

ОТЗЫВ

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;
2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

1. Актуальность темы диссертационной работы

Несмотря на более чем полувековой опыт применения цифровых радиотехнических систем передачи информации (РСПИ) проблема повышения скорости передачи сообщений по-прежнему не утратила своей актуальности. На ранних этапах развития для этого активно использовались спектрально-эффективные методы модуляции без межсимвольной интерференции (МСИ). Начиная с 1960-х гг. появились работы, в которых для повышения скорости показана возможность использования взаимно коррелированных канальных символов при передаче информации. Примерно в то же время Д. Тафтсом (D.Tufts) исследуется принципиальная возможность передачи канальных символов при скоростях модуляции выше скорости Найквиста в частотно-селективных каналах связи, что в последующем нашло отражение в работах Х. Марко (H. Marko), Дж. Мазо (J.E. Mazo) (1970...80 гг.)

О существенной сложности проблемы повышения скорости передачи информации и достижения значений, близких к пропускной способности, в многолучевых каналах с выраженными частотно-селективными замираниями в одной из своих работ еще в 1958 г. писал член-корр. АН СССР В.И. Сифоров, что справедливо отмечает в своей работе диссертант. Согласно выводам В.И. Сифорова, сложность решения данной задачи растёт по показательному закону с увеличением скорости передачи и увеличения памяти канала, что в ряде случаев делает практическую реализацию такой системы или крайне сложной, или невозможной.

Характерным примером таких каналов, являются ионосферные каналы связи декаметрового диапазона. Использующие их РСПИ широко применяются в интересах решения задач, имеющих хозяйственное и оборонное значение для нашей страны. Согласно результатам исследований, полученным ведущими отечественными и зарубежными специалистами, в указанном классе каналов преимущество имеют модемы с последовательной передачей информации.

С учётом изложенного тема диссертационной работы и решаемая в ней научная проблема – теоретическое обоснование и разработка новых методов обработки многопозиционных фазоманипулированных и амплитудно-фазоманипулированных сигналов на базе адаптивного управления режимами работы радиотехнических систем с последовательной передачей информации (РСПИ ППИ), функционирующих в частотно-селективных каналах связи (ЧСКС) при МСИ, направленная на повышение максимально достижимой скорости передачи информации, являются актуальными.

2. Научная новизна результатов исследований и их теоретическая значимость

Научная новизна результатов исследования, проведенного Лернером И.М. в диссертационной работе, прежде всего, обусловлена разработкой системного подхода по применению теории разрешающего времени к решению указанной выше научной проблемы, который позволяет в рамках периода квазистационарности декаметрового ионосферного канала (в худшем случае, не менее 300 мс), обеспечить в реальном времени оценку пропускной способности и адаптивную настройку параметров фазовой РСПИ ППИ. За счёт оптимального выбора длительности символа разработанные в рамках предложенного подхода методы позволяют повысить помехоустойчивость системы, поскольку в этом случае исключается принятие решения о канальном символе в моменты, когда действующая на выходе канала связи амплитуда искаженного сигнала, обусловленного МСИ, принимает

близкие к нулю значения. Это позволяет сократить вычислительные затраты, обусловленные необходимостью применения помехоустойчивого кодирования.

Предложенная в диссертации теория разрешающего времени для класса фазовых РСПИ ППИ впервые реализует комбинированный неасимптотический подход к решению указанной научной проблемы, когда построение решения по оценке достижимой скорости передачи информации производится в реальном времени в соответствии с технической реализацией самого устройства, что позволяет учитывать и специфику частотно-селективных замираний в многолучевом канале, и особенности реализуемых алгоритмических и программно-аппаратных решений для указанного класса каналов РСПИ.

К числу наиболее значимых научных результатов рецензируемой работы следует отнести:

1. Новые свойства и явления в поведении переходных процессов, которые: а) характеризуют изменение скорости процесса установления от значения скачка фазы в широких пределах, обусловленного передачей одного элемента многопозиционного фазоманипулированного или амплитудно-фазоманипулированного сигнала через узкополосные линейные системы, описывающие многолучевые каналы в декаметровом диапазоне; б) указывают на возможность съема информации о канальном символе до окончания процесса установления, сопровождающегося затухающими колебаниями, в окрестностях моментов времени, когда информативные параметры достигают своих стационарных значений.

2. Развитие теории построения фазовых РСПИ ППИ, функционирующих в многолучевых декаметровых каналах с МСИ, в части применения принципов разрешающего времени, что позволило обеспечить оценку максимально достижимой скорости передачи информации в реальном времени и осуществить адаптивное определение настроек системы для повышения скорости с учётом характерных для указанных каналов дестабилизирующих факторов, таких как доплеровское расширение спектра, сдвиг по частоте,

обусловленный неточностью настройки и (или) эффектом Доплера, неточностью восстановления несущей и погрешностями измерений.

Отмеченное выше развитие теории включает: новые математические модели реальных многолучевых декаметровых каналов для среднеширотных трасс, в основе которых используются новый системный параметр «разрешающее время»; новые методы оценки максимальной достижимой скорости передачи информации, помехоустойчивости и оптимальной длительности канального символа с низкой или постоянной вычислительной сложностью, реализующие их алгоритмы реального времени и программное обеспечение; новый нестатистический метод оценки эффективной памяти канала. Разработаны новые методы и определены свойства снижения вычислительной сложности алгоритмов оценки пропускной способности: 1) метод аналитической кластеризации слагаемых в полиномах; 2) свойства о «комбинациях символов».

3. Предложенный режим «окон прозрачности» для класса фазовой РСПИ ППИ с линейным приемником, позволяющий повысить удельную скорость в среднем в 1,2 – 1,9 раза.

4. Комплекс новых инженерных методов анализа эффективности фазовых РСПИ ППИ с линейным приемником, реализующих принципы теории разрешающего времени, позволяющих выбрать наилучший многолучевой канал по критерию наибольшей достижимой скорости передачи информации.

5. Доказательства возможности реализации режима передачи выше скорости Найквиста в многолучевом канале с достижением потенциальной удельной скорости в 9 бит/с/Гц при использовании QPSK-сигнала.

6. Разработку алгоритмов адаптивного управления для среднеширотных трасс декаметрового диапазона с полосой пропускания 3 кГц, предназначенных для реализации на базе вычислительной платформы ЦПУ «Эльбрус».

С помощью численного моделирования показано, что фазовая РСПИ ППИ на базе теории разрешающего времени в сравнении с модемом стандарта STANAG 4539 обеспечивает выигрыш 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} , для парциального декаметрового канала с полосой 3 кГц при допущениях о том, что мощность лучей одинакова, задержки между лучами равны 185 мкс, доплеровское расширение спектра не превосходит 0,5 Гц.

7. Новые решения в части аналогового-цифровой обработки сигналов, представленные в форме патентов на способы и устройства.

3. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, опираются на результаты аналитических исследований и характеризуются четкой логической аргументированностью. Их достоверность обеспечивается корректным применением математического аппарата и подтверждается их вполне приемлемой степенью корреляции с результатами математического моделирования применительно к среднеширотным декаметровым трассам, непротиворечивостью по отношению к экспериментальным результатам, полученным ведущими учёными в области распространения радиоволн и нашедшим свое отражение в ряде рекомендаций Международного союза электросвязи.

Результаты исследований прошли апробацию на международных и российских конференциях, успешно прошли экспертизу при сдаче работ, выполненных в рамках гранта РФФИ, Государственного задания и договора с Академией наук Республики Татарстан.

Степень обоснованности представленных в диссертации результатов в целом следует считать достаточной.

4. Практическая значимость работы

Практическая ценность работы заключается в создании новых алгоритмов оценки разрешающего времени, пропускной способности, помехоустойчивости

и эффективной памяти (нестатистический алгоритм) фазовой РСПИ ППИ, необходимых для адаптивного управления её режимами; 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 парциального многолучевого декаметрового канала с шириной полосы, равной 3 кГц, алгоритмов и временных диаграмм её функционирования, рекомендаций для практической реализации подсистем РСПИ; в разработке новых способов и устройств аналого-цифрового преобразования; 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 подтверждена актами внедрения, полученными от АО «НПО «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко»; АО «Казанское приборостроительное конструкторское бюро»; Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ по результатам выполнения гранта РФФИ 18-37-00440 по теме «Теоретические аспекты повышения пропускной способности фазовых радиотехнических систем передачи информации, работающих при сильных межсимвольных искажениях в линейных 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».

5. Общая характеристика диссертационной работы

Диссертационная работа содержит введение, пять глав, заключение, изложенные на 415 страницах. Помимо этого, имеются шесть приложений. Общий объем работы составляет 665 страниц.

Материал изложен в строгом научном стиле и обладает внутренним единством содержания. Математическое обоснование полученных результатов изложено подробно, текстовая часть характеризуется строгой логической последовательностью и связанностью изложения. Оформление текстовой части диссертации и иллюстрирующих рисунков произведено в соответствии с требованиями ГОСТ.

Диссертация является законченным научным исследованием, направленным на решение поставленной научной проблемы – теоретическое обоснование и разработку новых моделей и методов обработки ФМн-п- и АФМн-Н- сигналов на базе адаптивного управления режимами работы РСПИ ППИ, функционирующих в ЧСКС при МСИ, обеспечивающих повышение максимально достижимой скорости передачи информации.

Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 67 печатных работах, из которых 25 работ – 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, оригинальность результатов подтверждена двумя патентами на изобретение РФ и восемью свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ РФ.

Диссертация соответствует п. 1 (исследование процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств и систем) и 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) паспорта по специальности 2.2.13. «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», а также

п. 1 (разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций) и п. 2 (исследование новых технических, технологических и программных решений, позволяющих повысить эффективность развития цифровых сетей, систем и устройств телекоммуникаций) паспорта специальности 2.2.15. «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

6. Замечания и недостатки

1. Большая часть диссертации посвящена рассмотрению каналов без аддитивного шума, что требует дополнительного пояснения в части обоснования актуальности работы, поскольку в таких каналах пропускная способность определяется техническими возможностями АЦП и ЦАП.

Требуется пояснить, почему не учитывается источник аддитивного шума в математической модели канала связи с памятью, представленной на рисунке 3.1 в тексте диссертации и на рисунке 4 в автореферате. В работах многих известных авторов (Л.М. Финк, Дж. Прокис, Дж. Возенкрафт, И.А. Цикин и др.) используется модель канала с линейным фильтром и источником аддитивного шума между передатчиком и приемником. Если автор посчитал, что подобный источник шума не влияет на характеристики радиотехнической системы передачи информации, то это следует обосновать.

В разделе 3.3 оценка пропускной способности канала связи с памятью также осуществляется без учета влияния источника аддитивного шума, что в условиях отсутствия соответствующих обоснований, снижает ценность данных результатов.

2. В выводах по разделу 2 (стр. 177) было бы полезно уточнить, что конкретно автор имеет в виду в п.1, констатируя, что им «развит метод медленно меняющихся амплитуд» и что это позволило «... адекватно осуществить анализ переходных процессов». Необходимость тщательной конкретизации указанных формулировок обусловлена тем, что вопросы расчета переходных процессов в узкополосных линейных системах рассматривались в

известных работах Евтянова С.И., Гоноровского И.С., на которые, кстати, ссылается сам автор.

3. В разделе 4.1 на стр. 226 указывается, что решение строгого неравенства $B_0(t_3) > B_0(t'_3)$, записанного для функции установления B_0 , достигается при выполнении соотношения (4.1.56). Но при этом нарушается смысл приведенного далее утверждения о том, что данное неравенство переходит в равенство при $M'_{r-1} = 1$ и $\alpha_{r-1} = 0$.

4. В разделе 4.3 на стр. 275 при постановке задачи поиска экстремумов при перечислении параметров, не участвующих в решении задачи, используется обозначение «idem» (идемпотентность), которое используется в алгебре и информатике для обозначения свойств операции над числами и, в меньшей степени, для обозначения свойств чисел. В этой связи целесообразно было использовать обозначение «const».

5. В разделах 4.2, 4.3, 4.5 для оценки эффективной памяти используется нестатистический метод оценки разрешающего времени, одной из ключевых особенностей которого является использование типов мажорирующих рядов для оценки остатка ряда. При этом неясно, на каком основании были выбраны типы мажорирующих рядов, указанные на стр. 258.

6. В приложении 1 представлены методы аналитической кластеризации, которые позволяют снизить объем вычислений за счёт выявления одинаковых полиномов в суммах для аналитических методов. В диссертации не указано, может ли эта процедура быть произведена до оценки импульсной характеристики канала и, если «да», то каким образом.

7. В приложении 3, в отличие от приложения 2, результаты по оценке наименьшего числа реализаций псевдослучайной последовательности представлены только в форме табличных данных, что затрудняет проведение оценок о скорости сходимости случайного процесса к стационарному значению по функции распределения.

8. Научный результат 6, представленный в Заключение, требует сравнения с аналогичными результатами, известными из литературы.

9. Объем диссертации является избыточным. Так, в частности, можно было бы без ущерба для качества работы сократить обзор публикаций по теме исследования, который занимает 92 стр.

10. В тексте диссертации в ограниченном количестве имеются опечатки и стилистические неточности. К ним можно отнести: 1) совпадающий порядковый номер таблиц на стр. 82 и 114; 2) подрисуночная надпись рис. 5.15 находится на следующей странице после рисунка. Рисунки 2.20, 2.21, 2.23 имеют неоднородный серовато-белый фон, что затрудняет их восприятие. Имеется также опечатка в автореферате в формуле на стр. 35, где вместо $\Delta_0 = \Delta_{\text{доп}}/\Delta_{\text{ш}}$ должно быть $\Delta_0 = \Delta_{\text{доп}}/\Delta M_{\text{ш}}$.

7. Заключение

Диссертационная работа Лернера И.М. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема по теоретическому обоснованию и разработке новых методов обработки многопозиционных фазоманипулированных и амплитудно-фазоманипулированных сигналов на базе адаптивного управления режимами работы радиотехнических систем с последовательной передачей информации, функционирующих в частотно-селективных каналах связи в условиях межсимвольной интерференции. Результаты диссертационной работы обладают научной новизной, а их совокупность в целом может рассматриваться как вклад в развитие теории построения радиотехнических систем передачи информации.

Приведенные выше замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор, Лернер Илья Михайлович, заслуживает присуждения 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.

Профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор технических наук, доцент

 Сороцкий Владимир Александрович

06.03.2024

Почтовый адрес ФГАОУ ВО «СПбПУ»: Россия, 195251, Санкт-Петербург, улица Политехническая, д. 29

Телефон: +7(812)2972095

Адрес сайта: <https://spbstu.ru>

Адрес электронной почты: office@spbstu.ru

Подпись Сороцкого Владимира Александровича удостоверяю:

