

Председателю  
диссертационного совета  
Д 212.125.03 на базе  
«Московского авиационного  
института (национального  
исследовательского  
университета)»  
Д.т.н., профессору  
Ю.В. Кузнецову  
Волоколамское шоссе, д.4, А-80,  
ГСП - 3, г. Москва, 125993

Дата 27.11.2020 № Исход. 3043/01/20  
На № 420-10-111 От 09.11.2020

Об отзыве ведущей организации АО РТИ  
на диссертацию

Уважаемый Юрий Владимирович!

Высылаю Вам отзыв ведущей организации Акционерного общества «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» на диссертационную работу Сапронова Д.И. «Совместное оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах с использованием дискретно-кодированных по частоте сигналов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация.

Приложение: Отзыв, 2 экз., на 6 л. каждый.

*в 2 экземплярах,*

Генеральный директор



К.В.Макаров

Исп. Буханец Д.И. dbukhanets@rti-mints.ru, 2096

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

№ 12 2020г.

*Исх.*

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

АО «Радиотехнический институт имени

академика А.Л. Минца»

доктор военных наук, профессор

  
«*К.В. Макаров*» 2020 г.

К.В. Макаров

## ОТЗЫВ

Ведущей организации АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» на диссертационную работу Сапронова Данила Игоревича «Совместное оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах с использованием дискретно-кодированных по частоте сигналов», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация.

### Актуальность темы диссертационной работы

Современная тенденция на миниатюризацию радиотехнической базы способствует активному развитию малогабаритных радиоуправляемых объектов, таких как беспилотные летательные аппараты, способные совершать разведывательную и ударную деятельность, оставаясь малозаметными для классических радиолокационных станций, обладающих разрешающей способностью порядка единиц метров. Для успешного обнаружения и дальнейшего распознавания таких объектов в радиолокационных станциях необходимо переходить на сигналы, обладающие высокой разрешающей способностью, то есть, с широкой эффективной полосой частот спектра сигнала. Диссертационная работа Сапронова Данила Игоревича посвящена исследованию метода синтезирования и обработки радиосигналов в сверхширокой полосе частот, позволяющего производить высокоточное оценивание дальности и скорости малогабаритных объектов. Тема работы является **актуальной**, так как автор рассматривает способ синтезирования и обработки многочастотных сигналов, позволяющий оперировать с малоизученными на данный момент

многочастотными сигналами с неравномерной частотно-временной матрицей. Сапронов Д.И. приводит аналитическую модель функции неопределённости таких сигналов, исследует зависимость её характеристик от частотно-временных параметров сигнала, таких как код частоты и неравномерность шага по частоте, предлагает структурную схему радиолокационной системы, а также цифровую двумерную функцию сжатия сигналов на выходе аналого-цифровых преобразователей системы. В итоге, автором разработан макет радиолокационной системы с использованием сверхширокополосных дискретно-кодированных по частоте сигналов, получены экспериментальные данные и произведён их анализ с вычислением точностных характеристик предлагаемого способа оценивания дальности и скорости цели.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и пяти приложений.

**Во введении** автор проводит обзор открытых российских и зарубежных источников анализирует различные типы сверхширокополосных сигналов и обосновывает выбор многочастотных сигналов в качестве темы исследований, а также приводит открытые вопросы в направлении обработки данных сигналов. Таким образом, автор подтверждает актуальность темы диссертационной работы, формулирует цели и основные задачи исследований, и даёт общую характеристику работы.

**В первой главе** Сапронов Д.И. на основании выражения функции неопределённости сверхширокополосных сигналов общего вида аналитически выводит частное выражение функции неопределённости сверхширокополосных дискретно-кодированных по частоте сигналов с учётом введённых ограничений по дальности и скорости цели. Используя полученное выражение автор анализирует зависимость разрешающей способности по дальности, интервала однозначного оценивания дальности от таких параметров сигнала, как шаг по частоте и количество дискретов, а также зависимость разрешающей способности по скорости от частотно-временной матрицы сигнала.

**Во второй главе** диссертационной работы с помощью компьютерного моделирования полученного в первой главе функции неопределённости сверхширокополосных дискретно-кодированных по частоте сигналов производится анализ зависимости уровня боковых лепестков данной функции от размерности сигнала  $N$  с псевдослучайным кодом частоты. Аппроксимированием данных, полученных в результате моделирования, показывается аналитическая зависимость уровня боковых лепестков обратно пропорциональная кубическому корню из размерности сигнала  $N$ . Кроме того, проводится анализ изменения формы трёхмерного тела

функции неопределённости СШП ДКЧС при переходе к сетке частот с неравномерным псевдослучайным шагом по частоте и доказывається, что в таком случае интервал однозначного оценивания дальности увеличивается в  $N$  раз, а уровень боковых лепестков в сечении по дальности становится обратно пропорционален корню квадратному из  $N$ .

**В третьей главе** предлагается структурная схема приёмо-передающей части радиолокационной системы для использования СШП ДКЧС с неравномерной частотно-временной матрицей сигнала. Для предложенной структурной схемы автор выводится выражение сигнала на входе аналого-цифровых преобразователей приёмника и приводится двумерная цифровая функция сжатия таких сигналов, позволяющая производить совместное оценивание дальности и скорости цели по одному СШП ДКЧС. Полученная двумерная цифровая функция сжатия учитывает неравномерность частотно-временной матрицы сигнала, а также содержит калибровочные коэффициенты, компенсирующие неравномерность комплексно-частотной характеристики приёмо-передающего тракта. Также автор приводит алгоритм калибровки радиолокационных систем для получения данных коэффициентов по записанному сигналу от опорного отражателя. По результатам третьей главы автор спроектирован макет РЛС, функциональная схема которого приведена в приложении А.

**В четвёртой главе** диссертационной работы приводится описание экспериментальной установки с алюминиевым маятником для испытаний разработанного макета РЛС, а также приводятся уравнения теоретических законов изменения мгновенной дальности и скорости маятника при раскачивании в плоскости нормали к РЛС. После проведения серии экспериментов автор приводит статистические характеристики ошибки оценивания скорости маятника. Из сравнения среднеквадратическое отклонение ошибки оценивания скорости с использованием двумерной цифровой функции сжатия и с использованием классического метода обработки, основанного на вычислении сдвига по дальности за период зондирования сигнала видно, что предложенный способ оценивания скорости позволяет увеличить точность оценивания мгновенного значения скорости не хуже, чем в 2 раза при одинаковой точности оценки по дальности. Применение псевдослучайного кодирования по частоте позволило дополнительно увеличить точность оценивания скорости не хуже, чем в 1,5 раза.

**В Заключении** приведен перечень основных результатов работы и выводов.

**В Приложениях** представлена функциональная схема макета РЛС, разработанного для апробации метода совместного оценивания дальности и скорости, а также скрипты программ на языке MATLAB для компьютерного

моделирования функции неопределённости СШП ДКЧС, двумерной цифровой функции сжатия СШП ДКЧС и для вычислений и анализа мгновенной радиальной скорости маятника.

**Научная новизна** диссертации характеризуется следующими результатами, полученными в работе:

– получено аналитическое выражение функции неопределённости сверхширокополосных дискретно-кодированных по частоте сигналов с неравномерной частотно-временной матрицей;

– с помощью полученного выражения функции неопределённости СШП ДКЧС показана зависимость уровня боковых лепестков (УБЛ) ФН от количества дискретов  $N$  (пропорциональная  $N(-1/3)$ ) при равномерной сетке частот и зависимость УБЛ сечения ФН по дальности от  $N$  (пропорциональная  $N(-1/2)$ ) при неравномерном псевдослучайном изменении шага по частоте;

– показано отсутствие преимуществ сигналов Костаса по сравнению с другими псевдослучайными кодами частоты для получения кнопочной формы функции неопределённости СШП ДКЧС;

– предложено выражение двумерной цифровой функции сжатия, позволяющее реализовать метод совместного оценивания дальности и скорости в РЛС с использованием СШП ДКЧС с неравномерной частотно-временной матрицей, и учитывающее цифровые калибровочные коэффициенты, компенсирующие неравномерности в комплексной частотной характеристике приёмо-передающего тракта РЛС.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что результаты теоретических исследований реализованы в практических разработках, разработан макет РЛС, с использованием СШП ДКЧС, произведены его испытания и получены характеристики оценивания скорости цели, подтверждающие эффективность предлагаемого метода. Имеется акт внедрения результатов исследований в разработки АО «Радий ТН».

**Достоверность** результатов работы обеспечивается физически обоснованной аналитической моделью приёмопередающего тракта РЛС с использованием СШП ДКЧС; численном сравнении значений полученного выражения функций неопределённости со значениями функции неопределённости в общем виде; согласованностью с положениями теории сигналов, теории СШП РЛС и устройств СВЧ; сравнением полученных экспериментальных данных с теоретически рассчитанными, ожидаемыми данными от подвижной цели.

Результаты работы достаточно полно **представлены** на нескольких международных конференциях и **опубликованы** в 9 работах, среди которых 2 статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК, 2 статьи в журналах,

индексируемых международной научной базой Scopus, а также 5 работ в трудах международных научно-технических конференций

Результаты и выводы диссертации можно рекомендовать к использованию и развитию в организациях, занимающихся разработкой радиолокационных систем, таких как АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», АО «Концерн радиостроения «Вега», АО «НИИ приборостроения имени В.В. Тихомирова» и ПАО «НПО «Алмаз».

По представленной работе имеются следующие **замечания**:

1. Не показано сравнение результатов моделирования выражений функции неопределённости СШП сигналов общего вида и, полученного в первой главе, частного выражения функции неопределённости СШП дискретно-кодированных по частоте сигналов.

2. Не приведены промежуточные результаты компьютерного моделирования сечения функции неопределённости при нулевой дальности для получения зависимости разрешающей способности по скорости от частотно-временной матрицы сигнала.

3. Не исследованы СШП дискретно-кодированные по частоте сигналы с промежутками в сетке частот.

4. На разработанном макете РЛС не произведены испытания для СШП ДКЧС с сеткой частот с псевдослучайным изменением шага по частоте.

5. Допущена некоторая невнимательность при написании и небрежность в оформлении работы.

Недостатки, отмеченные в замечаниях выше, не снижают научной и практической значимости основных результатов, полученных автором и поэтому не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Выводы**

1. Диссертация Сапронова Д.И. является законченной самостоятельной квалификационной работой, посвященной решению актуальной прикладной научной задачи – улучшению характеристик совмещенных на одной апертуре антенных систем комплексированных с частотно-селективными структурами.

2. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

3. Диссертационная работа «Совместное оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах с использованием дискретно-кодированных по частоте сигналов» полностью соответствует требованиям пп. 9 и 10 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Сапронов Данил Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.14 - Радиолокация и радионавигация.

Отзыв ведущей организации по диссертации Сапронова Д.И. был обсужден и одобрен на заседании секции № 1 Научно-технического совета АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» 23 ноября 2020 г., протокол № 19.

Отзыв составили:

Начальник комплексного отдела – заместитель генерального конструктора АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», доктор технических наук, профессор

« 24 » 11 2020 г.

 Тимошенко Александр Васильевич

Ученый секретарь – начальник отдела отдела АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», доктор технических наук

« 24 » ноября 2020 г.

 Буханец Дмитрий Иванович