

На правах рукописи

УДК 621.397

Грачев Алексей Юрьевич

**Разработка методов и устройств эффективного  
формирования сигналов в цифровых системах  
наземного телевизионного вещания**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе  
системы и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва 2005

Работа выполнена на кафедре телевидения Московского технического  
университета связи и информатики (МТУСИ)

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Безруков В.Н.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,  
профессор Сизов В.П.  
кандидат технических наук,  
заместитель начальника отдела  
ЗАО «КОМСТАР» Салтыков К.Е.

Ведущая организация – ЗАО «Московский научно-  
исследовательский телевизионный  
институт» (МНИТИ), г. Москва

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2005 года в \_\_\_ часов  
на заседании кандидатского диссертационного совета К219.001.02 по  
присуждению учёной степени кандидата технических наук в Московском  
техническом университете связи и информатики по адресу:  
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8-а.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью  
учреждения, просим направлять по вышеуказанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МТУСИ.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2005 г.

Учёный секретарь кандидатского диссертационного совета К219.001.02

кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ О. В. Матвеева

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В соответствии с *«Концепцией внедрения в России цифрового наземного телевизионного и радиовещания»*, утвержденной на заседании коллегии Минсвязи РФ в 2003 году, в качестве основы национального стандарта цифрового телевидения в Российской Федерации определена европейская система DVB (Digital Video Broadcasting, англ.), соответственно: DVB-T – эфирное наземное, DVB-S – эфирное спутниковое, DVB-C – кабельное цифровое телевидение.

Система эфирного наземного цифрового телевизионного вещания (ЦТВВ) по стандарту DVB-T реализует передачу сигналов изображений с высокой помехоустойчивостью и полностью совместима с существующим планом распределения частот радиоканалов. Данная система позволяет вести прием телевизионного сигнала на подвижные объекты, обеспечивает выполнение современных требований к электромагнитной совместимости различных передатчиков. При этом система работает в условиях относительно высокой сложности помеховой обстановки, т.е. при наличии всех видов помех: флуктуационных, сосредоточенных, импульсных (в том числе, внутрисистемных); различного влияния шумов, т.е. их воздействия – аддитивного и в некоторых случаях мультипликативного.

В то же время, специфика функционирования системы ЦТВВ DVB-T предъявляет повышенные требования к характеристикам как радиопередающего, так и радиоприёмного устройств. При этом формирование выходного радиосигнала в передающей части системы конкретизируется европейским стандартом ETSI EN 300 744 v. 1.4.1, а аналогичных рекомендаций и указаний по построению радиоприёмных трактов стандарт DVB-T не содержит. Учитывая, что в соответствии с указанной Концепцией полный переход к цифровому телевидению в РФ намечен на 2015 год, то имеет смысл решать задачи по исследованию и разработке способов реализации структуры радиоприёмных устройств и их отдельных элементов на основе рекомендаций стандарта DVB-T.

Важнейшим элементом радиоприёмного устройства DVB-T в составе демодулятора является канальный фильтр, необходимый для ди-

намической коррекции характеристик канала передачи. Классическим цифровым канальным фильтром, применяемым для радиоприёмных устройств DVB-T, является фильтр Винера, который строится согласно уравнению Винера-Хопфа с использованием принципов линейной адаптивной фильтрации. Но традиционный подход к решению задачи по фильтрации параметров (характеристик) канала телевидения в части компенсации искажений мультипликативного типа не совсем адекватен условиям, при которых решается такая задача, и поэтому имеет некоторые потенциальные возможности для совершенствования. Например, при традиционном подходе необходимо использовать большие объёмы вычислений и значительную оперативную память, что заставляет применять высокопроизводительные, ресурсоёмкие и, соответственно, более дорогие сигнальные микропроцессоры.

Кроме того, указанный фильтр обеспечивает оптимальную фильтрацию в смысле минимума среднеквадратической ошибки (исходя из критерия минимальной среднеквадратической ошибки) лишь при соблюдении довольно жёстких ограничений, часто неприемлемых и невыполнимых на практике. Главными из них являются: линейность во времени фильтруемого параметра и линейность зависимости принимаемой суммы радиосигнала и помех (то есть смеси радиосигнала и помех на входе приёмника) от этого параметра, стационарность передаваемого и принимаемого процессов и, в идеале, хранение всей предыстории обрабатываемой реализации радиосигнала.

Эффективное в экономическом и технологическом плане решение задачи создания высококачественного радиоприёмного устройства (проектирования радиоприёмного тракта), устойчивого к воздействию помех и шумов канала передачи, для системы эфирного наземного ЦТВВ DVB-T возможно также с использованием теории нелинейной стохастической фильтрации. Её основы были заложены А. Н. Колмогоровым, Н. Винером, Р. Л. Стратоновичем, В. И. Тихоновым, Р. Калманом, Р. Бьюси, Г. Кушнером, М. Вонхамом и другими учёными.

Накладываемое методами теории оптимальной нелинейной фильтрации ограничение (передаваемые по каналу телевизионного вещания сообщения и помехи должны быть марковскими процессами) не является жёстким, так как реальные случайные процессы можно ап-

проксимировать многомерными марковскими процессами с требуемой точностью, а всякий случайный процесс, спектральная плотность мощности которого представляется при помощи дробно-рациональной функции, является компонентой многомерного марковского процесса. Однако решение задачи динамической оценки параметров канала и динамической коррекции его характеристик в общем виде отличается чрезмерной сложностью теоретической и практической реализаций. Поэтому данная задача в диссертации обычно решается в линейном приближении (финальная апостериорная плотность вероятности аппроксимируется гауссовским законом распределения) и с использованием предположения о том, что синхронность и синфазность обработки сигналов идеально обеспечена. При этом следует отметить, что линейное приближение определяет устойчивость работы всей совокупности операций алгоритма только при небольших отклонениях оцениваемых параметров гауссовской апостериорной плотности вероятности от истинных значений. При существенном возрастании отклонений, например, при начальном смещении спектра за счёт доплеровского сдвига, нестабильностях возбuditеля передатчика и гетеродинов приёмника, будут наблюдаться срывы синхронизации и значительное (часто неприемлемое) увеличение коэффициента ошибок и, как следствие, неправильный приём символов (неправильная демодуляция).

Уже существующий уровень развития микропроцессорной техники и методов цифровой обработки сигналов реально обеспечивает техническую возможность создания эффективного радиоприёмного устройства на основе теории нелинейной фильтрации. Следует, в связи с этим, отметить, что в период 1998-2004 гг. за рубежом появились работы по созданию алгоритма динамической оценки характеристик (параметров) федингующего многолучевого канала телевидения с помощью теории нелинейной стохастической фильтрации при приёме радиосигналов ортогонального частотного разделения с мультиплексированием (ОЧРМ). Это, например, работы португальских учёных F. D. Nunes'a и Jose M. N. Leitaо. Они убедительно показали преимущества нелинейного фильтра перед нестационарным расширенным фильтром Калмана-Бьюси, а, следовательно, и перед стационарным фильтром Винера, используемым для уже существующих телевизион-

ных приставок и приёмников системы ЦТВВ DVB-T. Соответственно, не вызывает сомнений тот факт, что целесообразно проводить оценку параметров федингующего телевизионного канала вещания для радиосигнала системы ЦТВВ DVB-T на приёмной стороне на основе принципов нелинейной стохастической фильтрации по соответствующим им алгоритмам.

Применение быстрого преобразования Фурье (БПФ) на приёме позволяет обеспечить при этом цифровую обработку необходимого количества поднесущих (6817 – в 8К режиме излучения и 1705 – в 2К режиме излучения) в радиоприёмном устройстве с помощью незначительно ресурсоёмкого и, соответственно, достаточно дешёвого сигнального микропроцессора. Это, несомненно, является существенным достоинством подобного варианта обработки радиосигнала с кодированием и применением ортогонального частотного разделения с мультиплексированием (КОЧРМ). При конкретизации структуры и отдельных элементов демодулятора, разработанного на основе теории нелинейной стохастической фильтрации для системы ЦТВВ DVB-T, большое внимание уделяется проблеме сопряжения БПФ с элементами помехоустойчивой обработки принимаемого телевизионного КОЧРМ-радиосигнала.

Решению указанных задач посвящено основное содержание представленной диссертационной работы. Прделанная работа отражает результаты проведённых исследований в части разработки адаптивных устройств радиоприёма сигнала с ОЧРМ для системы ЦТВВ DVB-T по каналам метрового и дециметрового диапазонов в условиях многолучевого распространения, с присутствием межсимвольной и межканальной интерференции, замираний, под влиянием сложной помеховой обстановки и при наличии эффекта Доплера. Результаты разработки нового корректирующего канального фильтра в своей совокупности отражают качественное повышение эффективности функционирования элементов и устройств системы ЦТВВ DVB-T, обеспечивают более устойчивую работу системы эфирного наземного ЦТВВ DVB-T на многолучевых мобильных каналах вещания при действии наиболее часто встречаемых при мобильном приёме мультипликативных искажений.

**Целью диссертационной работы** является разработка эффективных методов цифрового формирования и обработки радиосигналов с кодированием, ортогональным частотным разделением и мультиплексированием в спектральной и временной областях на основе теории нелинейной стохастической фильтрации, обеспечивающих улучшение качественных показателей функционирования системы ЦТВВ DVB-T, и проектирование соответствующих им устройств, применяемых для борьбы со сложными видами мультипликативных и аддитивных помех в многолучевых радиоканалах стационарного и мобильного телевизионного вещания.

**Основные задачи исследования.** Для достижения поставленной цели исследований в работе решаются следующие задачи:

- ⇒ анализ и моделирование процесса формирования телевизионного (ТВ) радиосигнала КОЧРМ в передающей части системы эфирного наземного ЦТВВ DVB-T применительно к разработке в диссертации корректора-эквалайзера канала телевизионного вещания, размещённого в демодуляторе радиоприёмного устройства;
- ⇒ конкретизация характеристик и параметров многолучевого приёма радиосигнала эфирного наземного ЦТВВ DVB-T в реальных стационарных и мобильных радиоканалах вещания с учётом действия помех и шумов;
- ⇒ разработка алгоритма коррекции ТВ радиосигнала КОЧРМ на выходе многолучевого канала вещания на основе теории нелинейной стохастической фильтрации средствами цифровой обработки сигналов с применением алгоритмов быстрых ортогональных преобразований;
- ⇒ сравнительный анализ эффективности применения разработанных алгоритмов подавления сложных мультипликативных и аддитивных помех и шумов в реальных каналах гауссовского, райсовского и рэлеевского типов.

**Методы исследования.** Основная часть диссертационной работы выполнена с привлечением методов статистической теории связи (статистического анализа и синтеза радиотехнических устройств и сис-

тем), теории функций и функционального анализа, теории вероятностей и математической статистики.

Все расчёты выполнены с использованием численных методов, реализованных на персональном компьютере с помощью пакета математического проектирования MATLAB 6.5 и средства имитации радиотехнических устройств и модулей Simulink 5.0, а также описания программных моделей на языке высокого уровня.

Обоснованность основных научных положений и исследований, рекомендаций и выводов, сделанных в диссертационной работе, подтверждается проведёнными экспериментами и статистическим математическим моделированием на персональном компьютере в среде имитации радиотехнических устройств и модулей Simulink 5.0, работающей под управлением системы математического проектирования MATLAB 6.5.

#### **Научная новизна работы.**

Научная новизна настоящей диссертационной работы заключается в следующем:

- ⇒ предложено решение задачи помехоустойчивого приёма КОЧРМ-радиосигнала системы ЦТВВ DVB-T, обеспечивающее устойчивый его приём при действии специфических видов искажений и помех, характерных для различных моделей реальных каналов вещания, и обладающее преимуществами по отношению к уже существующим вариантам;
- ⇒ разработан новый метод динамической коррекции характеристик (параметров) многолучевого мобильного канала вещания системы ЦТВВ DVB-T, подверженного мультипликативным искажениям, и показана его эффективность;
- ⇒ осуществлена экспериментальная реализация цифрового квазикогерентного фильтра (корректора-эквалайзера), разработанного на основе теории нелинейной стохастической фильтрации с применением быстрых алгоритмов ортогональных преобразований;
- ⇒ разработана методика и получены результаты сравнительного анализа помехоустойчивости известных и разработанного методов подавления помех мультипликативного типа.



**Личный вклад.** Теоретические и экспериментальные исследования, расчёты и выводы, изложенные в диссертационной работе, выполнены и получены автором лично.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.** Проведённый анализ специфики функционирования радиопередающего устройства позволил реализовать программное обеспечение и осуществить математическое моделирование передающего устройства системы DVB-T в части формирования телевизионного КОЧРМ-сигнала в среде имитации радиотехнических устройств и модулей Simulink 5.0 системы математического проектирования MATLAB 6.5.

В работе предложен и реализован в виде алгоритма новый метод динамического отслеживания параметров и цифровой динамической коррекции характеристик многолучевого мобильного радиоканала вещания в спектральной области при приёме телевизионного КОЧРМ-радиосигнала, способный существенно повысить для телевизионного приёма в соответствии со стандартом DVB-T помехоустойчивость и другие основные показатели качества. По существу, такими показателями качества в системе ЦТВВ DVB-T являются коэффициенты битовых и символьных ошибок (КБО и КСО), средняя вероятность принятия ошибочного символа, а также зависимость точности выполнения фильтрации от отношения сигнал-шум (ОСШ) на входе радиоприёмника. Преимущества предложенного метода доказаны статистическим математическим моделированием.

Разработанный в диссертации метод подавления помех, соответствующее алгоритмическое и программное обеспечения, а также результаты его моделирования используются в НИЧ МТУСИ при разработке оригинального программно-аппаратного блока устройства обработки информации связи (УОИС) для переносной радиостанции.

Вышеуказанные методы приняты для практического использования в сфере военной радиотелефонной связи.

Практическое использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

**Апробация результатов работы.** Основное содержание диссертационной работы докладывалось и обсуждалось на V Международном конгрессе НАТ «Прогресс технологий телерадиовещания» (TRBE)

(Москва, 2001 г.), на IV Международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и её применения» (DSPA) (Москва, 2002 г.), на научно-технических конференциях МТУСИ профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава (Москва, 2001, 2003, 2004 гг.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации, а также результаты теоретических и экспериментальных научных исследований отражены в 14 опубликованных работах. Публикации включают 8 тезисов докладов и 6 статей. Большинство опубликованных работ авторские.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Основная часть диссертации изложена на 215 страницах текста с 88 иллюстрациями и 26 таблицами. Список литературы насчитывает 88 наименований. Общий объём работы с приложениями составляет 230 страниц.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- разработанный на основе требований стандарта алгоритм работы цифрового телевизионного радиопередатчика эфирного наземного вещания в стандарте DVB-T и полученные результаты экспериментальных исследований.
- результаты сравнительного анализа алгоритмов помехоустойчивой демодуляции КОЧРМ-радиосигнала системы ЦТБВ DVB-T, разработанных на основе линейной адаптивной и нелинейной стохастической фильтрации.
- метод цифровой коррекции искажений КОЧРМ-радиосигнала на выходе многолучевого канала телевизионного вещания, обеспечивающий качество приёма радиосигнала практически не уступающее варианту выполнения коррекции на основе линейного фильтра Винера, но при использовании существенно меньших вычислительного ресурса и ёмкости накопителей.
- разработанный алгоритм и устройства цифровой обработки КОЧРМ-радиосигналов, реализующие метод коррекции мультипликативных искажений для мобильного приёма.

- результаты математического машинного моделирования и экспериментальных исследований разработанного метода, устройств и характеристик эффективного радиоприёма сообщений на выходе многолучевого мобильного канала телевизионного вещания.

### **Краткое содержание работы**

Во **введении** показаны актуальность диссертационной работы, современный уровень разработанных научно-технических решений, определены цель, задачи и методы исследований. Также конкретизируются научная новизна, личный вклад в работу, практическая значимость, сведения об апробации работы, публикациях автора и положения, выносимые на защиту.

**В содержании первой главы** диссертации рассмотрены специфика построения и функционирования, алгоритмы формирования радиосигнала КОЧРМ, основные параметры и характеристики системы эфирного наземного ЦТВВ DVB-T, а также требования к структурно-функциональным элементам оборудования её передающей части (передающего тракта).

В начале первой главы представлена функциональная блок-схема передающего тракта базовой системы цифрового телевидения DVB-T. Функциональными блоками канального кодирования и модуляции системы последовательно выполняются операции по адаптации телевизионного сигнала в основной (первичной) полосе частот с выхода транспортного мультиплексора MPEG-2 к характеристикам эфирного наземного канала телевизионного вещания. Пакеты транспортного потока MPEG-2 соответственно поступают здесь на вход формирователя телевизионного КОЧРМ-сигнала, в котором их объединяют в группы по восемь смежных пакетов, скремблируют сгруппированный цифровой сигнал, затем подвергают помехоустойчивому кодированию (внешнему кодированию Рида-Соломона и внешнему перемежению, внутреннему свёрточному кодированию и внутреннему перемежению). Скремблированию и свёрточному кодированию не подвергают синхробайты сформированных групп пакетов.

В результате выполнения указанных операций канального кодирования достигается увеличение устойчивости радиосигнала системы

ЦТВВ DVB-T к воздействиям помех. Увеличивается, в частности, устойчивость к внутрисполосным помехам, которые имеют относительно постоянную во времени область локализации спектра или отражают наличие искажений, имеющих в пределах рабочего диапазона частот относительно низкую динамику изменений во времени, что влияет на комплексный коэффициент передачи радиопередающего тракта. С другой стороны, использование в каждом из субпотокков битового перемежения полученных данных путём демультиплексирования и кодирования последовательного потока определяет, в конечном итоге, и степень подавления избирательных по частоте искажений (при наличии частотно-селективных замираний), отражающихся в комплексном коэффициенте передачи радиопередающего тракта. Фактически, упомянутая устойчивость определяет эффективность функционирования радиоприемного устройства системы, параметры характеристик которого должны быть тонко сопряжены с частотно-временной структурой сигнала передачи и, соответственно, обеспечивать необходимую динамику коррекции искажений принятого радиосигнала.

В связи с этим в работе проведён детальный анализ и определены последовательности операций формирования структуры радиосигнала DVB-T из мультиплексированного транспортного потока MPEG-2, а также специфики построения схем основных функциональных элементов (отдельных устройств) передающего тракта системы ЦТВВ DVB-T. Главные из последних: скремблер, генератор псевдослучайной двоичной последовательности, внутренний и внешний перемежители данных, кодер Рида-Соломона и свёрточный кодер, демультиплексор последовательного цифрового потока в параллельные потоки.

С учётом того, что к основным задачам, решаемым в передающей части, относится и собственно преобразование последовательных отсчётов (модуляционных символов) параллельных субпотокков в текущий радиосигнал КОЧРМ, то есть ОЧРМ-модуляция, то также подробно рассматриваются задачи, связанные с этим процессом преобразования. Среди них выделяют наиболее важные проблемы такие, как специфика формирования и структура кадра ОЧРМ, формирование дискретных и непрерывных пилот-сигналов, особенности передачи сигналов параметров передачи (СПП), нормировка числа пакетов Рида-

Соломона (РС) на каждый суперкадр ОЧРМ, получение требуемых спектральных характеристик и спектральной маски радиосигнала ОЧРМ на выходе радиопередающего тракта и т.д.

Проведённый анализ определил основные особенности программной реализации цикла операций по формированию радиосигнала КОЧРМ системы ЦТВВ DVB-T.

В результате также выявлено, что ключевым элементом, во многом обуславливающим эффективность процесса обратного преобразования сформированного и переданного по мобильному каналу с многолучевым распространением радиосигнала системы ЦТВВ DVB-T, производимого в блоке цифровой обработки демодулятора радиоприёмника, является устройство канальной коррекции (корректор-эквалайзер канала передачи) КОЧРМ-радиосигнала в составе демодулятора. Алгоритм функционирования данного устройства определяет основные параметры качества выполнения коррекции искажений КОЧРМ-радиосигнала, которые, в общем случае, являются индивидуальными для каждой точки его приёма. К таким параметрам, в первую очередь, следует отнести точность выполнения коррекции в условиях относительно высокой динамики изменения во времени уровня, формы, структуры и области локализации в частотном пространстве спектра реальных помех. Не менее важно сохранить точность выполнения коррекции при высокой динамике изменения во времени случайного комплексного коэффициента (комплексной функции) передачи (фединга) мобильного многолучевого канала вещания системы ЦТВВ DVB-T.

**Вторая глава** диссертации «Формирование сигнала синхронизации при приёме КОЧРМ-радиосигнала с выхода многолучевого мобильного канала телевидения» посвящена решению задачи выделения синхросинформации, присутствующей в пилот-сигналах, а также задачи отслеживания динамики параметров канала телевидения, которая возникает в условиях передачи телевизионного радиосигнала по многолучевому мобильному каналу.

По сути, задачу восстановления динамически меняющихся параметров при приёме радиосигнала КОЧРМ с выхода многолучевого мобильного канала телевидения без учёта информации о временной синхронизации можно решить: при помощи системы фазовой автопод-

стройки (ФАП) частоты и с использованием системы фазовой коррекции (ФК) частоты.

В содержании первого раздела этой главы рассмотрена схема работы системы фазовой автоподстройки. При этом первоначально определяется функция правдоподобия, местоположение максимума которой позволяет оценивать, с допустимым приближением, искомое смещение частоты, и решается задача выполнения необходимой оценки.

Для варианта системы с фазовой автоподстройкой проведено сопоставление двух алгоритмов оценки смещения частоты:

- последовательного алгоритма (в последовательности смежных периодов),
- параллельного алгоритма (при фиксации периода с дискретным сканированием и интерполяцией уровней функции правдоподобия в пределах заданного частотного диапазона).

В содержании разделов данной главы также рассмотрены: принцип работы алгоритма и блок-схемы устройств оценки смещения частоты в аналоговом и цифровом исполнении для системы фазовой автоподстройки частоты, схемы выделения смещения частоты (грубой оценки) и системы частотной автоподстройки частоты, способы отслеживания частот. Также проведено сравнение способов измерения смещения частоты (точной оценки): фактической оценки с фиктивной оценкой смещения частоты, приведены результаты сравнения точности отслеживания частоты с модифицированными границами Крамера-Рао и нормализованной дисперсией ошибки для функционала правдоподобия на основе максимума апостериорной плотности вероятности, рассмотрена функциональная блок-схема устройства оценки смещения частоты.

Во втором разделе данной главы анализируется работа цифровой системы фазовой коррекции частоты с учётом помехи соседнего канала, и производится сравнение такой системы с классической системой фазовой автоподстройки частоты. При этом показано, что предложенный в работе метод “задержки и умножения” для восстановления параметров телевизионного радиосигнала имеет более короткое время обнаружения изменений частоты и обеспечивает соответствующее увеличение скорости её автоподстройки.

**В третьей главе** диссертации «Разработка метода и устройства адаптивной фильтрации элементов структуры радиосигнала ЦТБВ DVB-T на основе теории нелинейной фильтрации» рассмотрены варианты динамической коррекции характеристик (параметров) многолучевых каналов передачи ТВ сигнала при использовании ОЧРМ. Решение поставленной здесь задачи осуществляется с учётом результатов, представленных и полученных в предшествующих главах диссертации и в приложении 1 данной работы.

При этом в содержании первого раздела третьей главы представлен сравнительный анализ вариантов коррекции искажений при распространении ТВ радиосигнала по мобильному многолучевому каналу вещания, показана специфика адаптивной фильтрации и градиентного алгоритма для фильтра Винера, построенного согласно уравнению Винера-Хопфа с использованием принципов линейной адаптивной фильтрации. Также выявлено существенное влияние точности текущей оценки параметров канала на характеристики системы ЦТБВ DVB-T.

В связи с этим, в содержании последующих разделов данной главы, проведено сопоставление вариантов устройств, производящих текущую оценку параметров канала передачи для радиоприёмника системы ЦТБВ DVB-T, представлены способы оптимизации их рабочих характеристик. На основе проводимых операций по коррекции параметров канала, собственно, и определяется применяемая в классическом демодуляторе радиоприёмного устройства системы ЦТБВ DVB-T конкретная структура линейного адаптивного фильтра (корректора-эквалайзера). Этот корректор-эквалайзер реализует фильтрацию вышеуказанных параметров в частотной области путём вычисления “быстрой свёртки” (иначе, проведением обратного БПФ от произведения спектров сворачиваемых функций времени) и быстрого обновления последовательных результатов.

В главе рассмотрена система частотно-временной синхронизации, источники и характеристики мультипликативных помех в современных системах телевещания. Далее проведён сопоставительный анализ вариантов построения корректоров мультипликативных искажений в многолучевых и/или мобильных каналах распространения ТВ радиосигнала ОЧРМ. На основе результатов анализа предложен новый ме-

тод коррекции вносимых при этом в радиосигнал мультипликативных помех (с учётом эффекта Доплера). Сравниваются варианты построения канальных корректоров на базе линейной теории фильтрации (получены ранее) с разработанными в диссертации канальными корректорами на базе нелинейной стохастической теории фильтрации, синтезированные с применением интегральных и рекуррентных дифференциальных уравнений соответственно.

С учётом специфики организации полного радиосигнала ОЧРМ во втором разделе третьей главы разработаны принципы динамической коррекции характеристик многолучевых каналов телевидения. Помимо этого конкретизированы (на основе быстрых алгоритмов) принципы реализации дискретного преобразования Фурье (ДПФ), вычисления спектральной эффективности для ОЧРМ на входе канала передачи при различных видах модуляции и при транспонировании (переносе) спектра радиосигнала из одного диапазона частот в другой.

Показана специфика оптимальной демодуляции полезных (информативных) составляющих КОЧРМ-радиосигнала с текущей оценкой паразитных параметров, связанных с влиянием вещательного канала и мешающих точной текущей оценке информативных, и показаны особенности фильтрации и линейной интерполяции корректирующих частотных отсчётов. Исходя из этого, и обеспечивается в системе ЦТВВ DVB-T возможность реализации для каждого из информационных подканалов необходимой коррекции коэффициента передачи.

Практически, третья глава посвящена разработке одного из основных узлов радиоприёмника по системе ЦТВВ DVB-T, обеспечивающего для последней возможность работы в каналах с многолучевым распространением радиосигнала, который к тому же искажается быстрофедингующими и независимыми состояниями подканалов и большими отклонениями фаз поднесущих. Устройство состоит из банка согласованных нелинейных фильтров (по количеству пилот-сигналов), процессора решения системы дифференциальных уравнений относительно кумулянтов апостериорного распределения плотности вероятности (при её максимуме) и линейных интерполяторов по времени и по частоте. Эта структура позволяет выполнить посимвольное детектирование принятой полезной информации при отслеживании и



коррекции мультипликативных искажений в пределах одного символьного интервала.

При этом структурную блок-схему коррекции мультипликативных искажений, вносимых многолучевым мобильным радиочастотным вещательным каналом, можно представить в следующем, удобном для понимания сути проблемы, виде (рис. 1).

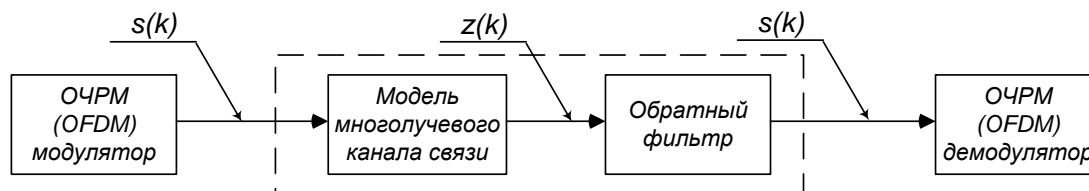


Рис. 1.

Здесь: OFDM – английское название ОЧРМ;

$s(k)$  – радиосигнал КОЧРМ, передаваемый через канал телевещания;

$z(k)$  – сумма радиосигнала КОЧРМ и помех (сигнальная смесь):

$$z(k) = s(k) + n(k), \quad (1)$$

где  $n(k)$  – отсчёты белого аддитивного гауссовского канального шума,

$$s(k) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=-L}^L \left\{ \dot{A}_l \left( \frac{k}{L} - n \right) \cdot e^{j2\pi \cdot l \cdot \left( \frac{k}{L} - n \right)} \right\}. \quad (2)$$

Здесь:  $\dot{A}_l$  – комплексная огибающая узкополосного сигнала, несущая полезную информацию;  $k$  – порядковый номер отсчёта по времени;  $l$  – порядковый номер узкополосного подканала по частоте;  $L, n$  – общее число узкополосных подканалов и порядковый номер символа радиосигнала ОЧРМ соответственно. Длительность символа определяется величиной  $\frac{4 \cdot \pi}{\Delta\omega}$ , а  $\Delta\omega$  – ширина полосы подканала в структуре радиочастотного спектра сигнала ОЧРМ.

Для разработки канального корректора с применением теории нелинейной стохастической фильтрации необходимо получить аналитическое выражение зависимости сигнала от фильтруемых параметров. Выражение адекватное (2) и описывающее реальный (действительный) непрерывный радиосигнал на выходе модулятора ОЧРМ, выглядит так:

$$s(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \left[ A_l(t) \cdot \cos(\omega_l \cdot t + \psi_l(t)) \right], \quad (3)$$

$\psi_l t$  – фазовая составляющая полезной информации для  $l$ -ого подканала спектра радиосигнала ОЧРМ.

В случае многолучевого канала телевидения, в пилот-сигнальных подканалах, узкополосный сигнал представляется соотношением:

$$s_{l(\text{п.с.})}(t, \vec{\lambda}) = G_{l(\text{п.с.})}(t) \cdot \cos(\omega_{l(\text{п.с.})} \cdot t + \Phi t + \theta_l t), \quad (4)$$

в этой формуле аббревиатура “п.с.” – пилот-сигнал.

Здесь и далее:  $\vec{\lambda}$  – вектор фильтруемых параметров;  $G_{l(\text{п.с.})}(t)$  – огибающая, как случайный процесс-параметр, узкополосного пилот-сигнала радиосигнала ОЧРМ, прошедшего через многолучевой канал передачи;  $\Phi t$  – фаза, как случайный процесс-параметр, приобретённая пилот-сигналом при прохождении по каналу передачи радиосигнала ОЧРМ из-за нестабильности гетеродинов при транспонировании (переносе) спектра этого радиосигнала и, частично, из-за эффекта Доплера для составляющей, которая обуславливает общее смещение спектра радиосигнала ОЧРМ;  $\theta_l t$  – фаза, как случайный процесс-параметр, приобретённая пилот-сигналом в процессе прохождения по федингующему мобильному вещательному каналу (в связи с его влиянием на радиосигнал) и, частично, из-за эффекта Доплера для составляющей, обуславливающей смещение спектра отдельных полос (подканалов) радиосигнала ОЧРМ.

Соотношение для узкополосного сигнала в информационных подканалах на выходе многолучевого канала телевидения несколько отличается:

$$s_{l(\text{и.с.})}(t, \vec{\lambda}) = G_{l(\text{и.с.})}(t) \cdot A_l(t) \cdot \cos(\omega_l \cdot t + \psi_l t + \Phi t + \theta_l t), \quad (5)$$

здесь аббревиатура “и.с.” – информационный сигнал.

Распределение плотности вероятности мгновенных значений огибающей  $G_l(t) = G_{l(\text{и.с.})}(t)$  узкополосного пилот-сигнала радиосигнала ОЧРМ, прошедшего через многолучевой канал передачи, можно описать рэлеевским или райсовским законом. Для рэлеевского канала можно показать, с помощью уравнения Фокера-Планка-Колмогорова (Ф-П-К), что априори нелинейное стохастическое дифференциальное уравнение 1-ого порядка вида:

$$\frac{dG_l t}{dt} = -\gamma \cdot G_l t + \frac{N_G}{4 \cdot G_l t} + n_G t, \quad (6)$$

описывает развитие во времени случайного процесса  $G_l t$ . В этом уравнении:  $n_G t$  – порождающий белый гауссовский шум с двухсторонней спектральной плотностью мощности  $\frac{N_G}{2}$ , а  $\gamma$  – параметр, равный частоте, на которой спектральная плотность мощности процесса  $G_l t$  (энергетический спектр) падает до уровня 0,5 относительно постоянной составляющей спектра;  $-\gamma \cdot G_l t + \frac{N_G}{4 \cdot G_l t}$  – коэффициент сноса в уравнении Ф-П-К, а  $\frac{N_G}{2}$  – коэффициент диффузии в уравнении Ф-П-К.

Для каждого подканала, выделенного для пилот-сигнала, вектор фильтруемых параметров записывается так:

$$\vec{\lambda}_{(i.\bar{n})} = G_l t, T_l t, \theta_l t, \Phi t, \quad (7)$$

здесь:  $T_l t$  – это задержка, как случайный процесс-параметр, полученная радиосигналом ОЧРМ в процессе распространения по федингующему многолучевому каналу телевидения:

$$T_l t = T_{l(\text{в.к.})} t + \Delta t_f t, \quad (8)$$

где аббревиатура “в.к.” – вещательный канал, а  $\Delta t_f t$  – это флуктуации (блуждания) периода функции, описывающей биполярную последовательность видеоимпульсов.

Если синхронность и синфазность обработки радиосигнала обеспечена, то вектор фильтруемых параметров преобразуется к виду:

$$\vec{\lambda}_{(i.\bar{n})} = G_l t, \theta_l t \Rightarrow u_1 t, u_2 t, \quad (9)$$

здесь:  $u_1 t$  – это синфазная (квадратурная) составляющая комплексной огибающей пилот-сигнала, прошедшего через федингующий канал;  $u_2 t$  – это квадратурная (синфазная) составляющая комплексной огибающей пилот-сигнала, прошедшего через федингующий канал.

Для корректирующего на частоте  $\omega_l$  коэффициента по дискретному пилоту  $\dot{C}_l^* t = 1/\dot{G}_l^* t$  получено апостериорное дифференциальное уравнение следующего вида:

$$\frac{d\dot{C}_l^* t}{dt} = -\gamma' \cdot \dot{C}_l^* + \frac{N_c}{4 \cdot C_l^*} \cdot \frac{dQ t}{dG_l t} \cdot e^{-j \cdot \theta_l^* t} + 2 \cdot \frac{k_{GG}}{N_0} \cdot \frac{dQ t}{dG_l t} \cdot C_l^{*2} \cdot z t \cdot e^{-j \cdot \omega_l t + \Phi^*}, \quad (10)$$

где  $\frac{dQ t}{dG_l t}$  – периодическая последовательность видеоимпульсов единичной амплитуды, имеющих квазипрямоугольную форму.

Синтезированный на основе дифференциального уравнения (10) нелинейный фильтр реализует не только устройство текущей оценки (фильтрации) корректирующего отсчёта, но и осуществляет его интерполяционную обработку во времени, обеспечивая формирование комплексных отсчётов частотной характеристики корректирующего фильтра на частотах дискретных пилот-сигналов соответствующих подканалов радиосигнала КОЧРМ системы эфирного наземного ЦТВВ DVB-T. Однако точность этой интерполяции не высока и необходимо уточнение. Ранее в работах по теории нелинейной стохастической фильтрации были получены уравнения для интерполяционной оценки  $C_{l_0}^* t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}}, t$  и для её дисперсии, которая согласно тем же работам в два раза меньше, чем дисперсия неутончённой оценки. Выражения (11) и (12) представляют интерполяционную оценку и её дисперсию:

$$C_{l_0}^* t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}}, t = C_l^* t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}} + \tilde{k} t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}}, t \cdot e^{-K \cdot k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}} - \Delta t_{(i.\tilde{n})}} \cdot F' t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}}, C^* t - \Delta t_{(i.\tilde{n})} \cdot \delta t, \quad (11)$$

$$\tilde{k} t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}}, t = \tilde{k} t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}} - K \cdot \tilde{k} t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}} \cdot \int_{t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}}}^t e^{-2 \cdot K \cdot t' - t + k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}}} \cdot dt. \quad (12)$$

*Примечание:* здесь  $\tilde{k} t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}}, t$  – стационарная дисперсия квазилинейно-уточнённой оценки линейно-интерполированного параметра  $C_{l_0}^* t - k \cdot \Delta t_{\tilde{n}\tilde{i} \tilde{a}}, t$ , а коэффициент  $K \approx \frac{1}{\delta t}$ . Кроме того, конечная разность  $\delta t \ll \tau_{C^* t}$ , где  $\tau_{C^* t}$  – интервал корреляции процесса  $C^* t$ .

На рис. 2, представлена функциональная блок-схема соответственно разработанного фильтра для комплексных отсчётов частотной характеристики корректирующего фильтра на частотах дискретных пилот-сигналов подканалов радиосигнала КОЧРМ системы эфирного наземного ЦТВВ DVB-T, соответствующая дифференциальному уравнению (10).

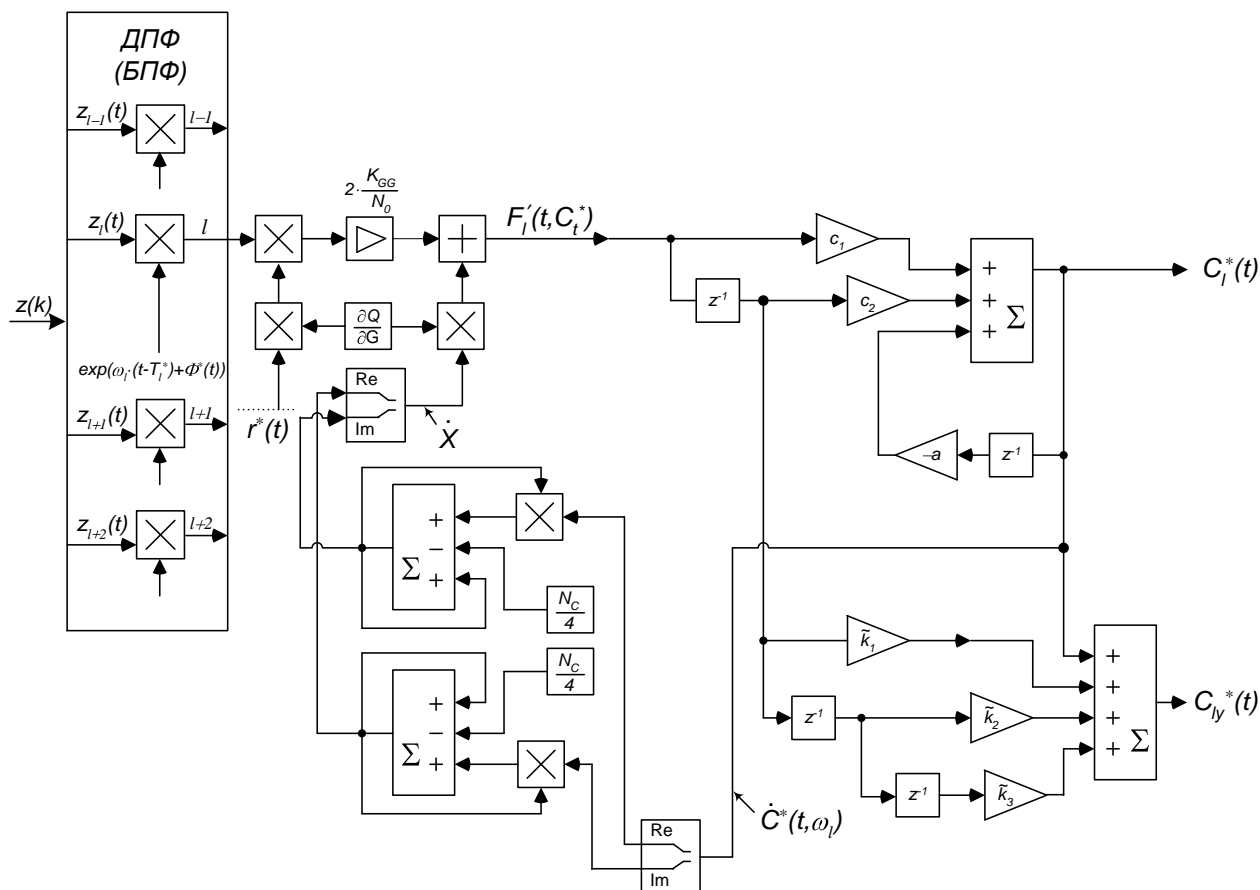
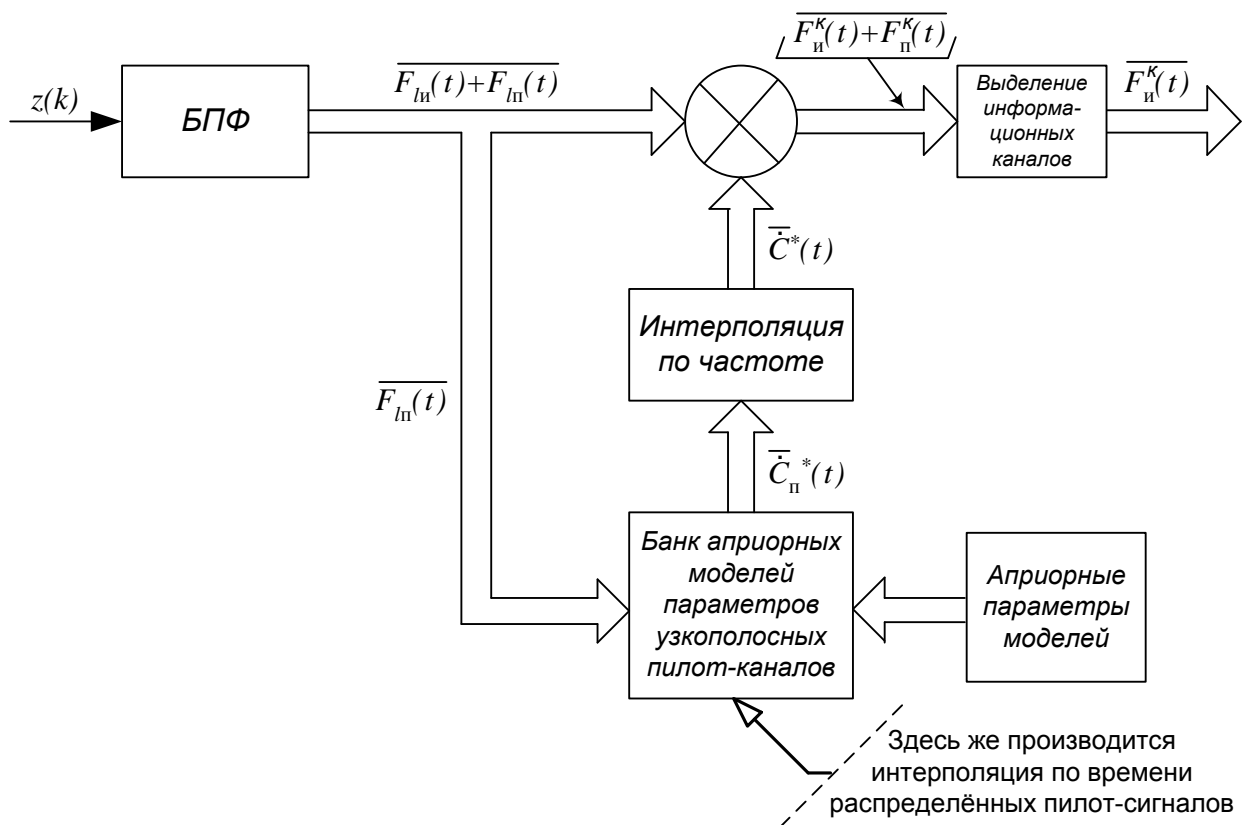


Рис. 2.

На рис. 3 представлена разработанная обобщённая функциональная схема корректора-эквалайзера мультипликативных искажений, создаваемых многолучевым каналом телевизионного вещания, спроектированная на основе теории нелинейной стохастической фильтрации. Эта функциональная схема представляет собой двумерный квазинелинейный корректирующий канал телевещания фильтр.



**Примечание к схеме:**

надстрочный индекс “к” – обозначает скорректированный сигнал;

$\overline{F_{in}(t) + F_{in}(t)}$  – это видеосигнал, поступающий с демодулятора (БПФ).

Для неэнергетического параметра это сигнал ошибки фильтрации;

$\overline{F_{in}(t)}$  – отвзлѐнные и демодулированные (на БПФ) комплексные огибающие пилот-сигналов;

$\overline{C_{in}^*(t)}$  – это вектор отсѐтов частотной характеристики только на частотах пилот-сигналов корректирующего канал связи (вещания) фильтра;

$\overline{C^*(t)}$  – это вектор всех отсѐтов частотной характеристики корректирующего канал связи (вещания) фильтра.

Рис. 3.

В четвёртой главе представлены результаты моделирования процесса формирования ТВ радиосигнала в передающей части системы DVB-T и устройства динамической коррекции характеристик многолучевого мобильного канала передачи на ПЭВМ. Разработка моделей устройств осуществлена в среде математического проектирования MATLAB 6.5 и средстве имитации радиотехнических устройств и модулей Simulink 5.0 в его составе. При этом формирователь КОЧРМ-радиосигнала практически подготовлен к аппаратной реализации. В частности, полностью завершена разработка программного обеспечения, реализующего стандартизованные операции соответствующего алгоритма формирования радиосигнала КОЧРМ.

В содержании разделов главы представлены практические результаты диссертации, специфика проведения расчётов и экспериментальных исследований. Существенное внимание уделяется статистическому моделированию полученного в предыдущих главах диссертационной работы алгоритма цифровой обработки КОЧРМ-сигналов и сравнительному анализу эффективности предложенного (разработанного) и традиционных методов коррекции мультипликативных искажений в мобильном многолучевом канале вещания при действии аддитивного белого гауссовского канального шума.

Кроме того, в данной главе представлены результаты разработки одного из узлов приёмопередатчика закрытой радиотелефонной связи на основе ОЧРМ, отражающей вариант частного использования результатов диссертации для решения смежной задачи. С использованием полученных экспериментальных данных в этой главе приведены основные характеристики устройства, а также его технические параметры и практические рекомендации и указания по использованию разработанного устройства в сфере радиотелефонной связи.

Экспериментально реализованы модели подканальных фильтров, корректирующих канал передачи, и приведены соответствующие осциллограммы. Выведены стохастические дифференциальные уравнения для дисперсии апостериорного распределения коэффициентов автокорреляции  $K_{CC}$   $K_{GG}$ . Получены решения этих дифференциальных уравнений для случая стационарности фильтруемых параметров. Экспериментальным путём получены графики зависимости относительной ошибки фильтрации (точности фильтрации) от отношения сигнал-шум (ОСШ) на входе радиоприёмного устройства, и реализован прогноз по коэффициенту битовых и символьных ошибок (КБО и КСО).

**В заключении** приведены основные выводы по полученным в диссертационной работе результатам.

**В приложении 1** «Теоретическое обоснование разработки устройства коррекции искажений для системы ЦТВВ DVB-T на основе теории стохастической нелинейной фильтрации» приведены исходные теоретические положения и обоснования разработки, использованные автором при работе над диссертацией.

В **приложении 2** представлены полученные автором при выполнении данной работы результаты моделирования соответствующих алгоритмов и устройств формирования и обработки радиосигналов.

### **Основные результаты работы**

1. Предложено решение задачи помехоустойчивого приёма радиосигнала DVB-T на основе теории нелинейной стохастической фильтрации, обеспечивающее устойчивый приём радиосигнала DVB-T при действии специфических видов искажений и помех, которые характерны для различных моделей реальных каналов телевизионного вещания, обладающее преимуществами по отношению к уже существующим вариантам.
2. Разработан новый метод динамической коррекции характеристик (параметров) мобильного канала телевизионного вещания DVB-T, подверженного мультипликативным искажениям, показана эффективность такого метода.
3. Осуществлена практическая реализация цифрового квазикогерентного фильтра, разработанного на основе теории нелинейной стохастической фильтрации в линейном приближении, с применением быстрых алгоритмов ортогональных преобразований.
4. Разработана методика, получены теоретические и экспериментальные результаты сравнительного анализа помехоустойчивости известных и разработанного методов подавления помех мультипликативного типа в мобильных вещательных каналах с использованием компьютерного моделирования.
5. Реализовано программное обеспечение и осуществлено моделирование передающего устройства системы ЦТБВ DVB-T в части формирования телевизионного КОЧРМ-радиосигнала.
6. Предложен и реализован в виде алгоритма новый метод цифровой динамической коррекции характеристик многолучевого мобильного канала вещания при приёме телевизионного КОЧРМ-радиосигнала в спектральной области, способный существенно повысить помехоустойчивость телевизионного приёма в соответствии со стандартом ЦТБВ DVB-T.



### Список публикаций

1. Грачёв А. Ю. Развитие инфраструктуры кабельного телевидения. Депонировано в ЦНТИ “Информсвязь”, №2190 св2001 от 22.05.01, с. 155-158.
2. Грачёв А. Ю. Внедрение Интернет-технологий в телевидении и особенности их применения. Депонировано в ЦНТИ “Информсвязь”, №2190 св2001 от 22.05.01, с. 159-160.
3. Грачёв А. Ю. Особенности и перспективы развития цифрового стандарта эфирного телевизионного вещания DVB-T. Депонировано в ЦНТИ “Информсвязь”, №2190 св2001 от 22.05.01, с. 161-163.
4. Грачёв А. Ю. Качественные характеристики и вопросы применения кабельных модемов в существующих сетях КТВ. Депонировано в ЦНТИ “Информсвязь”, №2232 св2003 от 14.06.03, с. 2-4.
5. Грачёв А. Ю. Способы и принципы синхронизации в системах цифрового телевидения. Депонировано в ЦНТИ “Информсвязь”, №2241 св2004 от 04.07.04, с. 42-44.
6. Грачёв А. Ю. Особенности измерения параметров цифровых телевизионных радиопередатчиков эфирного наземного телевидения. – М.: Научно-технический журнал «Метрология и измерительная техника в связи», №4, 2003. – с. 30-36.
7. Захаров А. Е., Козаренко В. А., Грачёв А. Ю. Система линеаризации параметров телевизионного передатчика. // Материалы 8-ой научно-технической конференции «Современное телевидение». – М.: НПО “Электрон”, 2000. – с. 59.
8. Грачёв А. Ю. Особенности и перспективы развития цифрового стандарта эфирного телевизионного вещания DVB-T. // Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава. – М.: МТУСИ, 2001. – с. 153-155.
9. Грачёв А. Ю. Развитие инфраструктуры кабельного телевидения. // Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава. – М.: МТУСИ, 2001. – с. 155-157.

10. Грачёв А. Ю. Внедрение Интернет-технологий в телевидении и особенности их применения. // Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава. – М.: МТУСИ, 2001. – с. 158-159.
11. Ульяновкин С. В., Грачёв А. Ю. Измерение частотных характеристик в видеотрактах современных систем телевидения. // Материалы V Международного конгресса НАТ «Прогресс технологий телерадиовещания». – М.: 2001. – с. 268-271.
12. Алёшкин В. Н., Грачёв А. Ю. Использование преобразования Фурье в системах с OFDM-модуляцией. // Сборник докладов IV Международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применения». – М.: 2002. – ч. 1. – с. 12-15.
13. Грачёв А. Ю. Качественные характеристики и вопросы применения кабельных модемов в существующих сетях КТВ. // Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава. – М.: МТУСИ, 2003. – с. 62-64.
14. Грачёв А. Ю. Способы и принципы синхронизации в системах цифрового телевидения. // Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава. – М.: МТУСИ, 2004. – с. 130-131.