

Экз. № ____

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

главного научного сотрудника доктора технических наук, профессора Путилина Алексея Николаевича на диссертацию Егорова Станислава Геннадьевича на тему «Исследование помехоустойчивых широкополосных сетей радиосвязи системы управления движением судов» 2.2.13. – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки)

Актуальность темы исследования

В настоящее время ключевым направлением развития мировой экономики является разработка робототехнических комплексов. Телекоммуникационной основой для мобильных роботов служат сети радиосвязи и навигации. Одной из причин появления технологий 5G/IMT-2020 мобильной связи является потребность в создании высокоскоростных каналов обмена данными с низкой задержкой и высокой достоверностью, необходимых для дистанционного управления транспортом. Система автономного управления движением судов (СУДС), рассматриваемая в диссертационной работе С.Г. Егорова может пользоваться технологией 5G только в пределах зоны её покрытия. Для дальней радиосвязи требуется использование диапазонов КВ и УКВ.

Ограничение Регламентом радиосвязи Международного союза электросвязи полос частот для радиосетей морской связи при возрастающем трафике требует повышения их спектральной эффективности. Для этого используют метод NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), основанный на разделении каналов различных пользователей по мощности. Его реализация требует

использования приемников с большим динамическим диапазоном и обеспечения линейности радиотракта. В противном случае каналы пользователей с низкой мощностью будут дискриминированы за счет снижения разрешающей способности приемника по амплитуде. Поэтому до настоящего времени NOMA не получил широкого использования в КВ и УКВ диапазонах.

Инструментами для компенсации нелинейных искажений в радиотрактах являются схемы DPD (Digital Pre-Distortion), используемые для предкоррекции сигнала на входе усилителя, а также посткоррекция сигнала на приеме за счет цифровой обработки сигналов. В системах множественного доступа наиболее важной является посткоррекция. Её использование требует динамического отслеживания частотно-энергетических характеристик радиоканала множественного доступа и расчета параметров фильтра посткоррекции. Для каждой конкретной радиосети и вида радиосредств этот алгоритм будет различным. Его обоснование, исследование и оптимизация представляют собою сложную научную и инженерную задачу. Он существенным образом обеспечивает высокую помехоустойчивость обмена данными в СУДС, определяющую требуемое качество управления. На этом основании тема, научная задача и частные задачи исследования диссертационной работы С.Г. Егорова обладают несомненной актуальностью.

Научная новизна исследования и полученных результатов

В работе получены аналитические зависимости вероятности битовой (Bit Error Rate – BER) и символьной (Symbol Error Rate – SER) ошибок в системах множественного доступа, учитывающие нелинейные искажения в передающих трактах радиостанций, а также частотно – энергетические характеристики группового сигнала на входе приемника. Автором определены его новые комбинационные свойства, на основе которых предложен алгоритм компенсации нелинейных искажений. На основе алгоритма

Ньютона-Гаусса предложены новые формулы для аппроксимации амплитудных характеристик нелинейных устройств. Разработан комплекс алгоритмов оценки параметров движения судна при кооперативной обработке измерений. Предложен алгоритм программного сопровождения по дальности, работающий при нелинейной гипотезе траектории движения судна.

Практическая значимость полученных результатов

Результаты исследования могут применяться при решении задач имитации и моделирования функционирования групповых трактов в СУДС. Полученные оценки могут использоваться для проектирования и разработки помехоустойчивых устройств для систем связи и навигации в СУДС. Практическая значимость подтверждается реализацией результатов диссертации в отчетах о НИР и ОКР и тремя полученными актами о внедрении в Санкт-Петербургском Государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, АО «Проектно-конструкторское бюро «РИО» г. Санкт-Петербург и АО «Научно-производственное предприятие Авиационная и морская электроника» г. Санкт-Петербург.

Степень достоверности и обоснованности основных положений

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением расчетных показателей анализа и компьютерных моделей. Ключевые результаты исследования были представлены и обсуждены на восьми научных конференциях.

Оценка содержания работы

Объем работы - 230 страниц, включая приложения на 14 страницах. Список литературы насчитывает 172 наименования. В целом работа оформлена достаточно качественно. Структура исследования включает введение, четыре главы, перечень сокращений, библиографический список и приложения. Автореферат составлен качественно и полностью отражает ключевые положения основной части диссертационного исследования.

Во **введении** раскрыта значимость выбранной темы исследования, сформулирована основная цель и решаемые в работе научные задачи.

В **первой главе** выполнен обзор и технический анализ принципов построения и функционирования СУДС, систем автономного судовождения и навигации, а также сетей радиосвязи, используемых для организации связи с береговыми станциями и пунктами управления в акватории порта, обосновывается актуальность решаемых задач. Выполнен обзор многоканальных широкополосных сетей радиосвязи и проблем их использования в системах автономного судовождения. Рассматриваются современное состояние СУДС, методы ортогонального и неортогонального доступа, методики позиционирования, критерии качества сигналов и измерений. Отмечена проблема влияния нелинейных искажений на работу многоканальных сетей связи. В конце главы приведены выводы, содержащие результаты анализа существующих решений, обоснование концепции совместной навигации и связи для беспилотных судов.

Во **второй главе** диссертационной работы описана структура многопозиционной автономной навигационной системы (АНС) и многоканальной морской отказоустойчивой системы связи (МОСС) для СУДС, а также дан анализ способов их математического моделирования. Подробно рассмотрены особенности используемых видов модуляции, кодового разделения каналов на примере Direct-Sequence Code Division Multiple Access (DS-CDMA). Проведен анализ характеристик передачи данных BER и SER. Исследовано влияние учета эффектов нелинейных искажений на сигналы МОСС. Анализируются методы кооперативной обработки измерений для повышения точности навигационных параметров АНС. Показано, что увеличение дисперсии измерений снижает точность, однако алгоритм сохраняет устойчивость, при использовании корреляционных матриц ошибок, присваивая больший вес менее ошибочным данным. Исследуются возможности применения неортогонального множественного доступа NOMA

совместно с CDMA и квазиортогональных кодов для повышения спектральной эффективности и помехоустойчивости. Разработаны аналитические выражения для инерциального сопровождения траектории судна, обеспечивающие повышение точности измерения дальности в 2-60 раз на длительных интервалах.

В **третьей главе** выполнено сравнение различных аналитических моделей, используемых для описания нелинейных амплитудных характеристик усилителей мощности. Получены аналитические выражения плотности распределения амплитуд многоканального сигнала на выходе нелинейного усилителя, характеристики которого описываются моделью Раппа. Проведен обзор способов аппроксимации амплитудных характеристик (АХ) усилителя мощности, при этом ключевыми критериями выбора модели названы обеспечение точного соответствия реальной АХ ниже точки насыщения и простота определения параметров аппроксимационной модели. Показано, что выбор модели нелинейного устройства (НУ) оказывает влияние на оценку уровня межканальных помех и кривые BER. Получены аналитические выражения для расчета вероятности SER, плотности вероятности амплитуд группового сигнала и формулы для одномерной плотности распределения смеси сигнала с шумом на выходе НУ. Результаты, представленные в главе, позволяют повысить энергетическую эффективность систем путем выбора АХ группового усилителя, обеспечивающих максимальную эффективность при заданной помехоустойчивости.

В **четвертой главе**, приведены компьютерные модели для оценки помехоустойчивости сетей связи СУДС при учете нелинейных искажений. Для моделирования широкополосного сигнала системе множественного доступа с кодовым разделением использован марковский случайный процесс. Для него предложен метод расчета переходной матрицы. Нелинейное преобразование сигнала описывается с помощью стохастических дифференциальных уравнений. Предложены критерии согласия и проведена гипотеза о адекватном

соответствии предложенной модели экспериментально полученному распределению группового сигнала.

Разработан рекурсивный алгоритм для генерации группового сигнала. Создана компьютерная модель в среде Matlab, позволяющая исследовать помехоустойчивость группового тракта, показано, что аппроксимация закона распределения сигнала может осуществляться с использованием разложения в ряд Грамма–Шарлье. Представлены результаты исследования модели группового тракта с пространственно-временным кодированием, включая анализ снижения энергетической эффективности и демонстрацию возможности компенсации нелинейных искажений.

В **заключении** работы обобщены основные результаты, полученные в ходе проведенного исследования.

Полнота опубликованных результатов

По теме кандидатской работы опубликованы 24 публикации, среди которых 10 статей в журналах, утвержденных Высшей аттестационной комиссией РФ, зарегистрированы две программы ЭВМ и один патент.

Правильность оформления диссертации и автореферата

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с принятыми для научных квалификационных работ нормами и требованиями. Автореферат адекватно и в полной мере отражает основные научные результаты и положения, сформулированные в тексте диссертации. Автореферат содержит краткое изложение материалов диссертационной работы по главам и соответствует содержанию диссертационной работы. В автореферате выделены все решаемые в каждой главе задачи и представлены научные результаты.

Замечания по работе

По работе имеются следующие замечания:

1. Динамический синтез фильтра посткоррекции нелинейных искажений группового сигнала в системе множественного радиодоступа с кодовым

разделением сигналов требует комплексной оценки его устойчивости и сходимости. Такие результаты в работе не представлены.

2. В работе отсутствует оценка вклада фильтров предкоррекции сигнала DPD (Digital Pre-Distortion), используемых на входе усилителя мощности, в помехоустойчивость рассматриваемых систем. Не сформулированы требования к разрядности ЦАП для их корректной работы.

3. Шум и помехи в рассмотренном канале множественного доступа снижают число эффективных разрядов АЦП приемников. При выделении канала первого уровня иерархии в системе NOMA это число дополнительно сократится. Это сокращение будет зависеть от вида модуляции (КАМ-16 потребует 6-8 разрядов). Из работы не понятно сколько каналов с различным уровнем мощности сигнала сможет разделить приемник с 16(24) разрядным АЦП. Требования к разрядности АЦП в работе не сформулированы.

4. Поскольку в рассмотренных системах имеет место пакетная передача данных, то более корректной оценкой их помехоустойчивости представляется широко используемая Frame Error Rate (FER).

5. В работе присутствуют грамматические ошибки (см. с. 9, с. 173), не приведены расшифровки используемых аббревиатур (см. с. 141 и далее – НУРС, НУВС).

Заключение

Указанные недостатки имеют частный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация С.Г. Егорова является законченным научным исследованием, посвященным решению научной задачи – разработке методики оценки реальной помехоустойчивости сетей радиосвязи с кодовым разделением каналов с учетом влияния комплекса факторов, а также повышение качества автономного управления движением объектов для систем управления движением судов, имеющая значение для развития сетей связи и соответствующая пунктам 4, 8, 14, 15, 18

паспорта специальности 2.2.13 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Диссертационная работа и автореферат Егорова Станислава Геннадьевича «Исследование помехоустойчивых широкополосных сетей радиосвязи системы управления движением судов» по своей актуальности, новизне полученных результатов и практической ценности полностью соответствует требованиям установленным в п. п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, в актуальной редакции), а ее автор Егоров Станислав Геннадьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13- «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник



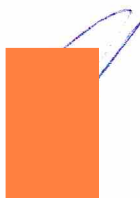
Путилин Алексей Николаевич

Подпись главного научного сотрудника доктора технических наук, профессора Путилина Алексея Николаевича заверяю.

Ученый секретарь ПАО «Интелтех»

Доктор технических наук, профессор

«13» ноября 2025 г.



Будко Павел Александрович

Контактный телефон: (812) 448-19-01 доп. 12-14

Организация: Публичное акционерное общество Информационные Телекоммуникационные Технологии (ПАО «Интелтех»).

Почтовый адрес: Кантемировская ул., 8, Санкт-Петербург, Россия, 197342.

Тел. (812) 542-18-49. Сайт: <http://inteltech.ru/>.