

*На правах рукописи*



**Гудков Сергей Михайлович**

**АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ  
ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ  
В СИСТЕМЕ СКАНИРУЮЩИХ РАДИОМЕТРОВ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации (технические системы)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ», РГРТУ).

Научный руководитель:

**Клочко Владимир Константинович,**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматике и информационных технологий в управлении ФГБОУ ВО «РГРТУ», г. Рязань.

Официальные оппоненты:

**Федосеева Елена Валерьевна,**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники Муромского института имени В. К. Зворыкина (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Владимирская область.

**Акименко Татьяна Алексеевна,**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры робототехники и автоматизации производства ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Концерн радиостроения «ВЕГА», г. Москва.

Защита состоится **3 марта 2021 года в 12 ч 00 мин** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на официальном сайте <http://www.rsreu.ru/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета Д 212.211.01  
д-р техн. наук, доцент



Пруцов Александр Викторович

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Развитие систем наблюдения за объектами, основанное на достижениях современной радиоэлектроники и вычислительной техники, открывает новые возможности для реализации эффективных алгоритмов формирования и обработки изображений объектов. В настоящее время востребовано направление, связанное с построением пассивных мобильных систем наблюдения за наземными и воздушными объектами, легко перевозимых на автомобилях и развешиваемых на местности, что делает подобные системы практически неуязвимыми. Такими являются радиометрические комплексы миллиметрового диапазона длин волн с антеннами небольших габаритных размеров, сканирующими пространство зоны обзора на ближних рубежах дальности.

Несмотря на очевидные преимущества скрытности и всепогодности радиометрических систем, время формирования радиотепловых изображений (РИ) и четкость самих изображений проигрывают по сравнению с системами оптического и инфракрасного диапазонов длин волн. В связи с этим возникает ряд задач диссертационного исследования, направленных на повышение эффективности функционирования мобильных сканирующих радиометрических систем наблюдения за неподвижными и медленно движущимися объектами.

**Степень разработанности темы.** Развитие радиометрических систем наблюдения за наземными, водными и воздушными объектами разной природы отмечено в работах Быстрова Р. П., Кутуза Б. Г., Николаева А. Г., Перцова С. В., Пирогова Ю. А., Соколова А. В., Тимановского А. Л., Федосеевой Е. В., Щукина Г. Г. и др. Для таких систем характерно невысокое пространственное разрешение из-за невозможности использования больших антенн и антенных решеток с большой базой. При этом наибольшей популярностью пользуются миллиметровые длины волн. Известны лаборатории в Великобритании, США и России, в частности в МГУ под руководством Ю. А. Пирогова, разрабатывающие устройства и методы ближнего пассивного радиовидения. Достигнуты определенные успехи в повышении пространственной разрешающей способности РИ. Однако в целом проблема повышения пространственного разрешения остается открытой.

Методы обработки РИ в определенной степени близки к методам обработки изображений, полученных в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн применительно к следящим бортовым системам ближней дальности и дистанционного зондирования Земли с борта космических аппаратов. Известны достижения в этой области российских ученых, в частности, Рязанского государственного радиотехнического университета, таких как Алпатов Б. А., Еремеев В. В., Кузне-

цов А. Е. и др. Вместе с тем радиометрические наблюдения на базе сканирующих радиометров миллиметрового диапазона длин волн имеют принципиальные отличия от видеонаблюдений оптического и ИК диапазонов. Первое отличие – большое время накопления сигнала и сканирования при формировании кадра изображения, занимающее минуты. Второе – малое угловое разрешение РИ, ограниченное шириной диаграммы направленности антенны (ДНА) на уровне 0,5 мощности и составляющее  $1^{\circ}$ –  $3^{\circ}$ . Это требует модификации известных методов формирования и обработки изображений и создания на их основе новых алгоритмов для более эффективной работы многофункциональной системы радиометрических наблюдений за объектами.

**Цель диссертации** заключается в разработке алгоритмов пространственно-временной обработки изображений в радиометрической сканирующей системе наблюдения за неподвижными протяженными и медленно движущимися малоразмерными объектами, позволяющих повысить скорость формирования РИ при сканировании и их пространственное разрешение, комплексировать изображения разных спектральных диапазонов в интересах улучшения качества изображений, а также определять пространственные координаты обнаруженных объектов и их траекторные параметры движения с повышенной точностью.

**Задачи исследования.** Поставленная цель достигается решением следующих основных задач.

1. Разработка и исследование алгоритмов восстановления изображений в пространственной и частотной областях для одно- и многоканальной системы с целью снижения времени формирования РИ при сканировании на этапе пространственной обработки РИ.

2. Разработка и исследование алгоритмов комплексирования двух РИ, полученных в разных спектральных диапазонах, а также РИ и оптических изображений (ОИ) с целью повышения четкости изображений объектов на РИ с сохранением их радиоярких характеристик.

3. Разработка и исследование алгоритмов взаимной ориентации систем координат в многопозиционной системе радиометров и оценивания дальностей до объектов на этапе пространственной обработки РИ.

4. Разработка и исследование более эффективных алгоритмов обнаружения и определения траекторных параметров нескольких движущихся объектов с целью их сопровождения на основе концепций пространственно-временной и совместной обработки РИ и ОИ.

**Методы исследования.** Для решения перечисленных задач используется современный аппарат математического анализа, линейной алгебры, аналитической геометрии, матричной алгебры, теории оценивания и математической статистики, методы математического и компьютерного моделирования.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке новых способов и алгоритмов восстановления и комплексирования изображений, взаимной ориентации системы радиометров и определения пространственных координат объектов наблюдения на основе предложенной концепции пространственно-временной обработки изображений и классификации векторов направлений на объекты.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Алгоритмы двухэтапного восстановления изображений в пространственной и частотной областях для одно- и четырехканальной системы, отличающиеся одномерной обработкой строк и столбцов матрицы изображения, позволяют на этапе пространственной обработки уменьшить количество вычислительных операций в  $N/2$  раз для одноканальной системы и в  $2N$  раз для четырехканальной (по количеству  $N$  строк и столбцов матрицы РИ) за счет рациональной организации вычислений по сравнению с двумерной обработкой и уменьшить время формирования РИ в 2 – 3 раза за счет увеличения шага сканирования по углу места с сохранением необходимой точности восстановления.

2. Алгоритмы комплексирования изображений разных спектральных диапазонов, отличающиеся передачей сегментов матрицы изображения объектов диапазона лучшего пространственного разрешения матрице изображения худшего разрешения, позволяют повысить четкость изображений в 5 – 10 раз до наилучшего разрешения с сохранением радиояркихостных характеристик и получать на этой основе эталонные изображения объектов, используемые в алгоритме классификации изображений по принадлежности тем или иным объектам и в алгоритме оценивания аппаратной функции радиометра.

3. Алгоритмы взаимной ориентации систем координат приемников и оценивания дальностей до контрольных объектов, отличающиеся распределением ортов векторов направлений на контрольные объекты по достаточному условию их сопряжения, позволяют за счет повышения точности взаимной ориентации уменьшить СКО ошибок определения дальностей до объектов и их пространственных координат одновременно нескольких объектов в 5 раз в условиях моделирования при значительно меньших вычислительных затратах по сравнению с известным аналогом, основанным на необходимом условии сопряжения.

4. Алгоритмы определения траекторных параметров движения нескольких объектов с помощью пространственно-временной обработки наблюдений – ортов направлений на объекты, найденных предварительной обработкой РИ и ОИ, с учетом моментов времени образования ортов и распределением этих векторов по принадлежности объектам с учетом радиояркой температуры, позволяют в течение одного периода сканирования в системе трех радиометров, совмещенных с оптическими датчиками, определять дальности до объектов на

расстоянии 50 – 100 м с погрешностью до 0,3 – 0,7 м при шаге сканирования в  $0,3^\circ$  с учетом скорости движения объектов, что в 10 раз точнее, чем без учета скорости. При сканировании в последовательности двух и более периодов в системе двух радиометров алгоритмы позволяют обнаруживать все объекты с вероятностью, близкой к 1, в модельном эксперименте.

**Практическая значимость работы.** Разработанные алгоритмы при их реализации в существующих пассивных радиометрических системах слежения за объектами, совмещенных с оптическими датчиками, позволяют повысить эффективность функционирования таких систем в плане уменьшения количества вычислительных операций, повышения четкости изображений, увеличения вероятности обнаружения всех объектов, точности определения их пространственных координат и траекторных параметров движения.

**Достоверность полученных результатов** определяется корректностью используемых математических моделей РИ, их соответствием известным описаниям, корректностью математических преобразований на основе моделей РИ при разработке алгоритмов, подтверждением работоспособности алгоритмов компьютерным моделированием и их экспериментальной проверкой на реальных изображениях, согласованием выводов аналитических и экспериментальных исследований и близостью результатов разных подходов.

**Результаты внедрения.** Результаты диссертации внедрены в опытный образец изделия «Радиометрический комплекс» (3- и 8- миллиметрового диапазона радиоволн), разработанный и изготовленный в рамках составной части опытно-конструкторской работы «Егорьевец-ИРТМ-Р», выполненной по государственному контракту №1416187143542010347001012/14-4-51/423/3к от 03.06.2014 при сотрудничестве с ООО «НТЦ-Версия» (г. Климовск, Московская обл.) и АО «Рязанская радиоэлектронная компания» (г. Рязань). А также результаты диссертации внедрены в учебный процесс Рязанского государственного радиотехнического университета. Внедрения подтверждены соответствующими актами.

Результаты диссертации использованы в научно-исследовательской работе, проведенной кафедрой АИТУ РГРТУ при поддержке гранта ведущим научным школам РФ (НШ-7116.2016.8).

**Апробация работы.** Результаты исследований, составляющих основное содержание диссертации, докладывались на 8 международных и 4 всероссийских научно-технических конференциях и 1 научно-практическом семинаре: Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании – СТНО» (РГРТУ им. В. Ф. Уткина, г. Рязань, 2017–2018 гг.); 19-я и 20-я Международные научно-технические конферен-

ции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA» (РНТОРЭС имени А. С. Попова, г. Москва, 2017–2018 гг.); 7-я Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн» (МИ ВлГУ, г. Муром, Владимирская область, 2017 г.); сборник тезисов докладов 8-го научно-практического семинара «Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике» (МИ ВлГУ, г. Муром, Владимирская область, 2017 г.); 7-я Международная научно-техническая конференция «Космонавтика. Радиотехника. Геоинформатика» (РГРТУ им. В. Ф. Уткина, г. Рязань, 2017 г.); 7-я Всероссийская научная конференция «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (НЦ МТУСИ, г. Москва, 2017 г.); 11-я Всероссийская научная конференция «Радиолокация и радиосвязь» (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва, 2017 г.); 23-я, 24-я и 25-я Международные научно-технические конференции «Радиолокация, навигация, связь» (ВГУ и АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, 2017–2019 гг.); 1-я Всероссийская научно-техническая конференция «Современные технологии обработки сигналов – СТОС-2018» (НЦ МТУСИ, г. Москва, 2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 статей в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК, из них 1 статья, входящая в БД SCOPUS, 7 патентов на способ, 15 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем работы составляет 188 с., в том числе основной текст – 153 с., 53 рисунка, 10 таблиц, библиографический список из 117 наименований на 12 с., приложение – 26 с.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, определены цель и основные задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** рассмотрена математическая модель РИ. Предложена концепция пространственно-временной обработки РИ, заключающаяся в разделении наблюдений за точечными объектами во времени на периоды, которые циклически повторяются. За время одного периода приемники синхронно сканируют зону обзора. По результатам сканирования фиксируются угловые координаты направлений, для которых амплитуда принимаемых сигналов в оптическом или радиометрическом диапазонах длин волн превышает эмпирически заданный порог обнаружения полезного сигнала. Запоминаются моменты времени фиксации угловых направлений и радиояркостьная температура.

Пространственно-временная обработка дополняется концепцией совместной обработки РИ и ОИ, согласно которой осуществляется передача более точных угловых координат объектов от оптических приемников радиометрическим с целью измерения радиояркой температуры, после чего решается задача обнаружения объектов, определения их пространственных координат и траекторных параметров.

При фиксированном угловом положении антенна радиометра в момент времени  $t$  аккумулирует действие поля  $\{u(t, \theta, \varphi, \omega)\}$  в угломерной области  $G_{\theta, \varphi}$ , ограниченной шириной ДНА (на уровне 0,5 мощности), в заданном диапазоне частот  $\Omega = [\omega_1, \omega_2]$  и формирует сигнал  $s(t)$ . После прохождения ВЧ-усилителя и квадратичного детектора этот сигнал в  $i$ -х,  $j$ -х,  $k$ -х дискретных значениях угла места  $\theta_i$ , азимута  $\varphi_j$  и частоты  $\omega_k$  с точностью до ошибок дискретизации представляется моделью:

$$s_1(t) = \left( \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n g(i, j) \sum_k u(t, i, j, k) \right)^2 + \xi^2(t) + 2\xi(t) \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n g(i, j) \sum_k u(t, i, j, k),$$

где  $g(i, j)$  – ДНА;  $\xi(t)$  – шум аппаратуры.

В НЧ-фильтре осуществляется накопление сигнала  $s_1(t)$  на промежутке времени  $[t-T, t]$  и усреднение его флуктуирующих составляющих, что дает сигнал  $\bar{s}_1(t)$ . После центрирования  $\bar{s}_1(t)$  действует следующая модель сигнала  $s_2(t)$  на момент времени  $t$ :

$$s_2(t) = \int_{t-T}^t w(\tau) \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n g^2(i, j) \bar{U}^2(\tau, i, j) d\tau + p(t), \quad (1)$$

где  $w(\tau) = 1/T$ ,  $\tau \in [t-T, t]$ , – весовая функция ФНЧ;  $\bar{U}^2(\tau, i, j)$  – усредненный по частоте  $\omega_k$  квадрат амплитуды поля  $u(t, i, j, k)$ ;  $p(t)$  – шум.

Сканирование антенной зоны обзора осуществляется построчно в растровом режиме. При фиксированном  $i$ -м положении угла места  $\theta_i$  и изменении значений азимута  $\varphi_j$  в  $j$ -х дискретных отчетах производится накопление сигнала по  $k$ -м отсчетам времени, при этом модель (1) для  $j$ -го отчета по  $i$ -й строке записывается как

$$s_2(i, j) = \sum_{k=j-L}^j w(k) \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n g^2(i_1, j_1) \bar{U}^2(i+i_1, k+j_1) + p(i, j), \quad (2)$$

где  $L$  – количество элементов дискретизации азимута  $\varphi_j$ , отсчитываемых за время фильтрации  $T$ .

Преобразование (2), представленное в виде двухэтапной процедуры:

$$s_2(i, j) = \sum_{k=j-L}^j w(k) z(i, k) + p(i, j), \quad z(i, k) = \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n g^2(i_1, j_1) \bar{U}^2(i+i_1, k+j_1), \quad (3)$$

позволяет восстановлением  $z(i, k)$  из первого уравнения (3) с помощью одномерного восстанавливающего фильтра скомпенсировать искажающее действие ФНЧ. Тогда модель (3) принимает вид:



$$s_2(i, j) = \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n g^2(i_1, j_1) \overline{U}^2(i+i_1, j+j_1) + p(i, j) \quad (4)$$

или в общем виде для  $Q$  независимых  $q$ -х измерительных каналов:

$$y_q(i, j) = \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n \alpha_q(i_1, j_1) x(i+i_1, j+j_1) + p_q(i, j), \quad q = \overline{1, Q}, \quad (5)$$

где  $y_q(i, j) = s_2(i, j)$  – результат наблюдения в  $q$ -м канале;  $\alpha_q(i, j) = g^2(i, j)$  – аппаратная функция (АФ), учитывающая действие ДНА и тракта первичной обработки на входной сигнал;  $x(i, j) = \overline{U}^2(i, j)$  – искомые величины, характеризующие среднюю мощность излучения в  $i$ -м,  $j$ -м угловом направлении.

Элементы  $y_q(i, j)$  запоминаются. Далее совокупность матриц РИ  $Y_q = \{y_q(i, j)\}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , где  $i$  меняется с шагом  $h$  ( $h \geq 1$ ) с учетом сканирования по углу места, поступают на алгоритмы обработки РИ.

Резерв времени, обусловленный накоплением сигнала в радиометре, предлагается направить на расширение функциональных возможностей и повышение эффективности работы радиометров.

Обзор направлений в области радиометрических наблюдений подтверждает перспективность направления создания мобильных персональных радиометров, легко развертываемых на местности с целью образования многопозиционной системы. В этом плане предложена концепция пространственно-временной обработки РИ. Радиометры, взаимно разнесенные в пространстве и совмещенные с оптическими датчиками, одновременно наблюдают несколько движущихся объектов, периодически сканируя локализованную с помощью оптики область зоны обзора.

Сформулированы концепция повышения надежности системы радиометров за счет распараллеливания операций обработки РИ и выбора наблюдений, отвечающих критерию точности сопряжения, и концепция формирования РИ в системе совмещенных радиометрических и оптических приемников для быстрой локализации положения объекта.

**Во второй главе** предложены алгоритмы восстановления изображений неподвижных протяженных объектов по результатам одного периода сканирования радиометров с целью повышения пространственного разрешения в матрицах РИ.

Дан обзор существующих методов восстановления двумерных изображений: матричный, градиентный и итерационный, метод Винера. Преимущество матричного метода решения уравнения (5) по критерию МНК заключается в возможности многоканальной обработки при записи матриц  $Y_q$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , в один вектор. Однако большая размерность обрабатываемой матрицы позволяет реализовать метод только для небольших фрагментов РИ.

Избежать “проклятия размерности” матричного метода позволяет двухэтапная процедура, которая заключается в представлении одноканальной ( $Q = 1$ ) модели (5) для АФ, разделяемых по переменным:

$$y(i, j) = \sum_{i_1=-m}^m \alpha(i_1) \sum_{j_1=-n}^n x(i+i_1, j+j_1) \cdot \beta(j_1) + p(i, j). \quad (6)$$

При этом (6) записывается в матричной форме:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{P}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{Y} = \{y(i, j)\}$  – матрица РИ;  $\mathbf{A} = \{a(i, k)\}$  – матрица элементов  $a(i, k)$ , полученных заполнением изначально нулевой матрицы  $\mathbf{A}$  значениями функции  $\alpha(i)$  в соответствии с (6);  $\mathbf{X}$  – матрица искомого изображения;  $\mathbf{B}$  – матрица элементов  $b(s, j)$ , полученных заполнением изначально нулевой матрицы  $\mathbf{B}$  значениями функции  $\beta(j)$  в соответствии с (6);  $\mathbf{P}$  – матрица шумов. Пропущенные строки матрицы  $\mathbf{Y}$  учитываются введением соответствующих нулевых строк в матрицах  $\mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ .

Для четырех каналов (двух основных и двух смешанных каналов) модель (5) представляется в виде следующего матричного выражения:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{P} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_{12} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{Y}$  – блочная матрица;  $\mathbf{A}$  – блочный вектор-столбец;  $\mathbf{B}$  – блочный вектор-строка.

Двухэтапный алгоритм, отвечающий критерию минимума следа матрицы  $\text{Tr}[(\mathbf{Y}-\mathbf{A}\mathbf{X}\mathbf{B})^T \cdot (\mathbf{Y}-\mathbf{A}\mathbf{X}\mathbf{B})]$ , для (7) и (8) сводится к следующему.

1. Вначале обрабатываются строки матрицы РИ  $\mathbf{Y}$ :  $\hat{\mathbf{Z}} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{H}_B$ ,

что реализуется в процессе формирования строк.

2. Затем обрабатываются столбцы матрицы  $\hat{\mathbf{Z}}$ :  $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{H}_A \cdot \hat{\mathbf{Z}}$ .

Матрицы весовых коэффициентов  $\mathbf{H}_A = (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \mathbf{A}^T$  и  $\mathbf{H}_B = \mathbf{B}^T (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1}$  вычисляются заранее с применением процедур регуляризации.

Двухэтапный алгоритм в частотной области следующий.

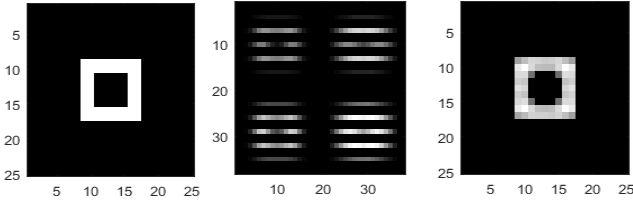
1. Заранее вычисляются спектры АФ  $\alpha_f(i)$  и  $\beta_f(j)$ , используемые при вычислении передаточных функций Винера.

2. В процессе сканирования формируются  $i$ -е строки матрицы  $\mathbf{Y}$  и подвергаются одномерному ДПФ. Полученные спектры строк по  $j$   $y_f(i, j)$  умножаются на передаточную функцию Винера  $w_{f,1}(j)$ . В результате получают спектры промежуточных оценок  $z_f^*(i, j) = y_f(i, j) \cdot w_{f,1}(j)$ ,  $i$ -const, которые с помощью обратного одномерного ДПФ переводятся в пространственную область и дают промежуточные оценки  $\mathbf{Z}^* = \{z_f^*(i, j)\}$ .

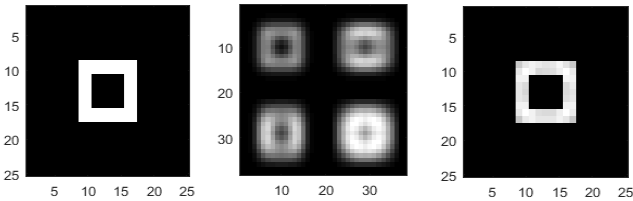
3. Затем для всех столбцов матрицы  $\mathbf{Z}^*$  с помощью одномерного ДПФ находят спектры столбцов по  $i$   $z_f^*(i, j)$ , которые умножаются на передаточную функцию  $w_{f,2}(i)$ . В результате получают спектры

$x_f^*(i,j) = z_f^*(i,j) \cdot w_{f,2}(i)$ , которые с помощью обратного одномерного ДПФ для каждого  $j$ -го столбца переводятся в пространственную область и дают искомое восстановленное изображение  $X^* = \{x^*(i,j)\}$ .

На рис. 1 и 2 показано двухэтапное восстановление в пространственной области с прореживанием строк матрицы РИ с шагом  $h$  ( $h = 3$ ) и без прореживания ( $h = 1$ ). Слева направо: объект, его РИ в 4 каналах и восстановленное изображение матричным методом.



**Рисунок 1 – Двухэтапное восстановление с шагом  $h = 3$**



**Рисунок 2 – Двухэтапное восстановление с шагом  $h = 1$**

В третьей главе предложены алгоритмы комплексирования изображений неподвижных протяженных объектов, полученных в разных спектральных диапазонах, в том числе в оптическом диапазоне. Матрицы таких изображений имеют разное пространственное разрешение. Для получения матриц с одинаковым разрешением, соответствующим диапазону лучшего разрешения, разработаны следующий алгоритм и его модификации.

1. В результате сканирования антеннами в разных частотных диапазонах формируются матрицы РИ  $Y_1 = \{y_1(i,j)\}$  и  $Y_2 = \{y_2(i,j)\}$ .

2. Матрица  $Y_2$  лучшего пространственного разрешения разбивается на  $K$  непересекающихся однородных по амплитуде подобластей  $D_1, D_2, \dots, D_K$  с помощью оператора сегментации. В результате сегментации получается матрица  $S = \{S(i,j)\}$ , где  $S(i,j)$  – номер сегмента, которому принадлежит  $i$ -й,  $j$ -й элемент матрицы  $Y_2$ , поставленный также в соответствие  $i$ -му,  $j$ -му элементу матрицы  $Y_1$ .

3. В матрице  $Y_1$  худшего разрешения для каждого  $s$ -го сегмента вычисляется средняя радиометрическая амплитуда  $\tilde{y}_1(s)$  усреднением  $i$ -х,  $j$ -х элементов с меткой  $s$ :

$$\tilde{y}_1(s) = (1/n_s) \sum_i \sum_j y_1(i,j), \quad i, j : s = S(i,j),$$

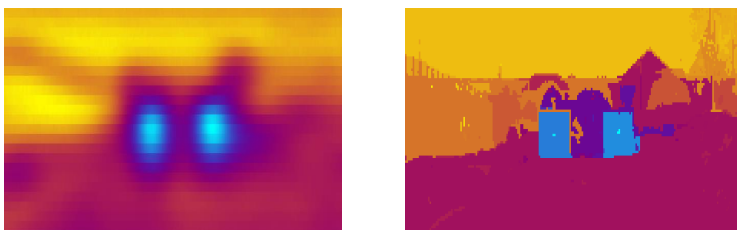
где  $n_s$  – количество элементов матрицы  $Y_1$  с меткой  $s$ .

4. Полученная средняя амплитуда присваивается всем  $i$ -м,  $j$ -м элементам матрицы  $Y_1$  с меткой  $s$  и запоминается как  $\hat{x}_1(i, j) = \tilde{y}_1(s)$ .

5. В результате из матрицы  $Y_1$  формируется матрица  $\hat{X}_1 = \{\hat{x}_1(i, j)\}$  изображения с пространственным разрешением матрицы  $Y_2$  и температурными характеристиками частотного диапазона матрицы  $Y_1$ .

Если  $Y_2$  используется как видеоизображение, то дополнительно осуществляются масштабирование  $Y_2$  и пересчет координат в  $Y_1$ .

На рис.3 слева направо показано в цвете РИ двух объектов в форме щитов (матрица  $Y_1$ ), полученное в 3мм диапазоне и преобразованное из  $Y_1$  в  $\hat{X}_1$  на основе отсегментированного видеоизображения  $Y_2$  в соответствии с предложенным алгоритмом.



**Рисунок 3 – Совместная обработка РИ и видеоизображения**

Матрицы, подобные  $\hat{X}_1$ , используются в качестве эталонных РИ в алгоритме классификации РИ нескольких объектов, наблюдаемых в системе радиометров под разными ракурсами. Предложен алгоритм классификации, который анализирует сегменты изображений нескольких объектов в системе нескольких пространственно распределенных радиометров по принадлежности тем или иным объектам путем сравнения полученных сегментов с эталонными изображениями. Вместо простого перебора вариантов соединения нескольких наблюдаемых РИ с эталонными изображениями предложен рациональный направленный перебор на основе ранжирования радиометров. Выведены показатели близости изображений, не требующие операций восстановления, что позволяет сократить объем вычислений. Показаны результаты натурального эксперимента с применением разработанного алгоритма, которые были выполнены с помощью радиометрического комплекса.

Радиометрический комплекс – измерительный двухчастотный радиотепловой модуль, предназначенный для экспериментальной оценки радиотепловых контрастов исследуемых объектов.

**В четвертой главе** предложены алгоритмы оценивания пространственных координат и траекторных параметров нескольких движущихся малоразмерных объектов на базе многопозиционной радиомет-

рической системы, совмещенной с оптическими датчиками. Для двухпозиционной системы разработаны алгоритмы взаимной ориентации. Один из них следующий.

1. Устанавливается стереопара из двух взаимно удаленных радиометров при известном базовом векторе  $\mathbf{b}$ , соединяющем центр системы координат первого радиометра с центром второго.

2. Формируются  $m$  пар неповторяющихся ортов  $\mathbf{a}_1(i)$  и  $\mathbf{a}_2(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , векторов направлений на  $i$ -е контрольные объекты, где  $j_i$  – номер орта второго радиометра, поставленного в соответствие  $i$ -му орту первого.

3. Рассматривается матрица  $\mathbf{P}$  поворота осей координат второго приемника заданием в ее составе углов поворота  $\alpha, \beta, \gamma$ .

4. Для каждой пары ортов  $\mathbf{a}_1(i)$  и  $\mathbf{a}_2(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , вычисляются МНК-оценки дальностей  $\hat{r}_1(i)$  и  $\hat{r}_2(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , по формуле:

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \hat{r}_2 \\ \hat{r}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_2^T \mathbf{a}_2 & -\mathbf{a}_2^T \mathbf{P}_1 \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2^T \mathbf{P}_1 \mathbf{a}_1 & -\mathbf{a}_1^T \mathbf{a}_1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{a}_2^T \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{a}_1^T \mathbf{P}_1^T \mathbf{b}_1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

а также оценки пространственных координат объектов  $\hat{\mathbf{M}}_1(i)$  и  $\hat{\mathbf{M}}_2(j_i)$ :

$$\hat{\mathbf{M}}_1(i) = \hat{r}_1(i) \cdot \mathbf{a}_1(i), \quad \hat{\mathbf{M}}_2(j_i) = \hat{r}_2(j_i) \cdot \mathbf{a}_2(j_i), \quad i = \overline{1, m}.$$

5. Вычисляется суммарный показатель  $I$  достаточного условия сопряжения  $m$  пар векторов:

$$I = \sum_{i=1}^m \|\hat{\mathbf{M}}_1(i) - \mathbf{b} - \mathbf{P} \hat{\mathbf{M}}_2(j_i)\|. \quad (10)$$

6. На множестве значений  $\alpha, \beta, \gamma$  выбираются углы, при которых показатель (10) принимает наименьшее значение. Соответствующая выбранным углам матрица  $\mathbf{P}$  используется далее для определения дальностей и пространственных координат произвольных объектов.

Показано преимущество данного алгоритма по сравнению с известным альтернативным алгоритмом, основанным на необходимом условии сопряжения – компланарности трех векторов, в значительно меньшем количестве вычислительных операций и ошибок оценивания матрицы  $\mathbf{P}$ .

Для обнаружения и траекторного сопровождения нескольких  $i$ -х движущихся объектов ( $i = \overline{1, m}$ ,  $m$  – число объектов) в системе  $k$ -х радиометров ( $k = \overline{1, n}$ ,  $n$  – число радиометров,  $n \geq 2$ ), совмещенных с оптическими датчиками, разработаны два подхода. При первом, алгебраическом, подходе составляется система уравнений связи координат ортов направлений на  $i$ -й объект в отдельном периоде сканирования для  $(n - 1)$  пар  $k$ -х приемников, ориентированных  $\mathbf{P}_k$  и  $\mathbf{b}_k$ :

$$r_1(i)\mathbf{a}_1(i) - P_k r_k(j_k)\mathbf{a}_k(j_k) + \Delta\mathbf{M}_{1,k} - \mathbf{b}_k = \mathbf{e}_k, \quad k = \overline{2, n}, \quad (11)$$

где  $\Delta\mathbf{M}_{1,k} = \mathbf{V}_1(i)\Delta t_k(i)$  – вектор изменения координат  $i$ -го объекта за время  $\Delta t_k(i) = t_k(j_k) - t_1(i)$  между двумя моментами фиксации ортов  $\mathbf{a}_1(i)$  и  $\mathbf{a}_k(j_k)$ , где номер  $j_k$  поставлен в соответствие номеру  $i$  по принадлежности одному объекту;  $\mathbf{V}_1(i)$  – вектор скорости изменения координат

$i$ -го объекта в системе первого приемника.

Система уравнений (11) для каждого варианта соединения ортов решается матричным методом по критерию минимума суммы квадратов норм векторов ошибок сопряжения  $J = \sum_{k=2}^n \|\mathbf{e}_k\|^2$  относительно

дальностей до объектов  $r_k(i)$ ,  $i = \overline{1, \hat{m}}$ , где  $\hat{m}$  – оценка числа  $i$ -х объектов. Обнаружение объектов осуществляется в одном периоде сканирования последовательным выделением  $\hat{m}$  непересекающихся групп векторов направлений на предполагаемые объекты с наименьшими значениями суммарных показателей  $J_\Sigma$ , вычисляемых как на основе (11) с подстановкой найденных оценок дальностей, так и с учетом близости радиоярких температур в направлении выбранных векторов.

Проводится аналитическое и численное исследование точности оценок и выявляются благоприятные расположения приемников, обеспечивающие близкие к ортогональным направления на объекты.

В соответствии со вторым алгоритмическим подходом разработан более устойчивый к условиям наблюдения (по сравнению с алгебраическим) алгоритм обнаружения и оценивания параметров движущихся объектов в последовательности нескольких периодов сканирования.

Алгоритм основан на идеях завязки траекторий нескольких объектов с оцениванием скорости движения объектов на основе оценок положения, найденных в соседних периодах, с учетом моментов времени образования ортов. Для каждой группы оценок, предположительно относящейся к объекту, вычисляются рекуррентно оценки траекторных параметров и показатель правдоподобия группы, зависящий от точности сопряжения векторов, а также от невязок при экстраполяции координат. Обнаружение объектов осуществляется в последнем периоде сканирования выделением непересекающихся групп оценок с наилучшими показателями правдоподобия.

Показаны преимущества разработанных алгоритмов в сравнении с известными аналогами методом компьютерного моделирования.

**Заключение.** В диссертации получены следующие основные новые научные и практические результаты.

1. Сформулированы концепции построения радиометрической системы: пространственно-временной обработки РИ, позволяющей комплексно решать задачи эффективного формирования и обработки изображений объектов; формирования РИ в совмещенной системе радиометрических и оптических приемников, позволяющей сократить время обзора в 2 - раза при формировании РИ объекта; повышения надежности системы в целом и точности оценок координат за счет предложенной структуры системы радиометров

2. Разработаны алгоритмы двухэтапного восстановления изображений в пространственной и частотной областях для одно- и четырехканальной системы, отличающиеся одномерной обработкой строк и столбцов матрицы изображения, позволяющие на этапе пространственной обработки уменьшить количество вычислительных операций в  $N/2$  раз для одноканальной системы и в  $2N$  раз для четырехканальной (по количеству  $N$  строк и столбцов матрицы РИ) за счет рациональной организации вычислений по сравнению с двумерной обработкой и уменьшить время обзора в 2 – 3 раза за счет увеличения шага сканирования по углу места с сохранением необходимой точности восстановления.

3. Разработаны алгоритмы комплексирования и анализа изображений разных спектральных диапазонов, отличающиеся передачей сегментов матрицы изображения объектов диапазона лучшего пространственного разрешения матрице изображения худшего разрешения, позволяющие повысить четкость изображений в 5 – 10 раз до наилучшего разрешения с сохранением радиоярких характеристик и получать на этой основе эталонные изображения объектов, используемые в алгоритме классификации изображений по принадлежности тем или иным объектам и в алгоритме оценивания АФ радиометра.

4. Разработаны алгоритмы взаимной ориентации систем координат приемников и оценивания дальностей до контрольных объектов, отличающиеся распределением ортов векторов направлений на контрольные объекты по достаточному условию их сопряжения, позволяющие за счет повышения точности взаимной ориентации уменьшить СКО ошибок определения дальностей до объектов и их пространственных координат одновременно нескольких объектов в 5 раз в условиях моделирования при значительно меньших вычислительных затратах по сравнению с известным аналогом, основанным на необходимом условии сопряжения.

5. Разработаны алгоритмы определения траекторных параметров движения нескольких объектов с помощью пространственно-временной обработки наблюдений – ортов направлений на объекты,

найденных в совмещенной системе радиометрических и оптических приемников, отличающиеся учетом моментов времени образования ортов и распределением этих векторов по принадлежности объектам с учетом радиояркостной температуры, позволяющие в течение одного периода сканирования в системе трех радиометров определять дальности до объектов на расстоянии 50 – 100 м с погрешностью до 0,3 – 0,7 м при шаге сканирования в  $0,3^\circ$  с учетом скорости движения объектов, что в 10 раз точнее, чем без учета скорости. При сканировании в последовательности двух и более периодов в системе двух радиометров алгоритмы позволяют обнаруживать все объекты с вероятностью, близкой к 1, в модельном эксперименте.

6. Проведено исследование разработанных алгоритмов методом компьютерного моделирования, получены характеристики работы алгоритмов в зависимости от условий наблюдения и шумов, показавшие их работоспособность.

7. Создано программное обеспечение предложенных алгоритмов, использованное при моделировании и натурных испытаниях.

#### **Список научных работ, опубликованных по теме диссертации**

##### **Статьи в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК**

1. Клочко В. К., Макарова О. Н., Гудков С. М., Кошелев А. А. Алгоритм формирования теплового изображения при радиометрическом наблюдении // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 3. С. 34-36.
2. Клочко В. К., Гудков С. М. Алгоритмы двухэтапного восстановления радиотепловых изображений // Вестник РГРТУ. 2017. № 1. С. 3-9.
3. Клочко В. К., Гудков С. М., Кошелев А. А. Алгоритмы формирования изображений объектов в радиометре с двумя антеннами // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 1. С. 18-21.
4. Клочко В. К., Гудков С. М. Повышение эффективности формирования изображений в радиометре со сканирующими антеннами // Радиотехника. 2017. № 5. С. 158-165.
5. Клочко В. К., Гудков С. М., Макарова О. Н. Алгоритмы оценивания аппаратной функции при наблюдении за несколькими объектами // Радиотехника. 2017. № 5. С. 166-172.
6. Клочко В. К., Гудков С. М. Алгоритмы обнаружения объектов, измерения дальности и перемещений объектов в системе нескольких радиометров // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 4. С. 36-43.
7. Клочко В. К., Гудков С. М. Классификация радиотепловых изображений объектов в системе нескольких радиометров // Вестник РГРТУ. 2017. № 4 (выпуск 62). С. 18-25.



8. Клочко В. К., Гудков С. М. Алгоритм оценивания параметров изображений объектов по данным радиометрических наблюдений // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 4. С. 20-22.
9. Клочко В. К., Гудков С. М., Нгуен К. Х. Оценивание пространственных координат объектов в системах тепло- и радиовидения // Вестник РГРТУ. 2018. № 1 (выпуск 63). С. 27-33.
10. Гудков С. М. Исследование алгоритма обнаружения объектов в радиометрической системе позиционирования // Вестник РГРТУ. 2018. № 1. С. 34-39.
11. Клочко В. К., Гудков С. М., Нгуен К. Х. Сравнительный анализ методов оценивания координат объектов в пассивной системе радиовидения // Вестник РГРТУ. 2018. № 2. С. 23-28.
12. Клочко В. К., Гудков С. М., Нгуен К. Х. Задачи пространственно - временной обработки изображений объектов в пассивной системе радиовидения // Радиотехника. 2018. № 5. С. 78-85.
13. Клочко В. К., Гудков С. М. Пространственно - временная обработка изображений объектов в пассивных системах радиовидения // Автоматика. 2018. № 4 (выпуск 54). С. 35-42.
14. Клочко В. К., Гудков С. М., Нгуен К. Х. Анализ погрешностей при передаче координат объектов в системе совмещенных приемников // Вестник РГРТУ. 2019. № 3 (выпуск 69). С. 33-41.

#### **Статьи в изданиях, входящих в БД SCOPUS**

15. V. K. Klochko, S. M. Gudkov. Space-Time Processing of Object Images in Passive Radio Imaging Systems // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2018, vol.54, №4, p. 348-354.

#### **Патенты**

16. Патент RU 2619916. Радиометрический комплекс // Гудков С. М., Кошелев А. А., Логинов С. Н., Митин С. А., Рода А. В. Приоритет 17.05.2016. Оpubл. 19.05.2017.
17. Патент RU 2622899. Способ определения аппаратной функции радиометра // Гудков С. М., Клочко В. К., Митин С. А., Архипов С. Г., Макарова О. Н., Логинов С. Н., Кузнецов В. П., Кошелев А. А. Приоритет 25.05.2016. Оpubл. 21.06.2017.
18. Патент RU 2646434. Способ формирования изображений объектов в радиометре с двумя антеннами // Клочко В. К., Гудков С. М. Приоритет 23.01.2017. Оpubл. 06.03.2018.
19. Патент RU 2656355. Способ повышения разрешающей способности изображений в многоканальных РТЛС // Клочко В. К., Гудков С. М. Приоритет 29.03.2017. Оpubл. 05.06.2018.
20. Патент RU 2657331. Способ формирования температурной карты местности // Клочко В. К., Гудков С. М., Кошелев А. А. Приоритет 20.02.2017. Оpubл. 13.06.2018.

21. Патент RU 2661903. Способ повышения разрешающей способности радиометрических изображений // Гудков С. М., Ключко В. К., Кошелев А. А., Митин С. А. Приоритет 15.02.2017. Оpubл. 23.07.2018.
22. Патент RU 2702228. Способ двухэтапного восстановления радиотепловых изображений // Гудков С. М., Ключко В. К. Приоритет 22.02.2017. Оpubл. 07.10.2019

### **Тезисы докладов на конференциях**

23. Гудков С. М. Сканирующий радиометр миллиметрового диапазона с двумя антеннами // Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2017): сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. в 8 т. Т. 3. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 1-3 марта 2017. С. 12 – 15.
24. Гудков С. М., Ключко В. К. Метод повышения разрешающей способности радиотеплового изображения // Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2017): сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. в 8 т. Т. 3 / под общ. ред. О. В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 1-3 марта 2017. С. 7 – 12.
25. Гудков С. М., Ключко В. К. Метод повышения разрешающей способности радиотеплового изображения // сб. докл. междунар. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (DSPA-2017) в 2 т. Т.1, 29 - 31 марта 2017 г., Москва. С. 361-365.
26. Гудков С. М. Алгоритмы повышения разрешающей способности радио-теплолокационных изображений объектов // сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC-2017) в 3 т. Т.3, 18-20 апреля 2017 г., Воронеж, С. 955-962.
27. Ключко В. К., Гудков С. М. Дистанционное зондирование объектов земной поверхности в системе нескольких радиометров // сб. докл. всеросс. конф. "Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн ", 27 - 29 июня 2017 г., Муром. С. 236-242.
28. Гудков С. М. Распознавание типов объектов на радиотепловых изображениях в системе нескольких радиометров // Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Прикладные вопросы формирования и обработки сигналов в радиолокации, связи и акустике: сб. тр. всеросс. науч. конф. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017 г. С. 14-16. Режим доступа: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2017/tezis-2017/section.html>
29. Гудков С. М. Дистанционное зондирование объектов земной поверхности с помощью системы из радиометров с двумя антеннами // сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. "Космонавтика. Радиотехника. Геоинформатика", 4-6 октября 2017 г., Рязань. С. 368-373.

30. Гудков С. М. Алгоритм траекторного сопровождения объектов по данным радиометрических наблюдений // сб. докл. всеросс. конф. "Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации" (РСПОВИ-2017), 25-27 октября 2017 г., Москва. С. 50-54.
31. Ключко В. К., Гудков С. М. Пространственно-временная обработка радиотепловых изображений объектов // сб. докл. всеросс. конф. "Радиолокация и радиосвязь", 27-29 ноября 2017 г., Москва. С. 28-32.
32. Гудков С. М. Оценки пространственных координат объектов в многопозиционной радиометрической системе // Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2018): сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. в 8 т. Т. 1 / под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 28 февраля - 2 марта 2018 г. С. 80 - 84.
33. Гудков С. М., Ключко В. К., Нгуен К. Х. Оценки пространственных координат объектов в многопозиционной радиометрической системе // сб. докл. междунар. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (DSPA-2018) в 2 т. Т.2, 28-30 марта 2018 г., Москва. С. 472-477.
34. Гудков С. М. Алгоритмы формирования радиоизображений объектов в радиометрической системе // сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC-2018) в 5 т. Т.2, 17-19 апреля 2018 г., Воронеж. С. 290-298.
35. Гудков С. М., Ключко В. К. Исследование алгоритмов оценивания координат объектов в пассивной системе радиовидения // сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC-2018) в 5 т. Т.2, 17-19 апреля 2018 г., Воронеж. С. 299-307.
36. Гудков С. М., Ключко В. К. Обнаружение сигналов в направлении на движущиеся объекты в пассивной сканирующей системе // сб. тр. всеросс. науч.-техн. конф. "Современные технологии обработки сигналов" (СТОС-2018), 31 октября-2 ноября 2018 г., Москва. С. 207-211.
37. Гудков С. М., Ключко В. К., Нгуен К. Х. Пассивное обнаружение и сопровождение объектов в системах ближнего зондирования // сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC-2019) в 6 т. Т.3, 16-18 апреля 2019 г., Воронеж. С. 41-50.

**Гудков Сергей Михайлович**

**АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ  
ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ  
В СИСТЕМЕ СКАНИРУЮЩИХ РАДИОМЕТРОВ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.12.2020. Формат бумаги 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,25.  
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина.  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.  
Редакционно-издательский центр РГРТУ.