На правах рукописи

Мирошникова Наталия Евгеньевна

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ СЛЕПЫХ ЭКВАЛАЙЗЕРОВ ДЛЯ СИСТЕМ КОГНИТИВНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель: Чиров Денис Сергеевич – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела 48 научно-исследовательской части МТУСИ

Официальные оппоненты: Голубев Евгений Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, советник руководителя ФГУП «18ЦНИИ»

Вечтомов Виталий Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Ордена Трудового Красного Знамени «Научно-исследовательский институт радио»

Защита состоится «15» ноября 2018 г. в 13:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-448 (малый зал заседаний)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ (http://srd-mtuci.ru/images/Dis-Miroshnikova/dis-Miroshnikova.pdf)

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.219.001.04
к.т.н., доцент Терешонок Максим Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время, благодаря появлению новых технологий, активно развиваются системы ионосферной радиосвязи с мобильными абонентами. Учитывая протяженность территории России, слабо развитую инфраструктуру на большей части восточной территории, а также ограничения на организацию спутниковой связи для подвижных абонентов на северных широтах, развитие систем ионосферной связи может являться наилучшей альтернативой.

Главными аргументами против использования ионосферных систем связи может служить низкая пропускная способность ионосферных каналов и низкая доступность из-за быстро меняющихся условий в ионосферном канале. Однако развитие новых методов формирования и обработки сигналов (например, методов пространственного и поляризационного разнесения, методов «слепой» оценки канала) позволяют значительно повысить пропускную способность ионосферных каналов. Так, одним из актуальных вопросов повышения качества радиосвязи становится адаптация параметров используемых радиосигналов (вида модуляции, кодирования, скорости передачи информации) и адаптация рабочих частот в зависимости от состояния нестационарного ионосферного канала.

Такая адаптация может быть достигнута за счет разработки управления параметрами радиосвязи на основе технологии когнитивного радио. Согласно определению МСЭ-Р, когнитивной называется радиосистема, «использующая технологию, позволяющую этой системе получать знания о своей среде эксплуатации и географической среде, об установившихся правилах и о своем внутреннем состоянии; динамически и автономно корректировать свои эксплуатационные параметры и протоколы, согласно полученным знаниям, для достижения заранее поставленных целей; и учиться на основе полученных результатов» .

Ионосферный канал связи характеризуется многолучевостью и, как следствие, высоким уровнем межсимвольной интерференции (МСИ) и глубокими замираниями. Для успешного восстановления сигнала, переданного через многолучевой канал, требуется коррекция искажений вызванных МСИ. Устройство, реализующее данную операцию, в современной литературе чаще всего называют «эквалайзером».

От качества восстановления сигналов зависит качество работы управляющих блоков когнитивной системы. Таким образом, для решения задачи управления параметрами радиосвязи в зависимости от состояния нестационарного ионосферного канала с применением методов когнитивного радио, в первую очередь, необходимо на физическом уровне сети решить вопросы идентификации канала и построения адаптивного эквалайзера.

В настоящее время в ионосферных системах связи используются эквалайзеры, чей алгоритм работы основан на критерии минимума среднеквадратической ошибки (СКО). Данные методы предполагают использование в сигнале тренировочной последовательности для оценки канала и «тренировки» эквалайзера. Для ионосферных систем связи, работающих на основе стандарта MIL-188-110x, эта тестовая последовательность может занимать от 20 до 50 % передаваемого кадра в зависимости от выбранной скорости передачи, что существенно ограничивает информационную скорость. Кроме того, при смене условий в канале требуется время на перенастройку на новый формат кадра.

Таким образом, актуальной становится задача поиска методов построения эквалайзеров для реализации когнитивных ионосферных систем связи. Одним из перспективных подходов к построению когнитивных систем является использование на физическом уровне так называемых методов слепой обработки сигналов. Под слепой обработкой подразумевается работа только с отсчетами принимаемых антенной решеткой (АР) сигналов от источников радиоизлучения (ИРИ) без использования априорной информации об их параметрах. Использование в приемнике «слепого эквалайзера» позволяет отказаться от передачи тестовой последовательности для идентификации канала и подстройки эквалайзера, тем самым увеличить информационную скорость передачи и построить систему, способную работать без априорного знания параметров передаваемых сигналов в условиях нестационарного канала передачи, что является ключевым условием для когнитивных систем.

Степень разработанности темы.

В развитие методов слепой обработки и, в частности, построения адаптивных слепых эквалайзеров, внесли вклад такие российские ученые, как О.В. Горячкин, В.И. Джиган, С.С. Аджемов, а также зарубежные специалисты A.Cichocki, S Amari, L.Chang , D.N. Godart , Y. Sato, R. Otnes, C. Dougles, J Cardoso и другие.

Вопросы приложения методов слепой обработки для построения систем когнитивной радиосвязи рассмотрены в работах J Smaragdis, P.Ferreira

В России работы по разработке современных адаптивных систем ионосферной связи ведутся в институте солнечной и земной физики СОРАН (ИСЗФ), Марийском государственном университете, Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ), Ростовском государственном университете (РГУ), Самарском филиале Научно-исследовательского института радио (СОНИИР), Московском техническом университете связи и информатики (МТУСИ).

Существующие в настоящее время методы построения слепых эквалайзеров можно разделить на две категории: это методы основанные на теории информации (минимизация взаимной информации или максимизация энтропии) и методы с использованием кумулянтов.

Алгоритмы Бусганга и алгоритм натурального градиента являются представителями первой категории. Алгоритмы Бусганга являются итеративными алгоритмами и используют классический метод стохастического градиента для оптимизации целевой функции, зависящей от выходного сигнала эквалайзера. Эти алгоритмы просты и легки в реализации, однако могут сходиться к неправильным решениям. Алгоритм натурального градиента был разработан С. Амари с целью преодоления недостатков методов Бусганга. Как показали исследования, использование в задаче оптимизации целевой функции метода натурального градиента позволяет значительно улучшить эффективность работы слепых эквалайзеров по сравнению с оптимизацией методом стохастического градиента. В случае алгоритмов, основанных на вычислении кумулянтов, для вычисления коэффициентов слепого эквалайзера используются статистики высоких порядков принятых сигналов.

Несмотря на все теоретические достоинства методов построения слепых эквалайзеров, такие их недостатки, как высокая вычислительная сложность, медленная сходимость и невозможность отслеживать быстрые вариации параметров канала долгое время делали их сложно применимыми на практике. Поэтому основной задачей в настоящее время является разработка таких методов и алгоритмов построения слепых эквалайзеров, которые бы позволяли обеспечивать быструю сходимость в условиях нестационарной модели канала.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности систем ионосферной связи за счет применения слепых эквалайзеров для оперативной компенсации искажений, обусловленных МСИ в условиях априорной неопределенности характеристик ионосферного канала.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих методов построения систем адаптивной ионосферной радиосвязи и возможности их модернизации с использованием технологии когнитивного радио;
2. Анализ известных методов построения слепых эквалайзеров и эффективности их использования в приемных устройствах когнитивных систем ионосферной радиосвязи;
3. Выбор и обоснование структуры слепого эквалайзера для приемных устройств когнитивных систем ионосферной радиосвязи ;
4. Разработка метода и алгоритма построения слепых эквалайзеров для систем когнитивной ионосферной радиосвязи, способного работать в условиях априорной неопределенности параметров полезных сигналов, характеристик канала и геометрии антенной решетки;
5. Анализ работоспособности разработанного метода как с использованием имитатора ионосферного канала, так и в условиях реального ионосферного канала.

Научная новизна работы состоит в развитии методов построения слепых эквалайзеров для когнитивных систем ионосферной радиосвязи. Разработанный метод построения эквалайзера основан на математическом аппарате слепого разделения сигналов, который ранее не применялся в данной области. Адаптивный эквалайзер, построенный с использованием разработанного метода и алгоритма, отличается от существующих возможностью работы без передачи тренировочной последовательности в условиях нестационарного ионосферного канала и априорной неопределенности параметров полезных сигналов, что позволяет повысить скорость передачи на 10-50% и увеличить доступность ионосферных каналов связи до 20%.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в сформулированных требованиях к структуре слепого эквалайзера и к методу построения слепого эквалайзера для когнитивных систем ионосферной радиосвязи. Разработанный метод построения слепого эквалайзера позволяет работать в условиях нестационарного ионосферного канала и априорной неопределенности параметров полезных сигналов.

Практическая значимость работы заключается в том, что *разработанный в диссертации метод* позволяет:

– повысить скорость передачи в каналах ионосферной радиосвязи за счет отсутствия передачи тренировочной последовательности от 10 до 50 %;

– работать в условиях априорной неопределённости параметров принимаемых сигналов;

– организовать устойчивую работу алгоритмов управления параметрами радиосвязи, требуемую в когнитивных системах связи.

Использование и внедрение результатов диссертации. Разработанный в диссертации метод построения слепого эквалайзера использован в МТУСИ при выполнении НИР «Творчество», предложенная структура эквалайзера при выполнении СЧ ОКР «Вавилон-М», разработанный алгоритм работы слепого эквалайзера при выполнении СЧ ОКР «Векша-М». Приведенные теоретические результаты также использованы в ГБ НИР ПВШ (Госбюджетной научно-исследовательской работе по проблемам высшей школы) выполняемой на базе кафедры РТС МТУСИ при подготовке практических занятий по дисциплине «Перспективные системы радиосвязи и радиодоступа». Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами.

Методология и методы исследования. При разработке метода построения слепого эквалайзера использован математический аппарат теории информации и математической статистики, а также теории оптимизации в римановом многообразии. При проведении иссле-

дований широко использовались методы математического моделирования, в частности метод Монте-Карло.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный метод и алгоритм построения слепого эквалайзера с оптимизацией квазиньютоновским методом для ионосферных систем связи позволяет повысить информационную скорость передачи на 10-50 % за счет работы эквалайзера без использования тренировочной последовательности.
2. Предложенный метод построения слепого эквалайзера позволяет работать без передачи тестовой последовательности в условиях нестационарного ионосферного канала и априорной неопределенности параметров полезных сигналов.
3. Предложенные метод и алгоритм построения слепого эквалайзера дают возможность увеличить показатель доступности каналов ионосферной связи до 20% по сравнению с традиционными системами ионосферной связи

Личный вклад. Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены соискателем лично.

Достоверность. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректностью применения математического аппарата и согласованностью результатов, полученных с помощью разработанных методик, с результатами теоретического анализа и имитационного моделирования. Полученные результаты обсуждались со специалистами на научных конференциях.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены и одобрены на 4 международных отраслевых научно-технических конференциях «Технологии информационного общества» (г. Москва, 2013, 2014, 2015 и 2016 г.), на 2 международных научно-технических конференциях «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» (г. Самара, 2016 г., г. Казань, 2017 г.), на международной научной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 2016 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 7-ми статьях в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК, в тезисах докладов 5-ти научных конференций и 2-х отчетах по ГБ НИР ПВШ. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и одного приложения. Объем диссертации – 134 страницы, 34 рисунка и 15 таблиц.

В библиографию включено 115 наименований отечественной (19) и зарубежной (96) литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и положения, выносимые на защиту, определена структура и краткое содержание разделов диссертации, сведения о публикациях и апробации работы.

В первом разделе выполнена постановка цели работы.

На основе имеющихся публикаций приведен краткий анализ существующих систем адаптивной ионосферной радиосвязи, проанализированы их характеристики, рассмотрены рекомендации МСЭ-Р по разработке адаптивных систем ионосферной связи. Также в главе проведен анализ существующих зарубежных стандартов ионосферной связи, в частности, рассматриваются алгоритмы назначения наборов частот и автоматического составление канала связи. Показано, что современные системы ионосферной связи уже обладают свойствами когнитивности, а значит, вопрос повышения эффективности этих систем за счет более гибкой адаптации к окружающим условиям можно рассматривать как вопрос когнитивного радио.

Результат сканирования декаметрового диапазона частот, используемого ионосферными системами радиосвязи, показывает наличие свободных частот для перестройки, однако значения частот и время, в течение которого они свободны, постоянно меняются в широком диапазоне. Используемый в когнитивном радио принцип динамического доступа к спектру может значительно повысить доступность ионосферных систем связи. Для осуществления динамического доступа к спектру требуется реализация постоянного мониторинга состояния радиоканала, что не может быть реализовано существующими протоколами работы ионосферных систем связи. С учетом сложных и быстроменяющихся условий в ионосферном радиоканале, целью исследования было выбрано повышение эффективности систем ионосферной связи за счет применения слепых эквалайзеров для оперативной компенсации искажений, обусловленных МСИ в условиях априорной неопределенности характеристик ионосферного канала. Использование математического аппарата слепой обработки сигналов позволит не передавать тренировочную последовательность для оценки канала и настройки эквалайзера, что позволит увеличить информационную скорость передачи и не тратить время на перестройку передаваемого кадра, при смене условий в канале.

Второй раздел посвящен анализу известных методов построения слепых эквалайзеров и анализу эффективности их использования в приемных устройствах когнитивных систем ионосферной радиосвязи.

Было рассмотрено два типа структуры эквалайзера: прямая и косвенная.

Для случая прямой структуры, рассматривалась модель смешивания, в которой вектор **x**(n) отсчетов принятых сигналов, можно записать в виде:

$$x(n) = \sum_{p=0}^{K} \boldsymbol{H}_p(n)\boldsymbol{s}(n-p) \ , \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{x}(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_P(n)]^T$- вектор отсчетов принятых сигналов в момент времени n, P-число приемных антенн, $\boldsymbol{s}(n) = [s_1(n), s_2(n), \dots, s_N(n)]^T$ – вектор отсчетов передаваемых сигналов в момент времени *n*, N- число передаваемых сигналов; $\boldsymbol{H}_p(n)$- смешивающая матрица размерностью $P \times N$ в момент времени *n*, *K*-порядок смешивающего фильтра.

Задача построения слепого эквалайзера рассматривается как задача поиска инверсного к $\boldsymbol{H}(p)$ фильтра $\boldsymbol{W}(p)$, сигнал на выходе которого можно представить в виде:

$$y(n) = \sum_{p=0}^{L} \boldsymbol{W}(p)\boldsymbol{x}(n-p) \qquad (2)$$

, где: $\boldsymbol{y}(n) = [y_1(n), y_2(n), \dots, y_N(n)]^T$-вектор отсчетов на выходе системы разделения; L-порядок разделяющего фильтра; $\boldsymbol{W}(p)$- разделяющая матрица размерностью $N \times P$ в момент времени p.

Для решения этой задачи было рассмотрено несколько известных алгоритмов построения слепых эквалайзеров, использующих модель (1): алгоритм постоянного модуля (constant modulus algorithm, CMA), энтропийный метод (алгоритм натурального градиента) и алгоритм, основанный на вычислении статистик высокого порядка.

Помимо рассмотренного выше подхода, был исследован еще один подход к построению слепых эквалайзеров. Он состоит в использовании классических методов слепого разделения на базе анализа независимых компонент (АНК), которые уже успели хорошо показать себя на практике. Для этого модель (1) была преобразована к виду, удобному для использования алгоритмов на базе анализа независимых компонент.

В этом случае **x**(n) – вектор комплексных отсчетов на выходе антенны, можно записать в виде:

$$\mathbf{x}(\mathrm{n}) = \mathbf{H}\mathbf{s}(n) + \mathbf{v}(n), \qquad (3)$$

где $\boldsymbol{x}(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_P(n)]^T$- вектор отсчетов принятых сигналов в момент времени n; $\boldsymbol{s}(n) = [s_1(n), s_2(n), \dots, s_N(n)]^T$ – вектор отсчетов передаваемых сигналов в момент времени n; $\boldsymbol{v}(n) = [v_1(n), v_2(n), \dots, v_P(n)]^T$- отсчеты белого гауссовского шума в момент времени n, $\boldsymbol{H}$- смешивающая матрица размерностью $P \times N$.

В отличие от модели (1), использующей свертку, модель (3) представляет обой линейную смесь сигналов, т.е. к этой модели применимы алгоритмы АНК. Для модели (3) были рассмотрены такие известные алгоритмы АНК, как: SOBI, JADE, EFICA, AMUSE.

В качестве первого параметра оценки эффективности разделения было использовано отношение сигнал/помеха (SIR, signal-to-interference) на выходе алгоритма. Для каждой пары сигналов (y_i, s_j) отношение SIR будет определяться выражением:

$$\mathrm{SIR}_{\mathrm{Sij}} = -10\log 10\left(\frac{\left\|y_i - s_j\right\|^2}{\left\|s_j\right\|^2}\right). \qquad (4)$$

Также в качестве параметра оценки эффективности работы использовалось значение уровня взаимной интерференции Misi, который можно оценить как

$$Misi = \sum_{l=1}^{N} \frac{\sum_j \sum_p |G_{pij}|}{max_{p,j}|G_{pij}|} - 1 + \sum_{j=1}^{N} \frac{\sum_i \sum_p |G_{pij}|}{max_{p,i}|G_{pij}|} - 1 \qquad (5)$$

, где: G_{pij}элемент глобальной матрицы смешивания $\mathrm{G(z)} = \mathrm{W(z)}H(\mathrm{z})$

В таблицах 1, 2 приведены значения отношения SIR, усредненные по результатам ста экспериментов анализа Монте-Карло. Анализ состоял из 100 испытаний, в каждом из которых случайным образом менялись элементы матрицы смешивания. На антенны поступала смесь двух сигналов с различными видами модуляции, используемыми в системах ионосферной связи. Длина выборки 5000 отсчетов.

В таблице 1 приведены величины средних значений SIR для смеси сигналов с BPSK и QPSK модуляцией. Модель смешивания (3). Также приведены значения SIR при добавлении к смеси отсчетов шума. Модель шума представляет с собой гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией равной 1.

Таблица 1 - Средние значения SIR для смеси сигналов с BPSK и QPSK модуляцией

Eb/No (дБ) / Алгоритм	Без шума	20	10	5
AMUSE	30	25	20.4	18.1
SOBI	36.4	27	23.04	18.5
JADE	7.42	6.89	5.10	4.45
EFICA	37	27.59	23.7267	16.95

В таблице 2 приведены величины средних значений SIR для смеси сигналов с BPSK и QPSK модуляцией при использовании модели смешивания (1). Также приведены значения SIR при добавлении в смеси отсчетов шума. Модель шума представляет с собой гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией равной 1.

Таблица 2 – Средние значения SIR для смеси сигналов с BPSK и QAM-16 модуляцией

Eb/No (дБ) / Алгоритм	Без шума	20	10	5
CMA	27.58	21.92	15.59	10.03
Энтропийный метод	28.28	27.055	25.1612	24.447
Алгоритм на основе кумулянтов четвертого порядка	34	28.67	20.75	10.76

Как видно из значений, представленных в таблицах, наиболее эффективным, в случае оказывается алгоритм EFICA. Максимальное значение SIR, полученное при использовании алгоритма EFICA составляет 37 дБ и получено при разделении смеси сигналов BPSK и QPSK модуляцией. Минимальное значение SIR получено при использовании алгоритма JADE и составляет 4.447 дБ. Однако энтропийный метод, при использовании модели (1), дает лучшие результаты для малых отношений Eb/No.

На рисунке 1 представлены зависимости уровня взаимной интерференции Misi от номера итерации для рассмотренных выше алгоритмов. Число коэффициентов эквалайзера: L=32.

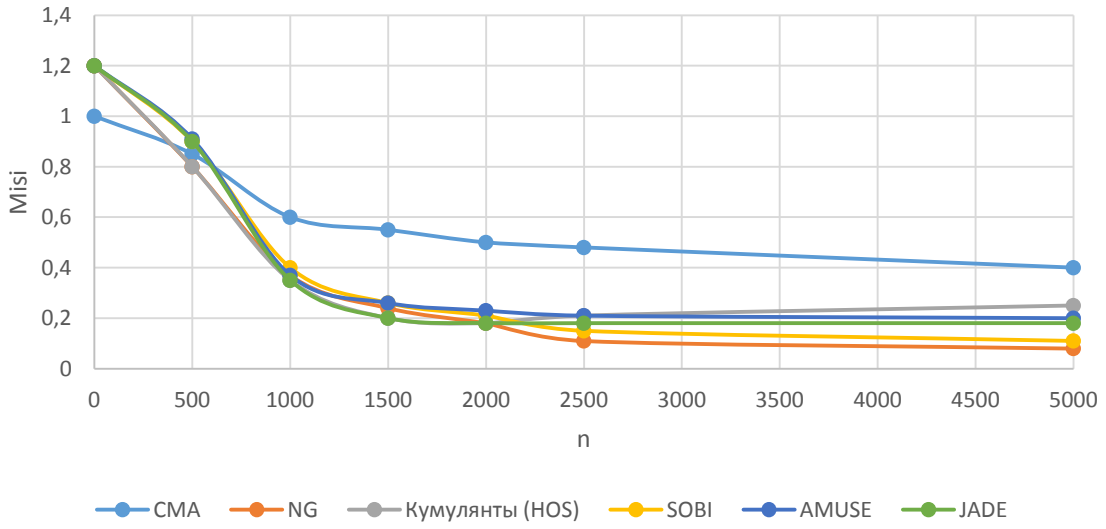


Рисунок 1 – Зависимость уровня взаимной интерференции Misi для различных алгоритмов слепого разделения

Из приведенного на рисунке 1 сравнения алгоритмов можно отметить, что наименьший уровень межсимвольной интерференции дает использование энтропийного метода (NG).

Для случая косвенной структуры, когда обновление коэффициентов эквалайзера происходит по результатам оценки импульсной характеристики канала, были рассмотрены такие алгоритмы как метод взаимных отношений, метод максимального правдоподобия и метод канального подпространства.

На рисунке 2 представлены зависимости уровня взаимной интерференции Misi от номера итерации для случая косвенной структуры эквалайзера. Каждое значение Misi является усредненным по результатам 111-ти испытаний. Число коэффициентов эквалайзера: L=32.

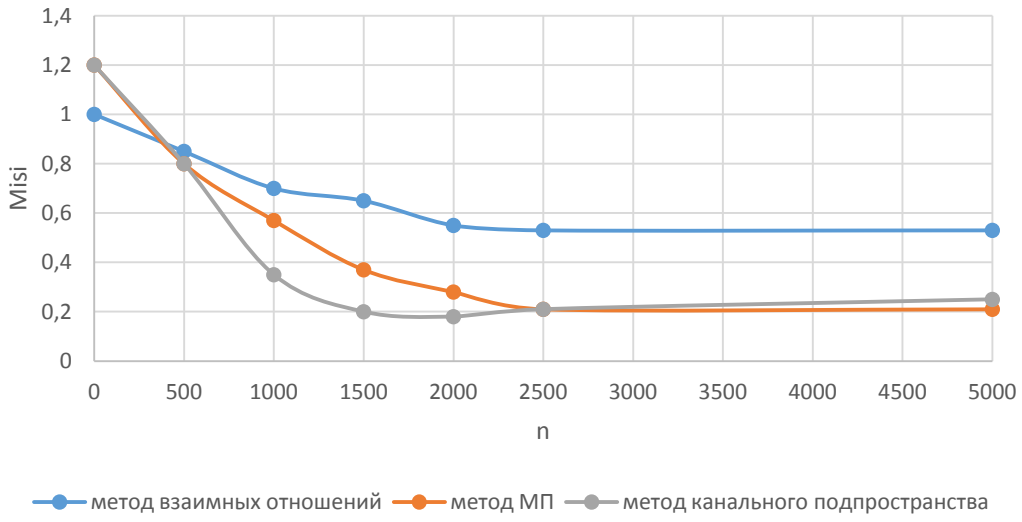


Рисунок 2 – Зависимость уровня взаимной интерференции Misi для различных методов построения слепых эквалайзеров с косвенной структурой

Из проведенного в разделе анализа алгоритмов был сделан вывод о том, что для слепых методов прямая структура дает лучшее подавление межсимвольной интерференции.

Для проверки работоспособности выбранного энтропийного метода в условиях нестационарного канала был проведен эксперимент с использованием модели ионосферного канала МСЭ F.1487 для средних широт в умеренном состоянии.

На рисунке 3 представлены зависимости средней квадратической ошибки на выходе эквалайзера от номера итерации при работе модели с использованием эквалайзеров, работающих по тренировочной последовательности и при работе с слепым эквалайзером, работающим по алгоритму натурального градиента. В качестве эквалайзеров, работающих по тренировочной последовательности, взяты эквалайзеры, работающие по алгоритмам RLS, LMS и SignLMS.

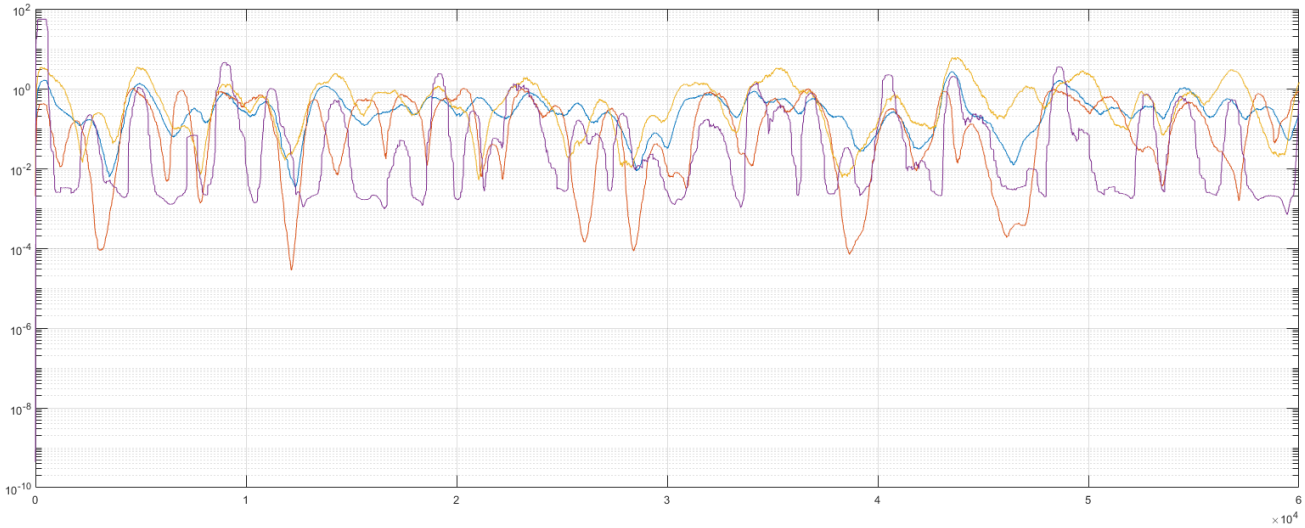


Рисунок 3 – Зависимости средней квадратической ошибки от номера итерации при работе модели с использованием эквалайзеров, работающих по тренировочной последовательности и при работе с слепым эквалайзером, работающим по алгоритму натурального градиента(желтый)

Из рисунка 3 видно, что среднеквадратическая ошибка на выходе алгоритма натурального градиента сравнима, а в некоторых случаях хуже, чем даваемая алгоритмом LMS (оранжевый).

Стоит отметить, что одним из недостатков, приведенных выше методов, затрудняющим решение поставленной задачи является то, что для работы этих методов необходимо точное знание общего количества принимаемых сигналов. То есть на приеме необходимо производить оценку этого числа. В том случае, если предполагаемое число сигналов меньше фактического, наблюдается значительное ухудшение результирующего значения Misi. Вторая трудность сопряжена с нестабильностью и медленной скоростью сходимости работы рассмотренных алгоритмов в условиях нестационарного канала, особенно при наличии быстрых замираний. Отсюда был сделан вывод, что существующие методы не могут непосредственно использоваться для построения эквалайзера когнитивной ионосферной связи, а значит, для решения поставленной в диссертации задачи требуется их усовершенствование.

Третий раздел посвящен разработке метода и алгоритма построения слепого эквалайзера для когнитивных систем ионосферной связи.

По результатам анализа, выполненного в разделе 2, в качестве основы для построения эквалайзера выбран энтропийный метод.

Так же, как и в рассмотренном в главе 2 методе, в качестве целевой функции для оптимизации используется дивиргенция Кульбака-Лейблера:

$$J(W) = -\frac{1}{2} log|\det(W_0)| - \sum_{i=1}^{n} log q_i(y_i(n)) \quad , \qquad (6)$$

где $q_i(.)$-аппроксимация истинной функции плотности вероятности распределения оценки передаваемых сигналов.

Поскольку пространство матриц **W** является Римановым, то вместо классического градиентного спуска для поиска минимума был использован квази-Ньютоновский BFGS алгоритм в Римановом многообразии. Рассмотренный в главе 2 энтропийный метод плохо работает в условиях быстрого изменения амплитуд принимаемых сигналов при передаче по нестационарному ионосферному каналу. Чтобы решить эту проблему в алгоритме были наложены ограничения в виде $f(y_i)y_i = \lambda_{ii}$

В результате, алгоритм для Риманова многообразия принял вид:

1. **Задать:** целевую функцию $J(\boldsymbol{W_p})$, начальные значения параметров $\boldsymbol{W_p(0)}$**,** начальный шаг $\propto$, точность ε, начальные значения матриц аппроксимации Гессиана $Q(o) = I$, определить Риманово многообразие, выбрав метрику, векторный транспорт $\Gamma_{W(i)}^{W(i+1)}$.
2. **Положить** i=0

3. Do until $\|\nabla J(\boldsymbol{W_p}) < \varepsilon\|$:

3.1 $\boldsymbol{p}(i) = -\mu(i)\boldsymbol{Q}(i)\nabla J(\boldsymbol{W_p}(i))$;

3.2 $\mu(i) = linemin(J, \boldsymbol{W_p}(i), \boldsymbol{p}(i))$;

3.3 $\boldsymbol{m}(i) = \Gamma_{W(i)}^{W(i+1)}\mu(i)\boldsymbol{p}(i)$;

3.4 $\boldsymbol{W_p}(i+1) = \boldsymbol{W_p}(i) + m(i)$;

3.5 $\boldsymbol{s}(i) = \nabla J\left(\boldsymbol{W_p}(i+1)\right) - \Gamma_{W(i)}^{W(i+1)}\nabla J(\boldsymbol{W_p}(i))$;

3.6 $\boldsymbol{Q}(i+1)\theta = \widetilde{\boldsymbol{Q}}(i)\theta + \frac{\{m(i)\theta m^H(i)\}}{m^H(i)s(i)} + \frac{\{\theta s^H(i)\widetilde{\boldsymbol{Q}}(i)^{\boldsymbol{H}} m^H(i)\}}{m^H(i)s(i)} - \frac{\{\theta s^H(i)\widetilde{\boldsymbol{Q}}(i)m(i)\}}{m^H(i)s(i)} - \frac{\{\widetilde{\boldsymbol{Q}}(i)\theta m^H(i)s(i)\}}{m^H(i)s(i)}$,

где $\widetilde{\boldsymbol{Q}}(i) = \Gamma_{W(i)}^{W(i+1)} \circ \boldsymbol{Q}(i)\Gamma_{W(i)}^{W(i+1)} \circ \left(\Gamma_{W(i)}^{W(i+1)}\right)^{-1}$

4. End.

Настройка коэффициентов эквалайзера производится согласно выражению:

$$\boldsymbol{W_p}(n+1) = \boldsymbol{W_p}(n) - \mu\left\{\boldsymbol{Q}_A(n)\frac{\partial J(\boldsymbol{W_p})}{\partial \boldsymbol{W_p}^*} + \boldsymbol{Q}_B(n)\frac{\partial J(\boldsymbol{W_p})}{\partial \boldsymbol{W_p}}\right\} \quad . \qquad (7)$$

$$\boldsymbol{W_p}(n+1) =$$

$$\boldsymbol{W_p}(n) - \mu\left\{\boldsymbol{Q}_A(n)\sum_{q=0}^{p}\left(\boldsymbol{\Lambda}(n)\delta_{0q} - \boldsymbol{R}_{fy}(n,q)\right)\boldsymbol{W}_{p-q}(n) + \boldsymbol{Q}_B(n)\sum_{q=0}^{p}\left(\Lambda(n)\delta_{0q} - R_{fy}(n,q)\right)\boldsymbol{W}_{p-q}(n)\right\} \quad , \qquad (8)$$

где $\boldsymbol{R_{fy}}(n,q) = (1-\mu_0)\boldsymbol{R}_{fy}(n-1,q) + \mu_0 f\big(y(n)\big)y^T(n-q),\ \ q = 0,1,\dots,L$

$\boldsymbol{\Lambda}(n) = (1-\mu_0)\boldsymbol{\Lambda}(\mathrm{n}-1) + \mu_0 diag\{\boldsymbol{f}\big(y(n)\big)g^T(y(n))\}$,

где $f\big(y(n)\big)$- вектор из значений функции $\mathrm{f_i(y_i(n))}$, такой, что:

$$f_i\big(y_i(n)\big) = -\frac{dlog\ q_i(y_i(n))}{dy_i(n)}.$$

Функция $q_i(y_i(n))$ зависит от предположения о распределении передаваемых сигналов и как показали приведенные в диссертации исследования, ее выбор является критичным для стабильности работы алгоритма и его быстрой сходимости. Для возможности работы с различными типами распределений в алгоритме предусмотрен адаптивный выбор функций $f_i(y_i)$ и $g_i(y_i)$ в зависимости от оценки функции эксцесса

$$f_i(y_i) = \begin{cases} \dfrac{y_i}{\hat{\sigma}_i^{2-r_i}} \text{ если } \kappa_4(y_i) > \delta_0 \\ y_i \end{cases}$$

$$g_i(y_i) = \begin{cases} y_i \text{ если } \kappa_4(y_i) > -\delta_0 \\ \dfrac{y_i}{\hat{\sigma}_i^{2-r_i}} \quad otherwise \end{cases}$$

$\kappa_4(y_i) = \frac{M\{y^4{}_i\}}{M^2\{y^2{}_i\}} - 3$ - нормированная функция эксцесса, δ_0 – положительная малая константа

Эффективность работы разработанного метода построения слепого эквалайзера оценивается величиной межсимвольной интерференции:

$$Misi = \sum_{l=1}^{N}\frac{\sum_j\sum_p|G_{pij}|}{max_{p,j}|G_{pij}|} - 1 + \sum_{j=1}^{N}\frac{\sum_i\sum_p|G_{pij}|}{max_{p,i}|G_{pij}|} - 1$$

На рисунке 4 представлена характеристика изменения величины Misi от номера итерации для алгоритмов, использующих метод классического градиента, натурального градиента и предложенного метода построения слепого эквалайзера.

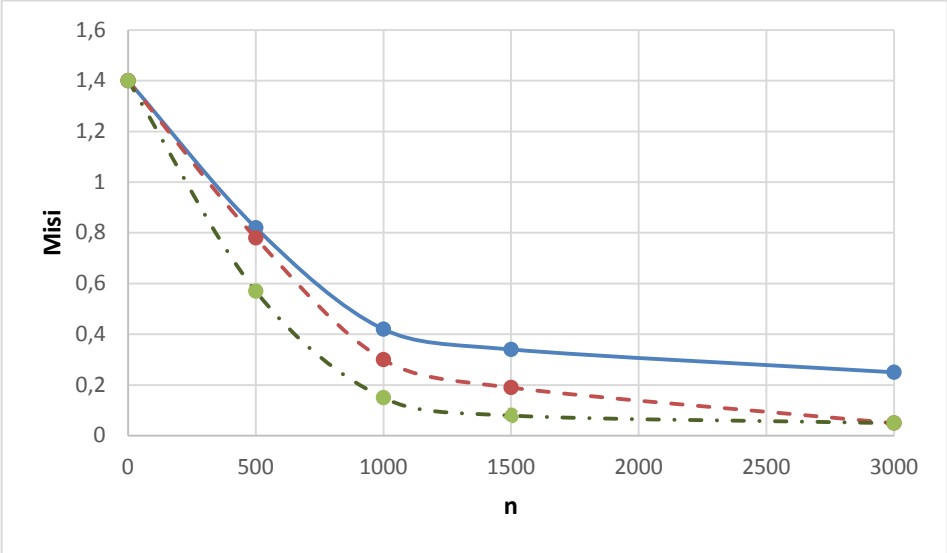


Рисунок 4 – Характеристика изменения Misi при использовании для оптимизации алгоритма стохастического градиента (сплошная линия), натурального градиента (пунктирная линия) и предложенного алгоритма построения слепого эквалайзера (штрихпунктирная линия)

Как видно из рисунка 4, для достижения значения Misi <0.2 при использовании классического алгоритма стохастического градиента потребуется порядка 8000 тысяч итераций, в случае алгоритма натурального градиента порядка 2000 итераций, в случае предложенного алгоритма, порядка 900 итераций.

На рисунке 5 приведены зависимости частоты ошибок (BER) от отношения E_b/N_0 для систем, использующих эквалайзер с настройкой по тренировочной последовательности и предлагаемый слепой эквалайзер. В качестве эквалайзера, использующего тренировочную последовательность, выбран эквалайзер с обратной связью по решению с адаптацией LMS алгоритмом и RLS алгоритмом.

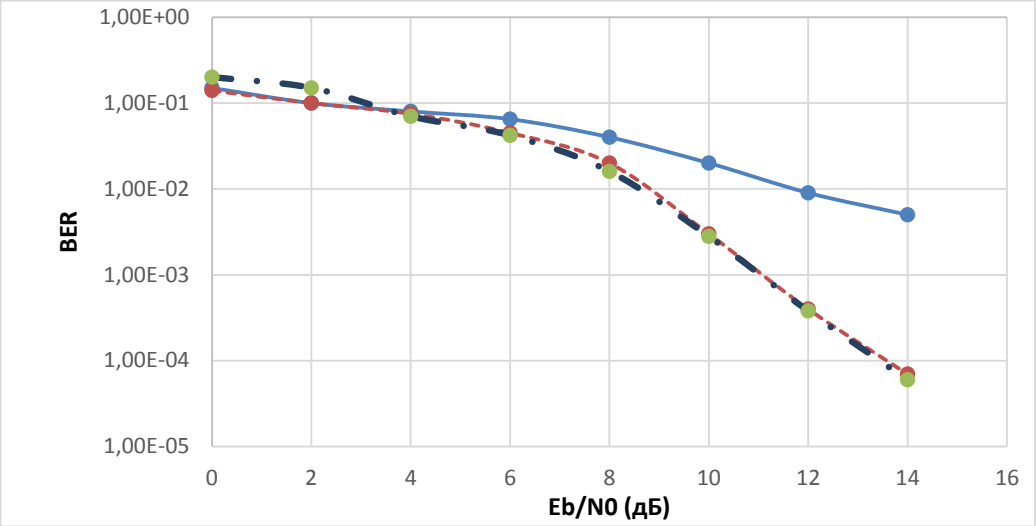


Рисунок 5 – Зависимости частоты ошибок (BER) от отношения E_b/N_0 для систем, использующих линейный эквалайзер, с адаптацией LMS алгоритмом (сплошная линия) и RLS алгоритмом (пунктирная линия), а так же разработанный слепой эквалайзер (штрихпунктирная линия).

Как видно из сравнения графиков, представленных на рисунке 5, система с разработанным слепым эквалайзером сравнима по помехоустойчивости с эквалайзером, работающим по алгоритму RLS, однако системы со слепым эквалайзером позволяют реализовать бо**л**ьшие скорости передачи за счет отсутствия тренировочной последовательности.

<u>В четвертом разделе</u> приведены результаты моделирования алгоритма на имитаторе ионосферного канала, согласно рекомендации МСЭ-Р F.1487, а также результаты, полученные при использовании записей реального ионосферного канала.

На рисунке 6 представлены сигнальные созвездия для двух QAM-4 сигналов на входе и выходе предложенного эквалайзера.

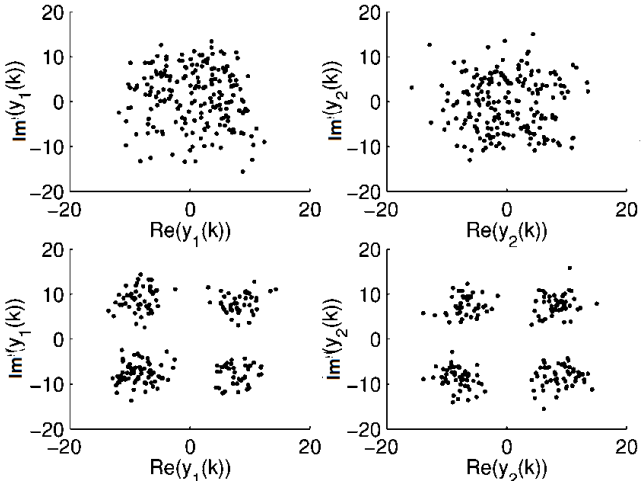
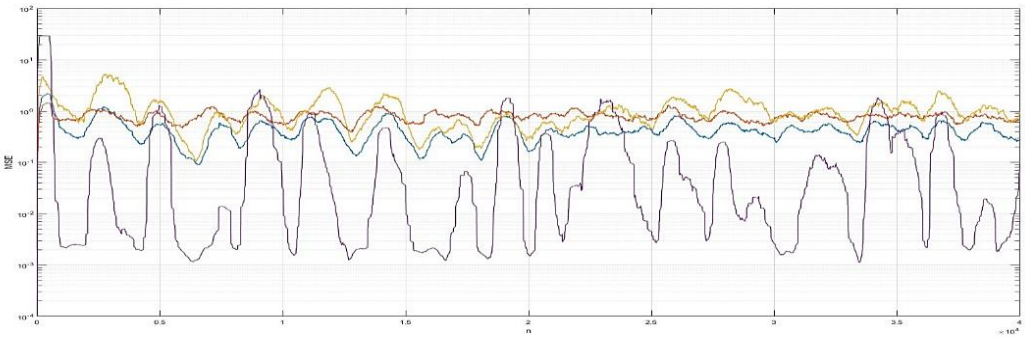


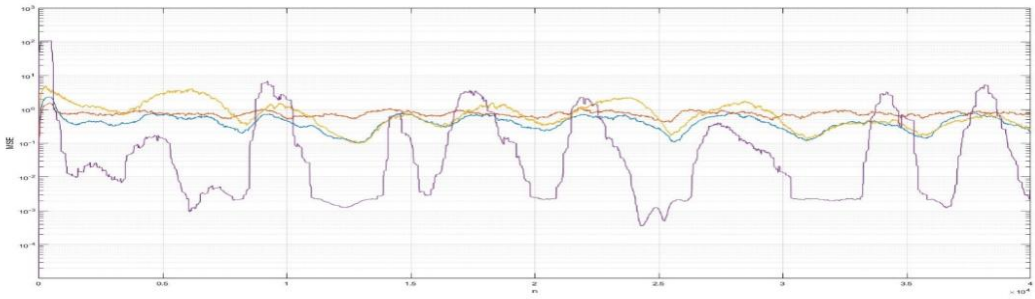
Рисунок 6 – Сигнальные созвездия на входе и на выходе эквалайзера

На рисунке 6 представлены зависимости средней квадратической ошибки от номера итерации при работе модели с использованием эквалайзеров, работающих по тренировочной последовательности и при работе с предложенным слепым эквалайзером. В качестве эквалайзеров, работающих по тренировочной последовательности взяты эквалайзеры, работающие по алгоритмам RLS, LMS и SignLMS.

Рассматривалось два случая: модель канала для средних широт в умеренном состоянии (рисунок 7 а) и модель канала для средних широт в возмущенном состоянии (рисунок 7 б).



а)



б)

Рисунок 7 – Зависимости средней квадратической ошибки от номера итерации при работе модели с использованием эквалайзеров, работающих по тренировочной последовательности и при работе с предложенным слепым эквалайзером (синий)

Из рисунка 7 видно, что предложенный эквалайзер способен эффективно отслеживать изменения ИХ канала с ошибкой меньшей, чем при использовании классических LMS эквалайзеров даже в возмущенном канале.

Рекомендацией МСЭ-Р F.1487 определены правила сравнения модемов ионосферных радиолиний. Для каждого сочетания относительной задержки между лучами и допплеровского сдвига определяется (измеряется) отношение сигнал/шум требуемое для достижения фиксированной частоты ошибок (BER).

Получив зависимости отношения сигнал/шум от каждого из параметров, можно определить границы работоспособности модема, в котором использован разработанный эквалайзер, для разных скоростей передачи. Эти требования сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Требования к параметрам канала для обеспечения работоспособности модема для разных скоростей передачи для достижения величины BER равной 10^{-3}

Скорость передачи (бит/с)	SNR (дБ)	Допплеровский сдвиг (Гц)	Задержка между лучами (мс)
2400	>14	< 4	< 5
1200	>7	< 8	< 5
600	>3	< 12	< 5
300	>0	< 16	< 5
150	>-3	< 10	< 5

В таблице 4 приведены аналогичные данные допустимых значений допплеровского сдвига и задержки при работе модели со слепым эквалайзером. Расширение области допустимых значений обозначено жирным цветом.

Таблица 4 – Требования к параметрам канала для обеспечения работоспособности модема, использующего слепой эквалайзер, для разных скоростей передачи для достижения величины BER равной 10^{-3}

Скорость Передачи (бит/с)	SNR (дБ)	Допплеровский сдвиг (Гц)	Задержка между лучами (мс)
2400	**>12**	**< 5**	< 5
1200	**>6**	**< 9**	< 7
600	>3	**< 14**	< 5
300	>0	< 16	< 5

Помимо проверки работоспособности на имитационной модели был проведен анализ доступности в условиях передачи по реальному каналу. Для анализа были использованы данные натурных испытаний. Отсчеты сигналов для эксперимента получены с выхода триортогональной антенной решетки. На антенну поступала смесь из трех сигналов с разными видами модуляции.

В течение десятиминутных интервалов производилась передача сигналов с различными типами модуляции на частотах от 2.8 до 21.9 МГц. Зондирующий сигнал использовался

для оценки состояния канала (величины доплеровского смещения и максимальной задержки).

Доступность заданной скорости передачи определялась как:

$$A = \frac{N_c}{N},$$

где: N - общее число 10-х интервалов за время проведения измерений (в том числе в течении которых связь была недоступна);

N_c- число десятиминутных интервалов в течении которых была возможна передача на заданной скорости, то есть значения SNR, допплеровского сдвига и задержки были в пределах указанных в таблице 4.

Полученные данные были разделены по времени дня, из-за изменения характеристик ионосферы в ночное время.

Для анализа влияния каждого из требований (SNR, допплеровский сдвиг, задержка) на значение величины доступности передачи на заданной скорости, анализ был проведен при фиксированном значении требований по остальным из трех параметров.

На рисунке 8 а, б, в представлены полученные зависимости для скорости передачи 1200 бит/с. Модуляция 8-PSK.

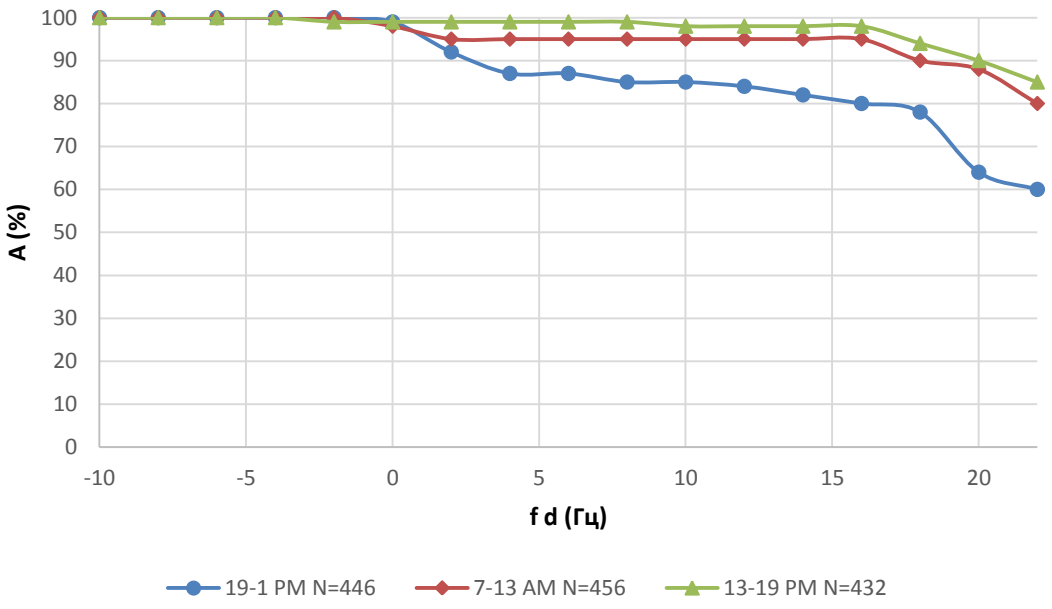


Рисунок 8а –Зависимость величины доступности от допустимого значения допплеровского сдвига

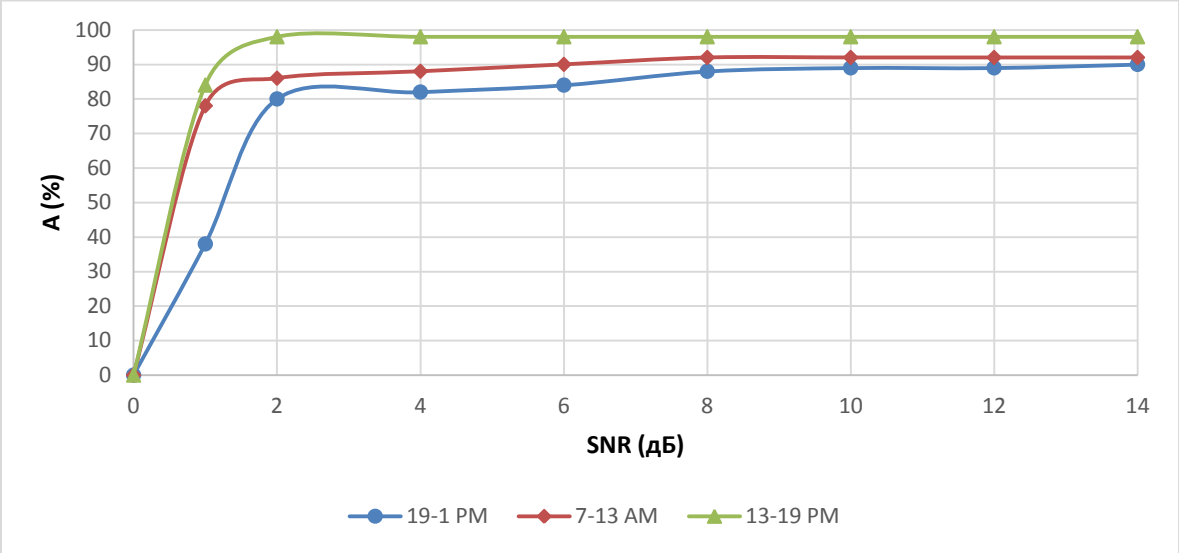


Рисунок 8б – Зависимость величины доступности от допустимого значения отношения сигнал/шум (SNR)

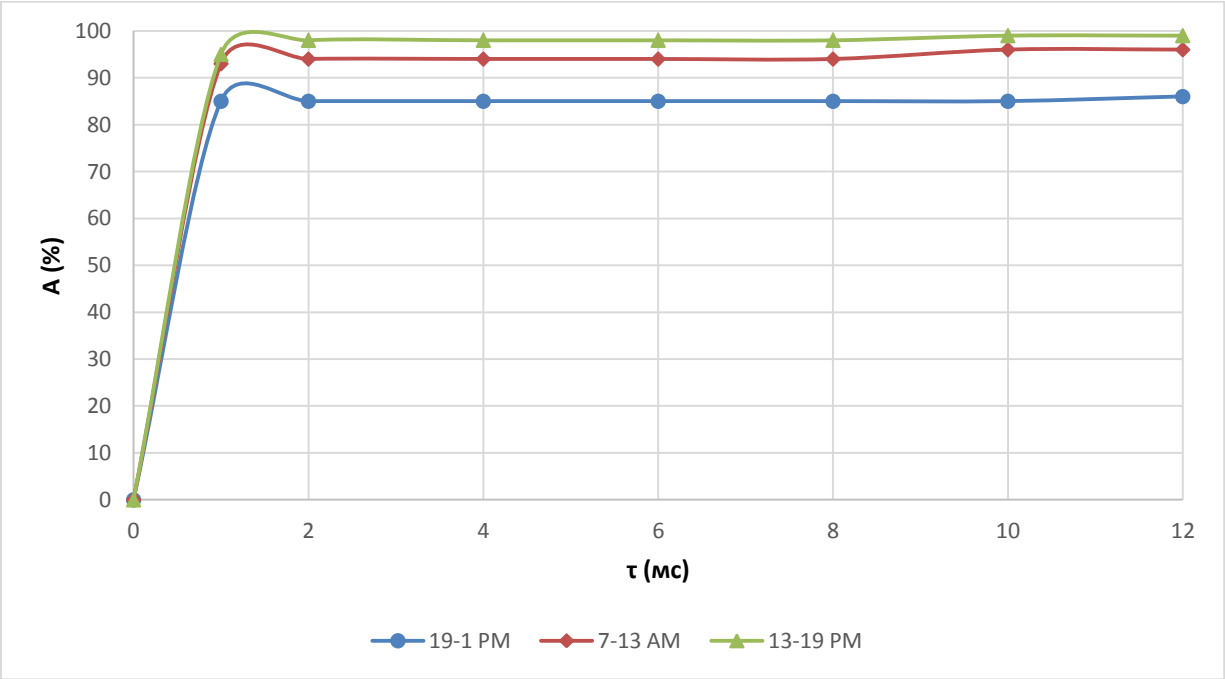


Рисунок 8в – Зависимость величины доступности от допустимого значения задержки

Из графиков можно сделать следующие выводы:

- Наиболее высокая доступность в ночное время.

- При SNR 10-15 дБ доступность выше 80 % в любое время дня.

- Значения задержки в 1-2 мс достаточно для обеспечения работы со скоростью 1200 бит/с.

- Допплеровского смещения меньше 4 Гц достаточно для обеспечения работы со скоростью 1200 Гц за исключением ночного времени. В ночное время для обеспечения доступно-

сти 64 % требуется значение допплеровского смещения 8 Гц, при значении 4 Гц получаем доступность только 58%.

- При низкой доступности заданной скорости передачи наибольшее улучшение достигается при увеличении допустимых значений SNR, чем от увеличения допустимых границ допплеровского сдвига и задержки. В среднем улучшение доступности, при увеличении допустимого значения SNR на 1 дБ может достигать 20%.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, сделаны выводы по работе в целом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации обоснован и проанализирован метод и алгоритм построения слепых эквалайзеров для когнитивных систем ионосферной радиосвязи.

Основные результаты, полученные в диссертации, следующие:

1. Проведенный анализ существующих методов построения систем адаптивной ионосферной связи показал, что их характеристики могут быть улучшены при использовании технологий когнитивного радио. Анализ показал, что современные системы ионосферной связи обладают свойствами «когнитивности», а, следовательно, вопрос повышения эффективности этих систем за счет более гибкой адаптации к окружающим условиям можно рассматривать как вопрос когнитивного радио.

2. Проведенный анализ существующих методов построения систем адаптивной ионосферной связи также показал, что для перехода к когнитивным системам ионосферной связи требуется на физическом уровне организовать адаптивный контроль состояния канала связи для чего предложено использовать слепой эквалайзер.

3. Проведенный анализ известных методов построения слепых эквалайзеров показал, что они не могут стать альтернативой классическим эквалайзерам, применяемым в системах ионосферной связи, и требуют улучшения по параметрам скорости сходимости и стабильности работы.

4. Разработанный метод построения слепых эквалайзеров для систем ионосферной связи способен работать в условиях априорной неопределенности параметров полезных сигналов, характеристик канала и геометрии антенной решетки.

5. Разработанный вычислительный алгоритм построения слепых эквалайзеров для систем ионосферной связи способен работать в условиях априорной неопределенности параметров полезных сигналов, характеристик канала и геометрии антенной решетки. Оптимизация квазиньютоновским BFGS алгоритмом позволила добиться большей скорости сходимости алгоритма.

6. Проведенный анализ работоспособности разработанного метода как на симуляторе ионосферного канала, так и в условиях реального ионосферного канала показал, что разработанный метод дает возможность увеличить скорость передачи по ионосферному каналу до 50% и увеличить доступность каналов ионосферной связи до 20 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Мирошникова, Н.Е. Применение адаптивной фильтрации в задаче слепой оценки ионосферного канала Анализ эффективности алгоритмов слепого разделения сигналов/Н.Е.Мирошникова// Радиотехника. – 2016. – № 3. – С. 37-42.

2. Мирошникова, Н.Е. Эффективность использования алгоритмов слепой обработки для разделения сигналов с различными типами модуляции /Н.Е.Мирошникова, А.А. Кучумов// T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. –2016. –Т. 10. – № 5. –С. 17-20.

3. Мирошникова, Н.Е. Применение адаптивной фильтрации в задаче оценки ионосферного канала /Н.Е.Мирошникова // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. –2016. – Т. 10. – № 9. –С. 24-29.

4. Мирошникова, Н.Е. Анализ эффективности алгоритмов слепой идентификации ионосферных каналов /Н.Е.Мирошникова // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. –2016. –Т. 8. – № 3. –С. 30-34.

5. Мирошникова, Н.Е. Обзор систем когнитивного радио /Н.Е.Мирошникова // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. –2013. –Т.7. – № 9. –С. 108-111.

6. Мирошникова, Н.Е. Влияние ошибок синхронизации на прием цифровых сигналов /Н.Е.Мирошникова // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. –2013. –Т.7. – № 9. – С. 112-114.

7. Мирошникова, Н.Е. Метод построения слепого эквалайзера для ионосферных декаметровых систем связи/ Н.Е.Мирошникова // Электросвязь. –2018.– №5. –С. 39-43.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных (SCOPUS, WebOfScience)

8. Miroshnikova, N.E. Adaptive blind equalizer for HF channels// Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO) (3-4 July 2017 г.) – Kazan, 2017. – P. 1-5.

Публикации в материалах международных конференций

9. Мирошникова, Н.Е. Применение адаптивной фильтрации в задаче слепой оценки ионосферного канала /Н.Е.Мирошникова //Материалы X Международной отраслевой

научно-техническая конференции «Технологии информационного общества» –Москва, 2016. –С. 147-148.

10. Мирошникова, Н.Е. Применение адаптивной фильтрации в задаче слепой обработки сигналов /Н.Е.Мирошникова // Материалы 18-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2016)» (ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 31 марта-1 апреля 2016 г.) – Москва, 2016. – Том 6. – С. 183-187.

11. Мирошникова, Н.Е. Методы слепой обработки в системах ионосферной связи /Н.Е.Мирошникова // Материалы 18-й международной конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях (СИНХРОИНФО-2016)» (ПГУТИ, 1-2 июля 2016 г.) – Самара, 2016. – Том 1. – С. 126-131.

12. Мирошникова, Н.Е. Адаптивный эквалайзер для декаметровых систем связи /Н.Е.Мирошникова // Материалы 19-й международной конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях (СИНХРОИНФО-2017)» (КНИТУ КАИ, 3-4 июля 2017 г.) – Казань, 2017. – Том 8. – С. 42-46.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

13. Мирошникова Н.Е. Программа для реализации итерационного алгоритма слепого эквалайзинга для декаметровых ионосферных систем связи / Н.Е. Мирошникова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018617049 от 15 июня 2018 г.

Публикации в других изданиях

14. Создание, поддержка и обновление электронных открытых ресурсов кафедры радиотехнических систем**:** отчет по ГБНИР «Радиотехника» **(**промежуточный): МТУСИ; рук. Шинаков Ю.С.; исполн. Мирошникова Н. Е. [и др.]. – М., 2015. – 180 с. (авторский вклад – 13 с.)

15. Создание, поддержка и обновление электронных открытых ресурсов кафедры радиотехнических систем**:** отчет по ГБНИР «Радиотехника» (заключительный): МТУСИ; рук. Шинаков Ю.С.; исполн. Мирошникова Н. Е. [и др.]. – М., 2017. – 87 с. (авторский вклад – 13 с.)