрес официального сайта в сети «Интернет»	iki.cosmos.ru
9.	Руководитель организации	Петрукович Анатолий Алексеевич
10.	Уполномоченный	Пулинец Сергей Александрович
11.	Должность	Главный научный сотрудник
12.	Ученая степень	Доктор физико-математических наук
13.	Ученое звание	Академик РАН

Публикации работников ведущей организации по специальности 1.3.4 - Радиофизика

- 1.Титова М. А. Захаров В. И., Пулинец С. А. Методика обработки радиотехнической и геофизической информации об условиях распространения спутниковых радиосигналов для изучения литосферно–ионосферных проявлений. // Сборник докладов I Всероссийской молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти Д. С. Лукина. Йошкар-Ола. 2024. Стр.23-26.
- 2.Пулинец С.А. Исследование физических механизмов взаимодействия атмосферы и ионосферы. // Отчет о НИР/НИОКР (итоговый). 2020. Номер графта 18-12-00441.
- 3.Пулинец М.С., Будникова П.А., Пулинец С.А. Глобальный отклик ионосферы на интенсивные вариации солнечной и геомагнитной активности по данным глобальной сети навигационных приемников GNSS. // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т.63. №2. Стр. 202-215.
- 4.Титова М.А., Захаров В.И., Пулинец С.А., Детектирование ионосферных возмущений над регионом острова Гаити в период 01-15 января 2010 г. по данным GPS в спокойных геомагнитных условиях. // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т.63. №2. Стр. 791-800, 2019 DOI: 10.1134/S0016794019060130
5. Пашинов Е.В., Втюрин С.А., Ермаков Д.М. Длинные ряды данных о глобальной циркуляции водяного пара в атмосфере Земли на основе спутникового радиотепловидения. Материалы 20-й международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 2022. Издательство: Институт космических исследований российской академии наук.

6. Втори́н С.А., Ермаков Д.М., Паши́нов Е.В. Развитие программных средств расчёта динамики водяного пара и парниковых газов в атмосфере и расчёт их баланса над регионами произвольной формы. Материалы 22-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Конференция Москва, 11–15 ноября 2024 года.

7. Ермаков Д.М., Лупян Е.А. Всероссийский семинар "Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса": Итоги заседаний 2024 года. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2025. Т. 22. № 1. С. 336-342.

8. Золотарев В.В. О выборе технологий кодирования в спутниковых сетях связи для ДЗЗ. // Материалы 22-й международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 2024. Москва, 11–15 ноября, Издательство: Институт космических исследований Российской академии .

9. Золотарев В.В. Применение современных технологий проектирования для перспективных систем цифровой связи. // Материалы 21-й международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" Москва, 2023. Издательство: Институт космических исследований Российской академии наук.

10. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Новый подход к оценкам характеристик спутниковых систем связи. // Материалы 21-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 2023. Издательство: Институт космических исследований Российской академии наук. Москва. Издательство: Институт космических исследований Российской академии наук.