

На правах рукописи

Исаев Илим Дурусбекович

**СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА КАДРОВ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ,
ФОРМИРУЕМЫХ ГРУППОЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ
ИЗ СОСТАВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА**

Специальность: 2.2.16. Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре «Радиоэлектронные системы и устройства» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Савельев Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ООО «НПО «НаукаСофт»
Васильев Олег Валерьевич

кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского комплекса программного обеспечения и моделирования АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина»
Каргашин Юрий Дмитриевич

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации»**

Защита диссертации состоится « 18 » декабря 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.331.03 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <https://bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.03.

Автореферат разослан « _____ » 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.03,
д.т.н., с.н.с.

Л.В. Лабунец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы наблюдается значительный рост числа и разнообразия объектов, обслуживаемых радиолокационными системами (РЛС), что особенно заметно проявляется, например, в сфере гражданской авиации в виде непрерывно возрастающей интенсивности воздушного движения. В этих условиях важной задачей является удовлетворение выдвигаемых современных нормативных требований к качеству радиолокационной информации. Специализированные однопозиционные РЛС обеспечивают требуемые показатели качества за счет избыточных характеристик: повышенных массогабаритных параметров и энергопотребления антенных систем, избыточной мощности излучения, завышенных требований к поворотным устройствам, мачтам и башням по нагрузке. Применение в составе многопозиционных РЛС (МП РЛС) «упрощенных» одиночных радиолокационных датчиков (РЛД), как правило, по отдельности не обладающих требуемым уровнем характеристик, например, разрешающей способностью по азимуту или дальности, позволяет снизить требования по энергетическим характеристикам и по нагрузке, выдвигаемые к специализированным РЛС, а также уменьшить стоимость системы. Кроме того, многопозиционное построение обеспечивает повышение показателей качества функционирования РЛС за счет совместной обработки радиолокационной информации, получаемой от одиночных РЛД из состава системы. МП РЛС на базе специализированных РЛД применимы для контроля за территорией аэродромов со сложной инфраструктурой и в качестве систем управления движением судов в речных и морских портах.

В связи с этим *на практике существует противоречие* между современными нормативными требованиями, допускающими применение МП РЛС, и отсутствием методов оценки системных показателей качества МП РЛС, к которым выдвигаются данные требования.

Подавляющее число РЛС управления движением объектов транспорта реализовано на базе относительно простых двухкоординатных РЛД с круговым несинхронным обзором, формирующих перекрывающиеся зоны действия для обеспечения покрытия контролируемой поверхности территории в соответствии с нормативными требованиями. Следствием этого является *противоречие научного характера* между наличием информации о наблюдаемых объектах в перекрывающихся фрагментах зон действия одиночных РЛД, с одной стороны, и отсутствием методов ее извлечения, за исключением типовой последовательности процедур первичной, вторичной и третичной обработки, не удовлетворяющей требованиям по темпу обновления радиолокационной информации, с другой стороны.

Таким образом, *актуальность* исследования связана с необходимостью внедрения этапа предварительной совместной обработки кадров радиолокационных изображений (РЛИ), формируемых одиночными РЛД в режиме асинхронного кругового обзора перекрывающихся зон действия.

Объектом исследования являются МП РЛС управления движением объектов транспорта, включающие в свой состав РЛД несинхронного кругового обзора с перекрывающимися зонами действия: РЛС управления воздушным движением (РЛС обзора летного поля, системы трассовых РЛС), системы управления движением судов (СУДС): береговые и судовые РЛС.

Предметом исследования является методика повышения качества РЛИ, формируемых одиночными РЛД, для обеспечения нормативных требований по достоверности обнаружения, точности измерения координат объектов, разрешающей способности и времени обновления радиолокационной информации.

Целью работы является обеспечение нормативных требований по достоверности обнаружения, точности измерения координат объектов, разрешающей способности и времени обновления радиолокационной информации в пределах контролируемой территории путем предварительной совместной обработки кадров РЛИ, формируемых одиночными РЛД из состава системы управления движением объектов транспорта. Цель исследования достигается решением комплекса **взаимосвязанных задач**:

1. Анализ направлений повышения показателей качества функционирования МП РЛС, обеспечивающих выполнение нормативных требований.

2. Разработка модели единого кадра РЛИ, формируемого путем объединения парциальных кадров от одиночных РЛД.

3. Разработка способов оценки численных показателей качества совместного функционирования РЛД из состава МП РЛС по достоверности обнаружения, точности измерения координат, разрешению и темпу обновления радиолокационной информации.

4. Разработка комбинированной методики предварительной совместной обработки кадров РЛИ, поступающих от РЛД из состава МП РЛС управления движением объектов транспорта.

5. Разработка программно-вычислительного комплекса для ЭВМ, реализующего методику предварительной совместной обработки кадров РЛИ, поступающих от РЛД из состава МП РЛС, и оценку численных показателей качества совместного функционирования РЛД из ее состава.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Предложен способ оценки вероятности правильного обнаружения и погрешности измерения координат целей в МП РЛС на основе формирования единого кадра РЛИ, позволяющий обобщить указанные показатели качества одиночных РЛД в соответствующие системные показатели качества и обеспечивающий, по сравнению с известным способом комбинирования информации, выигрыш в достоверности и точности измерения координат.

2. Разработана комбинированная методика предварительной совместной обработки кадров РЛИ, основанная на нелинейном переквантовании, радиометрической корректировке, функциональной калибровке, совмещении и объединении изображений, позволяющая,

в отличие от аналогов, повысить визуальное качество видеоданных, разрешение объектов, а также достоверность обнаружения и точность измерения координат объектов.

3. Обосновано рациональное соотношение между количеством пикселей сформированного парциального кадра РЛИ в полярной системе координат и кадра РЛИ после преобразования в декартову систему координат с использованием разработанной функционально ориентированной модели формирования кадров РЛИ.

4. Предложен способ оптимизации регуляризационных параметров алгоритма Брэгмана Split Bregman Algorithm для достижения компромисса между уровнем паразитных шумовых флюктуаций и разрешающей способностью.

5. Предложен алгоритм автоматического адаптивного повышения качества кадров РЛИ с использованием калибровочных функций, позволяющий одновременно решать задачи повышения контрастности РЛИ и выравнивания динамических диапазонов РЛИ за цикл обзора РЛД.

Теоретическая значимость исследования заключается в получении научно обоснованных результатов в части методики обработки парциальных кадров РЛИ, формируемых РЛД из состава МП РЛС, позволяющей повысить качество первичного видео на этапе предварительной обработки для визуального представления человеку-оператору и одновременно обеспечивать нормативные требования по достоверности обнаружения, точности определения координат и разрешению объектов на РЛИ.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. С помощью предложенной методики предварительной совместной обработки изображений получены повышенные системные показатели качества функционирования МП РЛС по достоверности обнаружения, точности измерения координат, разрешающей способности и времени обновления информации по сравнению с характеристиками одиночных радиолокаторов.

2. Сформированы рекомендации по реализации алгоритмов предварительной обработки РЛИ в МП РЛС управления движением объектов транспорта (МП РЛС обзора летного поля, управления движением судов и др.).

3. Разработан программно-вычислительный комплекс для предварительной обработки кадров РЛИ, поступающих от РЛД из состава МП РЛС, и расчета показателей качества функционирования МП РЛС с целью оценки обеспечения нормативных требований в контролируемой зоне.

Методы исследования. В ходе исследования использованы методы обработки цифровых изображений, полунатурных испытаний и имитационного моделирования с использованием ЭВМ, общие методы теории вероятностей, случайных процессов, а также статистического анализа.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается корректным применением соответствующего математического аппарата. Результаты исследования

согласуются с имеющимися научными и техническими достижениями в рассматриваемой области.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в получении всех основных результатов диссертационной работы, включая положения, выносимые на защиту, а также в непосредственном участии в выполнении расчетов, подготовке публикаций и докладов по теме исследования.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры радиоэлектронных систем и устройств МГТУ им. Н.Э. Баумана, в виде методик и алгоритмов модификации РЛИ в разрабатываемом ООО «СмартГеосистемс» программном обеспечении для платформы GEOKASKAD Marine в составе системы управления движением судов, при формировании тактико-технических требований к перспективным комплексам обзора летного поля в АО «Концерн «МАНС».

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Способ совместной обработки информации на основе формирования единого кадра РЛИ путем объединения парциальных кадров одиночных РЛД обеспечивает выигрыш в отношении сигнал-фон от 1 до 10 дБ по сравнению со способом комбинирования информации при условии обеспечения нормативных значений по достоверности обнаружения и точности измерения координат объектов, разрешающей способности и времени обновления радиолокационной информации.

2. Комбинированная методика предварительной совместной обработки кадров РЛИ обеспечивает повышение качества исходных видеоданных, что характеризуется повышением контраста не менее чем на 2 порядка, разрешения объектов – не менее чем в 4 раза, в условиях наблюдения точечных объектов инфраструктуры контролируемой территории.

3. Программно-вычислительный комплекс оценки показателей качества МП РЛС на основе предварительной обработки кадров РЛИ одиночных РЛД обеспечивает прогноз системных показателей качества, обоснование требований к характеристикам и размещению РЛД кругового обзора.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium (Ханчжоу, 2021 г.); всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского» (Москва, 2020, 2023 гг.); всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2020, 2022 гг.), XXVIII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2022 г.), всероссийская научно-техническая конференция «Расплетинские чтения» (Москва, 2024 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 научных трудах, из них 2 статьи в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК при Минобрнауки РФ по специальности 2.2.16, а также 2 статьи в изданиях, индексируемых в Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 135 источников и приложения. Общий объем работы с приложением составляет 160 страниц, включая 67 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, дана степень разработанности исследуемой темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены положения и результаты, выносимые на защиту, а также содержание диссертации по главам.

В первой главе представлены минимальные нормативные требования, предъявляемые к РЛС управления движением объектов транспорта. Важнейшими показателями качества функционирования РЛС, выбранными в качестве целевых в рамках исследования, являются вероятность правильного обнаружения объекта, характеризующая достоверность его обнаружения, погрешность оценки координат объекта, связанная с точностью измерения его координат, разрешающая способность, а также среднее время обновления радиолокационной информации, определяющее своевременность ее выдачи.

Обоснована необходимость перехода к многопозиционному построению РЛС, а также разработки методов повышения качества их функционирования на уровне совместной обработки кадров РЛИ, формируемых одиночными датчиками из состава системы.

Вторая глава посвящена разработке модели парциальных кадров РЛИ, формируемых РЛД кругового обзора из состава систем управления движением, а также единого кадра РЛИ, формируемого путем объединения парциальных кадров от одиночных РЛД с автономным некооперативным приемом сигналов (Рисунок 1): $I_{L0}(x) = F\{I_L(x)_{i=1,2,\dots,N}\}$, где $F\{z\}$ – оператор объединения кадров; N – количество объединяемых кадров, соответствующее количеству РЛД; $I_{L0}(x)$ – кадр РЛИ после объединения.

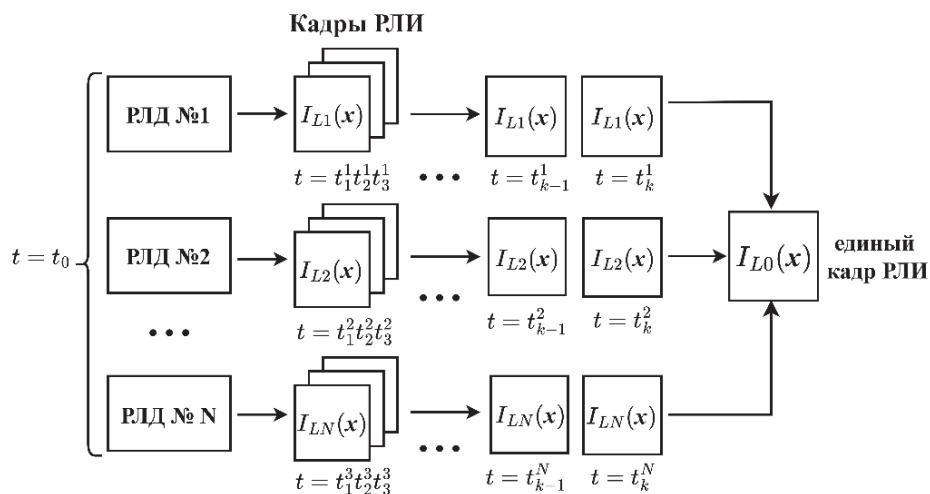


Рисунок 1. Модель формирования единого кадра РЛИ

Приведены способы оценки вероятности правильного обнаружения и погрешности измерения координат целей в МП РЛС путем формирования единого кадра РЛИ и путем комбинирования информации от одиночных РЛД.

Яркость пикселя РЛИ I_L пропорциональна амплитуде сигнала на выходе согласованного фильтра и имеет случайный характер. При гипотезе H_0 (цель отсутствует в рассматриваемом элементе разрешения) яркость описывается распределением Рэлея, при гипотезе H_1 – распределением Райса:

$$w(I_L | H_1, A_{\text{отр.ц.}}) = \frac{2I_L}{\sigma_{\text{ЭПР ф.}}} e^{-\frac{I_L^2 + A_{\text{отр.ц.}}^2}{\sigma_{\text{ЭПР ф.}}}} I_0\left(\frac{2I_L A_{\text{отр.ц.}}}{\sigma_{\text{ЭПР ф.}}}\right), \quad (1)$$

где $A_{\text{отр.ц.}}$ – амплитуда отраженного от цели сигнала; $\sigma_{\text{ЭПР ф.}}$ – среднее значение эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) фона в пределах элемента разрешения; $I_0(\bullet)$ – модифицированная функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка.

Если цель описывается первой (либо второй) моделью Сверлинга, которая характеризуется наихудшей достоверностью обнаружения, интенсивность отраженного сигнала изменяется в соответствии с распределением Хи-квадрат с двумя степенями свободы, а яркость пикселя РЛИ при гипотезе H_1 распределена по закону Рэлея:

$$w(I_L | H_1) = \int_0^\infty w(I_L | H_1, A_{\text{отр.ц.}}) w(A_{\text{отр.ц.}}) dA_{\text{отр.ц.}} = \frac{2I_L}{\sigma_{\text{ЭПР ф.}} + \sigma_{\text{ЭПР ц.}}} e^{-\frac{I_L^2}{\sigma_{\text{ЭПР ф.}} + \sigma_{\text{ЭПР ц.}}}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{ЭПР ц.}}$ – среднее значение ЭПР цели.

Яркость пикселя единого кадра РЛИ, полученного путем аддитивного объединения кадров, соответствует сумме яркостей пикселей исходных кадров, описываемых рэлеевским законом распределения. Плотность распределения яркости пикселя единого кадра имеет следующий общий вид:

$$w(I_{L0}) = \int_0^{I_{L0}} \frac{2I_{LN} e^{-\frac{I_{LN}^2}{\sigma_{\text{ЭПР } N}}}}{\sigma_{\text{ЭПР } N}} \int_0^{I_{L0}-I_N} \frac{2I_{L(N-1)} e^{-\frac{I_{L(N-1)}^2}{\sigma_{\text{ЭПР } N-1}}}}{\sigma_{\text{ЭПР } N-1}} \cdot \dots \cdot \frac{2(I_{L0} - \sum_{i=2}^N I_{Li}) e^{-\frac{(I_{L0} - \sum_{i=2}^N I_{Li})^2}{\sigma_{\text{ЭПР } 1}}}}{\sigma_{\text{ЭПР } 1}}, \quad (3)$$

где I_{L0} – яркость пикселя единого кадра; N – число объединяемых кадров, соответствующее числу РЛД; I_{Li} , $i = 1, 2, \dots, N$ – яркость пикселей объединяемых кадров; $\sigma_{\text{ЭПР } i}$, $i = 1, 2, \dots, N$ – ЭПР объектов в пределах рассматриваемых элементов разрешения. При гипотезе H_0 : $\sigma_{\text{ЭПР } i} = \sigma_{\text{ЭПР ф.}i}$, $i = 1, 2, \dots, N$, при гипотезе H_1 : $\sigma_{\text{ЭПР } i} = \sigma_{\text{ЭПР ф.}i} + \sigma_{\text{ЭПР ц.}i}$, $i = 1, 2, \dots, N$, где $\sigma_{\text{ЭПР ф.}i}$ – ЭПР фона в пределах рассматриваемых элементов разрешения.

На основе полученного выражения рассчитывается значение вероятности правильного обнаружения (ВПО) цели с использованием критерия Неймана-Пирсона при заданной вероятности ложных тревог (ВЛТ).

Оценка ВПО путем комбинирования информации от одиночных РЛД подразумевает использование трех правил принятия решения:

1. Решение об обнаружении объекта принимается, если объект обнаружен по кадру хотя бы одного из РЛД (правило «1 из N »).

2. Решение об обнаружении объекта принимается, если объект обнаружен по кадрам каждого РЛД (правило «N из N»).

3. Решение об обнаружении объекта принимается при его обнаружении по кадрам более чем половины РЛД (мажоритарное правило).

Для сравнения значений ВПО при указанных способах оценки построены характеристики обнаружения для различного числа РЛД при одинаковом отношении сигнал-фон (ОСФ) для всех датчиков (Рисунок 2).

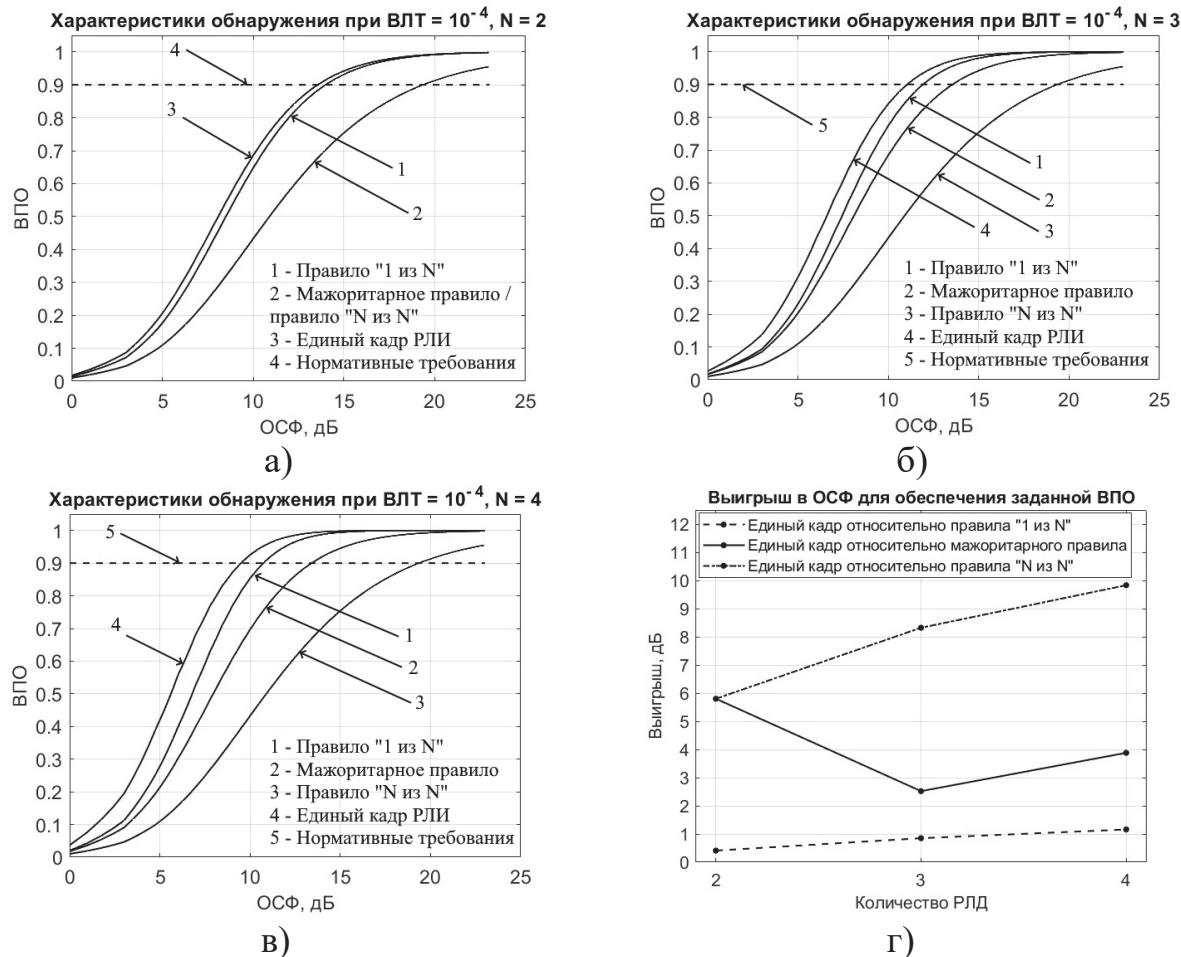


Рисунок 2. Характеристики обнаружения при числе РЛД:

а) $N = 2$; б) $N = 3$; в) $N = 4$; г) выигрыш в ОСФ при $D_{\text{ПО}} = 0,9$

Формирование единого кадра РЛИ обеспечивает больший энергетический выигрыш по сравнению с различными правилами принятия решения на основе способа комбинирования информации.

Осуществлена оценка точности измерения координат путем расчета погрешности измерения координат цели в произвольном пространственном направлении Δ_0 на основе погрешностей $\Delta x, \Delta y$ измерения декартовых координат цели, связанных, в свою очередь, с ошибками измерений дальности ΔR и азимута $\Delta \theta$:

$$\Delta_0 = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{(\Delta R)^2 + (R \Delta \theta)^2}, \quad (4)$$

$$\Delta \theta = t_\beta \sigma_\theta = t_\beta \frac{\Delta \theta_{0,5}}{3,21 \sqrt{q_{\text{сф}}}}, \quad \Delta R = t_\beta \sigma_R = t_\beta \frac{3c}{2\sqrt{3} \pi \Delta f \sqrt{q_{\text{сф}}}}, \quad (5)$$

где σ_θ – среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки азимута; σ_R – СКО оценки дальности; t_β – коэффициент, определяющий доверительный интервал по доверительной вероятности β ; $\Delta\theta_{0,5}$ – ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности; c – скорость света; Δf – девиация частоты зондирующего сигнала; $q_{\text{сф}}$ – ОСФ.

При комбинировании информации результирующая точность измерения координат Δ_0 определяется следующим образом:

$$\frac{1}{\Delta x_0^2} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\Delta x_i^2}, \quad \frac{1}{\Delta y_0^2} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\Delta y_i^2}, \quad \Delta_0 = \sqrt{\Delta x_0^2 + \Delta y_0^2}. \quad (6)$$

Погрешность измерения координат снижается в \sqrt{N} раз по сравнению со случаем использования одного РЛД при условии одинаковых погрешностей измерения координат $\Delta x_i, \Delta y_i$ по данным одиночных РЛД.

Зависимости погрешности измерения координат для двух способов ее оценки при различном числе РЛД представлены на Рисунке 3.

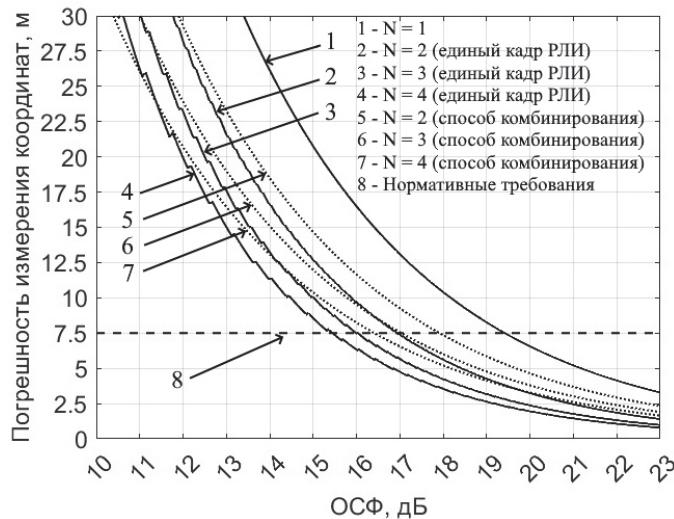


Рисунок 3. Точность измерения координат для различного числа РЛД

Формирование единого кадра обеспечивает более точное измерение координат объекта, как и более высокую достоверность обнаружения, по сравнению со способом комбинирования информации. При обеспечении погрешности измерения координат не хуже 7,5 м выигрыш в требуемом значении ОСФ составляет примерно 1 дБ при числе РЛД $N = 2 \dots 4$.

Потенциальная разрешающая способность оценивается в соответствии с «совместной» функцией рассогласования (ФР):

$$\Psi(\vec{r}, \vec{r}_0) = \sum_{i=1}^N w_i Q_i(\vec{r}_i, \vec{r}_{0i}) = \sum_{i=1}^N w_i \int \dot{u}_i(t, \vec{r}_i) \dot{u}_i^*(t, \vec{r}_{0i}) dt, \quad (7)$$

где i – порядковый номер РЛД; w_i – весовые коэффициенты, равные 1 или 0 в случае «покрытия» или «непокрытия» расчетной точки i -м РЛД соответственно; \vec{r}_{0i} и \vec{r}_i – векторы дальности для точечной цели и фрагмента

поверхности до i -го РЛД соответственно; $Q_i(\vec{r}_i, \vec{r}_{0i})$ – частная ФР для i -го РЛД; $i_t(t, \vec{r})$ – математически formalизованный тип комплексного сигнала.

Применительно к кадрам РЛИ разрешающая способность оценивается протяженностью отклика изотропного точечного отражателя в двумерной системе координат (СК). При объединении радиолокационной информации на уровне видеообработки применимы методы предварительной обработки РЛИ, повышающие их качество, а также разрешение отдельных объектов на РЛИ.

Осуществлена оценка среднего времени обновления радиолокационной информации в МП РЛС с использованием математического аппарата порядковых статистик при следующих допущениях:

- все РЛД, контролирующие территорию, имеют одинаковый период кругового обзора, равный времени одного оборота на 360° ;
- моменты времени поступления информации от РЛД распределены равномерно на периоде обзора.

Интервалы времени между поступающей радиолокационной информацией от РЛД могут быть оценены следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= M\{t_{(2)} - t_{(1)}\} = \int_0^1 t dF_{(2)}(t) - \int_0^1 t dF_{(1)}(t), \\ &\dots \\ \Delta t_n &= M\{T_0 + t_{(1)} - t_{(N)}\} = T_0 + \int_0^1 t dF_{(1)}(t) - \int_0^1 t dF_{(n)}(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где $t_{(1)}, t_{(2)}, \dots, t_{(N)}$ – случайные моменты времени поступления информации; T_0 – период обзора РЛД; $F_{(n)}(t)$ – функция распределения моментов времени:

$$F_{(n)}(t) = \sum_{i=n}^N C_N^i F^i(t) (1 - F(t))^{N-i}, \quad (9)$$

где i – номер порядковой статистики; C_N^i – число сочетаний из N по i .

Результаты анализа среднего времени обновления радиолокационной информации показывают снижение периода обновления строго обратно пропорционально числу функционирующих РЛД в составе МП РЛС.

Третья глава диссертации посвящена разработке комбинированной методики обработки РЛИ, которая представляет собой совокупность последовательно реализуемых способов обработки кадров РЛИ, направленных на улучшение их качества в целях повышения эффективности обработки радиолокационной информации (Рисунок 4).

Нелинейное переквантование применяется в целях визуализации РЛИ на индикаторном устройстве автоматизированного рабочего места оператора. Обоснованы оптимальные значения показателя степенного преобразования яркостей исходного РЛИ $\alpha \approx 0,05 \dots 0,08$, обеспечивающие наилучшее качество РЛИ в соответствии с критерием максимизации контраста Робертса и осреднения яркости кадра, гарантирующим отсутствие эффектов «засветки» или «затемнения» РЛИ.

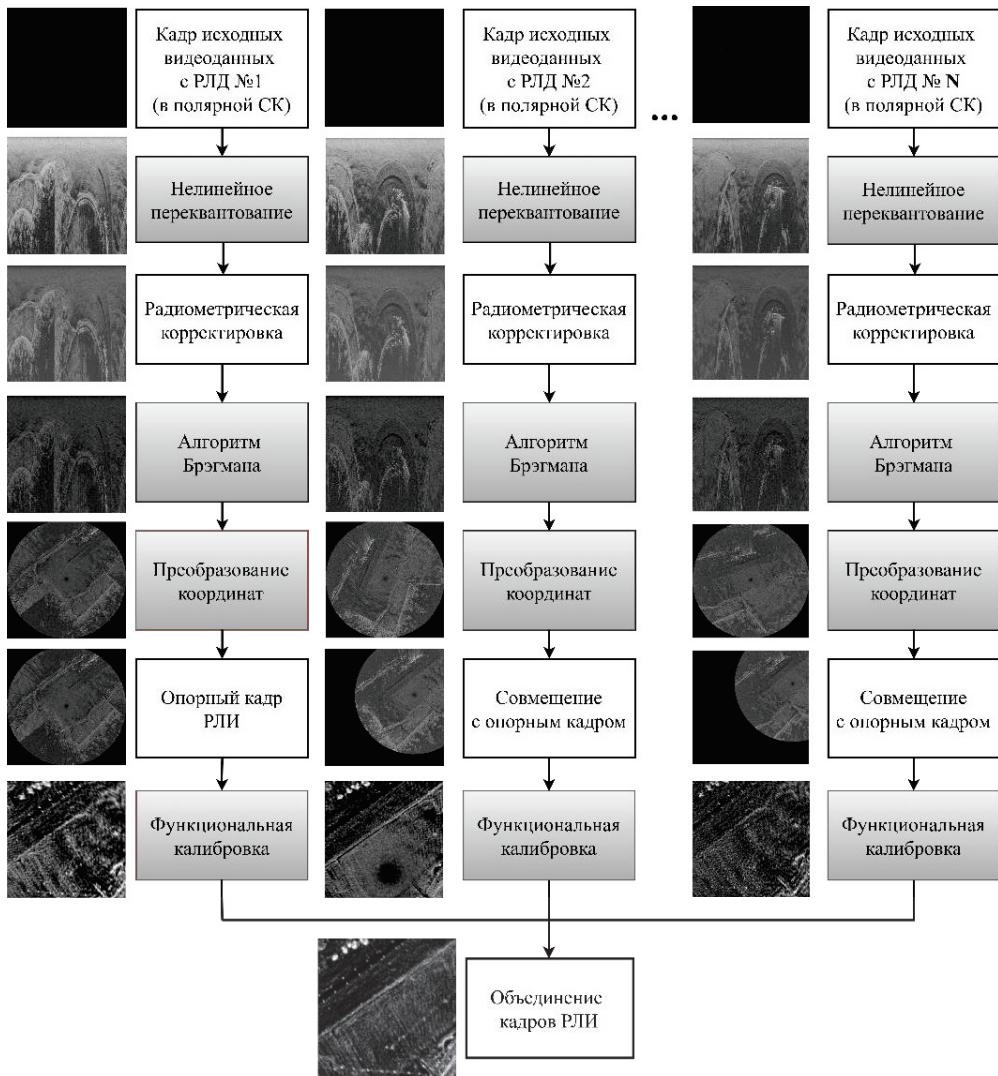


Рисунок 4. Блок-схема методики предварительной обработки кадров РЛИ

Радиометрическая корректировка направлена на устранение «засветки» вблизи точки расположения радиолокатора, связанной с большой мощностью принимаемого сигнала вблизи него, и заключается в пересчете яркостей пикселей, пропорциональных мощности сигнала, в пространство значений ЭПР наблюдаемых целей, согласно основному уравнению радиолокации.

В большинстве практических случаев удовлетворение нормативных требований по разрешающей способности требует выхода за пределы значений, обеспечиваемые техническими характеристиками радиолокаторов. Предложено решение данной проблемы с помощью эффективного итерационного алгоритма Брэгмана (англ. SBA – Split Bregman Algorithm), используемого при решении задач радиолокационного сверхразрешения. В частности, для сверхразрешения в азимутальном направлении алгоритм сводится к матричным уравнениям следующего вида:

$$\sigma^k = (\mu H_\alpha^T H_\alpha + \lambda I)^{-1} (\mu H_\alpha^T y + \lambda(g^{k-1} - b^{k-1})), \quad (10)$$

$$b^k = b^{k-1} + (\sigma^k - g^k), \quad (11)$$

$$g^k = sign(\sigma^k + b^{k-1}) \cdot max\left(\sigma^k + b^{k-1} - \frac{1}{\lambda}, 0\right), \quad (12)$$

где y – исходный кадр РЛИ; I – единичная матрица; H_α – матрица свертки в азимутальном направлении; H_α^T – транспонированная матрица H_α ; g и b – вспомогательные матрицы размерности y ; k – номер итерации; σ – кадр РЛИ после применения алгоритма; $sign(x)$ – функция, определяющая знак x ; $max(x_1, x_2)$ – функция, определяющая большее из двух значений x_1 и x_2 ; μ и λ – регуляризационные параметры алгоритма (положительные константы).

Результат обработки кадра РЛИ алгоритмом представлен на Рисунке 5.

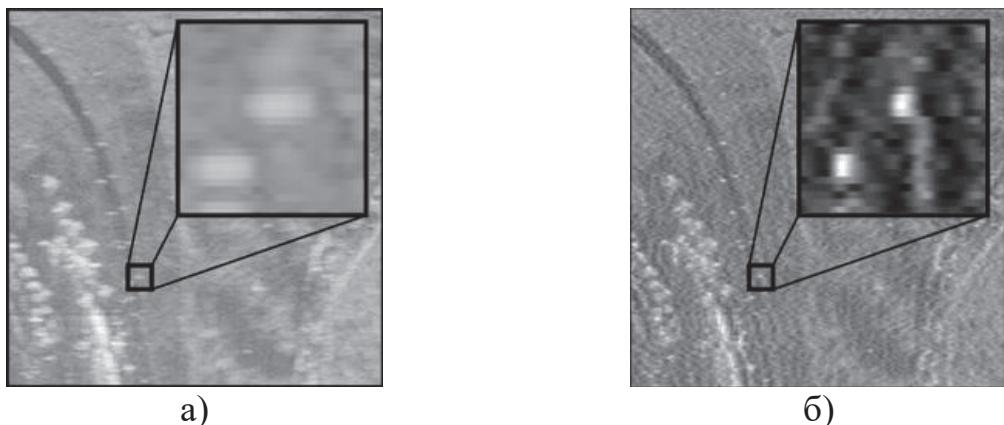


Рисунок 5. Фрагмент кадра РЛИ до (а) и после (б) алгоритма Брэгмана

Параметры μ и λ регулируют соотношение между уровнем шумоподавления и повышением разрешающей способности и требуют оптимизации. В качестве численной оценки паразитных шумовых флюктуаций SBA использована величина среднего квадрата отношения сигнала-шума изображения, а для оценки разрешения – коэффициент обужения луча (англ. BSR – Beam Sharpening Ratio), определяемый как отношение протяженности отклика точечной цели на исходном кадре РЛИ к протяженности отклика после применения алгоритма (Рисунок 6, а).

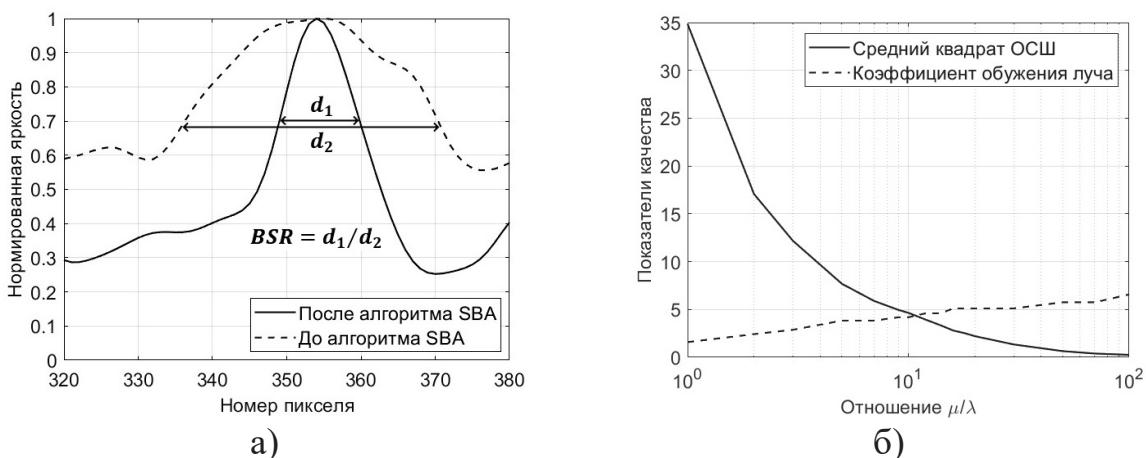


Рисунок 6. BSR (а) и зависимость показателей качества от отношения μ/λ (б)

На основе зависимостей указанных показателей качества от регуляризационных параметров μ и λ обоснованы оптимальные значения соотношения $\mu/\lambda \approx 8 \dots 15$, обеспечивающие компромисс между шумоподавлением и эффектом повышения разрешения и соответствующие области пересечения графиков на Рисунке 6, б.

Для совмещения кадров одиночных РЛД в единый кадр и последующего отображения на индикаторе кругового обзора оператора выполнено преобразование РЛИ из полярной СК в декартову (Рисунок 7).

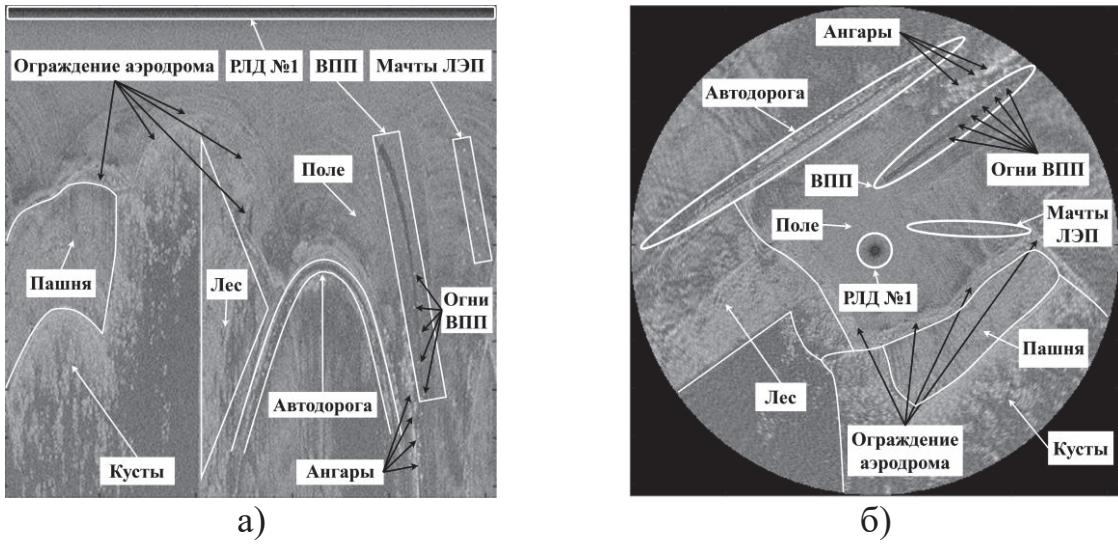


Рисунок 7. Кадр РЛИ в полярной (а) и в декартовой (б) системах координат

Выбор пространственного размера (разрешения) пикселя в декартовой СК влияет на качество РЛИ, прежде всего, на его детальность. Введем следующее обозначение для соотношения между размерами пикселя:

$$\beta = \frac{\Delta r_1}{\Delta y} = \frac{N_d}{2N_p}, \quad (13)$$

где Δr_1 – разрешение дискрета по дальности в полярной СК; Δy – разрешение пикселя в декартовой СК; N_d – количество пикселей в каждом столбце массива кадра РЛИ в декартовой СК; N_p – количество пикселей в направлении по дальности в полярной СК.

Ухудшение качества РЛИ, связанное со снижением его детальности, хорошо описывается контрастом Робертса, который существенно возрастает при $\beta < 0,5$ и незначительно – при $\beta > 0,5$ (Рисунок 8). Аналогичные результаты демонстрирует анализ кадров с помощью индекса структурного подобия (англ. SSIM – Structure Similarity Index Measure).

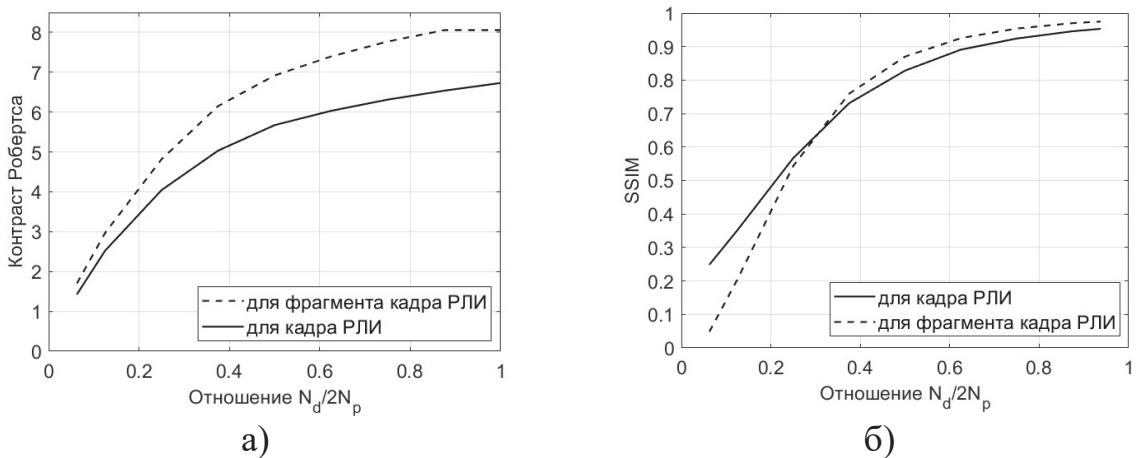


Рисунок 8. Зависимость контраста Робертса (а) и SSIM (б) от числа пикселей

Представленные графики позволяют сделать вывод, что количество пикселей при преобразовании СК целесообразно выбирать приблизительно равным количеству дискрет по дальности в полярной СК. Увеличение числа пикселей в декартовой СК не приводит к существенному повышению качества РЛИ и является нецелесообразным.

Совмещение кадров РЛИ, связанное с разворотом кадров РЛИ от всех РЛД в единую СК, выполнено с помощью метода совмещения на основе опорных яркостных точек, в качестве которых использованы элементы инфраструктуры контролируемой территории.

Для согласования динамических диапазонов принимаемых сигналов и устройства отображения РЛИ целесообразно применение калибровочных функций (КФ), в частности, нелинейной сигмоидальной функции:

$$f_{\text{сигм}}(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}, \quad (14)$$

где x – значение яркости пикселя РЛИ до калибровки; a и c – параметры « крутизны» и «смещения» сигмоиды соответственно.

Обоснован подбор рационального варианта сочетания параметров КФ и метода оценки качества кадров РЛИ для заданных условий применения. На основе анализа зависимостей показателей контраста, полученных с использованием различных методов (Рисунок 9), от параметров сигмоидальной КФ, получены следующие выводы:

- зависимости от параметра «смещения» показателей контраста, полученных с использованием методов Робертса и Собеля, аналогичны закону распределения яркости в дифференциальной форме, с использованием метода «центра масс» – закону распределения в интегральной форме;
- «смещение» КФ при ее заданной « крутизне» определяет выделение областей доминирующих яркостей кадра РЛИ, а также положение максимума дифференциального закона распределения яркости.

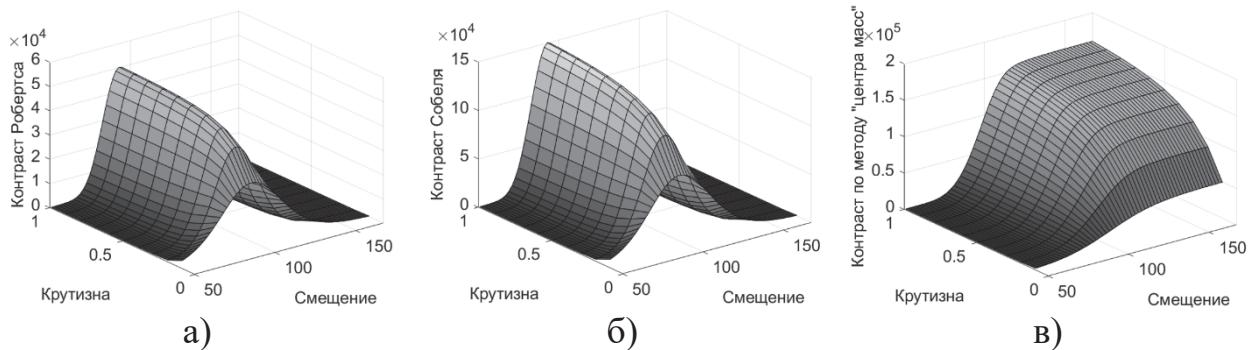
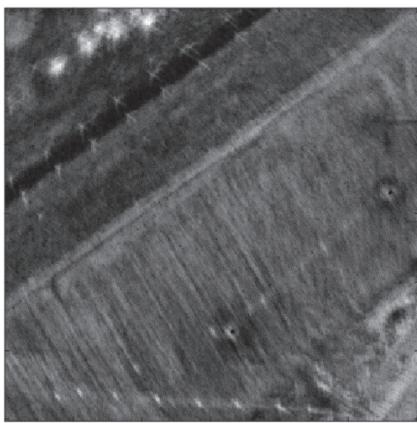


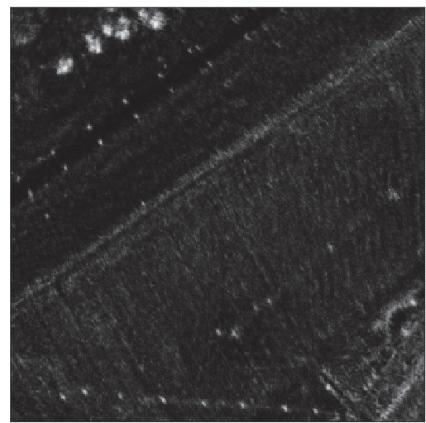
Рисунок 9. Зависимости показателей контраста от параметров КФ:

а) по методу Робертса; б) по методу Собеля; в) по методу «центра масс»

Решение задачи формирования единого кадра РЛИ, используемого для последующего выполнения этапов первичной, вторичной и третичной обработки, требует объединения совмещенных кадров (Рисунок 10).



а)



б)

Рисунок 10. Аддитивное объединение фрагментов парциальных кадров (а)
и результат обработки предлагаемой методикой (б)

Повышение разрешающей способности точечных объектов на РЛИ, особенно хорошо заметное на примере посадочных огней вдоль взлетно-посадочной полосы аэродрома, а также высокая контрастность РЛИ свидетельствуют о том, что результаты обработки исходных кадров с помощью разработанной методики имеют лучшее качество по сравнению с аддитивным объединением исходных кадров РЛИ без предобработки.

В четвертой главе представлено описание и структура программно-вычислительного комплекса, разработанного с использованием пакета прикладных программ MATLAB R2021b и состоящего из трех глобальных функций (подпрограмм):

1. Подпрограммы преобразования и оценки качества РЛИ;
2. Подпрограммы совмещения парциальных кадров РЛИ;
3. Подпрограммы расчета показателей качества функционирования МП РЛС.

Подпрограмма преобразования РЛИ позволяет выполнять модификацию исходных парциальных кадров путем применения различных методов преобразования, в том числе входящих в разработанную комбинированную методику, а также расчет статистических характеристик и показателей качества исходных и модифицированных изображений.

Подпрограмма совмещения парциальных кадров РЛИ решает задачу их совмещения с применением корреляционно-экстремального метода, реализованного на основе расчета величины взаимной корреляционной функции, или метода с использованием локальных особенностей изображения.

Представлены результаты оценки системных показателей качества в подпрограмме расчета показателей качества функционирования РЛС, предназначеннной для оценки характеристик обнаружения, точности измерения координат, разрешающей способности и времени обновления радиолокационной информации в МП РЛС, на примерах конфигурации группы РЛД на территории аэропорта «Внуково» (Рисунок 11) и Финского залива, позволяющие сделать вывод об обеспечении нормативных требований в зонах действия МП РЛС.

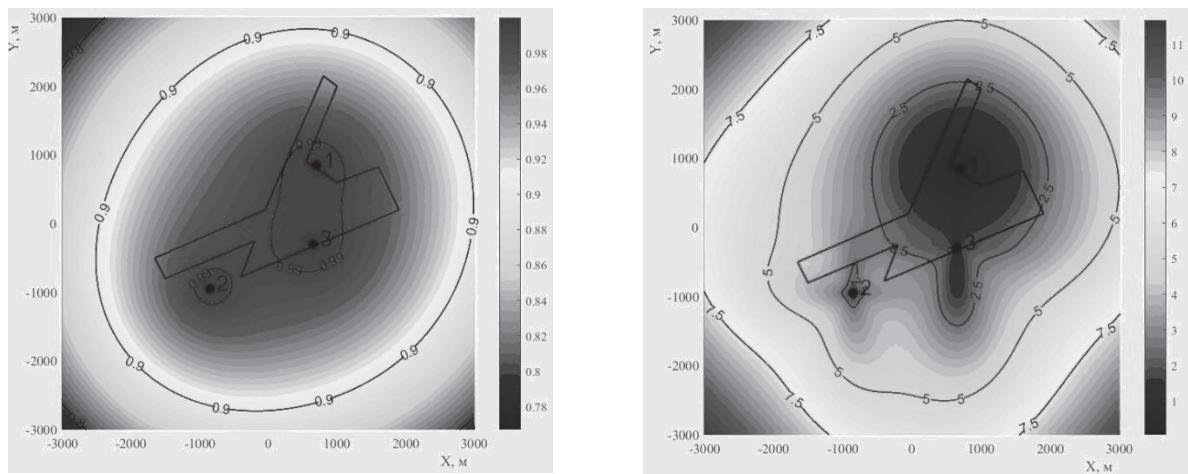


Рисунок 11. Карта ВПО (а) и СКО измерения координат (б), «Внуково»

Возможность загрузки карты местности, пространственных координат, основных технических характеристик РЛД позволяет осуществлять прогноз системных показателей качества и обосновывать требования к характеристикам и размещению датчиков кругового обзора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ современных методов улучшения показателей качества функционирования МП РЛС, способствующих соблюдению нормативных требований, обоснован выбор метода, основанного на совместной обработке цифровых РЛИ.

2. Предложены способы оценки численных показателей качества совместного функционирования РЛД из состава МП РЛС по достоверности обнаружения, точности измерения координат цели, разрешающей способности и времени обновления радиолокационной информации.

3. Разработана комбинированная методика предварительной совместной обработки кадров РЛИ, поступающих от РЛД из состава МП РЛС управления движением объектов, для повышения показателей качества обнаружения, измерения координат и разрешения объектов.

4. Разработан программно-вычислительный комплекс, реализующий методику предварительной совместной обработки кадров РЛИ, поступающих от РЛД из состава МП РЛС, и оценку численных показателей качества совместного функционирования РЛД из состава МП РЛС.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях перечня ВАК Минобрнауки РФ

1. Исаев И.Д., Савельев А.Н., Семенов А.Н. Анализ калибровочных характеристик для кадров радиолокационной информации наземной многопозиционной радиолокационной системы // Информационно-измерительные и управляемые системы. 2020. Т. 18. № 6. С. 51–64. (1,25 п.л. / 0,61 п.л.)

2. Исаев И.Д., Савельев А.Н., Семенов А.Н. Ретроспективный анализ развития и тенденции совершенствования радиолокационных систем обзора летного поля // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. Т. 77. № 10. С. 19–33. (0,94 п.л. / 0,31 п.л.)

Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в Scopus

3. Isaev I.D., Savelyev A.N., Semenov A.N. Analysis of Radar Frame Quality Indicators Properties // Progress in Electromagnetics Research Symposium, Hangzhou. 2021. P. 2238–2242. (0,25 п.л. / 0,12 п.л.)

4. Isaev I.D., Savelyev A.N., Semenov A.N. Analysis of Segmentation Procedure on Quality Indicators of Mixed Radar Frame // Progress in Electromagnetics Research Symposium, Hangzhou. 2021. P. 2136–2140. (0,31 п.л. / 0,14 п.л.)

Прочие публикации

5. Исаев И.Д., Савельев А.Н., Семенов А.Н. Программно-алгоритмический модуль анализа качества изображения наземной многопозиционной радиолокационной системы обзора летного поля // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского: материалы XVII научно-технической конференции, Москва. 2020. С. 291–297. (0,31 п.л. / 0,13 п.л.)

6. Исаев И.Д., Савельев А.Н., Семенов А.Н. Повышение контраста радиоизображений в многопозиционных РЛС обзора летного поля // Радиолокация и радиосвязь: сборник трудов XIV Всероссийской научно-технической конференции, Москва. 2020. С. 84–87. (0,25 п.л. / 0,12 п.л.)

7. Исаев И.Д., Савельев А.Н., Семенов А.Н. Повышение качества совместной обработки изображений наземной многопозиционной радиолокационной системы с использованием простейших калибровочных функций // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 466–467. (0,12 п.л. / 0,05 п.л.)

8. Isaev I.D. Radar Images Contrast Enhancement Using Simplest Calibration Functions // Conference Proceedings and Papers III Interacademic Conference for Graduate Students and Young Researchers, Москва. 2021. P. 241 – 248. (0,5 п.л. / 0,5 п.л.)

9. Исаев И.Д., Савельев А.Н., Семенов А.Н. Применение способа синтезирования апертуры в наземной многопозиционной радиолокационной системе // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, Воронеж. 2022. Т. 3. С. 167–176. (0,62 п.л. / 0,3 п.л.)

10. Исаев И.Д., Савельев А.Н., Семенов А.Н. Интерференционные изображения в наземной многопозиционной радиолокационной системе // XV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. 2022. С. 181–186. (0,37 п.л. / 0,18 п.л.)

11. Исаев И.Д., Савельев А.Н., Семенов А.Н. Радиолокационные системы обзора летного поля: прошлое, настоящее и будущее // Научные

чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского: материалы XX научных чтений, Москва. 2023. С. 65–79. (1,25 п.л. / 0,4 п.л.)

12. Исаев И.Д., Савельев А.Н., Семенов А.Н. Успехи и проблемы мультирадарной обработки информации в многопозиционных радиолокационных системах обзора летного поля // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского: материалы XX научных чтений, Москва. 2023. С. 55–64. (0,68 п.л. / 0,33 п.л.)

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614196 Российская Федерация. Программный комплекс преобразования радиолокационных изображений и оценки их показателей качества: № 2023613006 / И.Д. Исаев, А.Н. Савельев, А.Н. Семенов, А.В. Соловьев; заявл. 16.02.2023: опубл. 27.02.2023. Бюлл. №3.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612066 Российская Федерация. Программа оценки характеристик обнаружения наземной многопозиционной радиолокационной системы: № 2023610748 / И.Д. Исаев, А.Н. Савельев, А.Н. Семенов; заявл. 19.01.2023: опубл. 27.01.2023. Бюлл. №2.