



СМАЛЬ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

БЕСТЕСТОВЫЕ СПОСОБЫ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ  
КОРОТКОВОЛНОВОГО РАДИОКАНАЛА В АДАПТИВНЫХ  
РАДИОЛИНИЯХ

Специальность: 05.12.13

«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018 г.

Работа выполнена в публичном акционерном обществе «Российский институт мощного радиостроения» (ПАО «РИМР»)

Научный руководитель **Лобов Сергей Александрович**  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты **Биккенин Рафаэль Рифгатович**  
доктор технических наук, профессор  
доцент кафедры средств связи  
Военный институт дополнительного  
профессионального образования ВУНЦ ВМФ  
«Военно-морская академия имени Адмирала Флота  
Советского Союза Н.Г. Кузнецова»

**Клионский Дмитрий Михайлович**  
кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры Математического обеспечения и  
применения ЭВМ  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Ведущая организация **Закрытое акционерное общество «Институт  
Сетевых Технологий» (г. Санкт-Петербург)**

Защита состоится « 27 » марта 2018 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.233.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан « 20 » февраля 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.233.05  
кандидат технических наук,  
доцент



Овчинников Андрей Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время одним из активно развивающихся направлений в коротковолновой (КВ) радиосвязи являются адаптивные радиолинии передачи данных, которые автоматически приспособляются к изменяющимся условиям распространения радиоволн и помеховой обстановке. Такие радиолинии, в отличие от неадаптивных, позволяют значительно сократить время вхождения в связь, достичь требуемой достоверности переданных сообщений, увеличить длительность бесперебойной работы, обеспечить эффективное использование частотно-временного ресурса, что, позволяет рассматривать КВ канал, как полноценный канал передачи данных, являющийся основным элементом подсистемы передачи данных различных автоматизированных систем или частью некоторой сети. Такой подход позволяет с помощью КВ радиолиний обеспечить решение новых задач, в различных областях, где такая связь продолжает занимать важное место. Главными причинами актуальности данного рода связи являются: возможность организации связи между двумя удаленными абонентами на расстояния до нескольких тысяч км без использования промежуточных ретрансляторов и при различных мощностях передающих устройств (от единиц Вт до сотен кВт), низкая стоимость создания и обслуживания, а также меньшая сложность развертывания.

Одной из задач, возникающих при функционировании таких радиолиний, является оценивание состояния радиоканала и своевременное реагирование на его изменение. Сложность состоит в том, что контроль должен осуществляться непрерывно, а оценки должны быть достаточно точными и получены за минимальное время.

Достаточно часто в настоящее время для оценки состояния используют тестовые сигналы, однако, появляющаяся при этом дополнительная избыточность и разрывы связи снижают среднюю информационную скорость.

Возможным решением данной задачи является применение бестестовых способов оценивания состояния, которые позволяют получить необходимые величины путем анализа принимаемого информационного сигнала. Следует отметить, что, в настоящее время имеются возможности создания самых различных сигнально-кодовых конструкций (СКК), оптимальных для конкретных условий. Кроме того, развитие вычислительных средств и электронных компонентов дало возможность применения данных СКК в аппаратуре, а также их многоуровневой и детальной обработки в режиме реального времени.

Необходимо отдельно отметить специфику диссертационной работы.

Работа имеет практическую направленность, а разработанные способы оценивания реализованы в реальной действующей аппаратуре передачи данных, которая используется как в России, так и за рубежом. Способы разрабатывались для таких сигналов и кодовых конструкций, которые используются в настоящее время в современных КВ радиолиниях передачи данных.

При этом, были учтены особенности оборудования: требование реализуемости предлагаемых алгоритмов на современных вычислителях за ограниченное время для обеспечения возможности работы в режиме реального времени; скорости, форматы и допустимые задержки для оконечного оборудования; особенности передающих и приёмных трактов; достаточно короткие

информационные блоки (не более 1 кБ); определённые ограничения по длительности сеанса связи.

Кроме того, были учтены особенности работы в КВ диапазоне: существенное динамическое изменение параметров радиоканала, из-за чего необходимо иметь возможность подстраиваться под условия приёма после передачи каждого блока; значительные различия в условиях распространения на различных несущих частотах; сложная помеховая обстановка; малое количество частот пригодных для передачи данных среди выделенных частот; узкополосность стандартных каналов связи; относительно низкая скорость передачи данных (в среднем 1-4 кбит/с).

Учитывая вышесказанное, задача разработки бестестовых способов оценивания состояния радиоканала, которые повышают эффективность функционирования КВ радиолиний передачи данных, является актуальной. Данная работа посвящена разработке и исследованию указанных способов.

**Степень разработанности темы исследования.** Задача оценивания состояния радиоканала возникла одновременно с появлением радиолиний. Тогда же появились первые методы оценивания. Часто такие методы носили субъективный характер, и решение принимал оператор. Однако, по мере совершенствования принципов функционирования оборудования, применяемые методы также совершенствовались и разрабатывались новые. В настоящее время в адаптивных радиолиниях получаемые оценки являются основой для принятия решений, так как в этом случае удается более эффективно использовать возможности аппаратуры, канала и частотно-временного ресурса.

На сегодняшний день многие отечественные и зарубежные организации занимаются разработкой и производством оборудования для создания адаптивных радиолиний передачи данных.

В процессе развития КВ радиолиний были разработаны различные подходы для решения задачи оценивания состояния радиоканала, которые в последующем были внесены в соответствующие протоколы. Наиболее значительный вклад в разработку таких методов внесли: В. П. Шувалов, В. Е. Бухвинер, Е. В. Митряев, Ю.Г. Ростовцев, Ю.П. Рышков, П.П. Жигора, С.Е. Фалькович, Л.П. Коричнев, И.Т. Рожков, О. В. Головин, С. Beaulieu, М. Rice. Вопросам оценивания состояния канала связи посвящены диссертации В. С. Антошевского, А.В. Бобровского, Г.Х. Гарскова, А.В. Колесникова, Ю.В. Мартынова, Е.А. Мининой, П.И. Трекущенко и др.

В качестве основного показателя, характеризующего состояние радиоканала, с точки зрения цифровых систем передачи данных часто используется величина вероятности ошибки на бит (ВОБ). Следует отметить, что подавляющее число методов оценки состояния непрерывного канала сводятся к оцениванию величины отношения сигнал/помеха (ОСП). Однако, такая оценка является состоятельной только лишь для каналов с постоянными параметрами. Также известны способы для оценивания параметров канала при наличии замираний, однако, они менее распространены и обладают ограничениями. Кроме того, для реальных радиоканалов в должном объеме не рассматривалась задача оценки состояния при наличии в приемной аппаратуре системы автоматической регулировки усиления (АРУ), которая присутствует практически в любом оборудовании. Также стоит

отметить, что при анализе был выявлен недостаточный уровень развития способов оценивания ВОБ при использовании помехоустойчивого кодирования.

**Цели и задачи.** Целью настоящей работы является повышение эффективности многопараметрических адаптивных коротковолновых радиолиний передачи данных за счет использования бестестовых способов оценивания состояния радиоканала.

Основной научной задачей является разработка бестестовых способов оценивания состояния коротковолнового радиоканала и практических рекомендаций по их использованию.

Для достижения цели необходимо решить следующие частные задачи:

1. Разработать бестестовые способы оценивания параметров статистической модели радиоканала как для одночастотного информационного сигнала, так и для OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) сигнала с относительной фазовой модуляцией (ОФМ)
2. Разработать бестестовые способы оценивания ВОБ по информационному сигналу для сигнальной конструкции другого вида, характеризующейся повышенной скоростью передачи.
3. Разработать бестестовые способы оценивания ВОБ при использовании проверочных бит четности, линейных блоковых кодов и сверточного кодирования.
4. Разработать способ выбора оптимальной СКК при наличии оценок состояния радиоканала.
5. Исследовать точность предложенных способов.
6. Оценить эффективность предложенных способов
7. Привести условия, ограничения и рекомендации использования предложенных способов.

**Научная новизна** полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

- разработана совокупность бестестовых способов оценки непрерывного канала;
- разработана совокупность бестестовых способов оценки дискретного канала.
- разработаны практические рекомендации по использованию способов оценки канала связи при многопараметрической адаптации;
- все разработанные способы оценки базируются на использовании информационного сигнала как непрерывного, так и дискретного и не требуют использования тестовых или служебных сигналов;
- способы ориентированы как на традиционные, так и на новые перспективные сигнально-кодовые конструкции;
- на большинство предложенных способов получены патенты РФ на изобретения или полезные модели.

**Теоретическая значимость работы** состоит в создании новых бестестовых способов оценивания состояния радиоканала, которые могут использоваться при разработке подсистем управления параметрами КВ радиолиний в целях адаптации их к реальному состоянию сигнально-помеховой обстановки.

**Практическая значимость работы** состоит в промышленной применимости полученных результатов, использовании их при проведении НИОКР, а также

подтверждается внедрением результатов в уже принятый на снабжение автоматизированный адаптивный комплекс технических средств радиосвязи «Пирс» и разрабатываемые новые режимы его функционирования, и другие разрабатываемые перспективные комплексы КВ радиосвязи, в том числе для оснащения объектов МО РФ и различных гражданских объектов. Наиболее полезны такие комплексы для объектов, находящихся в удаленных или труднодоступных районах, где наблюдается потребность в линиях дополнительной или резервной связи, например, в северных широтах и горной местности. Предложенные способы могут повысить среднюю информационную скорость передачи данных адаптивной радиопередачи при наличии динамических изменений состояния канала связи до 15 % в зависимости от условий радиосвязи и методов адаптивного управления.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач в работе использовались методы теории вероятностей и математической статистики, теории информации и помехоустойчивого кодирования, теории передачи дискретных сообщений, теории статистической радиотехники, комбинаторные методы, метод численного моделирования, метод физического эксперимента.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Совокупность бестестовых способов оценивания состояния непрерывного канала, основанных на анализе принимаемого информационного сигнала и учитывающих его структуру.
2. Совокупность бестестовых способов оценивания состояния дискретного канала, основанных на анализе принимаемой информационной последовательности бит или массиве кодовых слов, возможно содержащих ошибки, и учитывающих структуру кода.
3. Практические рекомендации по использованию способов оценивания канала связи при многопараметрической адаптации и наличии нескольких потенциально возможных видов сигнально-кодовых конструкций и частот.

**Достоверность научных результатов.** Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций обусловлена корректной математической постановкой задачи, принятыми допущениями и ограничениями, использованием известных математических методов и подтверждена совпадением результатов теоретических расчетов, вычислительных экспериментов и натурных испытаний.

**Личный вклад автора.** Автором лично выполнен основной объем исследований: постановка задач исследования, разработка и реализация предложенных алгоритмов в программной среде, проведение вычислительных экспериментов и натурных испытаний, анализ и обобщение полученных результатов, сформулированы основные положения диссертации, составляющие ее новизну и практическую значимость.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

1. XI, XII Всероссийские научные конференции студентов-радиофизиков СПбГУ, г. Санкт-Петербург (2007, 2008 гг.);
2. Ежегодные конференции молодых специалистов ПАО «РИМР», г. Санкт-Петербург (2008, 2009, 2011, 2014 – 2016 гг.);

3. XIV, XV, XVI, XVII, XVIII Международные конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA), г. Москва (2012 – 2017 гг.);
4. VI, VII, VIII, IX, X Всероссийские научно-технические конференции «Радиолокация и радиосвязь», г. Москва (2012 – 2016 гг.);
5. XI, XII, XIII Российские научно-технические конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления», г. Калуга (2012 – 2014 гг.);
6. VIII, IX Всероссийские межведомственные научные конференции «Актуальные проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения», г. Орел (2013, 2015 гг.);
7. XIX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2013 г.;
8. Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию образования Научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий ВМФ и разведки НИИ ОСИС ВМФ (ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»), г. Санкт-Петербург, 2012 г.;
9. Международный научно-технический семинар «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» г. Ярославль, 2013 г.

**Публикации.** Основные научные результаты отражены в 63 публикациях: 12 работ в ведущих рецензируемых научно-технических журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ; 15 работ в материалах международных и российских конференций; 13 патентов на изобретения; 17 патентов на полезные модели; 6 работ в других изданиях.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 158 наименований и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 147 страниц, включая 62 рисунка и 5 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, рассматривается состояние исследуемой проблемы, сформулированы цель работы, перечислены основные научные результаты, полученные в диссертации, определены практическая ценность и область применения результатов, приведены сведения об апробации работы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены особенности передачи и приема сообщений в КВ диапазоне, известные адаптивные радиолинии передачи данных, подробно рассмотрена задача адаптивного управления радиолинией для двух различных случаев. Представлены условия и ограничения, постановка и решение таких задач. Приведен обзор существующих способов оценки состояния радиоканала. Приведена постановка задачи исследования.

**Во второй главе** предложена совокупность новых бестестовых способов оценивания состояния непрерывного радиоканала.

Изложен основной подход оценивания ВОБ для различных статистических моделей каналов связи, известный из статистической теории связи. Показано, что для получения оценки ВОБ требуется наличие оценок параметров статистической модели радиоканала. Рассмотрено несколько статистических моделей: канал с постоянными параметрами и аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ),

канал с замираниями по законам Рэлея, Райса и Накагами. Показана практическая трудность использования более сложных законов.

Для модели канала с постоянными параметрами и АБГШ приведены результаты разработки трех новых способов.

Приведены результаты разработки способа, который позволяет оценить значение отношения ОСП, если в качестве информационного сигнала используется отрезок гармонического колебания. Тогда модель сигнала имеет следующий вид:

$$\hat{X}(t) = X(t) + \xi(t) = B \cdot \cos(\omega t + \psi) + \xi(t), \quad (1)$$

где  $B$  – амплитуда сигнала,  $\psi$  – начальная фаза, изменившиеся в результате воздействия канала связи,  $\xi(t)$  – помеха.

В этом случае, равноотстоящие на время  $\Delta t$  отсчеты гармонического колебания частоты  $\omega$  связаны между собой рекуррентным соотношением:

$$X_k = 2 \cdot \cos(\omega \Delta t) \cdot X_{k-1} - X_{k-2}, \quad (2)$$

которым можно воспользоваться для предсказания оценки значения последующего отсчета сигнала по двум предыдущим отсчетам. Таким образом, на каждом шаге можно получить пару значений сигнала: текущее и прогнозное. Сформировав выборку этих величин, можно вычислить оценку среднеквадратичного отклонения измеренного значения отсчета от прогнозируемого, которая зависит от дисперсии помехи. Далее можно найти оценку мощности помехи и смеси сигнала и помехи. В этом случае оценку значения ОСП можно получить как отношение данных величин.

Таким образом, данный способ позволяет получить оценку ОСП для указанных условий. Такой способ оценивания может быть использован для радиопередачи, где применяются одночастотные гармонические сигналы с амплитудной модуляцией, фазовой модуляцией (ФМ) или квадратурно-амплитудной модуляцией различной позиционности или составные сигналы.

Приведены результаты разработки способа оценивания ОСП при использовании сигналов с двухпозиционной ФМ.

Данный способ является одним из возможных новых решений задачи оценивания ОСП для многочастотных OFDM сигналов двухпозиционной ФМ или OFM. На выходе модулятора разность начальных фаз  $\Delta\varphi$  двух соседних посылок сигнала с равной вероятностью принимает значения 0 или  $\pi$ . Если амплитуды на соседних посылках равны, то, складывая спектральные коэффициенты, можно вычислить амплитуду суммы и разности спектральных составляющих сигнала на используемой частоте  $\omega$ . При демодуляции ФМ сигналов такими действиями всегда можно получить две случайной величиной СВ  $\alpha$  и  $\beta$  – значения огибающей удвоенной помехи или смеси удвоенного сигнала и помехи. Однако, чему они будут соответствовать в условиях априорной неопределенности данных, указать невозможно. При этом СВ  $\alpha$  и  $\beta$  имеют плотности вероятности (ПВ) Релея и Райса соответственно. Если СВ  $\gamma$  равна их отношению, то удастся найти соответствующие ПВ при  $\Delta\varphi = 0$  и  $\Delta\varphi = \pi$  в виде:

$$W_\gamma^0(x; h^2) = \frac{x(2x^2 + 2(1 + 2h^2))}{(1 + x^2)^3} \exp\left(\frac{-2h^2x^2}{1 + x^2}\right), \quad (3)$$

$$W_\gamma^\pi(x; h^2) = \frac{x(2 + 2x^2(1 + 2h^2))}{(1 + x^2)^3} \exp\left(\frac{-2h^2}{1 + x^2}\right), \quad (4)$$

где  $h^2$  – ОСП.

Тогда, при условии, что передаваемые данные случайны и равновероятны, можно представить ПВ СВ  $y$  в виде смеси двух плотностей:

$$W(x; h^2) = \frac{1}{2} W_Y^0(x; h^2) + \frac{1}{2} W_Y^\pi(x; h^2). \quad (5)$$

В этом случае, в отличие от классического подхода в виде проведения процедуры классификации, автор предлагает рассматривать всю выборку целиком.

Единственным параметром этой общей плотности является искомое значение ОСП  $h^2$ . Для его оценки можно воспользоваться методом максимального правдоподобия (ММП). Предлагаемый способ позволяет оценить отношение ОСП для сигналов с OFDM или ФМ2 без использования каких-либо тестовых сигналов.

Приведены результаты разработки способа оценивания ОСП по восстановленной модели ПВ разницы фаз, который позволяет получить оценку на основе анализа сигналов любой позиционности ФМ. После прохождения канала связи, разность начальных фаз между двумя соседними посылками будет отличаться от заданных значений. На основе данных разностей фаз, доступных для измерения, можно сформировать ПВ разности фаз и оценить искомую ВОБ.

ПВ начальной фазы смеси сигнала и помехи в канале с постоянными параметрами описывается нормальным угловым законом распределения. Известно, что ПВ разностей фаз достаточно хорошо описывается распределением Мизеса:

$$W_0(\Delta\varphi, h^2) = \frac{1}{2\pi I_0(h^2)} e^{h^2 \cos(\Delta\varphi)}, \quad (6)$$

где  $I_0(h^2)$ - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Если данные равновероятны и используется двухпозиционная модуляция, то ПВ разностей фаз может быть описана смесью плотностей:

$$W_{0,\pi}(\Delta\varphi, h^2) = \frac{1}{2} W_0(\Delta\varphi, h^2) + \frac{1}{2} W_0(\Delta\varphi + \pi, h^2). \quad (7)$$

Тогда можно сформировать выборку разностей фаз на некотором интервале и используя в качестве модели теоретическую ПВ на основе полученной выборки можно оценить значение  $h^2$ , используя ММП. Отличительной особенностью описанного способа является возможность получить оценку ВОБ при использовании OFDM сигналов с OFM любой позиционности.

Для модели канала с замираниями приведены результаты разработки способа оценивания параметров адаптивно выбираемой статистической модели канала.

Задача оценивания параметров ПВ СВ является классической статистической задачей и имеет хорошо разработанные методы решения, такие, например, как метод моментов и ММП. Однако, применение напрямую указанных методов возможно лишь тогда, когда имеется аналитическое выражение для самой ПВ и выборка СВ, с таким законом распределения. Чаще всего доступными для измерения являются только значения огибающей смеси сигнала и помехи, а не самого сигнала. Кроме того, часто в аппаратуре присутствует блок АРУ, с динамически меняющимся коэффициентом усиления в процессе измерений. В этом случае, восстановить истинную ПВ огибающей известными способами не удастся.

Избавиться от указанной трудности при приеме сигнала на аппаратуру с АРУ, можно применяя подход, предложенный автором, состоящий в том, чтобы для оценки параметров модели канала использовать выборку СВ, инвариантную к значению коэффициента усиления АРУ. Предложенный подход можно

использовать, если для передачи данных используется OFDM сигнал. В качестве такой величины можно использовать СВ  $\xi$ , определяемую, как отношение огибающих сигнала  $A_i$  и  $A_j$ , измеренных на длительности элементарной посылки на свободных  $\{i\}$  и используемых  $\{j\}$  субчастотах внутри выделенной полосы.

Автору удалось найти аналитическое выражение для ПВ такой СВ. Если в качестве моделей замирания рассматривать модель Райса, то ПВ имеет вид:

$$W_{\xi}(x; h_0^2, h_p^2) = 2 \frac{x^3(h_0^2 + 1)^2 + x(h_0^2(h_p^2 + 1) + 1)}{(x^2(h_0^2 + 1) + 1)^3} \exp\left(-\frac{h_p^2 h_0^2 x^2}{x^2(h_0^2 + 1) + 1}\right). \quad (8)$$

Если рассматривать модель Накагами, то ПВ имеет вид:

$$W_{\xi}(x; m, h_0^2) = \frac{2x}{(x^2 + 1)^2} \left(1 + \frac{x^2 h_0^2}{2(1 + x^2)m}\right)^{-m} \left(1 + \frac{m h_0^2}{x^2(2m + h_0^2) + 2m}\right). \quad (9)$$

Таким образом, удастся сформировать выборку СВ с указанным законом распределения. Для нахождения параметров используется ММП, а выбор модели осуществляется в пользу гипотезы, для которой отношение правдоподобия имеет большее значение. По найденным параметрам можно однозначно определить ВОБ.

Предложен также подход, который позволяет получить оценку для случая, когда все субчастоты внутри выделенной полосы могут быть использованы для передачи полезного информационного сигнала с модуляцией ОФМ2.

Кроме подхода, основанного на использовании статистической модели канала связи, автором представлен новый способ для задачи оценивания ВОБ для сигналов с повышенной позиционностью ФМ.

При этом решение данной задачи особенно актуально в самом начале сеанса передачи данных, так как в этот момент используются самые помехоустойчивые и, следовательно, низкоскоростные сигналы, то есть имеющие двухпозиционную ФМ.

Решение основано на найденных аналитических зависимостях вероятности попадания вектора разницы фаз (или абсолютного значения фазы) в определенные сектора фазовой плоскости от ВОБ для различных позиционностей ФМ или ОФМ. При этом вероятность попадания можно оценить как частоту попадания в такие сектора измеренных значений фаз. Автору удалось получить соответствующие уравнения. Так, например, для сигналов с ОФМ2 уравнение имеет вид:

$$p_4^2 + (1 - p_4)^2 = \frac{k_4}{N}, \quad (10)$$

где  $k_4$  – число попаданий фазы в сектора символов 00 или 11 при использовании сигналов с ОФМ2,  $p_4$  – ВОБ для сигналов с ОФМ4,  $N$  – объём выборки.

Остальные уравнения для других позиционностей приведены в тексте диссертации.

Уравнения для старших степеней можно решить численными методами. Оценки можно получить скользящим окном с шагом в одну элементарную посылку.

Также автором отдельно представлен результат разработки способа оценивания ВОБ для различной длительности защитных интервалов (ЗИ), в котором могут быть использованы результаты, полученные в предыдущих способах и который может быть использован для выбора минимально необходимого ЗИ.

Для оценивания точности предлагаемых способов автором проведено численное моделирование, показавшее хорошее совпадение полученных оценок параметров статистических моделей радиоканала с задаваемыми значениями.

**В третьей главе** предложена совокупность новых бестестовых способов оценивания состояния дискретного канала связи.

Все представленные в данной главе способы базируются на том, что принимаемое сообщение закодировано помехоустойчивым кодом. Автор показывает, что имеющаяся избыточность, а также побочные продукты, получаемые при декодировании информационных сигналов, позволяют кроме основной задачи повышения достоверности, решить задачу оценивания ВОБ.

Представлены результаты разработки способа оценивания ВОБ при использовании линейного блокового кода, который часто используется как внутрений код каскадных кодовых конструкций.

Одним из этапов при проведении процедуры декодирования линейного блокового кода является получение синдрома путем умножения принятого кодового слова (которое может содержать ошибки) на проверочную матрицу.

Тогда вероятность события, что при декодировании принятого кодового слова длиной  $n$ , синдром обнаружит  $l$  ошибок определяется выражением:

$$P_l = \sum_{m=0}^n \rho_m \sum_{r=0}^l (C_m^r C_{n-m}^{l-r} p^{m-2r+l} (1-p)^{n-m+2r-l}) \approx \frac{z_l}{N}, \quad (11)$$

где  $\rho_m$  — соответствующие веса кода;  $p$  — ВОБ;  $z_l$  — подсчитанное количество указанных событий;  $N$  — количество принятых кодовых слов.

Тогда, имеется возможность определить частоты событий  $z_l/N$ , которые будут являться оценками соответствующих вероятностей  $P_l$ , то есть, удастся установить аналитическую связь между искомой ВОБ и доступной для измерения оценкой вероятности соответствующего события. При рассмотрении всего возможного количества обнаруживаемых ошибок  $l$  можно получить систему уравнений, для решения которой автор предлагает использовать методы, которые используются для определения меры близости ПВ. Тогда искомая оценка ВОБ выбирается из условия минимума расстояния между эмпирическим и теоретическим распределениями. Приведены примеры применения данного способа для кода Хэмминга (7,4,3) и расширенного кода Голея (24,12,8). Данный способ позволяет путем анализа результатов декодирования получить оценку состояния канала связи в виде ВОБ без применения дополнительных тестовых сигналов.

Отдельно автором также представлены результаты разработки способа оценивания ВОБ при использовании блокового кода на основе спектра кода и его усовершенствованный вариант.

Иногда при функционировании радиолинии требуется получить оценки ВОБ для различных кодовых конструкций за малый промежуток времени. Из-за ограничения вычислительных ресурсов приходится уменьшать число получаемых оценок. Автору удалось найти одно из возможных решений данной задачи, позволяющее в значительной мере ослабить ограничения.

Если передаваемое сообщение закодировано помехоустойчивым линейным блоковым кодом с параметрами  $(n, k, d)$ , где  $n$  — длина кодового слова,  $k$  — длина информационного слова,  $d$  — минимальное кодовое расстояние между кодовыми словами при наличии ошибок, вес слова может отличаться от разрешенных весов. Тогда, вероятность события, что вес принятого слова равен одному из возможных разрешенных весов после демодуляции имеет вид:

$$P(p) = \sum_{m=0}^n \frac{\rho_m}{2^k} \cdot \sum_{i=0}^n f(\rho_i) \cdot P_{m \rightarrow i}(p), \quad (12)$$

где  $f(\rho_i)$  – функция следующего вида:

$$f(\rho_i) = \begin{cases} 1, & \rho_i \neq 0, \\ 0, & \rho_i = 0, \end{cases} \quad (13)$$

$P_{m \rightarrow i}(p)$  – вероятность перехода из комбинации, когда в слове содержится  $m$  единиц в комбинацию, где содержится  $i$  единиц,  $p$  – ВОБ,  $\rho_m$  – спектральные коэффициенты кода, то есть количество разрешенных кодовых слов с весом  $m$ .

С другой стороны, в процессе приема данных на длительность интервала анализа можно посчитать количество совпадений и определить его долю. Таким образом, снова удастся установить аналитическую связь между искомой ВОБ и доступной для измерения оценкой вероятности соответствующего события. Решить полученное уравнение можно любым численным методом.

Усовершенствованный способ отличается тем, что используется аналитическое выражение вероятности того, что вес принятого кодового слова отличается ровно на  $j$  хотя бы от одного из возможных разрешенных весов.

Оценка при этом получается более точной по сравнению с неусовершенствованным способом. Основным преимуществом данных способов является отсутствие необходимости проведения процедур декодирования, что значительно сокращает вычислительные затраты и упрощает вычислительные процедуры. При этом данный подход применим для кодов с разреженным спектром.

Также представлены результаты разработки способа оценивания ВОБ, если передаваемое сообщение было закодировано сверточным кодом.

Для данного кода удастся составить уравнение, которое описывает прямую связь между заданными битами в кодированной последовательности. Уравнение для каждого конкретного кода зависит от количества, вида и длины полиномов. В общем виде для любого сверточного кода, использующего  $L$  полиномов степени  $M$  и, соответственно, имеющего кодовую скорость  $1/L$ , получена система уравнений, на основе которой можно получить общее уравнение путем их общего сложения:

$$\sum_{j=1}^{L-1} \left( \sum_{k=1}^M d_k^j \cdot b_{(M-1)*k+j+1} \oplus \sum_{k=1}^M d_k^{j+1} \cdot b_{(M-1)*k+j} \right) = 0, \quad (14)$$

где  $d_k^i$  – коэффициенты  $i$ -того полинома при  $k$ -той степени.

На основе данного уравнения можно составить уравнение для оценки ВОБ:

$$\frac{k}{N} = \sum_{m=0}^{\lfloor (n-1)/2 \rfloor} C_n^{2m} \hat{p}^{2m} (1 - \hat{p})^{n-2m}, \quad (15)$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  – операция округления в меньшую сторону,  $n$  – количество ненулевых членов уравнения (14) после приведения подобных членов,  $k$  – количество удовлетворяющих уравнению (14) событий при объеме выборки, равном  $N$ . Решение может быть найдено численным методом.

Приведены примеры применения данного способа для известных сверточных кодов с параметрами (6,3,5) и (12,4,10). Таким образом, получен бестестовый способ оценивания ВОБ по информационному потоку бит, кодированных помехоустойчивым сверточным кодом и, возможно, содержащих ошибки

демодуляции. При этом, проведение процедуры декодирования и знания передаваемой информации не требуется.

Для оценивания точности предлагаемых способов автором проведено численное моделирование для различных кодовых конструкций, показавшее хорошее совпадение полученных оценок ВОБ с задаваемыми значениями.

**В четвертой главе** рассмотрены условия, ограничения и рекомендации использования предлагаемых способов.

Разработаны рекомендации по выбору такого способа оценки состояния радиоканала (среди предложенных автором способов), который может быть использован при разработке перспективной радиолинии передачи данных с учетом особенностей применяемых при этом сигналов и кодовых конструкций. Наличие большого разнообразия видов сигнально-кодовых конструкций приводит к невозможности существования некоторого одного универсального бестестового способа оценки, и подтверждает необходимость наличия их большого числа для современных адаптивных КВ средств радиосвязи.

Показан выигрыш способов в информационной скорости передачи данных по сравнению с использованием тестовых способов, составляющий:

$$\frac{V_1}{V_2} = 1 + \frac{t_0}{t}, \quad (16)$$

где  $V_1$  – информационная скорость при использовании предложенного способа оценки состояния канала радиосвязи,  $V_2$  – информационная скорость при использовании тестового способа,  $t$  – время передачи информационного сигнала,  $t_0$  – время передачи тестового сигнала.

Кроме того, предложены способы совместного решения таких технологических задач, как установление и поддержание временной тактовой и цикловой кодовой синхронизаций и оценивания состояния радиоканала.

Особое внимание уделено решению задачи адаптивного управления. В частности, представлена новая, альтернативная классической, постановка задачи адаптивного управления параметрами радиолинии передачи данных и ее решение, основанное на информационном подходе. Показано, что такой новый информационный подход позволяет повысить эффективность адаптивных радиолиний, а именно, достичь максимально возможных информационных скоростей передачи данных для заданного состояния радиоканала при использовании заданных разрешенных видов СКК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

1. Показано, что оценивание состояния радиоканала является одной из важных задач, без решения которой невозможно осуществлять эффективное управление параметрами многопараметрических адаптивных КВ радиолиний передачи данных;
2. Показано, что среди всех существующих способов оценивания радиоканала особое место занимают бестестовые способы, так как позволяют значительно повысить информационную скорость передачи данных – один из главных показателей эффективности радиолиний передачи данных без увеличения выделенной частотной полосы и мощности сигнала. Следовательно, такие способы

являются востребованными, а радиолинии передачи данных, построенные с их использованием – перспективными.

3. Показано, что сложность разработки бестестовых способов заключается в необходимости создания большого количества конструктивных способов, чтобы при приеме любого сигнала из некоторого множества СКК для заданной радиолинии была возможность получить оценку для любой другой СКК из этого множества. При этом должны быть учтены особенности и ограничения каждой СКК.

4. Предложена совокупность бестестовых способов оценивания состояния непрерывного радиоканала.

5. Предложена совокупность бестестовых способов оценивания состояния дискретного радиоканала.

6. Предложены способы совместного решения таких технологических задач, как установление и поддержание временной тактовой и цикловой кодовой синхронизаций и оценивания состояния радиоканала.

7. Разработанные способы позволяют получить оценки для сигналов с текущими параметрами, либо отличающихся от текущих позиционностью модуляции, количеством задействованных субчастот, распределением мощности по субчастотам, длительностью защитного интервала. При этом они требуют ограниченного количества вычислительных операций и могут быть использованы в системах реального времени;

8. Предложен информационный подход, позволяющий эффективно решить задачу адаптивного управления параметрами радиолинии на основе полученных оценок ВОБ, то есть выбрать вид сигнала и кодовую конструкцию из заданного множества, которые обеспечат максимальное значение информационной скорости для заданного состояния радиоканала.

Таким образом, цель работы, состоящая в повышении эффективности многопараметрических адаптивных КВ радиолиний передачи данных за счет использования бестестовых способов оценивания состояния радиоканала, достигнута. Полученные результаты позволяют в значительной мере отказаться от использования тестовых сигналов, и предоставляют возможность использовать частотную полосу и время полностью для передачи полезного информационного сигнала, таким образом, позволяют увеличить информационную скорость передачи, являющуюся одним из показателей эффективности радиолиний.

Полученные новые способы являются решением поставленной научной задачи разработки бестестовых способов оценки состояния КВ радиоканала. Для каждого способа даны практические рекомендации по его использованию в зависимости от вида СКК. Способы позволяют получить оценку состояния радиоканала либо для текущей, либо для других потенциально возможных видов СКК для заданных условий. На основе полученных оценок выбирается оптимальная СКК, являющаяся наиболее эффективной в данный момент времени, то есть, позволяющая достигнуть максимума информационной скорости.

Полученные способы измерения ВОБ внедрены в программное обеспечение комплекса радиосвязи «Пирс» разработки ПАО «РИМР» и дают приращение информационной скорости порядка 3-15% по сравнению с использованием тестовых способов в стандарте MIL-STD-188-110B App B в зависимости от условий. В

перспективе полученные результаты можно использовать при разработке новых коротковолновых радиолиний передачи данных.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях (из Перечня ВАК)**

1. Смаль, М. С. Определение вероятности ошибки на бит по рабочим сигналам / М. С. Смаль, А. Н. Мингалев // Вестник академии военных наук. – 2009. – № 3(28). – С. 70-74.
2. Мазур, К. Г. Формирование частотно-временной матрицы с ограничениями на взаимное расположение частот / К. Г. Мазур, А. Н. Мингалев, М. С. Смаль // Вестник академии военных наук. – 2009. – № 3(28). – С. 91-92.
3. Егоров, В. В. Оценка параметров распределения Накагами по рабочим сигналам / В. В. Егоров, М. С. Смаль // Электросвязь. – 2011. – № 11. – С. 35-36.
4. Егоров, В. В. Оценка вероятности ошибки на бит по флуктуациям фазы информационных сигналов / В. В. Егоров, М. С. Смаль // Телекоммуникации. – 2012. – № 8. – С. 2-5.
5. Егоров, В. В. Оценка отношения сигнал/шум при использовании сигналов с фазовой модуляцией / В. В. Егоров, М. С. Смаль // Телекоммуникации. – 2013. – № 5. – С. 29-34.
6. Егоров, В. В. Использование почтипериодических функций для создания хаотических сигналов [Электронный ресурс] / В. В. Егоров, М. С. Смаль // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2013. – № 8. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug13/10/text.pdf>.
7. Егоров, В. В. Выбор оптимальной кратности фазовой модуляции по информационным сигналам / В. В. Егоров, М. С. Смаль // Телекоммуникации. – 2013. – № 11. – С. 16-19.
8. Егоров, В. В. Оценка вероятности ошибки на бит по результатам декодирования кодовых слов [Электронный ресурс] / В. В. Егоров, М. С. Смаль // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2014. – № 4. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/4/text.pdf>.
9. Егоров, В. В. Прогнозирование достоверности приема ОФМ сигналов для потенциально возможных режимов работы [Электронный ресурс] / В. В. Егоров, М. С. Смаль // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2014. – № 4. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr14/5/text.pdf>.
10. Егоров, В. В. Оценка параметров нестационарного канала связи по информационным сигналам / В. В. Егоров, К. В. Зайченко, В. Ф. Михайлов, М. С. Смаль // Датчики и системы. – 2015. – № 2(189). – С. 57-60.
11. Дворников, С. С. Предложения по расширению алфавита канального кодирования для декаметровых передач, использующих частотно-временные матрицы / С. С. Дворников, М. Л. Маслаков, М. С. Смаль // Информация и космос. – 2015. – № 2. – С. 22-26.
12. Егоров, В. В. Оценка статистических характеристик замираний сигналов в коротковолновом канале / В. В. Егоров, К. В. Зайченко, М. С. Смаль, В. Ф. Михайлов // Радиотехника. – 2017. – № 5. – С. 14-18.

**Патенты на изобретения**

13. Пат. 2451407 РФ. Способ определения вероятности ошибки на бит по параллельным многочастотным информационным сигналам / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.05.2012, Бюл. № 14. – 8 с.
14. Пат. 2502077 РФ. Способ оценивания отношения сигнал/помеха на длительности отрезка гармонического колебания / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.12.2013, Бюл. № 35. – 7 с.
15. Пат. 2526283 РФ. Способ определения вероятности ошибки на бит по флуктуациям фазы информационных сигналов / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.08.2014, Бюл. № 23. – 8 с.
16. Пат. 2533077 РФ. Способ передачи информации с внутрисимвольной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.11.2014, Бюл. № 32. – 8 с.
17. Пат. 2542900 РФ. Способ установления синхронизации псевдослучайных последовательностей / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 27.02.2015, Бюл. № 6. – 7 с.
18. Пат. 2548032 РФ. Способ оценивания отношения сигнал/шум при использовании сигналов с фазовой модуляцией / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.04.2015, Бюл. № 10. – 10 с.
19. Пат. 2559734 РФ. Способ определения параметров модели замирания радиоканала по закону Райса по информационному многочастотному сигналу / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.08.2015, Бюл. № 22. – 9 с.
20. Пат. 2560530 РФ. Способ установления цикловой синхронизации / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.08.2015, Бюл. № 30. – 9 с.
21. Пат. 2568304 РФ. Способ тактовой синхронизации по информационным сигналам с проверкой по CRC / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.11.2015, Бюл. № 32. – 6с.
22. Пат. 2571615 РФ. Способ передачи команд управления в синхронных системах связи по КВ радиоканалу / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.12.2015, Бюл. № 35. – 9 с.
23. Пат. 2580812 РФ. Устройство совместной передачи сообщений и служебной информации / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.04.2016, Бюл. № 10. – 7 с.
24. Пат. 2585979 РФ. Способ передачи информации с внутрисимвольной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты с использованием хаотических сигналов / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.06.2016, Бюл. № 16. – 12 с.
25. Пат. 2608363 РФ. Способ оценки параметров модели замирания огибающей сигнала по закону Накагами по информационному многочастотному сигналу / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 18.01.2017, Бюл. № 2. – 9 с.

**Патенты на полезные модели**

26. Пат. 136661 РФ. Устройство оценки вероятности ошибки на бит для сигналов с четырехпозиционной фазовой модуляцией по двухпозиционным сигналам / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.01.2014, Бюл. № 1. – 2 с.

27. Пат. 136662 РФ. Устройство оценки вероятности ошибки на бит при кодировании с помощью бита четности / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.01.2014, Бюл. № 1. – 2 с.
28. Пат. 141688 РФ. Устройство установления тактовой синхронизации по информационному составному последовательному сигналу / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.06.2014, Бюл. № 16. – 2 с.
29. Пат. 141787 РФ. Устройство установления тактовой синхронизации по информационным сигналам с ортогональным частотным разделением каналов / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.06.2014, Бюл. № 16.– 2 с.
30. Пат. 141811 РФ. Устройство установления тактовой синхронизации по информационному сигналу с двухпозиционной фазовой модуляцией / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.06.2014, Бюл. № 17. – 2 с.
31. Пат. 146675 РФ. Устройство оценки вероятности ошибки на бит по анализу искаженных кодовых слов на основе спектра кода / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.10.2014, Бюл. № 29. – 2 с.
32. Пат. 148377 РФ. Устройство оценки вероятности ошибки на бит по результатам анализа искаженных кодовых слов / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.12.2014, Бюл. № 34. – 2 с.
33. Пат. 149605 РФ. Устройство совместной передачи и приема сообщений и служебной информации / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.01.2015, Бюл. № 1. – 2 с.
34. Пат. 155554 РФ. Устройство оценки вероятности ошибки на бит для сигналов с восьмипозиционной фазовой модуляцией по двухпозиционным сигналам / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.10.2015, Бюл. № 28. – 2 с.
35. Пат. 161276 РФ. Устройство совместной передачи сообщений и служебной информации в последовательных системах / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.04.2016, Бюл. № 11. – 2 с.
36. Пат. 161376 РФ. Устройство совместной передачи сообщений и команд управления / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 20.04.2016, Бюл. № 11.–2 с.
37. Пат. 162225 РФ. Устройство установления цикловой синхронизации по искаженным кодовым словам на основе спектра кода / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 27.05.2016, Бюл. № 15. – 2 с.
38. Пат. 165283 РФ. Устройство оценки вероятности ошибки на бит в потоке бит, кодированных сверточным кодом / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.10.2016, Бюл. № 28. – 2 с.
39. Пат. 165348 РФ. Устройство фазирования узкополосных сигналов / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.10.2016, Бюл. № 28. – 2 с.
40. Пат. 167430 РФ. Устройство оценки вероятности ошибки на бит для сигналов с восьмипозиционной фазовой модуляцией по четырехпозиционным сигналам / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 10.01.2017, Бюл. № 1. – 2 с.
41. Пат. 168000 РФ. Устройство совместной передачи информации и тестовых сигналов в каналах с межсимвольной интерференцией / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 16.01.2017, Бюл. № 2. – 6 с.
42. Пат. 171372 РФ. Устройство установления цикловой синхронизации на основе оцененных показателей качества / Егоров В.В., Лобов С.А., Смаль М.С. [и др.]; 30.05.2017, Бюл. № 16. – 8 с.

**Публикации в материалах международных и российских конференций**

43. Смаль, М. С. Быстрый алгоритм нахождения элемента выборки с заданным рангом / М. С. Смаль // XI Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Тез. докл. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 108-109.
44. Смаль, М. С. Исследования многолучевости в КВ радиоканалах / М. С. Смаль, А. Н. Мингалев // XII Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Тез. докл. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 65-67.
45. Егоров, В. В. Измерение отношения сигнал/помеха на длительности отрезка гармонического колебания / В. В. Егоров, М. С. Смаль // 14-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2012», Москва, доклады. – Т. 2. – С. 461-463.
46. Егоров, В. В. Установление тактовой синхронизации по информационным OFDM сигналам с фазовой модуляцией / В. В. Егоров, М. С. Смаль // 15-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2013», Москва, доклады. – Том 1. – С. 268-271.
47. Смаль, М. С. Оценка вероятности ошибки на бит по рабочим сигналам в условиях наличия замираний сигнала по закону Райса / М. С. Смаль // XIX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», 16-18 апреля 2013 г., Воронеж, доклады. – Т. 1. – С. 11-15.
48. Смаль, М. С. Бестестовая тактовая синхронизация для сигналов с двухпозиционной фазовой модуляцией / М. С. Смаль // 16-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2014», Москва, доклады. – Том 1. – С. 261-264.
49. Смаль, М. С. Способ малозатратной бестестовой оценки качества дискретного канала связи / М. С. Смаль // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 24-26 ноября 2014 г., Москва, доклады. – С. 179-183.
50. Смаль, М. С. Алгоритм установления цикловой синхронизации по спектру помехоустойчивого кода / М. С. Смаль // 17-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2015», Москва, доклады. – Том 1. – С. 270-273.
51. Смаль, М. С. Результаты разработки специализированного программно-аппаратного комплекса для тестирования каналообразующей аппаратуры / М. С. Смаль // 6-я научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «РИМР», 19 мая 2015 г., Санкт-Петербург, тезисы. – С. 10-15.
52. Смаль, М. С. Бестестовое адаптивное управление длительностью защитного интервала OFDM сигнала / М. С. Смаль, В. В. Егоров // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 23-25 ноября 2015 г., Москва, доклады. – С. 187-192.
53. Смаль, М. С. Бестестовое оценивание вероятности ошибки на бит по потоку бит, кодированных сверточным помехоустойчивым кодом / М. С. Смаль // 18-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2016», Москва, доклады. – Т. 1. – С. 368-371.
54. Смаль, М. С. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс для организации сеансов связи по выделенным КВ каналам / М. С. Смаль // 7-я научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «РИМР», 18 мая 2016 г., Санкт-Петербург, тезисы. – С. 4-10.

55. Егоров, В. В. Статистическое оценивание фазы по информационным сигналам с относительной фазовой модуляцией / В. В. Егоров, М. С. Смаль // X Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 21-23 ноября 2016 г., Москва, доклады. – С. 272-274.
56. Егоров, В. В. Эффективный выбор сигнально-кодовых конструкций в адаптивной коротковолновой системе передачи данных / В. В. Егоров, М. С. Смаль // X Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 21-23 ноября 2016 г., Москва, доклады. – С. 275-279.
57. Смаль, М. С. Усовершенствованный малозатратный способ бестестовой оценки качества дискретного канала связи / М. С. Смаль // 19-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2017», Москва, доклады. – Т. 1.– С. 293-298.

#### **Публикации в других изданиях**

58. Смаль, М. С. Бестестовые способы оценки качества канала связи / М. С. Смаль // Восемнадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. – СПб. – 2013. – С. 144.
59. Егоров, В. В. Алгоритм установления тактовой синхронизации для OFDM сигналов с фазовой модуляцией / В. В. Егоров, М. С. Смаль, А. Е. Тимофеев // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2013.– Т. 4. – № 2. – С. 97-100.
60. Смаль, М. С. Оценка качества нестационарного радиоканала по информационным сигналам / М. С. Смаль // Итоги диссертационных исследований. Т. 1. – Материалы V Всероссийского конкурса молодых ученых. – М. : РАН, 2013. – С. 50-58.
61. Егоров, В. В. Пути построения адаптивных систем коротковолновой радиосвязи [Электронный ресурс] / В. В. Егоров, А. Н. Мингалева, А. Е. Тимофеев, М. С. Смаль, М.Л. Маслаков // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – Т. 20. – С. 2831-2835. – Режим доступа: <http://e-koncept.ru/2014/54830.htm>.
62. Egorov, V. V. PDF Ricean Fading Model Parameters Estimation via Real OFDM Signal Analysis for Receivers with AGC / V. V. Egorov, M. S. Smal // Proceedings of the IEEE Russia. North West Section. – 2014. – V. 6, P. 28-30.
63. Смаль, М. С. Бестестовые способы установления синхронизации систем радиосвязи / М. С. Смаль // Девятнадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов, СПб. – 2014. – С. 142.