

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

на диссертацию Краснова Тимура Валериевича  
на тему «Методы повышения устойчивости к взаимным помехам  
в радионавигационных системах со спектрально-эффективными  
шумоподобными сигналами»  
на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация.

**Актуальность темы диссертации.** Диссертационная работа Т.В. Краснова посвящена решению актуальной для радионавигации проблемы повышения помехозащищённости наземных радионавигационных систем (РНС) большой дальности действия. Для таких систем характерна перегруженность сигналами сторонних радиосистем и значительные помехи техногенного происхождения. Этим объясняется повышенный интерес к применению в системах дальней навигации спектрально-эффективных шумоподобных сигналов, позволяющих в значительной степени смягчить остроту проблемы тесноты эфира.

Большой динамический диапазон сигналов в системах дальней навигации обостряет проблему приёма слабых сигналов из-за действия мощных взаимных помех. Поэтому **актуальность** решаемой автором задачи, заключающейся в разработке методов повышения устойчивости наземных систем радионавигации с шумоподобными сигналами и кодовым разделением к мощным взаимным помехам, очевидна и **не вызывает сомнений**.

Особенностью подхода автора к решению поставленной задачи является использование в разрабатываемых радионавигационных системах дальней навигации нового поколения спектрально-эффективных шумоподобных сигналов (ШПС) с минимальной частотной модуляцией, вопросы теории и практического применения которых в настоящее время мало исследованы.

**Цель диссертации и задачи исследования** полностью соответствуют решаемой научно-практической задаче, заключающейся в повышении помехоустойчивости наземных радионавигационных систем большой дальности действия.

**Основная идея диссертации** заключается в том, что из-за высокого динамического диапазона сигналов каждый из известных подходов повышения устойчивости к мощным взаимным помехам в отдельности не позволяет полностью решить проблему и должен использоваться в комплексе. Такой подход наиболее продуктивен применительно к наземным широкополосным системам дальней навигации, использующим средневолновый и длинноволновый диапазоны.

**Наиболее значимые результаты диссертации.** На основании проведенного в главе 1 сравнительного анализа шумоподобных сигналов спектрально-

эффективных форматов модуляции автор обосновывает выбор вида модуляции, а также структуры и параметров дальномерных кодов для наземных широкополосных систем радионавигации. Показано, что сигналы формата *MSK-BOC* имеют преимущества перед сигналами с традиционной модуляцией *MSK* в точности измерения задержки, а использование ансамблей из циклических сдвигов общей *M*-последовательности длины 16383 и дополнительной компенсации мощных взаимных помех обеспечивает требуемый допустимый уровень взаимных помех 80 дБ.

Разработаны методы и алгоритмы компенсации мощной взаимной помехи с использованием штатной навигационной аппаратуры бортовых станций наземных радионавигационных систем.

Наиболее значимым результатом главы 2 является разработка автокомпенсатора на основе двухпетлевого следящего фильтра с кольцами слежения за задержкой и фазой помехи, обеспечивающего подавление помехи не менее 40 дБ для реальных условий приёма сигналов опорных станций. Обоснована перспективность алгоритма компенсации с бланкированием, позволяющего значительно ослабить негативное влияние модуляции данными на эффективность подавления помехи.

В главе 3 исследована эффективность предложенных методов компенсации взаимных помех. Оценена требуемая для подавления помехи на 40 дБ точность оценки параметров помехи. К числу основных результатов главы следует отнести то, что предложенный автокомпенсатор позволяет повысить запас помехоустойчивости приемника *MSK*-сигнала к взаимной помехе с 40 дБ (без компенсатора) до 80 дБ, что соответствует динамическому диапазону сигналов РНС. Анализ помехоустойчивости квазиоптимального алгоритма параллельного поиска слабого шумоподобного *MSK*-сигнала при воздействии взаимной помехи свидетельствует о том, что он обеспечивает существенные преимущества в реализации незначительно проигрывая оптимальному алгоритму (менее 1 дБ).

В главе 4 исследована эффективность предложенных методов компенсации взаимных помех с учётом влияния аппаратурных погрешностей. Показано, что наибольшее влияние на эффективность компенсации мощной взаимной помехи оказывают амплитудно-фазовые искажения принятого сигнала в полосно-пропускающем фильтре приемника. В меньшей мере на эффективность подавления структурной помехи влияет нелинейность тракта аналого-цифрового преобразования.

Предложен способ уменьшения негативного воздействия данного фактора на эффективность компенсации помехи, основанный на включении в канал формирования копии помехи полосового фильтра, идентичного фильтру приёмника. Дан-



ный подход позволяет повысить подавление помехи с 20 (без дополнительного фильтра) до 70 дБ.

Научные результаты диссертации создают теоретическую основу для разработки новых методов повышения помехоустойчивости наземных широкополосных систем радионавигации нового поколения, превосходящих действующие системы по точности и дальности действия.

**Новыми научными результатами, полученными автором, являются:**

1. Способ компенсации взаимных помех, основанный на фильтрации помехи с оценкой информационного символа в реальном времени, который в отличие от известных способов не требует дополнительной задержки ШПС.

2. Алгоритмы оценки параметров мощной взаимной помехи в системах со спектрально-эффективными сигналами, основанные на квазиоптимальных алгоритмах фильтрации задержки и фазы помехи, которые обеспечивают близкую к потенциальной помехоустойчивость по отношению к шуму.

3. Разработанный автором автокомпенсатор мощной взаимной помехи для средневолновой РНС со спектрально-эффективными ШПС, позволяющий увеличить допустимый уровень помехи с 40 до 80 дБ.

4. Вывод о том, что среди аппаратурных погрешностей наибольшее влияние на эффективность компенсации мощной взаимной помехи оказывают амплитудно-фазовые искажения при полосовой фильтрации сигналов и нелинейность тракта аналого-цифрового преобразования.

5. Способ поиска по задержке шумоподобных сигналов, который существенно сокращает аппаратурные затраты по сравнению с известным способом параллельного поиска при сохранении минимального времени поиска.

О новизне подхода и глубине проработки технических вопросов свидетельствуют пять патентов Российской Федерации и Евразийский патент, полученные автором на способы и устройства обработки ШПС с минимальной частотной модуляцией.

**Достоверность полученных результатов подтверждается** корректным применением известных математических методов, совпадением теоретических результатов с результатами математического моделирования и экспериментальных исследований, сопоставлением с результатами работ других авторов.

**Практическая значимость** результатов диссертационной работы несомненна, так как ее основные результаты легли в основу модернизации РНС в рамках ОКР «Спрут», выполнявшейся на АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) и завершившейся изготовлением опытного образца и успешным проведением государственных испытаний.

**Диссертация содержит** 166 страниц основного текста, приложения на 4 страницах. Список литературы включает 101 наименование.

**Материал диссертации изложен** на достаточно высоком научном уровне с использованием ясных формулировок и логических умозаключений. Диссертация представляет собой серьезную, аргументированную и завершенную научную работу, выполненную на актуальную тему и содержащую важные теоретические и практические результаты. Автор продемонстрировал глубокое знание предмета и методов исследования.

**По теме диссертации** автором опубликовано 35 работ, из них 13 – в рецензируемых изданиях по списку ВАК, в которых материалы диссертации отражены достаточно полно.

**Автореферат соответствует содержанию диссертации.**

**Замечания:**

1. Из текста работы не ясно, чем определяется выбор автором представления *MSK*-сигнала как сигнала с квадратурной ФМ, а не как частотно-манипулированного сигнала.
2. Не ясно, каким образом производится идентификация опорных станций при использовании циклических сдвигов общей *M* - последовательности в качестве дальномерных кодов для разных опорных станций.
3. Автором диссертации не приведена мера оценки устойчивости к взаимным помехам разрабатываемых РНС с ШПС.
4. В главе 3 исследуется помехоустойчивость алгоритма поиска ШПС с пилотной и информационной компонентами (раздел 3.2.4), описание которого отсутствует.
5. Непонятно, какой смысл имеет показатель «вероятность ошибки» при анализе алгоритмов поиска сигналов, если задача поиска формулируется как задача измерения времени запаздывания?
6. Автор не дает объяснения, почему при введении в канал формирования копии помехи полосового фильтра, аналогичного полосовому фильтру приёмника, эффективность компенсации помехи повышается с 20 до 70 дБ.
8. В автореферате и тексте диссертации имеется ряд погрешностей и неточностей (не описаны кривые 1,2, 3 на рис. 11 автореферата; на стр. 35 диссертации обозначения  $H_I(t)$  и  $H_Q(t)$  используются для описания элементов квадратурных сигналов, а на рис. 1.7 эти же обозначения соответствуют самим сигналам и ряд других).

Отмеченные замечания не затрагивают сути исследований и принципиально не влияют на их результаты. В перспективе автору рекомендуется рассмотреть



возможность применения нестационарных систем слежения за фазой и задержкой ШПС, уделить внимание изучению отражения мешающих сигналов от ионосферы.

**Выводы.** Отмеченные замечания не являются принципиальными. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, содержит новые научные результаты, имеет значение для теории и практики создания помехоустойчивых систем радионавигации. Автор диссертационной работы продемонстрировал высокую квалификацию и опубликовал ряд новых и важных научных результатов.

#### **Общее заключение по диссертации**

Представленная к защите диссертация выполнена на актуальную тему, имеет внутреннее единство и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных лично автором исследований разработаны методы повышения устойчивости к взаимным помехам в радионавигационных системах со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное достижение в области разработки широкополосных систем радионавигации.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 "Положения о порядке присуждения учёных степеней" (постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842) для учёной степени кандидата наук, а её автор Краснов Тимур Валериевич достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Д-р. техн. наук, профессор,

Заведующий кафедрой «Средства связи и

информационная безопасность» ОмГТУ

 /В. А. Майстренко/

Майстренко Василий Андреевич

644050, г. Омск-50, пр. Мира 11, каб. 8-405, 8-412

ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ)

Факс: (3812) 65-26-98

E-mail: info@omgtu.ru

Подпись профессора В. А. Майстренко удостоверяю.

Учёный секретарь университета

«28» января 2016 г.



 /А.Ф. Немцова/