

## ОТЗЫВ

официального оппонента,

кандидата технических наук, доцента Шахтанова Сергея Валентиновича на диссертацию Ширкаева Алексея Владимировича на тему «Разработка и исследование аппаратно-ориентированных алгоритмов измерения параметров широкополосного сигнала в условиях доплеровской деформации», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Диссертационное исследование Ширкаева А.В. посвящено разработке и исследованию эффективных методов измерения временных и частотных параметров широкополосных сигналов в условиях доплеровской деформации. Предложен метод решения ключевой задачи для измерителей с непрерывными сигналами при ограничении диапазона измерений длительностью периода опорного сигнала.

**Актуальность темы исследования.** Актуальность обусловлена рядом факторов. Во-первых, наблюдается постоянный рост требований к точности, быстродействию и энергоэффективности систем обработки сигналов. Во-вторых, наблюдается тенденция к расширению применения широкополосных сигналов с фазовой манипуляцией в различных областях: радиолокации (особенно ближнего действия), гидроакустике, спутниковых навигационных системах, системах мобильной и беспроводной связи. Это обусловлено их известными преимуществами, такими как высокая помехозащищённость, хорошие разрешающие способности и возможность совмещения нескольких систем в одной полосе частот. В-третьих, широкое распространение получили мобильные и портативные устройства, работающие в условиях относительного движения источника и приёмника сигнала, что порождает доплеровские искажения. Эти искажения существенно осложняют процедуры точного измерения параметров сигнала, особенно когда требуется совместное определение временной задержки и доплеровского сдвига. В-четвертых, в условиях текущих геополитических реалий особую значимость приобретает задача импортозамещения и создания отечественной элементной базы для критически важных применений, включая системы локации и связи. Использование взаимных функций корреляции, неопределённости и быстрого преобразования Фурье (БПФ) соответствует современным подходам в обработке сигналов.



Представленная диссертационная работа предлагает новые научно обоснованные решения, сочетающие в себе высокую точность измерений, вычислительную эффективность и практическую реализуемость на современной элементной базе. Автор демонстрирует понимание теоретических основ статистической теории оценивания параметров сигналов, теории функций неопределенности Вудворда, аппарата цифровой обработки дискретных сигналов, методов разработки аппаратно-ориентированных алгоритмов. Математический аппарат исследования включает аналитическое описание функции неопределенности фазокодоманипулированных (ФКМ) сигналов, методы корреляционно-спектрального анализа, алгоритмы адаптивной фильтрации, методы оптимизации вычислительных операций. Автор демонстрирует умение не только разрабатывать алгоритмы, методы и способы цифровой обработки сигналов, но и глубоко продумывать их эффективную аппаратную реализацию с учётом современных требований и ограничений, в том числе в контексте импортозамещения.

**Структура диссертационной работы.** Диссертационная работа Ширкаева А.В. состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, списка использованной литературы, содержит многочисленный графический и расчётный материал, подкреплена патентом на изобретение, актами о внедрение в научно-исследовательскую, опытно-конструкторскую и учебную работу.

Первая глава последовательно раскрывает тему от теоретического анализа взаимной функции неопределенности (ВФН) к лабораторному акустическому эксперименту и далее к численному моделированию влияния эффекта Доплера. Такой подход обеспечивает комплексное рассмотрение проблемы, что позволяет всесторонне оценить влияние эффекта Доплера, получить количественные оценки влияния доплеровской деформации на точность измерения временной задержки и частотного сдвига. Безусловным достоинством является наличие акустического эксперимента (раздел 1.2) и получение конкретных результатов (таблицы 1.1, рис. 1.2-1.5), что демонстрирует связь теории с практикой.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов и аппаратной реализации корреляционного измерителя временной задержки ФКМ-сигналов на базе ПЛИС. Показано что в случае отсутствия влияния эффекта Доплера и небольшого времени на обработку принимаемого ФКМ сигнала на первый план выходят его корреляционные свойства. Особого внимания заслуживает предложенный автором подход к исключению операций умножения за счёт использования бинарной М-



последовательности в структуре коррелятора на ПЛИС, что существенно снижает требования к вычислительным ресурсам для малобюджетных решений. Несомненным достижением является то, что предложенный метод лёг в основу изобретения «Цифровой многоканальный коррелятор фазоманипулированных сигналов».

Третья глава представляет собой логическое продолжение предыдущих исследований и посвящена решению важного практического вопроса — устранению неоднозначности измерения временных задержек, превышающих период опорного сигнала. Предложенные оригинальные методы комбинированного кодирования и прореживания данных демонстрируют высокую эффективность и реализуемость на ПЛИС. Работа имеет выраженную практическую направленность и может быть использована в системах локации, связи и навигации.

Четвертая глава посвящена завершающему этапу исследования — разработке и аппаратно-ориентированной реализации алгоритма совместного измерения временной задержки и частотного сдвига ФКМ-сигналов в условиях доплеровской деформации. Глава логично завершает диссертационное исследование, предлагая метод спектральной обработки усреднённых значений взаимной функции корреляции (ВФК) с использованием оптимизированного БПФ (рис. 4.4, 4.8). Это соответствует заявленной цели диссертации. Глава сочетает глубокий теоретический анализ, численное моделирование и практические аспекты аппаратной реализации на ПЛИС.

**Обоснованность, новизна исследования, полученных результатов и выводов диссертации.** В качестве главных новых результатов, полученных автором, необходимо отметить следующие:

1. Разработан аппаратно-ориентированный алгоритм вычисления взаимной функции корреляции, в котором исключены операции умножения за счёт использования бинарной псевдослучайной последовательностью (ПСП) и специализированной систолической архитектуры коррелятора. Это позволило сократить время вычислений и требуемые ресурсы ПЛИС примерно в 2 раза в соответствии с решаемой задачей по сравнению с традиционными подходами, использующими аппаратные умножители в аналогичных условиях. Данный результат имеет фундаментальное значение для создания экономичных и высокопроизводительных систем обработки сигналов.



2. Предложен метод расширения диапазона однозначности измерения временной задержки на основе комбинированного правила кодирования с использованием короткопериодных и длиннопериодных ПСП. Метод позволяет эффективно устранять неоднозначность измерений для квазинепрерывных сигналов без пропорционального увеличения аппаратных затрат. Особенностью метода является использование прореживания при обработке длиннопериодной ПСП, что обеспечивает значительную экономию ресурсов.

3. Предложен корреляционно-спектральный алгоритм совместного измерения временного и частотного сдвигов, основанный на спектральном анализе БПФ усреднённых значений ВФК. Алгоритм обеспечивает снижение вычислительной сложности и сохраняет работоспособность в условиях значительных доплеровских искажений. Предложенный подход позволяет преодолеть ограничения традиционных корреляционных методов в условиях большой доплеровской деформации.

4. Разработана и исследована эффективная аппаратная реализация БПФ с минимизацией использования операций умножения (замена на сдвиги, двухбитные поворачивающиеся коэффициенты), показавшая конкурентоспособность по отношению к коммерческим IP-ядрам. Реализация позволяет снизить требуемые ресурсы ПЛИС на 30-60% в зависимости от конкретной операции умножения, что особенно важно при использовании малобюджетных или отечественных ПЛИС.

#### **Практическая значимость для науки полученных результатов:**

1. Предложенный алгоритм оценки частотно-временных параметров, учитывает особенности архитектуры ПЛИС и позволяет проектировать радиотехнические системы с жёстко ограниченными вычислительными ресурсами.

2. Запатентованное устройство может быть использовано при разработке систем обработки широкополосных псевдослучайных сигналов в радиолокационных приёмных устройствах и устройствах измерительной техники в реальном масштабе времени.

3. Предложенный алгоритм измерения временных задержек может быть использован в системах ближней локации при снижении количества используемых вычислительных ресурсов.

#### **Оценка содержания диссертации, ее завершённости в целом, замечания по оформлению:**

1. В работе не приведены графики рабочих характеристик зависимости вероятности правильного измерения или ошибки от отношения сигнал/шум, а



также количественное сравнение потерь предлагаемых алгоритмов по отношению к теоретическим пределам (например, границе Крамера-Рао) или к известным оптимальным алгоритмам.

2. Не указана зависимость результатов акустического эксперимента эффекта Доплера от температуры среды и скорости звука (стр. 18 автореферата, стр. 67 диссертации).

3. При проведении эксперимента не рассмотрена возможность повышения эффективности методов оценки доплеровской деформации в многопозиционных системах с разнесённым приёмом в условиях положительного и отрицательного сдвига частот (раздел 1.2 диссертации).

4. Не приведена характеристика оценки помехозащищённости сигнала (стр. 18 автореферата, стр. 98-101 диссертации).

5. В тексте автореферата и диссертации имеют место ряд орфографических, стилистических и редакционных ошибок, затрудняющих чтение материала. К недостаткам оформления относятся: автореферат, подпись под рисунком 7, страница 15 полностью не читается; диссертация, в заголовках таблиц отсутствует их название (таблицы 2.1, 2.2, 3.2, 4.2, 4.3); стр. 43, формула 2.5 и стр. 98, формула 4.1 нет пояснения символов  $K_n(\theta)$  и  $K_n$ ; стр. 48, формула 2.6 в тексте указана алгоритмом, хотя им не является.

Указанные замечания не снижают научной, теоретической и практической ценности работы, носят локальный, большей частью редакционный характер и не изменяют общей положительной оценки полученных научных результатов актуального и важного исследования.

**Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати.** Работа обладает высокой степенью апробации: 5 статей в журналах ВАК, из них 2 публикации в журналах Scopus, патент на изобретение, а также опубликованные доклады в сборниках научно-технических конференций, в том числе международного и всероссийского уровня.

Содержание автореферата в целом соответствует основным положениям диссертации и отражает цель, задачи и результаты исследования.

**Общая оценка диссертационной работы.** Диссертация представляет собой выполненную самостоятельно завершённую научно-квалификационную работу, посвящённую решению актуальной научной задачи.



Следует отметить целостность построения диссертационной работы. Автор свободно владеет современным математическим аппаратом и методами моделирования. Математический аппарат соответствует решаемым задачам, и используется корректно. Стил ь изложения ясный, лаконичный, литературный. В тексте достаточно ссылок на использованные литературные источники. Рукопись аккуратно оформлена с соблюдением всех требований к оформлению материалов, представляемых в печать.

#### **Рекомендации по дальнейшим исследованиям:**

##### **1. Теоретические направления:**

- Исследование асимптотических свойств предложенных оценок,
- Для более полного подтверждения эффективности методов желательно расширить условия экспериментов (оценка объектов в динамике на увеличенных расстояниях, оценка помехоустойчивости при различных типах помех).

##### **2. Прикладные аспекты:**

- Адаптация методов для ММО-систем,
- Исследование в условиях не гауссовской модели помех,
- Разработка версий для отечественных ПЛИС.

#### **Заключение**

Диссертация Ширкаева Алексея Владимировича на тему «Разработка и исследование аппаратно-ориентированных алгоритмов измерения параметров широкополосного сигнала в условиях доплеровской деформации» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, разработаны теоретические положения. Приведено новое решение актуальной научной задачи - разработка и исследование эффективных методов измерения временных и частотных параметров широкополосных сигналов в условиях доплеровской деформации. Предложен эффективный метод решения ключевой задачи корреляционных измерителей с непрерывными сигналами — ограничение однозначного диапазона измерения длительностью периода опорного сигнала. Результаты работы апробированы на различных конференциях, в том числе международного уровня.

По своей актуальности, новизне, научно-практической значимости, диссертация Ширкаева Алексея Владимировича на тему «Разработка и исследование аппаратно-ориентированных алгоритмов измерения параметров широкополосного сигнала в условиях доплеровской деформации», соответствует

требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, согласно требованиям п.п. 9 – 11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а её автор, Ширкаев Алексей Владимирович, достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

доцент кафедры  
«Инфокоммуникационные  
технологии и системы связи»  
ГБОУ ВО НГИЭУ  
к.т.н., доцент



Шахтанов Сергей Валентинович

« 18 » ноября 2025 г.

Подпись Шахтанова С.В. заверяю:

Проректор по научной работе ГБОУ ВО НГИЭУ



Ганин Д.В.

Сведения об оппоненте:

Шахтанов Сергей Валентинович, гражданин Российской Федерации, кандидат технических наук (научная специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций), доцент, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы», государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ГБОУ ВО НГИЭУ.

Адрес: 606340, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22А корпус 2, деканат

Телефон: +7 (831-66) 4-16-51

E-mail: r155p@bk.ru