



Поволжский государственный
УНИВЕРСИТЕТ
СЕРВИСА

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Поволжский государственный университет сервиса»
(ФГБОУ ВО «ПВГУС»)

📍 445017 г. Тольятти, ул. Гагарина, д. 4 🌐 www.tolgas.ru
☎ Тел.: (8482) 26-35-38 ✉ office@tolgas.ru

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Воловача Владимира Ивановича

на диссертацию Лернера Ильи Михайловича

«Модели и методы повышения пропускной способности радиотехнических систем передачи информации в частотно-селективных каналах связи с межсимвольными искажениями», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

1. Актуальность темы исследования

Проблема повышения удельной пропускной способности в условиях наличия мультипликативных помех в настоящее время является одной из ключевых при создании современных радиотехнических систем передачи информации (РСПИ).

Среди мультипликативных помех можно выделить отдельный класс помех, который обусловлен частотно-селективными свойствами среды распространения и избирательными свойствами радиотракта РСПИ. Результатом воздействия таких помех на полезный сигнал является межсимвольная интерференция (МСИ), которая при увеличении скорости передачи приводит к слиянию отдельных сигнальных комбинаций и возникновению несократимой ошибки.

Такие мультипликативные помехи являются определяющими для класса радиотехнических систем передачи информации, функционирую-

щих в среднеширотных ионосферных частотно-селективных каналах связи (ЧСКС), чья сфера применения – это обеспечение связи в условиях чрезвычайных ситуаций и техногенных катастроф; служебная связь различного назначения (морская и дальняя наземная радиосвязь, связь в условиях боевых действий и т.д).

В этой связи особого внимания требует решение научной проблемы повышения эффективности работы радиотехнических систем с последовательной передачей информации, в которых применяются многопозиционные фазоманипулированные и амплитудно-фазоманипулированные сигналы (далее – фазовые РСПИ ППИ) в условиях воздействия указанного класса мультипликативных помех, поскольку именно последовательная передачи информации обеспечивают большую спектральную эффективность в указанных каналах по сравнению с системами, которые обеспечивают передачу информации посредством ортогонального частотного разделение каналов.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности выбранной темы диссертационной работы И.М. Лернера и решаемой в ней научной проблемы.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе автором, имеют чёткое обоснование, полученное как за счёт использования строгих математических доказательств, так и за счёт обширного математического моделирования.

Полученные автором основные и частные научные результаты и выводы в его диссертационной работе являются новыми.

3. Достоверность результатов диссертационной работы

Обоснованность и достоверность результатов, полученных И.М. Лернером в его диссертационной работе, не вызывает сомнений, поскольку они достигнуты посредством корректного применения различных математических методов, теорий и вследствие обширного численного эксперимента, результаты которого находятся в хорошем соответствии с разработанными соискателем теоретическими положениями. А также тем, что полученные в диссертационной работе результаты не противоречат выво-

дам признанных отечественных и зарубежных ученых, опубликованных в ведущих научных журналах и монографиях, и удовлетворяют рекомендациям МСЭ. Также, полученные в диссертационной работе результаты прошли широкое обсуждение на международных и российских конференциях.

4. Научная новизна результатов исследования

Новизна проведенного И.М. Лернером исследования в его докторской диссертации заключается в том, что диссертантом разработан новый подход к решению указанной научной проблемы применительно к выделенному выше классу фазовых РСПИ ППИ, функционирующих в частотно-селективных каналах связи. Новый подход сформулирован в форме новой научной теории – теории разрешающего времени (ТРВ).

Предлагаемый И.М. Лернером новый подход имеет следующие ключевые особенности, отличающие его от известных решений, представленных тремя обширными классами (корреляционными методами, обеспечивающими оптимальную обработку; эквалайзерами, реализующими канальное выравнивание, т.е. субоптимальные методы; гибридными методами, объединяющими оба перечисленных подхода), а именно:

а) новые математические модели реальных составных ЧСКС, адекватные физическим условиям, в которых функционирует указанный класс систем при наличии МСИ, то есть для среднеширотных декаметровых ионосферных каналов связи;

б) новые методы и алгоритмы оценки оптимальной длительности символа, обладающие низкой вычислительной сложностью, обеспечивающие адаптивность к динамическим изменениям частотно-селективной среды распространения и требуемый минимальный уровень принимаемого сигнала на основании анализа импульсной характеристики канала, учитывающие действие дестабилизирующих факторов, ошибок измерений, в т.ч. вызванных квазибелым шумом.

В результате, вышеуказанные особенности обеспечивают требуемую пользователем вероятность корректного приема каждого канального символа, позволяя одновременно избежать проблем, которые присущи существующим в настоящее время методам обработки сигналов в ЧСКС.

Проблемы, которые свойственны существующим методам обработки сигналов в указанных каналах, прежде всего, обусловлены тем, что выбор скорости передачи канальных символов не учитывает тонкую структуру ЧСКС в форме вносимых ими частотных искажений. Это приводит к тому,

ресурсы помехоустойчивого кодирования преимущественно затрачиваются на компенсацию отсутствия возможности восстановления отдельных пар комбинаций канальных символов, обусловленных МСИ, средствами самого приемного устройства, что, во-первых, существенно снижает пропускную способность системы, а во-вторых, значительно увеличивает требования к её вычислительным ресурсам, что негативно сказывается на её энергоэффективности, а в ряде случаев делает невозможным её практическую реализацию.

К наиболее значимым научным результатам, полученным И.М. Лернером в его диссертационной работе, которые имеют важное значение для развития современной теории цифровой связи являются:

1. Определение новых свойств и явлений, полученных за счёт развития метода медленно меняющихся амплитуд С.И. Евтянова (далее ММА) применительно к анализу поведения информативных параметров принимаемого сигнала, вызванных скачком фазы и/или амплитуды гармонического колебания. В результате чего был выявлен ряд новых свойств и явлений, которые стали основой при создании теории разрешающего времени для фазовых РСПИ ППИ. К ним относятся: 1) достижение наибольшего времени установления мгновенной фазы происходит при значениях скачка фазы, которые близки к $\pm\pi/2$, близость к указанному значению определяется заданной ошибкой установления по фазе; 2) влияние соотношения амплитуд гармонического колебания приводит только к изменению скорости протекания переходного процесса, но не влияет на сам характер процесса установления информативных параметров; 3) скорость передачи канальных символов может быть повышена для ЧСКС, имеющих неравномерности в полосе пропускания за счёт наличия моментов времени, при которых информативные параметры достигают своих стационарных значений, до окончания процесса установления. Это свойство было использовано для выявления нового режима работы фазовых РСПИ ППИ – режима «окон прозрачности». Его использование позволяет увеличить удельную пропускную способность РСПИ для ряда ЧСКС, имеющих сложную зависимость амплитудно-частотной характеристики от частоты, в среднем в 1,2...1,9 раза.

2. Создание для класса фазовых РСПИ ППИ новой теории – теории разрешающего времени, использование которой позволяет в адаптивном режиме управлять режимами работы указанного класса систем. Её отличительными особенностями от ранее существующих теорий являются: новые

и адекватные ионосферным среднеширотным декаметровым каналам связи математические модели, построенные на базе нового системного параметра – «разрешающее время»; новый подход к оценке их пропускной способности на базе системного параметра «разрешающее время»; новый метод оценки эффективной памяти, который реализует нестатистическую процедуру оценки; новые методы оценки пропускной способности для указанных каналов, обладающие низкой вычислительной сложностью, определяемой величиной эффективной памяти канала или имеющие постоянную вычислительную сложность; алгоритмы и программные реализации указанных методов, которые обеспечивают получение оценок разрешающего времени и пропускной способности в реальном времени; разработаны; новые методы оценки помехоустойчивости для указанного класса РСПИ применительно к среднеширотным ионосферным каналам. Предложены дополнительные методы снижения вычислительной сложности разработанных алгоритмов оценки пропускной способности за счёт методов аналитической кластеризации слагаемых в полиномах и доказанного свойства о «комбинациях символов».

Получено новое системно-техническое решение на основе разработанной соискателем теории разрешающего времени для указанного класса РСПИ применительно к среднеширотным ионосферным декаметровым каналам связи с периодом квазистационарности не менее чем 300 мс. Определены основные технические критерии, предъявляемые к подсистемам указанного класса РСПИ ППИ, даны рекомендации к их практической реализации, получены новые решения по аналогового-цифровой обработке сигналов для достижения требуемых результатов в форме патентов на способы и устройства. Особо стоит отметить, что даны рекомендации к построению вычислителя разрешающего времени на базе отечественных ЦПУ Эльбрус.

Посредством численного эксперимента доказан выигрыш предлагаемого автором системно-технического решения в сравнении с результатом, который достигается при использовании стандарта STANAG 4539, по пропускной способности более чем на 25%, а по помехоустойчивости – не менее чем на 5,93 дБ при вероятности ошибки на бит, равной 10^{-3} при использовании ФМн-4-сигнала при наихудших условиях, т.е. когда характеристики ионосферного декаметрового являются следующими: лучи имеют одинаковую мощность, задержка между лучами 185 мкс, доплеровское расширение спектра 0,5 Гц.

3. Создание новых инженерных методов для анализа эффективности указанного класса фазовых РСПИ ППИ и их программных реализаций, осуществленных в среде моделирования Matlab, которые обладают высокой вычислительной эффективностью. Они обеспечивают: а) анализ основных свойств «окон прозрачности», связанных с формой АЧХ ЧСКС, и определение условий их появления; б) оценку влияния ошибок измерений на стабильность «окон прозрачности» и изменение их свойств; в) определение с использованием «окон прозрачности» достижимых значений по удельной пропускной способности и возможность применения «окон прозрачности» для повышения пропускной способности с учетом конфигураций сигнальных созвездий ФМн- n - и АФМн- N -сигнала.

4. Получены: а) для обеспечения наибольшей помехоустойчивости приема канальных символов и отсутствия несократимой ошибки на символ, вызванной МСИ для указанного класса РСПИ, правило выбора значения начальной фазы сигнального созвездия; б) оценка потенциальной пропускной способности в замкнутой форме для ЧСКС с КЧХ резонансного фильтра при использовании ФМн- n -сигнала; в) показана возможность достижения значений потенциальной удельной пропускной способности в 9 бит/ Гц*с при использовании ФМн-4-сигнала в ЧСКС с КЧХ резонансного фильтра; г) дополнительные свойства разработанных алгоритмов, которые позволяют снизить как объем вычислений, так и затрачиваемый объем памяти вычислителя, используемых при проведении вычислений разрешающего времени.

5. Для ряда важных случаев, при существенных ограничениях, накладываемых на работу РСПИ ППИ, и передачи информации с помощью ФМн-4-сигнала на центральной частоте ЧСКС показано, что: 1) удельная пропускная способность достигает значений от 2,07 до 2,799 бит/Гц*с при изменении формы АЧХ ЧСКС канала от максимально гладкой в полосе пропускания до значительных неравномерностей в полосе пропускания; 2) для ЧСКС с АЧХ, удовлетворяющей АЧХ СТКС, показана возможность достижения 5,72 бит/Гц*с при использовании АФМн-64-сигнала.

5. Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость работы заключается: 1) в развитии метода медленно меняющихся амплитуд и выявлении новых свойств и явлений, использование которых позволяет повысить пропускную способность

фазовых РСПИ ППИ в ЧСКС при МСИ; 2) в создании для РСПИ ППИ новой теории обработки сигналов на базе оценок пропускной способности ЧСКС и адаптивного управления работой РСПИ ППИ – теории разрешающего времени, в рамках которой разработаны новые математические модели ЧСКС, методы и алгоритмы оценок пропускной способности и помехоустойчивости РСПИ при наличии дестабилизирующих факторов, правило выбора начального сдвига сигнального созвездия; 3) в получении аналитического выражения для оценки потенциальной пропускной способности в замкнутой форме для КЧХ резонансного фильтра и ФМн-сигнала; 4) в получении новых свойств, использование которых позволяет дополнительно снизить вычислительную сложность алгоритмов и затрачиваемый объем памяти вычислительного устройства.

Практическая ценность работы заключается в создании новых алгоритмов реального времени, которые имеют низкую вычислительную сложность, для определения разрешающего времени, пропускной способности и эффективной памяти (нестатистический алгоритм); в разработке алгоритма компенсации учёта ошибки определения начальной фазы сигнального созвездия в виде методической составляющей при определении разрешающего времени; в разработке функциональной схемы фазовой РСПИ ППИ для узкополосного декаметрового ионосферного канала (парциальный 3 кГц канал), алгоритмов и временных диаграмм её функционирования; рекомендаций для практической реализации подсистем РСПИ; в получении новых способов и устройств аналого-цифрового преобразования для указанного класса РСПИ ППИ; в разработке пакета прикладных программ для полноценного моделирования основных характеристик указанного класса РСПИ.

Перечисленные выше составляющие являются основой для создания нового класса систем передачи информации в ионосферных декаметровых каналах связи.

Практическая значимость работы подтверждается соответствующими актами внедрения, полученных от АО «НПО «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко», АО «Казанское приборостроительное конструкторское бюро», Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ при проведении НИР при выполнении гранта РФФИ 18-37 00440 по теме «Теоретические аспекты повышения пропускной способности фазовых радиотехнических систем передачи информации, работающих при сильных межсимвольных искажениях в ли-

нейных избирательных системах радиотракта», в рамках выполнения гос. задания №8.5635.2017/БЧ «Исследование принципов взаимодействия специальных программно-определяемых комплексов, работающих в информационном поле», по договору 06-114-ц-Г 2018 АН РТ от 31.10.2018 с Академией наук Республики Татарстан по теме «Адаптивный алгоритм обработки сигналов подвижной связи в сложных флуктуирующих негауссовских помехах» и в рамках учебного процесса при подготовке инженеров по направлению подготовки 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиоэлектронного оборудования».

6. Общая оценка диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, списка сокращений и условных обозначений и шести приложений. Работа изложена на 665 страницах, содержит 236 рисунков и 24 таблиц. Список использованных источников включает 424 пункта.

Материал диссертации изложен достаточно подробно и доходчиво, обладает логической последовательностью, отвечающей требованиям проведения научных исследований, имеет целостность и внутреннее единство содержания. Текстовый материал и иллюстрации оформлены аккуратно, в соответствии с требованиями ГОСТ, так же, как и список используемых литературных источников.

Диссертация является завершенным научным исследованием, направленным на решение поставленной *научно-технической проблемы* – теоретическое обоснование и разработка новых моделей и методов обработки ФМн-п- и АФМн-Н- сигналов на базе адаптивного управления режимами работы РСПИ ППИ, функционирующих в ЧСКС при МСИ, с целью повышения их пропускной способности.

Выдвигаемые соискателем основные положения, выносимые на защиту, а также сформулированные в диссертации выводы и рекомендации, как результаты исследования, являются новыми и сомнений не вызывают.

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 67 печатных работах, из которых 25 работ опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science по искомым специальностям, десяти объектах интеллектуальной собственности (два

патента на изобретение и восемь свидетельств о регистрации программ для ЭВМ), и неоднократно обсуждались на международных и российских научно-технических конференциях.

Диссертационная работа соответствует:

– по специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения следующим пунктам её паспорта:

п. 1. Исследование процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств и систем;

п. 15. Разработка и исследование физических, математических и гибридных имитационных моделей радиотехнических устройств и систем, включая системы и устройства аналогового и цифрового телевидения и оптикоэлектронных устройств;

– по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций следующим пунктам её паспорта:

п. 1. Разработка и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций;

п. 2. Исследование новых технических, технологических и программных решений, позволяющих повысить эффективность развития цифровых сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

7. Замечания по диссертационной работе

1. Объем диссертационной работы является слишком большим. Только обзор по теме исследования, в ходе которого формируются задачи, необходимые для решения научной проблемы, составляют 92 стр.

2. В разделе 3.2 на стр. 197 использовано обозначение множества натуральных чисел без нуля в форме \mathbb{N}^* , которое не свойственно русскоязычным источникам, но соответствует ISO 31-11 (1992 г.) и ISO 80000-2 (2009 г.).

3. В разделе 4.2 на стр. 258 указано, что в качестве мажорирующих рядов были выбраны три типа ряда на основе анализа литературы по переходным процессам. При этом остаётся неясным, по какому критерию выбраны применяемые в данной диссертационной работе типы мажорирующих рядов.

4. В разделах 4.2 и 4.3 на основе доказательства свойства о «комбинациях символов» указывается, что общее число уравнений, подлежащих решению может быть уменьшено при оценке разрешающего времени за счёт итерационной процедуры оценки разрешающего времени (проверке решения для $(d-1)$ -го и d -го символа), что должно позволить снизить и объем вычислений по сравнению с тем случае, когда число уравнений полагается $G+1$. В работе не показано, при каком числе символов целесообразно применять итерационную процедуру, а в каком случае обеспечить решение набора уравнений, состоящего из $G+1$ уравнений.

5. В заключении указывается, что дальнейшее развитие теории разрешающего времени необходимо проводить, в том числе, за счёт снижения вычислительной сложности алгоритмов до линейной, прежде всего для тех, которые основаны на аналитических методах. При этом автором не раскрывается, возможно ли этого достичь за счёт методов аналитической кластеризации полиномов для аналитических методов, которые представлены в работе, используя их совместно существующими методами решения задач оптимизации.

6. В автореферате имеется опечатка в формуле на стр. 35 $\Delta_0 = \Delta_{\text{доп}} / \Delta_{\text{ш}}$ должно быть $\Delta_0 = \Delta_{\text{доп}} / \Delta M_{\text{ш}}$.

7. В тексте диссертации в ограниченном объеме имеются опечатки и стилистические неточности. Так на стр. 82 порядковый номер таблицы 1.4 совпадает порядковым номером другой таблицы на стр. 114.

Вышеприведенные замечания не снижают научную значимость и практическую ценность диссертационной работы И.М. Лернера.

8. Заключение

Диссертационная работа Лернера Ильи Михайловича «Модели и методы повышения пропускной способности радиотехнических систем передачи информации в частотно-селективных каналах связи с межсимвольными искажениями» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития цифровой связи и повышения (степени) ее использования для нужд обороноспособности, заключающейся в теоретическом обосновании и разработке новых моделей и методов обработки ФМн-п- и АФМн-Н- сигналов на базе адаптивного управления режимами работы радиотехнических систем с последовательной передачей информации,

функционирующих в частотно-селективных каналах связи при наличии межсимвольных искажений с целью повышения их пропускной способности и помехоустойчивости.

Считаю, что диссертационная работа на тему «Модели и методы повышения пропускной способности радиотехнических систем передачи информации в частотно-селективных каналах связи с межсимвольными искажениями» удовлетворяет требованиям пп. 9-14 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а её автор, Лернер Илья Михайлович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальностям: 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения; 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Официальный оппонент,
и.о. директора Высшей школы передовых
производственных технологий
Поволжского государственного
университета сервиса
д.т.н., доцент

 В.И. Воловач

28.02.2024 г.

Подпись заверяю должность, ФИО: _____

