ОТЗЫВ

ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Гарифуллина Вадима Фанисовича «Методы синхронизации в широкополосных радионавигационных системах со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.14 — Радиолокация и радионавигация

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа В. Ф. Гарифуллина посвящена решению актуальной для радионавигации научно-технической задачи синхронизации 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. Особенностью подхода автора к решению поставленной задачи является использование в разрабатываемых системах дальней радионавигации нового поколения спектрально эффективных шумоподобных сигналов (ШПС) с минимальной частотной модуляцией, вопросы теории и практического применения которых в настоящее время мало исследованы.

Проблемы синхронизации являются весьма важными при разработке и эксплуатации систем радионавигации. Успешное их решение определяет основные системные характеристики (точность, помехозащищённость, время развертывания и др.). Поэтому актуальность темы диссертации, посвящённой разработке методов синхронизации в широкополосных радионавигационных системах со спектральноэффективными шумоподобными сигналами, очевидна и не вызывает сомнений.

Цель диссертации и задачи исследования полностью соответствуют решаемой научно-практической задаче, заключающейся в разработке методов синхронизации в широкополосных радионавигационных системах со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами (*MSK*-сигналами).

Основная идея диссертации заключается в том, что, несмотря на ведущую роль спутниковых навигационных систем в навигационном обеспечении воздушных, морских и других потребителей, наземные РНС остаются важным дополнением к спутниковым радионавигационным системам, способствуя улучшению их характеристик при комплексном использовании. 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 форма-

та *MSK-BOC* имеют преимущества перед сигналами с традиционной модуляцией *MSK* в точности измерения задержки, а использование ансамблей из кодовых последовательностей Касами длины 4095 и более обеспечивает возможность временного разделения сигналов без ограничения рабочей зоны PHC. Разработан формат сигналов опорных станций перспективной широкополосной PHC с временным разделением.

В главе 2 разработаны методы и алгоритмы поиска и слежения за задержкой спектрально-эффективных шумоподобных сигналов. Наиболее значимым результатом главы 2 является разработка алгоритма поиска по задержке сигналов, основанного на знаковой аппроксимации опорных квадратурных сигналов. Указанный алгоритм существенно сокращает аппаратурные затраты по сравнению с оптимальным алгоритмом параллельного поиска практически при равных энергетических и временных ограничениях (проигрыш в помехоустойчивости менее 1 дБ).

Дано обоснование перспективности алгоритма поиска по задержке двухкомпонентного шумоподобного сигнала формата *MSK-BOC /MSK*, позволяющего значительно ослабить негативное влияние модуляции данными на эффективность алгоритма поиска.

В главе 3 исследована помехоустойчивость предложенных алгоритмов поиска и слежения за задержкой спектрально-эффективных шумоподобных сигналов. Оценена потенциальная помехоустойчивость предложенных алгоритмов параллельного поиска *MSK*-сигналов. Она характеризуется пороговым отношением сигнал/шум на входе минус 40 дБ, требуемым для достижения значения вероятности ошибки менее 0,001 при времени поиска менее 5секунд. Анализ помехоустойчивости квазиоптимального алгоритма параллельного поиска шумоподобного *MSK*сигнала свидетельствует о том, что он обеспечивает существенные преимущества в реализации незначительно проигрывая оптимальному алгоритму (менее 1 дБ).

K числу основных результатов главы **3** следует отнести то, что при равной тактовой частоте сигнал MSK-BOC (2) обеспечивает в 2 раза меньшую ошибку слежения за задержкой по сравнению с сигналом MSK, что соответствует эквивалентному энергетическому выигрышу 6 дБ.

Проведенный анализ системы слежения за задержкой *MSK*-сигнала позволил определить потенциальные показатели помехоустойчивости и точности при воздействии флуктуационной помехи для типовых условий.

В главе 4 рассматриваются вопросы, связанные с выбором и теоретическим обоснованием предложенных способов синхронизации в наземных широкополосных РНС с шумоподобными сигналами с использованием спутниковых систем навигации. Разработан и исследован способ синхронизации опорных и бортовых станций широкополосных наземных РНС с использованием спутниковых навигационных систем, обеспечивающий сокращение времени синхронизации в три раза по сравнению со способом автономной синхронизации, применяемым в существующих системах.

Показано, что требуемая точность относительной синхронизации временных шкал опорных станций широкополосных РНС не хуже 5нс, может быть достигнута при применении двухчастотной помехозащищенной аппаратуры в режимах кодовых и фазовых измерений с компенсацией тропосферной погрешности.

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. Новый формат спектрально-эффективных сигналов с пилотной и информационной компонентами позволяет значительно ослабить негативное влияние модуляции сигнала данными на системные характеристики.
- 2. Предложенный формат сигналов широкополосной PHC с временным разделением обеспечивает возможность разделения сигналов без ограничения рабочей зоны PHC.
- 3. Разработанный способ поиска по задержке шумоподобных сигналов существенно сокращает аппаратурные затраты по сравнению с известным способом при сохранении минимального времени поиска.
- 4. Разработанный способ синхронизации наземных опорных станций интегрированной радионавигационной системы обеспечивает сокращение времени синхронизации более чем в три раза по сравнению с известным способом автономной синхронизации.

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 ОКР «Спрут», выполнявшейся на АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) и завершившейся изготовлением опытного образца и успешным проведением государственных испытаний.

Диссертация содержит 169 страниц машинописного текста, 48 иллюстраций, список литературы включает 79 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 48 работ, из них 18 – в рецензируемых изданиях по списку ВАК, в которых материалы диссертации отражены достаточно полно.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Замечания:

- 1. Не ясно, чем определяется выбор автором представления MSK-сигнала как сигнала с квадратурной ΦM , а не как частотно-манипулированного сигнала (глава 1).
- 2. В качестве дальномерных кодов для разных опорных станций предлагается использовать последовательности Касами, оптимальные для периодических сигналов (глава 1). Автор не поясняет насколько ухудшаются корреляционные свойства квазипериодических сигналов при временном разделении?
- 3. Непонятно, какой смысл имеет показатель «вероятность ошибки» при анализе алгоритмов поиска сигналов (глава 3), если задача поиска формулируется как задача измерения времени запаздывания?
- 4. Квазиоптимальный алгоритм поиска, основанный на знаковой аппроксимации опорных I и Q видеочастотных сигналов, проигрывает в помехоустойчивости оптимальному алгоритму около 1дБ (глава 3). Что мешает использовать более точную аппроксимацию (например, четырёхуровневую)?
- 5. При поиске сигналов опорных станций на начальном этапе производится обнаружение сигнала мощной станции, что позволяет сократить общее время поиска всех станций (глава 2). Автор не дает объяснения данному результату.
- 6. Для описания разных параметров иногда используются одни и те же обозначения. Так в главе 1 (с. 10) переменная N используются для описания длины частотного кода, а в главе 2 (с. 51) это же обозначение соответствуют длине квадратурных кодовых последовательностей.

Отмеченные замечания не затрагивают сути исследований и принципиально не влияют на их результаты.

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:

Диссертация Гарифуллина Вадима Фанисовича посвящена исследованиям в области создания помехоустойчивых систем радионавигации, соответствует спе-

циальности 05.12.14 — радиолокация и радионавигация, имеет внутреннее единство и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных лично автором исследований разработаны методы синхронизации в широкополосных радионавигационных системах со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное достижение в области 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 Гарифуллин Вадим Фанисович достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Доцент кафедры «САУ» Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева канд. техн .наук, доцент

Сидоров Виктор Геннадьевич

Подпись к.т.н., доцента Сидорова Виктора Геннадьеви за заверяю:

28.04.2016

660037, Красноярский край, г. Красноярск, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31 тел.: 8 (391) 264-00-14 - приемная ректора

факс: 8 (391) 264-47-09 e-mail: info@sibsau.ru