

Министерство образования и науки России  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ  
им. В.А.КОТЕЛЬНИКОВА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН)

Моховая ул., д. 11, корп. 7, Москва, 125009  
Тел. +7(495)629-35-74, факс +7(495)629-36-78  
[ire@cplire.ru](mailto:ire@cplire.ru), <http://www.cplire.ru>  
ОКПО 02699085, ОГРН 1027700183708  
ИНН/КПП 7703053425/770301001



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИРЭ им В.А. Котельникова РАН  
член-корреспондент РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

С.А. Никитов  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

10.06.2019 № 11210-6215-345

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Г  
}

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Смирнова Алексея Эдуардовича «Исследование и разработка алгоритмов обработки сигналов в системах беспроводной связи с большим количеством антенн», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

### 1. Актуальность темы исследования

В последнее время использование многоантенных систем становится очень популярным за счет получения преимуществ по сравнению с одноантенными. Например, системы MIMO используются для повышения скорости передачи информации и спектральной эффективности в системах беспроводной связи. Актуальной задачей в области многоантенных систем с учетом требований к росту скорости передачи информации является снижение вычислительной сложности алгоритмов демодуляции.

В работе Смирнова А.Э. разработаны алгоритмы демодуляции, которые имеют меньшую по сравнению с известными вычислительную сложность при допустимых потерях в помехоустойчивости. Использование таких алгоритмов позволит увеличивать количество антенн в системах MIMO и

63/19  
10.06.19

скорость передачи информации, что крайне актуально во время развития нового стандарта сотовой связи 5G.

## **2. Структура и основные результаты работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы и пяти приложений. Общий объем работы составляет 159 страниц.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и решаемые задачи, научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описаны постановка задачи демодуляции в системах MIMO, указаны отличительные особенности систем massive MIMO, приведено описание основных известных алгоритмов демодуляции и их характеристики.

Во **второй главе** диссертации приведены расчеты вычислительной сложности известных алгоритмов демодуляции, предлагается модификация алгоритма демодуляции МСКО без потерь в помехоустойчивости, но с меньшей вычислительной сложностью. Произведено сравнение вычислительной сложности известного алгоритма МСКО с разработанной модификацией.

В **третьей главе** диссертации предлагается два новых алгоритма для демодуляции сигнала в системах с помехоустойчивым кодированием. Один из них – итерационный алгоритм демодуляции, а второй – приближенный алгоритм вычисления дисперсий ошибок демодуляции. Оба эти алгоритма используются на приёмной стороне в многоантенных системах. В данной главе также произведена оценка вычислительной сложности и помехоустойчивости разработанных алгоритмов.

В **четвертой главе** описаны возможности реализации разработанных алгоритмов с использованием цифровых сигнальных процессоров и FPGA. Показано, что использование разработанных алгоритмов позволяет

осуществить демодуляцию сигнала за период времени, не превышающий длительности одного информационного символа.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

### **3. Научная новизна**

По итогам диссертационной работы разработаны три алгоритма обработки сигналов на приёмной стороне для систем massive MIMO.

Первый алгоритм А4 – это модификация известного алгоритма МСКО, позволяющая снизить его вычислительную сложность в 2 раза без потерь в помехоустойчивости.

Второй алгоритм А7 – итерационный алгоритм демодуляции, позволяющий снизить вычислительную сложность при допустимых потерях в помехоустойчивости.

И третий алгоритм А8 используется совместно с алгоритмом А7 для приближенного вычисления дисперсий ошибок демодуляции в системах связи с помехоустойчивым кодированием и «мягким» по входу декодером. Одновременное использование алгоритмов А7 и А8 для демодуляции в системах massive MIMO позволяет снизить вычислительную сложность в 2,5-5 раз в зависимости от количества антенн и порядка модуляции.

### **4. Практическая значимость диссертационной работы**

Результаты диссертации, полученные Смирновым А.Э., имеют практическую ценность для техники связи, разрабатываемой для современных стандартов беспроводной связи с использованием технологии MIMO.

Практическая ценность диссертации подтверждается использованием и внедрением её результатов АО «Крафтвэй корпорэйшн ПЛС», о чем свидетельствует соответствующий акт.

### **5. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректностью использования математического аппарата для решения

подобных задач, а также согласованностью результатов с результатами моделирования известных алгоритмов. Все полученные результаты обсуждались на научных конференциях.

#### **6. Личный вклад автора**

Результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту и составляющие основное содержание работы, разработаны и получены автором лично.

#### **7. Соответствие работы паспорту научной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют пункту 8 паспорта научной специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

#### **8. Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационные работы отражены в 3 статьях в журналах, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки России, в том числе 1 статья в журнале, рецензируемом в базе данных Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Апробация и обсуждение результатов диссертационной работы проводилось на семи международных конференциях.

#### **9. Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Разработанные Смирновым А.Э. алгоритмы могут быть применены в приёмных устройствах, используемых в системах беспроводной связи с большим количеством антенн (massive MIMO).

#### **10. Замечания по диссертационной работе**

К замечаниям по результатам диссертационной работы следует отнести следующее:

– предложенный алгоритм А4 ограничен в области использования по количеству антенн только для систем massive MIMO, при небольшом количестве антенн он имеет большую сложность относительно известного алгоритма МСКО;

– оценка помехоустойчивости произведена для одинаковых условий в канале связи, различны только виды модуляции. Непонятно, сохранится ли выигрыш в вычислительной сложности у разработанных алгоритмов при допустимых потерях в помехоустойчивости при иных условиях в канале связи;

– не обосновано выбраны сигнальные процессоры с низкой производительностью, например, ADSP-21266, для оценки возможности реализации алгоритмов.

Однако указанные недостатки не снижают значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы, защищаемые положения которой обладают научной новизной и практической значимостью.

## **11. Заключение**

Диссертационная работа Смирнова А.Э. является законченной научной квалификационной работой. Актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

По новизне, уровню научной проработки и практической значимости полученных результатов работа отвечает требованиям п. 9 положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Смирнов Алексей Эдуардович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании научно-технического совета отдела 34 (протокол №3 от 06.06.2019).

Председатель семинара,  
д.ф.м.н., г.н.с., профессор



А.С. Дмитриев

Секретарь семинара,  
д.ф.м.н., в.н.с.



Л.В. Кузьмин

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук

Адрес: 125009, г. Москва, Моховая ул., д. 11, корп. 7.

Веб-сайт: <http://cplire.ru>

Телефон: +7 (495) 629-3574

Адрес электронной почты: [ire@cplire.ru](mailto:ire@cplire.ru)