

*На правах рукописи*



**МАКАРОВА Ольга Николаевна**

**СПОСОБЫ И АЛГОРИТМЫ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ  
В РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ  
ТЕЛЕВИЗИОННОГО СКаниРОВАНИЯ**

05.12.04 – Радиотехника,  
в том числе системы и устройства телевидения

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

Рязань 2021

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ», РГРТУ).

Научный руководитель: **Клочко Владимир Константинович**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры АИТУ  
ФГБОУ ВО «РГРТУ», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Добычина Елена Михайловна**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Радиофизика, антенны и  
микроволновая техника» ФГБОУ ВО  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)», г. Москва

**Покровский Павел Сергеевич**,  
кандидат технических наук, старший  
инженер ООО «ВЕНТРА», г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Владимирский  
государственный университет имени  
Александра Григорьевича и Николая  
Григорьевича Столетовых», г. Владимир

Защита состоится «30» июня 2021 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.211.04 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 «РГРТУ» и на сайте <http://www.rsreu.ru/postgraduate/dissertatsii>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, доцент



Г.В. Овечкин

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** В современных радиотехнических системах формирования изображений объектов посредством преобразования радиосигналов в матрицу изображения важное место занимают радиометры, работающие в режиме телевизионного (построчного) сканирования. Их отличают скрытность, возможность работы в любое время суток и незначительная зависимость от погодных условий.

Принципы построения радиометрических сканирующих систем наблюдения за наземными объектами в миллиметровом диапазоне длин волн почти не изменились за последнее время. Антенна радиометра осуществляет сканирование наблюдаемой зоны, двигаясь по азимуту с переходом на новую строку по углу места, принятый антенной сигнал усиливается и проходит тракт первичной обработки сигналов, в результате образуется кадр радиотеплового изображения (РТИ) в элементах дискретизации по азимуту и углу места в радиояркостной температурной шкале. В условиях низкого соотношения сигнал-шум разрешающая способность радиотеплового изображения, определяемая шириной диаграммы направленности антенны (ДНА) и выборочным сканированием, оказывается недостаточной для восстановления РТИ удаленных объектов. Для увеличения пространственной разрешающей способности РТИ применяются известные методы восстановления изображений объектов, работающие в пространственной или частотной областях. Однако эффективность применения радиометрических систем телевизионного сканирования (РМСТС) снижается из-за следующих проблем:

1) наблюдение за объектами в процессе сканирования в телевизионном режиме занимает порядка десятков минут (при времени накопления сигнала в ФНЧ  $0,1 \dots 1$  с.). Выборочное сканирование кадра обзора с пропусками строк или столбцов уменьшает время формирования матрицы РТИ, но приводит к снижению пространственной разрешающей способности и точности восстановления РТИ;

2) априорная неопределенность относительно аппаратной функции (АФ) радиометрической системы. В идеальных условиях АФ определяет влияние формы ДНА на искомое изображение объекта. На практике же АФ будет отличаться от измеренной в идеальных лабораторных условиях и будет зависеть от внешних атмосферных факторов, стабильности параметров тракта обработки и других мешающих воздействий.

**Степень разработанности проблем.** Несомненные заслуги в развитии теоретических аспектов формирования РТИ, особенно в астрономическом направлении, принадлежат таким отечественным ученым, как Визильтер Ю.В., Кардашев Н.С, Яковлев О.И., Матвеевко Л.И. и др. Среди зарубежных ученых выделяются работы Свенсона Дж.У., Томпсона А.Р., Морана Дж.М., и др.

При исследовании верхних слоев атмосферы, а также при дистанционном наблюдении Земли из космоса и объектов на местности радиометрические методы исследования получили развитие в работах отечественных и зарубежных ученых, таких как Перцов С.В, Николаев А.Г., Быстров Р.П., Соколов А.В., Шарков Е.А., Dow G.S, Chapron B., Collard F., Arduin F., Shaller R.R. и др. Перспективные решения в этом направлении были получены в лаборатории при МГУ им. М.В. Ломоносова в работах Пирогова Ю.А., Тимановского А. Л. и др. Задачи мониторинга лесных массивов методами микроволнового многоспектрального дистанционного зондирования успешно решены во ВлГУ им. Столетовых в работах Никитина О.Р., Самойлова А.Г., Кислякова А.Н. и др.

Активно развивается новое направление экологического мониторинга на базе компактных и мобильных радиометрических систем телевизионного сканирования при наблюдении за объектами и поверхностями. Однако известные алгоритмы восстановления используют непрореженные РТИ, что требует больших временных затрат при их формировании. Таким образом, остаются актуальными вопросы разработки новых эффективных способов формирования, а также алгоритмов восстановления изображений и оценивания АФ в условиях выборочного сканирования при формировании РТИ.

**Цель диссертации** заключается в разработке способов и алгоритмов формирования и обработки изображений в радиометрической системе телевизионного сканирования в условиях прореженной матрицы наблюдений, позволяющих увеличить пространственное разрешение РТИ и уменьшить погрешность оценивания АФ.

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

1. Разработка новых способов наблюдения и формирования РТИ в двухканальной радиометрической системе телевизионного сканирования и соответствующих математических моделей РТИ, позволяющих синтезировать более эффективные по точности и быстродействию алгоритмы.

2. Разработка новых алгоритмов восстановления изображений объектов по прореженной матрице РТИ в двухканальной РМСТС, позволяющих повысить пространственную разрешающую способность

радиотепловых изображений за счет решения обратной интегральной задачи при новых способах наблюдения.

3. Разработка новых алгоритмов оценивания аппаратной функции на основе эталонных изображений объектов произвольной формы, в том числе в условиях прореженной матрицы наблюдения.

4. Разработка алгоритма формирования радиотепловых изображений объектов с пространственным разрешением оптического изображения и получение эталонных РТИ на основе нового способа совместной обработки РТИ и оптических изображений.

5. Исследование разработанных алгоритмов методом компьютерного моделирования и их экспериментальная проверка на реальных изображениях, полученных в РМСТС 3- и 8-миллиметрового диапазонов. Обоснование эффективности предложенных алгоритмов.

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

**Научная новизна** выносимых на защиту результатов определяется новыми положениями при разработке способов и алгоритмов формирования РТИ объектов, защищенных патентами и публикациями в рецензируемых научно-технических изданиях.

#### **На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Математическая модель формирования радиотепловых изображений, отличающаяся аналитическим описанием тракта первичной обработки принимаемых радиосигналов в радиометрической системе телевизионного сканирования, позволяет проводить аналитические исследования, синтезировать новые алгоритмы обработки радиотепловых изображений и создавать новые способы формирования изображений.

2. Алгоритмы восстановления изображений в двухканальной радиометрической системе телевизионного сканирования по двум прореженным матрицам радиотеплового изображения, основанные на одно- и двумерном матричном методе наименьших квадратов и методе фильтра Винера, отличающиеся способом обработки матриц радиотепловых изображений при сканировании двух антенн в ортогональных направлениях, позволяют в условиях модельного эксперимента снизить СКО ошибок восстановления изображений в сравнении с одноканальной обработкой в 1,6...2,2 раза и повысить быстродействие формирования изображений в 2...4 раза.

3. Алгоритмы оптимального оценивания аппаратной функции по известному эталонному изображению объекта в условиях прореженной и непрореженной матриц радиотеплового изображения, основанные на МНК, отличающиеся способом оценивания аппаратной

функции в реальных условиях наблюдения за объектами произвольной формы, позволяют повысить точность оценок аппаратной функции в 2...3 раза по сравнению с известным способом оценивания методом  $\delta$ -функции в условиях модельного эксперимента.

4. Алгоритм формирования радиотепловых изображений объектов в радиометрической системе телевизионного сканирования, отличающийся способом совместной обработки радиотеплового и телевизионного оптического изображений объектов, позволяет формировать радиотепловое изображение с пространственным разрешением оптического изображения и получать эталонное изображение объекта при оценивании аппаратной функции.

**Практическая ценность работы.** Разработанные алгоритмы при их реализации в радиосистемах слежения за объектами посредством радиометров позволяют повысить эффективность функционирования таких систем по скорости формирования и качеству изображений при обнаружении объектов, скрытых камуфляжем.

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

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертации внедрены в разработки АО «Государственный Рязанский приборный завод», АО «Рязанская радиоэлектронная компания», а также в учебный процесс Рязанского государственного радиотехнического университета, что подтверждается соответствующими актами.

**Апробация работы.** Результаты исследований, составляющих основное содержание диссертации, докладывались на 2 международных и 3 всероссийских научно-технических конференциях: VI Всероссийская конференция (с международным участием) «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ-2016), 26-28 октября 2016 г., Москва; Международная науч.-техн. и науч.-метод. конференция «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2016), 3-4 марта 2016 г., Рязань; VI Всероссийские Армадовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. VII Всероссийская научная конференция. Муром, июнь 2016; VII Международная научно-техническая конференция

«Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика», 4-6 октября 2017, Рязань; VII Всероссийская конференция «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ-2017), 25-27 октября 2017 г., Москва.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 патента на способ, 5 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, списка аббревиатур и 2 приложений. Общий объем работы составляет 161 с., в том числе основной текст – 139 с., 29 рисунков, 20 таблиц, библиографический список из 131 наименования.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** дана общая характеристика работы, проанализировано состояние вопроса по тематике диссертационных исследований, обосновываются актуальность и практическая значимость работы.

**В первой главе** получено аналитическое описание тракта первичной обработки радиосигналов в виде цифровой математической модели РМСТС, позволяющей синтезировать алгоритмы восстановления РТИ и оценивания АФ с позиции критерия МНК.

РМСТС состоит из одной или нескольких  $Q$  антенн и соответственно  $Q$  трактов первичной обработки, каждый из которых включает в себя ВЧ-усилитель, квадратичный детектор, ФНЧ, АЦП, регистрирующее устройство. Прошедшие тракты первичной обработки радиосигналы подаются на устройство обработки и восстановления изображений наблюдаемых объектов.

В момент времени  $t$   $q$ -я антенна РМСТС принимает действие электромагнитного поля  $\{u(t, \theta, \varphi, \omega)\}$ , излучаемого объектами, по ширине ДНА в координатах угла места  $\theta$  и азимута  $\varphi$  в определенном диапазоне круговых частот  $\omega$  и формирует радиосигнал  $s(t)$ , который после прохождения тракта первичной обработки в каждом  $q$ -м канале первичной обработки принимает дискретный вид

$$s_q(i, j) = \mu \sum_{k=j-L}^j h(k) \sum_{i_1=-m_q}^{m_q} \sum_{j_1=-n_q}^{n_q} g_q^2(i_1, j_1) \bar{U}_q^2(i+i_1, k+j_1) + p_q(i, j), \quad q = \overline{1, Q},$$

(1)

где  $\mu$  – коэффициент усиления;  $h(k)$  – весовая функция ФНЧ;  $L$  – память ФНЧ;  $g_q(i, j)$  –  $q$ -я ДНА в  $i$ -х,  $j$ -х элементах дискретизации азимута  $\varphi_j$  и угла места  $\theta_i$ ;  $2m_q+1$  и  $2n_q+1$  – ширина ДНА по углу места и

азимуту (на уровне 0,5 мощности)  $q$ -й антенны;  $\overline{U}_q^2(i, j)$  – средний квадрат флуктуирующей амплитуды полезного сигнала  $U_q(i, j)$  в  $q$ -м частотном диапазоне  $q$ -й антенны;  $p_q(i, j)$  – шумы аппаратуры в  $q$ -х приемных каналах (число каналов соответствует числу антенн) в виде дискретного белого шума.

Преобразование (1) представляется процедурой:

$$s_q(i, j) = \mu \sum_{k=j-L}^j h(k) y_q(i, k) + p_q(i, j), \quad y_q(i, k) = \sum_{i_1=-m_q}^{m_q} \sum_{j_1=-n_q}^{n_q} g_q^2(i_1, j_1) \overline{U}_q^2(i+i_1, k+j_1), \quad (2)$$

что позволяет скомпенсировать искажающее действие ФНЧ восстановлением  $y_q(i, k)$  из первого уравнения (2) и восстановить информационную составляющую  $\overline{U}_q^2$  из второго уравнения. Введем обозначения:  $\alpha_q(i, j) = \mu g_q^2(i, j)$  – АФ, учитывающая действие ДНА и тракта первичной обработки  $q$ -го канала на входной сигнал;  $x_q(i, j) = \overline{U}_q^2(i, j)$  – искомые величины, характеризующие среднюю мощность излучения в  $i$ -м,  $j$ -м направлении. Тогда запишем модель  $i$ -го,  $j$ -го измерения для  $q$ -го канала:

$$y_q(i, j) = \sum_{i_1=-m_q}^{m_q} \sum_{j_1=-n_q}^{n_q} \alpha_q(i_1, j_1) x_q(i+i_1, j+j_1) + p_q(i, j), \quad q = \overline{1, Q}. \quad (3)$$

Адекватность модели (3) подтверждается ее близостью к моделям, принятым в радиометрических исследованиях.

Совокупность  $\mathbf{Y}_q = \{y_q(i, j)\}$ , полученная при сканировании  $q$ -й антенны РМСТС в  $i$ -х,  $j$ -х направлениях, формирует матрицу РТИ. Искомыми в (3) являются величины  $x_q(i, j)$  – элементы матриц изображений объектов  $\mathbf{X}_q = \{x_q(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ , в  $q$ -х частотных диапазонах в  $M \times N$ -поле сканирования. Элементы  $y_q(i, j)$  запоминаются в регистрирующем процессоре РМСТС. Далее матрицы РТИ  $\mathbf{Y}_q$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , поступают на устройство восстановления изображений.

Для уменьшения времени формирования матриц РТИ осуществляется выборочное сканирование (с пропусками строк):  $i = m_q + 1, h, M - m_q$ ,  $j = n_q + 1, N - n_q$ , где  $h$  – шаг сканирования по углу места  $\Delta\theta$ . Получаются матрицы  $\mathbf{Y}_q$ , прореженные вдоль строк. С увеличением шага  $h$  увеличивается СКО ошибок восстановления

$\mathbf{X}_q$ . Предлагается способ снижения погрешности восстановления за счет обработки в двухканальной РМСТС в каждом частотном диапазоне. При этом две антенны РМСТС с круговой ДНА ( $m = n$ ) одновременно в ортогональных направлениях сканируют  $M \times M$ -поле: первая – с пропусками строк, вторая – с пропусками столбцов. Модель измерений для одного частотного диапазона принимает вид:

$$y_1(i, j) = \sum_{i_1=-n}^n \sum_{j_1=-n}^n \alpha(i_1, j_1) x(i+i_1, j+j_1) + p_1(i, j), \quad i = \overline{n+1, h, N-n}, \quad j = \overline{n+1, N-n},$$

$$y_2(i, j) = \sum_{j_1=-n}^n \sum_{i_1=-n}^n \alpha(i_1, j_1) x(i+i_1, j+j_1) + p_2(i, j), \quad j = \overline{n+1, h, N-n}, \quad i = \overline{n+1, N-n},$$
(4)

где искомой является матрица  $\mathbf{X} = \{x(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, N}$ , распределения радиояркой температуры поля изображения объектов. Модель (4) соответствует модели (3) при  $M = N$ .

Таким образом, для решения первой проблемы сформулирована задача повышения эффективности формирования РТИ в сканирующей РМСТС как повышения быстродействия системы за счет увеличения шага сканирования по углу места и одновременно повышения точности восстановления за счет увеличения числа каналов обработки в каждом частотном диапазоне.

Дан обзор существующих направлений в области радиометрического видения. Предложено направление решения поставленной задачи в виде поиска МНК-оценок искомого поля радиоярких температур наблюдаемых объектов. Показана потенциальная возможность сверхразрешения в несколько раз в радиометрической системе телевизионного сканирования за счет операций восстановления изображений.

**Во второй главе** разработаны алгоритмы восстановления изображений, отличающиеся возможностью работы с увеличенным шагом сканирования по углу места и способом обработки матриц РТИ при ортогональном сканировании двух антенн.

Разработан алгоритм восстановления изображений матричным методом в двухканальной РМСТС, позволяющий снизить погрешность восстановления в одном частотном диапазоне за счет способа наблюдений в ортогональных направлениях. Вводится второй измерительный канал, работающий одновременно с первым каналом. Каналы содержат антенны одного размера, принимающие поле  $\mathbf{X}$  в одном диапазоне длин волн, и одинаковые тракты первичной обработки принятых сигналов.

Две антенны сканируют поле наблюдения размером  $M \times M$  элементов дискретизации по азимуту и углу места одновременно, но в ортогональных направлениях. Первая антенна снимает данные вдоль

строки с малым шагом в  $h = 1$  элемент дискретизации и затем переходит по углу места к другой строке с шагом сканирования в  $h$  элементов дискретизации,  $h > 1$ , где  $(h-1)$  – количество подряд пропущенных во время сканирования строк. Вторая антенна, наоборот, движется непрерывно вдоль столбца и снимает данные с малым шагом в  $h = 1$  элемент дискретизации и затем переходит к другому столбцу с шагом сканирования в  $h$  элементов дискретизации,  $h > 1$ , где  $(h - 1)$  – число пропущенных подряд столбцов. По результатам первичной обработки формируются две матрицы РТИ:  $\mathbf{Y}_1 = \{y_1(i, j)\}$  и  $\mathbf{Y}_2 = \{y_2(i, j)\}$ , в которых рассматриваются только наблюдаемые строки и столбцы. Модель измерений (4) в векторно-матричной форме:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{p}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{y}$  – вектор-столбец измерений;  $\mathbf{x}$  – вектор-столбец искомого поля  $\mathbf{X}$ ;  $\mathbf{p}$  – вектор-столбец шумов;  $\mathbf{A} = \{a(i, j)\}$  – матрица значений АФ, в которой строки, в силу ортогональности сканирований, линейно не зависят друг от друга, что снижает погрешность решения системы уравнений (4) при оценивании  $\mathbf{X}$  (число наблюдений в двое больше при том же числе оцениваемых параметров) и повышает устойчивость решения. Алгоритм оптимального оценивания  $\mathbf{X}$  по критерию квадрата евклидовой нормы  $\|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}\|^2$  для матричной формы (5) следующий.

1. Формируется матрица  $\mathbf{A}$  значений АФ, отвечающая (4).

2. По результатам сканирования двух антенн формируются матрицы  $\mathbf{Y}_1$  и  $\mathbf{Y}_2$ .

3. Формируется единый вектор-столбец  $\mathbf{y}$  из элементов матриц  $\mathbf{Y}_1$  и  $\mathbf{Y}_2$  последовательной записью сначала строка за строкой  $\mathbf{Y}_1$ , затем по столбцам  $\mathbf{Y}_2$ .

4. Вычисляется вектор  $\mathbf{x} = \mathbf{A}^+ \times \mathbf{y}$ , где  $\mathbf{A}^+$  – псевдообратная матрица АФ, подготовленная заранее.

5. Формируется матрица восстановленного изображения  $\hat{\mathbf{X}} = \{\hat{x}(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, N}$  построчной записью из элементов вектора  $\mathbf{x}$ .

Предложены модификации итерационных алгоритмов восстановления изображений, основанные на градиентном методе, в условиях увеличенного шага  $h$  сканирования.

Разработан алгоритм восстановления изображений фильтром Винера на основе интерполяции пропущенных строк.

Предложен способ и разработан алгоритм восстановления в двухканальной РМСТС, отличающийся быстроедействием за счет использования одномерных процедур восстановления.

В пространственной области для двумерной модели измерений (4) для решения задачи восстановления изображения  $\mathbf{X}$  оптимального с позиции минимизации критерия квадрата евклидовой нормы необходимо проведение больших предварительных вычислений, а также памяти при обращении матриц. Реализовать матричные методы при больших значениях  $M$  из-за избыточной структуры матрицы  $\mathbf{A}$  в модели (5) не всегда возможно. Также неудобство вызывает требование  $M = N$ .

Поэтому целесообразен переход к одномерной модели (6) наблюдений для одного измерительного канала ( $Q = 1$ ). Модель учитывает только строки и столбцы матрицы  $\mathbf{X}$ , соответствующие наблюдаемым строкам и столбцам матриц  $\mathbf{Y}_1$  и  $\mathbf{Y}_2$ :

$$y_1(i, j) = \sum_{j_1=-n}^n \alpha_1(j_1) x(i, j + j_1) + p_1(i, j), \quad i - \text{const}, \quad j = \overline{n+1, N-n}, \quad (6)$$

$$y_2(i, j) = \sum_{i_1=-m}^m \alpha_2(i_1) x(i + i_1, j) + p_2(i, j), \quad j - \text{const}, \quad i = \overline{m+1, M-m},$$

где  $\alpha_1(j) = \alpha(0, j)$ ,  $j = \overline{-n, n}$ , и  $\alpha_2(i) = \alpha(i, 0)$ ,  $i = \overline{-m, m}$  – центральные сечения АФ  $\alpha(i, j)$  в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $p_1(i, j)$  и  $p_2(i, j)$  – случайные составляющие, обусловленные шумами аппаратуры и ошибками аппроксимации при переходе от (4) к (6).

Число оцениваемых величин в (6) значительно меньше, чем в (4), а ограничение на размеры  $m, n$  и  $M, N$  отсутствует.

Выражения (6) представим в виде двух матричных моделей:

$$\mathbf{y}_i^T = \mathbf{x}_i^T \mathbf{A}_1^T + \mathbf{p}_i^T, \quad i = \overline{m+1, M-m}, \quad \mathbf{y}_j = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_j + \mathbf{p}_j, \quad j = \overline{n+1, N-n}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{y}_i^T, \mathbf{x}_i^T$  –  $i$ -е строки матриц  $\mathbf{Y}, \mathbf{X}$ ;  $\mathbf{y}_j, \mathbf{x}_j$  –  $j$ -е столбцы этих же матриц;  $\mathbf{A}_1$  и  $\mathbf{A}_2$  – матрицы, заполненные значениями функций  $\alpha_1(j)$  и  $\alpha_2(j)$  в соответствии с (6);  $\mathbf{p}_i^T$  и  $\mathbf{p}_j$  – строки и столбцы шумов.

В рамках модели (7) ставится одномерная задача независимого восстановления изображений в  $i$ -х строках  $\mathbf{x}_i(i)$  и  $j$ -х столбцах  $\mathbf{x}_2(j)$  матрицы  $\mathbf{X}$  путем обработки  $i$ -х строк  $\mathbf{y}_1(i)$ ,  $i = \overline{m+1, M-m}$ , матрицы  $\mathbf{Y}_1$  и  $j$ -х столбцов  $\mathbf{y}_2(j)$ ,  $j = \overline{n+1, N-n}$ , матрицы  $\mathbf{Y}_2$ .

Задача решается любым известным методом восстановления одномерного изображения: матричным методом в пространственной области или методом фильтра Винера в частотной области. Алгоритм сводится к следующим этапам.

1. Формируется  $i$ -я строка  $\mathbf{y}_i^T$  матрицы  $\mathbf{Y}$  в процессе обзора антенны РМСТС по азимуту.

2. Строка  $\mathbf{y}_i^T$  подвергается одномерному восстановлению оператором  $R_1$ . Получается  $i$ -я строка оценок  $\mathbf{x}_i^{*T} = R_1[\mathbf{y}_i^T]$ .

3. Операции пп. 1, 2 повторяются при изменении угла места антенны для  $i = 1, 2, \dots, M$ . В результате образуются оценки-строки  $\mathbf{x}_i^{*T}$ ,  $i = \overline{1, M}$ , которые заполняют матрицу  $\mathbf{X}_1^*$  восстановленного изображения вдоль строк.

4. По завершении операций сканирования антенны столбцы  $\mathbf{y}_j$ ,  $j = \overline{1, N}$ , матрицы  $\mathbf{Y}$  подвергаются оператору одномерного восстановления  $R_1$ . Полученная последовательность оценок-векторов  $\mathbf{x}_j^*$ ,  $j = \overline{1, N}$ , заполняет матрицу  $\mathbf{X}_2^*$  восстановленного изображения вдоль столбцов.

5. Для каждой пары  $x_1^*(i, j)$  и  $x_2^*(i, j)$  соответствующих  $i$ -х,  $j$ -х элементов матриц  $\mathbf{X}_1^*$  и  $\mathbf{X}_2^*$  вычисляется объединенная оценка  $\hat{x}(i, j)$ , например:  $\hat{x}(i, j) = \max\{x_1(i, j), x_2(i, j)\}$ . В результате образуется  $M \times N$ -матрица  $\hat{\mathbf{X}} = \{\hat{x}(i, j)\}$  восстановленного изображения с повышенным пространственным разрешением.

Предложен способ и разработан алгоритм совместной обработки радиотепловых и телевизионных оптических изображений, позволяющий повысить пространственное разрешение радиотеплового изображения до пространственного разрешения оптического изображения с сохранением усредненных тепловых характеристик разных частотных диапазонов.

Допускается предварительное восстановление изображений в  $Q$  частотных диапазонах, которое дает матрицы  $\hat{\mathbf{X}}_q = \{\hat{x}_q(i, j)\}$  оценок искомых радиоярких температур  $\mathbf{X}_q = \{x_q(i, j)\}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ :

$$\hat{x}_q(i, j) = \sum_{i_1=-k_q}^{k_q} \sum_{j_1=-l_q}^{l_q} \beta_q(i_1, j_1) x_q(i+i_1, j+j_1) + \varepsilon_q(i, j), \quad (8)$$

где  $k_q < m_q$ ,  $l_q < n_q$ ;  $\beta(i, j)$  – АФ, описывающая остаточное искажение  $x_q(i, j)$  в  $(2k_q + 1) \times (2l_q + 1)$ -окрестности  $i$ -го,  $j$ -го элемента матрицы  $\hat{\mathbf{X}}_q = \{\hat{x}_q(i, j)\}$  в силу ограниченной точности восстановления при низком контрасте РТИ;  $\varepsilon_q(i, j)$  – остаточные шумы.

Телевизионное оптическое изображение (ОИ) области  $D$ , полученное с помощью теле- или видеокамеры с учетом геометрических совмещений, дает  $(M_1 \times N_1)$ -матрицу  $\mathbf{V} = \{v(i, j)\}$ , элементы  $v(i, j)$  которой удовлетворяют модели:

$$v(i, j) = \mu_0 x_0(i, j) + \xi(i, j), \quad i = \overline{1, M_1}, \quad j = \overline{1, N_1}, \quad (9)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент оптического преобразования;  $x_0(i, j)$  – амплитуда (интенсивность) оптического излучения в  $i$ -м,  $j$ -м угловом направлении;  $\xi(i, j)$  – шумы аппаратуры;  $M_1$  и  $N_1$  – размеры матрицы ОИ, в  $k$  раз превышающие размеры  $M$  и  $N$  матриц  $\mathbf{X}_q$  за счет меньшего в  $k$  раз элемента дискретизации:  $M_1 = k \cdot M$ ,  $N_1 = k \cdot N$ ,  $k$  – масштабный множитель.

Задача заключается в оценивании матриц  $\mathbf{X}_q$  по наблюдениям (8), (9). Алгоритм совместной обработки РТИ и ОИ следующий.

1. В результате сканирования антенной радиометра зоны обзора формируются матрицы РТИ  $\mathbf{Y}_q$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , модели (3).

2. Матрицы  $\mathbf{Y}_q$  могут подвергаться операциям восстановления с помощью оператора восстановления  $R_1$ . В этом случае формируются матрицы восстановленного изображения  $\mathbf{Z}_q = R_1[\mathbf{Y}, \mathbf{A}]$  модели (8).

3. С помощью телевизионной оптической системы получается матрица ОИ  $\mathbf{V}$  модели (9).

4. Матрица  $\mathbf{V}$  приводится в соответствие масштабу матриц  $\mathbf{Y}_q$  или  $\hat{\mathbf{X}}_q$  пересчетом значений ее элементов по формуле:

$$v^*(i, j) = (1/k^2) \sum_{i_1=1}^k \sum_{j_1=1}^k v(k(i-1) + i_1, k(j-1) + j_1), \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, N}.$$

Получается матрица ОИ  $\mathbf{V}^*$  с разрешением искомым матриц  $\mathbf{X}_q$ .

5. Матрица  $\mathbf{V}^*$  разбивается на  $K$  непересекающихся однородных по амплитуде подобластей  $D_1, D_2, \dots, D_K$  с помощью оператора  $R_2$

сегментации известными методами:  $\mathbf{S} = R_2[\mathbf{X}_2]$ . В результате получается матрица меток  $\mathbf{S} = \{S(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ , где  $S$  – номер сегмента, которому принадлежит  $i$ -й,  $j$ -й элемент матрицы  $\mathbf{V}^*$ .

6. Для каждого  $s$ -го сегмента матрицы  $\mathbf{V}^*$  вычисляются средние нормированные радиояркие температуры  $\tilde{y}_q(s)$  усреднением амплитуд соответствующих  $i$ -х,  $j$ -х элементов  $y_q(i, j)$  матриц  $\mathbf{Y}_q$  или элементов  $\hat{x}_q(i, j)$  матриц  $\hat{\mathbf{X}}_q$  с теми же метками  $S(i, j)$ :

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

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

7. Амплитуды  $\tilde{y}_q(s)$  присваиваются  $i$ -м,  $j$ -м элементам матриц  $\mathbf{X}_q$  с меткой  $S(i, j) = s : x_q(i, j) = \tilde{y}_q(s)$ ,  $\forall i, j : S(i, j) = s$ , то есть каждой подобласти матриц  $\mathbf{X}_q$  присваивается средняя радиояркая температура  $q$ -го частотного диапазона. Получаются матрицы РТИ  $\mathbf{X}_q^* = \{x_q^*(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , с разрешением матрицы  $\mathbf{V}^*$ .

8. Амплитуды элементов  $x_q^*(i, j)$  полученных матриц  $\mathbf{X}_q^*$  переводятся в уровни цветности. В результате получаются цветные изображения контролируемого участка местности с информацией о средней температуре излучающих элементов поверхности в  $Q$  частотных диапазонах.

**В третьей главе** разработаны алгоритмы оптимального оценивания АФ матричным методом в одно- и двухканальной РМСТС, отличающиеся наличием критерия оптимальности (МНК) и возможностью использования объектов произвольной формы для получения эталонных изображений. Модель измерений (3) представим в матричной форме:

$$\mathbf{y}_q = \mathbf{X}_1 \mathbf{a}_q + \mathbf{p}_q, \quad (10)$$

где  $\mathbf{y}_q$  – вектор измерений;  $\mathbf{X}_1$  – матрица эталонного изображения, составленная из элементов  $x(i, j)$ , расположенных в соответствии с (3);  $\mathbf{a}_q$  – вектор искомых значений АФ  $\alpha_q(i, j)$   $q$ -го канала;  $\mathbf{p}_q$  – вектор шумов.

Из (10) по критерию минимума квадрата нормы

$$J = \| \mathbf{y}_q - \mathbf{X}_1 \mathbf{a}_q \|^2 = (\mathbf{y}_q - \mathbf{X}_1 \mathbf{a}_q)^T (\mathbf{y}_q - \mathbf{X}_1 \mathbf{a}_q)$$

находим оптимальную оценку вектора  $\mathbf{a}_q$  относительно  $\mathbf{y}_q$  и  $\mathbf{X}_1$  с помощью обратной матрицы:

$$\mathbf{a}_q = (\mathbf{X}_1^T \mathbf{X}_1)^{-1} \mathbf{X}_1^T \mathbf{y}_q = \mathbf{X}_1^+ \mathbf{y}_q \quad (11)$$

Для  $Q$ -канальной системы с одинаковыми АФ формируется блочный вектор измерений  $\mathbf{y} = (\mathbf{y}_q, q = \overline{1, Q})$  и на его основе вектор оценок АФ  $\mathbf{a} = \mathbf{X}_2^+ \cdot \mathbf{y}$ , где  $\mathbf{X}_2$  – блочная матрица, составленная из нескольких эталонных изображений. Многоканальность уменьшает погрешность оценок АФ.

Предложен алгоритм оценивания симметричных АФ с прореженной матрицей наблюдений (при  $h > 1$ ), обеспечивающий более эффективную по скорости работу системы наблюдения. При этом выполняются следующие шаги.

1. Матрица  $\hat{\mathbf{A}}$  интерполируется с шагом  $h$ , что позволяет сгладить ступенчатый характер поверхности АФ.

2. После интерполяции матрица  $\hat{\mathbf{A}}$  нормируется. Выбирается строка с максимальным элементом, которая содержит информацию в форме центрального сечения АФ.

3. Составляется функция одной переменной  $b(\rho)$ ,  $\rho = 0, 1, 2, \dots, n$ , представляющая центральное сечение АФ в зависимости от дальности  $\rho$  относительно центра АФ.

4. Для каждого  $i$ -го,  $j$ -го элемента предварительно обнуленной матрицы  $\hat{\mathbf{A}}$  ( $i = \overline{1, 2m+1}$ ,  $j = \overline{1, 2n+1}$ ) с координатами  $i_1 = i - m - 1$ ,  $j_1 = j - n - 1$  ( $i_1 = \overline{-m, m}$ ,  $j_1 = \overline{-n, n}$ ) вычисляется его расстояние  $R$  от центра АФ с учетом масштабного множителя  $n/m$  по формуле:

$$R = \sqrt{(i - m - 1)^2 (n/m)^2 + (j - n - 1)^2}.$$

5. По запомненным значениям  $b(\rho)$  для найденного значения  $R$  вычисляется оценка АФ:  $\hat{\alpha}(i, j) = b(R)$  с использованием линейной интерполяции соседних отсчетов функции  $b(\rho)$ .

6. В результате получается матрица оценок АФ  $\hat{\mathbf{A}} = \{\hat{\alpha}(i, j)\}$ , которая далее используется при восстановлении изображений объектов.

Разработан алгоритм оценивания АФ, отличающийся более рациональной организацией вычислений, позволяющий снизить погрешность оценивания АФ за счет уменьшения числа оцениваемых

параметров модели (10) при обозначении  $\mathbf{a} = \mathbf{Hb}$ , где  $\mathbf{b}$  – вектор значений функции  $b(\rho)$ ;  $\mathbf{H}$  – заранее вычисляемая матрица.

Предложены алгоритмы оценивания АФ параметрическим методом в одно- и двухканальной РМСТС, позволяющие оценивать АФ в процессе восстановления изображения без использования эталонных изображений. Построен альтернативный алгоритм оценивания АФ методом  $\delta$ -функции и рассмотрены другие альтернативные решения при оценивании АФ, указаны их недостатки. Предложен алгоритм оценивания АФ при совместной обработке радиотепловых и оптических изображений, отличающийся формированием эталонного радиотеплового изображения с четкостью оптического изображения.

**В четвертой главе** представлены результаты моделирования разработанных алгоритмов и данные натуральных испытаний. На рисунке 1 изображены СКО зависимости СКО ошибок восстановления РТИ в двухканальной (алгоритмы 2, 4) и одноканальной (алгоритмы 1,3) РМСТС от шага сканирования. Алгоритмы 1, 2 построены на базе матричного оптимального

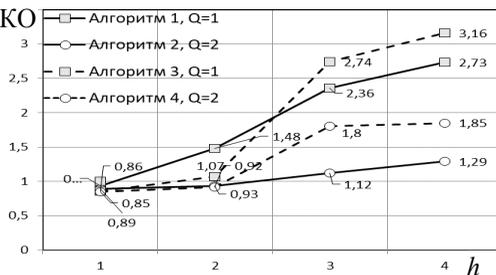


Рисунок 1

МНК; алгоритмы 3, 4 – на базе метода фильтра Винера. Результаты моделирования показали, что в условиях модельного эксперимента при шаге сканирования  $h > 2$  обработка РТИ в СКО двухканальной РМСТС позволила повысить точность восстановления изображения в сравнении с одноканальной в 2...2,2 раза, а квазиоптимальная обработка фильтром Винера – в 1,6...1,8 раза, что подтверждает 2-е положение, выносимое на защиту. Реализация

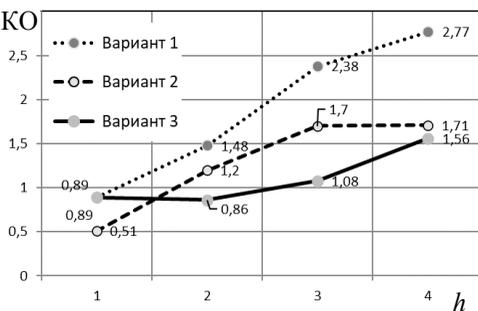


Рисунок 2

квазиоптимального способа существенно проще, не имеет ограничений на размеры ДНА и матрицы РТИ, но проигрывает по

точности восстановления около 15 % оптимальному матричному МНК.

Оценивание АФ при повышенном шаге сканирования позволяет повысить точность оценок АФ в среднем в 2...3 раза (в отдельных экспериментах до 8) по сравнению с широко используемым на практике методом  $\delta$ -функции, что подтверждает положение 3, выносимое на защиту. На рисунке 2 показано влияние характеристик антенной системы на точность восстановления изображений при выборе ее рациональной структуры (вариант 1 – одна антенна с узкой ДНА, вариант 2 – две антенны с узкой и широкой ДНА, вариант 3 – две антенны с одинаковой узкой круговой ДНА).

Натурные испытания алгоритма совместной обработки РТИ и ОИ проводились с помощью радиометра в 3-миллиметровом диапазоне длин волн при наблюдении объектов на местности на расстоянии 100 м (см. рисунки 3, 4). На рисунке 3 показано РТИ двух объектов на местности, а на рисунке 4 – приведённое в соответствии с предложенным алгоритмом к отсегментированному оптическому изображению.



Рисунок 3



Рисунок 4

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В приложениях** к диссертации содержатся акты внедрения и патенты.

### **Заключение**

В диссертации получены следующие основные новые научные и практические результаты.

1. Разработана математическая модель формирования радиотепловых изображений, позволяющая проводить аналитические исследования, синтезировать новые алгоритмы обработки радиотепловых изображений и создавать новые способы формирования изображений.

2. Разработан алгоритм восстановления изображений в двухканальной системе по прореженной матрице наблюдений, основанный на двумерном матричном МНК, отличающийся способом обработки матриц РТИ при сканировании двух антенн в

ортогональных направлениях, позволяющий в условиях модельного эксперимента повысить точность восстановления изображений в сравнении с одноканальной обработкой в 2...2,2 раза.

3. Разработан алгоритм квазиоптимального восстановления изображений в двухканальной системе по прореженной матрице наблюдений, отличающийся способом обработки матриц РТИ одномерным матричным МНК или методом фильтра Винера при ортогональном сканировании двух антенн, позволяющий в условиях модельного эксперимента повысить точность восстановления изображений в сравнении с одноканальной обработкой в 1,6...1,8 раза и повысить быстродействие формирования изображений в 2...4 раза.

4. Разработаны алгоритмы оптимального оценивания аппаратной функции по известному эталонному изображению объекта в условиях прореженной и непрореженной матриц наблюдений, основанные на матричном МНК, отличающиеся способом оценивания АФ в реальных условиях наблюдения за объектом произвольной формы, позволяющие повысить точность оценок АФ в 2...3 раза по сравнению с известным способом оценивания АФ методом  $\delta$ -функции в условиях модельного эксперимента.

5. Разработан алгоритм параметрического метода оценивания аппаратной функции в условиях прореженной матрицы наблюдений, не требующий знания эталонного изображения, позволяющий оценивать АФ в процессе восстановления изображений матричным методом или методом фильтра Винера с помощью многошаговой процедуры.

6. Разработан алгоритм формирования РТИ объектов, отличающийся способом совместной обработки радиотеплового и телевизионного оптического изображений объектов, позволяющий формировать РТИ с пространственным разрешением оптического изображения и получать эталонное изображение объектов при оценивании АФ.

7. Проведены аналитическое и экспериментальное исследования разработанных алгоритмов, подтверждающие их работоспособность и показывающие целесообразность использования многоканальной обработки для восстановления изображений и оценивания аппаратной функции.

**Список основных научных работ,  
опубликованных по теме диссертации  
Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Ключко В.К., Макарова О.Н. Алгоритмы совместной обработки радиотепловых и оптических изображений // Радиотехника. 2016. № 11. С. 128-134.
2. Ключко 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.

3. Клочко В.К., Кузнецов В.П., Макарова О.Н., Чураков Е.П. Сверхразрешение в двухканальной радиометрической системе // Радиотехника. 2016. № 8. С. 125-132.
4. Клочко В.К., Макарова О.Н. Влияние характеристик антенной системы радиометра на точность восстановления изображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. №3 (выпуск 57). С. 16-20.
5. Клочко В. К., Макарова О. Н. Математическая модель радиометра и возможность сверхразрешения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 56. С.24-30.
6. Макарова О.Н. Сравнительный анализ алгоритмов восстановления изображений в двухканальном радиометре // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 1. С. 10-15.
7. Клочко В.К., Гудков С.М., Макарова О.Н. Алгоритмы оценивания аппаратной функции при наблюдении за несколькими объектами // Радиотехника. 2017. № 5. С. 166-172.

#### **Патенты**

8. Патент RU 2612193. Способ формирования изображений объектов в двухканальной радиометрической системе // В.К. Клочко, О.Н. Макарова. Приоритет 28.03.2016. Оpubл. 03.03.2017. Бюл. № 7.
9. Патент RU 2612323. Способ восстановления изображений в двухканальной сканирующей системе // В.К. Клочко, О.Н. Макарова, В.П. Кузнецов. Приоритет 28.03.2016. Оpubл. 07.03.2017. Бюл. № 7.
10. Патент RU 2622899. Способ определения аппаратной функции радиометра //С.М. Гудков, В.К. Клочко, С.А. Митин, С.Г. Архипов, О.Н. Макарова, С.Н. Логинов, В.П. Кузнецов, А.А. Кошелев. Приоритет 25.05.2016. Опубликовано: 21.06.2017. Бюл. № 18.
11. Патент RU 2661491. Способ формирования радиотеплового изображения. // В.К. Клочко, О.Н. Макарова, О.А. Янов. Приоритет 23.01.2017. Оpubл. 17.07.2018. Бюл. № 20.

#### **Тезисы докладов на конференциях**

12. Клочко В.К., Макарова О.Н. Совместная обработка радиотепловых и оптических изображений // Сборник докладов VI Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ-2016), 26-28 октября 2016 г., Москва. С. 186-190.
13. Клочко В.К., Макарова О.Н. Восстановление изображений с оценкой аппаратной функции в радиометрических наблюдениях // VI Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы VII Всероссийской научной конференции. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. С. 211-216.

14. Ключко В.К., Макарова О.Н. Алгоритм оценивания аппаратной функции по прореженной матрице наблюдений // Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2016): сб. тр. Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конференции. В 4 т. Т. 1 / под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2016. С. 42-45.

15. Макарова О.Н. Алгоритмы оценивания аппаратной функции в задаче дистанционного зондирования объектов земной поверхности // Сборник докладов VII Междунар. науч.-техн. конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика», 4 – 6 октября 2017. Рязань: РГРТУ, 2017. С. 391-395.

16. Макарова О.Н. Повышение точности оценивания аппаратной функции радиометрической системы // Сборник докладов VII Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ-2017), 25-27 октября 2017 г., Москва. С. 104-109.

Соискатель



О.Н. Макарова

**Макарова Ольга Николаевна**

**СПОСОБЫ И АЛГОРИТМЫ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ  
В РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ  
ТЕЛЕВИЗИОННОГО СКАНИРОВАНИЯ**

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.21. Заказ \_\_\_\_\_ Формат бумаги 60×84 1/16.

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

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет им.

В.Ф. Уткина.

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

Редакционно-издательский центр РГРТУ.