

На правах рукописи



БАТАНОВ ВИТАЛИЙ ВИКТОРОВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ ПО
СПУТНИКОВЫМ РАДИОЛИНИЯМ С ЧАСТОТНОЙ И
ВРЕМЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ**

Специальность 1.3.4 - Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Фрязино, 2026

Работа выполнена в Фрязинском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН)

Научный руководитель:

Назаров Лев Евгеньевич,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Официальные оппоненты:

Егоров Владимир Викторович,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник АО «РИМР»

Палкин Евгений Алексеевич,
кандидат физико-математических наук,
профессор, проректор по научно-инновационной
работе АНО ВО «РосНОУ»

Ведущая организация:

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

Защита состоится: 17 апреля 2026 г. в 11:00
на заседании диссертационного совета 24.1.111.02
на базе ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН по адресу 125009, г.Москва, ГСП-9, ул.Моховая, д.11, стр.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова
РАН и на сайте <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Batanov/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «_____» 2026 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета 24.1.111.02
доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Кузьмин Лев Викторович

Общая характеристика диссертационной работы.

Развитие коммуникационных технологий привело к созданию современных глобальных сетей связи по проводным и беспроводным радиолиниям. Один из основных способов реализации сетей данных типов основан на применении спутниковых информационных систем (СИС) в качестве самостоятельного средства связи и базового дополнения к наземным сетям связи. Потребителям информации этих систем предоставляется широкий спектр коммуникационных услуг независимо от времени и местоположения.

СИС работают в широких частотных диапазонах: P (до 500 МГц), L (0.5 ...1.5 ГГц), Ku (11...14 ГГц), Ka (20...40 ГГц), Q/V (40...70 ГГц). Рациональный выбор частотных диапазонов для разрабатываемых СИС определяется многими факторами, включая типами физических сред в составе радиолиний - околоземная ионосфера, тропосфера (дождь, туман, облака, др.), лесные массивы, др.

В диссертационной работе рассмотрено влияние околоземной ионосферы и тропосферы (радиолинии с туманом) на эффективность функционирования СИС.

Для относительно низкочастотных диапазонов (P - , L - частотные диапазоны) преобладает влияние околоземной ионосферы при распространении сигналов. Для этих диапазонов основное влияние на верность передачи информации связано с рассеянием и дисперсионными свойствами околоземной ионосферы. Для высокочастотных диапазонов (Ka , Q/V - диапазоны) существенное влияние на верность передачи оказывает тропосфера (туман, облака, дождь, др.) со свойствами частотной дисперсии и поглощения.

На практике выбор частотного ресурса определяется не только свойствами радиолиний, но и административно-правовыми актами, которые назначают диапазоны и частотные полосы СИС. Устойчивой тенденцией является увеличение скоростей передачи информации по спутниковым радиолиниям. При этих условиях повышение информационных скоростей достигается, используя класс цифровых информационно-емких сигналов. Данный класс цифровых сигналов подвержен искажениям за счет влияния физических сред распространения. Суть искажений - случайные изменения комплексных огибающих сигналов при распространении (свойство частотной дисперсии), обусловливающие возникновение интерференционных межсимвольных (МСИ) и межканальных помех (МКИ), а также замирания сигналов за счет их многолучевого распространения (свойство временной дисперсии). Данные искажения приводят к существенной деградации верности передачи информации.

Это обуславливает **актуальность** проблем разработки и анализа методов обработки информационно-емких цифровых сигналов при их обнаружении и приеме при распространении по рассматриваемым спутниковым радиолиниям с целью снижения искажающего влияния радиолиний и обеспечения высоких информационных скоростей и верности передачи информации.

Возможность эффективной передачи информации по данным радиолиниям связана с решением комплекса проблем, составляющих **предмет исследований диссертационной работы.**

Теория передачи дискретных сообщений и теория сигналов в работах многих исследователей (Колмогоров А.Н., Зяблов В.В., Зигангиров К.Ш., Элайес П., Хэмминг Р.В., Витерби А., Месси Дж., Галлагер Р., Форни Д., Харкевич А.А., Тихонов В.И., Баскаков А.И., Финк Л.М., Зюко А.Г., Смольянинов В.М., Назаров Л.Е., Цыкин И.А., Золотарев В.В., Овчинин Г.В., Егоров С.И., Возенкрафт Дж., Берлекэмп Е., Витерби Э.Д., Фано Р. и др.). Теории спутниковых радиолиний, теории распространения радиоволн с учетом околоземной ионосферы и тропосфера создавались и развивались в работах исследователей (Лукин Д.С., Крюковский А.С., Палкин Е.А., Арманд Н.А., Егоров В.В., Смирнов В.М., Кутуз Б.Г., Пожидаев В.Н., Пулинец С.А., Захаров В.Е., Иванов Д.В., Иванов В.А., Стрелков Г.М., Черниговская М.А., Пашинцев В.П., Дэвис К., Намгаладзе А.А., др.).

Цель работы - развитие теории и методов передачи информационно-емких сигналов по спутниковым радиолиниям с частотной и временной дисперсией для обеспечения информационных скоростей для ограниченных частотных полос выделяемого частотного диапазона. Основные решаемые задачи:

- развитие, создание и анализ моделей спутниковых радиолиний, содержащих физические среды распространения радиосигналов различных частотных диапазонов (околоземная ионосфера, тропосфера (туман)) со свойствами частотной и временной дисперсии;
- развитие и создание моделей искажений комплексных огибающих цифровых сигналов при распространении по анализируемым спутниковым радиолиниям;
- развитие, создание и анализ методов снижения искажений цифровых информационно-емких сигналов за счет влияния физических сред в составе спутниковых радиолиний с частотной и временной дисперсией (околоземная изотропная и анизотропная околоземная ионосфера, тропосфера (туман));
- развитие и апробация разработанных методов оптимального посимвольного приема цифровых информационно-емких сигналов в недвоичных полях Галуа, согласованных с объемом сигнальных «созвездий»;
- выполнение и анализ экспериментальных исследований с целью оценивания статистических характеристик ионосферных спутниковых радиолиний P - L -частотных диапазонов.

Методы исследований. Развиваемая теория передачи цифровых сигналов по спутниковым радиолиниям с частотной и временной дисперсией представляет исследования на стыке пяти дисциплин - теории распространения радиоволн, помехоустойчивой передачи информации, теории сигналов, теории околоземной ионосферы и тропосферы, теории отождествления каналов.

Научная новизна. Развита теория оптимального посимвольного приема класса цифровых информационно-емких сигналов в недвоичных полях Галуа, размерность которых согласована с объемом сигнальных «созвездий».

Разработаны новые модели спутниковых радиолиний, включающие физические среды распространения радиосигналов - околоземную ионосферу и тропосферу (туман) со свойствами частотной и временной дисперсии.

Разработаны новые модели искажений комплексных огибающих класса информационно-емких цифровых сигналов с различными видами манипуляций при распространении по спутниковым радиолиниям.

Разработаны модели спутниковых радиолиний с многолучевостью распространения радиосигналов из-за отражения и рассеяния на ионосферных неоднородностях, порождающей фазовые и амплитудные замирания сигналов.

Разработан ряд методов снижения искажений цифровых информационно-емких сигналов за счет влияния физических сред в составе спутниковых радиолиний с частотной и временной дисперсией.

Выполнено экспериментальное исследование с целью вычисления статистических характеристик ионосферных спутниковых радиолиний P -, L -частотных диапазонов с использованием сигналов спутниковой аварийно-спасательной системы Коспас/Сарсат.

Практическая значимость результатов работы определяется направленностью на решение комплекса проблем для разработки методов помехоустойчивой передачи информации по спутниковым радиолиниям, характеризуемым искажающим влиянием физических сред на сигналы.

Защищаемые положения.

1. Новый алгоритм оптимального посимвольного приема цифровых информационно-емких сигналов с различными видами манипуляций, обеспечивающий достижение значимого энергетического выигрыша до 5...30 дБ при приеме сигнальных конструкций на основе корректирующего кодирования с минимальной избыточностью по сравнению к известным корректирующим кодам для спутниковых радиолиний с временной дисперсией относительно приема сигналов без кодирования.

2. Класс разработанных моделей спутниковых радиолиний, используемый для описания искажений цифровых сигналов и оценивания характеристик при их обнаружении и приеме, включающий изотропные и анизотропные неоднородные спутниковые ионосферные радиолинии с частотной дисперсией; радиолинии с временной дисперсией из-за отражения и рассеяния на ионосферных неоднородностях, порождающей фазовые и амплитудные замирания сигналов; радиолинии с туманом с частотной дисперсией. С использованием моделей впервые получены статистические оценки временной стационарности (50...1200 мс) для ионосферных радиолиний с временной дисперсией.

3. Новые методы описания искажений цифровых сигналов за счет влияния физических сред распространения (околоземная ионосфера, туман), эквивалентного линейной фильтрации с комплексными коэффициентами передачи, задаваемыми разработанными моделями спутниковых радиолиний. С использованием этих методов впервые показано наличие значительных энергетических потерь (более 10 дБ) при приеме по отношению к распространению в свободном пространстве и, как следствие, возможное

нарушение штатной работы спутниковых информационных систем при увеличении информационной емкости цифровых сигналов (до 8 бит/с/Гц) и увеличении частотной полосы.

4. Разработанные методы снижения искажений цифровых информационно-емких сигналов на основе использования линейных фильтров, инверсных к линейным фильтрам спутниковых радиолиний с частотной дисперсией (ионосферные радиолинии, радиолинии с туманом), позволяют обеспечить верность передачи информации с вероятностными характеристиками, близкими к передаче в свободном пространстве.

5. Результаты экспериментальных исследований относительно совместного влияния околосземной ионосферы на распространение сигналов в P - (радиолиния вверх), L - (радиолиния вниз) частотных диапазонах, полученные с использованием созданного приемо-передающего комплекса на основе спутниковой системы Коспас/Сарсат - впервые произведена оценка диапазона значений индекса сцинтиляций $S_4 = 0.27..0.49$ и диапазона замираний сигналов $\pm 5..\pm 11$ дБ для средних широт РФ.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 25 статей в рецензируемых журналах, из них 10 статей из списка Web of Science и Scopus, 9 статей из списка научных журналов, рекомендованном ВАК РФ по специальности 1.3.4 «Радиофизика».

Апробация результатов. Материалы диссертации докладывались на 33 научных Всероссийских и международных конференциях.

Результаты диссертации использованы при выполнении ряда СЧ ОКР (три акта об использовании результатов диссертации).

По теме диссертации получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Исследования по теме диссертационной работы поддержаны грантами РФФИ (№16-07-00746, №20-07-00525).

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.

Личный вклад автора заключается в выборе направлений исследований по тематике диссертационной работы, в постановке основных составляющих проблем, в проведении компьютерного моделирования разработанных методов и алгоритмов и теоретического анализа результатов и интерпретации полученных результатов моделирования и экспериментальных исследований.

Все вошедшие в диссертацию результаты исследований получены лично автором либо при его непосредственном участии и соавторстве.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы и четырех приложений. Она содержит 155 страниц, включая 51 рисунок, 13 таблиц и 151 ссылок на источники.

В 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 теории помехоустойчивой передачи дискретных сообщений с использованием цифровых сигналов, общая функциональная схема систем передачи дискретных сообщений дана на рисунке 1.

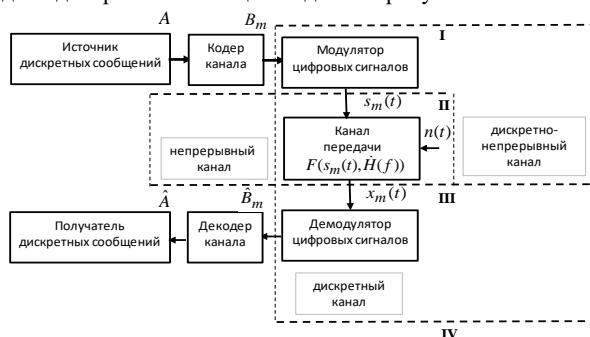


Рис.1. Функциональная схема систем передачи дискретных сообщений.

Непрерывный канал передачи сигналов $s_m(t)$ включает среду распространения, действие которой задается функциональным отображением $x_m(t) = F(s_m(t), \dot{H}(f)) + n(t)$, определяющее искажения сигналов из-за фильтрующих свойств среды с коэффициентом передачи $\dot{H}(f)$ и искажения тепловым шумом $n(t)$. Демодулятор сигналов и канальный декодер производят обработку реализации $x_m(t)$ с целью наилучшего соответствия переданного дискретного сообщения A принятому дискретному сообщению \hat{A} относительно используемого статистического критерия качества.

Сигналы $s_m(t)$ длительностью nT задаются соотношением

$$s_m(t) = \sum_{i=1}^n A_{mi} U(t) \cos(2\pi f t + \varphi_{mi}) , \quad f \text{ - центральная частота; } U(t) = 1 \text{ при } iT \leq t < (i+1)T, \text{ иначе } U(t) = 0 ; \quad A_{mi}, \varphi_{mi} \text{ - амплитуда и фаза цифровых сигналов}$$

$s_{mi}(t)$ объемом $M = 2^l$ в составе $s_m(t)$, значения которых задают вид сигнального «созвездия»; T - длительность $s_{mi}(t)$.

Характеристикой цифровых сигналов является частотная эффективность $l = \log_2 M$ (бит/с/Гц), которая определяет максимальную информационную скорость $R = l\Delta F$ (бит/с) для радиолинии с частотной полосой ΔF (Гц). Известен широкий класс цифровых сигналов с различными типами манипуляций и «созвездий» (фазовая (ФМ-М), квадратурно-амплитудная (КАМ-М), амплитудно-фазовая (АФМ-М) манипуляции), интенсивно используемых в спутниковых информационных системах. Пример «созвездия» АФМ-16 приведен на рисунке 2, даны законы отображения l двоичных символов в комплексные огибающие символов «созвездия».

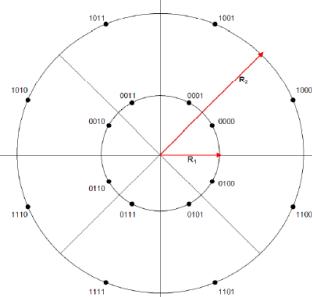


Рис. 2. Вид сигнального «созвездия» АФМ-16.

При приеме сигналов используются статистические критерии, в частности, критерий максимума апостериорных символьных вероятностей, который заключается в вычислении вероятностей символов $\Pr(b_j = \beta | \bar{Y})$, $\beta \in GF(2^l)$ и в принятии решения относительно переданного символа $\hat{b}_j = \max_{\beta \in GF(2^l)} \Pr(b_j = \beta | \bar{Y})$.

В диссертационной работе приведены результаты по развитию теории посимвольного приема цифровых сигналов с различными видами манипуляций. Основу разработанного алгоритма составляет алгоритм быстрого преобразования в базисе Уолша-Адамара с размерностью, совпадающей с объемом «созвездия».

Сложность алгоритма посимвольного приема определяется лишь размерностью дуального кода, что обуславливает перспективность применения для блоковых корректирующих кодов с низкой избыточностью. Приведены вычисленные характеристики для сигнальных конструкций на основе цифровых сигналов и корректирующего кодирования в недвоичных полях с минимальной избыточностью с использованием разработанного алгоритма оптимального посимвольного приема для канала с аддитивным белым гауссовским шумом

(АБГШ) и показано достижение значимого энергетического выигрыша до 1.5...4.0 дБ по отношению к приему сигналов без кодирования.

В главе 2 рассмотрены модели спутниковых радиолиний с частотной и временной дисперсией, влияние которых приводят к искажениям комплексных огибающих цифровых сигналов за счет дисперсионных свойств радиолиний, обусловливающих возникновение помех МСИ и МКИ; к многолучевому распространению сигналов (включая образование обыкновенной и необыкновенной радиоволн за счет гиротропных свойств ионосферы), порождающему фазовые и амплитудные нестационарные замирания сигналов. При исследовании используются две модели спутниковых радиолиний: модели неоднородной непрерывной среды с частотной дисперсией, характеризуемой диэлектрической проницаемостью $\dot{\varepsilon}(z, f)$ (земная ионосфера (глобальная модель земной ионосферы Клубушара, однослойная модель Чепмена), атмосфера (туман)); модели с ионосферными неоднородностями.

В частности, рассмотрена модель анизотропных ионосферных спутниковых радиолиний с частотной дисперсией за счет влияния магнитного поля Земли $\vec{H}(\vec{r})$. Для распространения электромагнитных волн вдоль оси ОХ и расположения поля $\vec{H}(\vec{r})$ в плоскости XOZ с углом φ к оси ОХ проницаемость

$$\varepsilon_{1,2}(z, f) = 1 - \frac{2f_p^2(z)}{2f^2 - h(z, f) \pm \sqrt{h^2(z, f) + 4f^2 f_{\text{пп}}^2}}, \quad h(z, f) = \frac{f_{\text{пп}}^2}{(1 - f_p^2/f^2)} ;$$

$$f_{\text{пп}} = \frac{\mu_0 e H_{\text{пп}}}{m} ; \quad f_{\text{пп}} = \frac{\mu_0 e H_{\text{пп}}}{m} ; \quad H_{\text{пп}} = H \sin \varphi ; \quad H_{\text{пп}} = H \cos \varphi ; \quad \varphi - \text{угол}$$

между вектором \vec{H} и осью ОХ (продольное и поперечное распространение при $\varphi = 0$ и при $\varphi = 90^\circ$) ; μ_0 - магнитная проницаемость свободного пространства.

Существование двух решений для $\varepsilon(z, f)$ соответствует двойному лучепреломлению: для спутниковых ионосферных радиолиний выражение упрощается, что приводит к модели лишь продольного распространения электромагнитных волн. В этом случае существуют два решения $\varepsilon_1(z, f) = 1 - f_p^2/(f^2 - ff_{\text{пп}})$ и $\varepsilon_2(z, f) = 1 - f_p^2/(f^2 + ff_{\text{пп}})$.

Одно из критических искажений цифровых сигналов обусловлено многолучевостью распространения из-за отражения и рассеяния на ионосферных неоднородностях, которая порождает временные вариации (замирания) фаз и амплитуд сигналов. Фазовые и амплитудные замирания представляют случайные процессы, их характеристики связаны с характеристиками временных и пространственных флуктуаций электронной плотности ионосферных неоднородностей. Экспериментальные и теоретические исследования показывают значимость данных искажений для P - и L - частотных диапазонов.

При создании и развитии статистических моделей фазовых и амплитудных замираний при распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям использованы два подхода:

- на основе эмпирических плотностей распределения фазы $p(\phi)$ и амплитуды $p(A)$, связанных с индексом сцинтиляции S_4 ;

- на основе аналитического описания распространения сигналов, основанные на теории распространения радиоволн в случайно-неоднородных средах с коэффициентом преломления ионосферы $n(\vec{r}, t) = 1 + \delta n(\vec{r}, t)$, $\delta n(\vec{r}, t)$ - флуктуации коэффициента преломления. Решение задачи распространения сигналов через такие среды предполагает установление связи характеристик $\delta n(\vec{r}, t)$ и параметров (время стационарности радиолинии τ_{st}). Выражения для флуктуации фазы и амплитуды монохроматических сигналов со слабыми возмущениями $\delta n(\vec{r}, t)$ получены при использовании приближения Рытова.

На рис.3 даны вычисленные кривые, определяющие вероятности времени фазовой стационарности радиолиний P - частотного диапазона для $S_4 = 0.3$ и $S_4 = 0.6$, скорость движения ионосферных неоднородностей $v = 500$ м/с. Кривые 1, 3 вычислены для $\Delta = 10^0$, кривые 2, 4 для $\Delta = 20^0$. Вероятность минимального времени стационарности $Pr(\tau_{st,min}) = 0.95$ для $S_4 = 0.3$ достигается при $\tau_{st,min} = 170$ мс для $\Delta = 10^0$ и при $\tau_{st,min} = 250$ мс для $\Delta = 20^0$. При увеличении S_4 минимальное время стационарности уменьшается - вероятность $Pr(\tau_{st,min}) = 0.95$ для $S_4 = 0.6$ достигается при $\tau_{st,min} = 50$ мс для $\Delta = 10^0$ и при $\tau_{st,min} = 110$ мс для $\Delta = 20^0$.

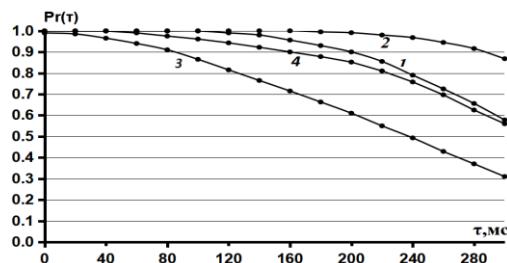


Рис.3. Вероятности времени стационарности радиолиний P - частотного диапазона, скорость движения ионосферных неоднородностей $v = 500$ м/с: кривая 1 - $S_4 = 0.3$, $\Delta = 10^0$; кривая 2 - $S_4 = 0.3$, $\Delta = 20^0$; кривая 3 - $S_4 = 0.6$, $\Delta = 10^0$; кривая 4 - $S_4 = 0.6$, $\Delta = 20^0$.

В работе рассмотрена модель радиолиний с туманом, основным параметром которой является водность q ($\text{г}/\text{м}^3$). Данные искажения значимы для высокочастотных диапазонов *Ku*-, *Ka*-, Q/V- частотных диапазонов. Получено соотношение относительно диэлектрической проницаемости

$$\dot{\varepsilon}(f) = \left(1 + 3 \frac{\dot{\varepsilon} - 1}{\dot{\varepsilon} + 2} \frac{q}{\rho} \right),$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\gamma_0 - \gamma_1}{1 + (f/f_p)^2} + \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{1 + (f/f_s)^2} + \gamma_2 + j \left(\frac{f(\gamma_0 - \gamma_1)}{f_p + f^2/f_p} + \frac{f(\gamma_1 - \gamma_2)}{f_s + f^2/f_s} \right),$$

$$\gamma_0 = 77.66 + 103.3(\alpha - 1), \quad \gamma_1 = 0.0671\gamma_0, \quad \gamma_2 = 3.52, \quad \alpha = 300/T_0,$$

$$f_p = 20.20 - 146(\alpha - 1) + 316(\alpha - 1)^2, \quad f_s = 39.8f_p.$$

Здесь f - частота (ГГц); T_0 - температура воды (K).

Полученные выражения относительно диэлектрической проницаемостью $\dot{\varepsilon}(z, f)$, задающие модели ионосферных радиолиний и радиолиний с туманом, применяются для оценки искажений и деградации вероятностных характеристик рассматриваемых цифровых сигналов при их обнаружении и приеме.

В главе 3 даны 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; радиолинии с туманом со свойствами частотной дисперсии и поглощения.

Основу методов анализа искажающего влияния среды распространения составляет решение волнового уравнения при распространении плоской волны $E(z, f)$ с частотой f , падающей на слой среды с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z, f)$. Ограниченный ряд аналитических решений получен при использовании упрощений относительно $\varepsilon(z, f)$, полагая, в частности, среду распространения изотропной (модель «холодной» плазмы), а также плоско-слоистой или сферически-слоистой. Альтернативным направлением является определение приближенных решений геометрической оптики волнового уравнения. Условием применимости этого подхода является медленность изменения диэлектрических свойств среды на длине волны λ , т. е. $\frac{d\varepsilon(z, f)}{dz}\lambda \ll 1$.

В работе приведены методы описания искажений цифровых сигналов при распространении по спутниковым радиолиниям во временной области с использованием импульсной характеристики $h(z, \tau)$ и в частотной области с использованием коэффициента передачи $\dot{H}(z, f)$.

Искажения сигналов в частотной области задаются как

$$E(z,t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{g}(f) \dot{H}(z,f) \exp(j2\pi f) df, \quad \dot{g}(f) - \text{спектр сигналов } E(0,t) \quad (\text{для}$$

сигналов длительностью } T \text{ с огибающей в виде меандра}

$$g(f) = \frac{\sin(2\pi(f-f_0)T/2)}{(f-f_0)/2} \text{ при условии } f_0 \gg 1/T; \quad \dot{H}(z,f) - \text{коэффициент}$$

передачи радиолинии } \dot{H}(f,z) = \exp(j2\pi f \tau(z,f)) = \exp\left(j2\pi f \int_{AB} \frac{dx}{c_\phi(f,x)}\right), \quad \tau(z,f) -

время распространения сигнала с частотой } f \text{ вдоль лучевой линии};

$c_\phi(f,x) = c/\sqrt{\epsilon(f,x)}$ - фазовая скорость.

Отличие времени распространения сигнала вдоль линии распространения и линии прямой видимости определяется как

$$\Delta\tau(z,f) = \int_0^z \frac{n(x,f)(R_3 + x)dx}{c_\phi(n^2(x,f)(R_3 + x)^2 - (n_0 R_3 \sin(\theta_A - \xi_A))^2)^{1/2}} - \frac{L_{AB}}{c}, \quad R_3 - \text{радиус}$$

Земли; θ_A - зенитный угол направления линии прямой видимости; n_0 - коэффициент преломления на высоте $z=0$; ξ_A - угол рефракции; L_{AB} - расстояние линии прямой видимости АВ.

На рис.4 приведен вид исходного радиоимпульса (кривая 1) ($f_0 = 400$ МГц, $z = 400$ км, $T = 200$ нс, $\Delta F = 10$ МГц). Кривая 2 - радиоимпульс при распространении с параметрами модели ионосферы дневного времени, $\theta_A = 60^\circ$.

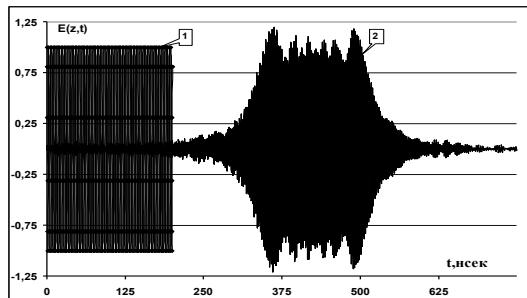


Рис.4. Вид радиоимпульсов $E(z,0)$ (кривая 1) и $E(z,t)$ (кривая 2).

На рис.5 приведены вероятностные кривые когерентного обнаружения сигналов $s(t)$ при распространении в зависимости от отношения сигнал/помеха E/N_0 для АБГШ и сигналов с искажениями $\hat{s}(t)$. Кривые получены моделированием процедуры обнаружения Неймана-Пирсона: $P_{\text{л.тр.}} = 10^{-3}$, варьируемые длительности T 25нс, 50нс, 100нс, 200нс, $f_0 = 400$ МГц, $z = 400$ км. Кривая 1 соответствует $P_{\text{обн}}$ для неискаженных сигналов, кривые 2-5 вычислены для модели дневной ионосферы, кривая 6 для модели ночной ионосферы. Формирование искаженных сигналов осуществлялось с использованием приведенного метода в частотной области с учетом углов рефракции для зенитных углов $\theta_A = 0^0$, $\theta_A = 60^0$ и $\theta_A = 80^0$. Показано достижение энергетических потерь до 4.85 дБ при увеличении частотной полосы сигналов до 80 МГц для модели дневной ионосферы и зенитного угла $\theta_A = 80^0$.

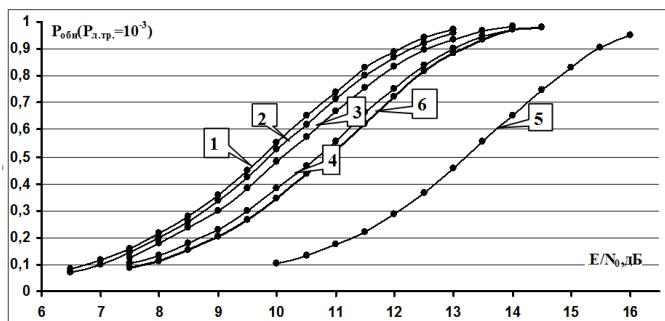


Рис.5. Вероятности когерентного обнаружения сигналов при распространении по ионосферной радиолинии ($\theta_A = 60^0$): кривая 1 - сигнал без искажений; кривая 2 - $T = 200$ нс, модель дневной ионосферы; кривая 3 - $T = 100$ нс, модель дневной ионосферы; кривая 4 - $T = 50$ нс, модель дневной ионосферы; кривая 5 - $T = 25$ нс, модель дневной ионосферы; кривая 6 - $T = 25$ нс, модель ночной ионосферы.

В таблице 1 приведены оценки асимптотических значений вероятностей ошибочного приема P_c для класса ФМ-сигналов с искажениями. Видно, что асимптотические значения P_c увеличиваются с уменьшением длительности T и с увеличением угла θ_A . Это поведение вероятностей P_c представляет ограничивающий фактор использования рассматриваемого класса цифровых сигналов с расширением их частотного спектра в спутниковых информационных системах для анализируемого P -частотного диапазона.

Таблица 1. Теоретические оценки асимптотических вероятностей ошибки P_c

| Сигналы | θ_A | $T, \text{ нс}$ | |
|---------|------------|---------------------|---------------------|
| | | 50 | 100 |
| ФМ-4 | 0 | $3.9 \cdot 10^{-7}$ | $< 10^{-9}$ |
| | 80^0 | $3.2 \cdot 10^{-5}$ | $< 10^{-9}$ |
| ФМ-8 | 0 | $6.6 \cdot 10^{-5}$ | $1.1 \cdot 10^{-9}$ |
| | 80^0 | $1.6 \cdot 10^{-3}$ | $2.9 \cdot 10^{-9}$ |
| ФМ-16 | 0 | $5.7 \cdot 10^{-2}$ | $2.5 \cdot 10^{-7}$ |
| | 80^0 | $6.5 \cdot 10^{-2}$ | $1.6 \cdot 10^{-3}$ |

Оценивание ошибок P_c для ряда цифровых сигналов получены моделированием алгоритма посимвольного приема. На рис. 6 в качестве примера приведены вероятности P_c для сигналов КАМ-256 при распространении по ионосферным радиолиниям P - частотного диапазона ($f_0 = 400$ МГц). При увеличении порядка манипуляции M цифровых сигналов значения ΔE значительны: для ФМ-8 сигналов с длительностью $T = 50$ нс (частотная полоса $\Delta F = 40$ МГц) потери ΔE превышают 10 дБ; для ФМ-16, КАМ-64 и АФМ-256 асимптотические вероятности $P_c > 0.05$, что показывает неприемлемое качество работы информационных систем. Подобные значения ΔE получены для анизотропных ионосферных радиолиний, а также для радиолиний с туманом с различными параметрами.

Вычисленные значения энергетических потерь при использовании рассматриваемого класса сигналов необходимо учитывать при оценивании энергетических бюджетов рассматриваемых радиолиний.

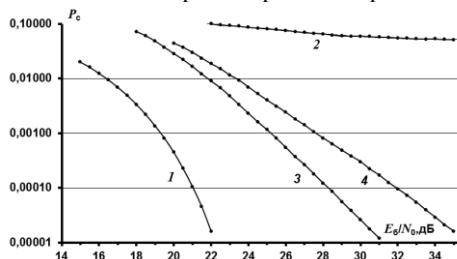


Рис.6. Вероятности ошибки P_c для сигналов КАМ-256 при распространении по ионосферной радиолинии: 1 - распространение в свободном пространстве; 2 - $T = 200$ нс, $\theta_A = 0$; 3 - $T = 400$ нс, $\theta_A = 0$; 4 - $T = 400$ нс, $\theta_A = 80^0$.

В главе 4 даны описания и анализ разработанных методов снижения искажающего влияния рассматриваемых спутниковых радиолиний при распространении информационно-емких сигналов.

Основу методов снижения искажающего влияния ионосферных радиолиний с временной дисперсией и повышения верности передачи информации составляют:

- применение корректирующих кодов в сочетании с перемежением символов сигнальных «созвездий» для борьбы с дружными замираниями, в частности, с временным перемежением;
- задание мощности передатчика, обеспечивающей требуемую верность передачи информации на основе корректного оценивания энергетических бюджетов анализируемых радиолиний с использованием моделей.

В таблице 2 даны значения энергетических выигрышей ΔE для рассматриваемых сигналов и ионосферных радиолиний при $P_c = 10^{-5}$ при применении разработанных сигнальных конструкций на основе корректирующего кодирования недвоичных полях Галуа.

Таблица 2. Значения энергетического выигрыша ΔE при распространении по радиолинии с временной дисперсией

| Цифровые сигналы | ΔE (дБ) | |
|---------------------|-----------------|-------------|
| | $S_4 = 0.3$ | $S_4 = 0.6$ |
| ФМ-4 | 5.0 | 15.0 |
| ФМ-8 | 6.0 | 17.0 |
| ФМ-16 | 6.5 | 19.0 |
| КАМ-16 | 7.0 | 20.5 |
| АФМ-16 | 6.0 | 29.0 |
| АФМ-16 | 7.0 | 21.5 |
| АФМ-32 | 7.5 | 21.5 |
| КАМ-64 | 4.5 | 21.0 |
| АФМ-64 | 9.0 | 21.5 |
| АФМ-64 | 8.5 | 23.5 |
| АФМ-256 | 10.5 | 37.5 |

Данные таблицы 3 (выигрыш по энергетике ΔE до 37.5 дБ) показывают перспективность применения разработанных схем корректирующего кодирования и алгоритма посимвольного приема для повышения верности передачи информации по ионосферным радиолиниям с временной дисперсией.

Методы снижения искажающего влияния рассматриваемых радиолиний с частотной дисперсией основаны на следующих подходах:

- на формировании линейного дискретного фильтра, инверсного к линейному фильтру радиолинии, характеристики которого определяются с использованием и без использования пилот-сигналов;
- на использовании глобальных моделей земной ионосфера;

- на применении корректирующих кодов, в частности, при применении разработанных сигнальных конструкций на основе корректирующего кодирования в недвоичных полях Галуа.

На рисунке 7 приведена блок-схема адаптивной обработки сигналов с искажениями при приеме без использования пилот-сигналов.

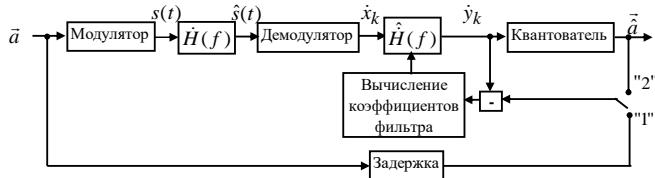


Рис.7. Блок-схема адаптивной обработки сигналов с искажениями при приеме.

На выходе демодулятора поступает последовательность отсчетов \dot{x}_k , (сумма сигнальных, шумовых и помеховых интерференционных составляющих).

Задача инверсного дискретного фильтра с коэффициентом передачи $\hat{H}(f)$ - компенсировать влияние интерференционных помех. При условии $\hat{H}(f) = \dot{H}^{-1}(f)$ выполняется полная компенсация рассматриваемого типа помех.

Инверсный фильтр эквивалентен трансверсальному фильтру с коэффициентами $\dot{w}(i)$, $i = 0, 1, \dots, N$. На выходе фильтра вычисляется реализация

$$\dot{y}_k = \sum_{i=0}^N \dot{x}_{k+i} \dot{w}(i). \text{ Здесь } N \text{ - размерность фильтра. Весовые коэффициенты}$$

вычисляются рекуррентно $\dot{w}^{(n+1)}[i] = \dot{w}^{(n)}[i] + \mu \cdot (\dot{a}[n+N/2] - \dot{y}[n]) \cdot \dot{x}[n+i]$, $i = 0, 1, \dots, N$, μ - параметр, определяющий сходимость итеративной процедуры.

При моделировании рассматриваемого метода снижения искажающего влияния радиолинии рассматриваются сигналы $s(t)$ на основе ФМ-16, для которых влияние искажений комплексных огибающих является значительным. Характеристики радиолинии - высота $z = 400$ км, центральная частота $f_0 = 400$ МГц, зенитный угол $\theta_A = 60^\circ$. На рис.8 приведены вычисленные вероятности P_c при приеме сигналов. Кривая 1 соответствует P_c при распространении в свободном пространстве. Кривая 2 соответствует распространению сигналов по ионосферной радиолинии, длительность радиоимпульсов, $T = 200$ нсек, частотная полоса $\Delta F = 10$ МГц. Видно монотонное уменьшение вероятности ошибочного приема P_c при увеличении параметра E_σ / N_0 , что показывает приемлемое качество радиолинии для информационной системы за счет превышения мощности АБГШ относительно мощности интерференционных помех. В этом

случае энергетические потери при $P_c = 10^{-3}$ за счет рассеяния и влияния интерференционных помех по отношению к распространению в свободном пространстве достигают 4.5 дБ. Кривая 3 соответствует распространению сигналов по ионосферной радиолинии, длительность радиоимпульсов $T = 100$ нс, частотная полоса $\Delta F = 20$ МГц. В этом случае при увеличении параметра E_σ / N_0 вероятность ошибочного приема практически не изменяется ($P_c > 0.01$). Это показывает разрушение нормальной работы информационной системы за счет превышения мощности интерференционных помех по отношению к мощности АБГШ. Кривая 4 соответствует вероятности P_c для данной ионосферной радиолинии с использованием аддитивного алгоритма обработки сигналов ФМ-16 с параметрами $N = 15$, $\mu = 0.000001$. Видно монотонное уменьшение вероятности ошибочного приема P_c при увеличении параметра E_σ / N_0 .

Эти результаты показывают перспективность приведенного алгоритма компенсации искажений широкополосных сигналов и коррекции ионосферной радиолинии.

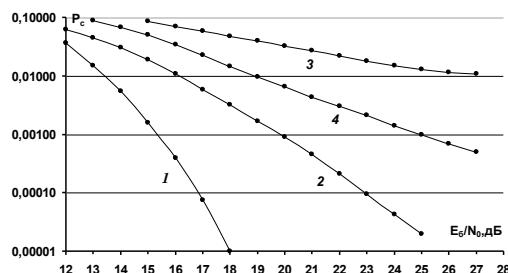


Рис.8. Вероятности ошибочного приема сигналов ФМ-16 при распространении по ионосферной линии, $\theta_A = 60^0$: 1 - распространение в свободном пространстве; 2 - без компенсации искажений сигналов ($T = 200$ нс, $\Delta F = 10$ МГц); 3 - без компенсации искажений ($T = 100$ нс, $\Delta F = 20$ МГц); 4 - с компенсацией искажений ($T = 100$ нс, $\Delta F = 20$ МГц).

В главе 5 даны результаты экспериментальных исследований амплитудных замираний сигналов при их распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям P - и L -частотных диапазонов. Исследования выполнены с использованием созданного комплекса передачи/приема сигналов спутниковой информационной системы аварийного оповещения Коспас/Сарсат (P -частотный диапазон радиолинии «вверх», L -диапазон радиолинии «вниз»). На рис.9 приведена блок-схема экспериментальной части исследований с использованием спутников-ретрансляторов сигналов P/L -частотных диапазонов в составе международной системы Коспас-Сарсат: P -частотный диапазон канала «вверх»

(406 МГц), L - частотный диапазон канала «вниз» (1540 МГц). Основу блок-схемы составляет плата программируемого радио SDR (Software Define Radio: передатчик/приемник). Особенностью данных радиолиний является совместное влияние ионосферных неоднородностей на распространение сигналов в P -, L -частотных диапазонах. В результате обработки сигналов определен примерный диапазон замираний амплитуды сигналов $\pm 5 \dots \pm 11$ дБ.

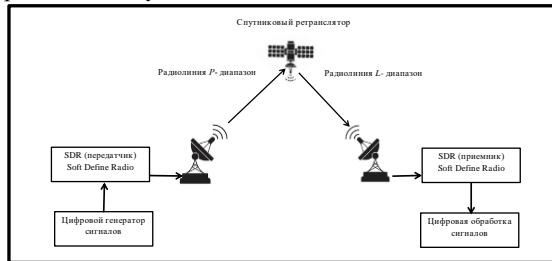


Рис.9. Блок-схема разработанной экспериментальной части исследований с использованием спутников-ретрансляторов сигналов P/L частотных диапазонов спутниковой системы Коспас-Сарсат.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

**Публикации в журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК
(по состоянию на 16.12.2025)**

- Назаров Л.Е., Батанов В.В., Кузнецов О.О. Алгоритмы итеративного посимвольного приема блоковых турбо-кодов на основе кодов с проверкой на четность. // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2014. №9. <http://jre.cplire.ru/jre/sep14/1/text.pdf>.
- Назаров Л.Е., Батанов В.В. Назарова З.Т. Характеристики ионосферных и тропосферных линий спутниковых систем связи.// Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/6/text.pdf>. 2015. №9.
- Назаров Л.Е., Батанов В.В., Зудилин А.С. Искажения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям спутниковых систем связи. // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал), URL:<http://jre.cplire.ru/jre/feb16/1/text.pdf>. 2016. №2.
- Батанов В. В., Назаров Л. Е. Алгоритм приема широкополосных сигналов при распространении по трансионосферным линиям. // Физические основы приборостроения. 2020. Т. 9. № 4(38). С. 24–29. DOI: 10.25210/jfop-2004-024029
- Батанов В.В., Назаров Л. Е. Алгоритмы компенсации искажений сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям. // Журнал радиоэлектроники. 2021. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.1>

6. Батанов В.В., Назаров Л. Е. Оценивание вероятностных характеристик приема КАМ-сигналов при распространении по трансионосферным радиолиниям. // Физические основы приборостроения. 2021. Т.10. №2(40) Стр. 42-48.
7. Батанов В.В., Назаров Л. Е., Кутуза Б.Г. Модель искажений частотно-эффективных сигналов при распространении по радиолинии с дождем. // Физические основы приборостроения, 2023. Стр.24-33. DOI: 10.25210/jfop-2301-MD
8. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Алгоритм оптимального посимвольного приема цифровых сигналов с пониженной сложностью реализации. // Физические основы приборостроения. 2024. Т.13. №3(53). Стр. 49-55. DOI: 10.25210/jfop-2403-EWLACU
9. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Лопатин В.В. Вероятностные характеристики обнаружения сигналов при распространении по трансионосферным радиолиниям. // Физические основы приборостроения. 2024. Т.13. №2(52). Стр. 22-2955. DOI: 10.25210/jfop-2402-BPUJOQ.

Публикации по теме диссертации, входящие в Международные реферативные базы данных и системы цитирования WOS и SCOPUS

1. Nazarov L.E., Batanov V.V. Analysis of the ionosphere influence on the probability of broadband signal with phase-shift keying reception in satellite communication systems. NOV 25-27, 2020. 7TH ALL-RUSSIAN MICROWAVE CONFERENCE (RMC). Proceedings Paper, p.233-234. www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000680675500058.
2. Nazarov L.E., Batanov V.V., Kutuza B.G. Effect of transitionospheric transmission lines on the probabilistic characteristics of reception of phase-shift keyed signals. // JOURNAL OF COMMUNICATIONS TECHNOLOGY AND ELECTRONICS, 2023. V.68. N1. P.56-63. DOI: [10.1134/s1064226923010102](https://doi.org/10.1134/s1064226923010102)
3. Nazarov L.E., Kutuza B.G., Batanov V.V. Estimation of probabilistic characteristics of reception of frequency-effective signals during propagation along a radio line with fog. // JOURNAL OF COMMUNICATIONS TECHNOLOGY AND ELECTRONICS, 2023. V.68. N6. P.702-705. DOI: [10.1134/s1064226923060104](https://doi.org/10.1134/s1064226923060104)
4. Nazarov L.E., Batanov V.V. Statistical models of trans-ionospheric radio lines with phase fading of signals. // JOURNAL OF COMMUNICATIONS TECHNOLOGY AND ELECTRONICS, 2022. V.67. N11. P.1388-1394. DOI: [10.1134/s10642269221101105](https://doi.org/10.1134/s10642269221101105).
5. Nazarov L.E., Batanov V.V. Probabilistic characteristics of detection of radio pulses during propagation along the ionospheric lines of satellite communications systems. // JOURNAL OF COMMUNICATIONS TECHNOLOGY AND ELECTRONICS, 2017. V.62. N11. P.960-968. DOI: [10.1134/S1064226917090169](https://doi.org/10.1134/S1064226917090169)
6. Nazarov L.E., Batanov V.V. Analysis of noise immunity of optimal symbol-by-symbol reception of phase-keyed signals with correcting codes in non-binary GALOIS FIELDS. // JOURNAL OF COMMUNICATIONS TECHNOLOGY AND ELECTRONICS, 2022. V.67. N8. P.973-978. DOI: [10.1134/s1064226922080137](https://doi.org/10.1134/s1064226922080137)

7. Nazarov L.E., Antonov D.V., Batanov V.V., Zudilin A.S., Smirnov V.M. The scintillation models for signal propagation through satellite ionospheric channels. // RENsit, 2019. V.11. N1. P.57-64. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.057
8. Nazarov L.E., Batanov V.V. The investigation of ionospheric channel influences for phased shift keying digital signals. // RENsit, 2019. V.11. N1. P.65-72. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.065
9. Batanov V.V., Nazarov L.E. An algorithm for compensating distortions of broadband signals during propagation through satellite ionospheric radio channels. // GEOMAGNETISM AND AERONOMY RENsit, 2022. V.62. N4. P.444-452. DOI: 10.1134/S0016793222040053
10. Nazarov L.E., Batanov V.V. Effect of a transitionospheric communication channel on the probabilistic properties of receiving signals with phase-shift keying manipulation. // BULLETIN OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES: PHYSICS, 2018. V.82. N11. P.1446-1450. DOI: 10.3103/S1062873818110187

Публикации по теме диссертационной работы в рецензируемых журналах

1. Назаров Л. Е., Батанов В. В. Исследование искажений цифровых сигналов при распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям. // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2019. Т.11. №1. Стр.65-72.
2. Назаров Л. Е., Кутуза Б.Г., Батанов В.В. Оценивание вероятностных характеристик приема частотно-эффективных сигналов при распространении по радиолинии с туманом. // Радиотехника и электроника. 2023. Т.68. №6. Стр. 608-614. DOI: 10.31857/S0033849423060104
3. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Зудилин А.С., Данилович Н.И. Модели каналов спутниковых подвижных систем связи. // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. №2. стр.34-45.
4. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Статистические модели замираний сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям. // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. №6. Стр. 34-43.
5. Назаров Л.Е., Шишкун П.В., Батанов В.В. Алгоритмы некогерентного приема сигнально-кодовых конструкций на основе последовательного турбо-кода с большой избыточностью.// Известия Вузов. Электроника. 2014. №6. Стр.60-66.
6. Назаров Л.Е., Шишкун П.В., Батанов В.В. Алгоритмы итеративного некогерентного приема сигналов на основе последовательных турбо-кодов и сигналов Уолша при передаче по нестационарным каналам. // Радиотехника и электроника. 2016. Т.61. №4. Стр. 366-372
7. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Модели многолучевости распространения сигналов в линиях спутниковых систем связи. // Наукоемкие технологии. 2016. Т.17. №2. Стр. 52-60.
8. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Анализ искажений радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т.21. №5. Стр. 37-45.

9. Назаров Л. Е., Батанов В.В. Исследование помехоустойчивости оптимального посимвольного приема фазоманипулированных сигналов с корректирующими кодами в недвоичных полях Галуа. // Радиотехника и электроника. 2022. Т.67 №8. Стр. 782-787. DOI: 10.31857/S0033849422080137
10. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Данилович Н.И. Анализ искажений сигналов с фазовой манипуляцией при распространении по ионосферным спутниковым линиям передачи. // Антенны. 2017. №12. Стр. 17-24.
11. Назаров Л. Е., Антонов Д. В., Батанов В.В., Зудилин А.С., Смирнов В.М. Модели сцинтиляции сигналов при распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям. // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2019. Т.11. №1. Стр.57-64.
12. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Статистические модели трансионосферных радиолиний с амплитудным замиранием сигналов. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2021. Т. 26. № 5. С. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202105-02>
13. Назаров Л. Е., Батанов В.В. Статистические модели трансионосферных радиолиний с фазовыми замираниями сигналов. // Радиотехника и электроника. 2022. Т.67 №11. Стр. 1133-1139. DOI: 10.31857/S0033849422110110
14. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Вероятностные характеристики обнаружения радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. // Радиотехника и электроника. 2017. Т.62. №9. Стр.866-874. <https://link.springer.com/article/10.11342/FS1064226917090169>
15. Назаров Л.Е., Шишкун П.В., Батанов В.В. Алгоритмы итеративного некогерентного приема сигналов на основе последовательных турбо-кодов и сигналов Уолша при передаче по нестационарным каналам. // Радиотехника и электроника. 2016. Т.61. №4. Стр. 366-372
16. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Алгоритм компенсации искажений широкополосных сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям. // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т.64. №4. Стр. 528-536.

Доклады на Всероссийских и международных научных конференциях

- 1.Назаров Л.Е., Батанов В.В. Модели распространения цифровых сигналов по трансионосферным радиолиниям. В сборнике: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Всероссийские открытые Армандовские чтения. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром, 2024. С. 145-149.
2. Назаров Л.Е. , Батанов В.В. Модели распространения цифровых сигналов по трансионосферным радиолиниям. // Всероссийские открытые Армандовские чтения «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». // Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 2024. ISSN 2304-0297. Стр.145-149. DOI: 10.24412/2304-0297-2024-1-145-149

3. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Зудилин А.С., Шишкин П.В. Эмпирические и статистические модели каналов спутниковых подвижных систем связи. Труды VIII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». 24-26 ноября 2014 г., г.Москва. Стр. 131-134.
4. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Алгоритм оптимального посимвольного приема сигналов со сложными «созвездиями» на основе помехоустойчивых кодов в недвоичных полях. Материалы 14-ой международной научно – технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». Владимир, 6-7 октября, 2021. Владимир. гос. университет. Владимир. Стр.230-232.
5. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Алгоритмы посимвольного и итеративного приема сигнальных конструкций на основе корректирующих кодов в недвоичных полях Галуа. Труды 19-ой Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 15-19 ноября 2021.
6. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Алгоритмы посимвольного и итеративного приема сигнальных конструкций на основе корректирующих кодов в недвоичных полях Галуа. // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 42. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a, <http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2021/8847.htm>
7. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Алгоритм оптимального посимвольного приема сигналов со сложными «созвездиями» на основе помехоустойчивых кодов в недвоичных полях. В сборнике: Перспективные технологии в средствах передачи информации. материалы 14-ой международной научно-технической конференции. Владимир, 2021. С. 230-232. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48071708>
8. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Оценивание искажений радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям спутниковых систем связи. XVI Всероссийская школа-семинар “Физика и применение микроволн” им. А.П. Сухорукова. Можайск, Московская обл. 4-9 июня 2017. Электронный ресурс <http://waves.phys.msu.ru/files/docs/2017/thesis/Section3.pdf>. Стр.16-17.
9. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Оценивание искажений радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. // Доклад на VII Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред» 31 мая - 2 июня 2016г. г. Муром. Стр.147-151.
10. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Статистические модели замираний сигналов при распространении по трансионосферным радиолиниям. Материалы Всероссийской открытой научной конференции [Электронный ресурс] «Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муромский институт Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых 25 – 27 мая 2021 г., Муром. Стр. 127-131.
11. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Смирнов В.М. Статистические модели амплитудных и фазовых замираний сигналов при распространении по трансионосферным радиолиниям. // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 415. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a.

12. Назаров Л. Е., Батанов В. В., Кутузова Б. Г. Влияние трансионосферных линий передачи на вероятностные характеристики при приеме сигналов с фазовой манипуляцией. // Радиотехника и электроника, 2023, том 68, № 1, с. 60–68. DOI: 10.31857/S0033849423010102
13. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Исследование влияния трансионосферных линий передачи на вероятностные характеристики приема сигналов с фазовой манипуляцией. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т.82. №11. Стр. 1584-1589.
14. Батанов В.В., Кутузова Б.Г., Назаров Л.Е. Исследования вероятностных характеристик приема цифровых сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям. // Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром, 2022. 586 с Стр.101-106. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-101-104
15. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Влияние трансионосферных линий на вероятностные характеристики приема сигналов. // Доклад на Восьмнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». 2020, Москва, 16-20 ноября.
16. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Оценка влияния ионосферы спутниковых линий связи при обнаружении сигналов в системах синхронизации. // Сборник тезисов IV Всероссийской микроволновой конференции. Москва, 23-25 ноября 2016 г. Издание JRE - ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва. Стр. 319-322.
17. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Оценка вероятностных характеристик обнаружения синхронизирующих сигналов при распространении по спутниковым ионосферным линиям связи. // Тезисы докладов Четырнадцатая Всероссийская Открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва, 14-18 ноября 2016 г.
18. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Анализ влияния ионосферы на вероятностные характеристики приема сигналов с фазовой манипуляцией в спутниковых системах связи. // Сборник трудов XI Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». Москва. 27-29 ноября 2017 г. Стр. 83-85.
19. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Назарова З.Т. Анализ влияния ионосферы на вероятностные характеристики приема сигналов в спутниковых системах передачи информации. Материалы Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн». Муром, 27-29 июня 2017 г. Стр.42.
20. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Вероятностные характеристики приема сигналов с фазовой манипуляцией при передаче по трансионосферным линиям связи. // Международная конференция «Актуальные проблемы математической физики». Москва, 2019, 27-30 ноября 2019.
21. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Исследование вероятностных характеристик приема информационно-емких цифровых сигналов при распространении по

- анизотропным трансионосферным радиолиниям. // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г. ISBN 978-5-00015-067-2. Стр.447.
22. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Назарова З.Т. Исследование помехоустойчивости посимвольного приема информационно-емких цифровых сигналов при распространении по трансионосферным каналам с замираниями. // Всероссийские открытые Армандовские чтения «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром, 2024. –524 с. ISSN 2304-0297. Стр.344-347. DOI: 10.24412/2304-0297-2024-1-344-347
23. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Исследование помехоустойчивости оптимального посимвольного приема сигналов с корректирующим кодированием в полях Галуа для каналов с замиранием. // 26-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2024». РНТОРЭС имени А.С. Попова, 2024, 27-29 марта, Москва, Россия, доклады, proceedings. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение. Стр. 9-12.
24. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Назарова З.Т. Исследование помехоустойчивости посимвольного приема информационно-емких цифровых сигналов при распространении по трансионосферным каналам с замираниями. В сборнике: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром, 2024. С. 344-347.
25. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Помехоустойчивость посимвольного приема цифровых сигналов с корректирующим кодированием в полях Галуа для трансионосферных радиолиний с замиранием. // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г. Стр.48.
26. Назаров Л.Е., Батанов В.В., Назарова З.Т. Модели искажений цифровых сигналов сцинтиляции сигналов при распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям. Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации и дифракции радиоволн». Муром, 2019. Стр. 212-218
27. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Алгоритмы приема последовательных турбо-кодов на основе ОФМ в системах связи с переключением частоты. Труды VIII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». 24-26 ноября 2014 г., г.Москва. Стр. 297-299.
28. Батанов В.В., Назаров Л.Е. Анализ влияния ионосферы на вероятностные характеристики приема сигналов с фазовой манипуляцией в спутниковых системах связи. Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2017. Москва. 13-17 ноября. Электронный ресурс http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6214.

29. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Оценивание вероятностных характеристик приема КАМ-сигналов при распространении по трансионосферным радиолиниям. // В сборнике: Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром, 2021. С. 132-137. [http://elibrary.ru/item.asp?id=48769954](https://elibrary.ru/item.asp?id=48769954)
30. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Алгоритмы компенсации искажений широкополосных сигналов при распространении по спутниковым ионосферным радиолиниям. Труды ХХVII Всероссийской открытой научной конференции. 28 июня - 3 июля 2021 года. Калининград. Научное электронное издание. Издательство Балтийского федерального университета им. И. Канта. Стр.626-628. [http://elibrary.ru/item.asp?id=47423526](https://elibrary.ru/item.asp?id=47423526)
31. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Компенсация искажений сигналов при распространении по трансионосферным радиолиниям с использованием глобальных моделей земной ионосферы. Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 14–18 ноября 2022 г. Электронный сборник материалов конференции ISBN 978-5-00015-056-6; DOI 10.21046/20DZZconf-2022a DOI 10.21046/20DZZconf-2022a
32. Назаров Л.Е., Денисова А.С., Киреев А.А., Махров П.С., Пискарев Я.А., Батанов В.В. Исследование радиоканалов передачи информации спутниковой системы КОСПАС-САРСАТ. Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 14–18 ноября 2022 г. Электронный сборник материалов конференции ISBN 978-5-00015-056-6; DOI 10.21046/20DZZconf-2022a DOI 10.21046/20DZZconf-2022a
33. Назаров Л.Е., Киреев А.А., Махров С.П., Пискарев Я.А., Батанов В.В. Исследование каналов передачи информации спутниковой информационной системы КОСПАС-САРСАТ. // Сборник трудов XV Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». 21-23 ноября. 2022. Москва. Стр. 66-69.

Программа для ЭВМ

1. Батанов В.В., Назаров Л.Е., Назарова З.Т. Программа формирования и оценивания искажений радиоимпульсов при их распространении в ионосферных линиях спутниковых цифровых систем связи. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 19 августа 2016г. №2016619472.