

## 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 современных цифровых радиосистемах передачи данных с целью повышения информационной эффективности радиоканалов используют все более сложные методы модуляции несущей частоты, а результирующий информационный сигнал характеризуется как амплитудной, так и фазовой модуляцией, и зачастую напоминает белый шум в некоторой ограниченной полосе частот с характерным значительным по величине пик-фактором. Это относится, в частности, к системам с OFDM-сигналами цифровых вещательных стандартов DVB, T-DMB. В результате, в таких системах оконечный усилитель мощности высокочастотного усилительного тракта должен работать с пониженными мощностью и КПД, в так называемом режиме backoff mode, с целью уменьшения нелинейных искажений усиливаемого сигнала. В диссертации Левченко А.С. делается попытка решить эту проблему путем снижения пик-фактора OFDM-сигнала.

Методы снижения пик-фактора OFDM-сигналов, обычно применяемые в современных системах передачи данных, такие как метод TR (англ. Tone Reservation method – метод резервирования тона) и метод ACE (англ. Active Constellation Extension method – метод активного расширения созвездия), в системах с относительно узкой шириной полосы частот канала, таких как DRM+ и PAVIC, неэффективны. Причем метод TR неэффективен в случае малого (менее 1000) числа поднесущих, а метод ACE – в случае, если используются методы модуляции с большим числом канальных информационных сигналов. В диссертации Левченко А.С. предложены и исследованы методы снижения пик-фактора OFDM-сигнала с малым числом поднесущих, что характерно для системы PAVIC. Показано, что разработанные и исследованные в работе модифицированные методы TR и ACE могут применяться в любой системе передачи данных с малым числом поднесущих, основанной на OFDM-сигналах.

Другая проблема радиосистем передачи с OFDM-сигналами, вариант решения которой предлагается в данной диссертации - обеспечение надежного приёма в условиях многолучевого распространения сигнала. В диссертации предложен способ учета ошибки оценки состояния многолучевого канала связи в алгоритме демодуляции OFDM-сигнала.

Вход. № 175/17  
«21» 11 2017 г.  
подпись В.С.С.

Таким образом, тема работы **является актуальной**, поскольку она предполагает рассмотрение и возможное уменьшение влияния основных, базовых факторов, снижающих эффективность радиотрактов усиления и трактов обработки канальных сигналов современных цифровых радиосистем передачи данных.

Диссертация изложена на 157 страницах, содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 93 наименований и два приложения. Приложение А содержит два Акта о внедрения результатов диссертационной работы, а приложение Б - уведомление о приёме и регистрации заявки на патент под названием: «Способ совместной оценки канала связи и мягкой демодуляции для COFDM-сигналов и устройство для его реализации».

**В первой главе** рассматриваются физические каналы современных цифровых систем передачи данных, включая базовые принципы формирования OFDM-сигналов, а также особенности их реализации в различных современных вещательных системах. Приведен подробный обзор основных систем этого типа, таких как DVB-T2, ISDB-T, DTMB-A, РАВИС и DRM+.

**Во второй главе** подробно рассмотрены методы снижения пик-фактора, применяемые в современных системах связи, включая методы TR, ACE и метод SLM (англ. Selective Mapping method – метод селективных отображений). Проведено их математическое моделирование при применении в системе РАВИС, в процессе которого выявлены гамма-процентные уровни пик-фактора, достижимые при использовании этих методов. Приведенные данные позволяют судить об их эффективности в различных условиях, поскольку в системе РАВИС применяются режимы вещания как с различным числом поднесущих, так и различные виды их модуляции.

**В третьей главе** автором предложен двухступенчатый метод снижения пик-фактора и обоснована целесообразность его применения в системе РАВИС второго поколения для обеспечения низкого пик-фактора одновременно при широкой и узкой полосе передаваемого сигнала. В этом методе низкий пик-фактор достигается при комбинированном использовании методов TR/SLM и модифицированного метода ACE, предложенного Левченко А.С. Модифицированный метод ACE заключается в том, что вместо использования «оптимального» уровня отсечки, характерного для традиционного метода ACE, применяется параллельно несколько различных уровней отсечки, что позволяет выбирать один символ с наименьшим пик-фактором, из нескольких символов. Кроме того, предложен модифицированный метод резервирования тона, более эффективный, чем классический, из-за использования внеполосных резервированных несущих. Он позволяет обеспечить пик-фактор, до 1.5 дБ меньший, чем классический метод. Уровень внеполосных излуче-

ний при этом контролируется таким образом, чтобы не нарушались требования по электромагнитной совместимости.

**В четвертой главе** разрабатывается методика расчета функционала логарифма отношения правдоподобия при демодуляции OFDM-сигнала для многолучевого канала, учитывающая наличие как аддитивной, так и мультипликативной ошибки, вызванной неточным знанием состояния канала связи. Основное ограничение – необходимость измерения дисперсий аддитивной ошибки и ошибки оценки канала. Причем, если дисперсию аддитивной ошибки в случае наличия пилотных несущих, можно найти как разность состояния канала до и после фильтрации на этих несущих, то способ оценки мультипликативной составляющей зависит от применяемого метода определения состояния канала.

**Основными новыми результатами**, полученными в диссертационной работе, являются:

1. **сравнительный анализ существующих методов снижения пик-фактора** (SLM, TR, ACE) и **оценка их эффективности при различном числе поднесущих** на примере системы РАВИС;
2. **двухступенчатый метод снижения пик-фактора** для системы РАВИС, позволяющий обеспечить низкий пик-фактор как при малом, так и при большом числе поднесущих;
3. **модифицированный метод активного расширения созвездия**, предполагающий использование параллельных итерационных процессов с различными уровнями порога клиппирования для каждого символа, по окончании которых выбирается результат с наименьшим пик-фактором;
4. **модифицированный метод резервирования тона**, который позволяет снизить пик-фактор относительно классического метода резервирования тона за счет использования дополнительных внеполосных резервированных несущих;
5. **способ расчета логарифма отношения правдоподобия** при демодуляции OFDM-сигнала, учитывающий мультипликативную составляющую ошибки; показано, что соответствующий алгоритм обработки сигнала позволяет снизить вероятность битовой ошибки на 0,5-1 дБ, по сравнению с традиционным подходом.

Пункты 3-5 могут быть применены в любой системе передачи данных с OFDM-сигналами, в то же время п.2 относится в основном к системе РАВИС.

Результаты, полученные в диссертационной работе, имеют как научную, так и практическую ценность, что отражено в **актах о внедрении**, приведенных в приложении к ней. В частности, имеется внедрение в учебный процесс кафедры мультимедийных технологий и телекоммуникаций физтех-школы радиотехники и компьютерных технологий

МФТИ в рамках программы дисциплины «Цифровые системы вещания». Кроме того, в работах ООО «НПФ «САД-КОМ» использован комбинированный метод снижения пик-фактора с помощью внеполосных тонов, ограниченной спектральной маской, и модифицированного алгоритма активного расширения созвездия, предложенный Левченко А. С. На этом же предприятии внедрен и метод демодуляции OFDM-сигнала, позволяющий снизить вероятность битовой ошибки в многолучевом канале распространения за счет учёта мультипликативной составляющей ошибки.

Значимым теоретическим результатом является модель многолучевого канала, предложенная в четвертой главе, более точно отражающая процессы при приёме сигнала, чем классическая модель.

Основные результаты диссертационной работы в достаточной мере **обоснованы** корректным использованием математического аппарата теории вероятностей, теории колебаний, теории цифровой обработки сигналов, а также применением математических моделей, отражающих все существенные свойства исследуемых объектов. Таким образом, результаты, полученные в работе, являются **достоверными**, что подтверждается и достаточным объемом выборок в компьютерных моделях.

Результаты диссертационной работы достаточно полно изложены в 8 работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях. Из них 3 работы - в изданиях, рекомендованных для научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; 6 научных работ выполнено без соавторов.

Рецензируемая диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». В ней имеются все необходимые ссылки на основные литературные источники, относящиеся к теме диссертации.

**Автореферат** полно отражает содержание диссертационной работы.

К недостаткам диссертации Левченко А.С. следует отнести следующее:

- 1) не обоснована возможность использования пик-фактора групповых канальных сигналов в качестве единственного показателя качества канала радиосвязи; в частности, как показано в ряде инженерных работ, допускается возможность работы оконечного усилителя мощности OFDM-сигнала на передающей стороне в состоянии насыщения в течение  $(0,1...0,15)\%$ , а в отдельных случаях до 1% времени при допустимом уровне нелинейных искажений; тогда основной характеристикой OFDM-сигнала, определяющей требования к динамическому диапазону передающего радиочастотного канала, является уровень амплитудной огибающей, который превосходят пики этой огибающей, суммарная длительность которых не больше заданного уровня; эта характеристика не исследована в работе;

2) после ограничения максимальных пиков амплитудной огибающей основным фактором, влияющим на показатель передающего радиотракта, является не функция распределения пик-фактора групповых канальных сигналов, а функция распределения их амплитудной огибающей; действительно, средняя выходная мощность усилителя – это среднее значение амплитудной огибающей входного сигнала, взвешенной с помощью функции зависимости его выходной мощности от мгновенных значений огибающей входного сигнала, то есть так называемой АМ-АРМ характеристики усилителя; при расчете среднего КПД эта взвешивающая функция соответствует зависимости мгновенного КПД усилителя от мгновенного значения амплитудной огибающей сигнала на его входе; исследование функции распределения амплитудной огибающей OFDM-сигнала представляется тем более важным, что очевидна ее зависимость от применяемого варианта снижения пик-фактора, рассмотренного в данной диссертации; характеристики нелинейных искажений также связаны скорее с функцией распределения амплитудной огибающей усиливаемого сигнала, а не с функцией распределения пик-фактора.

3) не обоснована структура целевой функции и частные показатели качества процедуры поиска ее экстремума при решении задачи уменьшения пик-фактора; не классифицированы используемые итерационные процедуры поиска экстремума; не исследованы показатели качества итерационных процессов, в частности, возможность их применения в реальном масштабе времени;

4) метод снижения пик-фактора, основанный на использовании дополнительных внеполосных тонов рассматривается при идеальной форме спектральной плотности мощности OFDM-сигнала на выходе усилителя мощности, то есть при идеальном линейном усилении, что невозможно; при этом внеполосные тоны добавляются перед усилителем, и дополнительные нелинейные искажения в усилителе из-за расширения спектра итогового сигнала не учитываются;

5) на стр. 68-69 диссертации предполагается, что максимальное значение OFDM-сигнала может возникнуть при когерентном сложении сигналов поднесущих, затем с использованием неравенства Буняковского-Шварца делается ошибочный вывод об увеличении пик-фактора OFDM-сигнала при росте числа его поднесущих; использованный подход представляется недостаточно корректным, так как не учитываются структурные свойства OFDM-сигнала;

6) в первой главе приведен излишне подробный обзор цифровых радиосистем передачи данных, результаты которого не используются в последующих главах работы;

7) утверждается, что на рис.2.3 (стр. 69 диссертации) приведен спектр OFDM-сигнала, в то время как показано его сигнальное созвездие;

- 8) в формуле (2.9) диссертации счетчик переменной под знаком суммы отсутствует в выражении, находящемся после знака суммы;
- 9) отсутствуют результаты натурального эксперимента.

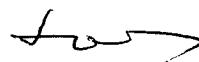
Несмотря на замечания, перечисленные выше, диссертация Левченко А.С. является самостоятельным и серьезным научным исследованием. Она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи повышения эффективности передающих и приемных средств цифровых радиосистем передачи данных, основанных на модуляции COFDM.

Работа, представленная к защите, соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, 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 –

Горгадзе Светлана Феликсовна,  
профессор кафедры “Радиооборудования  
и схемотехники” МТУСИ,

доктор технических наук, профессор



С.Ф. Горгадзе

Сведения об организации:

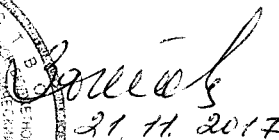
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования “Московский технический университет связи и информатики”  
(МТУСИ).

Адрес: 111024, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а

Тел.: +7(495)-957-79-27

e-mail: svetlana-gorgadze@yandex.ru

Подпись проф. С.Ф. Горгадзе заверяю  
Ученый секретарь Ученого совета МТУСИ



21.11.2017

Т.В. Зотова