

В объединенный диссертационный совет  
Д 999.028.03 на базе  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет им А.Н. Туполева – КАИ»,  
ФГБОУ ВО «Марийский государственный  
университет»,  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный  
технологический университет»

## ОТЗЫВ

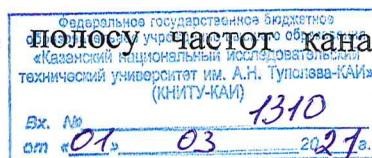
официального оппонента

на диссертационную работу **Кислицына Алексея Александровича**  
«Комплекс адаптивной компенсации энергетических потерь сигналов из-за  
частотной дисперсии в транссионосферных радиоканалах систем спутниковой  
связи», представленную на соискание учёной степени кандидата технических  
наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства  
телекоммуникаций

### Актуальность темы исследования

В настоящее время активно развивается направление телекоммуникаций и радиосвязи, проникая всё глубже как в повседневную жизнь людей, так и в решение задач создания и обеспечения информационной целостности и связности на территории государства. Развитие и совершенствование спутниковых систем связи (ССС) является важным и необходимым составляющим этой задачи.

Применение широкополосных сигналов в ССС вызвано получением возможности увеличить скорость передачи информации в канале связи, повысить уровень помехоустойчивости и энергетической скрытности и понизить уровень энергопотребления. Однако плюсы, которые можно получить за счёт использования широкополосных сигналов, отчасти компенсируются необходимостью ограничивать



вызванную применением системы связи в реальных условиях при наличии ионосферы в канале передачи. Это приводит к возникновению частотной дисперсии в трансionoсферном канале передачи данных, неоднородной как по времени, так и в пространстве. Отсюда вытекает актуальность настоящей работы, направленной на максимально возможную компенсацию этого эффекта дисперсии: автор ставит перед собой цель снижения энергетических потерь широкополосных сигналов ССС путём преодоления частотной дисперсии среды, позволяющего существенно расширить полосу частот трансionoсферного радиоканала за счёт разработки новых методов компенсации дисперсии и реализующих их алгоритмов.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертационная работа Кислицына А.А. состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. В конце глав приводятся промежуточные результаты и выводы, полученные в них.

Во введении обоснована актуальность работы, представлена степень разработанности темы, поставлена цель работы, приведён объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна работы, практическая ценность и реализация результатов работы, описаны методы исследования, выдвинуты положения, выносимые на защиту, показана достоверность проведённой работы, имеется информация об апробации работы, публикациях, личном вкладе автора и структуре, и объеме диссертации.

В первой главе рассматривается проблема расширения полосы частот широкополосных трансionoсферных каналов ССС из-за воздействия частотной дисперсии среды. Представлены способы расширения спектра сигналов и описаны преимущества использования широкополосных сигналов. Приведены характеристики и классификация различных существующих систем и устройств телекоммуникаций, работающих в трансionoсферных каналах связи. Рассмотрена частотная дисперсия среды распространения сигналов ССС и причины искажения системных



характеристик. Отмечается слабый уровень изученности в существующих работах дисперсии для транссионосферного распространения радиосигналов. Автор высказывает гипотезу о возможности создания метода компенсации на основе развития принципа адаптивного эквалайзирования для устранения эффекта частотной дисперсии, что и определило сформулированные в конце главы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу и научному обоснованию создания адаптивного комплекса компенсации энергетических потерь широкополосных сигналов ССС. Рассматриваются набег фазы и дисперсионная характеристика (ДХ) для транссионосферного канала. Отмечено, что имеющихся в литературе результатов исследования ФЧХ и ДХ на низких частотах (в случае приближения средней частоты канала к критической частоте ионосферы) недостаточно для задач диссертации, также не решён вопрос для общего случая о коррекции дисперсионных искажений в широкополосном транссионосферном канале. Обсуждается необходимость учитывать пространственно-временную изменчивость параметров транссионосферных каналов связи и методика оценивания коэффициента дисперсии по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. Разработана математическая модель частотной дисперсии различного порядка в широкой полосе частот по отношению к полосе когерентности транссионосферного радиоканала и оценены области частот, где необходим учёт нелинейной дисперсии. На основе анализа представленных данных получены количественные критерии для значений относительных частот, при которых можно пользоваться различными приближениями. Получены общие решения выражений для оценки полосы когерентности канала по данным о параметре дисперсии второго порядка. Оценены энергетические потери в канале ССС в радиоканале с частотной дисперсией и выявлена связь между потерями импульсной мощности и коэффициентом дисперсии канала.

В третьей главе исследуются вопросы синтеза методов и алгоритмов адаптивной компенсации энергетических потерь сигналов систем

спутниковой связи из-за частотной дисперсии на основе диагностики ГНСС и их программной реализации. Разработаны алгоритмы оценки коэффициента дисперсии трансionoсферного канала на основе диагностики глобальной наигационной спутниковой системы (ГНСС). Были созданы программные модули для определения значений ПЭС на основе данных двухчастотных фазовых и кодовых измерений с приёмных наигационных станций ГЛОНАСС/GPS. Был разработан программный продукт, позволяющий в автоматизированном режиме получать параметры абсолютного полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, коэффициента дисперсии трансionoсферного канала и оценку их стохастической погрешности на основе данных приёмников сети SmartNet. Предложен метод и реализующие его алгоритмы мониторинга параметров дисперсии трансionoсферного радиоканала, а также определение предельной ширины полосы частот систем спутниковой связи. Разработан алгоритм экспериментальной оценки времени деградации трансionoсферного канала. Представлены результаты модернизации и разработки алгоритма решения сетевых задач региональной диагностики полос когерентности трансionoсферных радиоканалов на основе электронных карт и оценены энергетические потери широкополосных сигналов спутниковых систем связи с учётом согласованного приёма. Предложен метод и реализующие его алгоритмы адаптивной компенсации энергетических потерь сигналов спутниковой связи при расширении полосы частот, позволяющие повысить пропускную способность трансionoсферных каналов, приводится оценка в выигрыше пропускной способности в таком канале.

Четвёртая глава диссертационной работы посвящена верификации разработанных методов и реализующих их алгоритмов для оценки информационно-технических характеристик широкополосных ССС. Представлена и описана экспериментальная техника и условия проведения экспериментов для решения сетевых задач диагностики трансionoсферных каналов. Разработан аппаратно-программный комплекс для адаптивной



компенсации эффекта частотной дисперсии. Приведены результаты региональных и временных измерений основных параметров частотной дисперсии в широкополосных транссионсферных каналах радиосвязи. Экспериментально определена предельная полоса частот транссионсферных радиоканалов и время их деградации. Были проведены эксперименты и представлены результаты по снижению энергетических потерь широкополосных сигналов ССС при компенсации нелинейной частотной дисперсии. Показано, что применение разработанных методик и алгоритмов по коррекции полосы транссионсферного канала позволяет увеличить полосу частот канала в 2,5-7 раз, а энергетический выигрыш при этом составит 1,6...9,6 дБ.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В диссертационной работе выносятся следующие положения на защиту:

1. Усовершенствованная математическая модель частотной дисперсии транссионсферного радиоканала, позволившая установить влияние дисперсионных искажений на широкополосные системы спутниковой связи и их системные характеристики при различных рабочих частотах в широкой полосе частот.

2. Метод и реализующие его алгоритмы для мониторинга системных характеристик транссионсферного радиоканала, позволяющие по данным сигналов сети референсных станций ГНСС периодически оценивать текущие параметры частотной и импульсной характеристик, что необходимо для преодоления энергетических потерь из-за частотной дисперсии по истечению периода деградации радиоканала.

3. Метод и реализующие его алгоритмы для определения предельной ширины полосы частот изменчивого в пространстве и времени транссионсферного радиоканала, отличающиеся решением сетевой задачи

его диагностики на основе региональных электронных карт полос когерентности в значительном пространственно-временном масштабе при условии, что дисперсионными искажениями в нём ещё можно пренебречь.

4. Метод и реализующие его алгоритмы адаптивного компенсирования энергетических потерь сигналов ССС и повышения пропускной способности путём преодоления эффекта частотной дисперсии при существенном расширении полосы частот трансионосферного радиоканала на основе применения метода обратной фильтрации с периодическим обучением компенсатора.

5. Оценка повышения информационно-технических характеристик ССС при использовании разработанных методов и реализующих их алгоритмов, показывающая достигаемое увеличение пропускной способности в 2,5...7 раз и энергетического выигрыша в 1,6...9,6 дБ при увеличении полосы частот канала.

Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми, т.к. вопросы, связанные с компенсацией энергетических потерь из-за частотной дисперсии, в авторской постановке ранее не рассматривались. Они имеют существенную научную и техническую значимость и могут найти применение в организации спутниковых трансионосферных радиоканалов.

В диссертации доказаны все полученные теоретические результаты и обоснованы все сделанные выводы. Соискатель успешно применяет математический аппарат вариационного исчисления, математического анализа, теории спектрального анализа и др. для решения поставленных задач.

### **Достоверность и новизна полученных результатов**

В качестве основных научных результатов, полученных в диссертации, следует отметить следующие положения.

1. Развита математическая модель частотной дисперсии, отличающаяся учетом нелинейной дисперсии третьего порядка и позволяющая оценивать



влияние дисперсионных искажений на широкополосные системы спутниковой связи, работающие в области пониженных частот (близких к критической частоте ионосферы), ширина полосы частот которых превышает полосу когерентности трансionoсферного радиоканала.

2. Создан метод и реализующие его алгоритмы мониторинга системных характеристик изменчивых радиоканалов связи для преодоления энергетических потерь широкополосных сигналов, отличающиеся учетом особенностей трансionoсферного распространения связного сигнала на трассе спутник–Земля, позволяющие по результатам обработки сигналов сети референчных станций ГНСС определять текущие параметры дисперсии изменчивого радиоканала по истечению периода деградации радиоканала.

3. Создан метод и реализующие его алгоритмы экспериментальной оценки предельной ширины полосы частот трансionoсферного радиоканала по данным ГНСС, отличающиеся возможностью проведения сетевого мониторинга в различных регионах на основе электронно-диагностических карт в допустимом пространственно-временном масштабе, позволяющие устанавливать необходимую оптимальную ширину полосы частот ССС

4. Создан метод и реализующие его алгоритмы адаптивного компенсирования энергетических потерь сигналов ССС, отличающиеся своевременной актуализацией параметров корректора к текущим значениям дисперсии среды в режиме обучения по истечению времени деградации канала, позволяющие преодолевать негативный эффект частотной дисперсии при существенном расширении полосы частот

Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается тем, что результаты, полученные для разработанных математических моделей, методов и алгоритмов, согласуются с результатами, полученными эмпирически при проведении экспериментов с реальной аппаратурой. Также достоверность и высокую значимость результатов подтверждает то, что результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и изданиях,

входящих в базы данных Scopus и Web of Science, а также неоднократно обсуждались на ведущих международных и российских научных конференциях.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов**

В диссертационной работе была решена задача создания методов, алгоритмов и системы адаптивной компенсации частотной дисперсии, что может быть использовано в ССС для обеспечения их широкими полосами частот транссионсферных радиоканалов для повышения информационно-технических показателей.

Практическая значимость результатов диссертации подтверждается актами о внедрении разработанных моделей, методов и алгоритмов в НИР, выполняемых в ФГБОУ ВО «ПТГУ» по проектам РНФ и РФФИ, а также для организации учебного процесса на кафедре РТиС ПТГУ.

### **Замечания по диссертационной работе**

Диссертация и автореферат имеют следующие недостатки.

1. Общее замечание по обзору существующих исследований и результатов по теме диссертации. При чтении диссертационной работы сложно из текста понять, что было уже сделано ранее, а что предложено автором. Возможно, стоило выделить отдельный раздел, посвящённый анализу состояния вопроса, а далее представлять новый материал.

2. В пункте 1.1 диссертации приведено описание достоинств широкополосной связи, однако недостаточно раскрыта специфика транссионсферного канала связи и её особенности использования в таких каналах.

3. Из текста диссертации п. 2.3 не ясно, откуда взялись количественные критерии (на базе относительных частот) для применения различного вида приближений.

4. В п. 3.1 не совсем понятно, зачем было необходимо создавать программные модули ТЕСphase и ТЕСcode. Да, в работе указаны отличия от существующих программных комплексов, но хотелось бы видеть в более явном виде обоснование необходимости нового программного обеспечения.



5. В п. 3.1 не уточняется, как именно определяется радиус корреляции с однородными данными.

6. В работе имеются грамматические неточности и опечатки. Так, в уравнении 1.10 отсутствует знак равенства. Не объясняются некоторые обозначения. Из контекста можно понять, о чём идёт речь, однако лучше давать определение в явном виде. В выражениях 2.30 и 2.31 имеются опечатки в коэффициентах. В заголовке таблицы 4.3 написано о стохастических погрешностях оценки параметра дисперсии второго порядка, а в таблице фигурирует величина относительной погрешности измерения ПЭС. Имеется 2 таблицы с номерами 4.4 (стр. 123 и стр. 130), у таблицы 4.8 должен быть номер 4.7.

Данные недостатки являются незначительными и не снижают научной ценности полученных результатов и общей положительной оценки диссертации.

### **Заключение**

В диссертации Кислицына А.А. содержатся новые строго аргументированные научные решения. В работе указаны все случаи заимствования и приведены ссылки на источники использованных материалов. Основные результаты своевременно и полно опубликованы, в том числе в ведущих российских и зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, Scopus и Web of Science. Автореферат диссертационной работы хорошо отражает содержание диссертации и достаточно подробно описывает проведённые исследования и полученные результаты. Считаю, что диссертационная работа Кислицына А.А. имеет существенное значение для передачи данных по трансферным радиоканалам в системах спутниковой связи и их эффективного использования.

Диссертационная работа Кислицына Алексея Александровича полностью соответствует требованиям к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, изложенным в п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября

2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020), предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата наук.

Считаю, что соискатель Кислицын Алексей Александрович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Официальный оппонент:  
кандидат физико-математических наук  
Рыжов Антон Игоревич,  
старший научный сотрудник,  
ФГБУН «Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН»  
«15» февраля 2021 г.

\_\_\_\_\_ А. И. РЫЖОВ

ФГБУН «Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН»  
125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.  
рабочий телефон: 8(495)629-72-78  
E-mail: mef.box@gmail.com  
Кандидатская диссертация защищена по специальности 01.04.03 –  
Радиофизика

Подпись Рыжова А. И. заверяю  
Учёный секретарь ФГБУН «Институт радиотехники  
и электроники им. В.А. Котельникова РАН» к.ф.н. М.Н. Чусов

\_\_\_\_\_ И.И. Чусов  
\_\_\_\_\_ 2021 г.





## СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по кандидатской диссертации Кислицына Алексея Александровича  
на тему «Комплекс адаптивной компенсации энергетических потерь сигналов  
из-за частотной дисперсии в транссионосферных радиоканалах систем  
спутниковой связи»

на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

1.	Фамилия Имя Отчество	Рыжов Антон Игоревич
2.	Гражданство	Российская Федерация
3.	Ученая степень (с указанием шифра специальности, по которой защищена диссертация)	Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика
4.	Ученое звание	–
5.	Место основной работы с указанием подразделения, должности и рабочего телефона	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», старший научный сотрудник лаб. 341 Рабочий телефон: 8(495)629-7278
6.	Адрес места основной работы с указанием индекса	125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.
7.	Телефон	89163475486
8.	Адрес электронной почты	mef.box@gmail.com


Список основных публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

Вид публикации	Название публикации	Выходные данные
Статья в журнале	Экспериментальное исследование беспроводной сети прямохаотических сверхширокополосных приемопередатчиков для мобильных объектов	Дмитриев А. С., Ицков В. В., Попов М. Г., Петросян М. М., Рыжов А. И. // Физические основы приборостроения. – 2018. Т. 7. № 1(27). С. 80–90. (Перечень ВАК)
Статья в журнале	Сверхширокополосная беспроводная сенсорная сеть для передачи непрерывных	Андреев Ю.В., Кузьмин Л.В., Попов М.Г., Рыжов А.И. // Физические основы

	потоков данных	приборостроения. 2018. Т. 7. № 1(27). С. 91–102. <b>(Перечень ВАК)</b>
Статья в сборнике	Self-organizing ultrawideband wireless sensor network	Dmitriev A. S., Kuzmin L. V., Lazarev V. A., Ryshov A. I., Andreyev Y. V. and M. G. Popov // 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO), Kazan, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997519. <b>(База Scopus)</b>
Статья в журнале	Повышение дальности действия сверхширокополосных прямохаотических средств связи	Дмитриев А.С., Попов М.Г., Рыжов А.И. // Радиотехника и электроника. 2020, Т. 65, №9, С. 902-910. <b>(База Scopus)</b>
Статья в журнале	Сверхширокополосные средства беспроводной связи и активные радиометки для интернета вещей и интернета робототехники	Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Попов М.Г., Рыжов А.И. // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности. 2019. № 1 (2). С. 72-82.
Статья в сборнике	Экспериментальное исследование беспроводной сверхширокополосной сети для мобильных объектов	Дмитриев А.С., Рыжов А.И., Попов М.Г., Ицков В.В., Петросян М.М. // В сборнике: 28-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2018). Материалы конференции. 2018. С. 322-328.

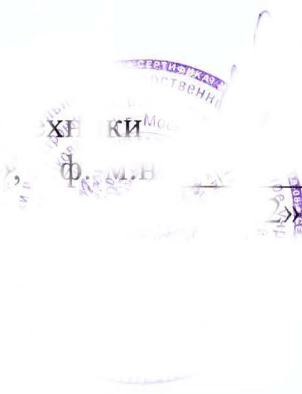
Сведения подтверждаю, согласен на их включение в диссертационное дело, дальнейшую обработку и размещение на сайте.

кандидат физико-математических наук  
Рыжов Антон Игоревич,  
старший научный сотрудник,  
ФГБУН «Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН»

 А. И. Рыжов  
«22» декабря 2020 г.



Подпись Рыжова А. И. заверяю  
Учёный секретарь ФГБУН «Институт ради  
и электроники им. В.А. Котельникова РАН



И.И. Чусов  
декабря 2020 г.