

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Левченко Андрея Сергеевича

«Разработка методов повышения эффективности передающих и приёмных средств цифровых радиосистем передачи данных»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

В диссертационной работе Левченко Андрея Сергеевича рассмотрено решение научно-технических задач, связанных с повышением эффективности работы вещательных цифровых систем передачи данных, использующих ортогональное частотное разделение с мультиплексированием (далее *OFDM* – от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). К таким задачам относятся: задача снижения пик-фактора *OFDM*-сигналов и задача повышения качества приёма такого сигнала в условиях многолучевого канала. Как показывает практика, каналы ВЧ и ОВЧ-диапазона частот за счет влияния многолучевого распространения вносят искажения сигнала, связанные с появлением амплитудных, частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции. С учетом нестационарности многолучевого канала качественный приём таких сигналов возможен только при оценке комплексной функции передачи канала в динамике. Вне зависимости от метода оценки состояния канала – по пилотным несущим или по специальному сигналу, предшествующему *OFDM*-символу, эта оценка всегда осуществляется с конечной точностью. Классические методы расчета логарифма отношения правдоподобия (*LLR*) *OFDM*-сигнала как правило учитывают только аддитивную составляющую ошибки. В диссертационной работе показан мультипликативный характер влияния ошибки оценки состояния канала при демодуляции *OFDM*-сигнала и предложен способ учета этой ошибки при расчете *LLR*.

Высокий пик-фактор сигнала является одной из причин, ограничивающих энергетическую эффективность систем передачи данных, основанных на *OFDM*. Также высокий пик-фактор негативно сказывается на электромагнитной совместимости и ошибке модуляции, что особенно важно для вещательных систем, где зачастую применяются созвездия высоких порядков. В рассматриваемой диссертации предложены методы, позволяющие улучшить показатели существующих методов снижения пик-фактора, что, в конечном счете, положительно скажется на качестве сигнала и снизит затраты на функционирование системы передачи данных.

Все это обуславливает **актуальность тематики диссертационной работы.**

Структура диссертации.

Диссертация изложена на 157 страницах, содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 93 наименований и два приложения.

В первой главе проведен анализ протокола физического уровня для сетевой модели OSI таких вещательных систем, основанных на OFDM, как DVB-T2, DTMB-A, ISDB-T, DRM+ и РАВИС. Рассмотрены специфические особенности этих систем, такие как использование технологий BST-OFDM, TDS-OFDM.

Во второй главе подробно рассмотрены применяемые в современных системах связи методы снижения пик-фактора, проведен их качественный сравнительный анализ и проведено математическое моделирование рассматриваемых методов при применении их в системе РАВИС. Приведены гамма-процентные уровни пик-фактора сигнала РАВИС после применения различных методов снижения пик-фактора при различных ширине полосы сигнала и видах модуляции.

В третьей главе проведен количественный сравнительный анализ методов снижения пик-фактора, показана низкая эффективность метода резервирования тона при малом числе несущих. Автором предложены модифицированный метод ACE, который заключается в том, что вместо использования заранее определяемого одного уровня отсечки, метод ACE применяется параллельно с несколькими различными уровнями отсечки, что позволяет выбрать из нескольких символов один с наименьшим пик-фактором, и модифицированный метод резервирования тона, более эффективный, чем классический, за счет использования виртуальных резервированных несущих с уменьшенным уровнем амплитуды, расположенных вне полосы сигнала. Предложено два варианта схемы снижения пик-фактора для системы РАВИС – с использованием метода селективных отображений и с использованием модифицированного метода резервирования тона при малой ширине полосы канала.

В четвертой главе предложена модель приёма многолучевого канала, позволяющая учитывать неточность оценки состояния канала. Предложены методы расчета логарифма отношения правдоподобия при демодуляции OFDM-сигнала, позволяющие снизить вероятность битовой ошибки за счет учета мультипликативной ошибки, возникающей при работе в многолучевом канале, при использовании техники поворота созвездия и без её применения.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Приложение А содержит два Акта внедрения результатов диссертационной работы, приложение Б содержит уведомление о приёме и регистрации заявки на патент «Способ

совместной оценки канала связи и мягкой демодуляции для COFDM-сигналов и устройство для его реализации».

К новым научным результатам, полученным в данной работе, относятся:

1. модифицированный метод активного расширения созвездия который заключается в том, что вместо того, чтобы использовать оптимальное значение V_{CLIP} , предлагается запускать для каждого символа итеративный процесс параллельно с различными уровнями V_{CLIP} , выбирая по окончании итеративных процессов результаты процесса с наименьшим пик-фактором;
2. модифицированный метод резервирования тона, который позволяет снизить пик-фактор относительно классического метода резервирования тона за счет использования дополнительных внеполосных резервированных несущих;
3. двухступенчатый метод снижения пик-фактора для системы РАВИС, позволяющий обеспечить низкий пик-фактор как при малом, так и при большом числе поднесущих, за счет использования при малой ширине полосы сигнала модифицированного метода резервирования тона или метода селективных отображений;
4. способ расчета логарифма отношения правдоподобия при демодуляции OFDM-сигнала, позволяющий снизить вероятность битовой ошибки при приеме OFDM сигнала в многолучевом канале распространения за счет учета мультипликативной составляющей ошибки;
5. способ расчета логарифма отношения правдоподобия при демодуляции OFDM-сигнала с использованием техники поворота созвездия, который позволяет получить энергетический выигрыш относительно классического приема не менее 1 дБ.

Достоверность результатов и выводов работы подтверждается обширными результатами математического моделирования, корректным использованием математического аппарата и совпадением в частных случаях полученных результатов с известными экспериментальными данными.

Основные результаты диссертационной работы достаточно полно изложены в 8 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, из них 3 работы в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; 6 научных работ выполнено без соавторства. Подана заявка на патент.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа и автореферат имеют логичную структуру, написаны в соответствии с требованиями ГОСТ 7.0.11-2011.

Тематика диссертационной работы и ее содержание соответствуют требованиям паспорта специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Научная и практическая ценность результатов диссертационной работы подтверждается **актами внедрения**, приложенными к диссертации. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс кафедры мультимедийных технологий и телекоммуникаций физтех-школы радиотехники и компьютерных технологий МФТИ в рамках программы дисциплины «Цифровые системы вещания». Значимым теоретическим результатом является модель многолучевого канала, предложенная в четвертой главе, более точно отражающая процессы при приёме многолучевого сигнала, чем классическая модель. Практическая ценность подтверждается тем, что в рамках работ ООО «НПФ «САД-КОМ» над оборудованием для системы цифрового наземного вещания РАВИС использованы предложенный Левченко А. С. комбинированный метод снижения пик-фактора с помощью ограниченной спектральной маской внеполосных тонов и модифицированного метода активного расширения созвездия, а также метод демодуляции сигнала, позволяющий снизить вероятность битовой ошибки при приёме OFDM сигнала в многолучевом канале распространения за счет учёта мультипликативной составляющей ошибки.

Замечания, мнение официального оппонента по диссертации:

- 1) предложенный способ расчета логарифма отношения правдоподобия требует знания дисперсии ошибки оценки состояния канала, однако в диссертационной работе не рассмотрены вопросы её оценки;
- 2) недостаточно полно описаны причины, по которым действительная и мнимая составляющие ошибки оценки состояния канала принимаются распределенными по нормальному закону;
- 3) не раскрыт вопрос вычислительной сложности предложенных модифицированных методов резервирования тона и активного расширения созвездия;
- 4) есть незначительные отличия в формулировках положений, выносимых на защиту в тексте диссертации и автореферата (в первом положении в автореферате приведены достигнутые уровни пик-фактора, в то время как в диссертации они не указаны);
- 5) в тексте присутствуют грамматические и синтаксические ошибки и опечатки (например, «QSPK» на страницах 30 и 143, «...метода резервирование тона...» на стр. 120 и т.д.), в расшифровке переменных формулы (1) автореферата переданный и принятый сигналы поменялись местами.

Считаю, что указанные недостатки не снижают ценности полученных результатов, а диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи повышения эффективности передающих и приёмных средств цифровых радиосистем передачи данных, основанных на модуляции COFDM.

Представляемая к защите работа полностью удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, утвержденным Положением о присуждении ученых степеней ВАК при Минобрнауки РФ, а ее автор, Левченко Андрей Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Официальный оппонент

кандидат технических наук, доцент,

Важенин Николай Афанасьевич

Подпись доцента, к.т.н. Важенина Н.А. заверяю
декан факультета №4 «Радиоэлектроника
летательных аппаратов» МАИ

Кирдяшкин В.В.

Сведения об оппоненте:

Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Должность: доцент кафедры 408 «Инфокоммуникации»

Адрес: 125993, Россия, г. Москва, ул. Волоколамское шоссе, д. 4

Тел.: +7 499 158-15-73

E-mail: nio4@mai.ru

N.Vazhenin@mai.ru