

На правах рукописи



В У Б А Х У Н Г

**СПОСОБЫ И АЛГОРИТМЫ
РАЗРЕШЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
НЕСКОЛЬКИХ СИГНАЛОВ В РАДИОСИСТЕМАХ**

Специальность: 2.2.13. – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина» на кафедре «Радиотехнических устройств».

Научный руководитель

Ключко Владимир Константинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и информационных технологий в управлении ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты:

Бестугин Александр Роальдович, доктор технических наук, профессор, директор института радиотехники и инфокоммуникационных технологий ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург

Давыдочкин Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, начальник отдела СВЧ устройств и антенн в ООО предприятие «КОНТАКТ-1», г. Рязань

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Защита состоится **18 декабря 2024** года в **14 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета **24.2.375.03** в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени 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 «_____» _____ 2024 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время при построении радиосистем различного назначения большое внимание уделяют методам разрешения и оценивания параметров нескольких сигналов при совместной частотно-временной обработке. Источники сигналов индуцируют поля различной физической природы, которые принимаются и обрабатываются радиосистемой. Для подвижных источников различие по частоте проявляется в полосе сдвига частот. Задачей является разрешение сигналов путем определения их числа и оценок параметров сигналов с целью нахождения параметров источников. Решение подобной задачи находит применение в разных физических областях: в радиоастрономии, гидроакустике, ультразвуковой диагностике, а также в радиосистемах разного назначения.

Современные частотно-временные подходы к разрешению нескольких сигналов отличаются от традиционной обработки в частотной области тем, что осуществляют интегральную частотную обработку сигналов в окрестности текущих моментов времени наблюдения, что позволяет строить частотно-временное изображение источников сигналов. Такой подход способствует разрешению сигналов, но в силу малого временного интервала их обработки разрешающая способность по частоте недостаточна для выделения нескольких сигналов. При этом более эффективным оказывается подход преобразования смеси сигналов, принятых в течение периода их наблюдения, в частотную область, где под периодом наблюдения сигналов понимается время нахождения источников сигналов на заданном промежутке дальности. Известны классические методы разрешения сигналов во временной области, основанные на корреляционной обработке сигналов, однако они также имеют ограниченную разрешающую способность по сравнению с частотной обработкой.

Все это стимулирует поиск новых решений в области частотно-временной обработки сигналов, более эффективных по разрешающей способности в сравнении с обработкой в одной частотной области и не требующих заметного увеличения вычислительных затрат.

Резервом повышения эффективности разрешения нескольких сигналов является частотно-временная обработка в системе позиционирования нескольких приемников. Многопозиционные системы в настоящее время также активно развиваются и находят применение в различных областях.

Поиску решений в указанных направлениях посвящена данная диссертация.

Степень разработанности проблемы. В решение задачи повышения разрешения сигналов, их обнаружения и оценивания параметров внесли большой вклад такие ученые, как Бакулев П.А., Финкельштейн М.И., Леонов А.И., Фомичев К.И., Кузьмин С.З., Ширман Я.Д., Левин Б.Р., Тихонов В.И., Сосулин Ю.Г., Воскресенский Д.И., Ван Трис Г.Л., Джонсон К.Р., Миддлтон Д., Уильям Экклз и другие. В развитие цифровых методов обработки сигналов значительный вклад внесли Марпл-мл С.Л., Кириллов С.Н., Витязев В.В., Сергиенко А.Б., Вострецов А.Г., Богданович В.А., Кейпон Дж., Денисов В.П., Оппенгейм А., Макс Ж., Рабинер Л., Гоулд Б. и другие. В развитие многопозиционных

систем обработки сигналов значительный вклад внесли Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н., Черняк В.С., Лукошкин А.П. и другие.

Цель диссертации – повышение эффективности работы радиосистем при разрешении и оценивании параметров нескольких сигналов от источников разной физической природы на основе новых способов и алгоритмов частотно-временной обработки сигналов как в одном приемнике, так и в системе приемников.

Объект исследования – радиосистемы обработки сигналов во временной и частотной областях.

Предмет исследования – способы и алгоритмы частотно-временной обработки нескольких сигналов, отличающиеся повышенной вероятностью обнаружения всех сигналов с оцениванием их параметров.

Задачи исследования. Поставленная цель достигается путем решения следующих основных задач.

1. Разработка способов и алгоритмов разрешения нескольких сигналов при совместной частотно-временной обработке в одном приемнике с повышенной вероятностью обнаружения всех сигналов и оцениванием их параметров.
2. Разработка способов и алгоритмов разрешения нескольких сигналов при совместной частотно-временной обработке в системе позиционирования нескольких приемников с повышенной вероятностью обнаружения всех сигналов и оцениванием их параметров по сравнению с одним приемником.
3. Исследование и внедрение разработанных способов и алгоритмов.

Методы исследования. Для решения перечисленных задач используется современный аппарат математического анализа, линейной алгебры, теории цифровой обработки сигналов, теории оценивания и математической статистики, методы математического и компьютерного моделирования.

Научная новизна выносимых на защиту результатов определяется новыми способами частотно-временной обработки радиосигналов в течение периода наблюдения, защищенными патентами и публикациями в рецензируемых научно-технических изданиях.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Способ и алгоритм разрешения нескольких сигналов в одном приемнике отличаются совместной обработкой сигналов во временной и частотной областях и позволяют за счет этого повысить вероятность обнаружения всех сигналов с 0,63 до 0,86 с оцениванием их параметров (по результатам моделирования трех сигналов) в сравнении с обработкой в одной частотной области.
2. Способ и алгоритм разрешения нескольких сигналов в системе позиционирования приемников отличаются обработкой сигналов в частотной области при определенном расположении приемников и позволяют за счет этого повысить вероятность обнаружения всех сигналов с 0,63 до 0,87 с оцениванием их параметров (по результатам моделирования трех сигналов) в сравнении с частотной обработкой в одном приемнике, а также оценить динамику источников сигналов.
3. Способ и алгоритм разрешения нескольких сигналов в системе пози-

ционирования приемников отличаются совместной обработкой сигналов во временной и частотной областях при определенном расположении приемников и позволяют за счет этого повысить вероятность обнаружения всех сигналов с 0,86 до 0,96 с оцениванием их параметров (по результатам моделирования трех сигналов) в сравнении с частотно-временной обработкой в одном приемнике, а также оценить динамику источников сигналов.

Практическая ценность работы. Разработанные способы и алгоритмы при их реализации в существующих радиосистемах позволяют повысить эффективность функционирования таких систем в плане разрешения нескольких сигналов с оцениванием их параметров.

Достоверность полученных результатов определяется соответствием математических моделей сигналов известным описаниям, корректностью математических преобразований на основе моделей сигналов при разработке способов и алгоритмов их реализации, подтверждением работоспособности алгоритмов компьютерным моделированием, согласованием результатов исследования и аналитических выводов.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертации внедрены:

- в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»: Способы и алгоритмы обработки сигналов от подвижных источников: учебное пособие / В.К. Ключко, Б.Х. Ву. Москва: КУРС, 2023. 84 с.;
- в разработки компании ООО «ТЕХНОЛОГИЯ И ТОРГОВЛЯ МЕГА-ЛАЙН» (охранные системы). Внедрения подтверждены соответствующими актам.

Апробация работы. Результаты исследований, составляющих основное содержание диссертации, докладывались на 4 международных и 5 всероссийских научно-технических конференциях:

- 5-й Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2022» (Рязань, 02 – 04 марта 2022 г.);
- Всероссийские открытые Армандовские чтения «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (Муром, 28 – 30 июня 2022 г.);
- 28-я Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь – RLNC*2022» (Воронеж, 27 – 29 сентября 2022 г.);
- 15-я Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 21 – 22 ноября 2022 г.);
- 7-я Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 21 – 23 ноября 2022 г.);
- 6-й Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023» (Рязань, 01 – 03 марта 2023 г.);
- 25-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение — DSPA-2023» (Москва, 29 – 31 марта 2023 г.);
- Всероссийские открытые Армандовские чтения «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и ди-

фракции волн» (Муром, 26 – 29 июня 2023 г.);

- 8-я Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 27 – 29 ноября 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 патентов на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ, 9 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы. Материал изложен на 143 страницах, включает 34 рисунка и 11 таблиц, а также 4 приложения. Список использованной литературы содержит 140 наименований.

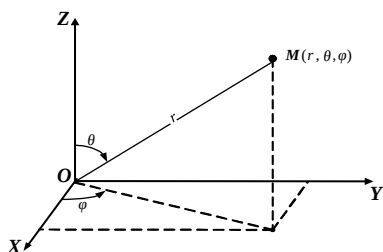
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы.

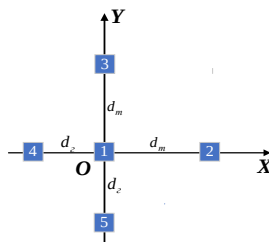
В первой главе проведен обзор методов частотно-временной обработки сигналов, применяемых в существующих радиосистемах. Особое внимание уделено описанию известных способов разрешения нескольких сигналов, а также рассмотрению их достоинств и недостатков. Сформулированы актуальные задачи частотно-временной обработки нескольких сигналов от источников. Рассмотрена математическая модель сигнала как в одном приемнике, так и в системе позиционирования приемников. Даны постановка и формализация задач диссертационного исследования.

Положение каждого источника сигнала $M(r, \theta, \varphi)$ в антенной системе координат измеряется дальностью r , углом места θ и азимутом φ , при этом угол θ отсчитывается в вертикальной плоскости, угол φ – в горизонтальной так, как показано на рисунке 1,а. Прямоугольные и сферические координаты связаны:

$$x = r \sin \theta \cos \varphi, y = r \sin \theta \sin \varphi, z = r \cos \theta.$$



а



б

Рисунок 1 – Система координат (а) и расположение элементов АР (б)

Передатчик посылает гармонический сигнал $s(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ с амплитудой U_0 , несущей частотой ω_0 и начальной фазой φ_0 в заданном угловом направлении. Такой режим обеспечивает малые энергетические затраты и дает

возможность использования малогабаритных мобильных станций. Прием сигналов осуществляется пятиканальной антенной решеткой (АР), элементы которой расположены в плоскости несимметрично (для учета неоднозначности измерения фазы), как показано на рисунке 1,б.

Для **одного приемника** сигналы после дискретизации по времени в тракте первичной обработки имеют вид:

$$y_q(t_i) = \sum_{k=1}^m s_{qk}(t_i - \tau_{qk}) + p_q(t_i) = \\ = \sum_{k=1}^m A_k \cos(\omega_k t_i - 4\pi r_k / \lambda - 2\pi \delta_{qk} / \lambda + \xi_k + \varepsilon_q) + p_q(t_i),$$

где τ_{qk} - задержка k -го сигнала в q -м приемном канале; $q = \overline{1, Q}$, Q - число приемных элементов АР; A_k - амплитуда принимаемого сигнала от k -го источника; ω_k - частота от k -го источника; r_k - дальность до k -го источника; λ - длина волны; δ_{qk} - отклонение фронта волны, отраженной от k -го источника и достигшей q -го элемента АР, относительно центра антенны ($\delta_{0k} = 0$); $\xi_k = \varphi_{0k} + \eta_k$, η_k - случайное изменение фазы на $[-\pi, \pi]$; ε_q - фазовый шум в q -м канале; $p_q(t_i)$ - аддитивный шум с нулевым средним, действующий в каждом q -м канале; m - неизвестное количество источников; $i = \overline{1, n}$, n - объем выборки. Величина δ_{qk} содержит искомые параметры сигнала, несущие информацию о параметрах k -го источника в виде угловых координат φ_k и θ_k (x_q, y_q - координаты центра q -го элемента АР):

$$\delta_{qk} = x_q \sin \theta_k \cos \varphi_k + y_q \sin \theta_k \sin \varphi_k.$$

Для **системы позиционирования приемников** модель принимаемого сигнала в j -м приемнике ($j = \overline{1, N}$, N - число приемников) в дискретные моменты времени t_i имеет вид:

$$y_{jq}(t_i) = \sum_{k=1}^m s_{jqk}(t_i - \tau_{jqk}) + p_{jq}(t_i) = \sum_{k=1}^m A_{jk} \cos(\omega_{jk} t_i - \\ - 2\pi(r_{1k} + r_{jk}) / \lambda - 2\pi \delta_{jqk} / \lambda + \xi_{jk} + \varepsilon_q) + p_{jq}(t_i).$$

Во второй главе проведен анализ фазового метода оценивания параметров сигнала и способа устранения неоднозначности измерения фазы. Предложены способы и алгоритмы разрешения сигналов и оценивания их параметров в одном приемнике как во временной, в частотной, так и в частотно-временной области. Получены оценки вероятности обнаружения сигналов и оценивания их параметров в сравнении с обработкой только в частотной об-

ласти.

В качестве прототипа при разработке способов повышения разрешения сигналов взят способ обработки сигналов в частотной области. Данный способ основан на выделении спектральных составляющих в спектре частот нескольких пространственных каналов, измерении фаз спектральных составляющих и оценивании угловых координат методом разности фаз. Алгоритмически способ-прототипа представлен на рисунке 2.

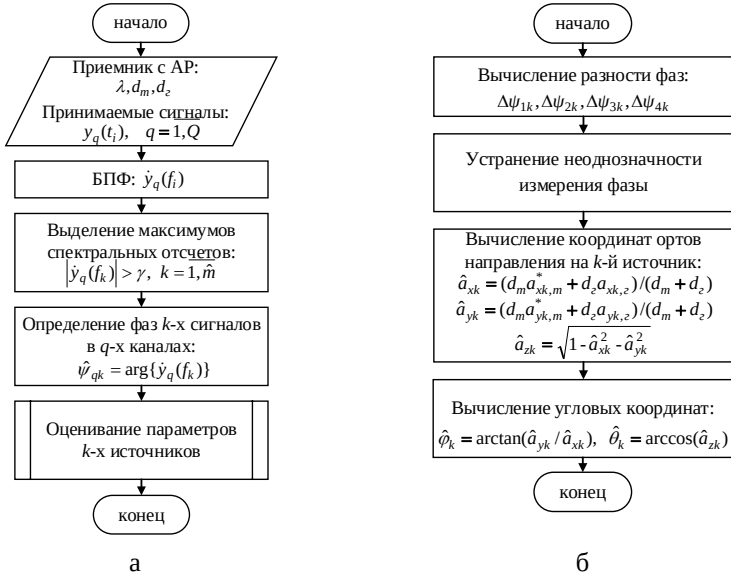
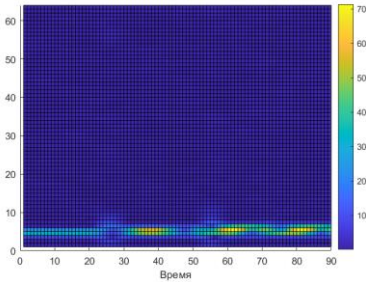


Рисунок 2 – Обработка в частотной области (а) и оценивание параметров k -го источника (б)

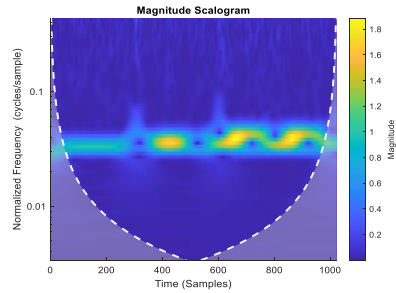
Преимущество способ-прототипа (БПФ) по сравнению с известными методами частотно-временной обработки показано на рисунке 3 на примере разрешения по частоте трех сигналов в одинаковых условиях моделирования (время дано в номерах отсчетов, частота – в преобразовании Фурье в Гц).

Для исследования возможности добиться лучших результатов, чем в частотной области, был разработан способ обработки сигналов во временной области. В соответствии с данным способом принимают смесь сигналов, формируют последовательность временных отсчетов сигналов, подвергают элементы последовательности операциям фильтрации и обнаруживают моменты времени τ_k появления k -х сигналов от $(k = 1, 2, \dots, \hat{m})$, где $\hat{m}$ – оценка числа сигналов), затем на каждом k -м образованном промежутке времени $[\tau_k, \tau_{k+1})$ оценивают частоты и фазы сигнала, причем сигнал выделяют с помощью вычитания из сглаженного суммарного сигнала экстраполированных оценок сигналов, выделенных ранее. Параметры сигналов и их источников определяют

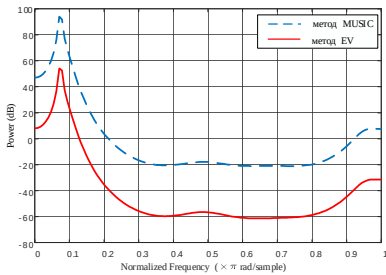
методом разности фаз.



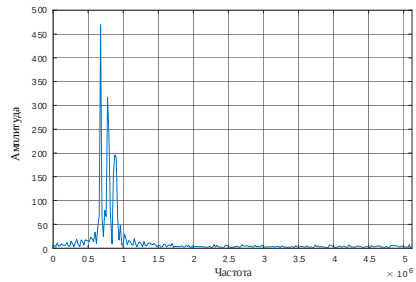
а) оконное преобразование Фурье с
N=128



б) вейвлет-преобразование



в) методы MUSIC и EV



д) БПФ с N=1024

Рисунок 3 – Сравнение способ-прототипа с известными методами

Алгоритм способа показан на рисунке 4. Для оценивания фаз нескольких сигналов использовался фильтр Калмана, настроенный на гармоническую модель сигнала с параметрами a , b и ω . Работа фильтра сравнивалась с оптимальным измерителем фазы по критерию максимального правдоподобия, рассчитанным на один сигнал. При этом дисперсия оценки фазы в соответствии с неравенством Рао–Крамера составляла $\sigma_{\psi}^2 = 1/(2E/N_0)$, где E/N_0 – отношение мощности сигнала к мощности шума, $\mathcal{S} = 10 \lg E/N_0$ дБ, и использовалась при моделировании оптимального измерителя фазы в составе алгоритма (рисунок 5).

Для оценки качества работы алгоритмов находились оценки вероятности обнаружения всех сигналов, понимаемые как доверительные вероятности попадания оценок параметров всех источников сигналов в интервалы, определенные потенциальной точностью фазового метода.

Для соединения преимуществ обработки сигналов во временной и частотной областях был разработан способ совместной обработки в частотно-временной области. Обработка во временной и частотной областях ведется

параллельно, результаты обработки объединяются, после чего выдаются оценки числа сигналов и их параметров. Алгоритмически способ представлен на рисунке 6.

На рисунках 7 и 8 показаны результаты компьютерного моделирования трех алгоритмов: алгоритма обработки сигналов в частотной области, во временной области и в частотно-временной области.

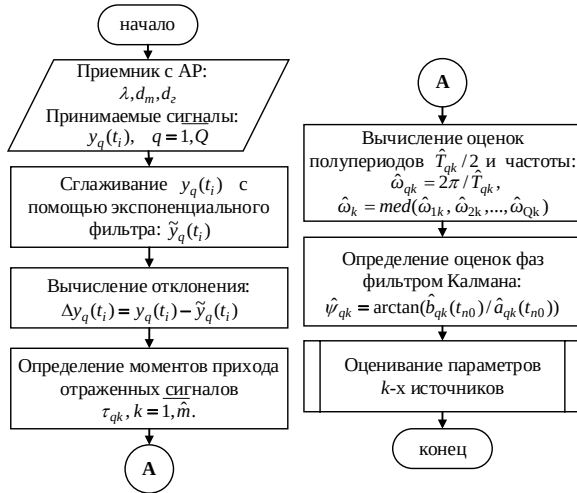


Рисунок 4 – Обработка во временной области

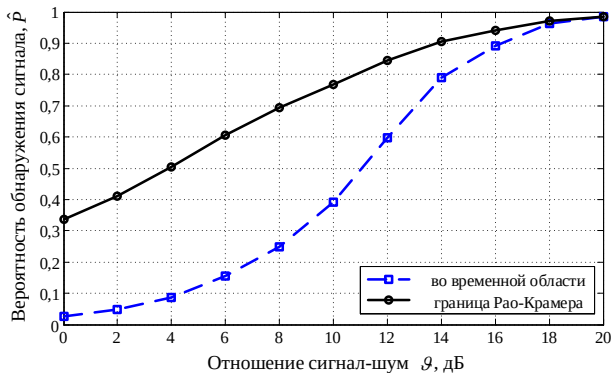


Рисунок 5 – Сравнение с границей Рао-Крамера

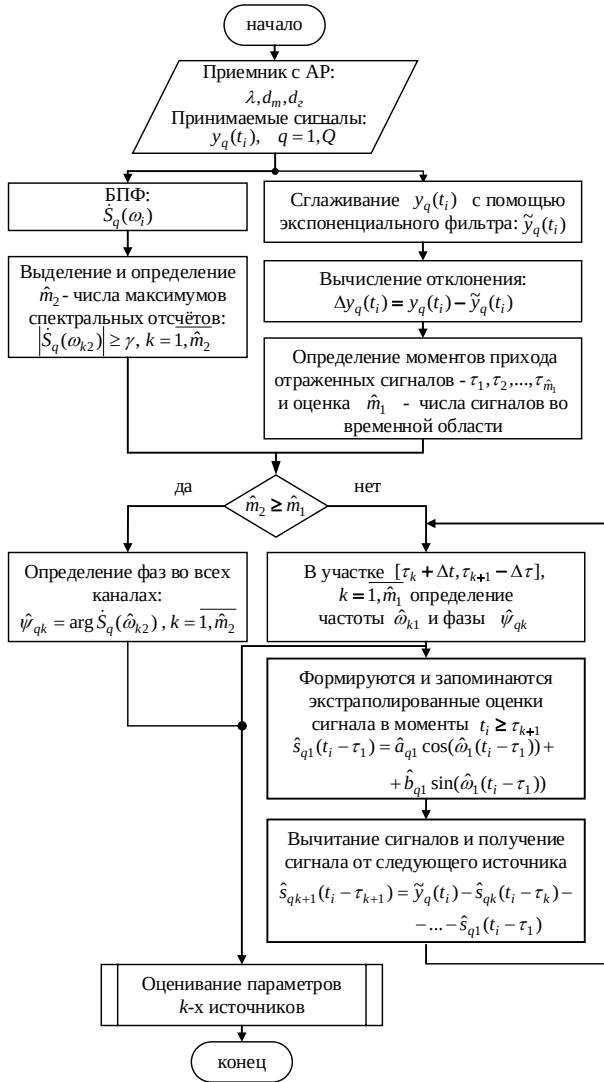


Рисунок 6 – Совместная обработка сигналов в частотно-временной области

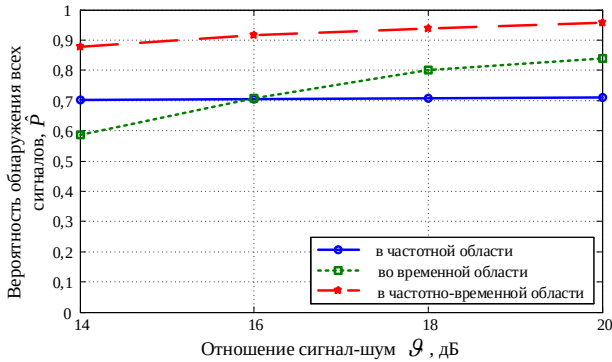


Рисунок 7 – Зависимость вероятности обнаружения всех сигналов от отношения сигнал-шум в различных способах обработки при $m = 2$

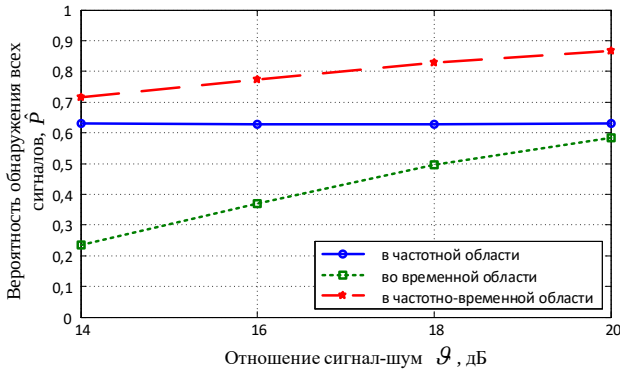


Рисунок 8 – Зависимость вероятности обнаружения всех сигналов от отношения сигнал-шум в различных способах обработки при $m = 3$

Результаты моделирования в сравнительной оценке показывают возможность повышения вероятности обнаружения всех сигналов с 0,71 до 0,96 при $m=2$ и с 0,63 до 0,86 при $m=3$ на уровне отношения сигнал-шум $\mathcal{S}=14-20$ дБ за счет совместной частотно-временной обработки сигналов.

Что доказывает положение 1.

В третьей главе в системе позиционирования приемников (рис. 9) предложено решение задачи классификации ортов направляющих векторов на источники сигналов по принадлежности каждому источнику и нахождения оценок дальностей. Разработаны способ и алгоритм обнаружения сигналов при частотной обработке сигналов в системе приемников, а также при частот-

но-временной обработке сигналов в системе приемников.

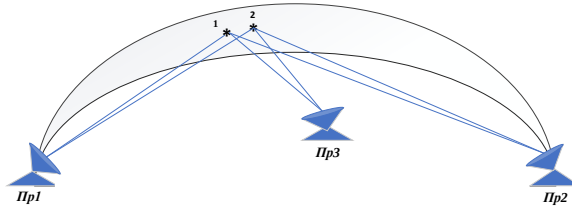


Рисунок 9 – Система приемников

Условия применимости алгоритмов:

- 1) источники находятся в сегменте сферы при условии, чтобы угол α между линиями визирования приемников на источники составлял $\alpha = 140 - 145^\circ$;
- 2) наличие источников в сегменте сферы установлено;
- 3) в системе позиционирования ошибки синхронизации при приеме сигналов считаются малыми.

В приемниках обрабатываются принятые сигналы, некоторые из них принадлежат посторонним источникам. На основе оценок параметров сигналов находятся орты направляющих векторов на источники. Алгоритм определяет правильные комбинации ортов – их направления на один и тот же источник (сопряжение). Критерий правильного сопряжения векторов основан на следующем.

Пусть N векторов $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_N$ выбраны правильно по направлению на один и тот же источник в N приемниках. Устанавливается парная связь между первым и j -ми векторами ($j = \overline{2, N}$) в единой прямоугольной системе координат OXYZ в матричной форме:

$$r_1 \mathbf{a}'_1 = (\mathbf{b}_j - \mathbf{b}_1) + r_j \mathbf{a}'_j + \mathbf{e}_{1j},$$

где r_1 – известная дальность от передаточной станции до источника; r_j – дальность от j -го приемника до этого же источника, которая подлежит оцениванию ($j = \overline{2, N}$); $\mathbf{a}'_j = \mathbf{H}_j \mathbf{a}_j$; $\mathbf{H}_j$ – 3×3 -матрицы поворота осей j -й антенной системы координат по отношению к общей системе; $\mathbf{a}_j$ – 3×1 -вектор-столбцы координат ортов; $\mathbf{b}_j$ – базовые векторы, соединяющие центр единой системы с центрами антенных систем координат; $\mathbf{e}_{1j}$ – 3×1 -вектор-столбцы ошибок сопряжения указанных пар векторов.

Критерий сопряжения $N-1$ пар векторов $\mathbf{a}'_1$ и $\mathbf{a}'_j$, $j = \overline{2, N}$ – это ограничение по заданному порогу $J_{\max}$ показателя сопряжения J в виде суммы квадратов норм ошибок сопряжения в каждом варианте перебора соединения векторов:

$$J = \sum_{j=2}^N \| \mathbf{e}_{1j} \|^2 = \sum_{j=2}^N (r_1 \mathbf{a}'_1 - \Delta \mathbf{b}_{1j} - r_j \mathbf{a}'_j)^T \cdot (r_1 \mathbf{a}'_1 - \Delta \mathbf{b}_{1j} - r_j \mathbf{a}'_j) \leq J_{\max},$$

где $\Delta \mathbf{b}_{1j} = \mathbf{b}_j - \mathbf{b}_1$, $j = \overline{2, N}$.

Из необходимого условия существования экстремума J

$$dJ/dr_j = 0 \Rightarrow 2(r_1 \mathbf{a}'_1 - \Delta \mathbf{b}_{1j} - r_j \mathbf{a}'_j)^T (-\mathbf{a}'_j) = 0$$

с учетом $\mathbf{a}'_j^T \mathbf{a}'_j = 1$ находятся оценки дальностей:

$$\hat{r}_j = \mathbf{a}'_j^T (r_1 \mathbf{a}'_1 - \Delta \mathbf{b}_{1j}), \quad j = \overline{2, N},$$

которые при подстановке в выражение показателя J обеспечивают проверку критерия сопряжения при классификации векторов. Невыполнение неравенства ($J > J_{\max}$) позволяет отсеять ложные варианты сопряжения.

Прошедшие через порог ($J \leq J_{\max}$) варианты сопряжения векторов позволяют определить динамические свойства источников в течение периода наблюдения сигналов. Система уравнений в матричной форме для трех приемников ($N = 3$) содержит координаты направляющих векторов a_x, a_y, a_z , сдвиги частот f_1, f_2, f_3 обнаруженного сигнала в приемниках и координаты вектора скорости источника v_x, v_y, v_z :

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{V} = \lambda \mathbf{F} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 2a'_{1x} & 2a'_{1y} & 2a'_{1z} \\ a'_{1x} + a'_{2x} & a'_{1y} + a'_{2y} & a'_{1z} + a'_{2z} \\ a'_{1x} + a'_{3x} & a'_{1y} + a'_{3y} & a'_{1z} + a'_{3z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}.$$

Методом обратной матрицы находится оценка вектора скорости источника:

$$\hat{\mathbf{V}} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F}.$$

В общем случае N приемников ($N > 3$): $\hat{\mathbf{V}} = \lambda (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{F}.$

Средняя ошибка измерения скорости: $\Delta v_{cp} = 1,6\lambda \sigma_f \sqrt{\text{Tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}} / 3.$

Принцип различения сигналов с близкими сдвигами частот в системе приемников заключается в положениях линий визирования приемников в направлении источников таких, чтобы разность проекций векторов скоростей на линии визирования была наибольшей.

На рисунке 10 иллюстрируется случай двух приемников (**Пр1** и **Пр2**) и двух источников (**A** и **B**). Абсолютная разность проекций векторов скорости (и соответственно доплеровских частот) на линии визирования приемников в случае положения векторов в плоскости, образованной этими линиями,

$$\begin{aligned} \Delta v_2 &= |v_{A2} - v_{B2}| = |v(1 + \cos \alpha) - v[\cos \Delta \alpha + \cos(\alpha - \Delta \alpha)]| = \\ &= v | (1 - \cos \Delta \alpha) + [\cos \alpha - \cos(\alpha - \Delta \alpha)] | = |f_{A2} - f_{B2}| \cdot \lambda = \Delta f_2 \cdot \lambda \end{aligned}$$

максимизируется по α и при фиксированном $\Delta\alpha$ дает угол
 $\alpha = \arctan(\sin(\Delta\alpha)/(1 - \cos\Delta\alpha))$.

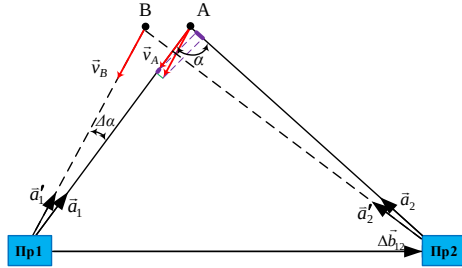


Рисунок 10 – Пояснение принципа различения сигналов

Изложенный подход реализован в способе обработки сигналов в частотной области в полуактивной многопозиционной системе, который алгоритмически представлен на рисунке 11.

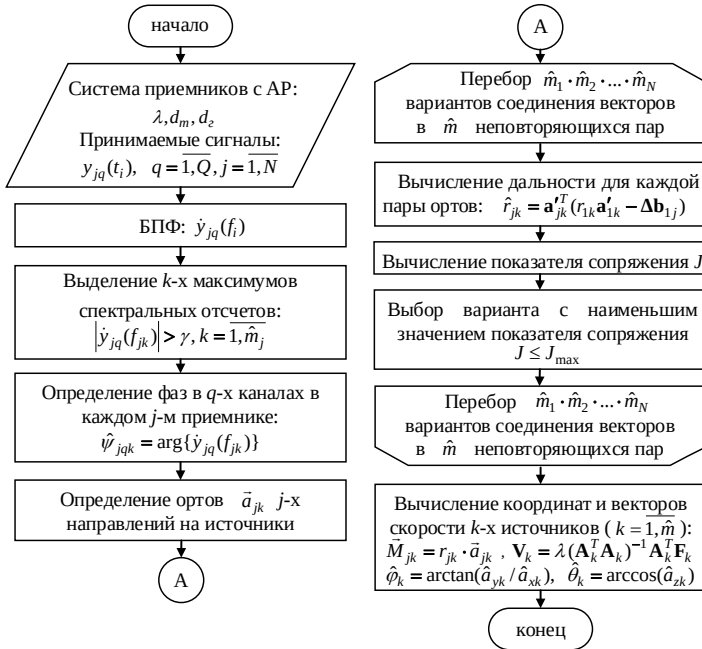


Рисунок 11 – Обработка сигналов в полуактивной многопозиционной системе

Полученные результаты моделирования работы алгоритма, реализующего способ, представлены на рисунке 12.

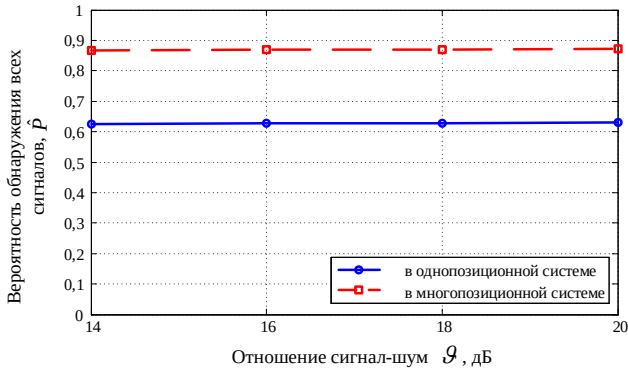


Рисунок 12 – Зависимость вероятности обнаружения всех сигналов от отношения сигнал-шум при частотной обработке (три сигнала)

Результаты моделирования показывают возможность повысить вероятность обнаружения всех сигналов с 0,63 до 0,87 (по результатам моделирования трех сигналов) за счет лучшего разрешения сигналов в полосе частот в сравнении с одним приемником, а также определить параметры и динамические свойства источников. **Что доказывает положение 2.**

Для дальнейшего повышения вероятности обнаружения всех сигналов разработан способ совместной частотно-временной обработки сигналов в системе нескольких приемников. Алгоритм способа дан на рисунке 13.

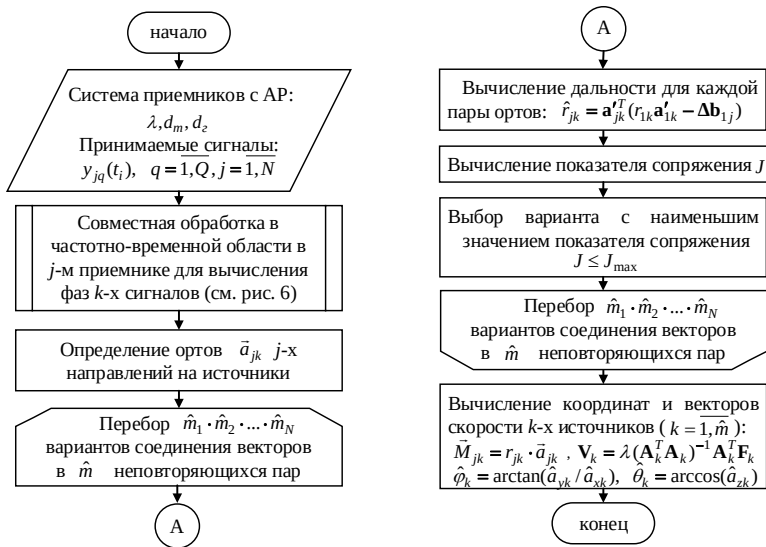


Рисунок 13 – Совместная частотно-временная обработка сигналов в системе нескольких приемников

Результаты моделирования алгоритма показаны на рисунке 14.

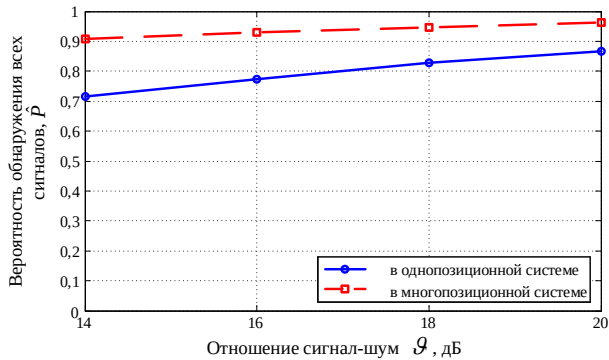


Рисунок 14 – Зависимость вероятности обнаружения всех сигналов от отношения сигнал-шум при частотно-временной обработке (три сигнала)

Результаты моделирования показывают возможность повысить вероятность обнаружения всех сигналов с 0,86 до 0,96 (по результатам моделирования трех сигналов) за счет частотно-временной обработки в системе приемников по сравнению с частотно-временной обработкой в одном приемнике, а также определить параметры и динамические свойства источников. **Что доказывает положение 3.**

В четвертой главе рассмотрены аспекты технической реализации предложенных алгоритмов обработки сигналов, в частности принципы синхронизации работы системы приемников. Дана оценка сложности предложенных алгоритмов. Рассмотрены способы и алгоритмы сопровождения источников с учетом радиометрических измерений и оценивания динамических свойств биологических сред в медицинской диагностике.

В плане получения дополнительной информации о движущихся источниках разработан способ определения тепловых свойств источников путем накопления измерений радиояростной температуры с помощью совмещенного с приемником радиометра, осуществляющего слежение в направлении упрежденных положений источников. В плане медицинского приложения технических решений, полученных в третьей главе диссертации, разработан способ измерения скорости кровотока в сосудах. Корпус прибора для измерения скорости кровотока выполнен в виде усеченного конуса. Прибор содержит один приемопередающий датчик по центру большего основания конуса, прикладываемого к участку тела, и $N = 3$ принимающих боковых датчика, расположенных по окружности большего основания конуса с взаимным угловым отклонением 120° и имеющих общий регулируемый угол наклона α к оси конуса. Способ отличается удобством регулировки по одному углу α и независимостью измерений скорости от наклона прибора. Дан расчет ошибок измерения, показывающий приемлемые результаты для диагностических приборов данного типа.

В заключении приводятся результаты диссертации, подтверждающие основные положения, выносимые на защиту.

В приложении содержатся титульные листы патентов, акты внедрения и блок-схемы разработанных алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Ключко В. К., Кузнецов В. П., **Ву Б. Х.** Оценивание параметров радиосигналов от подвижных маловысотных объектов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 12 – 23.
2. Ключко В. К., **Ву Б. Х.** Алгоритмы повышения разрешающей способности по доплеровской частоте в системе радиоприемников // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. № 3. С. 31 – 42.
3. Ключко В. К., **Ву Б. Х.** Обнаружение подвижных источников системной радиоприемников // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 4. С. 50 – 55.
4. Ключко В. К., **Ву Б. Х.** Частотно-временная обработка сигналов в доплеровском радиоприемнике // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 15 – 21.
5. Ключко В. К., **Ву Б. Х.** Частотно-временная обработка радиосигналов от нескольких движущихся объектов // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 1. С. 39 – 44.

Патенты

6. Патент RU 2792196. Способ измерения угловых координат движущихся объектов доплеровской станцией / В.К. Ключко, В.П. Кузнецов, **Ву Б.Х.** Приоритет 27.06.2022. Оpubл. 20.03.2023. Бюл. № 8.
7. Патент RU 2796230. Способ обнаружения движущихся объектов системой доплеровских приемников / Ключко В.К. **Ву Б.Х.** Приоритет 27.06.2022. Оpubл. 18.05.2023. Бюл. № 14.
8. Патент RU 2792087. Способ слежения за движущимися объектами радиостанцией с радиометром / В.К. Ключко, **Ву Б.Х.** Приоритет 01.07. 2022. Оpubл. 16.03.2023. Бюл. № 8.
9. Патент RU 2799480. Способ обработки сигналов во временной и частотной областях / Ключко В.К., **Ву Б.Х.** Приоритет 03.02.2023. Оpubл. 05.07.2023. Бюл. № 19.
10. Патент RU 2809744. Способ частотно-временной обработки сигналов / Ключко В.К., **Ву Б.Х.** Приоритет 31.05.2023. Оpubл. 15.12.2023. Бюл. № 35.
11. Патент RU 2813806. Способ измерения скорости кровотока системой ультразвуковых датчиков/ Ключко В.К., Андреева И.В., **Ву Б.Х.**, Григорьев А.С. Приоритет 13.02.2023. Оpubл. 19.02.2024. Бюл. № 5.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

12. **Ву Б.Х.** Программа для оценивания параметров радиосигналов от подвижных объектов в частотно-временной области в многопозиционных по-

луативных радиосистемах // Свидетельство РФ № 2024610207 о гос. регистрации программ для ЭВМ / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радио-технический университет им. В.Ф. Уткина». М.: ФСИС, 2024.

Тезисы докладов на конференциях и семинарах

13. **Бу Б.Х.** Влияние моделей радиоволны на точность оценок положения движущихся объектов // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2022: сборник трудов V Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2022. Т. 1. С. 8-17.

14. Ключко В.К., **Бу Б.Х.** Повышение разрешающей способности по доплеровской частоте при обнаружении движущихся объектов системой радиоприемников // Всероссийские открытые Арmandовские чтения «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»: материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром, 2022. С. 494-502.

15. Ключко В.К., **Бу Б.Х.** Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения движущихся объектов пятиканальным радиоприемником // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б. Я. Осипова. Воронеж, 2022. С. 241-246.

16. Ключко В.К., **Бу Б.Х.** Разрешение по доплеровской частоте при обработке радиосигналов // Сборник трудов XV Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 2022. С. 101-106.

17. **Бу Б.Х.**, Лук Д.В. Алгоритм оценивания числа источников сигналов системой радиоприемников // Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань: РГРТУ, 2022. С. 36-43.

18. Ключко В.К., Андреева И.В., **Бу Б.Х.**, Григорьев А.С. Алгоритм оценивания вектора скорости в многоканальной диагностической системе // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2023: сборник трудов VI Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2023. Т. 5. С. 113-118.

19. **Бу Б.Х.** Оценивание параметров радиосигналов от подвижных мало-высотных источников во временно-частотной области // Сборник трудов XXV Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA – 2023». Москва, 2023. С. 154-158.

20. Ключко В.К., **Бу Б.Х.** Частотно-временная обработка радиосигналов // Всероссийские открытые Арmandовские чтения «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»: материалы Всероссийской открытой научной конференции. Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн. Муром, 2023. С. 322-327.

21. **Бу Б.Х.** Моделирование частотно-временной обработки сигналов в системе радиоприемников // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань: РГРТУ, 2023. С. 222-226.

Бу Ба Хунг

**СПОСОБЫ И АЛГОРИТМЫ
РАЗРЕШЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
НЕСКОЛЬКИХ СИГНАЛОВ В РАДИОСИСТЕМАХ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18. 10. 24. Формат бумаги 60×84 1/16.

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

Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.