

ВАРЛАМОВ Владимир Олегович

**Повышение помехоустойчивости широкополосных цифровых
радиолиний передачи речевой информации в диапазоне
декаметровых волн**

Специальность

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре «Радиотехнические системы» в Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

Научный руководитель: **Лобов Евгений Михайлович** – доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Корчагин Юрий Эдуардович** – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет»;

Скрипачев Владимир Олегович – кандидат технических наук, заместитель начальника научно-организационного отдела Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Экспертно-аналитический центр».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет».

Защита диссертации состоится 10 июня 2026 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8-а, ауд. А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ: <https://dis.mtuci.ru/upload/srd/Dis-VarlamovVO/dis-VarlamovVO.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 55.2.002.01
доктор технических наук, профессор

М.В. Терешонок

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Радиосвязь в диапазоне декаметровых волн является одним из способов построения систем оперативной связи, наряду с системами резервной связи и мощного радиовещания. Для систем оперативной связи важными являются возможность повторного использования частотного ресурса (по причине загруженности декаметрового диапазона в целом, а также работы заметного числа пользователей в относительной близости друг от друга в частности) и обеспечение конфиденциальности передачи информации (что может обеспечиваться, помимо методов криптографической защиты, посредством работы сложными сигналами в широкой полосе частот).

Обеспечить выполнение данных требований для реализации широкополосной радиолинии передачи речевой информации с повышенной помехоустойчивостью позволяет использование алфавита ортогональных широкополосных фазоманипулированных сигналов совместно с современными алгоритмами недвоичного помехоустойчивого кодирования и алгоритмами сжатия речи.

Основными сложностями при построении радиолиний в диапазоне декаметровых волн являются прогнозирование состояния ионосферного канала, а также оценка и компенсация искажений, вносимых им в полезный сигнал в условиях многолучевого распространения радиоволн. Использование широкополосных сигналов позволяет обнаруживать, разделять и складывать многолучевые компоненты сигнала, реализуя принципы оптимального когерентного разнесенного приема для повышения помехоустойчивости радиолинии. Однако, когерентный разнесенный прием требует оценивания и отслеживания изменений (фильтрации) значений комплексных коэффициентов канала для каждой многолучевой компоненты в процессе приема радиограммы в условиях априорной неопределённости, возникающей при использовании алфавита ортогональных широкополосных фазоманипулированных сигналов.

Таким образом, актуальной является задача повышения помехоустойчивости широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн за счет учета особенностей распространения сигнала при квазизенитном распространении и распространении вдоль поверхности Земли, а также разработки алгоритмов приема, позволяющих оценивать и компенсировать искажения полезного сигнала при заданной структуре радиограммы и недвоичной передаче, с использованием алфавита ортогональных широкополосных фазоманипулированных сигналов.

Степень разработанности темы.

Вопрос разработки радиолиний, работающих в диапазоне декаметровых волн и использующих при передаче данных эффект отражения радиоволн от ионосферы Земли, рассматривался в работах Финка Л.М., Кловского Д.Д., Карташевского В.Г., Хазана В.Л., Романова Ю.В., Аджемова С.С., Иванова Д.В., Рябовой Н.В., Воглера Л.Е., Ваттерсона С., Сахтерова В.И., Лобова Е.М. и других.

В большинстве работ, посвященных разработке широкополосных цифровых радиолиний, в том числе с возможностью передачи речевой информации, в диапазоне декаметровых волн, рассматривается применение технологий прямого расширения спектра (direct sequence spread spectrum – DSSS), дискретно-частотных сигналов (ДЧС), либо многоканальной параллельной передачи, с использованием технологии ортогонального частотного разделения каналов (orthogonal frequency division multiplexing – OFDM) или технологии разделения каналов с помощью банка цифровых фильтров (filter bank multicarrier – FBMC). Так, вопрос разработки систем связи с DSSS и ДЧС, использующих недвоичные сигнально-кодовые конструкции, рассматривался в работах Даренского В.Д., Головкина И.В., Кандаурова Н.А., Лобова Е.М.. При этом, в данных работах подробно не рассматривалась проблема разработки алгоритмов когерентного приема сигналов и определения параметров формируемой радиограммы. Сигналы на основе OFDM и FBMC обладают высоким пик-фактором, который приводит к задаче его уменьшения с целью повышения эффективности использования усилителя передающего каскада радиостанций. Даже в относительно узкополосных современных радиолиниях (до 50 кГц) отказались от использования технологий многочастотной передачи в пользу одночастотной (см., например, MIL-STD-188-110D). Таким образом, выбор ортогональных широкополосных фазоманипулированных сигналов является обоснованным.

Вопросу разработки алгоритмов оценивания комплексных коэффициентов канала с помощью оптимальной фильтрации посвящены работы Стратоновича Р.Л., Калмана Р. Э., Шломы А.М., Крейнделина В.Б., Поборчей Н.Е. и других. Наиболее распространенным и эффективным методом оценивания коэффициентов канала является фильтр Калмана. При этом, в зависимости от модели канала и его динамики, требуется определить порядок авторегрессии и соответствующие значения коэффициентов модели авторегрессии. Априорная неопределённость относительно передаваемых символов при работе фильтра Калмана решается путем включения обратной связи по решению. Несмотря на широкую распространенность различных вариантов фильтра Калмана, в литературе отсутствуют решения (и оценки их эффективности), которые бы были разработаны для когерентного приема алфавита ортогональных широкополосных фазоманипулированных сигналов в условиях многолучевого ионосферного канала.

Проблему прогнозирования распространения радиоволн в ионосфере Земли и определения параметров радиограммы цифровых радиолиний в диапазоне декаметровых волн рассматривали в своих работах Черенкова Л.Е., Чернышев О.В. Барабашов Б. Г., Анишин М. М., Сахтеров В.И., Котенко О.О., Липатников В. А. и другие. При этом в данных работах не учитываются ограничения на максимальную задержку передачи информации, что важно для радиолиний передачи речевой информации. А также не учитывается совместное распространение сигнала вдоль поверхности Земли и при отражении от ионосферы.

Наиболее близким к разработанному в диссертации решению является макет модема, разработанный в МТУСИ и взятый за прототип. Указанный макет

использует недвоичные сигнально-кодовые конструкции (СКК), построенные на основе алфавита ортогональных широкополосных фазоманипулированных сигналов и недвоичного помехоустойчивого кода с малой плотностью проверок на четность (NB-LDPC). Однако, реализованный алгоритм обработки СКК, включающий сложение многолучевых компонент и формирование апостериорных вероятностей по каждому варианту недвоичного символа, является некогерентным и не использует информацию о коэффициентах канала. Параметры радиограммы подобраны эмпирически. Таким образом, существуют пути улучшения прототипа посредством корректировки параметров радиограммы и перехода к когерентному алгоритму обработки СКК, с использованием информации о коэффициентах канала с целью повышения помехоустойчивости радиолинии передачи речи.

Целью диссертационной работы является повышение помехоустойчивости широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн.

Научная задача заключается в синтезе алгоритмов формирования и обработки сигналов широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации ДКМВ диапазона, обладающих большей помехоустойчивостью по сравнению с известными. Решение поставленной научной задачи состоит из решения следующего набора частных задач, которые перечислены ниже.

1. Разработка методики определения параметров радиограммы радиолинии для передачи речевой информации недвоичными сигнально-кодовыми конструкциями, построенными на основе алфавита ортогональных широкополосных фазоманипулированных сигналов и недвоичного помехоустойчивого кода, учитывающей совместно результаты прогнозирования для распространения сигнала вдоль поверхности Земли и при отражении от ионосферы, а также ограничения, накладываемые на максимальную задержку передачи речи.

2. Разработка алгоритма когерентной обработки широкополосных недвоичных СКК в многолучевом ионосферном канале, использующего уточненные при помощи оптимальной фильтрации оценки коэффициентов канала, полученные по недвоичным символам данных радиограммы в условиях их априорной неопределенности.

3. Оценка потенциальных показателей помехоустойчивости разработанного алгоритма и определение энергетического выигрыша по сравнению с известными алгоритмами.

4. Разработка программной модели устройства приема сигналов широкополосной цифровой радиолинии передачи речевой информации, реализующей алгоритм когерентной обработки широкополосных недвоичных СКК с оптимальной фильтрацией коэффициентов многолучевого канала.

5. Проведение тестирования разработанной программной модели устройства приема сигналов, с использованием модели ионосферного канала для выработки научно-обоснованных рекомендаций по применению разработанного алгоритма, и сравнение помехоустойчивости с программной моделью устройства прототипа.

6. Разработка макета устройства приема сигналов цифровой радиолинии передачи речевой информации и обработка натуральных записей для подтверждения результатов, полученных при моделировании, и подтверждения корректности предложенных рекомендаций.

Объектом исследования являются широкополосные цифровые радиолинии передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн.

Предметом исследования являются алгоритмы формирования и обработки сигналов широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач исследования использовались методы цифровой обработки сигналов, теории электрической связи, теории случайных процессов, теории вероятностей, статистической радиотехники и методы вычислительного эксперимента.

Научная новизна работы.

1. Разработана методика определения параметров радиограммы для широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации, **отличающаяся от известных** совместным учетом результатов прогнозирования для распространения сигнала вдоль поверхности Земли и при отражении от ионосферы при оценке вероятности приема, а также учетом накладываемых ограничений на максимальную задержку передачи речи.
2. Разработан алгоритм когерентной обработки широкополосных недвоичных СКК в условиях многолучевого распространения сигнала в ионосферном канале, **отличающийся от известных** формированием апостериорных вероятностей по каждому варианту недвоичного символа радиограммы, с применением оптимального когерентного сложения многолучевых компонент сигнала, с использованием фильтрации оценок коэффициентов канала, полученных в условиях априорной неопределенности относительно недвоичных символов радиограммы.
3. Разработаны **новые** научно-обоснованные рекомендации по применению алгоритма когерентной обработки широкополосных недвоичных СКК в условиях априорной неопределенности относительно скорости замираний сигнала в ионосферном канале.

Достоверность результатов и выводов обеспечивается корректностью применения математических методов и соответствием результатов, полученных путем аналитических расчетов, численного моделирования и натурального эксперимента.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в разработке новых элементов научно-методического аппарата теории передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн, а именно – методики определения параметров радиограммы для широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации, а также алгоритма когерентного приема широкополосных недвоичных СКК в условиях многолучевого

распространения сигнала в ионосферном канале.

Практическая значимость заключается в повышении помехоустойчивости широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн за счет использования разработанного алгоритма когерентного приема широкополосных недвоичных СКК в условиях многолучевого распространения сигнала в ионосферном канале. Практическая значимость подтверждается результатами обработки натуральных записей эфира с помощью разработанных программной модели и макета устройства приема сигналов.

Результаты диссертационного исследования использовались:

- при проведении исследований по обоснованию технического облика перспективной широкополосной радиостанции ДКМВ диапазона для передачи данных и речевых сообщений в ФГБОУ ВО «ВГУ»;
- при разработке программных модулей обработки широкополосных сигналов в диапазоне декаметровых волн в рамках СЧ ОКР «Близнец-ТУС» в МТУСИ;
- в образовательном процессе на кафедре «Радиотехнические системы» МТУСИ в рамках дисциплин «Статистическая теория радиотехнических систем» и «Радиотехнические системы передачи информации».

Апробация работы.

Результаты, изложенные в диссертации, были представлены и обсуждены на следующих конференциях:

1. 2023 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, г. Москва, Россия, 2023 г;
2. 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), г. Псков, Россия, 2023 г;
3. 2024 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, г. Москва, Россия, 2024 г;
4. 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), г. Выборг, Россия, 2024 г.

Публикации результатов.

По теме диссертации было опубликовано 14 работ. Из них 4 опубликованы в журналах из списка ВАК, 7 работ проиндексированы в международных базах данных Web of Science и SCOPUS. Две работы проиндексированы в библиографической базе данных РИНЦ. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора.

Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена только та их часть, которая выполнена лично соискателем.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Основная часть изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 5 таблиц; список литературы состоит из 139 наименований.

Соответствие паспорту специальности.

Проведенное автором исследование соответствует п. 2 «Исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов, учитывающих эффекты их рассеяния и отражения при прохождении через различные среды распространения» и п. 3 «Разработка и исследование радиотехнических устройств и систем, обеспечивающих улучшение характеристик точности, быстродействия и помехоустойчивости» паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Положения, выносимые на защиту.

1. Применение предложенной методики определения параметров радиограммы цифровой радиолинии передачи речевой информации в ДКМВ диапазоне **позволяет достичь энергетического выигрыша** до 2.8 дБ по излучаемой мощности относительно известных вариантов, при сохранении вероятности корректного приема радиограммы в среднем не менее 0.95 в течение календарного года.

2. Предложенный алгоритм когерентной обработки широкополосного сигнала с применением оптимальной фильтрации оценок комплексных коэффициентов передачи канала при многолучевом распространении сигнала в условиях ионосферного канала **обеспечивает энергетический выигрыш** до 2.7 дБ при вероятности корректного декодирования кодового блока 0.95 по сравнению с известными алгоритмами.

3. Разработанный макет устройства приема сигналов цифровой радиолинии передачи речевой информации, **отличающийся от известных** применением алгоритма когерентной обработки с оптимальной фильтрацией коэффициентов многолучевого ионосферного канала и работающий с учетом разработанных рекомендаций в условиях априорной неопределенности о динамике изменения состояния канала, **позволяет повысить помехоустойчивость** широкополосной радиолинии передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн, что количественно **выражается в уменьшении доли** непринятых радиограмм в 1.45 раз по сравнению с прототипом при обработке записей эфира.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, проведен анализ современного уровня разработанных научно-технических решений, определены цель, задачи и методы исследований. Конкретизируются научная новизна, личный вклад в работу, практическая значимость, сведения об апробации работы, публикациях автора, а также положения, выносимые на защиту.

В **первом** разделе рассматриваются существующие решения для построения широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн.

Рассматриваются особенности распространения широкополосных сигналов при квазизенитном излучении. Отмечены возможность одновременного приема сигналов Земной и ионосферной волн, малые значения максимально применимой частоты и сильное влияние дисперсионных искажений. Рассмотрена модификация

модели ионосферного канала Ваттерсона, учитывающая влияние дисперсионных искажений. Приведены методы разнесенного приема, позволяющие реализовать когерентное и некогерентное сложение лучей, прошедших по различным путям распространения. Рассмотрены существующие подходы к оценке коэффициентов передачи канала для схем когерентного приема.

Проведен анализ существующих широкополосных радиолиний передачи речи ДКМВ диапазона в части используемых сигналов и алгоритмов их приема. По результатам сравнения был выбран прототип, реализующий, в отличие от других рассмотренных, компенсацию дисперсионных искажений, режекцию узкополосных помех и использующий недвоичный помехоустойчивый код, согласованный с размером используемого ансамбля ортогональных сигналов 2^6 . Показано, что в прототипе может быть улучшен алгоритм приема, путем перехода от некогерентного сложения лучей к когерентному, и могут быть выработаны параметры радиограммы, обеспечивающие большую надежность радиолинии, путем учета возможности приема Земной и ионосферной волн.

Во **втором** разделе представлена методика определения параметров радиограммы широкополосной радиолинии в условиях ионосферного канала. Приведены количественные показатели энергетического выигрыша в сравнении с модемом прототипом за счет применения методики.

Предполагается радиолиния, работающая с независимыми радиограммами. В таком случае вероятность успешного приема радиограммы P_{np} равна

$$P_{np} = P_{обн} P_{дек}, \quad (1)$$

где $P_{обн}$ – вероятность обнаружения синхропоследовательности, $P_{дек}$ – вероятность успешного декодирования кодового блока.

С учетом возможности распространения сигнала по Земной и ионосферной волнам вероятность приема в зависимости от ОСШ равна:

$$P_{np}(E_{np}/N_0, E_c/N_0) = \begin{cases} P_{обнз}(E_{np}/N_0) P_{декз}(E_c/N_0), & P_{обнз}(E_{np}/N_0) > P_{обни}(E_{np}/N_0) \\ P_{обни}(E_{np}/N_0) P_{деки}(E_c/N_0), & P_{обни}(E_{np}/N_0) > P_{обнз}(E_{np}/N_0) \end{cases}. \quad (2)$$

Полагаем, что информация передается фазоманипулированными сигналами, длительностью T_q , энергией E_c и состоящими из N_{ncn} чипов псевдослучайной последовательности. Тогда энергия одного фазоманипулированного сигнала будет равна $E_c = N_{ncn} E_q$, а длительность, соответственно, $T_c = N_{ncn} T_q$. При этом, если синхропоследовательность состоит из сигналов с энергией и длительностью, равной используемым при передаче полезной нагрузки, то энергия сигнала преамбулы E_{np} может быть рассчитана как:

$$E_{np} = E_c N_{np}, \quad (3)$$

где N_{np} – число фазоманипулированных сигналов, используемых в преамбуле.

При использовании блочного помехоустойчивого кода декодирование кодового блока возможно только при приеме всех кодовых символов блока кода. Полагаем,

что радиogramма заданной длительности содержит один блок кода. По этой причине минимально возможная задержка передачи речи в такой радиолинии с блочным кодированием равна сумме длительности преамбулы и длительности полезной нагрузки, содержащей один кодовый блок. Учитывая ограничения на максимальную задержку для радиолиний передачи речи, можно однозначно определить максимальную длительность радиogramмы T_{pe} . Число бит, передаваемых в каждой радиogramме с длительностью T_{pe} определяется исходя из используемой вокодером битовой скорости v . В таком случае величина N_{np} может быть однозначно определена при известных значениях T_c и разрядности двоичных символов m .

Исходя из представленной на рисунке 1 структуры кадра рассматриваемой радиолинии длительность радиogramмы равна:

$$T_{pe} = T_c \left(N_{np} + \frac{K}{mr} \right), \quad (4)$$

где K — число информационных бит, передаваемых в радиogramме.

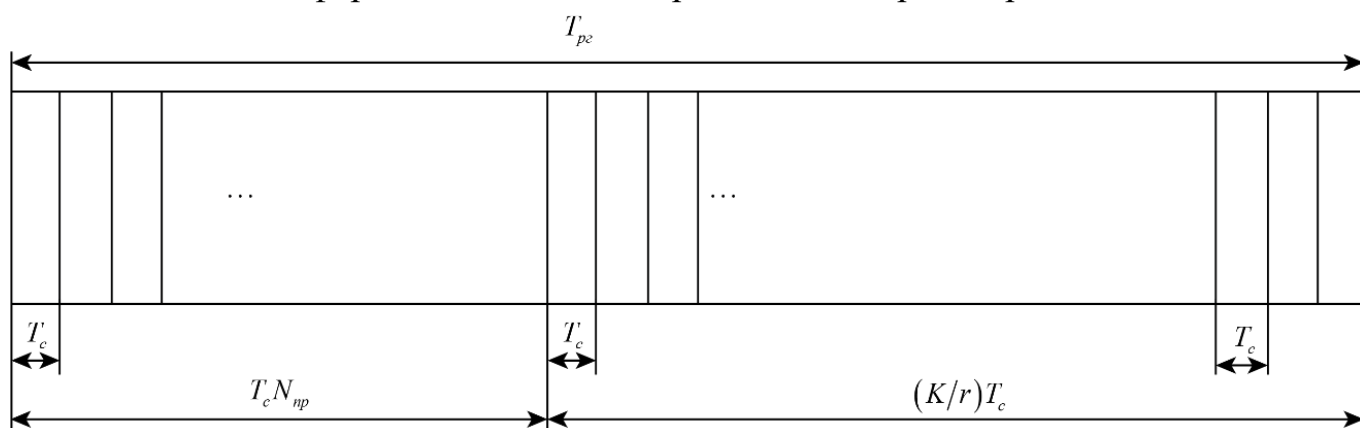


Рисунок 1 – Временная структура кадра радиолинии

Кроме того, при известных T_{pe} и v , число бит K , которые должны содержаться в каждой радиogramме в предположении непрерывной их передачи, рассчитывается как:

$$K = \frac{v}{T_{pe}}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получим:

$$T_{pe} = T_c \left(N_{np} + \frac{v}{mrT_{pe}} \right). \quad (6)$$

Откуда N_{np} выражается как:

$$N_{np} = \frac{T_{pe}}{T_c} - \frac{v}{mrT_{pe}}. \quad (7)$$

Предполагая параметры T_{pe} , T_c , v и m определенными на этапе предварительного анализа ($m = 6$ как у прототипа), величина N_{np} будет

варьироваться от кодовой скорости помехоустойчивого кода r . Тогда выражение (2) примет вид:

$$P_{np}(E_{np}/N_0, E_c/N_0, r) = \begin{cases} P_{обнз}(E_c/N_0, r)P_{декз}(E_c/N_0, r), P_{обнз}(E_c/N_0, r) > P_{обни}(E_c/N_0, r). \\ P_{обни}(E_c/N_0, r)P_{деки}(E_c/N_0, r), P_{обни}(E_c/N_0, r) > P_{обнз}(E_c/N_0, r) \end{cases} \quad (8)$$

Таким образом, для полного определения исходных параметров функции $P_{np}(E_{np}/N_0, E_c/N_0, r)$ требуется провести расчет отношений сигнал/шум на входе приемного устройства. Был предложен вариант определения указанных выше вероятностей, основанный на рекомендациях МСЭ в части прогнозирования распространения радиоволн. Используемые методы расчета требуют информацию о несущей частоте сигнала f_0 и дальности между передающей и приемной станциями d для прогнозирования уровня мощности Земной волны. Для прогнозирования мощности ионосферной волны помимо этих параметров необходимо так же определить время суток H и месяц M .

Подставив аргументы, от которых зависит отношение сигнал/шум, в (8), получим выражение для вероятности приема радиограммы:

$$P_{np}(d, f_0, H, M, r) = \begin{cases} P_{обнз}(d, f_0, r)P_{декз}(d, f_0, r), P_{обнз}(d, f_0, r) > P_{обни}(d, f_0, H, M, r) \\ P_{обни}(d, f_0, H, M, r)P_{деки}(d, f_0, H, M, r), P_{обни}(d, f_0, H, M, r) > P_{обнз}(d, f_0, r) \end{cases} \quad (9)$$

Полученное выражение для вероятности приема зависит, помимо варьируемого параметра, от условий работы радиолинии. В связи с этим предлагается сформулировать дополнительные условия, которые позволят найти величину r максимизирующую величину P_{np} для определенной совокупности параметров H , M и d .

Для радиолиний передачи речи в качестве критерия работоспособности применяется характеристика доли времени, в течении которого обеспечивается связь с заданным качеством (коэффициент готовности). В случае цифровой радиолинии работающей в режиме передачи независимых радиограмм качество приема определяется соответствующей вероятностью P_{np} . Таким образом, предлагается считать радиолинию работоспособной в том случае, если для всех значений дальности d от 0 вплоть до d_{max} вероятность приема P_{np} превышает граничное значение P_{sp} :

$$D(f_0, H, M, r) = \begin{cases} 1, & P_{np}(d, f_0, H, M, r) \geq P_{sp} \\ 0, & P_{np}(d, f_0, H, M, r) < P_{sp} \end{cases}, \quad 0 < d \leq d_{max}. \quad (10)$$

Тогда по величине $D(f_0, H, M, r)$ доля времени, для которого радиолиния является работоспособной, т.е. коэффициент готовности, будет рассчитываться как:

$$A(f_0, r) = \frac{\sum_{H \in \mathbf{H}} \sum_{M \in \mathbf{M}} D(f_0, H, M, r)}{|\mathbf{H}| |\mathbf{M}|}, \quad (11)$$

где \mathbf{H} и \mathbf{M} – множества значений времени суток и времени года соответственно, а $|\mathbf{H}|$ и $|\mathbf{M}|$ – мощность этих множеств. Таким образом, максимизируя $A(f_0, r)$ для каждой частоты может быть найдено значение r для которого коэффициент готовности радиолинии за рассмотренный временной промежуток максимален как:

$$r_{\max}(f_0) = \arg \max_{r \in \mathbf{r}} A(f_0, r), \quad (12)$$

где \mathbf{r} – множество рассматриваемых кодовых скоростей.

На рисунке 2 слева приведена зависимость коэффициента готовности радиолинии, рассчитанного с использованием разработанной методики для минимальной вероятности приема равной 0.95. По данной зависимости видно, что в течении наибольшего времени пороговое значение P_{ep} превышаетея при кодовой скорости 22/25.

На рисунке 2 справа представлена зависимость коэффициента готовности, рассчитанная аналогичным способом для скорости передачи данных 2400 бит/с. В данном режиме радиограмма модема прототипа предполагает кодовую скорость 2/3, однако, по полученным зависимостям коэффициент надежности наибольший для значения кодовой скорости 4/5.

На рисунке 3 слева представлены графики зависимости доли времени работы радиолинии для скорости передачи информации 700 бит/с от частоты для предлагаемой радиограммы при мощности 100 Вт и радиограммы модема прототипа при мощности 190 Вт.

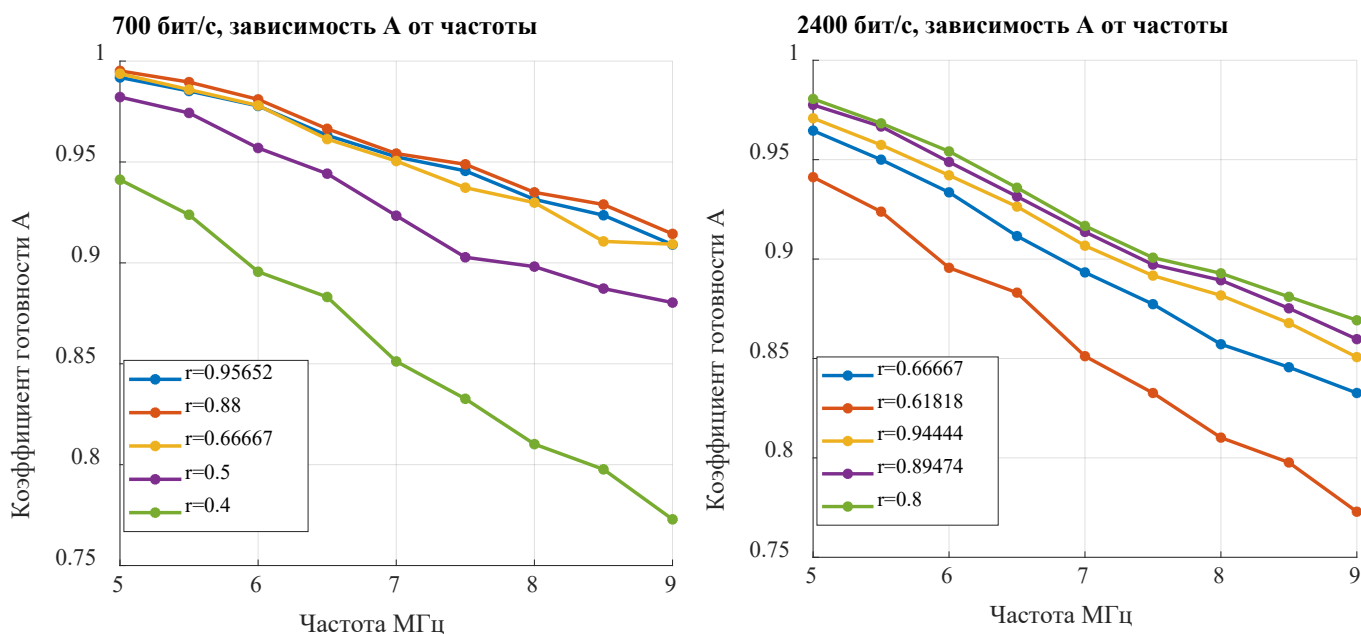


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента готовности для скорости 700 бит/с (слева) и 2400 бит/с (справа) по годовому прогнозу от частоты

При таком отношении мощностей доля времени работы для рассматриваемых радиолиний практически совпадает, что позволяет говорить о возможности снижения мощности радиолинии в 1.9 раз (2.8 дБ) без потери в среднем времени обеспечения связи за счет применения радиограммы, рассчитанной в соответствии с предложенной методикой. На рисунке 3 справа представлена зависимость аналогичного сравнения по величине коэффициента готовности для скорости передачи информации 2400 бит/с. Выигрыш от использования разработанной методики составил 2 дБ.

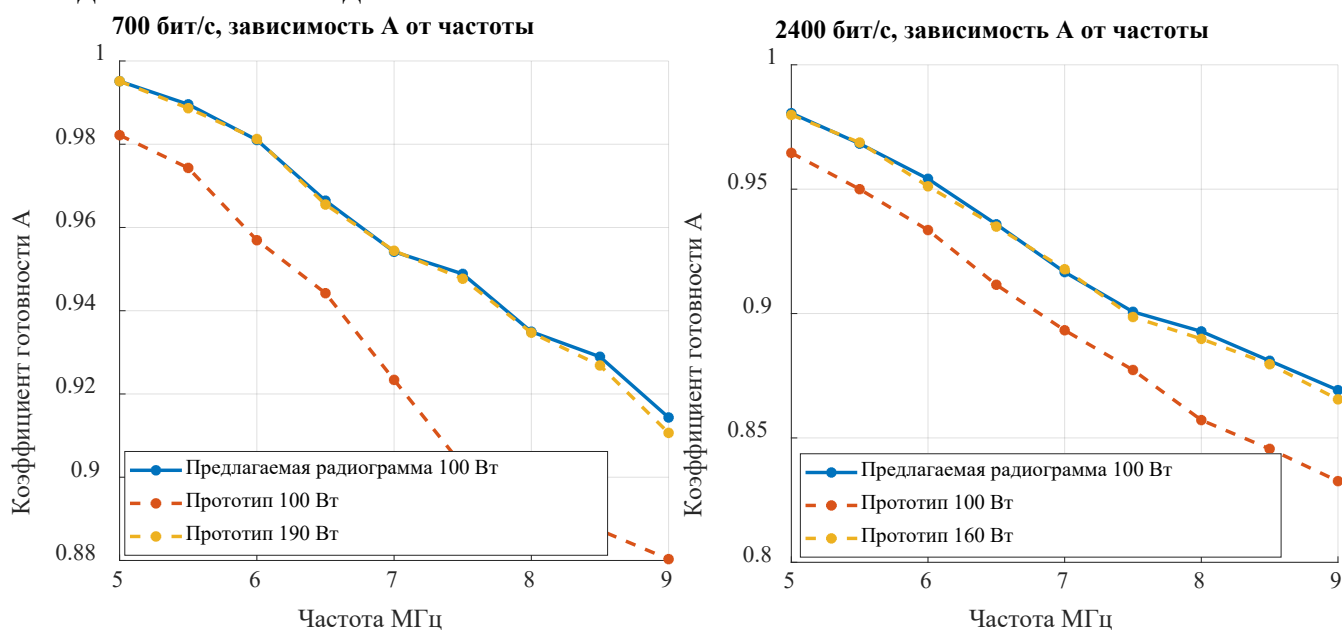


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента готовности от частоты при скорости 700 бит/с (слева) и 2400 бит/с (справа)

В **третьем** разделе рассмотрены алгоритмы обработки широкополосных недвоичных СКК в условиях частичной или полной априорной неопределенности относительно коэффициентов канала для каждой многолучевой компоненты принимаемого сигнала.

Получены выражения для вычисления апостериорных вероятностей по каждому варианту недвоичного символа с учетом многолучевого распространения сигнала в условиях:

- точного знания коэффициентов канала для каждой многолучевой компоненты;
- усреднения по начальной фазе многолучевых компонент при условии их равномерного распределения, и точного знания модуля коэффициентов канала;
- усреднения по фазе и по модулю коэффициентов канала при условии рэлеевского закона распределения модулей;
- квадратичного сложения многолучевых компонент с известными модулями коэффициентов канала (вариант, реализованный в прототипе).

На примере радиограмм из модема прототипа, установлено, что при применении фильтра Калмана недостаточно авторегрессии 1-го порядка для приема радиограмм с помехоустойчивостью сравнимой со значениями, достижимыми при

использовании максимально правдоподобных (МП) оценок коэффициентов канала. С целью повышения помехоустойчивости была построена модель авторегрессии более высокого порядка, путем решения уравнения Юла-Уокера, относительно модели Ваттерсона для ионосферного канала.

Фильтр Калмана синтезирован на основе динамической модели вида авторегрессии порядка N_{ap} в форме:

$$\dot{h}_j(n) = \sum_{k=1}^{N_{ap}} \alpha_k \dot{h}_j(n-k) + \dot{\xi}_j(n), \quad (13)$$

где α_k – коэффициенты авторегрессии, N_{ap} – порядок авторегрессии.

Перейдем к векторно-матричной записи. Определим векторы текущего и предыдущего состояний в форме векторов размером $N_{ap} \times 1$:

$$\mathbf{h}_{n,j} = [\dot{h}_j(n), \dot{h}_j(n-1), \dots, \dot{h}_j(n-N_{ap}+1)]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{h}_{n-1,j} = [\dot{h}_j(n-1), \dot{h}_j(n-2), \dots, \dot{h}_j(n-N_{ap})]^T. \quad (15)$$

Тогда динамическая модель будет иметь вид

$$\mathbf{h}_{n,j} = \mathbf{F}\mathbf{h}_{n-1,j} + \mathbf{e}_{n,j}, \quad (16)$$

где $\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \alpha_{N_{ap}-1} & \alpha_{N_{ap}} \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}$, $\mathbf{e}_{n,j} = [\dot{\xi}_j(n), 0, 0, \dots, 0]^T$. Коэффициенты α_k

предполагают решение уравнение Юла-Уокера:

$$\mathbf{R}\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\rho}, \quad (17)$$

где $\boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_{N_{ap}}]^T$ – вектор коэффициентов корреляции ρ_k между

вещественными (или мнимыми) частями $\dot{h}_j(n)$ и $\dot{h}_j(n-k)$, $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{N_{ap}}]^T$ –

вектор искомых коэффициентов, $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_{N_{ap}-2} & \rho_{N_{ap}-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{N_{ap}-3} & \rho_{N_{ap}-2} \\ \rho_2 & \rho_1 & & \dots & \rho_{N_{ap}-4} & \rho_{N_{ap}-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{N_{ap}-1} & \rho_{N_{ap}-2} & \rho_{N_{ap}-3} & \dots & \rho_1 & 1 \end{pmatrix}$ –

матрица уравнения. Решение уравнения (17) записывается в форме:

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{R}^{-1}\boldsymbol{\rho}. \quad (18)$$

Предполагалось, что магнитоионные компоненты разделяются отдельно, а частотным сдвигом можно пренебречь. Корреляционная функция коэффициентов передачи канала в таком случае имеет вид:

$$\rho_k = C(kT_s) = e^{-2\pi^2\sigma_{sia}^2(kT_s)^2}, \quad (19)$$

где $2\sigma_{sia}^2$ – величина доплеровского расширения.

Было показано, что использование напрямую выражений **Ошибка! Источник ссылки не найден.** – (19) приводит к неустойчивой авторегрессии, т.е. к неустойчивому БИХ-фильтру, коэффициентами которого являются коэффициенты авторегрессии.

Для решения данной проблемы была сформирована модель вычисления множителей канала в форме скользящего среднего. В качестве коэффициентов в модели используется конечное число отсчетов импульсной характеристики фильтра, обеспечивающего спектральную плотность мощности формируемого случайного процесса, близкую к исходной. Тогда справедливо

$$\rho_k = \frac{\sum_{n=0}^{L-k} b_n b_{n+k}}{\sum_{j=0}^L b_n^2}, \quad (20)$$

где L – количество упомянутых коэффициентов (нечетное число), b_j , $j = 0, \dots, L$ – коэффициенты импульсной характеристики фильтра получаемые методом частотной выборки путем дискретизации АЧХ фильтра $\sqrt{S_c(\nu)}$ в частотной области и вычисления обратного быстрого преобразования Фурье.

Таким образом, использование (20), вместо прямой подстановки по (19), позволило получить устойчивые модели авторегрессии.

Среди недостатков следует отметить рост вычислительной сложности, т.к. увеличиваются размерности векторов и матриц, входящих в основные выражения алгоритма фильтра Калмана. С учетом упрощения выполняемых матричных вычислений полное число арифметических операций (умножений $R_{умнож}$ и сложений $R_{слож}$) вещественных чисел составило

$$R_{умнож} = 3N_{ар}^2 + 5N_{ар} + 3, \quad R_{слож} = 3N_{ар}^2 + 2N_{ар} + 2. \quad (21)$$

Результаты оценки помехоустойчивости, приведенные на рисунке 4 показывают, что увеличение авторегрессии выше 4-го порядка не дает существенный прирост в помехоустойчивости. При этом вычислительная сложность алгоритма увеличивается на 47%.

Разработан алгоритм когерентной обработки радиogramм, передаваемых широкополосными недвоичными СКК, с использованием оценок коэффициентов канала, уточненных фильтром Калмана для каждой

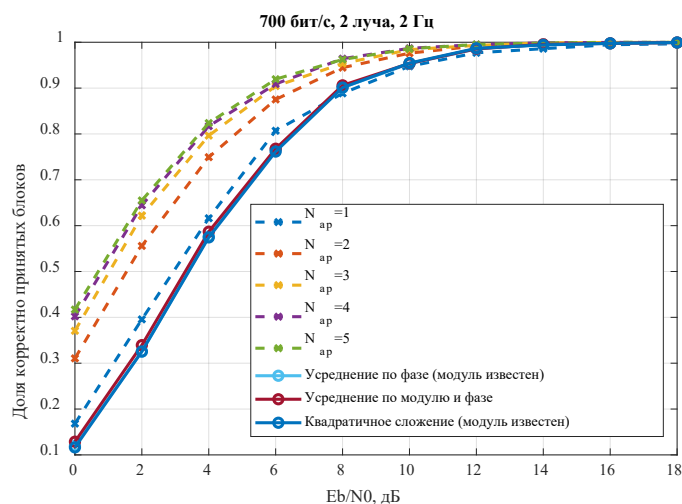


Рисунок 4 – Доля принятых блоков для разных вариантов авторегрессии

многолучевой компоненты по преамбулам радиogramм и непосредственно по передаваемым символам радиogramм, с соответствующим принятием решений. Блок схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 5.

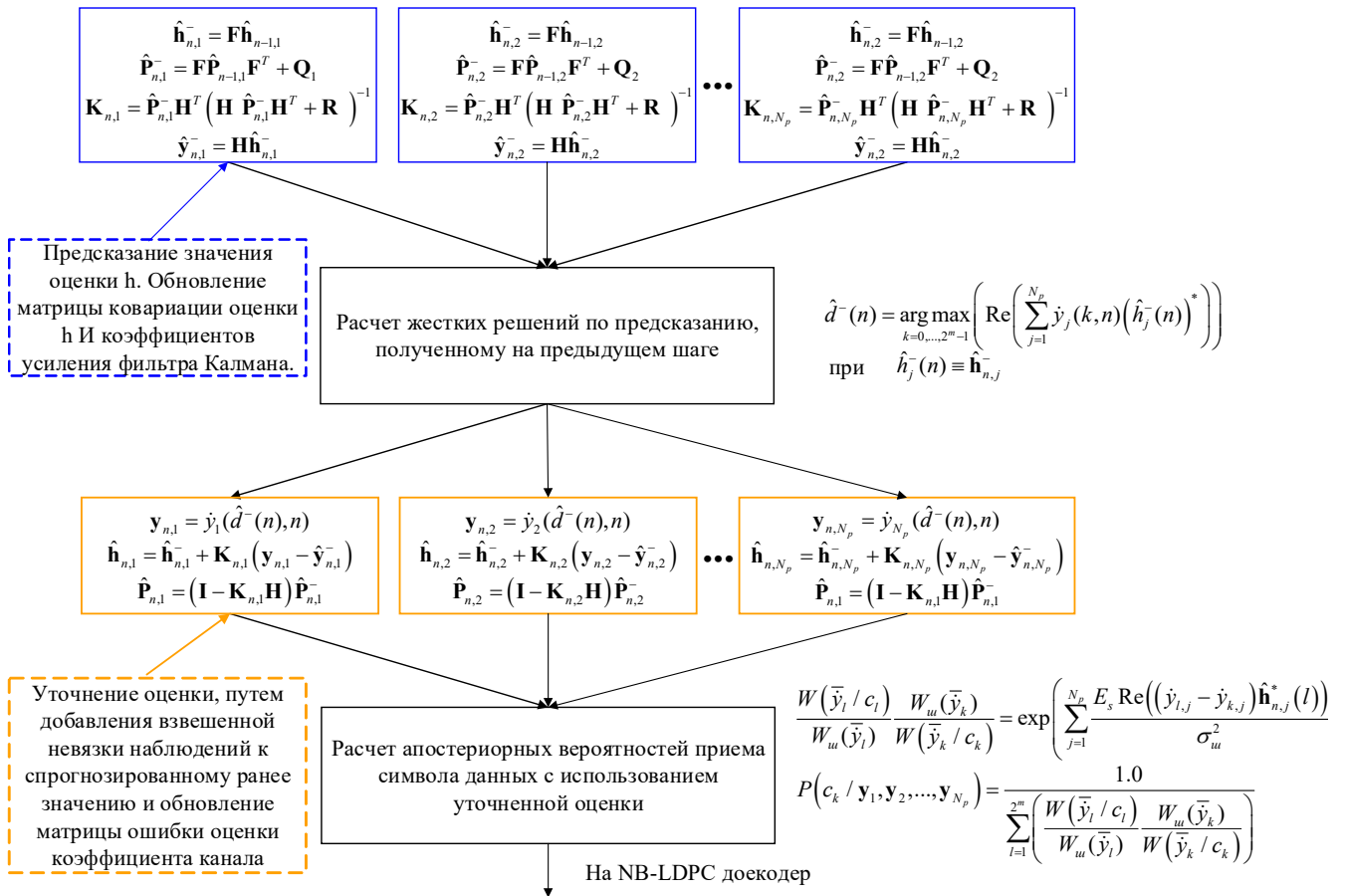


Рисунок 5 – Блок схема разработанного алгоритма когерентного приема с оптимальной фильтрацией

Получены оценки помехоустойчивости разработанного алгоритма в форме кривых зависимости доли корректно декодированных радиogramм (рисунки 6 и 7) и оценок вероятностей символьной и битовой ошибок от среднего значения отношения сигнал/шум в двухлучевом ионосферном канале. Сравнение кривых помехоустойчивости показывает, что алгоритм когерентной обработки с фильтрацией Калмана по данным обеспечивает энергетический выигрыш порядка 2.7 дБ по сравнению с алгоритмом квадратичного сложения, который реализован в модеме прототипе (при известных значениях коэффициентов каналов), при уровне доли корректно принятых блоков, составляющей 0.95 и доплеровском разбросе 0.5 Гц.

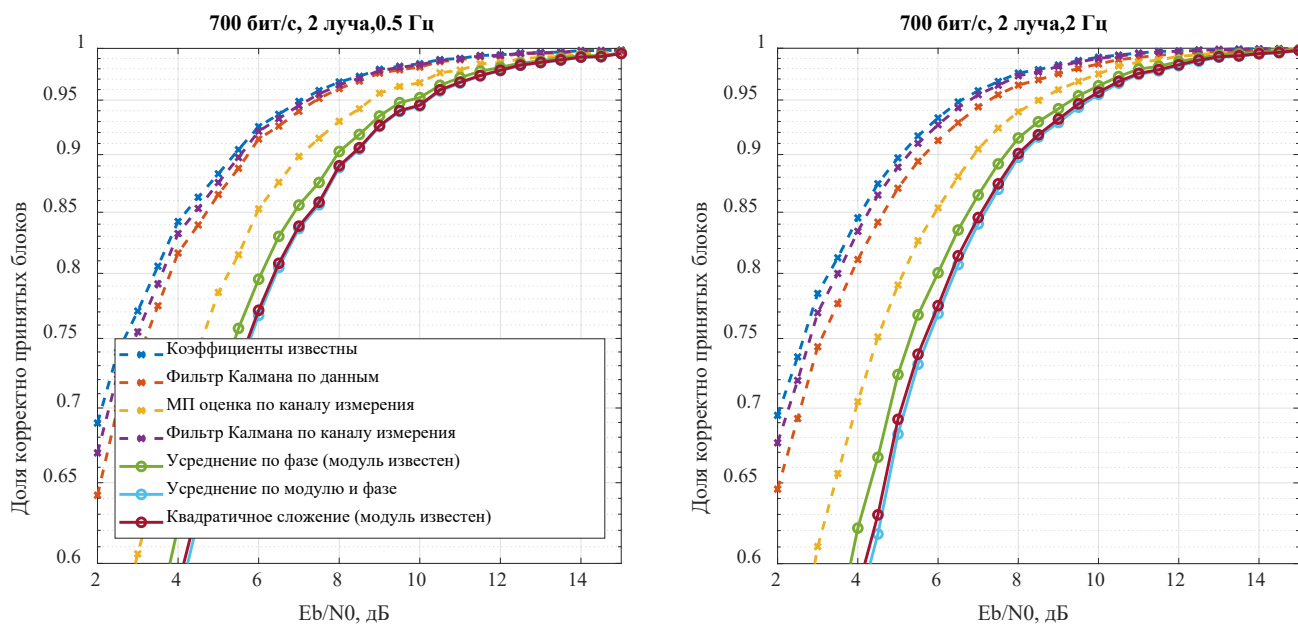


Рисунок 6 – Доля корректно принятых блоков, доплеровский разброс 0.5 Гц (слева) и 2.0 Гц (справа)

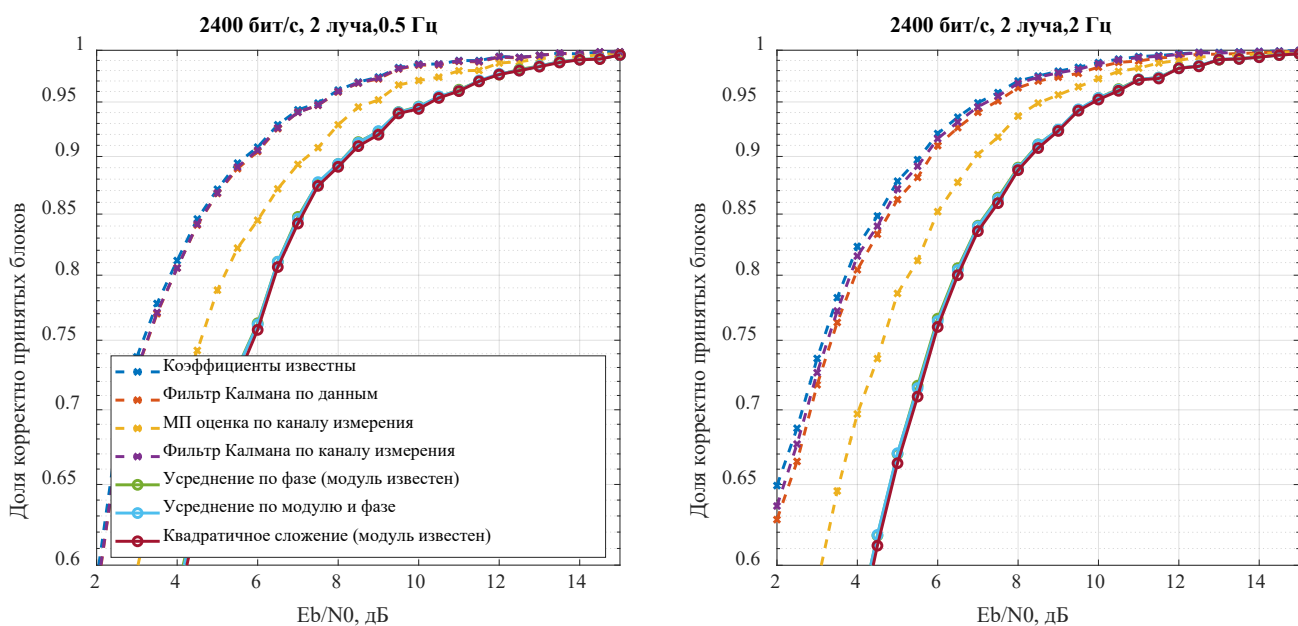


Рисунок 7 – Доля корректно принятых блоков, доплеровский разброс 0.5 Гц (слева) и 2.0 Гц (справа)

В четвертом разделе представлена программная модель устройства приема сигналов цифровой радиолинии передачи речевой информации, реализующая синтезированный в разделе 3 алгоритм когерентной обработки. Блок схема разработанного устройства приведена на рисунке 8.

Разработанная программная модель реализует работу фильтра Калмана по МП оценкам коэффициентов канала, полученным по символам преамбулы, а также по информационным символам, выбранным в соответствии с жесткими решениями, полученными в результате сложения лучей, с использованием коэффициентов передачи канала, рассчитанных на этапе прогноза их значений на основе динамической модели.

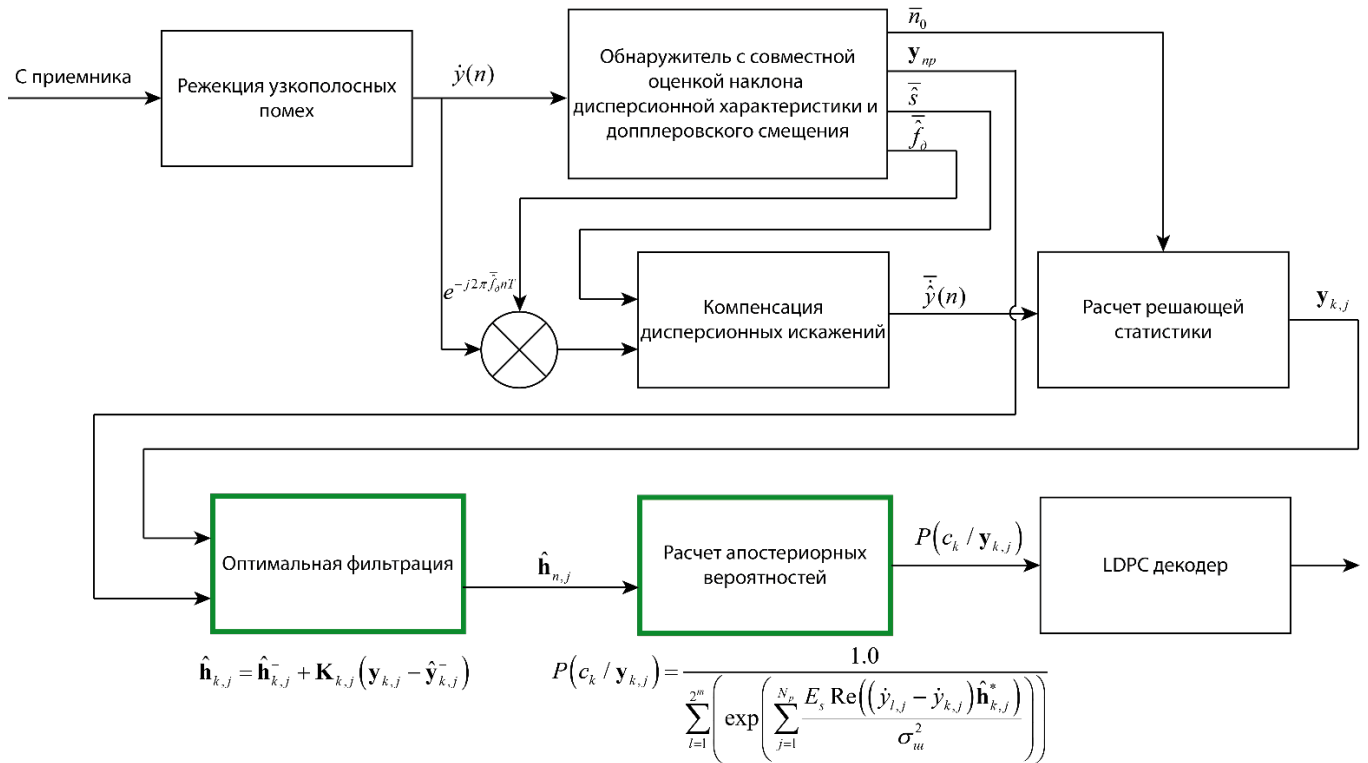


Рисунок 8 – Блок схема устройства когерентного приема сигналов цифровой радиолинии передачи речи ДКМВ диапазона

С целью устранения неопределенности относительно дисперсии шума в канале было реализовано вычисление выборочного значения данной дисперсии по откликам корреляторов для позиций, не отвечающих информационным символам в общей матрице откликов для всей радиограммы. Проведен численный эксперимент, целью которого являлись апробация и сравнение помехоустойчивости радиолинии, с использованием разработанного алгоритма приема и радиолинии прототипа. Схема эксперимента в среде имитационного моделирования «Спектр-2» приведена на рисунке 9.

При работе алгоритма когерентной обработки в составе модели устройства приема производится сброс фильтра Калмана, так как каждая из радиограмм обрабатывается независимо, и не всегда возможно сохранить непрерывную линию времени на входе фильтра Калмана. С учетом этого, по результатам эксперимента был

показан энергетический выигрыш по вероятности декодирования от 1.4 до 2.4 дБ при доплеровском расширении от 0.5 до 2 Гц, соответственно. Кривые помехоустойчивости приведены на рисунке 10.

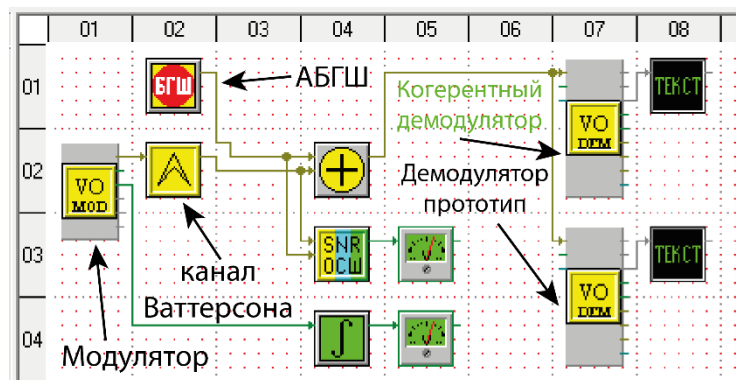


Рисунок 9 – Схема эксперимента в среде «Спектр 2»

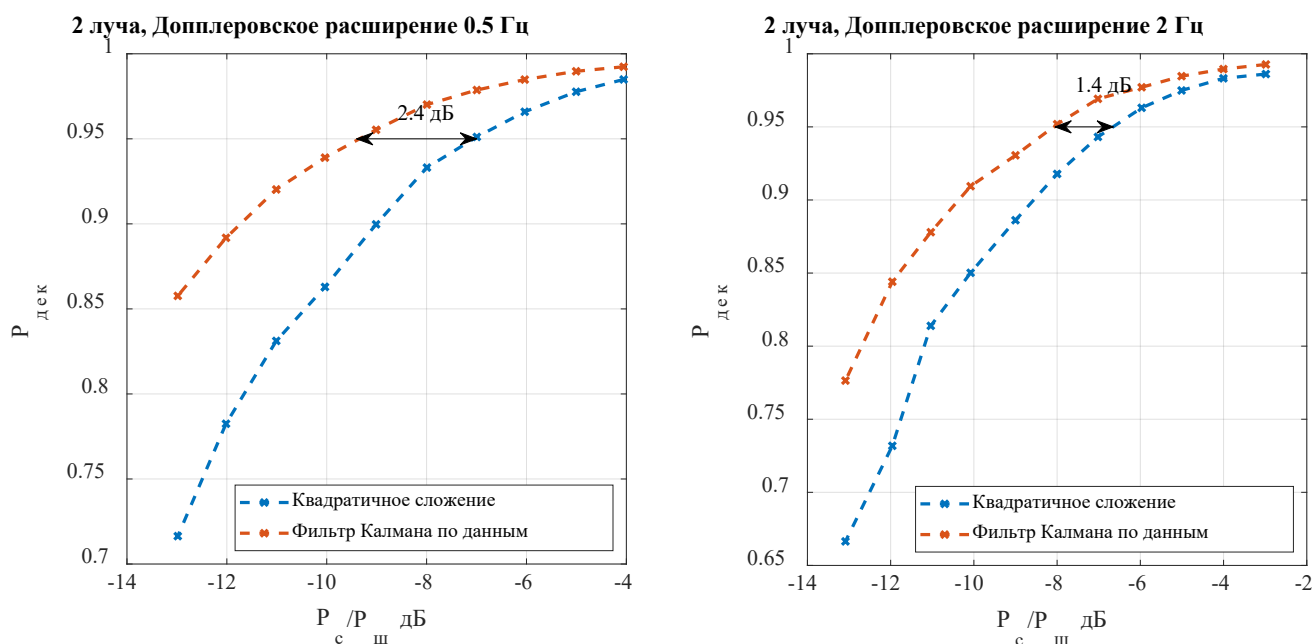


Рисунок 10 – Зависимость вероятности декодирования кодового блока от ОСШ при доплеровском разбросе 0.5 Гц (слева) и 2 Гц (справа)

Показано, что в условиях априорной неопределенности относительно скорости замираний в ионосферном канале (значения доплеровского разброса в диапазоне до 2 Гц) следует применять параметры алгоритма оптимальной фильтрации множителей канала, рассчитанные для значения доплеровского разброса, равного 2.0 Гц. Это позволяет обрабатывать широкополосные сигналы в диапазоне значений доплеровских разбросов от 0.5 Гц до 2 Гц с потерями, не превышающими 0.1 дБ относительно точно настроенных алгоритмов оптимальной фильтрации.

Был разработан макет устройства приема сигналов цифровой радиолинии передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн и проведена обработка записей эфира, полученных в результате проведения натуральных испытаний радиолинии прототипа с использованием разработанного макета.

Для оценки доли корректно принятых радиограмм в полезной нагрузке каждой радиограммы помимо блоков данных вокодера один байт отведен на служебную информацию о номере радиограммы. Этот номер монотонно возрастает от 0 до 255 после чего сбрасывается к 0. Это позволяет, в предположении что между двумя ближайшими корректно демодулированными радиограммами было передано не более 255 неприятых радиограмм, определить оценку доли корректно принятых радиограмм как:

$$\hat{P}_{np} = \frac{N_{дек}}{\sum_{n=1}^{N_{дек}-1} (i_n - i_{n-1})}, \quad (22)$$

где $N_{дек}$ – число корректно декодированных блоков за сеанс связи, i_n – номер радиограммы переданный в составе полезного сообщения для n -й декодированной посылки.

В таблице 1 приведены полученные оценки вероятности ошибки декодирования и ошибки приема радиограммы. Было установлено, что применение разработанного алгоритма позволило снизить вероятность ошибки декодирования кодового блока в 1.92 раза (на 48%), а вероятность ошибки приема радиограммы в 1.45 раз (на 31%).

Таблица 1 – Вероятности декодирования и приема по записям эфира

	Усреднение по модулю и фазе	Фильтр Калмана по данным	Выигрыш
Ошибка декодирования $1-P_{дек}$	0.11	0.0576	48%
Ошибка приема $1-P_{пр}$	0.16	0.11	31%

Заключение

Основные результаты, полученные в диссертационном исследовании, состоят в следующем.

1. Разработана методика определения параметров радиограммы радиолинии для передачи речевой информации недвоичными сигнально-кодowymi конструкциями, построенными на основе алфавита ортогональных широкополосных фазоманипулированных сигналов и недвоичного помехоустойчивого кода, учитывающая совместно результаты прогнозирования для распространения сигнала вдоль поверхности Земли и при отражении от ионосферы, а также ограничения, накладываемые на максимальную задержку передачи речи. Указанная методика позволяет уменьшить мощность, требуемую для достижения равной с прототипом доли времени, в течении которого вероятность корректного приема радиограммы составляет в среднем не менее 0.95 в течение календарного года, до 1.9 раз (2.8 дБ).

2. Разработан алгоритм когерентной обработки широкополосных недвоичных СКК в многолучевом ионосферном канале, использующий уточненные при помощи оптимальной фильтрации оценки коэффициентов канала, полученные по недвоичным символам данных радиограммы в условиях их априорной неопределенности.

Оценивание коэффициентов канала осуществляется для каждой многолучевой компоненты отдельным фильтром Калмана, с использованием авторегрессии 4-го порядка. Получены выражения для оценивания вычислительной сложности оптимального фильтра. Установлено, что увеличение порядка авторегрессии выше 4-го порядка не дает существенный прирост в помехоустойчивости, однако увеличивает вычислительную сложность на 47%.

Априорная неопределенность, относительно символа данных радиограммы на каждом шаге фильтрации, устраняется путем принятия решения по нему после

когерентного сложения многолучевых компонент с использованием прогнозных значений коэффициентов канала.

3. Получены оценки помехоустойчивости разработанного алгоритма в форме кривых зависимости доли корректно декодированных кодовых блоков и оценок вероятностей символьной и битовой ошибок от среднего значения отношения сигнал/шум в двухлучевом ионосферном канале. Сравнение кривых помехоустойчивости показывает, что алгоритм когерентной обработки с фильтрацией Калмана по данным обеспечивает энергетический выигрыш порядка 2.7 дБ по сравнению с алгоритмом квадратичного сложения (при известных значениях коэффициентов канала), который реализован в прототипе, при уровне доли корректно декодированных кодовых блоков, составляющем 0.95 и доплеровском разбросе 0.5 Гц. При анализе графиков вероятностей битовой и символьной ошибок наблюдается выигрыш до 2.9 дБ. Для более быстрых замираний (доплеровский разброс 2.0 Гц) энергетический выигрыш составляет 2.4 дБ по графикам доли корректно декодированных кодовых блоков и 2.0 дБ по графикам вероятностей ошибок.

4. Разработана программная модель устройства приема сигналов широкополосной цифровой радиолинии передачи речевой информации, реализующая алгоритм когерентной обработки широкополосных недвоичных СКК. Разработанная модель реализует работу фильтра Калмана по МП оценкам коэффициентов канала, полученным по символам преамбулы, а также информационным символам, выбранным в соответствии с жесткими решениями, полученными в результате сложения лучей, с использованием коэффициентов передачи канала, рассчитанных на этапе прогноза их значений на основе динамической модели. С целью устранения неопределенности относительно дисперсии шума, в канале было реализовано вычисление выборочного значения данной дисперсии по откликам корреляторов для позиций, не отвечающих информационным символам в общей матрице откликов для всей радиограммы.

5. В результате проведения тестирования программной модели устройства были разработаны научно-обоснованные рекомендации по применению алгоритма оптимальной фильтрации в реальных условиях, заключающиеся в перезапуске оптимального фильтра при приеме новой радиограммы, а также в установлении значения доплеровского расширения, используемого при синтезе оптимального фильтра равным 2 Гц, для условий априорной неопределенности относительно скорости замираний в канале. Установлено, что применение указанных выше рекомендаций обеспечивает энергетический выигрыш от 1.4 до 2.4 дБ по сравнению с прототипом.

6. Разработан макет устройства приема сигналов цифровой радиолинии передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн. В результате обработки натуральных записей был достигнут выигрыш по помехоустойчивости, заключающийся в уменьшении вероятности ошибки декодирования кодового блока в 1.92 раза (на 48%) и вероятности ошибки приема радиограммы в 1.45 раз (на 31%),

что подтверждает эффективность разработанного алгоритма когерентной обработки недвоичных широкополосных СКК и разработанных научно-обоснованных рекомендаций по его применению.

Таким образом, **научная задача**, заключающаяся в синтезе алгоритмов формирования и обработки сигналов широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации ДКМВ диапазона, обладающих большей помехоустойчивостью по сравнению с известными, решена.

Цель работы, заключающаяся в повышении помехоустойчивости широкополосных цифровых радиолиний передачи речевой информации в диапазоне декаметровых волн, достигнута.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

1. Варламов В.О. Методика определения скорости помехоустойчивого кода цифровой голосовой радиолинии ДКМВ диапазона / **В.О. Варламов** // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19. № 2. С. 23-30. – doi: 10.36724/2072-8735-2025-19-2-23-30.
2. Варламов В.О. Алгоритм когерентной обработки широкополосных недвоичных сигнально-кодовых конструкций для передачи речи в декаметровом радиоканале / **В.О. Варламов**, Е.М. Лобов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19. № 12. С. 59-76.
3. Лобов Е.М. Современные методы обработки широкополосных сигналов в условиях дисперсионных искажений в ионосфере Земли / Е.М. Лобов, Н.А. Кандауров, Е.О. Лобова, **В.О. Варламов** [и др.] // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 17-31. – doi: 10.18127/j00338486-202312-03.
4. Варламов В.О. Сравнение качества оптимальной фильтрации наклона дисперсионной характеристики фильтром Стратоновича и сигма-точечным фильтром Калмана / **В.О. Варламов**, Н.А. Кандауров, Е.О. Лобова, Е.М. Лобов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 1. С. 12-19. – doi: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-12-19.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных

Scopus и Web of Science

5. Lobov E.M. Synthesis of the Optimal Dispersion Slope and Phase Joint Filtering Algorithm for the Broadband Signal in the Ionospheric Radio Channel / E.M. Lobov, E.O. Lobova, **V.O. Varlamov** // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2023. – 5 p. – doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092032.
6. Lobova E.O. Comparison of Optimal Filtering Algorithms of the Channel Dispersion Slope and the Signal Phase Shift / E.O. Lobova, **V.O. Varlamov**, E.M. Lobov // 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2023. – 5 p. – doi: 10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178533.

7. Lobov E.M. On Progressive Edge Growth Parity Check Matrix Generation for NB-LDPC Codes in HF Communications / E.M. Lobov, A.D. Grigorieva, **V.O. Varlamov** // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2024. Vol. 7. No. 1. P. 272-276. – doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617767.
8. Chertova O.G. Development of Turbo Product Code with Elementary Encoders as LDPC Code / O.G. Chertova, D.S. Chirov, A.D. Grigorieva, **V.O. Varlamov** // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2024. Vol. 7. No. 1. P. 20-25. – doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496787.
9. Kandaurov N.A. Analysis of Interference HF Range / N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, **V.O. Varlamov** // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2022. – doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744307.
10. Varlamov V.O. Error Correction Codes Parameters Optimization in Wideband HF Range Digital Voice Radio Links / **V.O. Varlamov**, E.M. Lobov // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2024. – 4 p. – doi: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496777.
11. Varlamov V.O. Algorithm of Ionospheric Channel Dispersion Characteristic Slope and Transmission Coefficients Joint Optimal Filtering / **V.O. Varlamov**, E.O. Lobova, E.M. Lobov // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2024. – 5 p. – doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617471.

Публикации в других изданиях

12. Varlamov V.O. Study of HF Broadband Digital Radio Line Signals Coherent Reception Device Noise Immunity / **V.O. Varlamov** // SynchroInfo Journal. – 2026. – Vol. 12, №1. – P. 2-12.
13. Лобов Е.М. Современные методы обработки широкополосных сигналов радиолиний связи в условиях дисперсионных искажений в ионосфере Земли / Е.М. Лобов, Н.А. Кандауров, Е.О. Лобова, **В.О. Варламов** [и др.] // Распространение радиоволн: Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции. Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. С. 43-50.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668903 Российская Федерация. Программа для работы SDR Red Pitaya по расписанию / Н.А. Кандауров, В.И. Липаткин, **В.О. Варламов** [и др.]; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2023664705; заявл. 13.07.2023; опубл. 05.09.2023. – 1 с.