

На правах рукописи



БУЙ ШИ ХАНЬ

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ
В АВТОМОБИЛЬНЫХ РАДИОЛОКАТОРАХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ
СТОЛКНОВЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование» института «Радиоэлектроника, инфокоммуникации и информационная безопасность» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

- Научный руководитель - Кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование», МАИ
Охотников Денис Александрович
- Официальные оппоненты - Доктор технических наук, доцент, директор «Учебно-научный институт радиоэлектроники и информационных технологий», НГТУ им. Р.Е. Алексеева
Мякинцов Александр Валерьевич
- Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиотехника», ННГУ, им. Н.И. Лобачевского
Семенов Виталий Юрьевич
- Ведущая организация - АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР».

Защита диссертации состоится «11» февраля 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу:

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим выслать по указанному адресу, отделу ученного и диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МАИ и на сайте: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=109994.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, к.т.н.



Горбунова А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном мире интенсивно растет число автомобилей, а также и средняя скорость движения транспортных средств (ТС). При этом количество аварий и дорожно-транспортных происшествий (ДТП) резко увеличивается. Одной из причин этого является отсутствие информации у водителя о состоянии дорожной обстановки при ограниченной оптической видимости, вызванной наличием плохих погодных условий (дождя, тумана, снега, дыма, пыли и др.). Поэтому проблема обеспечения безопасного движения ТС в условиях ограниченной оптической видимости является чрезвычайно актуальной.

По мере развития технологии применялись разные устройства (датчики) и методы их использования для предупреждения столкновения ТС: ультразвуковые, инфракрасные, видео-, инфракрасные камеры (ИК), лазерные, радарные а также датчики дождя и света. Ультразвуковые датчики, используемые при парковке автомобиля, измеряют расстояние между автомобилем и препятствием с ограниченной дальностью действия. Видео и ИК – камеры, а также лазерные датчики при наличии плохих погодных условий с высокой плотностью практически прекращают своё применение. Поэтому интенсивно применяются радиолокационные датчики.

Важнейшим преимуществом автомобильных радиолокационных датчиков (АРД) является их малая чувствительность к погодным условиям, сезонам и времени суток. АРД имеют большую дальность действия, широкую область обзора и высокое пространственное разрешение, позволяющее оценить состояние дороги при разных плотностях движений.

Таким образом, современным путем решения проблемы безопасности движения ТС при условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости является применение автомобильной радиолокационной системы обзора местности, предоставляющей изображение дороги и различных препятствий, расположенных на дороге, около нее, границ дороги и параметров объектов на дорожной полосе в реальном времени.

Обработка радиолокационных данных (РЛД) является важной задачей в автомобильных радиолокационных станциях (АРЛС) для предоставления необходимых данных водителю или системе управления беспилотного автомобиля.

В управлении автомобилями требуется определение различных объектов и их параметров на дороге, в том числе подвижных и неподвижных, для предупреждения столкновения, с целью информирования оператора о состоянии дорожной обстановки. Для решения данных задач необходимо разработать алгоритмы и прикладное ПО обработки сформированного в АРЛС панорамного радиолокационного изображения (РЛИ). Это позволит не только определить координаты и скорость всех дорожных объектов (ДО), но и определить их размеры и осуществлять прогноз их движения.

Решению задач определения радиолокационных образов ДО в АРЛС в настоящее время существенно препятствует практическое отсутствие достоверных данных о радиолокационных образах ДО, их устойчивости, уникальности, ракурсной зависимости и т.д.

Необходимое знание местоположения автомобиля носителя АРЛС относительно дорожных границ представляется главной важной задачей для последующего

определения параметров других объектов дороги, обеспечивая безопасное движение автомобиля.

Одним из требований при разработке АРЛС является представление интуитивно понятной информации о дорожной обстановке, отображаемой на экране.

Обзор современных АРЛС показывает наличие следующих нерешенных задач:

1. Отсутствует информация о размерах движущихся автомобилей в представлении дорожной обстановки из-за отсутствия алгоритма определения размеров автомобилей.

2. Отсутствует система достоверного определения границ дороги при движении автомобилей с АРЛС.

3. Не представлены параметры движения дорожных объектов.

4. Отсутствует интуитивно понятное отображение радиолокационной информации водителю.

Таким образом, тема диссертации, посвященной разработке алгоритмов обработки РЛД АРЛС для обеспечения безопасного движения автомобиля с в условиях плохой или отсутствия видимости, **является актуальной.**

Проектированием РЛС и обработкой ее РЛД для обеспечения безопасности движения занимались различные ученые мира. Необходимо отметить работы таких российских учёных в данной области, как Скосырев В.Н., Мякинков А.В., Нуждина В.М., Расторгуева В.В., Чукина Л.Ф., Давидича И.В., Шелухина О.И., Елистратова В.В., и Ананенкова А.Е. Среди зарубежных учёных необходимо отметить труды: M.Skolnik, P.Russer, R.Rollman, M. Schnider, R.Schmidt. В МАИ на кафедре 410 разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец панорамной АРЛС.

Объекты и предметы исследований

К объектам диссертационных исследований относятся автомобильные радиолокационные станции предупреждения столкновений транспортных средств. Предметами исследований являются радиолокационные данные, полученные при натуральных экспериментах макетом АРЛС.

Методы исследования

Для решения поставленных задач используются методы теории вероятностей, методы статистической радиотехники и теории анализа сигналов, методы теории радиолокационных сигналов, цифровой обработки сигналов, а также компьютерного моделирования.

Цель работы

Повышение точности определения параметров радиолокационных объектов путем разработки алгоритмов обработки РЛ данных в панорамной автомобильной радиолокационной станции для определения размеров автомобилей, положения границ дороги и применения техники прямой перспективы к РЛИ в условиях ограниченной или отсутствующей оптической видимости.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие основные задачи.

1. Разработан алгоритм определения характеристик РЛИ объектов на дороге и дана оценка размеров объектов.

2. Произведена оценка погрешности определения размеров РЛИ автомобилей в зависимости от отношения сигнал-шум.

3. Разработан алгоритм определения дорожных границ и оценена его погрешность.

4. Разработан алгоритм формирования РЛИ с применением техники прямой перспективы.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработан алгоритм определения РЛ центральных сечений РЛИ объектов дороги и дана оценка их ракурсной зависимости.

2. Разработан алгоритм определения дорожных границ, позволяющий определять положение собственного автомобиля на дороге и оценивать ошибку определения границ дороги.

3. Предложен новый алгоритм применения техники прямой перспективы к обработке радиолокационного изображения.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработаны алгоритм и программное обеспечение для исследования РЛИ дорожных объектов в движении АРЛС. Исследована статистическая характеристика РЛИ автомобилей при движении АРЛС, позволяющая оценивать размеры центральных сечений дальномерных и азимутальных РЛ изображений объектов с минимальными относительными погрешностями определения размеров сечений соответственно до 10% и до 15%.

2. Разработаны алгоритм и программное обеспечение статистического определения дорожных границ при переходе дорожного полотна к обочине типа «асфальт – металлические ограждения» при прямолинейном движении АРЛС по прямой дороге. Погрешность определения положения дорожных границ статистически определяется как 1,5м.

3. Разработаны алгоритм и прикладное программное обеспечение, позволяющее применение техники прямой перспективы в преобразовании РЛИ, отображаемого на экране водителя.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм определения сечения РЛИ на основе использования многоточечной модели обеспечивает определение продольного размера РЛИ автомобиля с ошибкой не более 10%.

2. Алгоритм определения сечения РЛИ на основе многоточечной модели обеспечивает определение поперечного размера РЛИ автомобиля с ошибкой не более 15%.

3. Алгоритм определения боковых дорожных границ с использованием преобразования Хафа позволяет определить границы перехода «асфальт – металлические ограждения» для прямолинейного движения АРЛС вдоль прямой дороги с ошибкой до 1,5 метра.

4. Алгоритм применения техники прямой перспективы к радиолокационному изображению увеличивает размер РЛИ автомобиля на расстоянии 100м в 1,9 раз.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов статистического анализа, применением адекватных методик

инженерного моделирования, а также экспериментальной проверкой предложенных алгоритмов обработки РЛД, полученных на основе результатов натурных испытаний макета АРЛС.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы были использованы при проведении научных исследований, выполненных совместно с сотрудниками НИО кафедры «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование», МАИ.

Личный вклад автора состоит в следующем:

- проведен анализ состояния развития АРЛС, обработки сигналов РЛД АРЛС, в том числе и панорамной АРЛС;
- разработаны методика, алгоритм и программное обеспечение для определения радиолокационных характеристик сигналов, отраженных от автомобилей;
- разработаны алгоритм и программное обеспечение для определения боковых дорожных границ дороги с переходом «полотно-обочина» типа «асфальт – металлические ограждения»;
- разработаны алгоритм и программное обеспечение применения техники прямой перспективы к радиолокационному изображению.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях:

- Буй Ши Хань. Методика исследования радиолокационных сигнатур дорожных объектов в автомобильной РЛС предупреждения столкновений / Тезисы докладов, XLIII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2017». Москва, Россия, 5-19 апреля 2017, с. 614.
- Bui Sy Hanh, V.V. Rastorguev, P.V. Sokolov. Researching of road objects radar signatures in the collision prevention automobile radar / 19th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2017, Girona, Spain, 2-6 July, 2017, pages: 1 – 5.
- Буй Ши Хань, Расторгуев В.В., Шнайдер В.Б. Алгоритм определения дорожных границ с помощью автомобильной радиолокационной системы предупреждения столкновений / Тезисы докладов, 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017». Москва, Россия, 20-24 ноября 2017, с. 205 – 206.
- Bui Sy Hanh, V.V. Rastorguev, P.V. Sokolov. Algorithm for Determining Road Boundaries in the Radar System of an Unmanned Car / 20th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2018, Bucharest, Romania, 1-5 July, 2018, pages: 1 – 7.
- Буй Ши Хань, Расторгуев В. В., Соколов П.В. Построение дорожных границ с помощью автомобильной радиолокационной станции с применением преобразования Хафа / XII всероссийская конференция – «Радиолокация и Радиосвязь». Москва, Россия, 26-28 ноября 2018, с. 103 – 107.

Публикации. Результаты исследований, выполненных в диссертации, представлены в 8 печатных трудах, в том числе в 3 статьях в научных журналах, рекомендованных в перечни изданий ВАКа, и 5 тезисах докладов научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 110 машинописных листах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и списка использованных источников. Иллюстративный материал представлен в виде 39 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 50 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследований, представлена научная новизна и практическая значимость работы, показаны основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, реализация и внедрение результатов работы, апробация результатов работы, личный вклад, публикации, структура и объем диссертационной работы.

В первой главе выполнен обзор состояния развития информационных датчиков современных систем помощи в движении автомобилей на дороге, особенность преобразования РЛИ в АРЛС.

Выполнен анализ методов определения размеров РЛИ объектов в разных радарх, позволяющий сделать вывод об отсутствии метода определения размеров РЛИ ДО в АРЛС с ЛЧМ сигналом.

Обзор и анализ методов определения границ дороги в движении автомобиля показывает необходимость разработки алгоритма и программного обеспечения, применимых для панорамной АРЛС.

Показана необходимость разработки нового алгоритма преобразования РЛИ в вид, интуитивно воспринимаемый водителем и дающий ему представление перспективы о дорожной обстановке при наблюдении РЛИ на экране.

Вторая глава диссертации посвящена разработке 3 алгоритмов:

- алгоритм определения размеров РЛИ автомобилей, позволяющий выполнить оценивание размеров центральных сечений радиолокационных отражений от автомобилей;
- алгоритм определение дорожных границ, использующий для написания программы поиска и определить границы перехода «дорожное полотно - обочина»;
- алгоритм применения техники прямой перспективы к радиолокационному изображению.

Алгоритм измерения размеров РЛИ ДО

Особенностью отражения от автомобилей (особенно от легкового автомобиля) является сигнал высокого уровня с одной выраженной модой при дальности наблюдения больше 30 – 40м на рисунке 1.

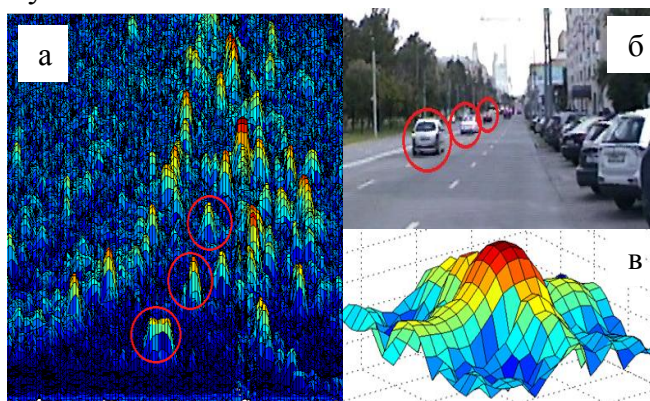


Рисунок 1 - Трехмерное изображение кадра РЛИ а), соответствующее видеоизображение б) и фрагмент РЛИ автомобиля в)

На рис. 1а и 1б соответственно показываються трехмерное РЛИ и видео изображение дорожной обстановки, а на рис. 1в представляет фрагмент РЛИ легкого автомобиля.

Сигналы представленные на рисунке 1а и 1в были полученными экспериментальным путём. Вид и параметры этих сигналов могут быть подтверждать также и теоретически, если для сигнала отраженных от автомобилей сигналов использовать широко распространённую в теории радиолокационную модель цели в виде многоточечного отражателя. Такая модель далее в главе 3 будет использована для компьютерного моделирования сигналов, отраженных от автомобилей.

Автомобили имеют разные габариты, поэтому размеры их РЛИ будут различными, и это позволяет определить габариты типовых автомобилей путем анализа их РЛ отражений.

Алгоритм оценивания размеров главных сечений сигналов отражения от автомобиля при движении показан на рисунке 2

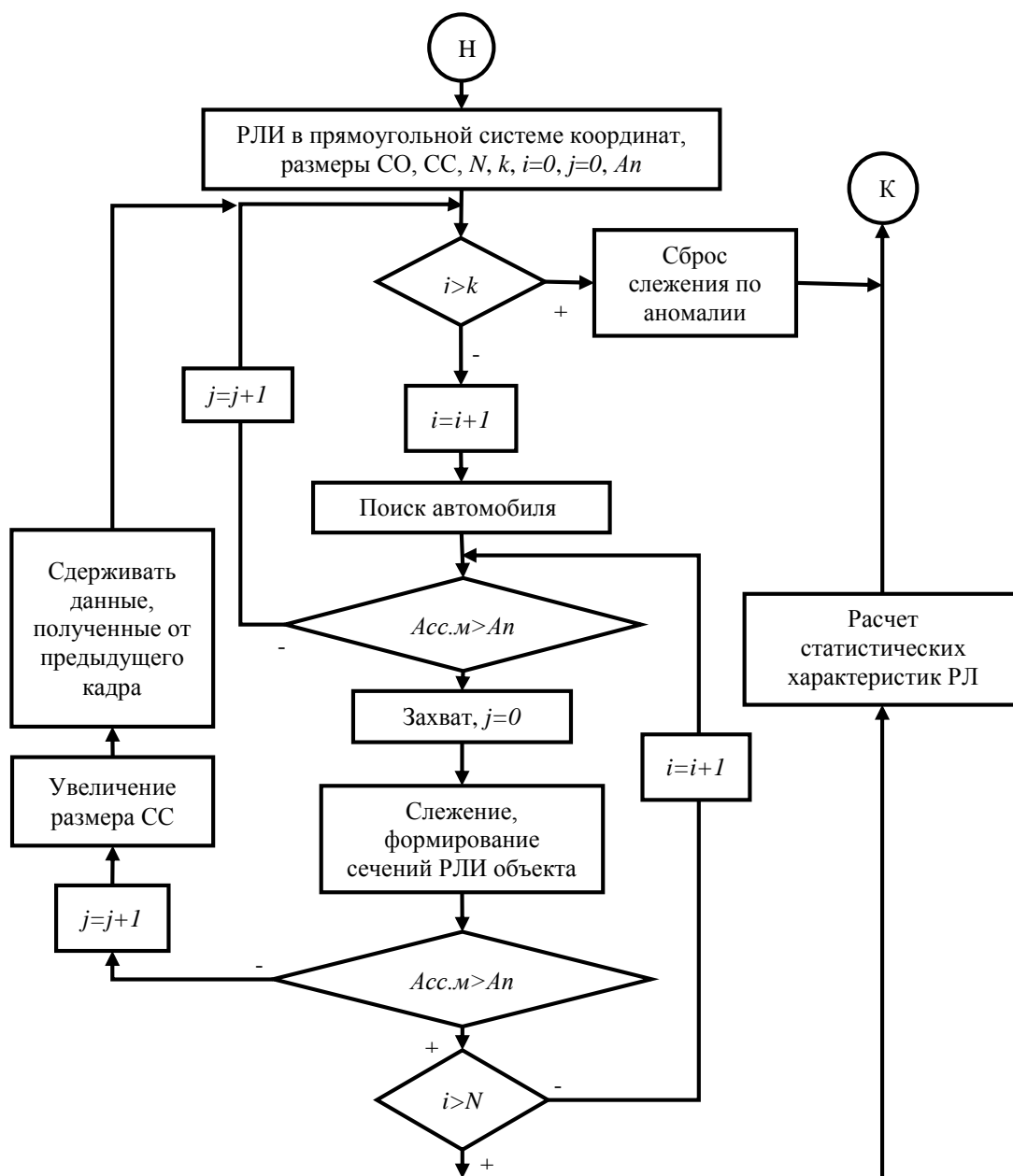


Рисунок 2 - Алгоритм оценивания размеров главных сечений РЛИ автомобиля

На РЛИ дорожной обстановки заранее выбрана область, через которую проезжает исследуемый автомобиль. Здесь размещается строб обнаружения (СО) (для поиска автомобиля) с меньшим размером по дальности и большим по азимуту. Данный СО при прохождении через него РЛ-изображения автомобиля превращается в строб слежения (СС) (Рисунок 3), осуществляющего слежение за максимумом мощности РЛ-отражения исследуемого объекта и его синхронное сопровождение. По координатам положения максимума амплитуды, полученным от СС, строится расширенный строб для формирования сечений РЛИ объекта по дальности и по азимуту. При этом размеры расширенногоstroba выбираются для покрытия полного РЛИ объекта.

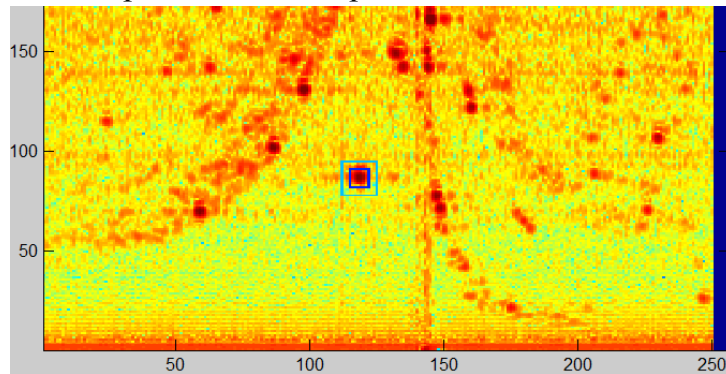


Рисунок 3 - Стробы обнаружения и слежения за автомобилем

Процесс слежения и формирования РЛ-сечений повторяется на всей дистанции движения объекта для большого количества его положений. Выбор числа положений предварительно установлен за счет постоянного слежения за исследуемым объектом, при котором получается большое количество РЛ-сечений для вычисления статистических характеристик РЛ-сигнатур ДО.

Статистические характеристики РЛ центральных сечений вычисляются накоплением N наблюдаемых кадров по формуле:

$$D_{r,az} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i; \sigma_{r,az} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_{r,az} - D_i)^2}, \quad (1)$$

где N – количество отслеженных положений объекта; $i = 1, \dots, N$ – индекс положения при слежении; $D_{r,az i}$ – ширина сечения РЛИ по дальности или по азимуту i -го положения объекта; $D_{r,az}$ – среднее значение ширины сечения по дальности или по азимуту; $\sigma_{r,az}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) ширины сечения по дальности или по азимуту; D_i – ширина сечения по дальности или по азимуту.

Анализ ракурсной зависимости размеров центральных РЛ сечений выполняется по мере наблюдения объектов.

Алгоритм определения дорожных границ

Анализ преобразованного РЛИ в полярных координатах азимут – дальность показывает, что отражение от дорожных обочин носит протяжённый случайный характер по сравнению с отражениями от других объектов на дороге (Рисунок 4б, 4в). Кроме того, если на дороге устанавливаются радиолокационные отметки или металлическое ограждение, то отражение от них четко с большими уровнями сигнала выведено на РЛИ. Поэтому можно определить боковые границы дороги по статистике точек на линии перехода «дорожное полотно – обочина» (например: с переходом «асфальт – металлическое ограждение»). Одним из возможных методов определения

положения дорожных границ является пороговый метод. Суть этого метода заключается в сравнении уровней шумовых отражений от дороги и сигналов отражения от дорожных границ (обочин), в нахождении их отличительных признаков и использовании этих признаков при решении задачи определения границ проезжей части.

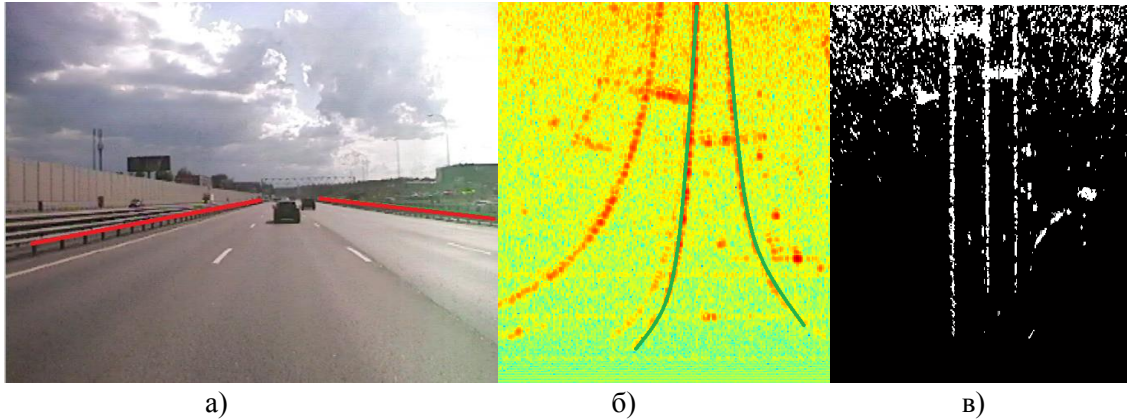


Рисунок 4 – Видеоизображение а) проезжающей части дороги, соответствующие РЛИ в прямоугольной б) и полярной в) системах координат

На рисунке 5 показан алгоритм определения дорожных границ с параметрами, носящими следующие значения: M - количество сечений, k – максимальное количество пропущенных точек границы дороги, i – текущий индекс пропуска точек границы в сечениях.

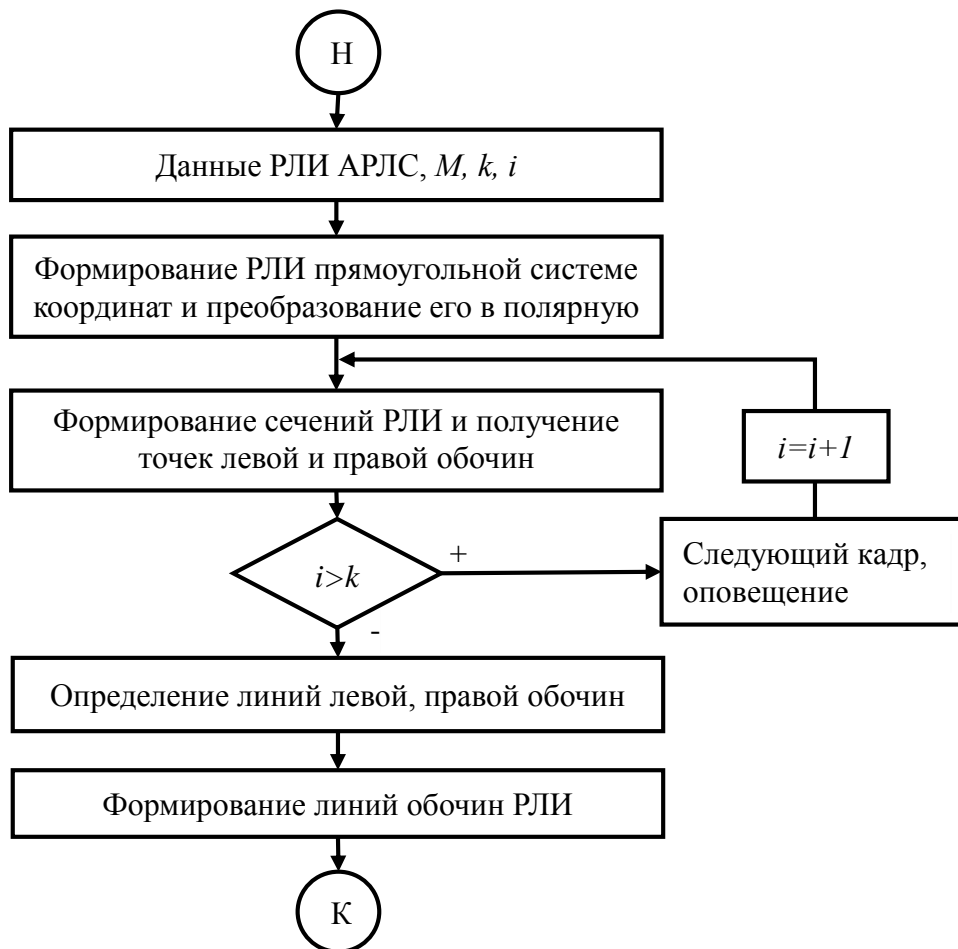


Рисунок 5 - Алгоритм определения дорожных границ

Разработанный алгоритм определения дорожных границ выполняет следующую последовательность действий

- 1) формирование РЛИ дорожной обстановки в прямоугольной системе координат и его преобразование в полярную систему координат;
- 2) предварительная фильтрация и пороговая обработка РЛИ;
- 3) формирование азимутальных сечений РЛИ и получение положений точек левой и правой обочин;
- 4) текущее определение линий границ дорожной части;
- 5) графическое отображение границ дорожной части и формирование информативной части РЛИ.

При выполнении алгоритма существует момент отсутствия точки границы в сечении из-за наличия различных аномалий, вызывающих подавление сигналов отражения от обочин до уровня соизмеримо к шумам дороги. При определенном количестве «пропущенных» точек границы необходимо информировать о невозможности определения границ дорог и повторять процесс поиска границ.

Алгоритм применения техники прямой перспективы к РЛИ

Границы дороги в РЛИ АРЛС при обычном представлении выглядят криволинейными. Неудобство представления дорожной ситуации в РЛИ вызывает трудность в оценке дорожного состояния, а также неправильное определение габаритов объектов и расстояния до них. Поэтому необходимо разрабатывать алгоритм преобразования РЛИ в привычное для водителя изображение на экране при управлении автомобилем (в вид перспективы наблюдения дорожной обстановки).

Ось автомобиля при прямолинейном движении автомобиля будет параллельной границам дороги, поэтому после любого преобразования РЛИ для удобства наблюдения требуется прямолинейность данной оси и границ дороги. На основе визуальных представлений известно, что размеры соизмеримых дорожных объектов при увеличении дальности наблюдения уменьшаются.

По указанным соображениям РЛИ в полярной системе координат (прямоугольное РЛИ) целесообразно расширять. Коэффициенты расширения k выбираются разными в зависимости от многих факторов. Размеры обеих сторон нижней стороны РЛИ от оси автомобиля нужно расширять с таким значением коэффициента, которое обеспечит удобство в восприятии перспективы (на изображении даль представляется как в действительности) водителем, соблюдая при этом прямолинейность оси АРЛС.

Преобразование РЛИ представляет собой двустороннее расширение РЛИ от оси автомобиля. Положение оси автомобиля на дороге является центром для преобразования (Рисунок 6). Прямоугольное РЛИ с высотой h разделяется на две части относительно оси АРЛС, расстояния от оси АРЛС до левого и правого краев РЛИ (или до границ дороги) являются соответственно l , r (Рисунок 6а). В визуальном представлении оптическое отражение от параллельных границ дороги через лобовое стекло автомобиля попадает в глаза обычно в виде двух краевых сторон трапеции, и объекты выглядят постепенно уменьшающимися по мере увеличения дальности наблюдения. С учетом этих особенностей формирования изображения необходимо выполнить преобразование РО РЛИ в вид трапеции, проводя необходимое расширение нижнего края РЛИ с учетом положения АРЛС. Поэтому после расширения с коэффициентом k нижние стороны

обеих частей увеличиваются до l_1 , r_1 (Рисунок 6б). Из подобия треугольников можно получить другие коэффициенты расширения i -ой строки, а с их помощью - все точки расширенного РЛИ.

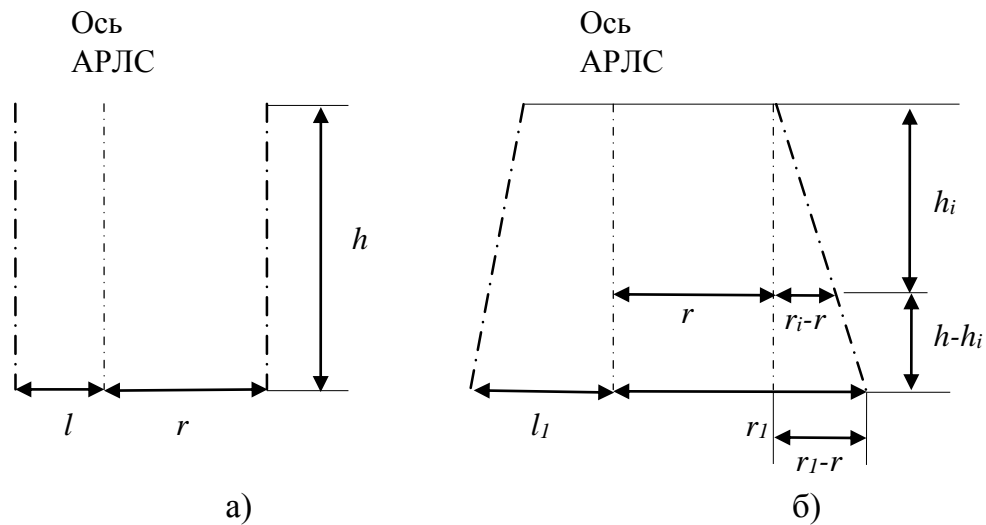


Рисунок 6 - РЛИ а) в полярной системе координат и б) расширенное
Алгоритм применения техники прямой перспективы к РЛИ представлен на рисунке 7.

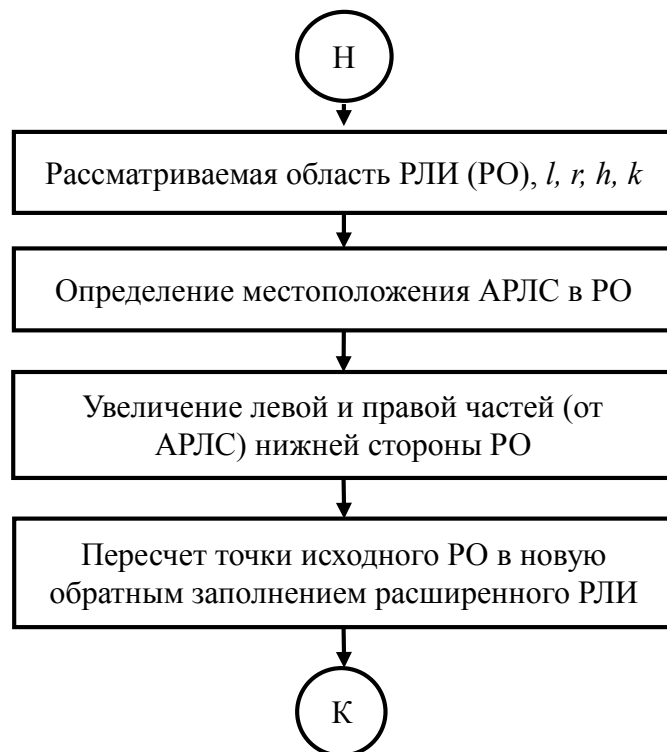


Рисунок 7 - Алгоритм применения техники прямой перспективы к РЛИ

Третья глава диссертации посвящена разработке моделей, с помощью которых исследованы характеристики разработанных алгоритмов.

РЛ сигналы отражения от автомобилей сильно зашумлены и зависят от многих факторов из-за присутствия на дороге множества мешающих объектов и их свойств (других автомобилей, обочин, прилегающих к дороге объектов, зеркального отражения сигналов от дороги, неровностей, электромагнитных свойств дороги, погодных условий и прочих). Эти факторы оказывают совокупное влияние на отраженные сигналы, имеющие большой уровень шума.

С учетом влияния всех перечисленных факторов и случайного характера их воздействий в диссертации используется модель цели (автомобиля) в виде совокупности блестящих точек, расположенных на его поверхности. Каждый точечный отражатель имеет свою ЭПР и определенное удаление от радиолокатора, следовательно, имеет свою амплитуду и фазу, которые можно отражать в записи комплексной огибающей сигнала:

$$s_i(t) = A_i \exp\{j[\beta(t-t_i)^2 + \varphi_i]\} \quad (2)$$

где: A_i – амплитуда сигнала i -ой точки;

$t_i = \frac{2R_i}{c}$, R_i – дальность от АРЛС до i -ой точки; c – скорость распространения радиосигналов в воздухе;

φ_i – случайная комплексная фаза, зависящая от условий отражения ЭМВ от i -ой точки;

$i = 1, 2 \dots N_s$ – индекс отражателей; j – мнимая единица.

Параметр $\beta = 0,5(f_1 - f_0)/\tau_0$ характеризует скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала (здесь f_0 , f_1 , τ_0 – начальная, конечная частота и длительность ЛЧМ сигнала), девиация частоты которого равна $\Delta F = f_1 - f_0$.

В литературе показано, что суммарный сигнал, отраженный от совокупности N точечных отражателей для k -ого элемента разрешения является сигналом той же частоты, но обладающим случайной амплитудой и фазой:

$$A'(t_k) = \sum_{i=1}^{N_s} \dot{s}_{k,i}(t) = A_{k0} \exp\{j[\beta(t-t_k)^2 + \varphi_k]\} \quad (3)$$

где: A_{k0} , t_k , φ_k – амплитуда сигнала, задержка и фаза k -го элемента соответственно.

Зависимость комплексной огибающей $A'(t_k)$ на всем интервале задержек $t_k \in [t_{kmin}, t_{kmax}]$ характеризует свойства отраженного сигнала от цели, имеющей протяженность $[R_{kmin}, R_{kmax}]$, где:

$$R_{kmin} = \frac{ct_{kmin}}{2}, R_{kmax} = \frac{ct_{kmax}}{2} \quad (4)$$

Таким образом зависимость $A'(t_k)$ от времени эквивалентна такой же зависимости от дальности $\tilde{A}(x)$.

Можно по аналогии ввести зависимость комплексной амплитуды от азимута, которая обозначается как $\tilde{A}(y)$.

Полученные амплитуды сигналов $A(x)$, $A(y)$ после сжатия сигналов $\tilde{A}(x)$, $\tilde{A}(y)$ носят случайный характер. Результаты натуральных экспериментов показывают, что распределения этих амплитуд по дальности (параметр x) и по азимуту (параметр y) могут быть аппроксимированы следующими зависимостями вида:

$$\begin{aligned} A(x) &= \frac{1}{\sigma_{x0}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-x_0}{\sigma_x}\right)^2}, \\ A(y) &= \frac{1}{\sigma_{y0}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

где: $x \in (x_0 - \Delta x; x_0 + \Delta x)$; $y \in (y_0 - \Delta y; y_0 + \Delta y)$; σ_{x0} , σ_{y0} – нормирующие коэффициенты; x_0 , y_0 – координат центра автомобиля; $2\Delta x$, $2\Delta y$ – размер автомобиля по дальности и по азимуту соответственно.

С учетом распределения (5) и условия некоррелированности величин x и y можно определить двумерное распределение амплитуд:

$$A(x, y) = A(x) \cdot A(y) \quad (6)$$

Результаты многочисленных натуральных экспериментов показали, что различные виды транспортных средств характеризуются своими уникальными статистическими параметрами:

- средним размером по дальности $2\Delta x$;
- средним размером по азимуту $2\Delta y$;
- видом остротой распределений $A(x)$, $A(y)$ по параметрам σ_x , σ_y .

Математически можно определить количество азимутальных дискретных ячеек при обзоре автомобиля с габаритом $a \times b$ (a , b – ширина и длина объекта), движущегося перед АРЛС на дальности R (Рисунок 8а).

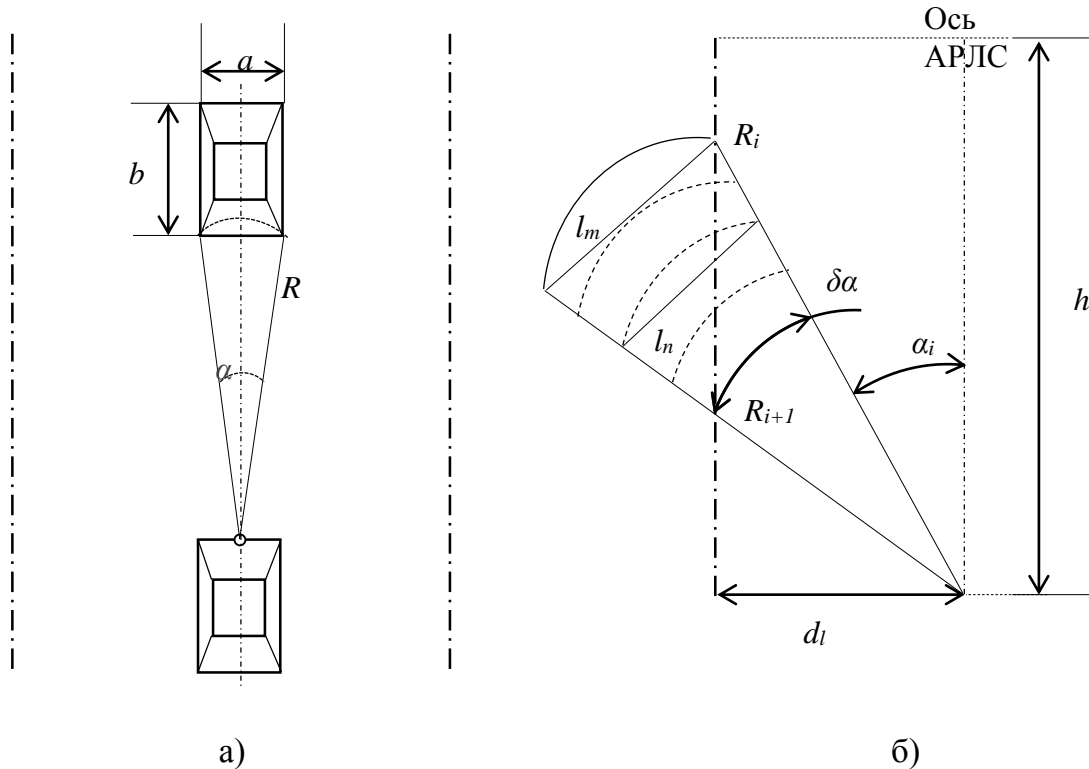


Рисунок 8 - Иллюстрации а) к наблюдению автомобиля со стороны АРЛС, б) к вычислению параметров модели в определении границ дорог

Наблюдаемый угол α со стороны АРЛС вычисляется выражением: $\alpha = a/R$. По этому параметру и разрешению по азимуту можно определить количество азимутальных ячеек N_{az} сигнала отражения автомобиля в зависимости от их положений, а также для разных значений ширины a автомобилей (Таблица 1). А количество дальномерных ячеек будет кратным числу дискретов по дальности в зависимости от длины b автомобиля. В таблице 1 в первой и второй колонке находятся ширина автомобиля и дальность до него, в третьей - α – размер угла наблюдения с АРЛС, в четвертой колонке - δ_{az} – азимутальный дискрет, $0,36^\circ$, а в пятой колонке - N_{az} – приближенное целое число ячеек, полученных в зависимости от значений α и δ_{az} .

Таблица 1: Количество азимутальных ячеек РЛИ автомобилей в зависимости от их размеров и положений на оси АРЛС

а, м	Р, м	α, градус	α/δ _{az}	N _{az}
1,8	30	3.44	9.55	10
	60	1.72	4.78	5
	120	0.86	2.39	3

Продолжение таблицы 1

	150	0.69	1.91	2
	200	0.52	1.43	2
2,0	30	3.82	10.62	11
	60	1.91	5.31	6
	120	0.96	2.65	3
	150	0.76	2.12	3
	200	0.57	1.59	2

На рисунке 8 показаны результаты моделирования РЛИ автомобиля с габаритными параметрами 1,8*5м на экране АРЛС МАИ в полярной системе координат.

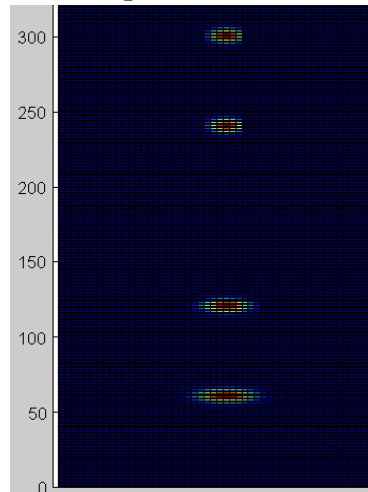


Рисунок 8 - Положения РЛИ модельного автомобиля на РЛИ АРЛС на разных дальностях

На рисунке 9 приведены результаты погрешности оценивания центральных (дальномерных 10а и азимутальных 10б) размеров РЛИ модельного автомобиля на разных дальностях (30, 60, 120, 150м) в зависимости от отношений сигнала и шума в дБ.

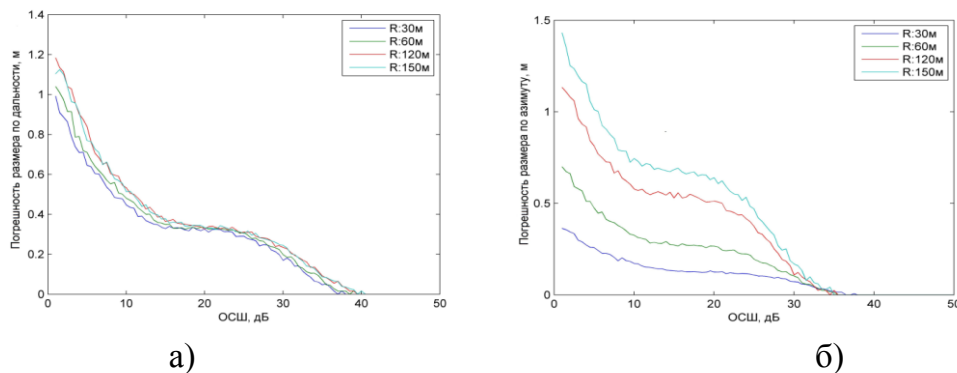


Рисунок 9 - Погрешности измерения размеров центральных сечений а) D_r и б) D_{az} РЛИ автомобиля с габаритом 1.8x5м разных положений в зависимости от отношения сигнал-шум

На основе полученных расчетов и распределения (6) построена модель РЛИ автомобиля и выполнено моделирование процесса определения размеров РЛИ объекта исследования.

Граница дороги будет отражать радиосигналы при облучении диаграммой направленностью антенны АРЛС. Аналогично модели РЛИ от автомобиля моделировать процесс определения границ дороги. При облучении границ радиосигналом в каждом смежном положении ДН будет появляться отраженное поле,

имеющее вид (6), принимающийся для описания зависимости отражения сигналов от дорожных границ.

Отражение радиосигналов АРЛС от границы при каждом смежном положении антенны представляется собой матрицы точек с количествами столбцов и строк, меняющихся зависимо от текущего положения ДН. Иллюстрация облучения ДН на левую границу дороги показывается на рисунке 8б, в которой параметры имеют значения: R_i , R_{i+1} – расстояния левой и правой сторон ДН от АРЛС до границ дороги, δ_α – ширина ДН, α_i – угловое положение левого края i -го положения ДН, h – высота области поиска границ, l_m , l_n – длины хорд m -го, n -го дальномерных положений отсчетов, d_l – расстояние от АРЛС до левой границы.

Осуществляется необходимое вычисление количество горизонтальных и вертикальных точек границ, попадающих в ДН для всех ее положений для различных ее положений. Пользуя модель сигналов (6) можно построить модель в определении дорожных границ с применением алгоритма определения дорожных границ. Результаты моделирования процесса определения границ показаны в главе.

На рисунке 10 показаны результаты моделирования РО РЛИ и результат её применение техники прямой перспективы, где показаны ось автомобиля (носителя АРЛС) линией с точками, границы дороги сплошными линиями и объекты до и после обработки. Размеры ДО увеличиваются после расширения.

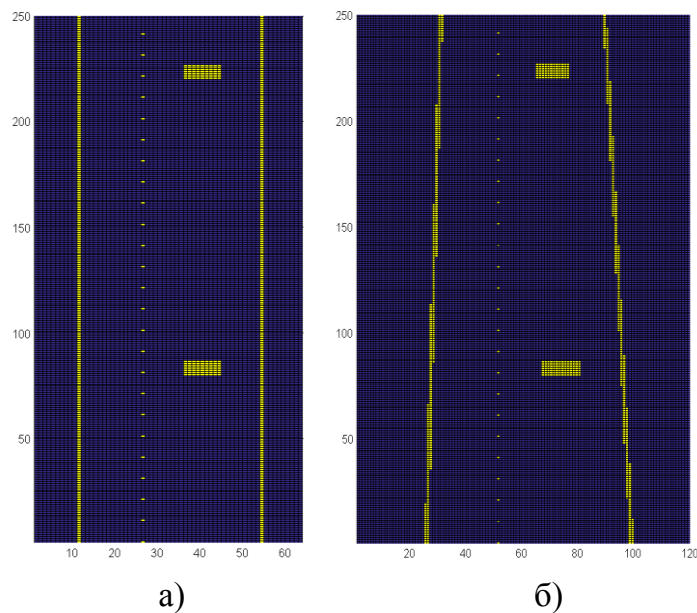


Рисунок 10 - Модель радиолокационного изображения а) на прямоугольном РЛИ, б) на РЛИ после расширения

В четвертой главе диссертации рассмотрены результаты применения разработанных алгоритмов на РЛД, полученных при натурном испытании макета панорамной АРЛС МАИ с непрерывным зондирующим сигналом линейно-частотной модуляции (ЛЧМ). На рисунке 11а приведён макет АРЛС Ка диапазона длин волн, а на рисунке 11б - внешний вид мобильного испытательного комплекса.



а)

б)

Рисунок 11 - а) макет АРЛС Ка диапазона длин волн,
б) мобильный испытательный комплекс

Основные характеристики экспериментального макета АРЛС МАИ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные характеристики АРЛС МАИ

Дальность действия, м	5 - 250
Разрешение по дальности, м	< 1
Разрешение по азимуту, градус	1
Рабочая частота, ГГц	39
Мощность излучения, мВт	60
Антенна	волноводно-щелевая
Сектор сканирования антенны в азимутальной плоскости, градус	90
Координаты изображения	азимут-дальность
Число информационных точек изображения, за один кадр	256 × 512
Энергопотребление	< 100 Вт
Скорость обновления информации	8-10 (Гц)

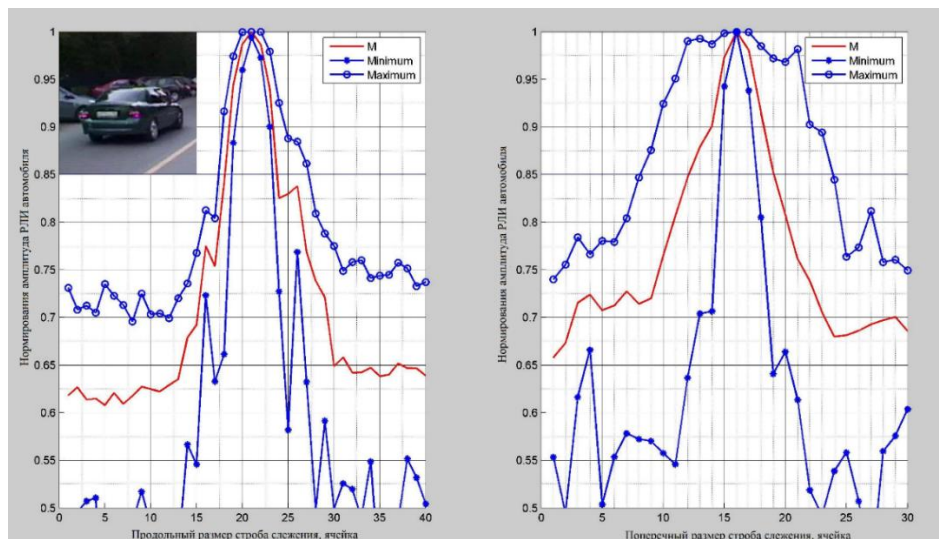


Рисунок 12 - Легковой автомобиль и его главные РЛ-сечения по дальности и по азимуту

Верхняя синяя линия показывает максимальные значения амплитуд отраженных сигналов, а нижняя синяя линия - минимальные значения. Форма сечений РЛИ для минимальных и максимальных уровней отраженных сигналов подтверждает их сильно флюктуирующий характер. Средняя красная линия является линией усреднённых значений амплитуд отраженных сигналов при статистическом наблюдении исследуемого автомобиля.

Результаты оценивания размеров центральных сечений РЛИ автомобилей показывает выраженную одно-модную форму отраженных сигналов в РЛИ автомобиля. При статистической обработке сигналов нужно учитывать моменты потери сигналов отражений от объектов исследования или появления сильных помех. Вместе с тем анализ РЛ-сечений по дальности и по азимуту показал достаточно стабильный характер значений их ширины (по определенному уровню, например: 0,8 от максимальной нормированной амплитуды сигнала отражения от исследуемого автомобиля), они слабо зависят от ракурса, начиная с определенной дальности до автомобиля или начиная с малого угла наблюдения (Рисунок 11 и Рисунок 12). Оценка результатов статистических измерений показывает, что параметры центральных сечений РЛ изображений объектов вычисляются с минимальными относительными погрешностями определения размеров сечений соответственно 10% и 15%.

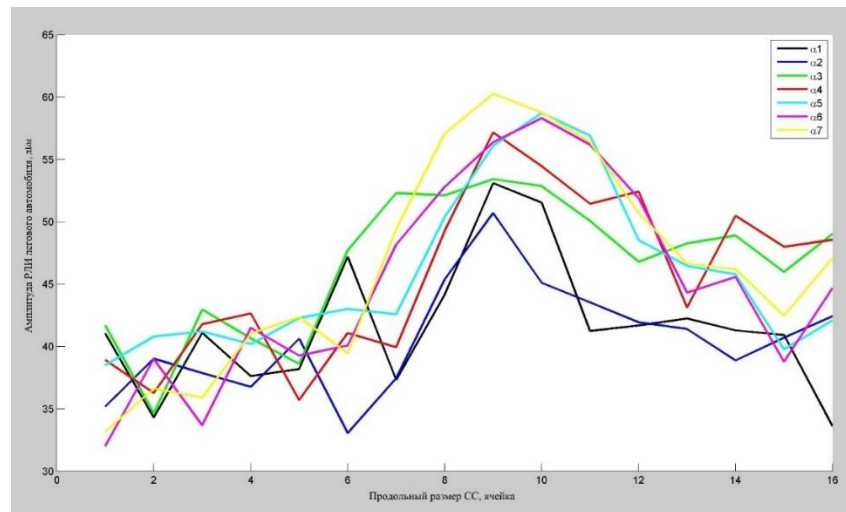


Рисунок 12 - Зависимость сечения РЛИ легкого автомобиля по дальности от ракурса:
 $\alpha_1 = 23,75^0$; $\alpha_2 = 21,45^0$; $\alpha_3 = 15,71^0$; $\alpha_4 = 14,83^0$; $\alpha_5 = 13,33^0$; $\alpha_6 = 12,1^0$; $\alpha_7 = 11,07^0$

Пример применения разработанного алгоритма определения границ проезжей части асфальтовой дороги с металлическим ограждением для случая прямолинейного движения автомобиля с АРЛС показан на рисунке 13, а для других видов дороги с другими обочинами - на рисунке 14.



Рисунок 13 - Оптическое и радиолокационное изображения участка асфальтовой дороги с металлическими ограждениями с нанесёнными линиями обочин

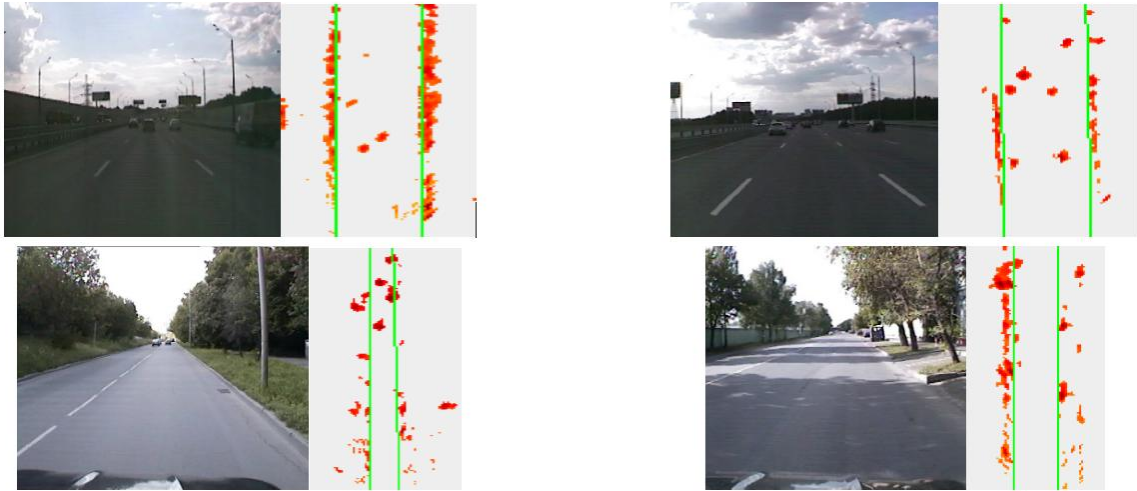
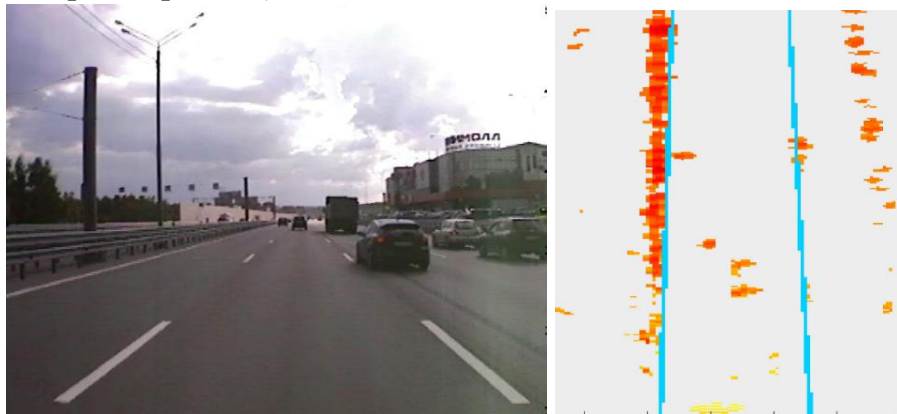
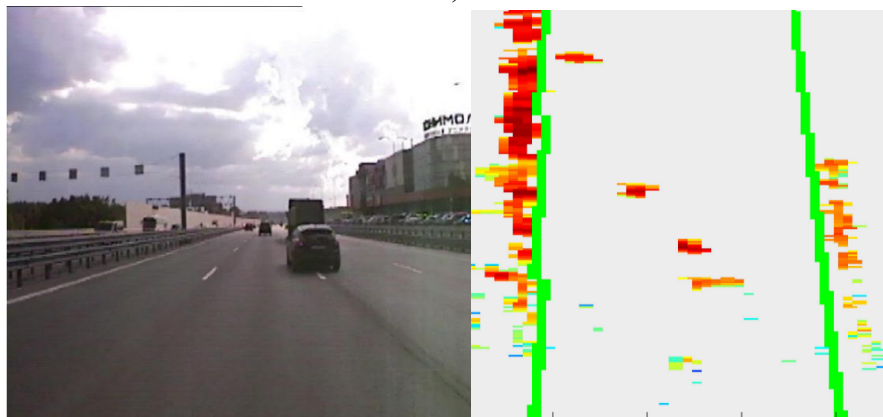


Рисунок 14 - Результаты построения границ проезжей части для различных дорог

Результаты преобразования РЛИ в расширенное изображение показаны на рисунке 15. для различных ситуаций с наложенными дорожными границами, полученными от предыдущего этапа определения дорожных границ с разными коэффициентами расширения (15а - 1,7 и 15б - 2,5).



а)



б)

Рисунок 15 - Видеоизображения и расширенные РЛИ дорожной участка с разными коэффициентами а) $k = 1,7$, б) $k = 2,5$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработан новый алгоритм оценивания параметров радиолокационных изображений дорожных объектов, позволяющий эффективно определять размеры

центральных сечений РЛИ дорожных объектов (стоящих и подвижных) в движении АРЛС. Этот алгоритм позволяет автоматически наблюдать за исследуемым объектом, что устраняет необходимость ручного измерения его параметров.

2. Оценены размеры центральных радиолокационных сечений РЛИ автомобилей, позволяющие определить габариты автомобилей на дороге в зависимости от характеристик отражения.

3. Оценена зависимость сечений РЛИ легкого автомобиля от ракурса при движении на дороге, показывающая малую зависимость размеров центральных сечений РЛИ автомобилей при наблюдении автомобилей под малым углом до 14° .

4. Разработанный алгоритм определения дорожных границ показывает эффективность при обработке РЛИ с границами, имеющими металлические ограждения. Показано, что данный алгоритм работает также и при других обочинах. Это дает водителю возможность оценить положение автомобиля с АРЛС при движении на непривычной дороге в условиях плохой видимости.

5. Оценена погрешность определения дорожных границ в панорамной АРЛС, которая представляется приемлемой для дороги с металлическим ограждением и защитной обочиной 1 м.

6. Разработан новый алгоритм повышения качества визуализации РЛИ на экране монитора АРЛС, основанный на применении расширения РЛИ в полярной системе координат. Показано, что применение полученного алгоритма позволяет повысить информативность о состоянии объектов на дороге, что обеспечивает водителю возможность оценить положения и габариты объектов подобно визуальному представлению перспективы.

7. Обработка реальных сигналов показывает эффективность разработанных алгоритмов. Погрешности измерений размеров сечений моделей автомобилей в среднем меньше 15%. При металлических ограждениях дороги алгоритм определения дорожных границ работает с ошибкой до 1,5 метра.

8. В дальнейшем исследовании нужно сосредоточиться на определении дорожных границ при криволинейном движении автомобиля, определении параметров движения объектов дороги, уточнении коэффициентов расширения нижнего края РО РЛИ для получения точной реальной перспективы наблюдаемой дорожной обстановки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ

1. Буй Ши Хань, Расторгуев В.В. Анализ характеристик радиолокационных сигнатур дорожных объектов в автомобильной РЛС предупреждения столкновений / Журнал «Электросвязь». № 9/2018. с.55-60.

2. Охотников Д. А., Буй Ши Хань. Алгоритм вычисления местоположения границ дороги относительно положения радиолокатора предупреждения столкновений транспортных средств/ Журнал Научно-технический вестник Поволжья, №9/2019.

3. Буй Ши Хань, Охотников Д. А. Алгоритм измерения размеров радиолокационных изображений автомобилей в радиолокаторах предупреждения столкновений транспортных средств/ Журнал Радиотехника, №9(13), 2019.

Публикации в других изданиях:

4. Буй Ши Хань. Методика исследования радиолокационных сигнатур дорожных объектов в автомобильной РЛС предупреждения столкновений / Тезисы докладов, XLIII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2017». Москва, Россия, 5-19 апреля 2017, с. 614.

5. Bui Sy Hanh, V.V. Rastorguev, P.V. Sokolov. Researching of road objects radar signatures in the collision prevention automobile radar / Proceeding 19th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2017, Girona, Spain, 2-6 July, 2017, page: 1- 5.

6. Буй Ши Хань, Расторгуев В.В., Шнайдер В.Б. Алгоритм определения дорожных границ с помощью автомобильной радиолокационной системы предупреждения столкновений / Тезисы докладов, 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017». Москва, Россия, 20-24 ноября 2017, с. 205-206.

7. Bui Sy Hanh, V.V. Rastorguev, P.V. Sokolov. Algorithm for Determining Road Boundaries in the Radar System of an Unmanned Car / Proceeding 20th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2018, Bucharest, Romania, 1-5 July, 2018, pages: 1-6.

8. Буй Ши Хань, Расторгуев В. В., Соколов П.В. Построение дорожных границ с помощью автомобильной радиолокационной станции с применением преобразования Хафа / XII всероссийская конференция – «Радиолокация и Радиосвязь». Москва, Россия, 26-28 ноября 2018, с. 103-107.