

Безумнов Данил Николаевич

Разработка метода и алгоритмов комплексной обработки разнодиапазонной информации в системах технического зрения наземных робототехнических комплексов

Специальность:

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2026

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель: **Чиров Денис Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехнические системы» МТУСИ.

Официальные оппоненты: **Хрящев Владимир Вячеславович**, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры цифровых технологий и машинного обучения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова» (ЯрГУ);

Диязитдинов Ринат Радмирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Сети и системы связи» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ПГУТИ).

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество «Московский научно-исследовательский телевизионный институт» (МНИТИ).

Защита диссертации состоится «01» октября 2026 года в 15:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при Ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8А, МТУСИ, ауд. А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ: <https://dis.mtuci.ru/upload/srd/Dis-Bezumnov/dis-Bezumnov.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.002.01
доктор технических наук, профессор _____

М.В. Терешонок

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Применение систем технического зрения (СТЗ) наземных робототехнических комплексов (РТК) в реальных условиях эксплуатации – при плохой видимости, в задымлении, пыли, осадках и перепадах освещенности, – предъявляет требования к повышению их надежности и функциональности. Несмотря на существенные успехи в комплексировании сенсорных данных, подавляющее большинство работ сосредоточено на объединении оптических каналов различных диапазонов (видимый, ближний и дальний инфракрасный (ИК)), что ограничивает устойчивость распознавания и оценку проходимости в неблагоприятных условиях.

При этом радиолокационный канал в современных СТЗ часто сводится к измерению дальности, хотя именно радиолокационные изображения и эффективная площадь рассеяния (ЭПР) несут критически важные признаки для распознавания объектов. Радиолокационные измерения потенциально позволяют оценивать также плотность и структуру препятствий, однако практические внедрения таких возможностей в СТЗ наземных РТК отсутствуют. Наличие в СТЗ наземного РТК двух архитектур радиоканала – активного мм-диапазона и пассивной радиолокационной системы (РЛС) по внешним подсветам, – требует обоснованного выбора архитектуры СТЗ и специализированных алгоритмов обработки информации.

Стремительное развитие методов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) открывает возможность повышения эффективности комплексной обработки разнодиапазонной (оптической и радиолокационной) информации для задач обнаружения, распознавания и оценки преодолемости препятствий наземным РТК. Решение этих задач позволит существенно расширить диапазон условий применения РТК, повысить безопасность и уровень автономности, обеспечив устойчивое распознавание в условиях, где использование отдельных каналов СТЗ недостаточно эффективно.

Степень разработанности темы исследования. Научной базой диссертации являются труды российских и зарубежных учёных: Ю. В. Визильтера, А. Я. Андриенко, В. А. Павельева, В. А. Котцова, Е. П. Путятин, Д. С. Чирова, М.В. Терешонка, А. Д. Яманова, Ю. С. Сагдуллаева, В. Н. Гармаша, Л. Н. Костяшкина, П. А. Безмена, В. П. Рыжова, А. А. Богуславского, H. Fourati, J. Borenstein, R. Klemm, X. Li, S. Gupta, D. Bibicu, R. S. Blum и их коллег. Однако в данных работах приведены результаты решения частных задач, а общая методика комплексирования разнодиапазонной информации в СТЗ наземных РТК отсутствует.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности распознавания объектов по данным разнодиапазонных измерений в системах технического зрения робототехнических комплексов.

Научная задача исследования заключается в разработке метода и алгоритмов распознавания объектов СТЗ наземных РТК, позволяющих повысить вероятность распознавания типовых объектов в сложной фоно-целевой обстановки.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи в работе были решены следующие **частные задачи**:

1. Проведен анализ тенденций развития исследований в области повышения эффективности системы технического зрения наземного робототехнического комплекса;

2. Разработана модель разнодиапазонной системы технического зрения наземного робототехнического комплекса;

3. Разработан метод и алгоритмы комплексной обработки разнодиапазонной информации системы технического зрения наземного робототехнического комплекса.

4. Проведена оценка эффективности разработанного научно-методического аппарата.

Объектом исследования является система технического зрения наземного робототехнического комплекса.

Предметом исследования является эффективность (точность распознавания типов объектов) системы технического зрения наземного робототехнического комплекса.

Методология и методы исследования: методы цифровой обработки сигналов, распознавания образов, многопараметрической оптимизации, вероятностное моделирование, теория информации, глубокое обучение, экспериментальное моделирование, статистическая проверка гипотез.

Научная новизна работы.

1. Разработан метод распознавания объектов СТЗ наземного РТК, обеспечивающий за счет комплексной обработки оптических и радиолокационных изображений и применения нейронных сетей глубинного обучения повышение вероятности правильного распознавания типовых объектов на 43% по сравнению с использованием только оптического канала и на 38% по сравнению с использованием только радиолокационного канала.

2. Разработан алгоритм распознавания объектов с учетом оценки плотности препятствий по измерениям радиолокационного канала СТЗ наземного РТК, обеспечивающий повышение вероятности правильно принятия решений о типе

объекта на ~16% по сравнению с использованием комплексированной оценки по измерениям оптического и радиолокационного каналов.

3. Разработан бортовой алгоритм обнаружения и измерения координат движущихся объектов СТЗ наземного РТК по сигналам подсвета стандарта LTE, обеспечивающий повышение точности измерения координат объекта на 3-5 % за счет применения методов кластерного анализа.

Степень достоверности. Достоверность результатов исследования обеспечивается корректностью применения математических методов и соответствием результатов, полученных путем аналитических расчетов и численного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке нового метода распознавания объектов СТЗ наземного РТК, обеспечивающего повышение вероятности правильного распознавания типовых объектов. Повышение вероятности распознавание объектов достигается за счет комплексной обработки оптических и радиолокационных изображений на уровне принятия решений по схеме Шортлиффа, а также применения нейронных сетей глубинного обучения в качестве распознающего автомата. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанного метода и алгоритмов в качестве программно-алгоритмического обеспечения СТЗ наземных РТК, что позволит повысить эффективность их применения в сложной фоно-целевой обстановки и степень доверия к технологиям искусственного интеллекта в целом. Результаты диссертационной работы реализованы в СЧ НИР «Эврика-2023-ЭАЦ» и в учебном процессе МТУСИ в дисциплинах «Системы искусственного интеллекта», «Интеллектуальные методы обработки и анализа данных в инфокоммуникационных системах», «Интеллектуальные методы и средства радиомониторинга и радиоконтроля».

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и научных семинарах:

- X Всероссийская научно-практическая конференция «Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления», ФГБНУ «Экспертно-аналитический центр», г. Москва, Россия, 7 ноября 2024 г.;
- International Scientific Conference «2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of On Board Communications», Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Россия, 12-14 марта 2025 г.;
- XXVII Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2025», Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия, 26-28 марта 2025 г.;
- Международная научно-техническая конференция «Автоматизация»,

федеральная территория «Сириус», Россия, 7-13 сентября 2025 г.

Публикации результатов. По теме диссертации было опубликовано 7 работ, из них 3 опубликованы в журналах из Перечня ВАК, 2 работы проиндексированы в международной базе данных Scopus. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад. Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена только та их часть, которая получена лично соискателем.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация соответствует пункту «11. Разработка информационных технологий, в том числе цифровых, а также с использованием нейронных сетей для распознавания сигналов, изображений и речи в интеллектуальных радиотехнических, робототехнических системах технического зрения» паспорта научной специальности 2.2.13. «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод и алгоритм распознавания объектов на основе комплексной обработки данных, получаемых через оптический и радиолокационный каналы СТЗ наземного РТК, с использованием нейронных сетей глубинного обучения обеспечивает повышение вероятности правильного распознавания типовых объектов на 43% по сравнению с использованием только оптического канала и на 38% по сравнению с использованием только радиолокационного канала.

2. Учет оценки плотности препятствия по измерениям радиолокационного канала СТЗ наземного РТК позволяет повысить вероятность правильно принятия решений о типе объекта на ~16% по сравнению с использованием комплексированной оценки по измерениям оптического и радиолокационного каналов.

3. Бортовой алгоритм обнаружения и измерения координат движущихся объектов по сигналам подсвета стандарта LTE обеспечивает повышение точности на 3-5 % по сравнению с существующими алгоритмами за счет применения методов кластерного анализа.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений.

Диссертационная работа изложена на 127 печатных страницах (включая 4 страницы приложений), содержит 35 рисунков, 11 таблиц, 37 формул. Список литературы содержит 107 наименований, из них 57 иностранных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы выбор темы диссертации, ее актуальность, научная новизна, перечислены цели и основные задачи исследования, определены объект, предмет, методология и методы исследования, теоретическая и практическая значимость работы, представлены сведения об апробации и публикации результатов, личном вкладе автора и соответствии паспорту научной специальности, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** рассматриваются существующие подходы для повышения эффективности СТЗ наземных РТК. Отмечено, что в качестве основного способа повышения эффективности СТЗ российские и иностранные исследователи рассматривают методы комплексирования информации от датчиков различной физической природы. При этом большинство работ направлены на комплексирование изображений различных оптических диапазонов (видимого, ближнего и дальнего ИК).

Проведен анализ использования радиолокационных средств в современных СТЗ, по результатам которого сделаны выводы о том, что зачастую они используются как измерители дальности. При этом наиболее информативными данными от радиолокационного канала СТЗ наземного РТК для решения задачи распознавания являются радиолокационные изображения и ЭПР объектов. Более того, используя радиолокационные измерения, возможно провести оценку плотности объекта (препятствия), однако практических применений данных измерений в СТЗ наземных РТК для решения задач распознаваний объектов в настоящее время не известны.

Рассмотрены два основных подхода при разработке современных и перспективных радиолокационных каналов СТЗ наземных РТК: активный радиолокатор мм-диапазона и пассивная РЛС, работающая по внешним сигналам подсвета, например сигналам сотовой связи LTE. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки, поэтому рассмотрены оба варианта.

Проведена оценка возможностей применения технологий ИИ и МО, в частности, искусственных нейронных сетей (ИНС), в целях совершенствования СТЗ наземных РТК для решения задач распознавания объектов.

Таким образом, проведенный анализ показал, что наиболее перспективными направлениями являются; разработка методов и алгоритмов комплексной обработки разнодиапазонной информации СТЗ наземных РТК; применение технологий ИИ и МО.

Во **втором разделе** проведена разработка математических моделей оптического и радиолокационного каналов бортовой СТЗ наземного РТК.

В качестве модели оптического канала СТЗ наземного РТК выбрана математическая модель радиального ортофото. С аппаратной точки зрения такую

систему можно представить в виде стереовидеосистемы на базе двух ПЗС-видеокамер, поддерживающей набор функций обработки изображений на аппаратном уровне. В основе разработанной модели лежит метод радиального ортофото (ортогональные проекции левого и правого изображений стереопары на вспомогательную плоскость, построенные в полярной системе координат).

Математическая суть модели заключается в следующем. Пусть есть внешняя система координат $(OX_e OY_e OZ_e)$ на подстилающей поверхности (ПП): ось OX_e направлена вперед по ходу движения объекта, ось OY_e перпендикулярна оси OX_e , ориентирована вправо, ось OZ_e направлена вверх по нормали к поверхности, плоскость OX_eY_e совпадает с плоскостью ПП. Также имеется пространственная модель подстилающей поверхности $Z(X,Y)$. Тогда расстояние от фокальной плоскости камеры до 3D-точки R в полярной системе координат определяется как:

$$R = \sqrt{(X - X_S)^2 + (Y - Y_S)^2}, \quad \alpha = \arctan \frac{Y - Y_S}{X - X_S}, \quad (1)$$

где X_S, Y_S – координаты оптического центра камеры; α – угол между проекциями на горизонтальную плоскость оптической оси камеры и линией, соединяющей оптический центр с точкой (X, Y, Z) .

Методика построения радиального ортофото в полярной системе координат (α, R) заключается в следующем. Пиксельные координаты (i, j) его точки в системе координат (α, R) соответствуют точке (α_i, R_i) , вычисляемой как

$$\alpha_i = iS_\alpha, \quad R_j = jS_R, \quad (2)$$

где S_α, S_R – масштабирующие коэффициенты вдоль осей α и R .

Значение яркости пиксела (i, j) вычисляется путем определения координаты точки (α_i, R_i) в системе координат $(O X_e Y_e Z_e)$:

$$X_i = R_i \cos(\alpha_i) + X_S, \quad Y_i = R_i \sin(\alpha_i) + Y_S, \quad Z_i = R_i \cos(\alpha_i) + Z_S. \quad (3)$$

В этом случае очертания объектов на радиальном ортофото сохраняются без характерных геометрических деформаций, кроме того, границы объекта соответствуют зонам резкого перепада яркости, и они могут рассматриваться как информативный признак наличия трёхмерного объекта.

Далее вычисляется вертикальная проекция яркости $V(x)$ признакового изображения:

$$V(x) = \sum_{y=0}^{DY-1} I(x, y), \quad x = 0, \dots, DX - 1, \quad (4)$$

где $I(x, y)$ – яркость пиксела (x, y) , DX, DY – ширина и высота изображения.

Благодаря вертикальной ориентации контуров в проекции $V(x)$ формируются локальные максимумы, которые описываются сочетанием отрезков с постоянным уровнем и участков линейного увеличения и уменьшения. По их расположению устанавливают горизонтальные координаты контуров и выполняют оценку их ширины. Затем для каждого выделенного максимума x_i в пределах области,

соответствующей ширине контура, рассчитывается горизонтальная проекция яркости признакового изображения:

$$H_{x_t}(y) = \sum_{x=x_1}^{x_2-1} I(x, y), \quad x = 0, \dots, DY - 1, \quad (5)$$

где x_1 и x_2 – координаты левой и правой границы контура. Конечные участки контурных линий в проекции $H_{x_t}(y)$ отражают скачкообразные изменения, которые могут быть описаны как сочетание двух стационарных уровней сигнала.

Для каждой точки x степень близости формы сигнала к требуемой модели предложено оценивать посредством отношения правдоподобия:

$$\rho(x) = \frac{S_{H_0}^2}{S_{H_1}^2}, \quad (6)$$

где $S_{H_0}^2, S_{H_1}^2$ – несмещённые оценочные дисперсии наблюдаемого сигнала для моделей, описывающих гипотезы H_0 (сумма гауссовского шума и постоянного сигнала) и H_1 (сумма шума и полезного сигнала известной формы, представленной комбинацией отрезков постоянного значения и линейного возрастания-убывания). Положение значимых пиков требуемой формы определяется путём поиска локальных максимумов в $\rho(x)$, превышающих пороговое значение.

В отличие от существующих реализаций метода, которые функционируют исключительно на дорогах, имеющих разметку, предложенный вариант позволяет работать в условиях бездорожья, поэтому и выбран в качестве математической основы разработанной модели.

В качестве модели радиолокационного канала СТЗ наземного РТК целесообразно использовать математическую модель РЛС мм-диапазона длин волн, позволяющую определить удельную ЭПР различных поверхностей и обеспечить построение двумерных радиолокационных изображений.

Проведено моделирование радиолокационного канала на основе метода независимых отражателей: отражающая поверхность (ОП) представлена в виде совокупности независимых отражателей, а выходной сигнал – суперпозицией элементарных отраженных сигналов.

Математическая модель многопозиционной РЛС для обнаружения препятствия представлена в матричном виде для системы, состоящей из M передающих и N приемных модулей. Сформирована линейная система с M входами и N выходами, прохождение сигналов через которую описано матрицей $K(\tau, t)$ передаточных характеристик размером $M \times N$. Вектор выходных сигналов $S(t)$ описан сверткой во временной области вектора входных (излучаемых) сигналов $X(t)$ и матрицы передачи $K(\tau, t)$:

$$S(t) = \int_0^{t_{max}} K(\tau, t) X(t - \tau) d\tau, \quad (7)$$

где t_{max} – максимальная длительность передаточных характеристик.

Выражение для расчёта матрицы передаточных характеристик в дискретном виде можно представить как:

$$K = X_A \cdot K_{tr} \cdot G_m \cdot F_{PTm}(\alpha, \beta) \cdot L_{ak} \cdot \Delta f_{prm} \quad (8)$$

где n – индекс приемных модулей, m – индекс передающих модулей, k – индекс трасс распространения, учитываемых при моделировании, $X_A = \frac{G_n F_{PTn}(\alpha, \beta)}{\Delta f_{prn}}$, G_m – коэффициент усиления передающей антенны m -го передатчика, $F_{PTn}(\alpha, \beta)$ – нормированная диаграмма направленности передающей антенны m -го передатчика, Δf_{prm} – ширина спектра зондирующего сигнала m -го передающего модуля, G_n – коэффициент усиления приемной антенны n -го приемника, L_{ak} – потери, обусловленные распространением сигнала в атмосфере, $F_{PTn}(\alpha, \beta)$ – нормированная диаграмма направленности приемной антенны n -го приемника, Δf_{prn} – центральная частота полосы пропускания n -го приемного модуля, K_{tr} – матрица коэффициентов распространения радиосигналов от m -го передатчика к входу n -го приемника.

При формировании K_{tr} учитываются следующие виды трасс: прямое попадание радиосигнала передатчика на вход приемника; однократное отражение радиосигнала от объекта; рассеяние радиосигнала ПП; переотражение радиосигнала сначала от ОП, а затем от объекта; переотражение радиосигнала сначала от объекта, а затем от ОП.

В качестве закона распределения отражателей по высоте использовано нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, соответствующей стандартному отклонению высот поверхности σ_{Π} :

$$w(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\frac{h^2}{2\sigma_c^2}} \quad (9)$$

где σ_c – значение ЭПР объекта в зависимости от угла облучения.

ЭПР ОП во многом зависит от её физических и геометрических свойств и от длины волны используемого радиосигнала. Поэтому характеристики отражения ОП как площадных образований описываются усредненной ЭПР:

$$\sigma^0 = 4\pi D^2 \frac{I_{отр}}{I_{изл} S_p}, \quad (10)$$

где D – расстояние от РЛ до объекта; $I_{изл}$ – интенсивность излученной (падающей) волны на единичном расстоянии от излучателя; $I_{отр}$ – интенсивность отраженной волны под данным ракурсом обзора на единичном расстоянии от объекта; S_p – площадь элемента разрешения радиолокатора на местности.

Интенсивность отраженного сигнала имеет вид:

$$I_{\text{отр}} = I_{\text{отр.осн}} + I_{\text{отр.к-п}}, \quad (11)$$

где $I_{\text{отр.осн}}$ – основная поляризационная составляющая, при которой прием и излучение осуществляются на одном и том же виде линейной поляризации: вертикальной или горизонтальной.

Отсюда, итоговое выражение для отсчетов радиосигнала на входе n -го приемного модуля можно представить как:

$$S_n(t_j) = \sum_{i=0}^{K-1} K_{tr}(t_j) \cdot X_n(t_j - \tau_k) \cdot (\tau_k - \tau_{k-i}), \quad (12)$$

где t_j – момент времени, в который рассчитывается сигнал на входе приемника, τ_k – время моделирования.

Такой подход позволяет моделировать не только удельную ЭПР различных поверхностей, но и их радиолокационных изображений, в виде матрицы коэффициентов обратного рассеяния.

В **третьем разделе** проведен сравнительный анализ вариантов объединения разнодиапазонной информации СТЗ наземного РТК на уровне данных, признаков и принятия решений.

Разработан метод комплексирования оптической и радиолокационной информации СТЗ наземного РТК на уровне принятия решений для оценки плотности и распознавания объектов, основанный на методе вероятностного объединения поканальных решений на основе схемы Шортлиффа.

Рассмотрена СТЗ наземного РТК, в которой функционируют N информационных каналов, предназначенных для получения оптических и радиолокационных изображений; распознавание объектов выполняется независимо в каждом из каналов. Сформулирована задача объединения информации на уровне решений, т.е. проблема установления степени достоверности вывода на основе решений, сформированных отдельно по данным задействованных каналов.

С учётом проведённого анализа в качестве способа объединения решений выбрана схема Шортлиффа:

$$P_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P(A_i)), \quad (13)$$

где: N – количество измерительных каналов, A_i – информация от i -го канала, $P(A_i)$ – вероятность корректного распознавания объекта по A_i .

Блок-схема разработанного метода распознавания объектов на основе комплексной обработки данных представлена на рисунке 1.

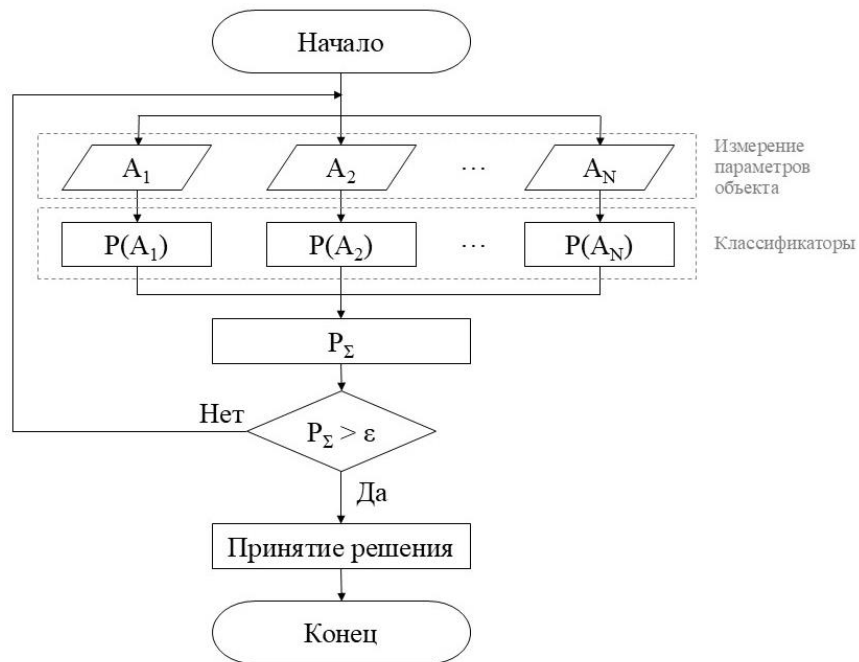


Рисунок 1 – Метод распознавания объектов на основе комплексной обработки данных

Разработан алгоритм классификации (распознавания) объектов, получаемых СТЗ наземного РТК, имеющей два информационных канала, обеспечивающих получение оптических и радиолокационных изображений через оптический и радиолокационный каналы, посредством сверточной нейронной сети (СНС).

Для вычисления общей вероятности события использована схема на основе формулы Шортлиффа и формулы вероятности осуществления хотя бы одного из независимых событий:

$$P_K = P_{OЭ} + P_{РЛ} (1 - P_{OЭ}), \quad (14)$$

где P_K – вероятность корректного распознавания объекта (доля корректно распознанных объектов (КРО)); $P_{OЭ}$ – вероятность корректного распознавания объекта (доля КРО) для оптического канала, $P_{РЛ}$ – вероятность корректного распознавания объекта (доля КРО) для радиолокационного канала.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 2.

Анализ результатов оценки возможности определения плотности препятствий радиолокационным каналом бортовой СТЗ наземного РТК с использованием имитационной модели радиолокационного канала показал, что плотность препятствий может быть оценена по удельной ЭПР препятствий.

Отдельные типы препятствий (деревья, кустарники, трава) могут быть отсекалированы по времени корреляции принятого сигнала, которое у них значительно ниже, чем у однородных твердых препятствий.

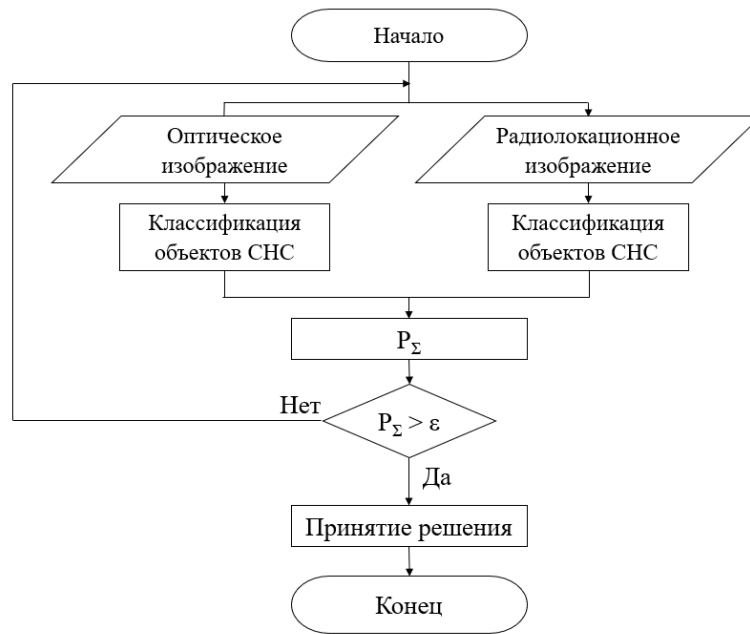


Рисунок 2 – Алгоритм классификации объектов на основе комплексной обработки оптической и радиолокационной информации

Оценка плотности препятствия может быть использована как дополнительная информация в алгоритме распознавания объектов СТЗ наземного РТК, основанном на схеме Шортлиффа (13).

Схема разработанного алгоритма распознавания объектов представлена на рисунке 3. Информация об удельной ЭПР σ_0 и времени корреляции сигнала $\tau_{кор}$ используется в нём как дополнительные признаки при классификации (распознавания) объектов по радиолокационным измерениям.

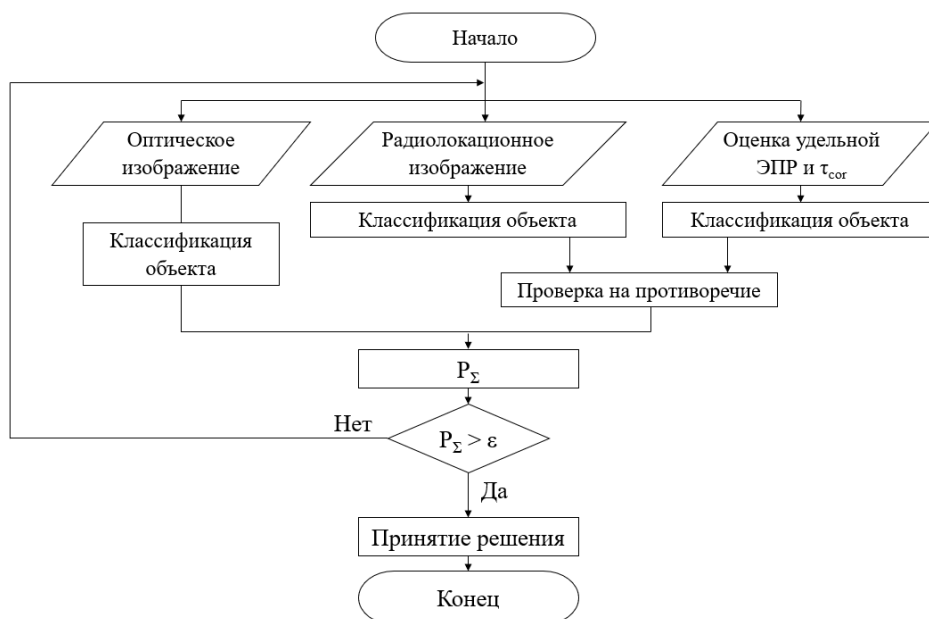


Рисунок 3 – Схема алгоритма распознавания объектов с учетом удельной ЭПР и времени корреляции сигнала

Проведённый анализ показал, что использование имеющихся устройств подсвета в пассивных РЛС имеет большой технический потенциал в области радиолокации. Сигнал LTE является наиболее распространенным в радиоэфире и обладает свойствами, которые позволяют использовать его в качестве имеющегося устройства подсвета в пассивных РЛС.

В диссертационной работе рассмотрена система для обнаружения и измерения координат движущихся объектов по сигналам подсвета стандарта LTE (рисунок 4), состоящая из двух параллельных совмещенных каналов Ch1 и Ch2, предназначенных для приёма опорного сигнала прямого пути от LTE eNB и для приёма эхо-сигнала, отражённого от объектов, соответственно.

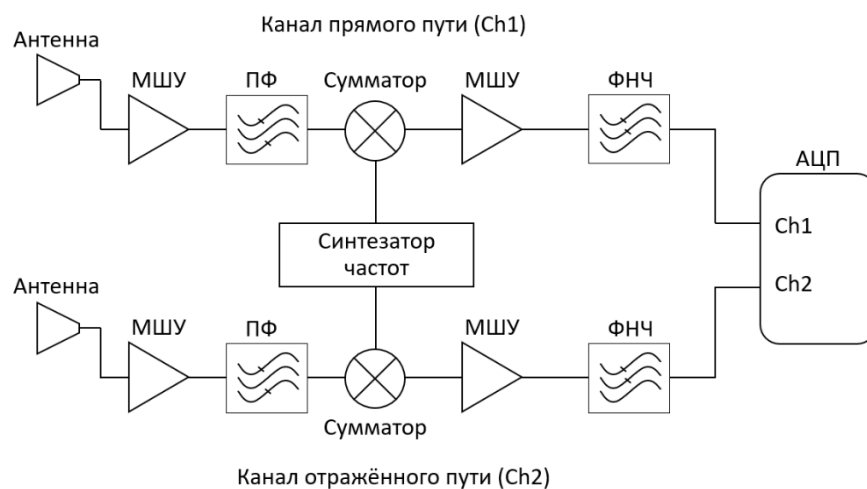


Рисунок 4 – Архитектура пассивной РЛС обнаружения с использованием сигналов LTE

Сигналы LTE, полученные от каналов Ch1 и Ch2, различаются по временной задержке и доплеровскому сдвигу, которые определяют дальность и скорость обнаруженного движущегося объекта. Общая схема обработки сигналов (рисунок 5), связанная с пассивным радаром на базе LTE. Данный способ хорошо известен, однако обладает достаточно большим среднеквадратичным отклонением (СКО) полученных оценок координат объектов.

Для повышения точности определения координат объектов по измерениям пассивной РЛС СТЗ наземного РТК предложено использовать методы кластерного анализа, в частности карты Кохонена (КК).

По результатам исследования разработан алгоритм обнаружения и измерения координат движущихся объектов по сигналам подсвета стандарта LTE, представленный на рисунке 6.

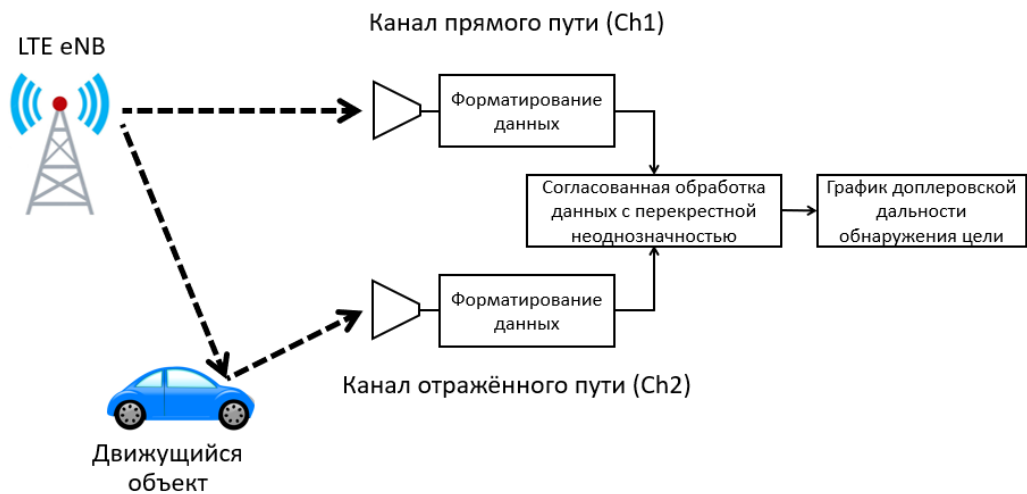


Рисунок 5 – Схема обработки сигнала LTE для обнаружения объектов



Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма постобработки радиолокационных данных РЛС для определения траектории объектов

В четвертом разделе проведены эксперименты по обучению СНС решению задач распознавания и классификации объектов на оптических и радиолокационных изображениях с использованием алгоритма, представленного на рисунке 2, при параметрах, приведённых в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры экспериментов по обучению СНС

Параметр	Эксперимент №1	Эксперимент №2
Канал получения изображения	оптический	радиолокационный
Количество классов	5	5
Объём обучающего набора (кол-во изображений каждого класса)	450 (90 x 5)	450 (90 x 5)
Объём тестового набора (кол-во изображений каждого класса)	50 (10 x 5)	50 (10 x 5)
Вероятность зеркального отображения по горизонтали	0,5	0,5
Число эпох обучения	[1, 2, ..., 160]	[1, 2, ..., 160]
Фиксируемый параметр	доля КРО, %	доля КРО, %

Результаты экспериментов и комплексированная оценка доли КРО представлены на рисунке 7: эксперименту № 1 соответствует график $P_{OЭ}$, эксперименту № 2 – график $P_{РЛ}$, комплексированная оценка изображена на графике P_{Σ} .

Среднее арифметическое значение доли КРО в диапазоне от 60 до 160 эпох обучения составляет: 58% для оптического канала, 60% для радиолокационного канала, 83% для комплексной оценки доли КРО.

Показано, что эффективность СТЗ наземного РТК, использующей несколько каналов получения информации, может быть значительно повышена путём комплексной обработки данных, получаемых через каждый из каналов. Разработанный метод позволяет повысить эффективность СТЗ наземного РТК на 43% по сравнению с использованием только оптического канала и на 38% по сравнению с использованием только радиолокационного канала.

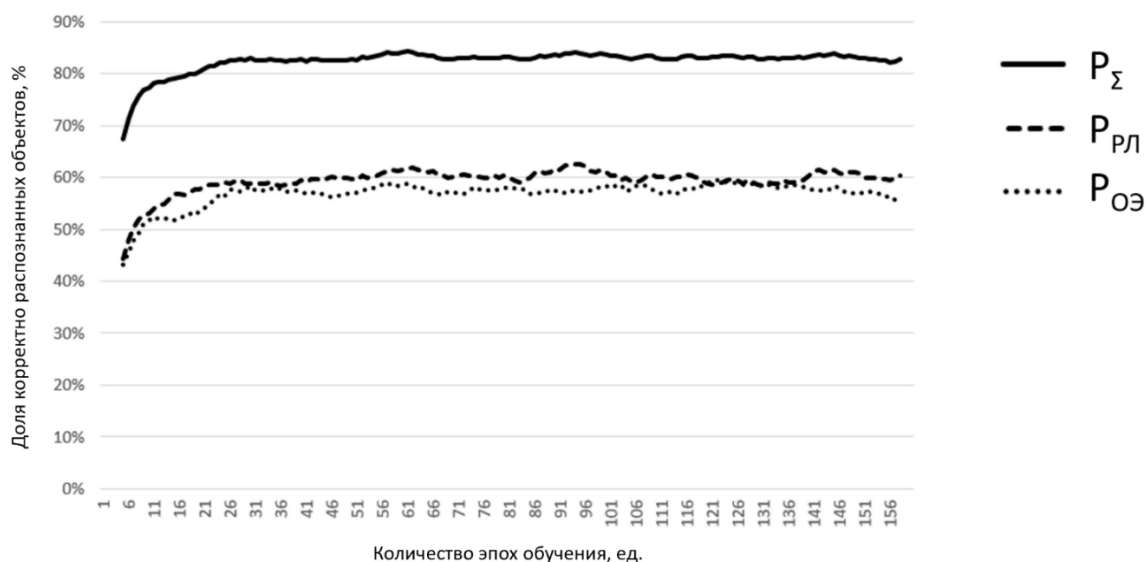


Рисунок 7 – Зависимость доли КРО от числа эпох обучения

Реализована программная имитационная модель радиолокационного канала бортовой СТЗ наземного РТК, включающей канал обнаружения препятствия (пространственно-распределенного объекта), канал измерения дальности до

препятствия и канал оценки плотности препятствий.

Проведен эксперимент по оценке возможности определения плотности препятствий на основе анализа параметров принимаемых диффузно рассеянных препятствиями эхо-сигналов. Полученные в результате экспериментальных исследований расчетные значения удельной ЭПР препятствия, время корреляции сигнала на частоте f_0 и заданной поляризации сигнала представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальной проверки возможностей определения плотности препятствий РЛ-каналом бортовой СТЗ РТК

Тип препятствия/ Дальность		Удельная ЭПР σ_0		Частота сигнала f_0 , Гц	Поляризация сигнала	Время корреляции сигнала, с	
		Эталонная	Расчетная			Скорость ветра 1 м/с	Скорость ветра 5 м/с
Стена (дерево сухое)	10 м	0,19	0,196	77	вертикальная	>10 с	>10с
	50 м	0,19	0,1-0,2	77	вертикальная	>10 с	>10 с
Стена (бетон)	10 м	0,31	0,27	77	вертикальная	>10 с	>10 с
	50 м	0,31	0,15 – 0,3	77	вертикальная	>10 с	>10 с
Дерево (отдельное, высота 7 м, ширина кроны 3,4 м)	10 м	0,33	0,1-0,19	77	вертикальная	0,12	0,026
	50 м	0,33	0,1-0,25	77	вертикальная	0,7	0,13
Кустарник	10 м	0,17	0,18-0,2	77	вертикальная	0,051	0,01
	30 м	0,17	0,1– 0,15	77	вертикальная	0,17	0,03
Трава	10 м	0,10	0,12-0,13	77	вертикальная	0,035	0,007
	30 м	0,17	0,6-0,12	77	вертикальная	0,12	0.023
Автомобиль	10 м	0,91	0,5-0,95	77	вертикальная	>10 с	>10 с
	50 м	0,91	0,2-0,86	77	вертикальная	>10 с	>10 с

Таким образом, точность классификации (распознавания) типа препятствия при дальности в 10 и 30..50 метров составила 94% и 88% соответственно. Учет этих данных в алгоритме, представленном на рисунке 3, позволяет достичь комплексной точности классификации 99% и 98% соответственно.

На основе полученной точности классификации сделан вывод о целесообразности учёта удельной ЭПР и времени корреляции сигнала в СТЗ наземного РТК в качестве отдельного канала получения информации и комплексировании результатов пост-обработки данных на уровне принятия решений.

Таким образом, разработанный алгоритм распознавания объектов с учетом оценки плотности препятствий по измерениям радиолокационного канала СТЗ наземного РТК (рисунок 3) обеспечивает повышение вероятности правильно принятия решений о типе объекта на ~16% по сравнению с использованием комплексной оценки по измерениям оптического и радиолокационного каналов.

Для определения результативности разработанного бортового алгоритма обнаружения и измерения координат движущихся объектов СТЗ наземного РТК по

сигналам подсвета стандарта LTE (рисунок 6) проведено имитационное моделирование процесса кластерной постобработки радиолокационных данных в условиях пассивной радиолокационной станции.

На рисунке 8 приведена диаграмма рассеяния, содержащая радиолокационные отметки, сформированные по наземным объектам, движущимся в составе одной группы. Светлыми линиями отображены траектории перемещения объектов, восстановленные методом квадратичной аппроксимации с применением критерия минимизации СКО.

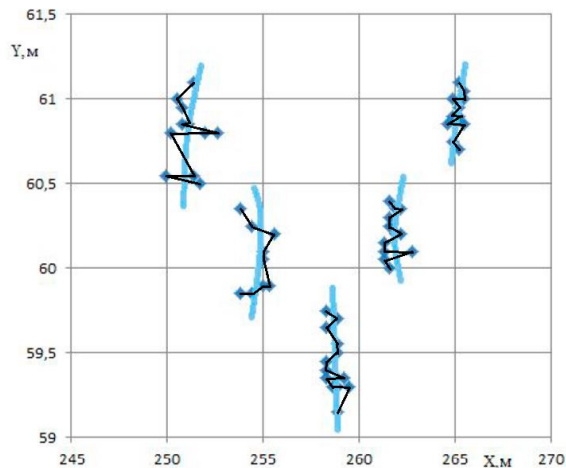


Рисунок 8 – Диаграмма рассеяния радиолокационных измерений

Анализ рисунка 8 показывает, что все наземные объекты совершают групповое движение, и боковое расстояние между ними оказывается соизмеримым с величиной СКО одиночного определения координат. Это указывает на повышенную сложность корректного разделения измерений по отдельным объектам.

Выполнен вычислительный эксперимент, направленный на кластеризацию рассматриваемой совокупности радиолокационных измерений с использованием КК, работающей на основе алгоритма обучения PLSOM. Исследована возможность выделения устойчивых кластерных структур в условиях близкого расположения объектов и частичного перекрытия измерительных областей.

Оценка эффективности применения карты Кохонена путём сопоставления значений СКО радиолокационных измерений до выполнения кластеризации и после неё (рисунок 9) позволяет судить о влиянии процедуры кластерной обработки на точность интерпретации радиолокационных данных.

Таким образом, разработанный алгоритм обеспечивает повышение точности измерения координат объекта на 3-5 % за счет применения кластеризации радиолокационных измерений с использованием самоорганизующейся КК.

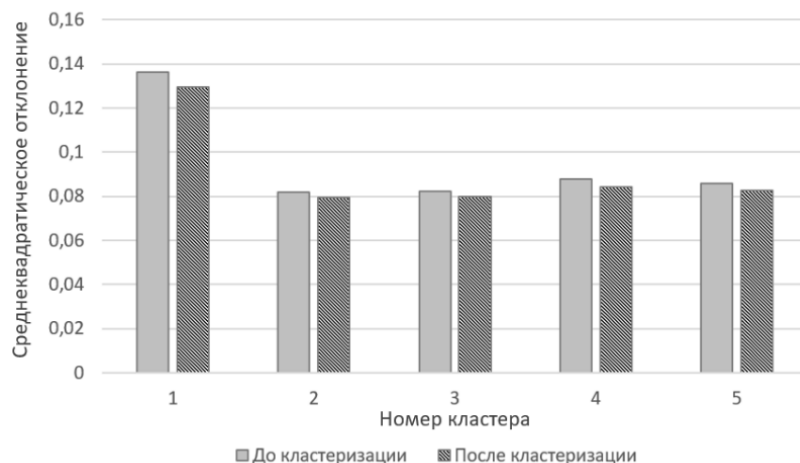


Рисунок 9 – Значения СКО радиолокационных измерений при кластеризации с использованием карты Кохонена

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Анализ существующих работ в области повышения эффективности СТЗ наземных РТК показывает, что российские и иностранные исследователи в качестве основного способа повышения эффективности СТЗ рассматривают методы комплексирования информации от датчиков различной физической природы. В данном направлении получены хорошие теоретические и практические результаты. Однако большинство работ направлены на комплексирование изображений различных оптических диапазонов (видимого, ближнего и дальнего ИК).

2. Радиолокационные средства в современных СТЗ используются в основном как измерители дальности. Хотя в ряде работ отмечается, что комплексирование радиолокационной и оптической может существенно повысить эффективность СТЗ с точки зрения обнаружения, распознавания и оценки преодолемости препятствий. Как показывает анализ публикаций, наиболее информативными данными от радиолокационного канала СТЗ наземного РТК для решения задачи распознавания являются радиолокационные изображения и ЭПР объектов. Более того, используя радиолокационные измерения возможно провести оценку плотности объекта (препятствия), однако практических применений данных измерений в СТЗ наземных РТК для решения задач распознаваний объектов в настоящее время не известны.

3. При разработке современных и перспективных радиолокационных каналов СТЗ наземных РТК рассматривается, как правило, два основных подхода: активный радиолокатор мм-диапазона и пассивная РЛС, работающая по внешним сигналам подсвета, например сигналам сотовой связи LTE. Каждый из этих подходов имеет

свои преимущества и недостатки, поэтому в данной работе рассмотрены оба варианта.

4. Другим направлением совершенствования СТЗ наземных РТК для решения задач распознавания объектов является применение технологий искусственного интеллекта и машинного обучения, в частности, искусственных нейронных сетей.

5. Таким образом, анализ существующих публикаций и разработок в области повышения эффективности распознавания объектов СТЗ наземных РТК показал, что наиболее перспективными направлениями являются: разработка методов и алгоритмов комплексной обработки разнодиапазонной информации СТЗ наземных РТК; применение технологий искусственного интеллекта и машинного обучения.

6. В качестве модели оптического канала СТЗ наземного РТК целесообразно выбрать математическую модель радиального ортофото. С аппаратной точки зрения такую систему можно представить в виде стереовидеосистемы на базе двух ПЗС-видеокамер, поддерживающей набор функций обработки изображений на аппаратном уровне. В основе разработанной модели лежит метод радиального ортофото (ортогональные проекции левого и правого изображений стереопары на вспомогательную плоскость, построенные в полярной системе координат). В итоге выполняется пространственная реконструкция подстилающей поверхности. В отличие от существующих реализаций метода, которые функционируют исключительно на автомобильных и железных дорогах, имеющих разметку, предложенный вариант позволяет работать в условиях бездорожья, поэтому и выбран в качестве математической основы разработанной модели.

7. В качестве модели радиолокационного канала СТЗ наземного РТК целесообразно использовать математическую модель РЛС мм-диапазона длин волн, позволяющую определить удельную ЭПР различных поверхностей и обеспечить построение двумерных радиолокационных изображений. Основным подходом к моделированию радиолокационного канала является использования понятия независимых отражателей. В этом случае отражающая поверхность представляется в виде совокупности независимых отражателей, а выходной сигнал – суперпозицией элементарных отраженных сигналов. Такой подход позволяет моделировать не только удельную ЭПР различных поверхностей, но и их радиолокационных изображений, в виде матрицы коэффициентов обратного рассеяния.

8. В результате проведенного анализа для дальнейшего использования в качестве метода комплексирования оптической и радиолокационной информации СТЗ наземного РТК для оценки плотности и распознавания объектов (препятствий) выбран метод вероятностного объединения поканальных решений на основе схемы Шортлиффа. Данный метод прост в реализации и позволяет получать вероятностную оценку решаемой задачи.

9. Разработанный метод распознавания объектов на основе комплексной обработки данных состоит из следующих этапов:

- получение оптических и радиолокационных изображений с использованием N информационных каналов бортовой СТЗ наземного РТК;
- распознавание (классификация) объектов независимо в каждом канале с использованием сверточной ИНС;
- объединение решений по схеме Шортлиффа. Принятие решения о типе объекта.

10. Результаты оценки возможности определения плотности препятствий радиолокационным каналом бортовой СТЗ наземного РТК с использованием имитационной модели радиолокационного канала показали, что плотность препятствий может быть оценена по удельной ЭПР различных препятствий. Как показали результаты моделирования, отдельные типы препятствий (деревья, кустарники, высокая трава) могут быть дополнительно отсекалированы по времени корреляции принятого сигнала, которое у них значительно ниже, чем у однородных твердых препятствий. Оценку плотности препятствия можно использовать как дополнительную информации в методе распознавания объектов СТЗ РТК, основанным на схеме Шортлиффа. Информация об удельной ЭПР σ_0 и времени корреляции сигнала $\tau_{кор}$ используется как дополнительные признаки при классификации (распознавания) объектов по радиолокационным измерениям.

11. Использование имеющихся устройств подсвета в пассивных РЛС имеет большой технический потенциал в области радиолокации. Сигнал LTE является наиболее распространенным в радиоэфире и обладает свойствами, которые позволяют использовать его в качестве имеющегося устройства подсвета в пассивных РЛС. Система для обнаружения и измерения координат движущихся объектов по сигналам подсвета стандарта LTE состоит из двух параллельных совмещенных каналов Ch1 и Ch2, предназначенных для приёма опорного сигнала прямого пути от LTE eNB и для приёма эхо-сигнала, отражённого от объектов. Сигналы LTE, полученные от каналов Ch1 и Ch2, различаются по временной задержке и доплеровскому сдвигу, которые определяют дальность и скорость обнаруженного движущегося объекта. Данный способ хорошо известен, однако обладает достаточно большой СКО полученных оценок координат объектов.

12. Для повышения точности определения координат объектов по измерения пассивной РЛС СТЗ наземного РТК предлагается использовать методы кластерного анализа, в частности, карты Кохонена. Их преимущество перед классическими алгоритмами кластерного анализа состоит в отсутствии необходимости проведения длительной процедуры кластеризации каждый раз при поступлении новых сигналов, что приводит к более высокому быстродействию. По

результатам исследования разработан алгоритм обнаружения и измерения координат движущихся объектов по сигналам подсвета стандарта LTE.

13. Проведенные исследования показали, что эффективность СТЗ РТК, использующая несколько каналов получения информации, может быть значительно повышена путём комплексной обработки данных, получаемых через каждый из каналов. Разработанный метод позволяет повысить эффективность СТЗ РТК на 43% по сравнению с использованием только оптического канала и на 38% по сравнению с использованием только радиолокационного канала.

14. На основе имитационного моделирования показано, что разработанный алгоритм распознавания объектов с учетом оценки плотности препятствий по измерениям радиолокационного канала СТЗ наземного РТК обеспечивает повышение вероятности правильного принятия решения о типе объекта на ~16% по сравнению с существующими методами.

15. Разработанный бортовой алгоритм обнаружения и измерения координат движущихся объектов СТЗ наземного РТК по сигналам подсвета стандарта LTE, обеспечивающий повышение точности измерения координат объекта на 3-5 % за счет применения кластеризации радиолокационных измерений с использованием самоорганизующейся карты Кохонена.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что поставленная научная задача решена, а цель диссертационного исследования достигнута в полном объёме.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Безумнов, Д. Н. Алгоритм классификации объектов на основе комплексной обработки данных системы технического зрения наземного робототехнического комплекса / Д. Н. Безумнов, Д. С. Чиров, М. В. Базылев // Электросвязь. – 2025. – № 2. – С. 40-45.

2. Безумнов, Д.Н. Метод распознавания объектов на основе комплексной обработки данных системы технического зрения наземного беспилотного транспортного средства / Д.Н. Безумнов, Д.С. Чиров // Цифровая обработка сигналов. – 2025. – № 2. – С. 36-39.

3. Bezumnov, D.N. Obstacle density estimation according from the radar channel measurements to the technical vision system of ground-based robotic complex / D.N. Bezumnov, D.S. Chirov // T-Comm. – 2026. – Vol. 20. – No. 2. – P. 55-64.

Публикации в изданиях, индексируемых в МБД Scopus:

1. Bezumnov, D.N. On Improving the Efficiency of the Technical Vision System of the Robotics Complex / D.N. Bezumnov, D.S. Chirov // 2025 Systems of Signals

Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – Moscow, Russian Federation, 2025. – P. 1-4.

2. Bezumnov, D. Radar and Camera Fusion for Improving the Efficiency of the Technical Vision System of the Ground-Based Unmanned Vehicle / D. Bezumnov, D. Chirov // 2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation, 2025. – P. 720-724.

Прочие публикации:

1. Безумнов, Д. Н. Метод комплексирования информации в системах технического зрения наземных робототехнических комплексов / Д. Н. Безумнов, Д. С. Чиров, О. В. Кореньков // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления : Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 07 ноября 2024 года. – М.: ФГБНУ "Экспертно-аналитический центр", 2024. – С. 460-467.

2. Безумнов, Д.Н. Повышение эффективности распознавания объектов системой технического зрения наземного робототехнического комплекса за счет комплексной обработки оптических и радиолокационных измерений / Д.Н. Безумнов, Д.С. Чиров // Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA - 2025 : Доклады XXVII Международной конференции, Москва, 26-28 марта 2025 года. – М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2025. – С. 141-144.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026610823 Российская Федерация. Программа для распознавания объектов в системе технического зрения наземного робототехнического комплекса на основе комплексирования разнодиапазонной информации / Д.Н. Безумнов, Д.С. Чиров; правообладатель ОТКЗ ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики». № 2026610247; заявл. 15.01.2026; зарегистр. 15.01.2026.