

На правах рукописи



**ЧИНЬ Нгок Хиеу**

**АЛГОРИТМЫ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ  
ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ С ПЕРЕМЕННЫМ  
ПЕРИОДОМ ПОВТОРЕНИЯ НА ФОНЕ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ**

Специальности:

2.2.13. Радиотехника,  
в том числе системы и устройства телевидения

2.2.16. Радиолокация и радионавигация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2025

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

**Научный руководитель:**

**Кошелев Виталий Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой радиотехнических систем ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань.

**Официальные оппоненты:**

**Токарев Антон Борисович,**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиотехники» Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж;

**Савостьянов Владимир Юрьевич,**  
доктор технических наук, начальник лаборатории открытого акционерного общества «Корпорация «Фазотрон-НИИР», г. Москва.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Защита состоится «20» февраля 2026 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» или на сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент

Г.В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Радиотехнические системы (РТС) используются в различных областях науки и техники, играя важную роль в гражданских и специальных приложениях, таких как телекоммуникации, радиосвязь, радиолокация, радионавигация и др. Одной из важнейших их подсистем является система первичной межпериодной обработки периодических импульсных сигналов, решающая задачи обработки и измерения параметров сигналов на фоне помех. Параметры эффективности РТС сильно зависят от интенсивности некоррелированных и коррелированных помех.

Улучшение таких показателей РТС, как энергетический выигрыш в отношении полезного сигнала и помех, среднеквадратические ошибки оценки параметров сигнала в радиолокации, связанные с вероятностью правильного его обнаружения, является актуальной задачей. Ее решение достигается использованием методов цифровой обработки сигналов. Одним из эффективных способов построения подсистем обработки сигналов (ПОС) является применение многоканальных частотных фильтров (МЧФ), выделившихся в самостоятельный класс цифровых устройств, известных как доплеровские процессоры сигналов (ДПС). Проектирование ДПС во многом зависит от решаемой задачи и часто требует значительных вычислительных ресурсов. Основная сложность заключается в выборе алгоритма спектрального преобразования, а также в оптимизации предварительной весовой обработки принимаемого импульсного сигнала. Эти этапы, например в радиолокации, критически важны для обеспечения максимальной дальности обнаружения объектов и высокой точности оценки параметров их движения.

В радиотехнических задачах когерентные пачки импульсов применяются для эффективного накопления сигналов при действии шумов и помех и оценки модулирующей частоты сигнала. На эффективность накопления периодических сигналов влияет степень их корреляции, а также их структурные особенности, в частности неравномерность межимпульсных интервалов. Такие неэквидистантные последовательности импульсов (НПИ) часто используются в радиотехнических задачах, например в системах передачи информации с времяимпульсной модуляцией, радиолокации, для устранения эффектов слепых скоростей и слепых дальностей, а также расширения зоны однозначного измерения частот модулированных сигналов.

Одним из способов повышения эффективности МЧФ является модифицирование обычно используемого в МЧФ алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Целесообразно использование максимума энергетического критерия или максимума критерия вероятности правильного обнаружения. Важным является снижение погрешности оценки модулирующей частоты сигналов с неэквидистантным периодом следования импульсов. Решение этих задач представлено в диссертационной работе и подтверждено реализацией полученных алгоритмов на аппаратном уровне с помощью программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

**Степень проработанности темы.** Существенный вклад в развитие теории обнаружения сигналов и оценку их параметров был внесен отечественными и зарубежными исследователями, это работы Вайнштейна Л.А., Зубакова В.Д., Тартаковского Г.П., Репина В.Г., Ван Триса Г., Миддлтона Д., Бакута П.А., Ширмана Я.Д., Манжоса В.Н., Тихонова В.И., Бакулева П.А., Скольника М., Сосулина Ю.Г. Оптимизация весовых функций и проектирование доплеровских фильтров когерентного накопления проводились исследователями Рабинером Б., Гоулдом Л., Хэррисом Ф.Дж., Свердликом М.Б., Барановым П.Е., Кошелевым В.И., Поповым Д.И., Лихаревым В.А., Лифановым Е.И. Вопросы фильтрации когерентной пачки импульсов с неэквидистантным периодом следования рассматривались в работах Мураками Т., Джонсона Р.С., Леванона Н., Мозесона Э., Ричардса М. А., Испира М., Кандана К., Бланта С. Д., Чанга Р. Дж., Кошелева В.И., Горкина В.Н., Кострова В. В., Богатова А.Д., Букварева Е.А., Рябкова А.П. и других исследователей.

**Цель диссертации.** Разработка алгоритмов многоканальной обработки когерентной последовательности импульсов с переменной частотой повторения импульсов, обеспечивающих повышение эффективности многоканальной фильтрации подсистемы первичной обработки и снижение погрешности оценки модулирующей частоты сигнала, а также реализацию модифицированных алгоритмов БПФ на ПЛИС.

**Объектом исследования** является многоканальный фильтр в подсистеме первичной обработки сигналов.

**Предметом исследования** являются алгоритмы функционирования (структура вычислений) многоканального частотного (доплеровского) фильтра на основе преобразования Фурье неэквидистантной последовательности отсчетов.

**Задачи диссертации.** Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи.

1. Обоснован выбор критериев оценки эффективности многоканальной доплеровской фильтрации и разработана структура алгоритмов функционирования процессоров многоканальной фильтрации НПИ.
2. Сформированы модели сигналов и помех и определены их корреляционные матрицы с учетом неэквидистантных периодов следования импульсов (вобуляции) и модулирующего (доплеровского сдвига) частоты.
3. Разработаны методы и алгоритмы оценки модулирующей частоты сигнала с НПИ, а также проанализированы погрешности различных методов оценки модулирующей частоты.
4. Разработана архитектура алгоритмов функционирования многоканального фильтра НПИ на ПЛИС и получены экспериментальные оценки времени и максимальной частоты обработки, необходимых ресурсов для синтеза двух вариантов структур алгоритмов вычислений.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использован современный инструментарий математического анализа, линейной алгебры, математического и имитационного моделирования, цифровой обработки сигналов, теории оценивания и математической статистики, теории обнаружения сигналов и цифровой схемотехники. Выполнены проектирование и реализация алгоритмов на современной отладочной платформе ПЛИС.

### **Научная новизна**

1. Алгоритмы спектральной обработки сигналов с неэквидистантным периодом следования импульсов на фоне шумов отличаются от известных алгоритмов, основанных на классическом БПФ, оптимизацией их фазовой структуры в соответствии с параметрами изменения периода повторения импульсов. *(Соответствует п. 5 специальности 2.2.13 Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки).*

2. Алгоритмы спектральной обработки сигналов с неэквидистантным периодом следования импульсов на фоне узкополосных помех отличаются от известных структур, основанных на классическом БПФ, оптимизацией их амплитудно-фазовой структуры в соответствии с корреляционными матрицами сигнала с переменным периодом повторения импульсов. *(Соответствует п.6 специальности 2.2.13 Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, включая системы телевидения и передачи информации, при наличии помех с целью повышения помехоустойчивости).*

3. Алгоритмы извлечения уточненной оценки скорости цели по результатам вычисления модулирующей доплеровской частоты сигналов с неэквидистантным периодом следования импульсов основаны на максимизации функции правдоподобия и модифицированной версии алгоритма БПФ, учитывающие параметры изменения периода повторения импульсов. *(Соответствует п. 13 специальности 2.2.16 Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов и извлечения из них информации при воздействии помех).*

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Модифицированный алгоритм быстрого преобразования Фурье с оптимизацией его фазовой структуры в соответствии с параметрами изменения периода повторения импульсов обеспечивает увеличение среднего энергетического выигрыша в отношении сигнал-шум на 1,6 дБ при обработке неэквидистантной последовательности импульсов на фоне белого шума по сравнению с многоканальным фильтром на основе классического алгоритма БПФ. *(Соответствует п. 5 специальности 2.2.13 Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и ин-*

*формации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки).*

2. Комбинация классического и модифицированного алгоритмов БПФ с оптимизацией его амплитудно-фазовой структуры в соответствии с корреляционными свойствами сигнала с переменным периодом повторения импульсов обеспечивает повышение средней вероятности правильного обнаружения сигнала на 5 % при обработке неэквидистантной последовательности импульсов на фоне узкополосной помехи и белого шума по сравнению с многоканальным фильтром на основе классического алгоритма БПФ. (Соответствует **п.6 специальности 2.2.13 Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, включая системы телевидения и передачи информации, при наличии помех с целью повышения помехоустойчивости** и **п. 13 специальности 2.2.16 Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов и извлечения из них информации при воздействии помех**).

3. Алгоритм извлечения уточненной оценки скорости цели, основанный на максимизации функции правдоподобия, учитывающий параметры вобуляции периода повторения импульсов сигнала, обеспечивает уменьшение средней относительной погрешности оценки частоты Доплера на 38 % по сравнению с многоканальным фильтром на основе классического алгоритма БПФ. (Соответствует **п. 13 специальности 2.2.16 Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов и извлечения из них информации при воздействии помех**).

**Достоверность полученных результатов** основывается на использовании апробированных математических моделей корреляционных матриц сигнала и помехи, критериев синтеза и анализа алгоритмов в соответствии с классическими статистическими методами и корректностью проведенных математических преобразований. Достоверность подтверждена работоспособностью алгоритмов, реализованных с помощью компьютерного моделирования, а также их реализацией на физическом уровне (на ПЛИС).

**Практическая значимость.** Разработанные алгоритмы БПФ и его архитектуры реализуются в реальном аппаратном устройстве, при этом практически доказано повышение эффективности многоканальной фильтрации в подсистеме ПОС, выраженной в увеличении среднего выигрыша в отношении сигнал-шум и сигнал-(помеха+шум) и уменьшении погрешности оценки модулирующей частоты пачки импульсов с неэквидистантным периодом следования импульсов.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертации внедрены в АО «Торговля и развитие электронных технологий E-STARs» (Социалистическая Республика Вьетнам) и в РГРТУ им. В.Ф. Уткина при изучении дисциплины "Методы спектрального анализа сигналов" магистрантами направ-

ления "Радиотехника" 11.04.01 (разработаны методические указания, лабораторный макет и программное обеспечение к нему).

**Личное участие автора.** Личный вклад автора состоит в выполнении основных разделов теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию предложенных алгоритмов, подготовку публикаций, компьютерное моделирование работы модифицированных алгоритмов БПФ, проектирование и реализацию архитектуры алгоритмов модифицированного БПФ на ПЛИС, а также выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Результаты исследований, составляющих основное содержание диссертации, докладывались на 5 международных и одной всероссийской научно-технических конференциях:

1. VI Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023» (г. Рязань, 01–03 марта 2023 г.);
2. VII Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024» (г. Рязань, 04–06 марта 2024 г.);
3. XX Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 20–22 ноября 2024 г.);
4. VIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» «Радиоинфоком-2024» (г. Москва, 18–22 ноября 2024 г.);
5. XXIX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, 28 ноября 2024 г.);
6. XXVII Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2025» (г. Москва, 26–28 марта 2025 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК к опубликованию основных научных результатов по профилю защищаемой диссертации, один научный доклад, опубликованный в зарубежном журнале, входящем в базу цитирования Scopus, 5 публикаций, индексируемых в РИНЦ, 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и одна учебно-методическая работа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, приложений и списка литературы. Материал изложен на 145 страницах, включает 49 рисунков и 20 таблиц, а также 3 приложения. Список использованной литературы содержит 145 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна, описана практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения о внед-

рении результатов, апробации работы и публикациях, а также описаны структура и объем диссертации.

**В первой главе** приведены исследование архитектуры процессоров и их амплитудно-частотные характеристики, оптимизированные по критериям средней вероятности правильного обнаружения сигналов с неизвестной частотой и среднего по всем частотным каналам коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум).

Классическое  $N$ -точечное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) последовательности  $\{x_n\}$  можно представить как:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n} W_N^{2nk} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n+1} W_N^{(2n+1)k}, \quad (1)$$

$$W_N = \exp(-j2\pi/N).$$

Для последовательности  $\{x_n\}$  с двумя периодами повторения импульсов алгоритм (1) был модифицирован путем введения корректирующего фазового сдвига, вызванного переменным периодом следования. В результате модифицированное  $N$ -точечное ДПФ последовательности  $\{x_n\}$  вычисляется путем умножения на дополнительный множитель на последнем этапе вычислений. При этом модифицированный алгоритм ДПФ представлен следующим выражением:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n} W_N^{2nk} + e^{j2\pi kv \frac{N}{2}} \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n+1} W_N^{(2n+1)k}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$

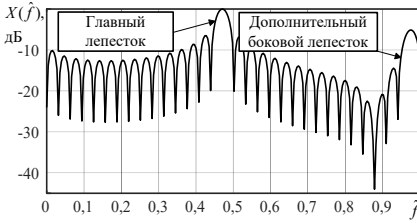
где  $v = \Delta T/T_0$  – степень вобуляции периода повторения импульсов (СВП-ПИ),  $\Delta T = T_0 - T_1$  – сдвиг между четными и нечетными отсчетами,  $T_0 = (T_1 + T_2)/2$  – средний период следования,  $T_1$  и  $T_2$  – различные периоды следования.

На заключительном этапе модифицированного алгоритма БПФ коэффициент вращения модифицируется введением дополнительного умножения:

$$\begin{cases} W_{v,N}^k = e^{j2\pi v \frac{k}{N}} W_N^k = e^{-j2\pi \frac{k}{N}(1-v)}, \quad k = 0, 1, \dots, N/2-1, \\ W_{v,N}^{k+\frac{N}{2}} = e^{-j2\pi \frac{k+\frac{N}{2}}{N}(1-v)} = -W_{v,N}^k \cdot e^{j\pi v}, \quad k = 0, 1, \dots, N/2-1. \end{cases}$$

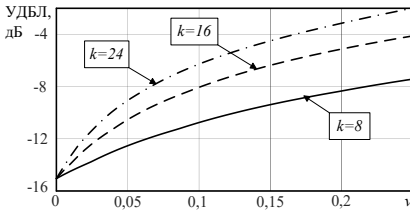
Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) доплеровского фильтра при применении модифицированного алгоритма БПФ для обработки сигнала с двухпериодной вобуляцией периода повторения импульсов (ДВП-ПИ) представлена на рис. 1. Важно отметить, что при использовании модифицированного алгоритма БПФ в частотной области возникает дополнительный боковой лепесток (ДБЛ), которого нет у классического БПФ.





**Рисунок 1 – АЧХ доплеровского фильтра при обработке сигнала с ДВПИ**

$\exp(j2\pi kv/N)$ . Кроме того, с увеличением номера канала значение УДБЛ возрастает. Увеличение УДБЛ оказывает влияние на эффективность подавления узкополосных помех, что рассматривается в разделе диссертации, посвященном оценке эффективности многоканальной фильтрации.



**Рисунок 2 – Зависимость УДБЛ в различных частотных каналах от СВППИ**

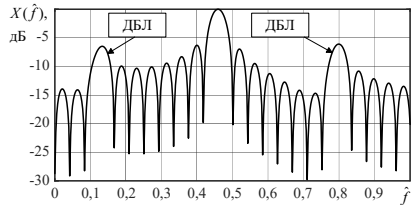
$$X_k = \sum_{n=0}^{\frac{N}{3}-1} x_{3n} W_N^{3nk} + e^{\frac{j2\pi k\alpha}{N}} W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{3}-1} x_{3n+1} W_N^{3nk} + e^{\frac{j2\pi k\beta}{N}} W_N^{2k} \sum_{n=0}^{\frac{N}{3}-1} x_{3n+2} W_N^{3nk},$$

где  $\alpha = (T_0 - T_1)/T_0$  и  $\beta = (2T_0 - T_1 - T_2)/T_0$  характеризуют СВППИ сигнала,  $T_0 = (T_1 + T_2 + T_3)/3$  – средний период повторения импульсов,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – различные периоды.

При этом АЧХ доплеровского фильтра представлена на рис. 3. Чем больше количество различных периодов повторения, тем больше дополнительных боковых лепестков, что приводит к уменьшению

На рис. 2 представлена зависимость уровня дополнительного бокового лепестка (УДБЛ) от СВППИ в различных каналах многоканальной фильтрации при количестве каналов  $N = 32$ . Из рис. 2 видно, что с увеличением степени возбуждения периода повторения импульсов УДБЛ возрастает, что математически связано с дополнительным умножением на комплексный множитель –

Модифицированный алгоритм ДПФ при трехпериодной возбуждении периода повторения импульсов (ТВППИ) для последовательности  $\{x_n\}$  аналогично определяется компенсированием фазового смещения каждой подпоследовательности путем соответствующих фазовых сдвигов. Выражение для вычисления значения отсчета на выходе  $k$ -го частотного канала МЧФ имеет вид:



**Рисунок 3 – АЧХ доплеровского фильтра при обработке сигнала с ТВППИ**

эффективности подавления помех. Также возрастает сложность структуры алгоритма. В связи с этим в рассмотрении ограничимся тремя различными периодами повторения импульсов.

**Во второй главе** представлена оценка эффективности различных БПФ-процессоров в условиях белого гауссовского шума и узкополосной помехи. Выполнен сравнительный анализ погрешностей оценки модулирующей частоты сигнала с переменным периодом следования при применении различных алгоритмов, и сформулированы выводы.

Эффективность многоканальной фильтрации определяется критериями среднего коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум) и средней вероятности правильного обнаружения сигнала с усреднением по всем доплеровским каналам, которые соответственно представлены:

$$\bar{\mu}(\mathbf{w}) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\Delta\psi_i} \int_{\psi_i - \frac{\Delta\psi_i}{2}}^{\psi_i + \frac{\Delta\psi_i}{2}} \left( \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w} (1 + \lambda)}{\mathbf{w}^H (\mathbf{R}_c + \lambda \mathbf{E}) \mathbf{w}} \right) d\varphi_s \rightarrow \max_{\mathbf{w}},$$

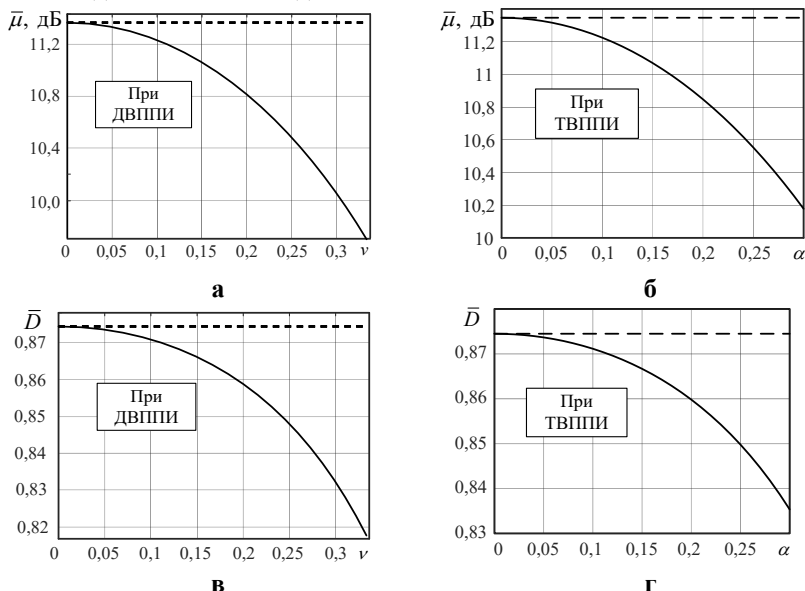
$$\bar{D}(\mathbf{w}) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\Delta\psi_i} \int_{\psi_i - \frac{\Delta\psi_i}{2}}^{\psi_i + \frac{\Delta\psi_i}{2}} \exp \left( \frac{\ln(F) \mathbf{w}^H (\mathbf{R}_c + \lambda \mathbf{E}) \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H (\mathbf{R}_c + \lambda \mathbf{E}) \mathbf{w} + Q \mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w} (1 + \lambda)} \right) d\varphi_s \rightarrow \max_{\mathbf{w}},$$

где  $\mathbf{w}$  и  $\mathbf{w}^H$  – вектор импульсной характеристики доплеровского фильтра и его эрмитово сопряженный вектор,  $\varphi_s$  – доплеровский фазовый сдвиг,  $\psi_i$  и  $\Delta\psi_i$  – центральная частотная и предел  $i$ -го доплеровского канала,  $N$  – количество каналов,  $F$  – вероятность ложной тревоги,  $Q$  – входное отношение сигнал-шум,  $\lambda$  – отношение шум-помеха,  $\mathbf{R}_c$  – нормированная корреляционная матрица помехи,  $\mathbf{R}_s$  – нормированная корреляционная матрица сигнала,  $\mathbf{E}$  – единичная матрица.

Для исследования эффективности многоканального доплеровского фильтра на фоне белого шума используются нормированные корреляционные матрицы сигналов с элементами, модифицированными СВППИ. При этом используются следующие параметры многоканального фильтра (МФ) и сигнала:  $N = 16$ ,  $F = 10^{-8}$ ,  $Q = 10$  дБ и относительный спектр сигнала –  $\Delta F_s = 0,01$ . Для упрощения предположим, что  $\alpha = \beta$ .

На рис. 4 приведены зависимости среднего коэффициента улучшения и средней вероятности правильного обнаружения сигнала от параметров СВППИ при обработке сигналов с ДВПИ и ТВППИ, где пунктирная линия соответствует модифицированному алгоритму, а сплошная линия – классическому алгоритму. По результатам исследования, представленным на рис. 4, следует, что при применении классического алгоритма с увеличением степени вобуляции вероятность правильного обнаружения и коэффициент улучшения отношения сигнал-шум уменьшаются в каждом канале, что связано с потерей части энергии сигнала. При применении моди-

фицированного алгоритма вероятность правильного обнаружения и коэффициент улучшения не зависят от степени вобуляции и соответствуют случаю эквидистантной последовательности.



**Рисунок 4 – Зависимости среднего коэффициента улучшения отношения сигнал-шум (а, б) и средней вероятности правильного обнаружения сигнала (в, г) от величин СВППИ**

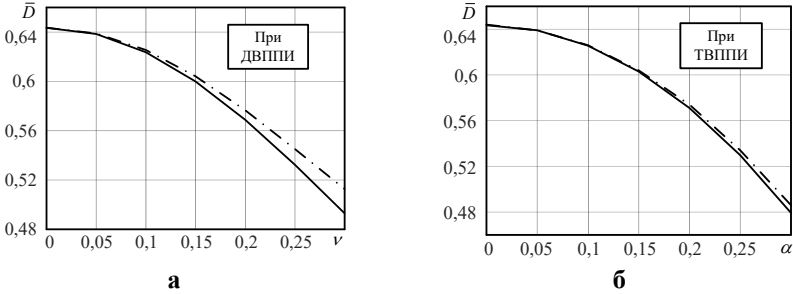
При исследовании эффективности многоканальной фильтрации сигналов с ДВПИ и ТВПИ на фоне смеси узкополосной помехи с белым шумом использованы следующие параметры:  $F = 10^{-8}$ ,  $Q = 10^{-2}$ ,  $\Delta F_s = 0,01$ ,  $N = 32$ ,  $\lambda = 10^{-5}$ , относительная ширина спектра помехи –  $\Delta F_c = 0,1$ , параметр вобуляции  $\alpha = \beta$  при обработке сигнала с ТВПИ.

**Таблица 1 – Результаты расчетов среднего коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум)**

При ДВПИ	СВПИ	$\nu$	0	0,1	0,2	0,3
	Классическое БПФ	$\bar{\mu}(\nu)$ , дБ	42,14	36,99	34,38	32,2
	Комбинированное БПФ	$\bar{\mu}(\nu)$ , дБ	42,14	37,18	35,12	34,01
При ТВПИ	СВПИ	$\alpha$	0	0,1	0,2	0,3
	Классическое БПФ	$\bar{\mu}(\alpha)$ , дБ	42,14	35,36	31,67	28,97
	Комбинированное БПФ	$\bar{\mu}(\alpha)$ , дБ	42,14	35,47	32,11	30

В табл. 1 представлены результаты расчетов среднего коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум) при применении комбинированного метода (модифицированный и классический алгоритмы БПФ) и классического алгоритма БПФ.

На рис. 5 представлены зависимости средней вероятности правильного обнаружения сигнала от значения СВППИ, где пунктирно-точечная линия и сплошная линия соответствуют применениям комбинированного и классического алгоритмов соответственно.



**Рисунок 5 – Зависимости средней вероятности правильного обнаружения сигналов с ДВПИ (а) и с ТВПИ (б) от значения СВППИ**

Из результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 5, видно, что применение комбинированного алгоритма БПФ обеспечивает выигрыш по сравнению с классическим алгоритмом БПФ. Следует отметить, что этот выигрыш при обработке сигнала с ТВППИ много ниже по сравнению с обработкой сигнала с ДВПИ. Это связано с тем, что в АЧХ доплеровского фильтра, сформированной на основе модифицированного алгоритма БПФ при обработке сигнала с ТВППИ, наблюдается большее количество ДБЛ.

Считаем равновероятным распределение смещения частоты отраженного сигнала в пределах частотного канала. Тогда среднюю относительную погрешность (СОП) по всем каналам можно определить следующим образом:

$$\bar{\varepsilon}_{\sigma} = \frac{1}{N\Delta f} \sum_{k=0}^{N-1} \int_{f_k - \Delta f/2}^{f_k + \Delta f/2} \frac{\sigma_{\tilde{f}}(f_s)}{\Delta f/2} df_s,$$

где  $\sigma_{\tilde{f}} = \sqrt{(\tilde{f} - f_s)^2}$  – среднеквадратическое отклонение оценки частоты от истинного значения в каждом из каналов,  $f_s$  – априорно неизвестное смещение частоты сигнала,  $\Delta f/2$  – половина интервала частотного разрешения БПФ и  $f_k = k\Delta f$  – настройка  $k$ -го канала.

Предполагая, что шум является некоррелированным гауссовским процессом, функцию правдоподобия (плотности распределения вероятностей,

зависящей от неизвестного параметра  $\delta$ ) элементов вектора  $\mathbf{S}$  спектральных отсчетов смеси сигнала и шума на выходе МФ, вычисленных модифицированным алгоритмом БПФ можно записать в следующем виде:

$$P(\mathbf{S}/\delta) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^{2M+1}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} [\mathbf{S} - X_i \Delta \delta]^T [\mathbf{S} - X_i \Delta \delta] \right\}, \quad (2)$$

где  $X_i$  – максимальное амплитудное значение сигнала на выходе канала МФ,  $\Delta \delta$  – вектор коэффициентов, определяющих поправки оценки частоты,  $\delta = f_s - f_i$  – величина поправки и  $f_i$  – спектральная частота настройки канала с максимальной амплитудой.

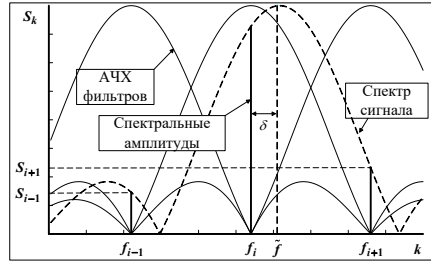
Оценка максимального правдоподобия находится решением уравнения для производной натурального логарифма выражения (2) по  $\delta$ :  $d \ln(P(\mathbf{S}/\delta))/d\delta = 0$ , а величина поправки определяется решением следующего уравнения:

$$S_i \left( \frac{\delta}{(\delta + \Delta f)^3} - \frac{\delta}{(\delta - \Delta f)^3} \right) + \frac{S_{i+1}}{(\delta - \Delta f)^2} - \frac{S_{i-1}}{(\delta + \Delta f)^2} = 0, \quad (3)$$

где  $S_{i+1}$ ,  $S_{i-1}$  – смежные спектральные амплитуды максимальной амплитуды  $S_i$ , которые изображены на рис. 6. Решение уравнения (3) представлено в диссертации, а оценка смещения частоты определена как:  $\tilde{f} = f_i + \delta$ .

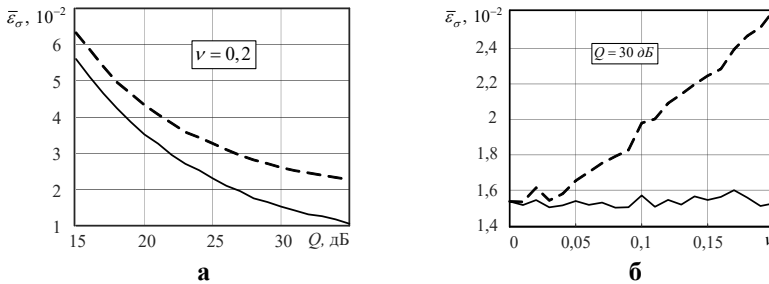
Исследование эффективности алгоритма оценки смещения частоты сигнала с ДВПИИ методом максимального правдоподобия проведено при следующих параметрах сигнала: количество отсчетов  $N=16$ , степень вобуляции периода  $\nu$  в пределах  $(0...0,2)$ , отношение сигнал-шум  $Q$  в пределах  $(15...35)$  дБ. Зависимости СОП от отношения сигнал-шум (рис. 7, а) и от степени вобуляции периода следования импульсов (рис. 7, б) получены методом максимального правдоподобия. На рис. 7 сплошная и пунктирная линии относятся соответственно к применению модифицированного алгоритма БПФ и классического алгоритма БПФ.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что с увеличением отношения сигнал-шум  $Q$  СОП смещения частоты уменьшается, но



**Рисунок 6 – АЧХ смежных каналов многоканального частотного фильтра и спектр сигнала**

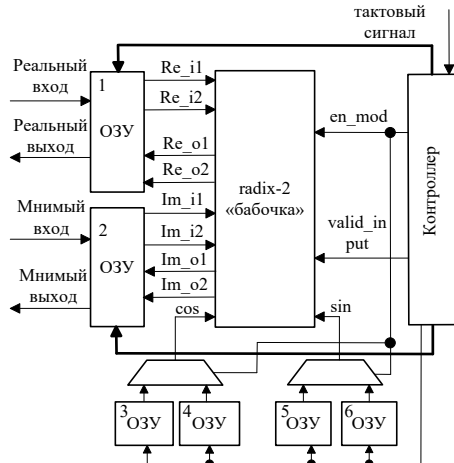
с увеличением степени вобуляции СОП значительно возрастает. Применение модифицированного алгоритма БПФ уменьшает СОП оценки частоты по сравнению с применением классического алгоритма БПФ, что особенно выражено при большой степени вобуляции. Метод максимального правдоподобия обеспечивает малую погрешность оценки смещения частоты даже при небольшом отношении сигнал-шум, что достигается учетом влияния шума. Так, при отношении сигнал-шум  $Q = 15$  дБ СОП оценки частоты может достигать  $5,5 \cdot 10^{-2}$ , а при  $Q = 30$  дБ – величины  $10^{-2}$ .



**Рисунок 7 – Зависимости СОП от отношения сигнал-шум (а) и степени вобуляции периода следования импульсов (б)**

В третьей главе разработаны архитектурные решения модифицированного алгоритма БПФ. Выполнена их реализация на отладочной плате с чипом Intel-Altera Cyclone IV, проведен анализ необходимых ресурсов для синтеза и удовлетворения заданного требования, анализ экспериментальных результатов.

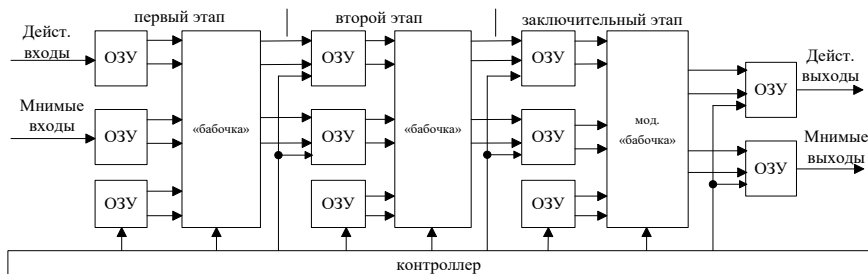
Последовательная архитектура представлена на рис 8, в которой используется только один общий блок вычисления «бабочка». В зависимости от этапа вычисления БПФ предложено вычисление (операция radix-2) или модифицированное вычисление (модифицированная операция radix-2) в блоке «бабочка». Блоки ОЗУ 1 и 2 предназначены для загрузки исходных данных, а также для сохранения промежуточных значений блока «бабочка» и выгрузки данных. Блоки ОЗУ 3–6 с инициализированными данными сохраняют коэффици-



**Рисунок 8 – Последовательная архитектура модифицированного алгоритма БПФ**

енты вращения  $W_N^k$  и модифицированные коэффициенты вращения  $W_{v,N}^k$  и передают эти коэффициенты через мультиплексор в блок «бабочка» в соответствии с этапом вычисления.

Конвейерная архитектура представлена на рис. 9, в которой для уменьшения общего времени вычисления используется параллельность вычислений между этапами вычисления. На каждом вычислительном этапе используются классический блок «бабочка», блоки ОЗУ и только на заключительном этапе используется блок «модифицированная бабочка».



**Рисунок 9 – Конвейерная архитектура 8-го точечного модифицированного алгоритма БПФ**

Эксперимент проведен с использованием отладочной платы и персонального компьютера. При реализации 256-точечного модифицированного алгоритма БПФ на чипе Cyclone IV EP4CE115F29C7 проведено исследование влияния степени вобуляции периода повторения импульсов на пик выходных многоканальных фильтров по амплитуде с применением модифицированного алгоритма БПФ ( $A_{\text{мод}}$ ) и классического алгоритма БПФ ( $A_{\text{класс}}$ ). Результат эксперимента представлен в табл. 2.

**Таблица 2 – Пиковое амплитудное отношение при использовании модифицированного и классического алгоритмов БПФ**

$\nu$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
$A_{\text{мод}}/A_{\text{класс}}$	1,006	1,024	1,056	1,104	1,169

Из табл. 2 следует, что с увеличением степени вобуляции периода повторения импульсов отношение пика увеличивается в связи с тем, что учитывается вобуляция периода повторения импульсов при вычислении модифицированного алгоритма БПФ. А также отношение пиков  $A_{\text{мод}}/A_{\text{класс}}$  по амплитуде при изменении степени вобуляции периода повторения импульсов по результатам вычисления из ПЛИС меняется на 16 %.

Ресурсы (количество логических элементов, памяти и встроенных умножителей) для синтеза 256-точечного модифицированного алгоритма БПФ при использовании последовательной и конвейерной архитектур чипом Cyclone IV EP4CE115F29C7 представлены в табл. 3.

**Таблица 3 – Ресурсы для синтеза модифицированного алгоритма БПФ**

Архитектура	Последовательная		Конвейерная	
	<i>Использование</i>	<i>Доступный</i>	<i>Использование</i>	<i>Доступный</i>
Логический элемент	1478	114480	5858	114480
Память (бит)	19480	3981312	102080	3981312
Умножитель (9*9)	32	532	128	532

Из табл. 3 следует, что использование последовательной архитектуры требует меньших ресурсов по сравнению с конвейерной архитектурой. Так, количество встроенных умножителей уменьшается 4 раза. Однако конвейерная архитектура будет иметь преимущество во времени обработки. Результаты синтеза показывают, что максимальная тактовая частота выполнения операций (в условиях высокой внешней температуры) и при напряжении питания 1,2 В составляет 223 МГц (при последовательной архитектуре) и - 200 МГц (при конвейерной архитектуре). Для  $N$ -точечного модифицированного алгоритма БПФ результат вычисления будет получен за  $N \log_2(N) + 5$  тактов при последовательной архитектуре и  $2N - 2 + 4 \log_2(N)$  тактов при конвейерной архитектуре. В связи с этим обеспечивает время вычисления 256-точечного модифицированного алгоритма БПФ по последовательной и конвейерной архитектурам соответственно за 9,2 мкс и 2,71 мкс. Результаты по времени вычисления модифицированного алгоритма БПФ согласуются с требованием, указанным в разделе 3.1.1 диссертации ( $t_{\text{БПФ}} \leq 13,2 \text{ мкс}$ ), что обеспечивает возможность применения представленных архитектур для реализации в реальных РТС.

**Заключение.** В диссертационном исследовании сделаны следующие выводы и практические результаты:

1. Использование модифицированного алгоритма БПФ приводит к возникновению дополнительного бокового лепестка в АЧХ фильтра. Наличие дополнительного бокового лепестка в АЧХ обусловлено теми же эффектами, что и появление дополнительного бокового лепестка в спектре сигнала при неэквидистантном периоде следования импульсов. Число дополнительного бокового лепестка увеличивается с ростом количества различных частот повторения, а их уровень может достигать до -2 дБ в зависимости от номера канала и степени вобуляции.

2. При обработке сигнала с двухпериодной вобуляцией периода повторения импульсов с  $\nu = 0,33$  на фоне белого шума применение модифицированного алгоритма БПФ увеличивает среднюю вероятность правильного обнаружения сигнала на 10 % и обеспечивает улучшение среднего коэффициента улучшения отношения сигнала-шум на 1,6 дБ. В случае обработки сигнала с трехпериодной вобуляцией периода повторения импульсов



при  $\alpha = \beta = 0,3$  применение модифицированного алгоритма БПФ увеличивает вероятность на 5 % и улучшает отношение сигнал/шум на 1,17 дБ.

3. При обработке сигнала на фоне помехи и шума комбинация классического и модифицированного алгоритмов БПФ обеспечивает повышение среднего энергетического выигрыша в отношении сигнал-(помеха+шум) на 1,8 дБ и увеличение средней вероятности правильного обнаружения сигнала на 5 % при обработке двухпериодной неэквидистантной последовательности импульсов по сравнению с многоканальным фильтром на основе классического алгоритма БПФ.

4. При  $Q = 30$  дБ и  $\nu = 0,2$  применение модифицированного алгоритма БПФ обеспечивает уменьшение средней относительной погрешности оценки частоты сигнала с неэквидистантным периодом следования импульсов на 38 % по сравнению с многоканальным фильтром на основе классического алгоритма БПФ.

5. Практическая реализация на основе ПЛИС модифицированного и комбинированного алгоритмов БПФ для обработки неэквидистантных последовательностей отсчетов сигнала не увеличивает время выполнения алгоритма и обеспечивает, например для 256-го точечного входного сигнала и степени вобуляции его периода повторения, равной 0,2, увеличение отклика фильтра на частоте сигнала на 16 %, что в радиолокации эквивалентно увеличению дальности обнаружения объекта до 8 %.

Полученные результаты обеспечивают достижение целей диссертационной работы состоящие в повышении эффективности многоканального фильтра обработки сигнала с переменным периодом следования, снижении погрешности оценки модулирующей частоты неэквидистантной последовательности импульсов и реализации модифицированного алгоритма БПФ на ПЛИС для применения в реальных проектах. Перспективы развития исследования обеспечат повышение дальности обнаружения радиолокационных объектов.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в журналах, рекомендованных ВАК**

1. Чинь Н.Х. Алгоритм быстрого преобразования Фурье неэквидистантных последовательностей импульсов / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 85. – С. 3-13.

2. Чинь Н.Х. Эффективность многоканальной доплеровской фильтрации неэквидистантных последовательностей импульсов / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь // Цифровая обработка сигналов. – 2023. – № 2. – С. 3-8.

3. Чинь Н.Х. Оптимизация алгоритма весовой обработки в многоканальной доплеровской фильтрации / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 93-104.

4. Чинь Н.Х. Реализация быстрого преобразования Фурье неэквидистантной последовательности импульсов на ПЛИС типа FPGA / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь // Цифровая обработка сигналов. – 2024. – № 4. – С. 21-27.

5. Чинь Н.Х. Повышение точности оценки частоты неэквидистантных импульсных радиосигналов / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь // Успехи современной радиоэлектроники. – 2025. – Т. 79. – № 4. – С. 35-47.

#### **Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS**

6. Trinh N.H. Designing Multi-Channel Filter for Processing Coherent Pulse Train with Staggered Pulse Repetition Frequency On FPGA/ V.I. Koshchelev, N.H. Trinh // 27th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation. – 2025. – P. 1-5.

#### **Публикации в других изданиях**

7. Чинь, Н.Х. Характеристики многоканальных доплеровских фильтров обработки неэквидистантных отсчетов сигнала / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023: Сборник трудов VI международного научно-технического форума. В 10 томах, Рязань, 01–03 марта 2023 года / Под общей редакцией О.В. Миловзорова. Том 1. – Рязань: РГРТУ, 2023. – С. 93-99.

8. Чинь, Н.Х. Оценка вычислительных затрат алгоритмов БПФ неэквидистантной последовательности отсчетов / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2024: Сборник трудов VII Международного научно-технического форума. В 10 томах, Рязань, 04–06 марта 2024 года. – Рязань: РГРТУ, 2024. – С. 30-35.

9. Чинь, Н.Х. Многоканальная доплеровская фильтрация сигналов с неэквидистантным периодом следования импульсов / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем ("Радиоинфоком-2024"): Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 18–22 ноября 2024 года. – Москва: МИРЭА, 2024. – С. 430-435.

10. Чинь, Н.Х. Оценка модулирующей частоты импульсного сигнала с неэквидистантным периодом следования методом многоканальной фильтрации / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XX Международной научно-практической конференции, Томск, 20–22 ноября 2024 года. – Томск: ТУСУР, 2024. – Ч. 1. – С. 26-29.

11. Чинь, Н.Х. Оптимизация фильтра неэквидистантной последовательности импульсов с неизвестной частотой модуляции / Н.Х. Чинь // Новые информационные технологии в научных исследованиях: Материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 27–29 ноября 2024 года. – Рязань: РГРТУ, 2024. – С. 171-172.

#### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ**

12. Чинь Н.Х., Кошелев В.И. Программа для вычисления средней вероятности правильного обнаружения сигнала на выходе многоканального

фильтра неэквидистантных последовательностей импульсов: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2023665485. – Зарегистр. 03.07.2023; опубл. 17.07.2023. – 7,58 кб. – Яз. программирования: MATLAB R2022a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

13. Чинь Н.Х., Кошелев В.И. Программа для вычисления среднего коэффициента улучшения на выходе многоканального фильтра неэквидистантных последовательностей импульсов: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2023664115. – Зарегистр. 03.07.2023; опубл. 17.07.2023. – 7,09 кб. – Яз. программирования: MATLAB R2022a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

14. Чинь Н.Х., Кошелев В.И. Программа для вычисления модифицированного быстрого преобразования Фурье неэквидистантной последовательности импульсов с тремя различными периодами повторения: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2023666093. – Зарегистр. 18.07.2023; опубл. 26.07.2023. – 4,41 кб. – Яз. программирования: MATLAB R2022a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

15. Чинь Н.Х., Кошелев В.И. Программа для вычисления модифицированного быстрого преобразования Фурье неэквидистантной последовательности импульсов с двумя различными периодами повторения: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2023666391. – Зарегистр. 18.07.2023; опубл. 31.07.2023. – 3,75 кб. – Яз. программирования: MATLAB R2022a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

16. Чинь Н.Х., Кошелев В.И. Программа оптимизации многоканального частотного фильтра по критериям максимума среднего выигрыша в отношении сигнал-(помеха+шум) и максимума средней вероятности правильного обнаружения импульсного сигнала с эквидистантным периодом следования: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2023689320. – Зарегистр. 12.12.2023; опубл. 28.12.2023. – 5,64 кб. – Яз. программирования: MATLAB R2022a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

17. Чинь Н.Х., Кошелев В.И. Программа для моделирования модифицированного алгоритма быстрого преобразования Фурье обработки неэквидистантных последовательностей импульсов на ПЛИС типа FPGA-Altera Cyclone IV: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2024669066. – Зарегистр. 29.07.2024; опубл. 14.08.2024. – 136 кб. – Яз. программирования: Verilog HDL. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

18. Чинь Н.Х., Кошелев В.И. Программа для вычисления оценки доплеровской частоты сигнала с неэквидистантным периодом следования

импульсов методом параболической интерполяции: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2024690513. – Зарегистр. 04.12.2024; опубл. 16.12.2024. – 7,4 кб. – Яз. программирования: MATLAB R2022a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

19. Чинь Н.Х., Кошелев В.И. Программа для вычисления оценки доплеровской частоты сигнала с неэквидистантным периодом следования импульсов методом максимального правдоподобия: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2024691128. – Зарегистр. 04.12.2024; опубл. 19.12.2024. – 7,11 кб. – Яз. программирования: MATLAB R2022a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

#### **Учебно-методическая работа**

20. Кошелев, В.И. Проектирование многоканального фильтра обработки неэквидистантной последовательности импульсов на ПЛИС: методические указания к лабораторной работе / В.И. Кошелев, Н.Х. Чинь. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. – 20 с.

**ЧИНЬ Нгок Хиеу**

## **АЛГОРИТМЫ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРИОДОМ ПОВТОРЕНИЯ НА ФОНЕ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ**

### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_\_. 202\_\_ . Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ