

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Лернера Ильи Михайловича на тему «**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 и 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Актуальность темы диссертации. Телекоммуникационные технологии являются, пожалуй, самой быстроразвивающейся областью человеческой деятельности. Обновление знаний в этой области происходит экспоненциально. Поэтому уследить за этим ростом весьма сложно и возникает узкая специализация специалистов. Узкая специализация делает проблематичным выполнение системных работ, которые требуют широкой эрудиции специалиста. Представленная диссертация Лернера И.М. относится как раз к системным работам. В ней с новых позиций решается проблема повышения пропускной способности систем передачи информации, которая является одной из главных проблем радиотехники и теории связи на всем протяжении истории их существования. Работа представлена по двум специальностям 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения и 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций. И это вполне закономерно, так как порожденные телекоммуникационными технологиями межсимвольные искажения компенсируются радиотехническими методами, а именно, за счет разработки новых методов обработки сигналов.

Достоинством представленной работы является подробный и тщательный системный анализ результатов, полученных исследователями по рассматриваемым вопросам за весь период развития радиотехники и связи. Грамотно выполненный обзор методов обработки сигналов, анализа переходных процессов в линейных избирательных цепях представляется существенным результатом исследования.

Современные телекоммуникационные системы неразрывно связаны с использованием радиотехнических устройств, работающих в разных частотных диапазонах и обладающие огромным многообразием особенностей. Вычислительные средства, которые в настоящее время доступны для реализации устройств обработки сигналов, позволяют учесть множество этих особенностей. Однако, это возможно только в том случае, когда имеются обоснованные методы и алгоритмы обработки сигналов, разработке которых посвящена рассматриваемая работа.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы Лернер И.М., безусловно, актуальна.

Цель работы состоит в повышении удельной пропускной способности радиотехнических систем с последовательной передачей информации АФМн- N - и ФМн- n - сигналами в частотно-селективных каналах связи (ЧСКС) при наличии межсимвольной интерференции (МСИ).

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие **задачи**:

1. Проведен подробный анализ по соответствующим областям: теории приема сигналов фазовыми радиотехническими системами последовательной передачи информации (РСППИ) в непрерывных ЧСКС и методов оценки их пропускной способности, по переходным процессам в полосовых фильтрах, описывающих их частотно-селективные свойства в течение периода квазистационарности. Результатом анализа: а) определены методы приема и обработки сигналов ФМн- n - и АФМн- N - сигналов в ЧСКС, позволяющих повысить удельную пропускную способность фазовых РСППИ; б) сформированы требования к новому подходу оценки пропускной способности РСППИ и к разработке новых адекватных математических моделей ЧСКС, позволяющих осуществлять адаптивное управление режимами её работы; в) определен метод анализа переходного процесса для ЧСКС и сформированы критерии его развития для определения новых общих свойств и явлений, позволяющих повысить удельную пропускную способность фазовых РСППИ.

2. Создана теория разрешающего времени (ТРВ) для фазовых РСППИ с линейным приемником и адаптивным управлением режимами их работы, путем развития идей ТРВ для информационно-измерительных систем, что необходимо для оценки их пропускной способности в ЧСКС и определения возможностей по её повышению по сравнению с существующими подходами.

При решении этой задачи:

2.1) Развита метод медленно меняющихся амплитуд (ММА) С.И. Евтянова для анализа переходного процесса, вызванного скачком амплитуды и/или фазы гармонического колебания в узкополосных линейных системах (УЛС), который учитывает: а) значения скачка фазы в широком диапазоне значений и изменение мгновенной фазы (МФ) выходного процесса по четвертям комплексной плоскости; б) постоянный фазовый сдвиг от УЛС.

2.2) Развита идея ТРВ для информационно-измерительных систем применительно к фазовым РСППИ. Это потребовало:

а) разработать **новые адекватные математические модели** для каждого из типов сигналов (ФМн- n - и АФМн- N -сигналов) для информационных ЧСКС на основе нового системного параметра «разрешающее время», которые *учитывают*:

- смещение частоты, обусловленное в т.ч. эффектом Доплера из-за движения среды распространения;

- вызванный малым доплеровским расширением спектра набег фазы, чьё значение существенно меньше наименьшего скачка фазы, обусловленного передачей канального символа;

- ошибки измерений, в т.ч. обусловленные аддитивным гауссовским шумом;
- для ФМн- n -сигнала – ограничение по наименьшей амплитуде принимаемого сигнала в момент съема информации о символе;

- *используют* новый системный параметр - *разрешающее время* (РВ);
- *обеспечивать* оценку пропускной способности при использовании линейного приемника и заданной конфигурации СС при воздействии дестабилизирующих факторов;

б) разработать **новые методы** определения пропускной способности и исследования свойств реализующих их **алгоритмов** на основе оценки РВ для новых моделей ЧСКС, в том числе при больших значениях памяти канала (ПК) и объема канального алфавита (КА), которые должны обеспечить:

- низкую вычислительную сложность алгоритмов оценки пропускной способности и высокую точность,

- возможность выполнения алгоритмов в реальном масштабе времени для обеспечения адаптивного управления работой фазовой РСППИ с линейным приемником в информационном канале;

в) *исследование* с помощью разрабатываемых методов возможностей по повышению пропускной способности фазовых РСППИ с линейным приемником в ЧСКС с сильными МСИ, в том числе при наличии затухающих колебаний в процессе установления информативных параметров, за счёт применения новых системных и физических свойств и явлений. Разработка соответствующего инженерного ПО.

3) Разработаны базовые структуры фазовой РСППИ для ЧСКС с адаптивным управлением режимами её работы на основе разработанных алгоритмов. Синтезированы функциональные схемы фазовой РСППИ с линейным приемником на базе ТРВ для 3 кГц ЧСКС КВ-диапазона. Проведена оценка основных технических характеристик такой системы (пропускной способности, помехоустойчивости) и их сравнение с характеристиками существующих стандартов связи для данного частотного диапазона.

Научная новизна:

1. Развита ММА С.И. Евтянова, позволяющий определить новые физические и системные свойства и явления, связанные с поведением информативных параметров переходного процесса на выходе УЛС, вызванных скачком амплитуды и/или фазы гармонического колебания, использование которых позволяет повысить пропускную способность фазовых РСППИ, работающих в ЧСКС при МСИ. Это было показано путем получения новых математических выражений и математических доказательств, описывающих данный тип переходного процесса *отличающихся от существующих* учётом значений скачка фазы в широком диапазоне значений, изменения МФ пере-

ходного процесса по четвертям комплексной плоскости, и постоянного фазового сдвига, вносимого УЛС.

2. Создана ТРВ для фазовых РСППИ с линейным приемником. Её *отличительными свойствами* от существующих являются: 1) введение нового системного параметра – РВ; 2) создание новых адекватных математических моделей на базе РВ для фазовых РСППИ с линейным приемником, функционирующих в ЧСКС при наличии МСИ, которые учитывают: а) расстройку по частоте, обусловленную неточностью настройки передатчика и/или доплеровским сдвигом по частоте из-за движения среды распространения; б) набег фазы, обусловленный малыми значениями доплеровского расширения спектра, т.е. набег фазы на один символ существенно меньше наименьшего скачка фазы при передаче канального символа; в) ошибки измерений информативных параметров, вносимых приемником, в том числе аддитивным белым гауссовским шумом; г) ошибки восстановления начальной фазы несущего колебания; д) влияние пороговой подсистемы шумоподавления на работу решающего устройства при использовании ФМн- n -сигнала; 3) доказано правило выбора значения начальной фазы СС, обеспечивающее наибольшую помехоустойчивость и отсутствие постоянной ошибки на символ, вызванной МСИ; 4) разработан новый подход к оценке пропускной способности на базе РВ для фазовых РСППИ; 5) получение оценки пропускной способности в замкнутой форме для ЧСКС с КЧХ резонансного фильтра (РФ) и ФМн- n -сигнала; 6) создание нестатистического метода оценки эффективной памяти ЧСКС для фазовой РСППИ; 7) создание для фазовой РСППИ аналитических методов оценки РВ и пропускной способности ЧСКС с симметричными КЧХ относительно частоты приема с низкой вычислительной сложностью, не зависящих от объема КА, $O(\sim 2^G)$, где G – эффективная память канала, синтез высокоскоростных алгоритмов и их практических реализаций с высокой параллельностью вычислений, исследование их свойств для дополнительного снижения вычислительной сложности; 8) создание высокоскоростного численного метода оценки РВ и пропускной способности при несимметричности КЧХ ЧСКС относительно частоты приема сигнала и алгоритма его реализации с высокой параллельностью вычислений; 9) разработаны методы оценки помехоустойчивости РСППИ на базе ТРВ, отличающиеся от существующих тем, что используются точные предельные оценки наименьшего уровня сигнала на выходе ЧСКС, при которых возможен приём символов с заданной вероятностью ошибки; 10) выявлен новый режим работы фазовой РСППИ – режим «**окон прозрачности**» (ОП), возникающих из-за затухающих колебаний в процессе установления значения информативных параметров, обусловленных наличием нескольких собственных частот у ЧСКС.

3. Показано, что среднее время расчёта на ЭВМ (с производительностью FR64 – 212 ГФлопс/с) разрешающего времени и пропускной способности на одно СС с помощью алгоритмов на базе аналитических методов, реализованных в форме ПО в среде Matlab, для ФМн- n -сигнала при $n \in [4; 128]$ – 39,7 мс, а для АФМн- N -сигнала при $\sqrt{N} \in [4; 32]$ – 152,9 мс, а для численного метода – 1,65 с. Показано, что для числен-

ного метода обеспечивается постоянная вычислительная сложность. Показано, что усреднённая относительная погрешность оценки пропускной способности между аналитическим и численным методом для ФМн- n -сигнала не превышает 0,5%. Относительная погрешность уменьшается с увеличением n ; для малых n она не превышает 2,08%, исключение $n = 4$, при котором эта величина, усредненная по различным УЛС – 2,7%, а её наибольшее значение не превышает 5,9%. Данные оценки при использовании АФМн- N -сигнала имеют следующие значения: усреднённая относительная погрешность не превосходит 1,3% при $\sqrt{N} \leq 10$ и уменьшается с увеличением N ; при малых N - не превосходит 5%.

4. На основе применения разработанных методов оценки РВ и пропускной способности для фазовых РСППИ были исследованы возможности повышения пропускной способности за счёт ОП. Результаты, полученные для ряда сложных ЧСКС, показали возможность повышения пропускной способности за счёт ОП в среднем на 1,2...1,9 раза по отношению к случаю, когда ОП не используются при заданной конфигурации СС. Исследование ОП произведено с помощью созданных инженерных методов анализа эффективности фазовых РСППИ: 1-й метод реализует построение областей ОП и зависимостей граничного времени, определяющих РВ, на плоскости «длительность символа – расстройка по частоте», при заданной конфигурации СС и изменении уровня ошибок измерений; 2-й метод реализует построение нескольких типов оценок пропускной способности и конфигураций СС, необходимых для их реализации, при изменении КЧХ ЧСКС и варьировании значений расстройки по частоте, уровня ошибок измерений и значения пороговой амплитуды. Благодаря их использованию показана возможность достижения значений потенциальной удельной пропускной способности в 9 бит/ Гц*с при использовании ФМн-4-сигнала в ЧСКС с КЧХ резонансного фильтра. 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. Разработаны: 1) обобщенная структурная схема фазовой РСППИ с адаптивным управлением режимами работы, реализующая принципы ТРВ; 2) функциональная схема фазовой РСППИ, реализующая принципы ТРВ, для парциального 3кГц ЧСКС КВ-диапазона, для которой определено среднее время оценки разрешающего времени и пропускной способности при использовании отечественных вычислительных универсальных платформ на базе Эльбруса, представлены рекомендации по их практическому использованию. Для РСППИ КВ-диапазона при конкретных условиях показан выигрыш по пропускной способности более чем на 25%, а по помехоустойчивости – не менее чем на 5,93 дБ при BER = 10^{-3} по сравнению с результатами, достигаемыми в стандарте STANAG 4539, при использовании ФМн-4-сигнала

для ЧСКС с задержкой в 185 мкс между лучами одинаковой мощности и доплеровским расширением 0,5 Гц. Получены новые решения по аналогово-цифровой обработке сигналов.

Значение для практики заключается в том, что:

1. Разработаны алгоритмы реального масштаба времени, реализующие аналитические и численные методы оценки РВ и пропускной способности для фазовых РСПИ ППИ на базе ТРВ, функционирующих в ЧСКС, в т.ч. и при скоростях передачи информации ВСН.

2. Разработан нестатистический алгоритм оценки эффективной памяти ЧСКС для ФМн-*n*- и АФМн-*N*-сигналов.

3. Разработан алгоритм компенсации учёта ошибки определения начальной фазы СС в виде методической составляющей при определении РВ.

4. Создан пакет оригинальных программ и программных комплексов математического моделирования алгоритмов обработки сигналов, при широкой вариации системных параметров, как эффективное инструментальное средство для разработчиков современных РСПИ ППИ, позволяющий существенно уменьшить временные и финансовые издержки при проведении НИР и НИОКР по данной тематике.

5. Создан новый способ и устройство аналого-цифрового преобразования, необходимого для реализации приемника класса фазовой РСПИ ППИ на базе ТРВ, отличающийся от других решений наличием четырех каналов преобразований, переключение между которыми обеспечивается за счёт быстродействующего ключа или наличием двухтактного аналого-цифрового преобразования входного сигнала, что позволяет обеспечить как высокую скорость преобразования, так и широкий динамический диапазон.

6. Получена функциональная схема фазовой РСПИ ППИ с адаптивным управлением режимами работы для 3кГц ЧСКС КВ-диапазона, реализующая разработанные алгоритмы в ТРВ.

Краткая характеристика построения и содержания работы

Диссертация изложена на 665 стр. (основная часть, список сокращений и условных обозначений, 6 приложений) и содержит 24 таблиц, 236 рисунков. Основная часть диссертации изложена на 474 стр. и состоит из: введения, 5 глав, заключения, списка литературы.

Во введении обоснована актуальность научной проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены ее основные результаты и область их применения, отмечена практическая ценность и научная новизна, а также приведены сведения об апробации работы и представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе произведен сравнительный анализ характеристик для двух классов фазовых РСПИ ПарПИ и РСПИ ППИ. Показано, что с точки зрения на абелевой группе. Разработана математическая модель разомкнутой ЦИРС. Рассмотрены методы построения цифровых систем управления, использующие для

описание системы переменные состояния. Предложена разработанная автором работы математическая модель адаптивной системы, которая основана на модели разомкнутой ЦИРС и предназначена для случая равных размерностей кодовых векторов сообщения и управления. В заключении главы поставлена цель и определены задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена развитию ММА и определению с его помощью новых физических и системных свойств и явлений, позволяющих повысить пропускную способность фазовых РСПИ ППИ в ЧСКС, на основании анализа переходного процесса, вызванного скачком амплитуды и/или фазы гармонического колебания УЛС¹.

Из анализа полученных результатов следует, что моменты времени достижения информативными параметрами стационарных значений до окончания процесса установления при наличии затухающих колебаний можно использовать для увеличения скорости передачи, если при передаче каждого канального символа данные момент не будут сильно различаться по времени.

Третья глава посвящена созданию новых математических моделей ЧСКС для фазовых РСПИ ППИ на основе нового системного параметра РВ с учётом критериев для моделей из 1-й главы и новому подходу к оценке их пропускной способности на его основе.

Четвертая глава посвящена разработке новых высокоскоростных методов оценки пропускной способности ЧСКС, алгоритмов их реализации, исследованию их свойств с точки зрения уменьшения вычислительной сложности.

Пятая глава посвящена практическим аспектам реализации ТРВ для повышения пропускной способности фазовых РСПИ ППИ в ЧСКС.

На основании разработанного оригинального ПО получены оценки по времени выполнения алгоритмов на одну конфигурацию сигнального созвездия (СС), реализующих АМ и ЧМ, на базе универсальной вычислительной платформы Dell Precision 7540-5260 (пиковая производительность FP64 – 212,5 ГФлоп/с)

Анализ результатов и существующих отечественных универсальных вычислительных платформ на базе ЦПУ Эльбрус, доказывает возможность реализации полученных алгоритмов в реальном масштабе времени и позволяет сформулировать требования к использованию вычислительных платформ на их основе для реализации фазовой РСПИ на базе ТРВ (требования к вычислителю) для её функционирования в ионосферных среднеширотных ЧСКС с периодом квазистационарности не менее 300 мс.

В заключении подчеркнута, что в работе получены и обоснованы математические выражения и технические решения, которые способствуют созданию аппаратуры радиосвязи, работающей в сложной, динамически изменяющейся, помеховой обстановке. Разработанные радиостанции обеспечивают высокую достоверность передачи информации при минимизации энергетических и частотных ресурсов.

Общие замечания по работе

1. Объем диссертации слишком большой. Основной текст составляет 474 страницы и приложение 191 страницу. Только обзор исследований по рассматриваемой проблеме занимает 92 страницы.

2. В диссертации нет оценки энергетических затрат, которые необходимы для увеличения пропускной способности.

3. Для повышения быстродействия обработки сигналов требуется минимизация времени переходных процессов. Непонятно, почему в диссертации основное внимание уделяется оценке наибольшего времени установления.

4. На страницах 225 и 226 приведены строгие неравенства. Однако, как следует из утверждения автора, при некоторых условиях они превращаются в равенство. Поэтому в приведенных формулах следует использовать нестрогие неравенства.

5. Для реализации разработанных методов соискателем создано программное обеспечение на языке интерпретатора М среды Matlab/Simulink. Насколько ухудшатся результаты при переводе программного обеспечения на языки, пригодные для реализации на сигнальных процессорах, например язык C++?

6. Согласно, приведенном на странице 187, определению разрешающим временем по фазе является объединение трех множеств. Следовательно, само разрешающее время является множеством. Однако в дальнейшем разрешающее время используется как текущее время без указания места во множестве. Такая вольность в представлении затрудняет восприятия большого количества приведенных формул.

7. Диссертационная работа и автореферат имеют ряд редакционных неточностей.

Заключение


Диссертация, представленная Лернером И.М, является законченной научно-квалификационной работой. В диссертации решена научная проблема создания новых математических моделей радиотехнических систем передачи информации с последовательной передачей информации, работающих в частотно селективных каналах связи при наличии межсимвольных искажений. Предложенные теоретические положения доведены до инженерных методов расчета созданных алгоритмов обработки сигналов с фазовой манипуляцией. Научные результаты и технические решения вносят значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в создание средств радиосвязи. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы, использованы при выполнении НИР в рамках гранта РФФИ и на ряде промышленных предприятий. Основные результаты диссертации в должной мере отражены в многочисленных научных публикациях и апробированы на научных конференциях.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. Работа

соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а Лернер Илья Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальностям: 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения и 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Официальный оппонент:

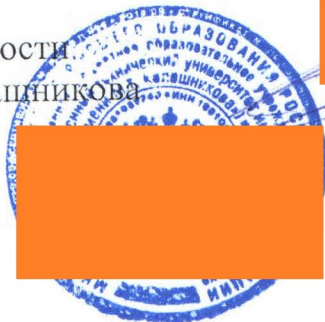
д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой «Радиотехника»
ИжГТУ имени М.Т. Калашникова



14.02.24

В.В. Хворенков

Подпись Хворенкова В.В. заверяю

Проректор по научной и
инновационной деятельности
ИжГТУ имени М.Т. Калашникова




15.02.24

А.Н. Копысов

Организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (ИжГТУ имени М. Т. Калашникова).
Адрес: 426069, Приволжский ФО, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.
Тел.: (3412) 77-20-22, (3412) 77-41-33
E-mail: info@istu.ru