



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
и инновациям

А.Г. Лоцилов

« 20 » 07 2020 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

по результатам представления научного доклада об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации) на соискание ученой степени кандидата наук

Диссертация «Формирование и обработка сигналов в системах связи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров» выполнена на кафедре телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники.

В период подготовки диссертации аспирант Абенев Ренат Рамазанович очно обучался в аспирантуре Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи» специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» и работал на кафедре телекоммуникаций и основ радиотехники в должности старшего преподавателя.

Научный руководитель – Рогожников Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры ТОР, ТУСУР.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

#### **Оценка выполненной соискателем работы.**

Диссертационная работа Р.Р. Абенова является научно-квалификационной работой, в которой приведено описание метода формирования и обработки сигналов в системах связи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров.

#### **Актуальность темы и направленность исследования**

В 2015-м году Международный Союз Электросвязи разработал план развития сетей пятого поколения мобильной связи (5G). Для совершенствования физического уровня сети был предложен ряд технологий в качестве альтернативы для замены ныне используемой технологии OFDM (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Данные технологии призваны устранить ключевые недостатки OFDM: низкая спектральная эффективность вследствие необходимости использования защитного интервала в виде циклического префикса, а также высокое внеполосное излучение, которое увеличивает защитные полосы в спектре. В число альтернативных методов передачи вошли UFMC (Universal Filtered MultiCarrier, многочастотная передача с универсальной фильтрацией), GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование на основе обобщенного частотного разделения) и FBMC (Filter Bank MultiCarrier, многочастотная передача с использованием банка фильтров), а также ряд технологий NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access, неортогональный множественный доступ). Поэтому в настоящее время в данном направлении многими мировыми корпорациями и научно-исследовательскими институтами проводится активная исследовательская работа. Среди перечисленных технологий FBMC отличается максимальной эффективностью, что влечет за собой усложнение построения системы связи на ее основе. В данный момент технология имеет статус альтернативной и пока в стандарте 5G не применяется. Несмотря на это многие исследовательские институты и корпорации, такие как Samsung, Huawei и ZTE, активно поддерживают развитие данной технологии.

Мультиплексирование OFDM уже много лет используется в различных стандартах связи и телевидения, поэтому в настоящее время имеется множество учебных пособий и научных публикаций, которые описывают основные принципы работы, схемы построения системы, методы и алгоритмы. Среди учебных пособий встречаются не только англоязычные источники, но и отечественные. Однако новые методы передачи, в частности, FBMC/OQAM, уже сегодня могут быть внедрены в различные стандарты телекоммуникаций. На сегодняшний день системы связи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров находятся в стадии разработки и научных исследований.

Таким образом, актуальность данной работы подтверждается высоким интересом разработчиков и исследователей к новым методам передачи, способным повысить спектральную эффективность современных систем беспроводной связи.

#### **Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.**

Автором совместно с доцентом кафедры ТОР А.Я. Демидовым поставлены цель и задачи работы. Основные результаты диссертации, в том числе математические модели и программы, получены автором лично. Программа экспериментального исследования разработана совместно с сотрудниками кафедры ТОР. Результаты экспериментального исследования обработаны автором лично.

#### **Степень достоверности результатов проведенных исследований.**

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается проведением экспериментальных исследований системы передачи в реальных каналах распространения радиоволн, сопоставлением результатов, полученных с помощью экспериментов и моделирования, а также сравнением с аналогичными результатами, полученными другими авторами.

#### **Научная новизна диссертации.**

1. Приведен сравнительный анализ систем на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров и стандартных систем на основе ортогонального частотного мультиплексирования. Показано, что спектральная эффективность системы на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров может быть выше до 1.25 раза, а внеполосное излучение может быть ниже на 131 дБ по сравнению с системами на основе ортогонального частотного мультиплексирования.

2. Предложена схема формирования и обработки для систем беспроводной связи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров, позволяющая работать в многолучевом канале без использования циклического префикса. Показано, что использование полифазной реализации фильтра снижает вычислительную нагрузку до 3.71 раз по сравнению с алгоритмом стандартного оконного преобразования Фурье.

3. Проведено экспериментальное исследование системы на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров. Показано, что она способна обеспечить такую же помехоустойчивость, как и система OFDM, а также обеспечить выигрыш в спектральной эффективности.

#### **Практическая значимость диссертации.**

Предложенный метод формирования и обработки сигналов может быть применен в разработке систем беспроводной связи будущих поколений. Метод позволяет формировать сигнал с низким внеполосным излучением, а также не требует использования защитных интервалов в виде циклического префикса. Благодаря этому повышается спектральная эффективность системы передачи.

#### **Полнота изложенных материалов диссертации в печатных работах, опубликованных автором.**

По теме диссертации опубликовано 12 публикаций: 5 статей в журналах из перечня ВАК, 2 монографии, 1 доклад в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus, 2 доклада в трудах международных конференций, 2 доклада в трудах всероссийских конференций.

### **В изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Абенев Р. Р. и др. Исследование методов эквалайзирования для систем связи с использованием OFDM-сигналов // Вестник СибГУТИ. – 2013. – №. 1. – С. 50-56.
2. Абенев Р. Р. и др. Проблемы оценки канала в системе с частотным мультиплексированием с использованием банка фильтров // Вестник СибГУТИ. – 2018. – №. 1. – С. 72-78.
3. Покаместов Д.А., Демидов А.Я., Крюков Я.В., Рогожников Е.В., Абенев Р.Р. Формирование и обработка сигналов множественного доступа с разреженным кодом // Электросвязь. – 2016. № 10. С. 56-61.
4. Покаместов Д.А. и др. Концепция физического уровня систем связи пятого поколения // ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. – 2017. – Т. 60. – №. 7.
5. Я. В. Крюков, А. Я. Демидов, Д. А. Покаместов, Е. В. Рогожников, Р. Р. Абенев. Метод множественного доступа с разделением каналов по мощности // Омский научный вестник № 6 (162) 2018. С. 184-188.

### **В сборниках трудов конференций Web of Science, Scopus:**

6. Abenov R. R. et al. FBMC/OQAM Equalization Scheme with Linear Interpolation // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2019. – С. 0130-0133.

### **Коллективные монографии:**

7. Цифровая обработка сигналов в беспроводных широкополосных системах. Ворошилин Е.П., Рогожников Е.В., Вершинин А.С., Чигринец В.А., Долгих Д.А., Абенев Р.Р., Гельцер А.А., Коротков Д.А., Лобанов Н.А., Майков Д.Ю. Томск: В-Спектр, 2012. – 244 с. ISBN 978-5-91191-273-4.
8. Алгоритмы обработки и преобразования сигналов в системе «Мобильный WiMax». Ворошилин Е.П., Рогожников Е.В., Вершинин А.С., Демидов А.Я., Каратаева Н.А., Коротков Д.А., Лобанов Н.А., Майков Д.Ю., Абенев Р.Р. – Томск: В-Спектр, 2012. – 172 с. ISBN 978-5-91191-274-1.

### **В сборниках трудов международных конференций:**

9. Абенев Р.Р., Рогожников Е.В. Способы эквалайзирования для систем широкополосного беспроводного доступа диапазона (2.4 – 2.7) ГГц. – Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции (8-10 ноября 2012 г.): В 2ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2012. – 208 с.
10. И. Сагиева, аспирант каф. ТУ, Р.Р. Абенев, аспирант каф. ТОР, ТУСУР. Метод передачи данных на множестве поднесущих с использованием банка фильтров (FBMC) // XII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», 16-18 ноября 2016г., г. Томск.

### **В сборниках трудов всероссийских конференций:**

11. И. Сагиева, магистрант каф. ТОР, Д. Ыканов, магистрант каф. ТОР, Р.Р. Абенев, аспирант каф. ТОР, ТУСУР. Моделирование FBMC в SystemVue // Научная сессия ТУСУР – 2016 Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016»
12. Т.Е. Жукембаева, магистрант каф. ТОР, Р.Р. Абенев, аспирант каф. ТОР, ТУСУР. Перспективы применения модуляции OFDM/OQAM в системах связи // Научная сессия ТУСУР – 2016 Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016»

### **Соответствие содержания диссертации избранной специальности.**

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствуют специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» по областям исследования:

1. Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов в радиосистемах телевидения и связи при наличии помех. Разработка методов разрушения и защиты информации. (п. 4)

2. Исследование и разработка радиотехнических систем и устройств передачи информации, в том числе радиорелейных и телеметрических, с целью повышения их пропускной способности и помехозащищенности. (п. 6)

Диссертация «Формирование и обработка сигналов в системах связи на основе ортогонального частотного мультиплексирования с использованием банка фильтров» Абенова Рената Рамазановича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Заключение принято на научно-техническом семинаре кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники радиотехнического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Присутствовало на заседании 16 чел., в том числе 2 д.т.н., 5 к.т.н., 1 к.ф.-м.н. и др. Результаты голосования: «за» – 16 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 5 от «16» июля 2020 г.

Председатель семинара,  
к.т.н., зав. каф. ТОР



К.Ю. Попова

Секретарь семинара,  
к.т.н., доцент каф. ТОР



Е.В. Рогожников