

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи



БУЙ ШИ ХАНЬ

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

Специальность 05.12.14

«Радиолокация и радионавигация»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Охотников Денис Александрович

Москва – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1. Анализ состояния проблемы	12
1.2. Особенность преобразования радиолокационного изображения в АРЛС	25
1.3. Задачи обработки радиолокационных данных	37
1.4. Прототип АРЛС	39
1.5. Выводы	41
2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ	43
2.1. Разработка алгоритма определения размеров РЛ изображения автомобилей	43
2.1.1. Обоснование разработки алгоритма	43
2.1.2. Алгоритм определения размеров РЛИ автомобилей	45
2.1.3. Анализ ракурсной зависимости РЛИ автомобилей	52
2.1.4. Выводы	53
2.2. Разработка алгоритма определения границ дороги при движении АРЛС	54
2.2.1. Обоснование разработки алгоритма	54
2.2.2. Алгоритм определения границ дороги при движении АРЛС	56
2.2.3. Выводы	63
2.3. Разработка алгоритма расширения радиолокационного изображения	64
2.3.1. Обоснование разработки алгоритма	64
2.3.2. Алгоритм расширения радиолокационного изображения	65
2.3.3. Компьютерный эксперимент	69
2.3.4. Выводы	72

2.4. Выводы	72
3. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ В АЛГОРИТМАХ	74
3.1. Модель сигналов отражения от автомобилей	74
3.1.1. Математическое описание модели	74
3.1.2. Компьютерный эксперимент	80
3.1.3. Анализ результата моделирования измерения размеров радиолокационных изображений автомобилей	82
3.2. Модель сигналов отражения от границ дороги	82
3.2.1. Математическое описание модели	82
3.2.2. Компьютерный эксперимент	89
3.2.3. Анализ результата моделирования	91
3.3. Выводы	92
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	93
4.1. Результаты определения размеров РЛИ автомобилей	93
4.2. Результаты определения границ дороги	95
4.3. Результаты расширения расстраиваемой области радиолокационного изображения	97
4.4. Выводы	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
Список сокращений и условных обозначений	102
Список литературы	104

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

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, лазерные, радарные, а также датчики дождя и света [1-3].

Разнообразные информационные датчики являются необходимой частью современных систем помощи водителю (для автоматического поддержания дистанции, смены полосы, торможения и др.). Разработчики автомобилей используют разные датчики в системах помощи водителю: Mitsubishi, Bosch, Denso, Eaton, Hella, Melexis, Osram, Valeo и Raytheon [4-7,9].

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 определить дорожное состояние при разных плотностях движений [8].

Таким образом, современным путем решения проблемы движения ТС в безопасности при условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости является применение автомобильной радиолокационной системы обзора

местности, предоставляющей радиолокационное (РЛ) изображение дороги и различных препятствий, расположенных на дороге, около нее, границ дороги и параметры объектов на полосе дороги для водителя 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 [10-12].

Решению задач определения радиолокационных образов дорожных объектов (ДО) в АРЛС в настоящее время существенно препятствует практическое отсутствие достоверных данных о радиолокационных образах ДО, их устойчивости, уникальности, ракурсной зависимости и т.д. Кроме того, последние исследования показывают существенную зависимость типа схемы обнаружителя и его параметров от характерного вида радиолокационного портрета (РЛП) ДО [11-16].

Определение положения границ дороги относительно автомобиля является важной задачей для обеспечения безопасного движения собственного автомобиля. Границей дороги является стык дорожного полотна и обочины, по РЛ отражению от которого можно произвести оценку ширины дороги и положения ее границы [18, 22-23].

Использование АРЛС в помощи управления при ограниченной, отсутствия оптической видимости или при большой плотности движений предоставляет легко принимаемую информацию о дорожной обстановке для дальнейшего управления автомобилем относительно других объектов на дороге [16].

Анализ литератур показывает недостаточное исследование вышеуказанных проблем. Поэтому эти задачи являются **актуальными и их необходимо решать.**

Проектированием АРЛС и обработки РЛД для обеспечения безопасного движения автомобилей занимались различные учёные. Работы российских

учёных в области радиолокации по исследуемой проблематике: профессор В.Н. Скосырев. Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Чукин Л.Ф., Давидич И.В. Шелухина О.И., Елистратова В.В., Ананенкова А.Е., Мякинкова А.В. Среди зарубежных учёных необходимо отметить труды: P.Russer, R.Rollman, M. Schnider, R.Schmidt. В Московском авиационном институте на кафедре 410 разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец панорамной АРЛС, работающей на основе ЛЧМ сигналов.

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 достоверного определения дорожных границ и оценена его погрешность.
4. Разработан алгоритм формирования РЛИ с применением техники прямой перспективы.

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.

Научная новизна диссертационной работы 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 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 для 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 компьютерного моделирования, а также экспериментальной проверкой предложенных алгоритмов формирования в обработке РЛД, полученных при обработке 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.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

– 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 трудах, в том числе в 3 статьях в научных журналах, рекомендованных в перечни

изданий ВАК РФ, и 5 тезисах докладов научных российских и международных конференций.

Личный вклад автора состоит в следующем:

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

Структура и объем диссертационной 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.

Содержание работы

В главе 1 выполнен обзор состояния развития информационных датчиков современных систем помощи автомобилей в движении на дороге, в том числе и АРЛС, степени разработки алгоритмов обработки РЛ данных. Сформулирована актуальность разработки алгоритмов обработки РЛ данных в измерении размеров РЛИ дорожных объектов, определении дорожных границ, и повышении информативности РЛИ.

Глава 2 посвящена разработке 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 обработке радиолокационного изображения.

Глава 3 посвящена разработке моделей, с их помощью исследованы характеристики разработанных алгоритмов.

В главе 4 представлены результаты применения разработанных алгоритмов на моделях и экспериментальных РЛД, полученных при натурном испытании макета панорамной АРЛС переднего обзора 8-миллиметрового диапазона волн кафедры 410 Московского авиационного института.

В заключении приведены основные полученные результаты диссертационной работы и рекомендации к перспективным исследованиям.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ состояния проблемы

В настоящее время с увеличением количества транспортных средств дорожно-транспортные происшествия (ДТП) становятся большой проблемой.

Рассматривая причины ДТП можно выделить следующие их основные типы: неисправность транспортного средства, невнимательность водителя, недостаточная информированность водителя о дорожной ситуации. Так, по данным американского агентства NTHSA [1], указанные ДТП чаще всего связаны с невнимательностью водителя (68%), с несоблюдением дистанции (19%), а также с недостаточной информацией, получаемой водителем во время движения.

Степень информированности водителя о ситуации на дороге находится в прямой зависимости от условий оптической видимости, таких как:

- освещённости дороги и обочин;
- наличия качественной разметки и указателей;
- степени загрязнённости остекления кабины;
- наличия гидро-метеобразований (сильного снегопада, ливневых дождей, тумана), смога, пыли и других мешающих факторов.

Как правило, эти негативные факторы действуют в совокупности, что повышает риск ДТП и при определённых условиях делает эту причину аварии наиболее вероятной. Так, например, ночью наряду с плохой освещённостью может присутствовать и туман, а зимой к идущему снегу, короткому световому дню добавляются вечно забрызганные и обледеневшие стекла, в том числе и стекла фар, а также ослепляющий свет встречных автомобилей.

Есть два пути предотвращения аварий и ДТП. Первый – увеличение пропускной способности транспортной системы за счет увеличения количества

полос движения, второй – разработка системы помощи водителю автомобильного средства, предупреждающей столкновение и/или автоматической остановки при различных ситуациях вождения автомобиля. Система автомобильной помощи водителю будет предупреждать человека-оператора о состоянии движения автомобиля в окружающей среде и возможного столкновения с другими объектами или ТС. Такими системами являются ультразвуковые, оптические (видео-, инфракрасная, лазерная), и радиолокационные, построенные на соответствующих датчиках (Рисунок 1.1).

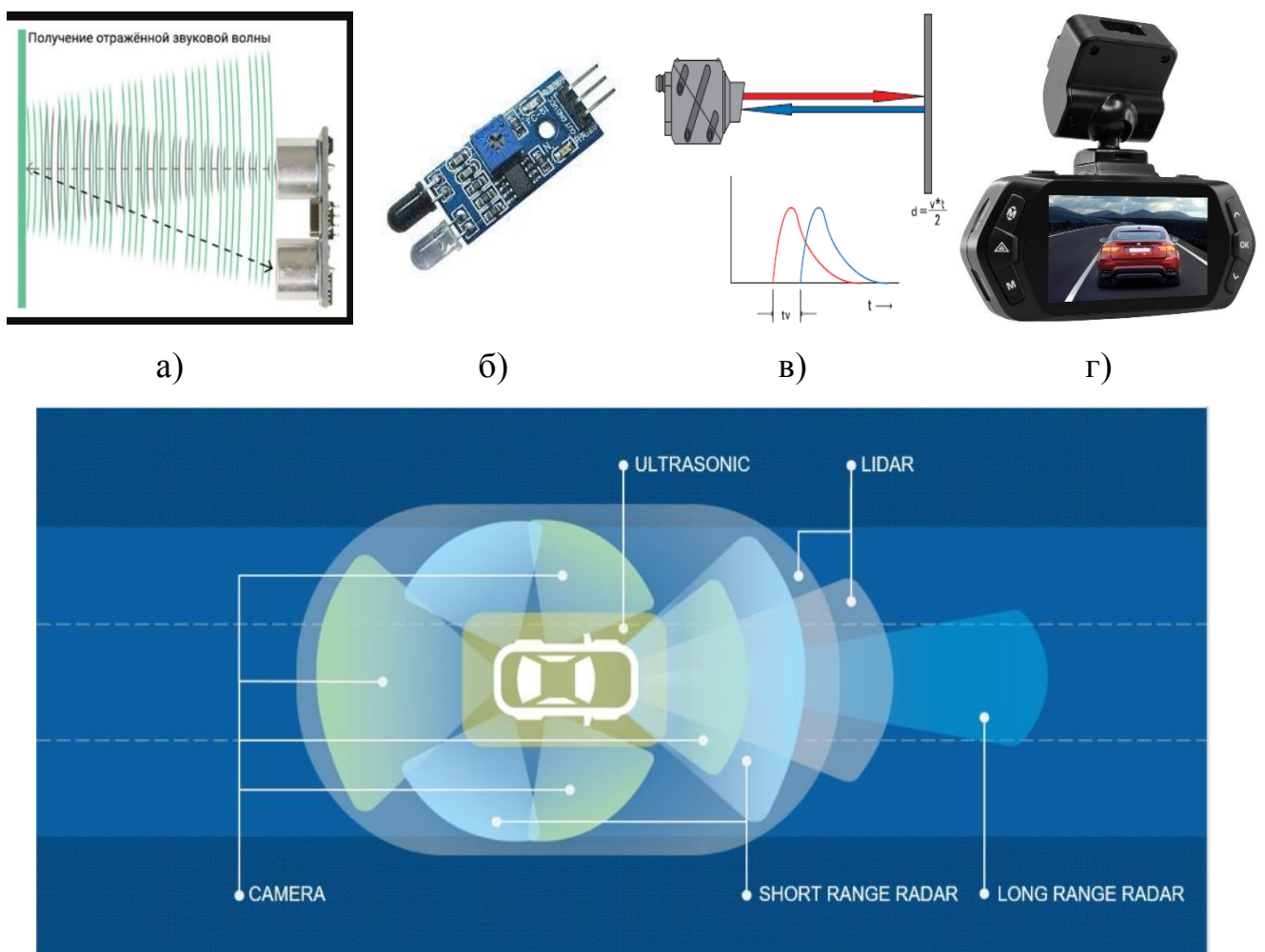


Рисунок 1.1 - Технологии автомобильных систем помощи водителю
а – ультразвуковой датчик; б – инфракрасный датчик; в – лазерный датчик;
г – видеочамера (в качестве датчика); д – схема применения датчиков на автомобиле.

Каждая из указанных систем имеет свои преимущества и недостатки в применении на практике. Ультразвуковые, оптические системы частично будут рассмотрены ниже. Радиолокационная система становится приоритетной из-за её работоспособности, независимой от погодных условий, освещенности дорог, степени загрязненности остекления кабины, степени видимости окружающей среды, большой дальности действия и широкого пространственного обзора. Поэтому большая часть обзора будет сосредоточена на радиолокационной системе помощи водителя (система предупреждения столкновения ТС) с главным элементом - автомобильная радиолокационная станция, построенная на основе автомобильных радиолокационных датчиков (АРД).

Ультразвуковые системы (акустические локаторы) строятся на основе расчета времени распространения звуковой волны в воздухе с автомобиля носителя до измеренного объекта.

Известно, что при распространении в атмосфере акустических волн происходит их ослабление в результате их поглощения и рассеивания окружающей средой. Ослабление излучения подчиняется экспоненциальному закону в зависимости от расстояния. Это является существенным недостатком акустических локаторов. Кроме этого, мощность пьезогенераторов, используемых как источник ультразвуковых сигналов, мала. Поэтому ультразвуковой локатор не может обеспечить необходимую дальность действия [1,2]. Вследствие этого ультразвуковые системы имеют ограниченную дальность действия (меньше 10м) и используются главным образом для обеспечения парковки автомобиля.

Ультразвуковые датчики имеют небольшую стоимость. Их можно защищать от неблагоприятного воздействия окружающей среды. Они стабильно работают при постоянной влажности, запыленности и определяют движения объектов любого материала.

Инфракрасные системы (ИК) предупреждения столкновения машин применяют ИК датчики движения для предупреждения движения собственного излучаемого объекта. С помощью специальной системы линз и особых зеркал ИК излучение объектов попадает на центральный сенсор датчика. При движении объектов происходит изменение в этих системах инфракрасного излучения, что приводит к реакции датчика.

Основными недостатками инфракрасных датчиков движения являются вероятность ложных срабатываний данного вида датчиков (воздействие любого потока теплого воздуха); низкая точность реакции датчика на открытом пространстве (воздействие осадков или солнечного света); невысокий диапазон рабочих температур; и неспособность реакции на объекты, не испускающие ИК излучения.

Преимущества инфракрасных датчиков движения заключаются в огромной дальности фиксирования движения; возможности регулировки нужного угла захвата зоны контроля; реагировании датчиков исключительно на объекты с собственной температурой; гарантированной безопасности ИК датчиков для здоровья людей и животных (датчики не испускают излучения) [2, 3].

Видео-камерные системы предупреждения столкновения строятся на основе визуального датчика, крепящегося под лобовым стеклом. Этот датчик представляет собой компактную видеокамеру высокого качества с платой обработки изображений.

При обработке изображения можно распознавать такие ДО как машины, людей, дорожные знаки и другие. Камерное изображение может показывать на экране и при его обработке можно сигнализировать водителю о возможности столкновения с ДО.

Основные недостатки исходят из принципа работы видео-камерных систем, основанного на обработке изображения, полученного из видеокамеры. Качество изображения зависит от погодных условий, сезона, дня или ночи,

степени загрязнения стекла машины-носителя перед камерой и освещенности наблюдаемой среды. Поэтому видео-камерные системы способны работают только при небольшом расстоянии (в прямой видимости) и при светлом освещении с не большим загрязнением воздуха и стекла машина-носителя.

Преимущество видео-камерных систем находится в визуальном наблюдении на экране дорожных объектов и водитель самостоятельно принимает решение о возможности продолжения движения автомобилей [1-3].

Лазерные системы предупреждения столкновения работают на основе света. Устройство, используемое в них, носит название ЛИДАР (LIDAR – Light Detection and Ranging — световое обнаружение и определение дальности). Это устройство основано на технологии получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных световых систем, использующих явления отражения света и его рассеяния в прозрачных и полупрозрачных средах.

Лидар представляет собой, как минимум, активный дальномер оптического диапазона. Сканирующие лидары в системах машинного зрения формируют двумерную или трёхмерную картину окружающего пространства.

Главные свойства лазера зависят от высокой плотности и мгновенной мощности излучения. Излучателями света в таких системах могут служить обычные светодиоды. Главные недостатки световых систем такие же, как у инфракрасных систем. Работоспособность этих систем зависит от погодных условий, степени загрязнения воздуха и стекла машины, пыли, дождя, снега [1-3].

Автомобильные радиолокационные системы предупреждения столкновения машин появляются в последнее время развития системы предотвращения столкновения ТС при движении автомобиля. Эти системы построены на основе АРД и имеют лучшие характеристики по сравнению с выше рассмотренными системами, так как они работают в любую погоду и мало

зависят от степени загрязнения окружающей среды, также стекла машины. Эти радары устанавливаются на машине для раннего обнаружения дорожных объектов, машин, пешеходов, препятствий и других. В настоящее время признано, что системы радиовидения (СРВ) становятся основным всепогодным информационным датчиком для наземных транспортных средств нового поколения. Главным элементом АРЛС (также СРВ) являются автомобильные радиолокаторы (радиолокационные датчики) [3-6].

Известен ряд различных радиолокаторов (радиолокационных датчиков), применённых в АРЛС. Выделяются две большие группы по методам обработки сигналов: импульсные (недоплеровские и доплеровские) и радары с непрерывной гармонической волной (continuouswave, CW), немодулированные, частотно-модулированные (FMCW), радары с частотной манипуляцией (ЧМн) или frequency shift keying (FSK), широкополосные радиолокаторы.

Импульсные радиолокаторы

С классическим импульсным АРД, АРЛС передает импульсы длительностью порядка нескольких десятков наносекунд и затем ожидает отраженные сигналы некоторое время, являющиеся функцией расстояния до цели. Информация о скорости в недоплеровском радиолокаторе может быть получена только на основе массива данных об изменениях расстояния до объекта во времени.

Импульсные радиолокаторы, для того чтобы однозначно разрешать множественные цели, требуют осуществления высокоскоростной и широкополосной обработки сигнала. Измеренное расстояние до объекта зависит от времени распространения электромагнитной волны от объекта до радиолокатора. Из-за недостаточного быстрого переключения перехода режима передачи на прием для обработки отраженного от цели сигнала, эти радиолокаторы обладают слепой зоной, обычно превышающей 100м. Поэтому импульсные радиолокаторы только используются для обнаружения объекта и

измерения его параметров в дальней зоне и не применяются для обычных транспортных средств.

Радиолокаторы непрерывного излучения

Такие радиолокаторы подразделяют на немодулированные и модулированные.

Как правило, немодулированные радиолокаторы непрерывно передают одиночную частоту и прослушивают эхо-сигналы, существующие непрерывно, поэтому оно не дает информации о расстоянии. Специальные методы позволяют из доплеровского сдвига извлекать информацию о скорости наблюдаемого объекта. Поэтому они мало применяются для построения АРЛС.

Радиолокаторы с модулированным сигналом в настоящее время широко применяются из-за своих возможностей измерения двумерных координат дальности и угла азимута, также скорости движения объекта. Кроме того, обработка радиолокационных данных, получаемых при сканировании дорожных полос приносит большую информативность о состоянии ДО и других в поле вокруг машина-носителя. Поэтому АРЛС такого типа может информировать водителя о возможности ДТП и другие оповещения для непрерывного безопасного вождения ТС на дороге.

Радиолокаторы с линейной частотной модуляцией сигналов

Радиолокаторы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) сигналов (является радиолокатором с модулированным сигналом) в настоящее время используется в большинстве всех автомобильных радиолокационных системах предупреждения столкновений транспортных средств и на основе этих радаров построена современная АРЛС. Далее в диссертационной работе радиолокационная станция, работающая на основе с АРД с ЛЧМ сигналов, будет принята как АРЛС предупреждения столкновений ТС. Современные АРЛС подразделяют по диапазонам дальности работы на: малой дальности (Short-Range Radar - SRR) при помощи парковки, обнаружении препятствия/пешехода,

средней дальности (Medium Range Radar - MRR) для оповещения перекрестного движения и помощи смены полосы, большой дальности (Long Range Radar - LRR) для адаптивного круиз-контроля [7-9].

По диапазонам частот АРЛС делят на радиолокаторы, работающие на частотах 24ГГц, 39ГГц и 76-81ГГц. На этих частотах АРЛС могут работать с узким, широким или сверхширокополосным сигналами. В зависимости от решаемых задач в АРЛС используются разные типы сигналов и модуляций.

АР малой дальности (SRR) [3,4,9-14] обычно имеют максимальную дальность обнаружения до 50м, угол обзора в азимутальной плоскости лежит в пределах $\pm 65^\circ$ для обзора слепых зон автомобиля, поддержки АКК и парковки. Например, АР диапазона 24 ГГц компании Delphi в системе безопасности Delphi Forewarn Radar Side Alert предупреждает водителя о появлении объектов на соседних полосах в пределах 2,4–4 м. С 2016 года компания Conti-Temic ADC выпускает радиолокационный датчик серии SRR 20X малой дальности. Этот датчик работает на частоте 24ГГц и его можно применять для поддержки смены полосы движения автомобиля, обзора слепых зон и обнаружения пешеходов. Компания HELLA является одной из первых производителей 24 ГГц АРЛС. Эта компания начала производить АРЛС четвертого поколения в середине 2017 году в замене предыдущего третьего поколения, начинающего с 2014 года.

Одним из примеров АРЛС малой дальности является радарная концепция от компании TRW [8,9,15]. Семейство масштабируемых радаров ближней зоны, обеспечиваюот обзор в диапазоне 360° вокруг автомобиля и множественные функции безопасности: помощь при смене полосы, обнаружение объектов в «слепых» зонах, предупреждение о поперечном трафике, определение опасности боковых ударов и низкоскоростное предупреждение о столкновениях (Рисунок 1.2)

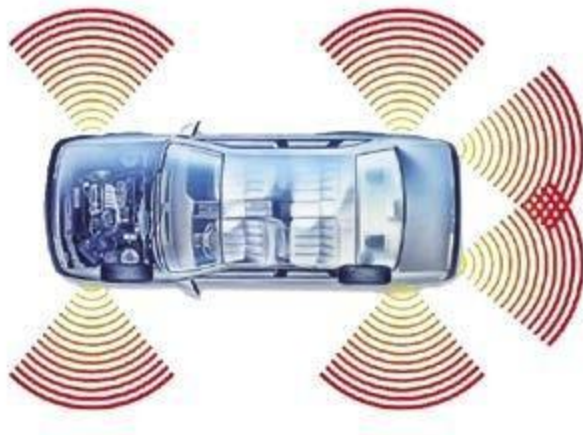


Рисунок 1.2 - Иллюстрация 360-градусного обзора с помощью радаров TRW

Эти AP могут быть также интегрированы с системами автомобильного торможения (для осуществления чрезвычайного торможения) и системами электрического рулевого управления (для помощи в пробках). Этой же концепции создания, распределённой РЛС придерживаются в своих работах [15,16] научные сотрудники НГТУ им. Р.Е. Алексеева, под руководством д.т.н. Мякинкова А.В.

Ведущими компаниями по производству автомобильных радиолокационных датчиков SRR являются Hitachi, Mitsubishi Electric, Tyco/M/A-Com, TDK, s.m.s GmbH, Simens-VDO, Hella InnoSent/ s.m.s, Valeo, MTS GmbH (Рисунок 1.3)

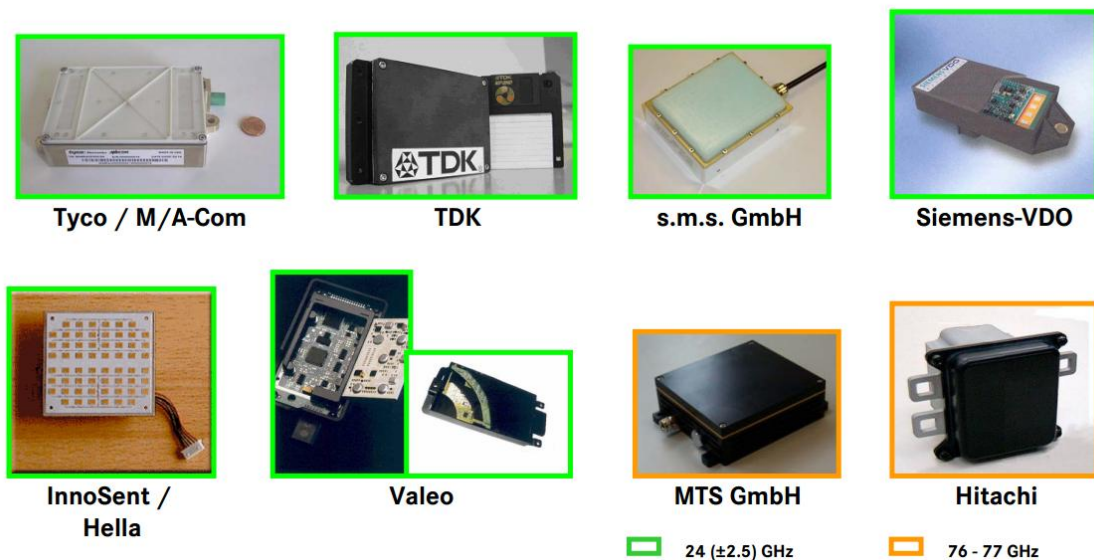


Рисунок 1.3 - AP малой дальности различных зарубежных компаний

АР средней дальности (MRR) [14] поддерживает максимальную дальность обнаружения 70м и полный угол обзора от $\pm 40^\circ$ до $\pm 50^\circ$. Этот АР применяет узкополосный сигнал 200 МГц, промышленный, научный и медицинский диапазон (*Industrial, Scientific, Medical*– ISM) вокруг 24 ГГц и использует линейно-частотную модуляцию (ЛЧМ) или другие техники модуляции, например, ступенчатую модуляцию частоты. Из-за ограниченной полосы пропускания сигнала, разрешающая способность по дальности ограничивает в 0,6м. Поэтому главное применение такой АРЛС является поддержка смены полосы движения машины.

АР компании Bosch работает в диапазоне частот 76 - 77 ГГц, являющейся стандартом для АР практически во всех странах мира. При этом, вариант этого АР для переднего обзора имеет угол обзора по азимуту до ± 45 градусов и дальность обнаружения до 160 метров от автомобиля-носителя. Вариант MRR обзора позади автомобиля имеет угол обзора по азимуту до ± 75 градусов и дальность до 90 метров. Радары средней дальности в системе АКК автомобилей BMW серии 3, Mitsubishi, Mercedes-Benz, Toyota, работающие в диапазоне 76-77 ГГц, позволяют обнаруживать, распознавать и измерять расстояние до объектов на дальности: 1-150 м с разрешением порядка 1 м и обеспечить обзор по азимуту в пределах 12° .

АР большой дальности (LRR) позволяет наблюдать объекты в диапазоне дальностей: 10 - 250м и угле обзора в азимутальной плоскости в пределах: не более $\pm 15^\circ$. Основной функцией этого радиолокатора является работа в системе АКК [4,17-19,70].

АРЛС AC20 компании TRW Automotive выполняет измерение расстояний в диапазоне 1 - 200 м с точностью $\pm 0,5\%$ от дальности или 1 м, измерение скорости в диапазоне ± 150 км/ч с точностью 0,1 км/ч и сканирование углового сектора по азимуту в пределах $\pm 6^\circ$ с точностью $0,3^\circ$.

Новая АРЛС фирмы DENSO имеет дальность обнаружения - 205 м и зоны обзора по азимуту: $\pm 18^\circ$ на расстоянии 35 м от автомобиля, и $\pm 10^\circ$ - на расстоянии 151 м. Кроме того, DENSO начинает интегрировать РЛС с видеокамерой. При этом, АРЛС используется для измерения расстояния до объекта, в то время как видеокамера используется для обнаружения дорожных полос движения и объектов.

Ведущими в мире компания по производству автомобильных радиолокационных датчиков LRR являются Conti-Temic ADC, TRW, DENSO, Hitachi, Bosch, Delphi, FujitsuTen, Mitsubishi Electric, Tyco/M/A-Com, TDK, s.m.s GmbH, Simens-VDO, Hella InnoSent/ s.m.s, Valeo, MTS GmbH, Hitachi (см. Рисунок 4).



Рисунок 1.4 - АР большой дальности различных зарубежных компаний

Типичные тактико-технические характеристики (ТТХ) вышеуказанных АРЛС приведены в таблице 1.1 с условным подразделением на типы АРЛС.

Таблица 1.1. Типичные параметры АРЛС различных диапазонов

Параметры	LRR	MRR	SRR
Максимальная излучаемая мощность передатчика	35 dBm	-9 dBm/MHz	-9 dBm/MHz
Рабочая частота	76-77 ГГц	77-81 ГГц	77-81 ГГц
Полоса частот	600 МГц	600 МГц	4 ГГц
Диапазон дальности $R_{\min} - R_{\max}$	10-250м	1-100м	0,15-30м
Разрешающая способность по дальности, ΔR	0,5м	0,5м	0,1м
Точность определения дальности, δR	0,1м	0,1м	0,02м
Разрешающая способность по скорости, ΔV	0,6м/с	0,6м/с	0,6м/с
Точность определения скорости, δV	0,1м	0,1м	0,1м
Сектор обзора по углу азимута на уровне 3дБ, $\pm \varphi_{\max}$	$\pm 15^{\circ}$	$\pm 40^{\circ}$	$\pm 80^{\circ}$
Разрешающая способность по углу азимута $\Delta \varphi$	1°	$2,5^{\circ}$	$4,5^{\circ}$
Точность определения угла азимута $\delta \varphi$	$0,1^{\circ}$	$0,5^{\circ}$	1°
Диапазон углов по азимуту для определения скорости, на уровне 3дБ, $\pm \varphi_{\max}$	$\pm 5^{\circ}$	$\pm 5^{\circ}$	$\pm 10^{\circ}$

В последнее время ведутся активные исследования в области использования АРЛС диапазона 79 ГГц. Целью освоения нового частотного диапазона 77 – 81 ГГц является уменьшение массогабаритных характеристик АРЛС при сохранении высокой информативности РЛИ [20-23].

Важной тенденцией, появляющейся в последние годы, является комплексирование АРЛС разной дальности действия в едином радаре. Например, компания Delphi Automotive предлагает электронную сканирующую АРЛС - ESR (Electronically Scanning Radar), работающую в двух режимах: ближнем и дальнем диапазоне дальностей. При работе на малой дальности: до 60 м (режим SRR) ESR позволяет обнаруживать автомобили и пешеходов, а при работе на большой дальности: до 174 м (режим LRR) - определяет дальность и скорость до 64 объектов на пути движения автомобиля. Эта АРЛС сейчас устанавливается на модель Ford Focus в Европе [4,9,24].

Кроме того, другая тенденция развития АРЛС связана с возможностью определения пешеходных мостов на дороге в движении автомобиля для подавления ложных тревог о преградах, начинается разрабатывать трехмерная АРЛС с дополнительным каналом для угла места, измеряющего высоту объекта. Если попадает мост через дорогу, то отражение от него начинается с некоторой высоты (выше 2м) и это отражение будет отличным от ДО (может быть с нуля).

Среди последних тенденций необходимо отметить, что весной 2018 года технологическая компания A.D.S. GmbH и компания NVIDIA объявили о начале совместной разработки систем автономного управления автомобилем с искусственным интеллектом (ИИ) на базе платформы NVIDIADRIVE™.

Все выше указанные АРЛС имеют сходную структуру построения за исключением параметров сигналов, отличающихся для разных задач радара и соответственно связанными с ними других параметров. Радиолокационные данные (РЛД) содержат всю информацию о дорожных объектах, дорожной обстановке, прилегающих к дороге объектах. Поэтому обработка радиолокационных данных АРЛС имеет большое практическое применение. Из этого можно сделать вывод об **актуальности проблемы** разработки алгоритмов обработки радиолокационных данных, полученных при сканировании местности АРЛС предупреждения столкновений транспортных средств.

1.2. Особенность преобразования радиолокационного изображения в АРЛС

Как известно, что при сканировании АРЛС по местности, РЛИ сохраняется в памяти в виде прямоугольного массива, в котором по горизонтали расположены отсчёты по азимуту, а по вертикали (в столбцах) – отсчёты по дальности. Учитывая указанную особенность можно осуществлять непосредственный вывод РЛИ на индикатор РЛС без дополнительных преобразований. При этом каждый отсчёт отображается одной точкой на экране ПЭВМ, сообразно своему положению в массиве данных. Характерный вид получаемого при этом изображения показан на рисунке 1.5б. Именно такой подход к отображению информации и был использован на ранних этапах разработки специального программного обеспечения.



а)

б)

Рисунок 1.5 - Видеоизображение а) и РЛИ б) прямого отрезка дороги в случае не преобразованных координат.

Следует отметить, что получаемое в таком случае РЛИ не соответствует естественным геометрическим пропорциям наблюдаемых объектов, поскольку отображение осуществляется в координатах вида отсчёт по азимуту по горизонтальной оси – отсчёты по дальности по вертикальной оси. Особенно

хорошо видны получаемые искажения в случае наблюдения протяжённых по дальности или азимуту объектов. В частности, на рисунке 1.5 показаны видеоизображение и РЛИ для прямого отрезка дороги протяжённого по дальности, на котором хорошо виден переход от дорожного полотна к обочине.

Искажения, возникающие при использовании подобного механизма отображения, можно охарактеризовать следующим образом:

- любой лоцируемый объект с фиксированной шириной, протяжённый по дальности будет иметь, на результирующем изображении, большую ширину для зоны малых дальностей и его ширина будет уменьшаться по мере приближения к максимальной дальности.

- объект, имеющий в действительности, на виде сверху, форму дуги с фиксированным радиусом кривизны равным дальности до этого объекта, на результирующем изображении будет иметь вид прямой или прямоугольника, в зависимости от его протяжённости по дальности. Наиболее характерные искажения, при использовании отображения без преобразования координат, схематично показаны на рисунке 1.6.

Первое достоинство вывода информации в подобной форме это минимальное машинное время необходимое на обработку РЛИ, поскольку кроме операции передачи данных из памяти и последующего БПФ ни какие другие операции над массивом данных РЛИ не осуществляются.

Второе достоинство состоит в том, что максимально полно используется площадь экрана, выделенная под вывод РЛИ и, следовательно, максимально полно отображается информация, полученная от РЛС.

Однако недостаток этого метода состоит в несоответствии геометрической формы реальных объектов и отображаемых на индикаторе РЛИ. Это значительно усложняет понимание получаемого изображения человеком-оператором и тем более использование данного изображения оператором для навигации.

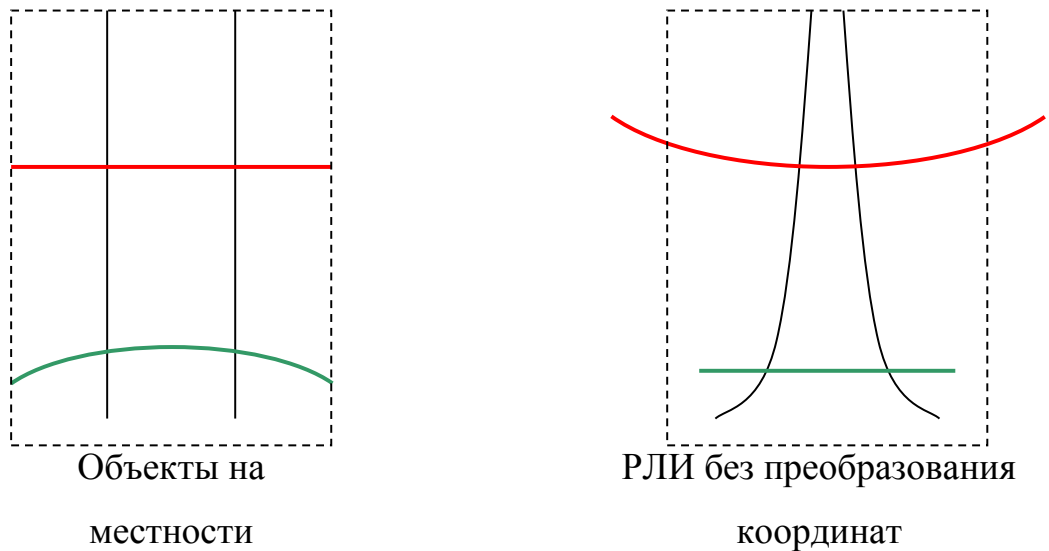


Рисунок 1.6 - Схематичное изображение характерных искажений.

Поскольку основной целью, преследующей использование ПЭВМ в РЛС, является выдача конечных результатов в наиболее удобной и наглядной форме, естественно возникает необходимость осуществлять в реальном времени преобразование получаемого изображения в полярную систему координат. Причём отображение всё равно будет происходить на экране с прямоугольным растром, что несколько усложняет данную задачу.

При этом необходимо отметить, что преобразование координат преследует цель получить изображение РЛ кадра наиболее удобное для быстрой оценки всей ситуации в целом. В этом не ставится задачи использовать получаемое изображение для точного обнаружения или слежения за целью. Критериями выбора метода преобразования являются не столько точность получаемого результата, сколько скорость преобразования и простота и наглядность его результатов для оператора РЛС.

Таким образом, преобразование РЛИ нужно выполнить таким образом, чтобы из элементов прямоугольного массива с известной дальностью R и угловым положением α которому они соответствуют, было сформировано изображение в

прямоугольном растре, соответствовавшем бы представлению этих данных в полярных координатах индикатора.

Схематично процесс преобразования от полярных координат объекта на местности до экранных координат на мониторе, показан на рисунке 1.7.

Здесь необходимо отметить, что задачу преобразования координат можно в общем случае рассматривать как задачу отображения одного множества в другое.

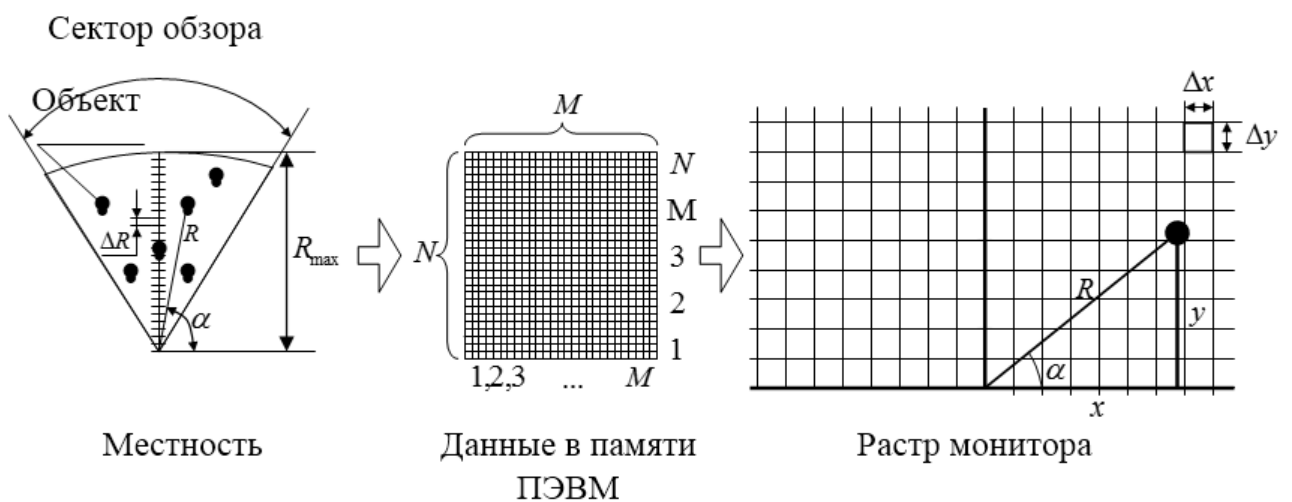


Рисунок 1.7 - Схема преобразования координат точки РЛИ от координат на местности до экранных координат на мониторе.

где: ΔR – разрешение по дальности; R_{\max} – дальность действия АР; R – дальность до объекта дороги; α – азимутальный угол места объекта; M, N – размер массива данных; x, y – координат объекта после преобразования; $\Delta x, \Delta y$ – разрешения экрана по горизонтали и вертикали.

При этом возможны следующие решения:

1. поиск прямого соответствия, когда элементам исходного массива ставятся в соответствие элементы результирующего. В этом случае обходятся все элементы исходного массива, но не обязательно все элементы результирующего;

2. поиск обратного соответствия, когда осуществляется постановка в соответствие элементам результирующего массива элементов исходного. В этом случае осуществляется обход всех элементов результирующего массива, которым обязательно ставится в соответствие какой-либо элемент исходного.

Применение второго способа гарантирует, что всем элементам результирующего массива будет поставлено в соответствие некоторое значение из исходного.

Первое решение менее требовательно к вычислительным ресурсам, но имеет менее точный результат преобразования. Использование второго способа дает более точные результаты, и потребует создания более сложного алгоритма, а следовательно и значительно больших затрат времени.

Выбор конкретного преобразования из выше указанных решений осуществляется по состоянию применения дальнейшего результата преобразования. Первое решение дает простое и быстрое формирование РЛИ на экране водителя, а второе – более точные результаты.

В рамках данной работе был использован второй подход к формированию РЛИ.

Кроме того в дальнейшем, так же возможны два подхода к постановке в соответствие элементам исходного массива элементов результирующего.

Первый подход предполагает использование некоторого промежуточного растра, содержащего результат формирования преобразованного РЛ изображения. При этом этот процесс не будет зависеть от размеров и пропорций конечной отображаемой области результата. В данном случае необходимо иметь этап приведения размеров промежуточного массива к размерам области вывода.

Второй подход подразумевает создание алгоритма, преобразующего координат исходного массива непосредственно в растр области отображения. Достоинствами такого подхода является отсутствие промежуточного этапа и

возможность проанализировать все действия над РЛИ и их допустимость, а недостатками зависимость от конкретного устройства и размера области вывода, и значительное усложнение разрабатываемого алгоритма и соответственно увеличение временных затрат на разработку.

В рамках данной работы приведен первый подход. Осуществляется преобразование координат в промежуточный растр, используя стандартные методы и функции обработки изображения для вывода РЛИ на экран. При необходимости можно осуществлять его растяжение и/или масштабирование до требуемого размера. Кроме того, использование промежуточного растра позволяет организовать преобразование координат, не зависимо от характеристик конечного устройства и размеров области графического вывода данных.

Данная задача может быть решена с использованием известных формул связи полярной и декартовой систем координат:

$$\begin{aligned} \sin(\alpha) &= \frac{y}{R}; \\ \cos(\alpha) &= \frac{x}{R}; \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} y &= R \cdot \sin(\alpha); \\ x &= R \cdot \cos(\alpha); \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\alpha = \Delta\alpha \cdot m; R = n \cdot \Delta R.$$

Где: $\Delta\alpha$ - ширина строки по азимуту в градусах, m - номер столбца (номер отсчёта по азимуту), ΔR - дискретность по дальности, а n - номер отсчёта по дальности (номер строки по азимуту). А $x = \Delta x \cdot l$ и $y = \Delta y \cdot k$ - координаты элемента прямоугольного растра размером $\Delta x \times \Delta y$ с номером l по оси x и k по оси y , который принимает значение из элемента исходного массива с координатами (m, n)

Предполагается с помощью приведенных формул осуществлять отображение данных РЛИ один к одному в промежуточный растр эквивалентный по размерам исходному массиву.

Для этого необходимо определить связь параметров (α, R) с известными значениями номера строки и столбца в исходном массиве.

Дискретное значение угла α можно определить, исходя из номера столбца в массиве. Поскольку здесь известно количество строк по дальности приходящихся на ширину ДНА и ее значение в градусах с учетом равномерного вращения антенны, тогда можно получить теоретическое значение ширины строки по дальности в градусах. Умножая эту величину ($\Delta\alpha$) на текущий номер строки, можем получить искомый угол α

Необходимо отметить, что в радаре помимо указанного выше способа получения относительного угла, имеется возможность получать абсолютное значение угла α для каждой из строк по дальности от датчика углового положения антенны.

Значение расстояния R , при дискретном представлении определяется произведением дискрета по дальности ΔR на номер отсчёта по дальности, являющегося номером строки по азимуту n в сохраненной массиве данных в памяти ПЭВМ.

Предполагается отображение один к одному. В данном случае длина строки, в промежуточном массиве, соответствующей нулевому отклонению от вертикали (Рисунок 1.7) совпадёт со значением её исходной длины в элементах массива. А результирующие значения координат x и y необходимо будет округлять до целых значений. В противном случае, если взять шаг по дальности не равный размерам элемента разрешения возникнут дополнительные сложности, т.к. при округлении шага по дальности до размера элемента разрешения по соответствующей оси, периодически будут возникать элементы промежуточного раstra, несоответствующего поставленному значению из исходного массива.

В итоге каждая точка имеет целочисленные значения координат (номер конкретного элемента промежуточного массива) и при его отображении один к

одному на мониторе, это является номером пикселя монитора по соответствующей оси.

При этом у точек, полученных для малых дальностей, рассчитанные подобным образом значения координат для достаточно большого их количества будут совпадать и все отсчёты будут отображаться в одну точку. Кроме того в области промежуточного массива или экрана, сохраняющего пересчитанные координаты с отсчётами для максимальных дальностей, возникнет некоторое количество пикселей, не соответствующих ни одному из значений с пересчитанными координатами.

Появление элементов раstra, не имеющих в соответствие элементы исходного массива РЛИ, объясняется следующим образом. Как известно, для РЛС с радиально-круговым сканированием местности размер элемента разрешения по дальности фиксирован, а по азимуту увеличивается с ростом дальности. Азимутальный столб имеет вид сектора с шириной равной угловому дискрету $\Delta\alpha$, как это показано на рисунке 1.8.

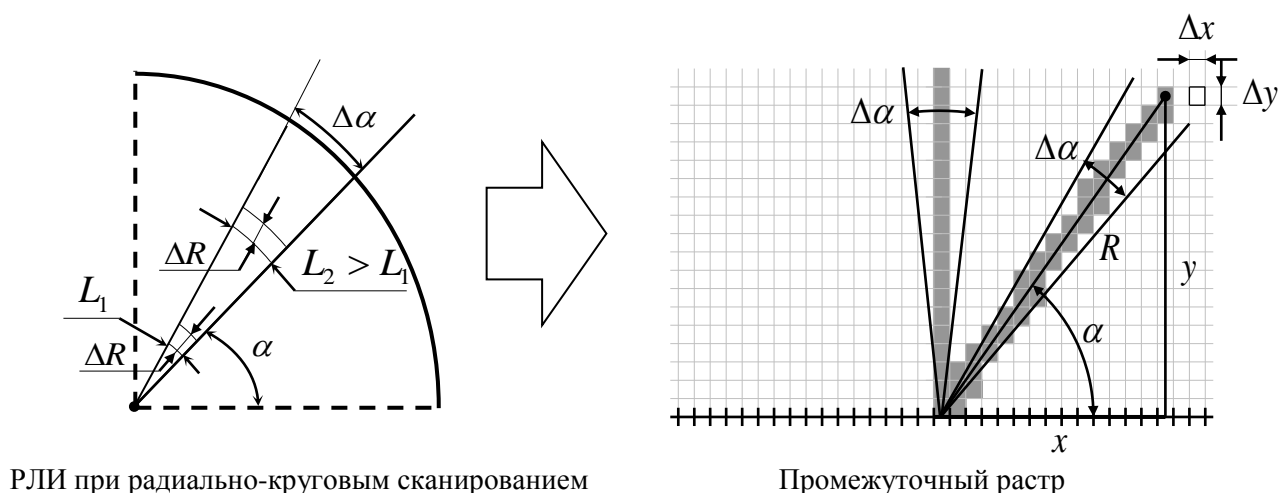


Рисунок 1.8 - Вид азимутального столба в РЛС с радиально-круговым сканированием местности и в промежуточном растре или растре монитора ПЭВМ.

где под угловым дискретом $\Delta\alpha$ понимается угол, на который антенна поворачивается за один период повторения: $\Delta\alpha = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{СКАНИР.}} \cdot T_{\text{ПОВ.З.}}$ или

$\Delta\alpha = \Omega_{\text{СКАНИР.}} \cdot T_{\text{ПОВ.ЗС.}}$. (эта величина совпадает с шириной строки по дальности в градусах).

Однако это не учитывается в приведённых выше формулах преобразования координат. Они интерпретируют азимутальный столб не как сектор, а как полосу фиксированной толщины, проведённую из начала координат под углом α . Следовательно, в области максимальных дальностей, когда дуга ($L_2 > L_1$) в секторе азимутального столба проходит уже не через один, а через два или более элементов раstra размером $\Delta x \times \Delta y$ возникают элементы раstra, которым не ставится в соответствие ни один из элементов исходного РЛИ.

На рисунке 1.8 элементы раstra, координаты которых после округления с точностью до $\Delta x \times \Delta y$, т.е. до целых значений, поставлены в соответствие какому-либо отсчёту из данной строки по дальности, выделены серым цветом. Таким образом, это примерный вид одной строки по дальности в преобразованных координатах. При этом, очевидно что предыдущая ($\alpha - \Delta\alpha$) и последующая ($\alpha + \Delta\alpha$) строки по дальности так же образуют свои наборы элементов промежуточного раstra, которые в области малых дальностей пересекаются, а в зоне максимальных дальностей появляются элементы раstra не относящиеся ни к одному из таких множеств.

Минимальная дальность, на которой появляются непересекающиеся области, при фиксированных $\Delta R = \Delta x = \Delta y = 1$, определяется количеством азимутальных лучей, т.е. величиной $\Delta\alpha$. Чем меньшее количество азимутальных лучей приходится на преобразуемый сектор, тем ближе к центру будут возникать незаполненные элементы раstra.

Исходя из приведенных выше рассуждений, можно сформулировать две основных задачи, для которых необходимо определить методы решения.

Во-первых, способ отображения нескольких элементов исходного массива в одном элементе результирующего РЛИ. Во-вторых, выбора или вычисления

значения, которое должно отображаться в точках РЛИ, которым не было поставлено в соответствие ни одно из значений исходного массива.

Далее рассматривается способ, решающий проблему отображения нескольких значений исходного массива в одной и той же точке РЛИ. В данном случае возможны два основных подхода:

1. Осуществлять усреднение всех значений;
2. Отображать только одно из всех значений, выбранное в соответствии с каким-либо критерием.

Так как по формируемому изображению должна производиться оценка РЛ ситуации, то наиболее приемлемым является отображение максимального из всех значений приходящихся на данный элемент разрешения. Поскольку в противном случае, например при использовании усреднения может возникнуть ситуация когда цель имеющая размеры в один-два отсчёта в исходном массиве данных после усреднения с находящимися рядом нулевыми значениями даст столь малую величину что это приведёт к пропуску этой цели оператором. Что является неприемлемым в особенности для объекта находящегося в ближней зоне и априорно представляющего наибольшую опасность в смысле возможности столкновения.

Исходя из приведённых выше рассуждений, используется следующий подход: в случае попадания нескольких отсчётов в один элемент разрешения среди них производится выбор максимального, значение которого и отображается в данном элементе разрешения.

При решении же вопроса определения значения, которое должно отображаться в том элементе, в который не попало ни одно из значений исходного массива, можно выделить два основных подхода:

- Первый состоит в точном определении, какому отсчёту должен соответствовать данный элемент разрешения путём осуществления более

точного преобразования с использованием более сложных формул, учитывающих изменение азимутального размера элемента разрешения в зависимости от дальности.

- Второй подход подразумевает получение значения для такого элемента раstra путём вычисления среднего значения по нескольким соседним элементам.

В качестве рабочего метода было выбрано осуществление интерполяции усреднением по двум соседним элементам в строке уже преобразованного раstra. Сделано это было исходя из следующих соображений.

Во-первых, использование более сложного алгоритма преобразования координат, хотя и позволит получать более достоверную картину для дальностей близких к максимальным, но приведёт к большим временным затратам при обработке информации.

Во-вторых, использование интерполяции по соседним элементам является более простым решением, которое не требует большого объёма предварительных теоретических изысканий, в отличие от случая разработки более точного алгоритма.

Недостатком использования интерполяции является уменьшение достоверности отображаемой на РЛ индикаторе информации для максимальных дальностей.

В процессе исследования наилучший результат показывается использованием усреднения по двум соседним точкам в строке.

Подобного результата следовало ожидать, поскольку, не пройденные алгоритмом преобразования элементы раstra возникают, как уже было сказано, из-за непостоянства размера элемента разрешения по азимуту, следовательно, информация, которая должна отображаться в данном элементе находится левее или правее данной точки на окружности с радиусом, равным текущей дальности.

Следовательно, использование для интерполяции информации из элементов соответствующих другой (большей или меньшей) дальности не правомерно и обязательно должно приводить к увеличению неточности отображения, что подтверждается полученными экспериментально РЛ изображениями.

В соответствии с полученными результатами интерполяция значений для не пройденных элементов раstra целесообразно осуществляется по двум соседним по горизонтали элементам результирующего РЛИ.

Теоретически используемые процедуры отображения определённого числа значений в одном элементе разрешения и интерполяция значений, соответственно для малых и больших дальностей, может быть представлена как некоторая процедура по усреднению горизонтального (азимутального) разрешения при выводе РЛИ.

Это можно пояснить следующим образом. Используемый метод сканирования пространства, приводит к тому, что количество отсчётов по азимуту на единицу длины дуги на местности для малых дальностей значительно превосходит тот же параметр для максимальных дальностей. А операции, описанные выше, приводят этот параметр к некоторому среднему значению. Это происходит, поскольку при преобразовании считается, что разрешение по длине объекта равно разрешению по его ширине $\Delta R = \Delta x = \Delta y$.

С учетом выше указанных соображений требуется выбрать необходимое преобразование: прямое быстрое преобразование используется лишь для формирования в реальном времени РЛИ на экране водителя, а более сложное точное преобразование примеряется при дальнейшем использовании преобразованного РЛИ.

На рисунках 1.9 и 1.10 приведено исходное и преобразованное РЛИ участка дорожного полотна. Как видно из рисунка 1.10 преобразование координат формирует хорошо различимый коридор между двумя сторонами дороги, который пригоден для управления транспортным средством.

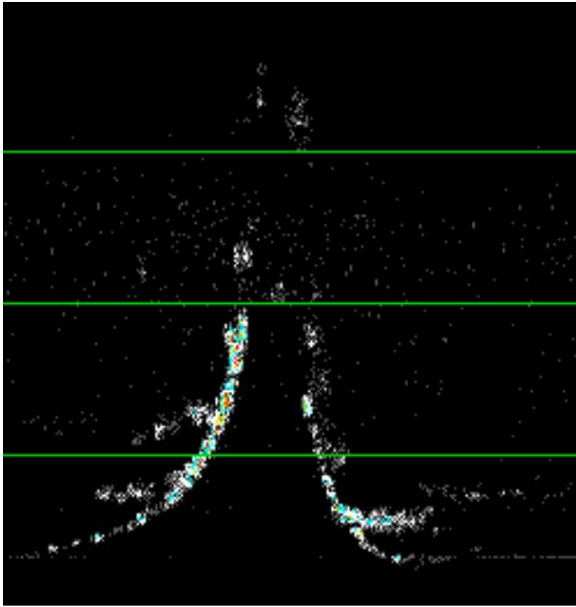


Рисунок 1.9 - РЛИ без преобразования координат

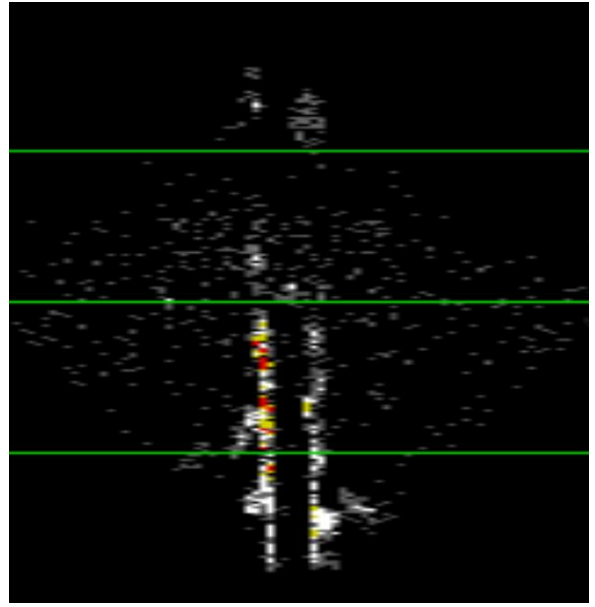


Рисунок 1.10 - Преобразованное РЛИ

При необходимости для удобства в обработке РЛ-данных и представления РЛИ на экране нужно предварительно преобразовать РЛИ в полярной системе координат в изображение в прямоугольной и наоборот.

1.3. Задачи обработки радиолокационных данных

Основные функции для АРЛС различных типов были сформулированы в источниках [2-4,7,19] следующими:

- круизконтроль - поддержка требуемой дистанции и скорости;
- обзор слепых зон машины, поддержка парковки;
- уведомление/поддержка смены полосы движения;
- удержание движения по полосе;
- предупреждение столкновений в пределах полосы;
- обнаружение пешеходов, мотоциклов, велосипедистов;
- помощь при парковке;
- автономная навигация - функция автопилота.

Для выполнения выше указанных функций требуется решение ряд задач, связанных с проектированием АРЛС, обработки радиолокационных данных после первичного формирования РЛИ. Задачи обработки РЛД должны обеспечивать безопасного вождения автомобилями на дороге, поэтому необходимо осуществить следующие задачи:

- выделение неподвижных объектов на полосе движения и оценка их текущих координат;
- выделение, оценка текущих координат и скорости и классификация движущихся объектов. Прогноз их движения;
- проверка критериев опасности ситуации и формирование информации предупреждения об опасности [26,31];
- классификация подвижных и неподвижных объектов [27];
- сформировать символическую, легко воспринимаемую человеком визуализацию выходной информации, обеспечивающую четкое и однозначное разъяснение смысла сигнала предупреждения;
- обеспечить выделение края дороги и (при наличии) разделительной границы между полосами встречного движения [26];
- осуществить классификацию типа обочины дороги – грунтовая обочина, металлический или бетонный барьер, противозумовые щиты;
- определить текущую ширину дороги, прямой и встречной полосы движения.

В работах [27-29] были рассмотрены вопросы формирования первичного РЛИ автомобильной дороги и ДО. Исследованы в [29-31] различные алгоритмы обработки РЛД АРЛС, предоставляющие формирование РЛИ на экране в помощи водителя при управлении автомобилями. В [30] также разработан алгоритм многоканального измерителя для определения дорожных границ. Данный алгоритм не устойчиво работает при большой плотности ДО на дороге.

В других источниках разрабатываются алгоритмы обработки РЛД, применяющие для импульсных радиолокаторов, не применяющих в последнее время в АРЛС предупреждения столкновений. В работе [26] был проведен исследование по созданию алгоритма измерения горизонтальной скорости дорожных объектов. Но вопросы об исследовании размеров ДО, определения границ дороги при различных условиях загруженности дороги ДО и визуального представления состояния дороги, а также ряд других вопросов обработки РЛД остаются мало изученными или не исследованными.

Проведенный обзор известных достижений в области обработки РЛД показал их основные недостатки:

1. Отсутствуют данные о размерах движущихся автомобилей для помощи водителю в представлении дорожной обстановки из-за отсутствия алгоритма определения размеров автомобилей;
2. Отсутствуют механизмы определения положения границ дороги при движении автомобилей с АРЛС;
3. Информация на экране водителя отображается без учета перспективы окружающей автомобиль обстановки.

Поэтому можно констатировать, что необходимо разрабатывать алгоритмы обработки РЛД для измерения размеров движущихся объектов на дороге, определения дорожных границ устойчиво к разным загруженностям дороги и представления удобного к наблюдению водителем дорожного состояния.

1.4. Прототип АРЛС

Разработка алгоритмов, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, выполнена на многолетних исследованиях учёных кафедры «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиооборудование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Данные исследования были направлены на создание алгоритмов,

использованных в программном обеспечении функционирования панорамного радиолокационного датчика переднего обзора автомобиля, работающего в ММ диапазоне длин волн для создания информационного источника в помощь водителю и/или автоматическому управлению транспортных средств [6,32] в условиях плохой или отсутствия видимости.

Экспериментальные макеты радиолокационной станции предупреждения столкновений транспортных средств (РПС) с непрерывным зондирующим сигналом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), работающие в диапазоне 39 ГГц, были созданы специалистами данной кафедры. Применение ЛЧМ зондирующего сигнала позволило поднять энергетический потенциал РПС на 40 дБ и улучшить разрешение по дальности до 1,0 метра. Увеличение частоты работы РПС с применением новой антенны вытекающей волны в диапазоне 77 ГГц [32] позволило снизить массу и габариты системы так, что она по этим параметрам приблизилась к ИК системам автомобиля, но функционирует вне зависимости от погодных условий, а также имеет большую дальностью наблюдения. На рисунке 1.11 приведен макет РПС Ка диапазона, а на рисунке 1.12 - внешний вид мобильного испытательного комплекса.



Рисунок 1.11 - Макет РПС Ка диапазона



Рисунок 1.12 - Внешний вид мобильного испытательного комплекса

Основные характеристики макета АРЛС (РПС) Ка диапазона приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. 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 (39 ГГц)
Сектор сканирования антенны в азимутальной плоскости, градус	90 ⁰ (39 ГГц)
Координаты изображения	азимут-дальность
Число информационных точек изображения	256 × 512 за один кадр
Энергопотребление	<100 Вт (бортовая сеть 12 - 24 В)
Скорость обновления информации, Гц	8-10

Проведенные многочисленные лабораторные и экспериментальные исследования показали, что макет автомобильного РПС позволяет сформировать панорамное РЛИ на экране монитора в заданном угловом секторе на дальностях от 5 до 250 м в координатах азимут-дальность с требуемым разрешением и в реальном времени. Данный макет предоставляет водителю возможность четко наблюдать на РЛИ границы автодороги, движущиеся и стоящие автомобили (как встречные, так и попутные), иные предметы и препятствия на ней.

1.5. Выводы

1. Рассмотрены основные системы автомобильной помощи водителя для предупреждения столкновения транспортных средств. Сделан вывод, что в настоящее время единственным наиболее перспективным направлением

решения проблемы обеспечения безопасности движения наземных ТС в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости является применение в таких системах различных АРЛС малой, средней, большой дальности действия.

2. АРЛС решает задачу предотвращения столкновения с препятствием в пределах полосы движения, так и обеспечивают управление движением (маневрированием) беспилотного автомобиля. Принципиальной особенностью АРЛС является необходимость сформировать высокоинформативное панорамное РЛИ в реальном времени и создание прикладного программного обеспечения (ПО) для решения различных функций предупреждения и управления транспортными средствами.

3. Большинство опубликованных в открытой печати результатов исследований описывают формирование первичного РЛИ автомобильной дороги и дорожных объектов, небольшое количество алгоритмов обработки радиолокационных сигналов и радиолокационных данных (РЛД).

4. Сформулированы основные задачи, которые необходимо решить в диссертации для достижения поставленной цели разработки алгоритмов измерения РЛИ ДО, определения дорожных границ и применения техники прямой перспективы к РЛИ, что приводит к повышению и информативности изображения на экране водителя.

ГЛАВА 2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

2.1. Разработка алгоритма определения размеров РЛ изображения автомобилей

2.1.1. Обоснование разработки алгоритма

Автомобильная радиолокационная система предупреждения столкновений транспортных средств, как известно в [6,27,28] и подразделе 1.1, обеспечивает безопасное движение пилотируемого автомобиля при ограниченной оптической видимости (в условиях дождя, снега, града, тумана, смога) или при ее отсутствии, а также является основным информационным всепогодным датчиком системы автоматического управления (САУ) беспилотным автомобилем.

Для пилотируемого автомобиля одной из нерешенных задач в рассматриваемой АРЛС остается разработка алгоритмов и прикладного программного обеспечения обработки радиолокационных данных с формированием символической, легко воспринимаемой пилотом автомобиля, выходной информации. Данная информация должна обеспечивать четкое и однозначное отображение дороги, ее границ, а также всех ДО: стационарных и динамичных, попутных и встречных – и всех разновидностей транспорта: пассажирского, грузовых и легковых автомобилей, мотоциклов, велосипедов и т.п., а главное – пешеходов.

Для решения задачи автоматического управления (маневрирования) беспилотным автомобилем необходимо разработать алгоритмы и прикладное ПО обработки сформированного в АРЛС панорамного РЛИ. Это позволит не только определить координаты и скорость всех ДО, но и осуществить их идентификацию и прогноз движения.

Решению задач обнаружения и классификации 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. Кроме того, последние исследования [33, 34] показывают существенную зависимость характеристик обнаружения, оптимальность выбора схемы обнаружителя (и тем более его параметров) от характерного вида радиолокационного портрета (РЛП) ДО.

Известные радиолокационные портреты объектов, наблюдаемых на фоне подстилающей земной поверхности, были получены в экспериментальном образце РЛС обзора летного поля аэродрома X-диапазона [34]. Эти РЛП, доступные в небольшом наборе ракурсов, имели лишь одно (как правило, весьма низкое) пространственное разрешение и были заметно ограничены по динамическому диапазону (уровнем боковых лепестков функции неопределенности по дальности, уровнем шумов и т.д.), что в значительной степени определялось методиками их получения, особенностями применяемой аппаратуры и типами сигналов.

Проблема идентификации радиолокационных объектов исследована в работах [34–38]. Известные методы идентификации базируются на различных принципах: на основе формирования сигнатур с использованием кумулянтов высокого порядка [35], нейронной сети [36] или специфических особенностей РЛИ в задаче обнаружения объектов [37, 38].

Выше перечисленные методы применяются преимущественно для РЛС с импульсной модуляцией зондирующего сигнала (ЗС). Для АРЛС Ka- и W-диапазонов, в которых используется непрерывный ЗС с линейной частотной модуляцией, вопрос идентификации объектов дорожного движения остается мало изученным. В большинстве известных исследований АРЛС [27-29] рассматриваются вопросы формирования первичного РЛИ автомобильной дороги и ДО. Однако актуальные вопросы определения и классификации радиолокационных образов ДО в АРЛС, основанных на обработке РЛД и

обеспечивающих формирование символической выходной информации о ДО, в этих работах не рассматриваются.

Одним из возможных методов классификации объектов, наблюдаемых на фоне подстилающей земной поверхности, является исследование РЛ дальномерных портретов (РЛДП) отдельных объектов для нахождения их отличительных признаков и использования в решении задачи идентификации [34]. Поэтому ниже обсуждаются методика и результаты исследования РЛ-портретов и сигнатур ДО в АРЛС предупреждения столкновений. Представлены результаты статистического анализа полученных РЛ-сигнатур автомобилей, которые позволяют использовать их в качестве признаков идентификации ДО для дальнейшего формирования необходимой символической информации в САУ беспилотного автомобиля.

2.1.2. Алгоритм определения размеров РЛИ автомобилей

Для исследования статистических характеристик рассеяния дорожных объектов – как в стационарном состоянии, так и в процессе движения – были разработаны методика исследования РЛ-сигнатур ДО [47] и прикладное программное обеспечение обработки РЛИ, сформированных в АРЛС. Данная методика основана на формировании и анализе двумерной матрицы рассеяния ДО, полученной с высоким пространственным разрешением, соизмеримым по обеим координатам дальность–азимут.

Известно в [34], что двумерная матрица рассеяния наиболее полно характеризует рассеивающие свойства ДО в определенном секторе азимутальных углов и определяется как зависимость интенсивности отраженного сигнала от координат дальность–азимут в заданном участке панорамного РЛИ. При этом РЛ-сигнатуры (или РЛ-портреты) являются искомыми устойчивыми классифицирующими признаками ДО и представляют собой дальномерные и азимутальные сечения двумерной матрицы рассеяния в точке максимума отражения для исследуемого ДО.

Дорожные объекты делятся на движущиеся и стационарные. В данной работе в качестве примера исследуются РЛ-образы движущихся по асфальтовой дороге автомобилей. Исследуемый объект выбирается визуальным совмещением его координат на видео- и РЛ-изображениях. После этого определяются начальные координаты в РЛИ для дальнейшего слежения за движущимся объектом (см. рисунок 2.1).

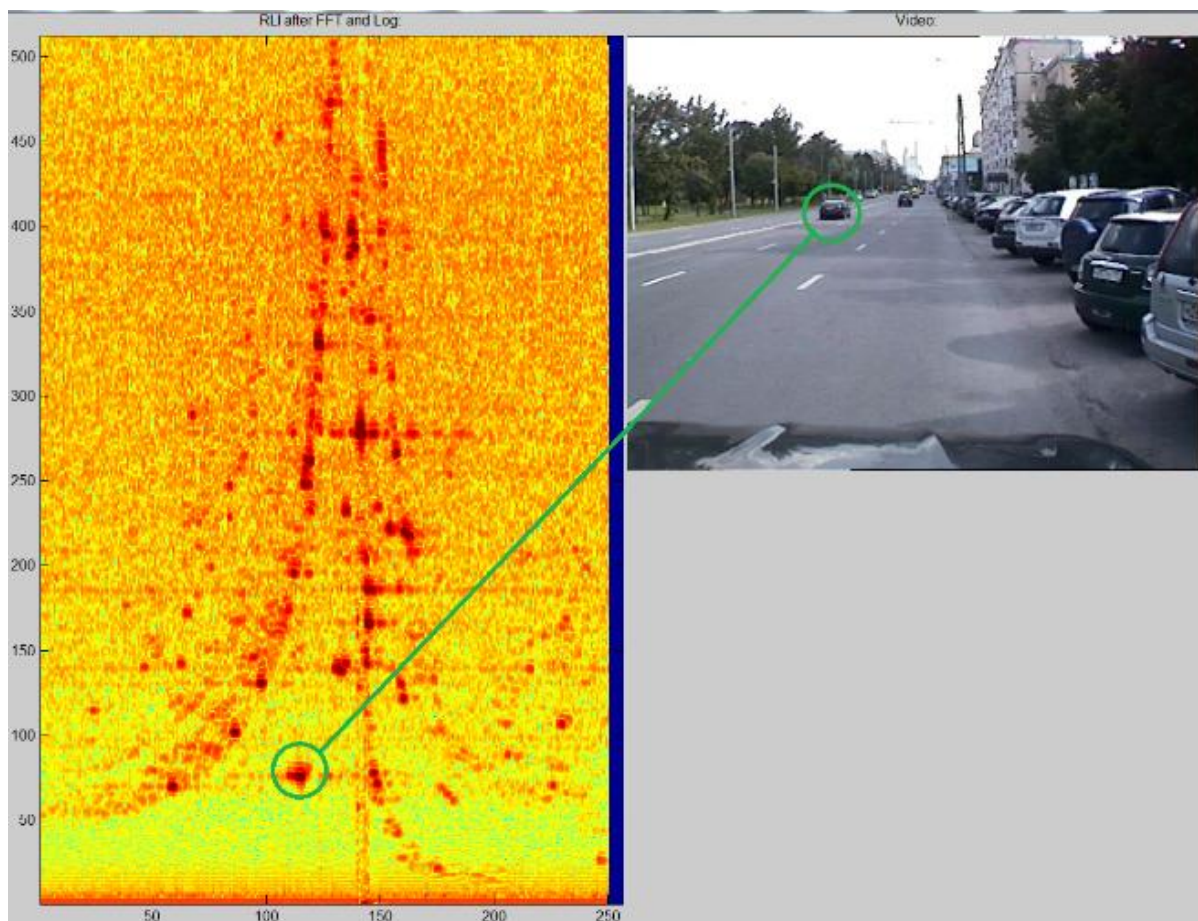


Рисунок 2.1 - Визуальное совмещение координат автомобиля на видео- и радиолокационном изображениях

В ходе исследования РЛИ дороги и ДО установлено соответствие между объектом и его индивидуальным радиолокационным образом. Пример такого соответствия показан на рисунке 2.2, где представлены: трехмерное изображение дорожной обстановки с тремя автомобилями (в красных окружностях) и соответствующее видеоизображение этой обстановки. В нижнем правом углу показан фрагмент РЛИ одного из автомобилей в трехмерном

представлении: по оси X – условные дискреты по азимуту, по оси Y – условные дискреты по дальности, по оси Z – нормированная мощность отраженного от объекта сигнала.

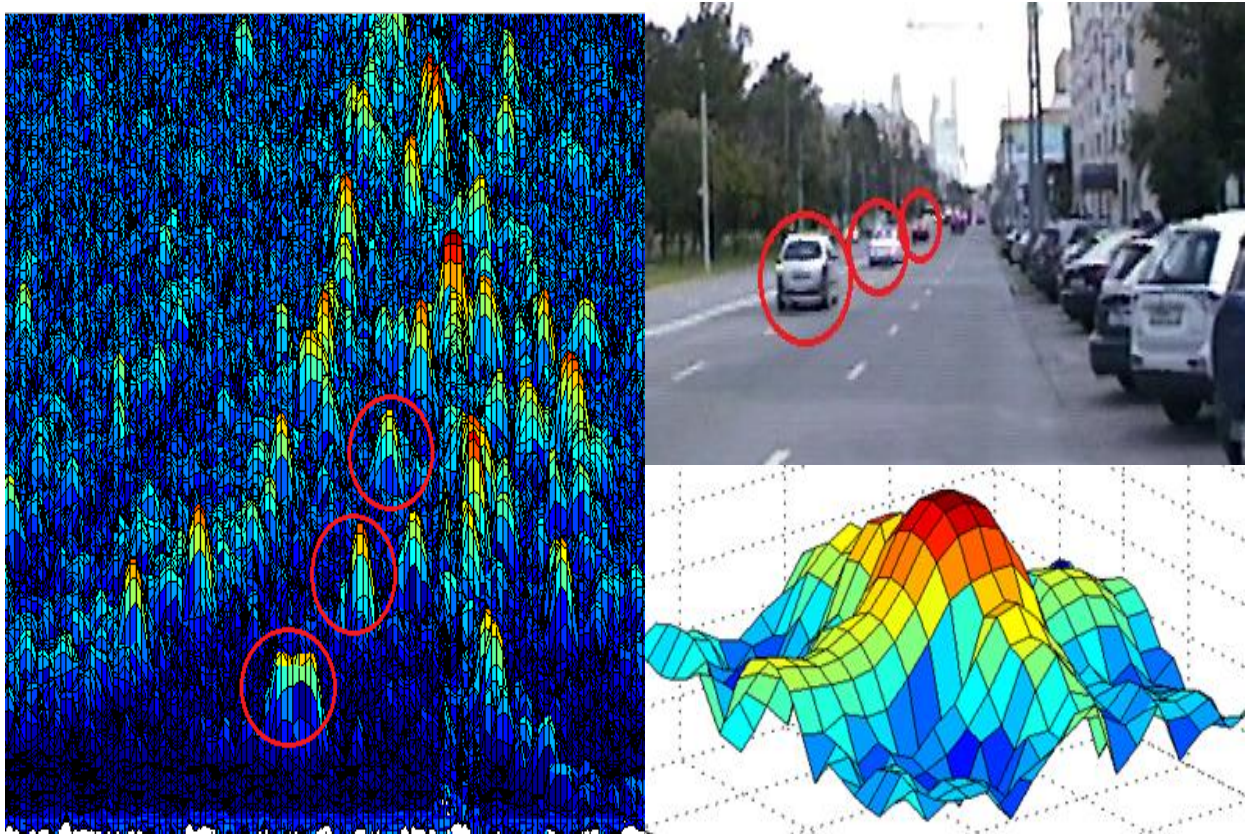


Рисунок 2.2 - Трехмерное изображение кадра РЛИ, соответствующее видеоизображение и фрагмент РЛИ автомобиля

Поскольку автомобиль с АРЛС, а также другие объекты постоянно находятся в движении, для исследования РЛ-сигнатур и динамических РЛ-сечений матриц рассеяния объектов по азимуту и дальности была разработана соответствующая методика. Далее под РЛ-сигатурой объекта будет пониматься его азимутально-дальномерный портрет (сечения двумерной матрицы рассеяния объекта по дальности и азимуту в максимуме отраженного сигнала). При этом в процессе исследования РЛ-сигнатур необходимо обратить внимание на эффект трансформации двумерной матрицы рассеяния объекта, отмеченный в [34].

Исходя из известной величины антенной разрешающей способности АРЛС по азимуту $\Delta\theta_{аз}$, нетрудно оценить пространственное азимутальное разрешение на дороге при настильных углах визирования с помощью простой формулы:

$$\Delta D_{аз} \approx \Delta\theta_{аз} R. \quad (2.1)$$

Например, при типовом значении антенного азимутального разрешения для АРЛС $\Delta\theta_{аз} = 1^\circ$ на дальности 10 м от АРЛС пространственное азимутальное разрешение составит $\Delta D_{аз} \approx 0,17$ м, на дальности 50 м – 0,9 м; и только начиная с дальности 100 м эта величина будет больше поперечной ширины легкового автомобиля – 1,7 м. При дальнейшем росте дальности с некоторой ее величины, определяемой соотношением поперечного к направлению визирования габарита объекта к разрешающей способности АРЛС по азимуту, двумерная матрица рассеяния вырождается в радиолокационный дальномерный портрет (РЛДП).

Исходные данные, используемые при исследовании, представляют собой экспериментальные РЛИ, полученные в ходе натурных испытаний АРЛС и записанные в памяти ПЭВМ в виде массива цифровых данных. Каждый кадр РЛИ имеет размерность 512 x 256 ячеек, причем 512 ячеек соответствуют дальности 250 м, а 256 ячеек – 90° по азимуту.

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, например, 50x8 условных единиц (ячеек массива данных). Данный СО (Рисунок 2.3) при прохождении через него РЛ-изображения автомобиля превращается в строб слежения (СС), с помощью которого осуществляются 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 строга обнаружения выбираются для покрытия полного РЛИ объекта.

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.

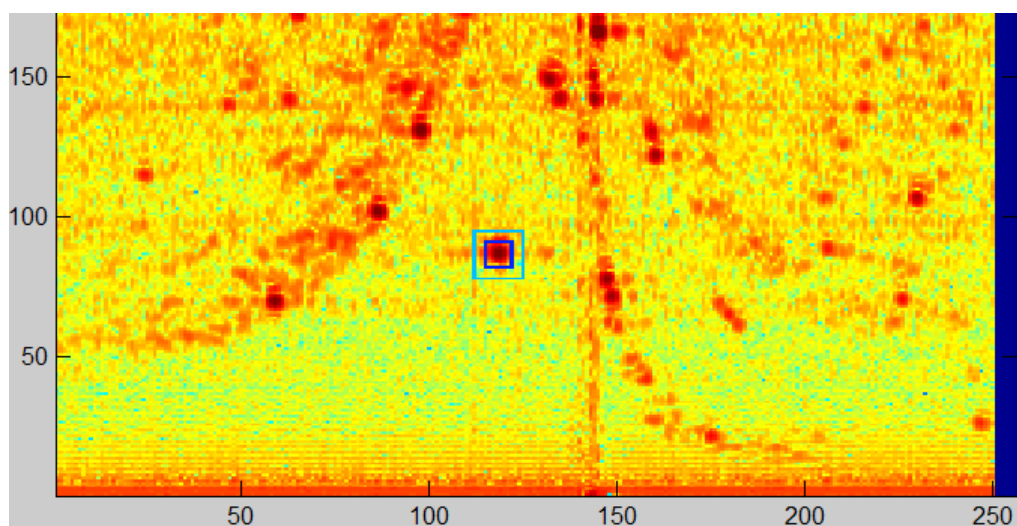


Рисунок 2.3 - Строги обнаружения и слежения за ДО

При выделении движущегося объекта на РЛИ вычисляются координаты его максимума (псевдоцентра), по которому выполняется постоянное наблюдение. После определения первоначальных координат центра осуществляется автоматическое сопровождение выделенного автомобиля с помощью прикладного ПО, разработанного для анализа статистических характеристик РЛ-сигнатур ДО. Структурная схема алгоритма автоматического обнаружения, слежения и формирования РЛ-сечений дорожного объекта приведена на рисунке 2.4.

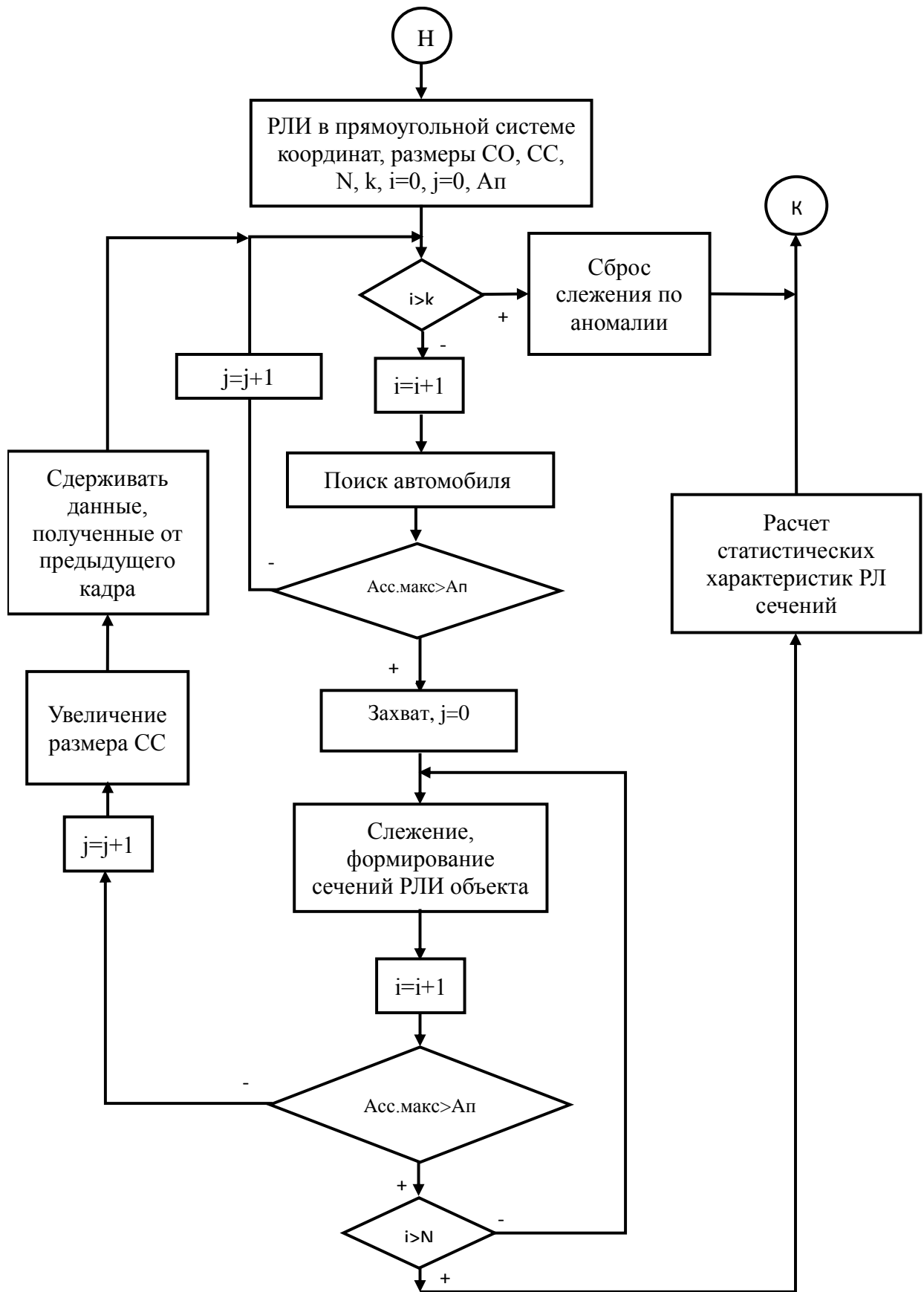


Рисунок 2.4 - Алгоритм определения размеров центральных сечений автомобиля

Работа алгоритма выполняется следующим: входными данными для определения размеров сечений РЛИ автомобиля являются РЛИ в прямоугольной системе координат, выбранные размеры строка ожидания и строка слежения, количество отслеженных кадров - N , количество пропущенных кадров при потере сигнала центра автомобиля - k , уровень амплитуды для определения условия потери сигнала центра - A_n (пороговой) и текущий индекс кадров - i , индекс текущих пропущенных кадров - j . Устанавливается СО на заранее выбранном положении на РЛИ в зависимости от каждого исследуемого ДО, на каждом кадре выполняется поиск автомобиля (превышения максимального уровня сигналов в СС по сравнению с пороговым), если находится отражение от автомобиля, то выполняется захват и слежение, формирования сечений РЛИ объекта. В процессе слежения может появиться момент потери сигналов слежения, то процесс поиска автомобиля повторяется с увеличением размеров строка слежения для захвата РЛИ автомобиля. Если текущее значение пропущенных кадров (не найдено РЛИ автомобиля) больше установленного значения k , то программа останавливается. Если успешно проходит слежение, то в итоге выполняется расчет статистических характеристик РЛ сечений автомобиля.

Статистические характеристики РЛ - сигнатур

В результате статистической обработки РЛ-сечений по дальности и по азимуту для всех положений исследуемого объекта в движении определяются характеристики его азимутально-дальностного портрета. При этом оцениваются: количество максимумов РЛ-сечения, стабильность положения максимума сечения, ширина его индивидуального сечения РЛИ по дальности и по азимуту в среднем и их среднеквадратические отклонения (СКО).

Средние значения и СКО ширины для каждого сечения по дальности и по азимуту определяются известными выражениями:

$$D_{r,az} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i; \sigma_{r,az} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_{r,az} - D_{r,azi})^2}, \quad (2.2)$$

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

В ходе исследования количество отслеженных положений объекта выбирается априори для постоянного слежения за интересующим нас автомобилем (без потери сигнала).

В процессе статистического анализа РЛ-сигнатур переменными параметрами являлись дальность и угол азимута объекта относительно АРЛС.

2.1.3. Анализ ракурсной зависимости РЛИ автомобилей

Важным вопросом исследования РЛ-сигнатур ДО представляется их ракурсная устойчивость. Это обстоятельство легко пояснить, возвращаясь к физическому смыслу матрицы рассеяния – отображению совокупности рассеивающих центров объекта.

Очевидно, что с изменением ракурса наблюдения часть рассеивателей начнет затеняться, мигрировать по дальности. Поэтому с физической точки зрения ракурсная устойчивость элементов двумерной матрицы по сравнению с радиолокационным дальномерным портретом (РЛДП) будет тем выше, чем на большее число элементов объект разрешается по азимуту.

На рисунке 2.5 приведены результаты анализа ракурсной зависимости РЛ-сигнатуры по дальности от угла азимута α (значение угла $\alpha = 0$ совпадает с направлением продольной оси автомобиля – носителя АРЛС). Анализ показывает, что при угле азимута меньше 14° усредненные значения РЛ-сигнатуры по дальности практически не зависят от ракурса. При больших значениях угла азимута (меньшей дальности) влияние эффекта интерференции различных элементов отражения автомобиля усиливается, что приводит к увеличению уровня флуктуаций его РЛДП.

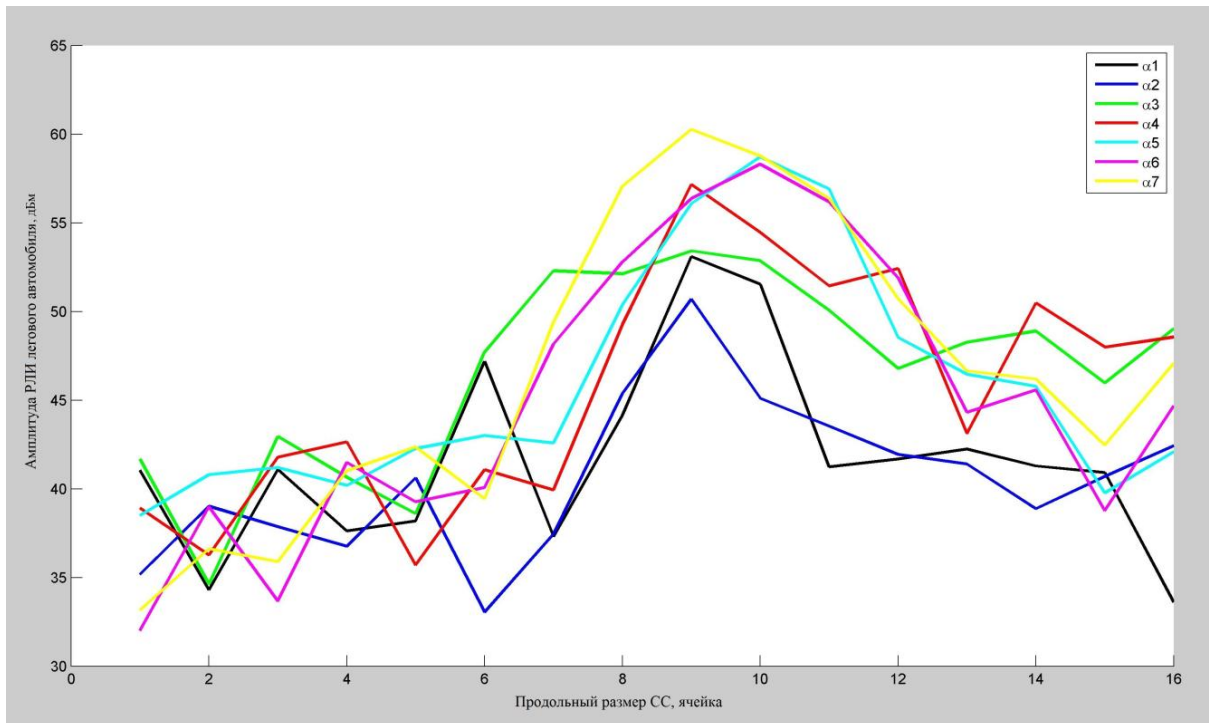


Рисунок 2.5 - Зависимость сечения РЛИ легкого автомобиля по дальности от ракурса.

где: $\alpha_1 = 23,75^0$; $\alpha_2 = 21,45^0$; $\alpha_3 = 15,71^0$; $\alpha_4 = 14,83^0$; $\alpha_5 = 13,33^0$; $\alpha_6 = 12,1^0$; $\alpha_7 = 11,07^0$

Таким образом, проведенный статистический анализ большого количества РЛИ различных автомобилей показал, что наиболее устойчивым признаком (инвариантным к ракурсу наблюдения) является ширина РЛ-сечений по дальности (по азимуту – на ограниченных дальностях), которая определяется габаритами объекта.

2.1.4. Выводы

1. Выполненные исследования позволили разработать алгоритм измерения РЛ размеров центральных сечений дорожных объектов в панорамной автомобильной РЛС предупреждения столкновений.

2. На основе большого объема данных натурных испытаний макета АРЛС проведен анализ статистических характеристик РЛ-сигнатур различных объектов дорожного движения в городских условиях. Исследование показало,

что ширина РЛ-сечений по дальности и по азимуту различных объектов дорожного движения может быть использован для классификации их по группам: легковой автомобиль, грузовик малого и большого размера, специальные дорожные машины малого и крупного размера, городской транспорт (троллейбус, автобус).

3. Статистический анализ большого количества РЛИ различных автомобилей свидетельствует, что наиболее устойчивым признаком (инвариантным к ракурсу наблюдения) является ширина РЛ-сечений РЛИ по дальности (по азимуту на ограниченных дальностях), которая определяется габаритами объекта.

4. Результаты исследования позволяют разработать методику определения размеров дорожных объектов, основанную на динамическом анализе РЛ-сигнатур объектов и сравнении этих сигнатур с эталонными образцами, полученными при статистической обработке РЛ-сигнатур объектов разных классов участников дорожного движения.

2.2. Разработка алгоритма определения границ дороги при движении АРЛС

2.2.1. Обоснование разработки алгоритма

Известно, что радар, как один из основных датчиков системы ADAS, должен обеспечить безопасное движение автомобиля в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости (дождь, снег, град, туман, смог) [27,28,39]. Прежде всего, с помощью радара решается задача предупреждения столкновений с препятствиями на дороге путем измерения расстояния до этого препятствия и оценки скорости сближения с ним.

Вместе с тем, для реализации интерактивного и автономного управления движением автомобиля необходимо определить его местоположения на дороге с точностью, необходимой для совершения маневра в реальном времени. В настоящее время эту задачу решают с помощью известных систем спутниковой

навигации: GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou. Однако даже при использовании дифференциального режима в этих системах точность измерения местоположения автомобиля может оказаться недостаточной, особенно учитывая реальное время запаздывания в этих системах для формирования оценок координат, что недопустимо при скоростном движении автомобиля.

Поэтому другим вариантом решения этой задачи является применение высокоинформативной автомобильной РЛС, разработанной учёными Московского авиационного института (национального исследовательского университета), для определения местоположения автомобиля на дороге путём измерения расстояния от автомобиля до границы проезжей части (обочины) и его угловой ориентации. В результате, путём обработки РЛД (или РЛИ) в АРЛС, можно обеспечить чёткое и однозначное отображение границ дороги и оценить местоположение автомобиля на дороге. Кроме того, относительно дорожных границ строится коридор безопасности [29], в пределах которого решается задача безопасного управления автомобилем.

Задача измерения дальности от автомобиля до границы проезжей части с помощью АРЛС является достаточно сложной [33,41]. Эта сложность определяется рядом причин. Во-первых, учитывая высокое пространственное разрешение АРЛС, граница (обочина) дороги является пространственно-протяженным объектом по дальности и азимуту, представленным большим количеством элементов отражения. Этот объект представляет границу раздела двух поверхностей, которые различаются величиной мелкомасштабного рельефа (геометрия) и величиной комплексной диэлектрической проницаемости (тип), например, асфальт-бетон, асфальт-трава, асфальт-металл. Во-вторых, естественные в процессе движения автомобиля флюктуации скорости и положения центра излучения приводят к дополнительным флюктуациям уровня отраженного сигнала. В-третьих, настильные углы визирования границы дороги, приводят к флюктуациям уровня отраженного сигнала из-за известного эффекта интерференции радиоволн.

Метод определения местоположения автомобиля на дороге относительно дорожных границ для реализации автоматизированного управления движением автомобиля был рассмотрен в работе [30], но данный метод не устойчиво работает при большом количестве ДО на дороге. Поэтому требуется разрабатывать новые алгоритм определения дорожных границ, выполняющий свою функцию независимо от степени загруженности дороги. Здесь рассматривается прямолинейное движение автомобиля и граница перехода «проезжая часть - обочина» также аппроксимируется прямой линией.

Данный алгоритм определения границ проезжей части в АРЛС базируется на результатах анализа статистических характеристик границы раздела «проезжая часть – обочина» и дана оценка возможности применения разработанного алгоритма на практике.

2.2.2. Алгоритм определения границ дороги при движении АРЛС

Основой для построения алгоритма определения границ проезжей части дороги являются панорамные РЛИ дорожной обстановки, экспериментально полученные в результате натурных испытаний макета АРЛС 410 кафедры МАИ.

В ходе анализа РЛИ дороги и дорожных объектов установлено графическое соответствие между исследуемым объектом (обочиной) и его индивидуальным радиолокационным образом. Пример такого соответствия показан на рисунке 2.6, где представлено: видеоизображение дорожной обстановки с обочинами (выделены красным цветом) и соответствующее ему РЛИ (обочины выделены зеленым цветом).

Анализ РЛИ (Рисунок 2.6), построенного в прямоугольных координатах азимут – дальность, подтверждает тот факт, что отражения от границы проезжей части и дорожных обочин имеют протяжённый случайный характер по сравнению с отражениями от других объектов на дороге. Кроме того, необходимо учитывать конечность разрешающей способности АРЛС по азимуту, которая определяется эффективной шириной ДНА ($\Delta\theta_{аз}$) и составляет

величину $\approx 0,7^0 \div 1^0$ (таблица 1). В результате с увеличением дальности отраженные от левой и правой обочин сигналы сливаются. Можно определить максимальную дальность R_{\max} , на которой дорожное полотно не может быть выделено на РЛИ. Так, для однополосной дороги, шириной 3,75 м, эта величина составляет: $R_{\max} \leq 120$ м.

Одним из возможных методов определения 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 в решении задачи определения границ проезжей части.

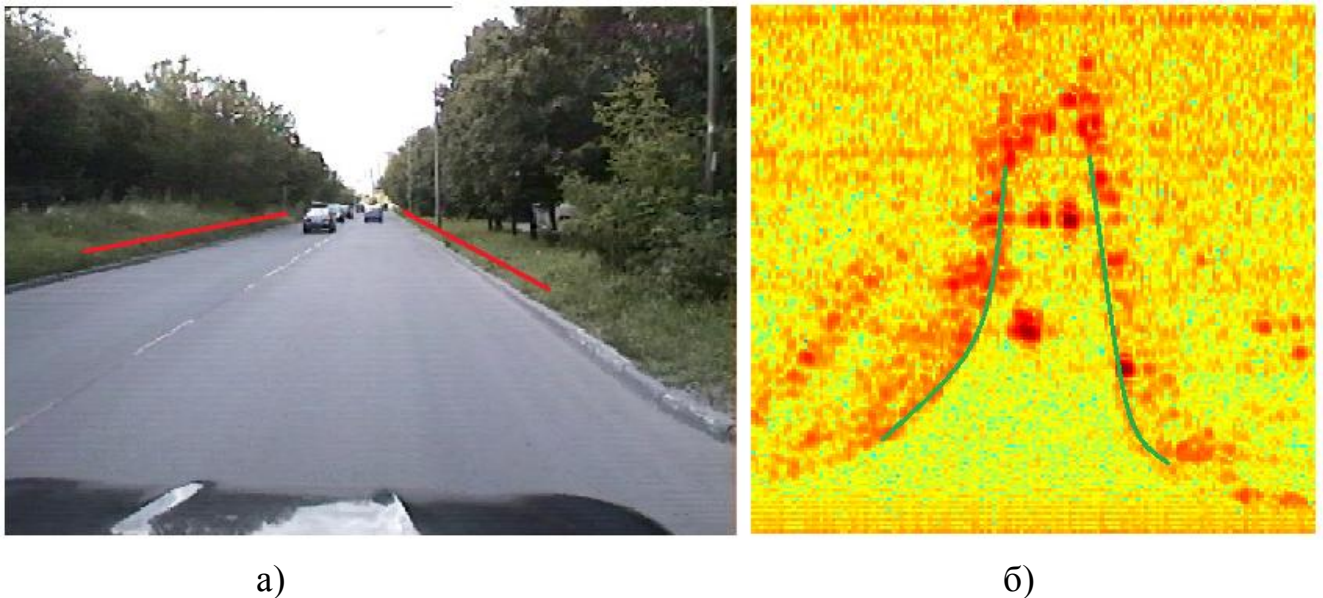


Рисунок 2.6 - Видеоизображение а) и соответствующее изображение РЛИ б) участка дороги

В результате данный алгоритм должен реализовать следующую последовательность действий (Рисунок 2.7) (n – количество сечений, k – количество не найденных точек обочин в сечениях):

1) формирование РЛИ дорожной обстановки в прямоугольной системе координат и преобразование его в полярной системе координат;

- 2) предварительная фильтрация и пороговая обработка РЛИ;
- 3) формирование азимутальных сечений РЛИ;
- 4) получение точек на обочинах всех азимутальных сечений для левой и правой обочин;
- 5) текущая аппроксимация линий границ дорожной части;
- 6) 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.

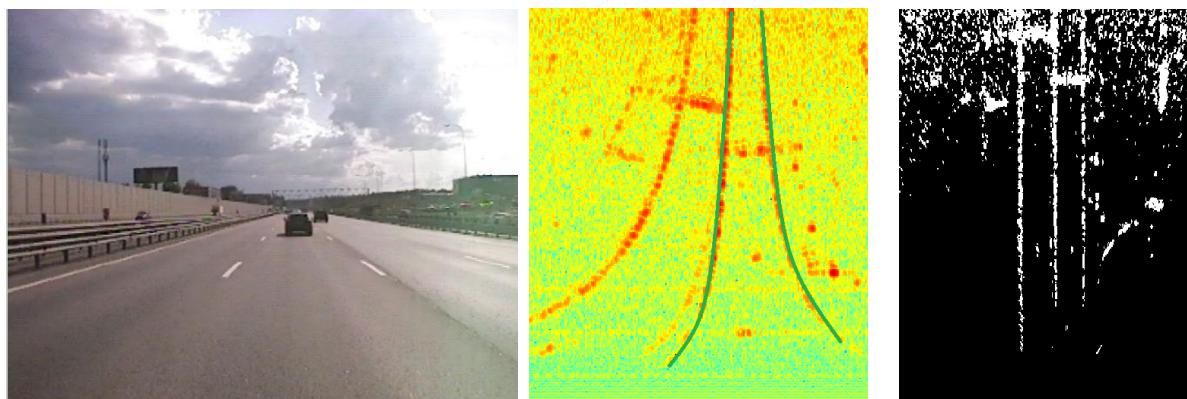


Рисунок 2.7 - Алгоритм определения дорожных границ

Исходные данные, используемые для построения алгоритма, представляют собой экспериментальные РЛИ, полученные в ходе натуральных испытаний АРЛС

и записанные в памяти ПЭВМ в виде массива цифровых данных. Каждый кадр РЛИ имеет размерность 512 x 256 ячеек, причём 512 ячеек соответствуют дальности 250 м, а 256 ячеек соответствуют 90 градусам обзора по азимуту.

В качестве примера рассматриваемого алгоритма рассмотрен случай построения границы проезжей части для участка четырёхрядного шоссе с металлическим ограждением (см. рисунок 2.8).



а)

б)

в)

Рисунок 2.8 - Объект исследования а) и соответствующее РЛИ в прямоугольной б) и полярной в) системах координат

В соответствии с алгоритмом построения на первом этапе формируется РЛИ в виде матрицы информационных точек (дальность, азимут, амплитуда) в полярной системе координат. Затем осуществляется предварительная фильтрация и начальная пороговая обработка РЛИ для удаления шумов. Здесь порог выбирается на постоянном уровне из анализа статистических характеристик отраженного сигнала для асфальтной дороги. Затем исходное РЛИ преобразуется в прямоугольную систему координат (рисунок 2.8в) и осуществляется операция формирования набора азимутальных сечений полученного кадра РЛИ.

Анализ азимутальных сечений РЛИ (рисунок 2.9) показывает, что уровень отраженного сигнала от металлического ограждения (левого и правого) существенно (в несколько раз) превышает уровень сигналов, отраженных от

проезжей части дороги. Кроме того, положение локальных максимумов практически во всех сечениях совпадают, что позволяет уточнить положение двух локальных максимумов в суммарном сечении РЛИ (нижний график на рисунке 2.9).

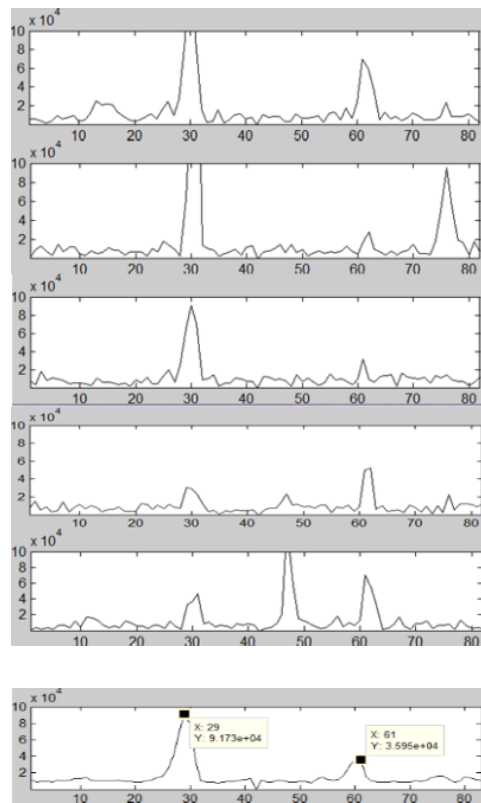


Рисунок 2.9 - Азимутальные сечения кадра РЛИ дороги с металлическими ограждениями и суммарное сечение

Учитывая, что информационной составляющей рассматриваемого алгоритма являются координаты границ проезжей части и обочины, которые определяются положением локальных максимумов, целесообразно осуществить операцию бинарного квантования преобразованного РЛИ. Тогда, для каждой точки на РЛИ выполняется процесс сравнения с порогом для определения признака превышения этого уровня:

$$x(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{если } P(i, j) > P \\ 0 & \text{если } P(i, j) \leq P \end{cases} \quad (2.3)$$

где: P – уровень порога, который определяется уровнем отраженного сигнала для асфальтной дороги,

$x(i,j)$ – уровень сигнала точки (i,j) в преобразованной матрице X ;

$P(i,j)$ – мощность отраженного сигнала (i,j) -точки;

$i = 1 \div m; j = 1 \div n$;

m, n – количество строк и столбцов анализируемого РЛИ и полученной матрицы X .

После процесса квантования РЛИ формируется матрица $X\{x(i,j)\}$ размером $m \times n$ бинарных значений единиц и нулей (Рисунок 2.10).

0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1
1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
4	4	6	11	0	0	1	1	4	12	7	4

Рисунок 2.10 - Пример бинарной матрицы азимутальных сечений РЛИ

В итоге координаты двух локальных максимумов (красные значения) и указывают положение металлического ограждения на РЛИ как в прямоугольной (Рисунок 2.8б), так и в преобразованной (полярной) системе координат (Рисунок 2.8в).

Положение каждого локального максимума зависит от степени разброса точек отражения металлического ограждения, поэтому точная граница перехода «проезжая часть - обочина» определяется статистическим анализом

определённой области азимутального сечения вблизи этих максимумов. После завершения процедуры нахождения положения локальных максимумов реализуется алгоритм аппроксимации левой и правой границ дороги. В завершении с учетом реальной скорости движения автомобиля используется процедура усреднения аппроксимированных значений координат границы дороги по m кадрам РЛИ.

После выполнения аппроксимацией линий границ перехода «проезжая часть - обочина» осуществляется их формирование на экране водителя на РЛИ для помощи ориентации в управлении автомобилями при необходимости.

2.2.3. Выводы

1. Разработан алгоритм построения границ проезжей части дороги в процессе движения автомобиля, основанный на обработке текущих кадров РЛИ, формируемых АРЛС, методом аппроксимацией точек локальных максимумов азимутальных сечений кадра РЛИ.

2. Степень разброса точек отражения границы «проезжая часть – обочина» влияет на оценку точности местоположения этой границы. Неопределенность текущего размера обочины, её геометрических и электрофизических свойств влияют на форму азимутального сечения РЛИ (величину и положение локального максимума) в области границы проезжей части и обочины дороги, а, следовательно, и точности оценки её местоположения.

3. Выходная информация данного алгоритма в простом случае при наличии металлического ограждения или радиометки позволяет применить его для реализации интерактивного или автономного управления движением автомобиля.

4. Важным направлением дальнейших исследований является оценка точности определения местоположения границы «проезжая часть – обочина» для

случая геометрически невыраженной границы типа асфальт – песок, асфальт – гравий, асфальт – трава.

5. Данный алгоритм строится на основе статистического накопления данных о местоположении дорожных границ. Алгоритм устойчиво работает при наличии на дороге большой плотности ДО.

2.3. Разработка алгоритма расширения радиолокационного изображения

2.3.1. Обоснование разработки алгоритма

Как показано в подразделе 1.4, что обычно РЛИ, полученное из РЛД АРЛС, после сканирования местности формируется в полярной системе координат, тогда координаты объектов и в частности их относительные размеры РЛИ будут искаженными при прямом выводе радиолокационных данных на экране водителя. Поэтому непосредственное представление РЛИ в полярном формате для наблюдения приносит неудобство в принятии решения об габаритах ДО при вождении автомобилем на дороге. В работах [6,26,31] рассматривается прямое представление РЛИ на экране водителя с учетом особенностей сканирования АРЛС, а в работе [26] были еще рассмотрены нелинейные логарифмические преобразования РЛИ для расширения размеров дороги и дорожных объектов. Однако нелинейные преобразования является не привычными для человеческого глаза и не несут информации о пропорциональной зависимости размеров объектов по мере увеличения дальности наблюдения. Устранение этих недостатков требует разработки нового алгоритма преобразования РЛИ.

РЛИ АРЛС получается сканированием антенны по местности. Ось автомобиля при прямолинейном движении автомобиля будет параллельной границам дороги, поэтому после любого преобразования для удобства наблюдения требуется прямолинейность данной оси, а также границ дороги. Кроме того в соответствии с визуальным представлением, размеры ДО при увеличении дальности наблюдения уменьшаются.

2.3.2. Алгоритм расширения радиолокационного изображения

Оптическое отражение от параллельных линий границ дороги в обычных условиях вождения автомобилей через лобовое стекло автомобиля попадает в человеческие глаза в виде двух краевых сторон трапеции как показано на рисунке 2.11 (линии границ выделены желтым цветом).

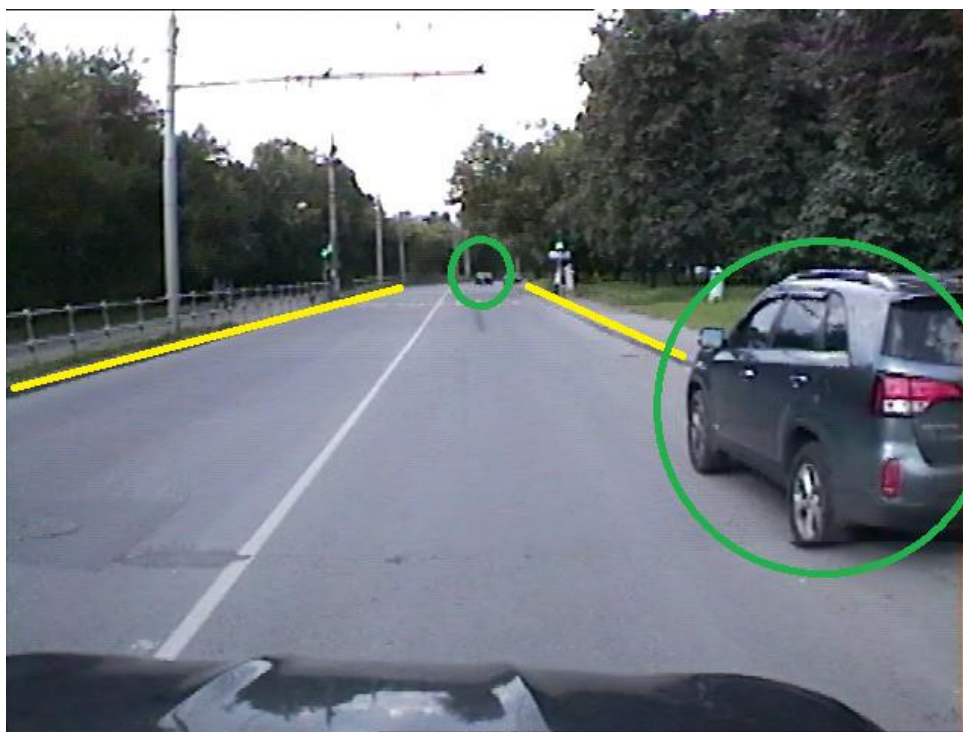


Рисунок 2.11 - Иллюстрация оптического изображения линий границ в виде сторон трапеции и изменения размеров автомобилей по дальности

Объект, находящийся близко к наблюдателю, имеет размер больше по сравнению с тем же объектом при его дальнем расположении (см. легковые автомобили в зеленных окружностях для разных дальностей на рисунке 2.11). Кроме того, если ДО, располагающийся отдалено от водителя в левой или правой сторонах также находится под действием такого же эффекта изменения размеров по мере увеличения дальности. На основе этих особенностей формирования оптического изображения выработан алгоритм преобразования рассматриваемой области РЛИ (РО) в прямоугольной системе координат в форму трапеции, приводя необходимое расширение ее нижнего края РО. Алгоритм данного преобразования показан на рисунке 2.12.

Для применения техники прямой перспективы изображения дорожной обстановки необходимо расширить левую и правую части РО относительно оси АРЛС.С нижнего края расширение осуществляется с коэффициентом расширения больше единицы, на верхний край РО воздействует с коэффициентом, равным единице, поэтому входные параметры для расширения будут координаты носителя АРЛС и коэффициент расширения нижнего края РО. Постепенно с увеличением дальности наблюдения перечисляются коэффициенты расширения горизонтальных сечений, создающие эффект медленного уменьшения размеров соизмеримых дорожных объектов по мере увеличения дальностей до наблюдаемых ДО.

На основе сделанного выше анализа сначала нужно полученные радиолокационные данные сканирования дороги сформировать в полярной системе координат с последующим преобразованием РЛИ в прямоугольной системе координат.

Алгоритм преобразования РЛИ представляет собой двухстороннее расширение РЛИ с оси автомобиля (Рисунок 2.12). Положение оси автомобиля на дороге является центром для преобразования (Рисунок 2.13).

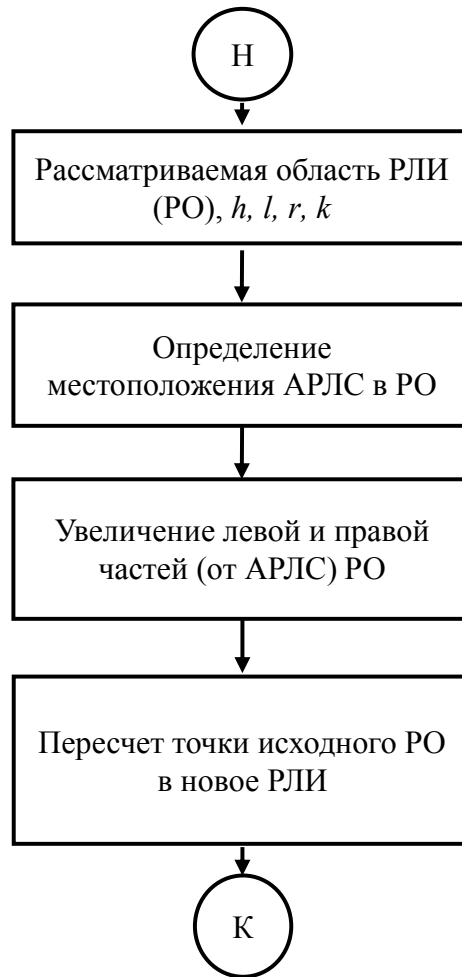


Рисунок 2.12 - Алгоритмы преобразования РЛИ в удобно-воспринимаемое изображение оператору

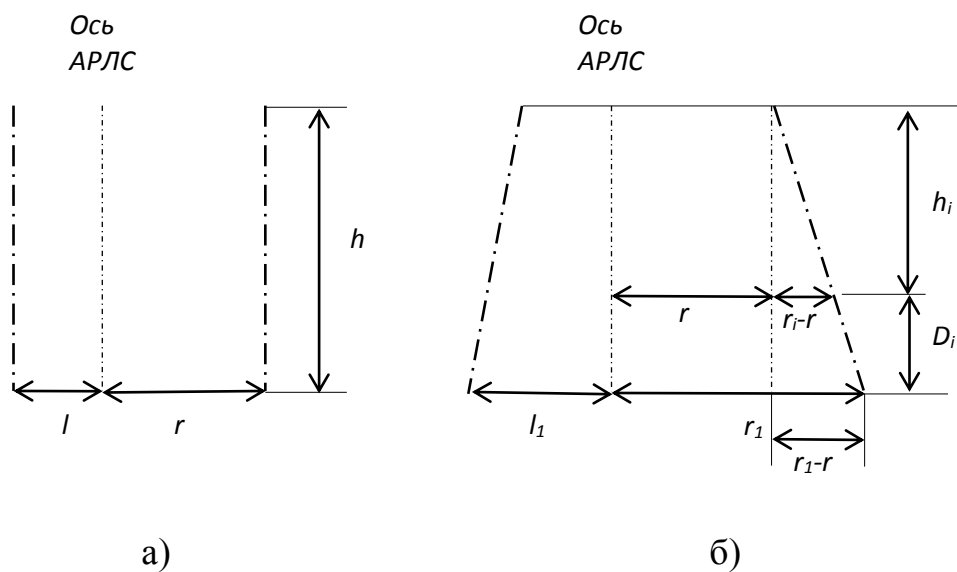


Рисунок 2.13 - Рассматриваемая область РЛИ а) в прямоугольной системе координат и б) расширенное РЛИ

На РО определяется место положения АРЛС и центральная ось автомобиля носителя, являющиеся центром расширения. Выбирается коэффициент расширения нижнего края РО, математически определяя коэффициент расширения по (2.7).

Прямоугольное РЛИ с высотой h разделяется на две области (левую и правую) относительно оси АРЛС и расстояния от нее до левого и правого краев РЛИ (или до границ дороги) являются соответственно l , r (Рисунок 2.13а). Если применяется расширение нижнего края РО с коэффициентом k_p , то размеры нижних краев обеих сторон увеличиваются до $l_1 = k_p \cdot l$, $r_1 = k_p \cdot r$ (Рисунок 2.13б). Выполняется небольшое вычисление для подобных треугольников можно приводить другие коэффициенты расширения k_i (2.7) для следующей i -той строки РЛИ на высотах $D_i = h - h_i$ (где: i – индекс строки). С помощью полученных коэффициентов расширения можно получить все точки расширенного РЛИ обратным вычислением точек из исходного прямоугольного РЛИ.

Коэффициенты расширения i – ой строки правой области вычисляется следующим:

$$k_i = \frac{r_i}{r} = 1 + \frac{r_i - r}{r}, \quad (2.4)$$

где r_i – размер i -ой строки правой области.

Но, по принципу подобных треугольников:

$$\frac{r_i - r}{r_1 - r} = \frac{h_i}{h} = \frac{h - D_i}{h} = 1 - \frac{D_i}{h} \quad (2.5)$$

$$\text{Тогда: } r_i - r = (r_1 - r) \left(1 - \frac{D_i}{h}\right) = (k_p * r - r) \left(1 - \frac{D_i}{h}\right)$$

$$= r(k_p - 1) \left(1 - \frac{D_i}{h}\right), \quad (2.6)$$

где: D_i - расстояние от нижнего края РО до положения i -ой строки.

В итоге коэффициент расширения i -той строки

$$k_i = 1 + (k_p - 1) \left(1 - \frac{D_i}{h}\right) \quad (2.7)$$

зависит от параметра наблюдаемой части РЛИ (высота h), дальности до места положения АРЛС по ее оси D_i и коэффициента расширения нижнего края данной области k_p . Соответственно размеры объектов, расположенных на РЛИ будут увеличиваться в k_i раза в зависимости от выше указанных параметров, прежде всего от их дальности до АРЛС. Это увеличение приносит водителю представление, подобное визуальному, что объекты расположенные ближе к АРЛС имеют размер больше, чем размеры объектов, находящихся на больших дальностях (Рисунок. 2.14).

По формуле (2.7) можно трактовать что, коэффициент расширения не зависит от выбранной области вычисления (левой или правой), поэтому для левой части, коэффициенты расширения i -той строки также вычисляются по этой формуле.

В подразделе 2.3.3 на рисунке 2.14 показаны результаты моделирования РО РЛИ и его расширения, где показывается ось автомобиля (также АРЛС) линией с точками и границы дороги сплошными линиями. На обеих РЛИ показаны объекты с одинаковым размерами до и после расширения, размеры которых увеличены после применения алгоритма изменения пропорционально дальностям до объектов, что соответствует визуальному представлению о ДО и дорожной обстановке. Горизонтальный размер ДО при этом увеличивается, а продольный размер остаётся прежним. Это совпадает с реальным формированием РЛИ ДО по дальности, что все объекты с одинаковыми продольными размерами имеют один и тот же продольный размер РЛИ независимо от дальности.

2.3.3. Компьютерный эксперимент

На рисунке 2.14 показан результат компьютерного моделирования расширения РО, а на рисунке 2.15 – зависимость коэффициента расширения от дальности.

Размер ДО на РЛИ для объектов, находящихся на большой дальности почти не изменены до и после расширения РЛИ из за малого значения коэффициента расширения по формуле (2.7).

Выбор начинающего коэффициента расширения нижнего края РО осуществляется отдельным исследованием для удобного представления о ДО подобного оптической визуализации водителя.

Выбираются коэффициенты расширения k разными (1,5; 2,0; 2,5). Размер каждой стороны нижней стороны РЛИ от оси автомобиля также нужно расширять с таким коэффициентами (2.7), соблюдая прямолинейности оси АРЛС.

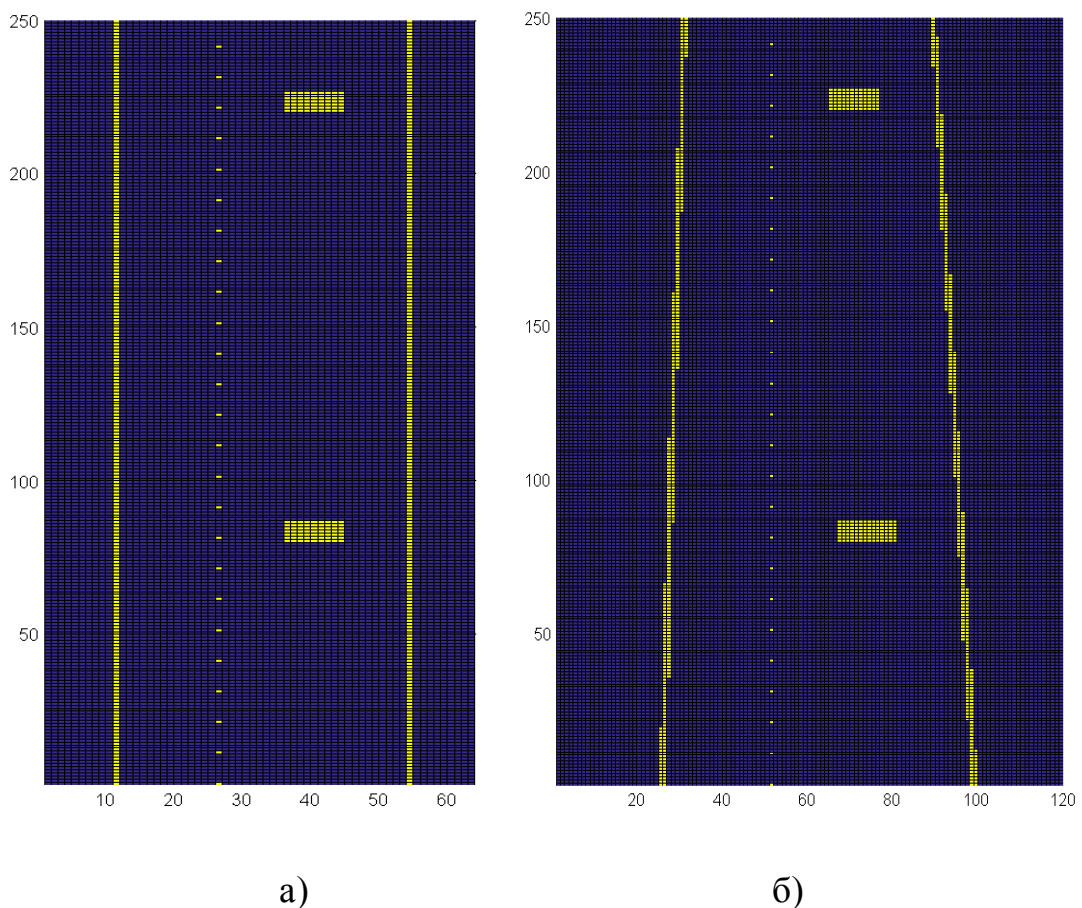


Рисунок 2.14 - Модель радиолокационного изображения с автомобилями:

- а) в прямоугольной системе координат;
- б) после расширения.

На рисунке 2.15 приведена зависимость коэффициента расширения от входных параметров: размеры РЛИ – 512*512 точек, для разных коэффициентов расширения нижнего края и дальностей.

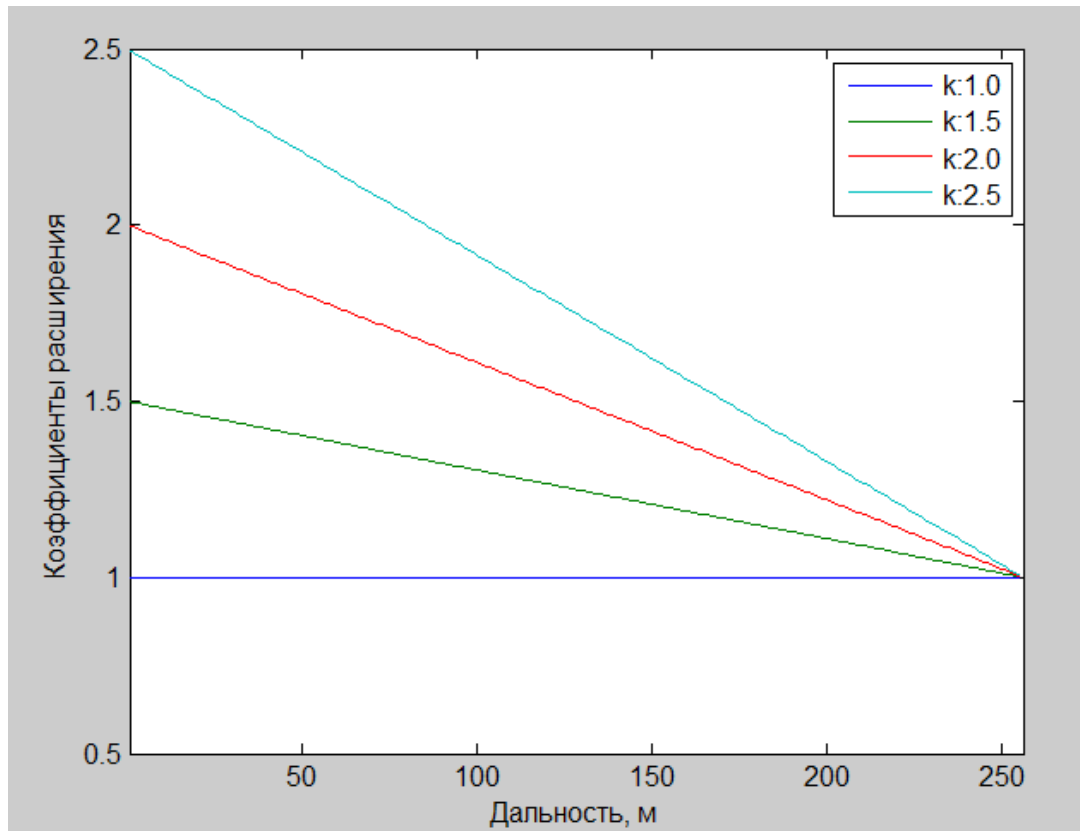


Рисунок 2.15 - Коэффициенты расширения РЛИ и размеров объектов в нем при разных коэффициентах увеличения нижнего края РЛИ

Как показано на рисунке 2.14, расширение РЛИ приводит к увеличению размеров РЛ изображения объектов, находящихся на дороге. Коэффициент расширения зависит от дальности до АРЛС (Рисунок 2.15) при постоянных прочих параметрах (размере РЛИ и выбранном коэффициенте расширения нижнего края РЛИ). Например: на дальности 100м, для выбранных коэффициентов расширения края 1,5 и 2,5, размер РЛИ автомобиля увеличивается соответственно 1,3 и 1,9 раз.

По результатам преобразования для разных коэффициентов расширения можно говорить об удобстве данного алгоритма в преобразование

прямоугольного РЛИ в привычное РЛИ для наблюдения состояния дороги водителю в управлении автомобилем с помощью АРЛС.

2.3.4. Выводы

1. Разработан новый алгоритм применения техники прямой перспективы к РЛИ на экране монитора АРЛС в прямоугольной системе координат, позволяющей получить большую информативность про состояние объектов на дороге в помощи водителю для оценки положения и габариты объектов подобно визуальному представлению.

2. Размер РЛИ автомобиля на расстоянии 100м увеличивается в 1,9 раз при коэффициентом расширения 2,5.

2.4. Выводы

1. Выполненные исследования позволили разработать алгоритм измерения РЛ размеров центральных сечений дорожных объектов в автомобильной РЛС предупреждения столкновений.

2. На основе большого объема данных натуральных испытаний макета АРЛС проведен анализ статистических характеристик РЛ-сигнатур различных автомобилей на дороге в городских условиях. Исследование показало, что ширина РЛ-сечений по дальности и по азимуту различных автомобилей дорожного движения может быть использовано для классификации объектов по группам: легковой автомобиль, грузовик малого и большого размера, специальные дорожные машины малого и крупного размера, городской транспорт (троллейбус, автобус).

3. Статистический анализ большого количества РЛИ различных автомобилей свидетельствует, что наиболее устойчивым признаком (инвариантным к ракурсу наблюдения) является ширина РЛ-сечений РЛИ по дальности (по азимуту на ограниченных дальностях), которая определяется габаритами объекта.

4. Результаты исследования позволяют разработать методику определения размеров дорожных объектов, основанную на динамическом анализе РЛ-сигнатур объектов и сравнении этих сигнатур с эталонными образцами, полученными при статистической обработке РЛ-сигнатур объектов разных классов участников дорожного движения.

5. В результате выполненных исследований также разработан алгоритм построения границ проезжей части дороги в процессе движения автомобиля, основанный на обработке текущих кадров РЛИ, формируемых АРЛС, методом аппроксимации точек локальных максимумов азимутальных сечений кадра РЛИ.

6. Степень разброса точек отражения границы «проезжая часть – обочина» влияет на оценку точности местоположения этой границы. Неопределенность текущего размера обочины, её геометрических и электрофизических свойств влияют на форму азимутального сечения РЛИ (величину и положение локального максимума) в области границы проезжей части и обочины дороги, а, следовательно, и точности оценки её местоположения.

Выходная информация данного алгоритма в простом случае при наличии металлического ограждения или радиометки позволяет применить его для реализации интерактивного или автономного управления движением автомобиля.

7. Разработан новый алгоритм применения техники прямой перспективы к РЛИ на экране монитора АРЛС, основанный на применении алгоритма изменения (расширения) РО РЛИ в прямоугольной системе координат. Показано, что применение полученного алгоритма позволяет повысить информативность отображения состояние объектов на дороге, позволяющая водителю оценить положения и габариты объектов подобно визуальному представлению. Размер РЛИ автомобиля на расстоянии 100м увеличивается в 1,9 раз при коэффициенте расширения 2,5.

ГЛАВА 3. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ В АЛГОРИТМАХ

3.1. Модель сигналов отражения от автомобилей

3.1.1. Математическое описание модели

РЛ сигналы отражения от автомобилей носят сильно флуктуационные характеристики и зависят от многих факторов из-за присутствия на дороге большого числа различных объектов, окружающих автомобиль (других автомобилей, обочин, прилегающих к дороге объектов, зеркального отражения сигналов от дороги, электромагнитных свойств дороги, погодных условий и прочих). Поэтому на сигналы, отраженные от автомобиля, оказывают совокупное влияние отражения и переотражения от окружающих его объектов и это влияние носит случайный характер.

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:

$$s_i(t) = A_i \exp\{j[\beta(t-t_i)^2 + \varphi_i]\} \quad (3.1)$$

где: A_i – амплитуда 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.

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:

$$\dot{A}(t_k) = \sum_{i=1}^{Ns} \dot{s}_{k,i}(t) = A_{k0} \exp\{j[\beta(t-t_k)^2 + \varphi_k]\} \quad (3.2)$$

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:

$$R_{kmin} = \frac{ct_{kmin}}{2}, R_{kmax} = \frac{ct_{kmax}}{2} \quad (3.3)$$

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 нормированные распределения этих амплитуд по дальности (параметр x) и по азимуту (параметр y) могут быть аппроксимированы следующими зависимостями вида:

$$A(x) = \frac{1}{\sigma_{x0}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-x_0}{\sigma_x})^2}, A(y) = \frac{1}{\sigma_{y0}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{y-y_0}{\sigma_y})^2} \quad (3.5)$$

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 (3.5) и условия некоррелированности величин x и y можно определить двумерное распределение амплитуд:

$$\tilde{A}(x, y) = \tilde{A}(x) \cdot \tilde{A}(y) \quad (3.6)$$

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 распределения $A(x)$, $A(y)$, характеризующихся параметрами σ_x , σ_y .

Выбирая параметры x , y и СКО для размеров РЛИ по дальности и по азимуту на основе анализа реальных данных, полученных при натурном исследовании АРЛС и по расчетам, можно создать модели РЛИ разных типов автомобилей на дороге. При этом исследование РЛИ объектов выполняется на разных расстояниях до АРЛС, также с различными размерами.

Измерение зависимости размеров РЛИ от отношения сигнал-шум (ОСШ) будет выполнено на уровне 0.3 от максимального значения отражения. Параметры СКО можно заранее задавать длиной (D_r) и шириной (D_{az}) РЛИ объекта в исследовании математическим расчетом и анализом реальных данных при экспериментах. Например: при экспериментальных исследованиях установлены, что центральные размеры РЛИ легкового автомобиля в среднем составят $D_r = 5$ м и $D_{az} = 1,8$ м. Если не имеются шумы, то размеры РЛИ рассчитаны на расстоянии до АРЛС 60 м на уровне 0.3 амплитуды плотности должны быть 5 м и 1,8 м. Выполнить небольшое математическое вычисление по формулам в (3.6) можно определить СКО $\sigma_r = 4,56$ м, $\sigma_{az} = 1,7$ м. Эти значения приблизительно соответствуют количеству ячеек в РЛИ по дальности и по азимуту (для АРЛС МАИ): 10 и 6. При увеличении дальности до АРЛС, количество ячеек по дальности остаётся неизменным, но количество азимутальных ячеек уменьшается. Эта зависимость вычисляется по закону

$R \cdot \sin(N_{az} \cdot \delta_{az})$, где R – дальности до объекта исследования; N_{az} – количество азимутальных ячеек; δ_{az} – азимутальный дискрет РЛИ АРЛС.

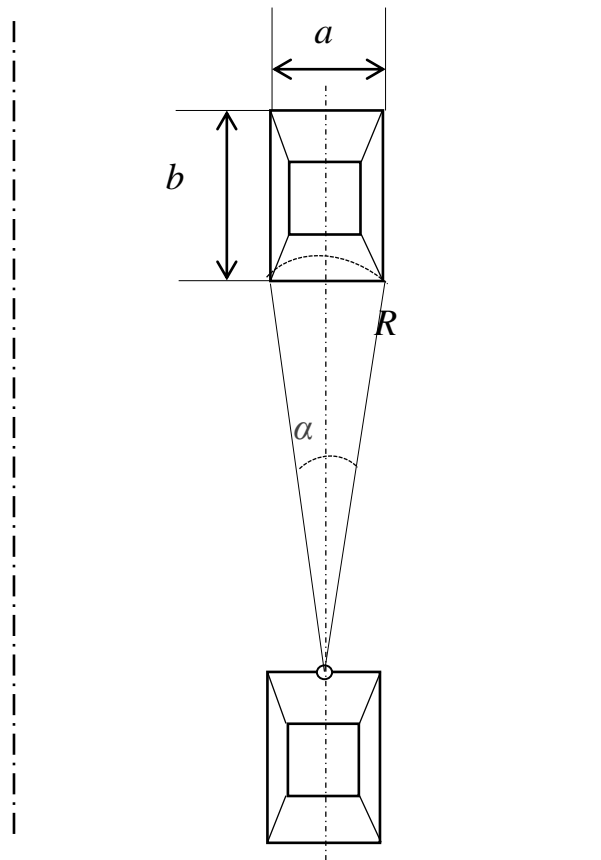


Рисунок 3.1 - Азимутальный угол наблюдения на автомобиль со стороны АРЛС.

Математически можно определить количество азимутальных дискретных ячеек при обзоре автомобиля, движущегося перед АРЛС на дальности R с габаритом axb (a , b – ширина и длина объекта) (рисунок 3.1).

Наблюдаемый угол (α) со стороны АРЛС вычисляется выражением: $\alpha = a/R$, если азимутальная разрешающая способность составляет δ_{az} градусов, то количество азимутальных ячеек сигнала отражения от автомобиля вычисляется формулой $N_{az} = \alpha/\delta_{az}$, а если каждая ДН еще делится на n дискретов, то количество ячеек в полученном РЛИ автомобиля еще увеличивается в n раза. Количество продольных ячеек будет кратным числу дискретов (Δ_y) по дальности в зависимо от длины (b) автомобиля и определяется формулой $N_y = b/\Delta_y$.

Типичные параметры для азимутальных ячеек АРЛС МАИ показаны в таблице 3.1.

В таблице 3.1 в первой и второй находятся ширина автомобиля и дальность до него, α – угол наблюдения с АРЛС, δ_{az} – азимутальный дискрет, $0,36^\circ$, N_{az} – приближенное целое число ячеек, полученных от значений четвертой колонки.

Количество продольных ячеек вычисляется для типичного значения АРЛС МАИ с размером дальномерного дискрета – $0,5\text{ м} : 2 \cdot b$. Например, продольный размер автомобиля составляет 5 м, то количество продольных ячеек будет $2 \cdot 5 = 10$.

Таблица 3.1. Количество азимутальных ячеек РЛИ автомобилей в зависимости от их размеров и положений на оси АРЛС.

a, м	R, м	$\alpha, ^\circ$	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
	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
2,5	30	4.78	13.27	14
	60	2.39	6.63	7
	120	1.19	3.32	4
	150	0.96	2.65	3
	200	0.72	1.99	2

Реально размер вертикальной диаграммы направленности изучаемой АРЛС составляет 1° , создающий 3 дискрета за одно ее положение, поэтому если один азимутальный дискрет данной диаграммы попадает в зону автомобиля, то все ее дискреты данного положения антенны будут считаными в общее количество азимутальных ячеек обзора автомобиля. Таким образом, число ячеек в сумме зависимо от положения объекта наблюдения будет дополнительно увеличиваться от $0 \div 2$ ячеек (если с обеих сторон автомобиля, то $0 \div 4$). Это соображение подтверждается на реальных РЛИ, его нужно учитывать в процессе моделирования РЛИ автомобилей (в среднем будут добавлены 2 ячейки в азимутальных размерах).

Определения ОСШ реальных РЛИ автомобилей.

При оценке погрешности измерения размеров сечений при моделировании и в обработке реальных РЛИ ДО необходимо вычислить отношение сигнала шума (ОСШ).

Определить среднеквадратическое отклонение (СКО) отношения сигналов A_1/A_0 для большого количества кадров РЛИ объектов (рисунок 3.2).

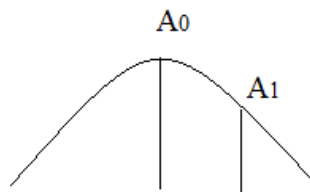


Рисунок 3.2 - Положения сигналов для вычисления ОСШ

ОСШ вычисляется по формуле при нормировании сигналов:

$$\text{ОСШ} = \frac{1}{\text{СКО}\left(\frac{A_0}{A_1}\right)_{i=1 \div N}} \quad (3.7)$$

где: A_0 – амплитуда сигнала РЛИ объекта i -го кадра;

A_1 – значение сигнала на уровне $0,3 * A_0$

N – количество расчетных кадров;

i – индекс кадра, $i = 1 \div N$;

$\text{СКО}\left(\frac{A_0}{A_1}\right)_{i=1 \div N}$ – среднеквадратическое отклонение отношений $\frac{A_0}{A_1}$ на N кадрах.

3.1.2. Компьютерный эксперимент

На рисунке 3.3 показаны результаты моделирования РЛИ легкового автомобиля с габаритными параметрами 5x1.8м на экране АРЛС в прямоугольной системе координат на разных дальностях 30м, 60м, 120м и 150м.

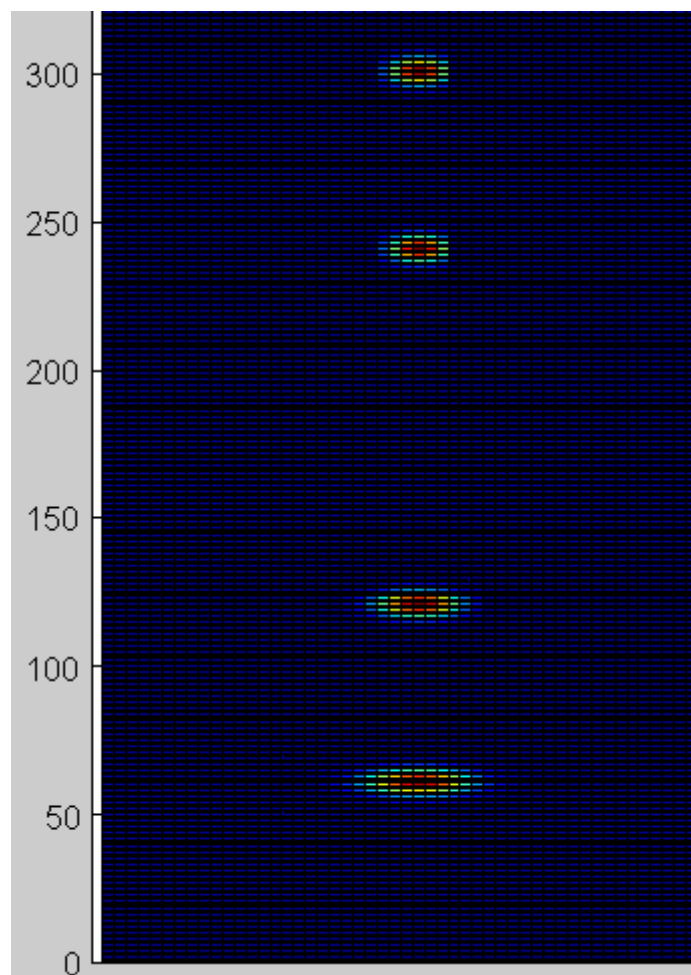
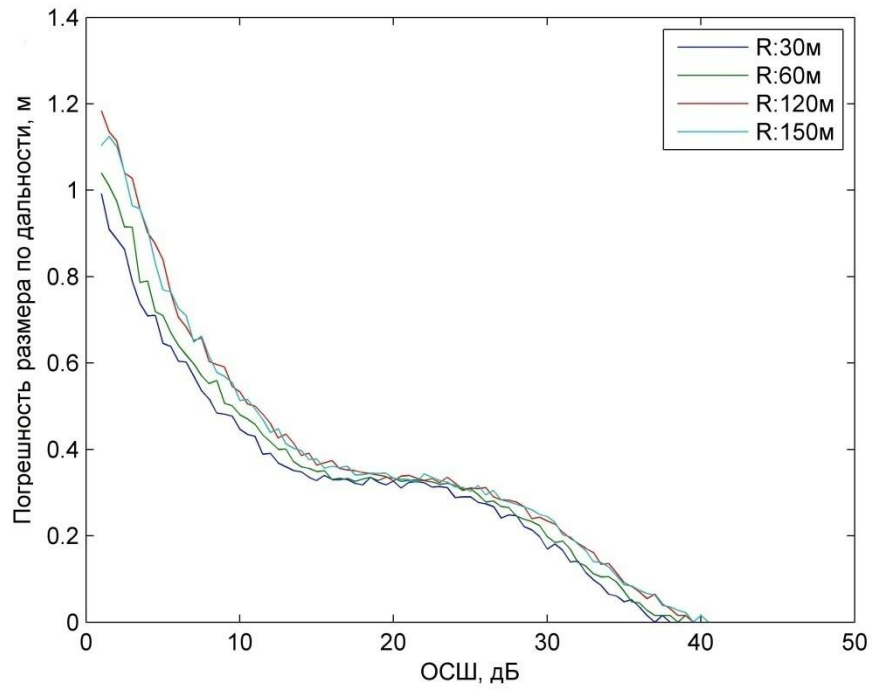
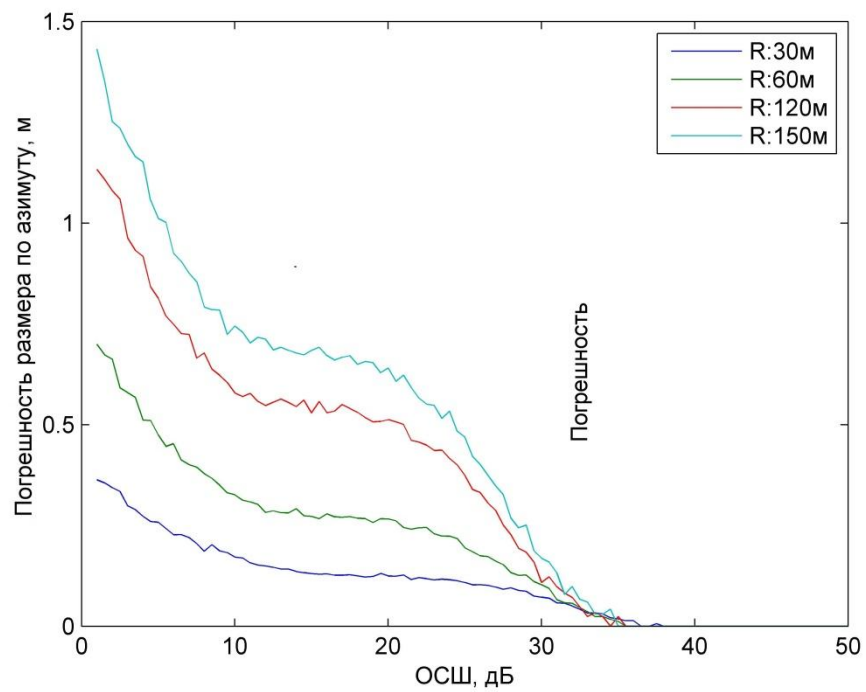


Рисунок 3.3 - Положения модельных РЛИ легкового автомобиля на РЛИ АРЛС

На рисунке 3.4 приведены результаты погрешностей определения центральных (дальномерных (а) и азимутальных (б)) размеров РЛИ легкового автомобиля на разных дальностях в зависимости от ОСШ в дБ.



а)



б)

Рисунок 3.4 - Погрешность измерения размеров центральных сечений а) D_r и б) D_{az} РЛИ легкового автомобиля с габаритом 5х1.8м разных дальностей в зависимости от ОСШ в дБ

3.1.3. Анализ результата моделирования измерения размеров радиолокационных изображений автомобилей

Как показано на рисунке 3.3, РЛИ модельного автомобиля, полученного при моделировании, имеет структуру, подобную реальным РЛИ автомобиля. В прямоугольной системе координат РЛИ габариты одномерных ДО будут искажены.

Смотря на рисунке 3.4, при увеличении ОСШ погрешности измерения размера РЛИ ДО уменьшаются. При уменьшении ОСШ меньше 10 дБ, погрешность увеличивается.

При ОСШ больше 10 дБ наблюдается относительная погрешность измерения дальномерного сечения и горизонтального (азимутального) сечения не превышает соответственно 10% и 15%.

3.2. Модель сигналов отражения от границ дороги

3.2.1. Математическое описание модели

РЛИ АРЛС получается сканированием антенны по местности. Границы дороги могут быть различными. Обочина может быть асфальтовой, гравием с травой, бетоном, с металлическим ограждением и другие. Граница дороги является распределенным объектом для АРЛС. Отражения РЛ сигналов от границ разных типов будут разными по формам и по уровням мощностей. Отражение от металлического ограждения является постоянным протяженным и выраженным на РЛИ с высоким уровнем мощности по сравнению с отражением от дорожного полотна (Рисунок 3.5). Это дает возможность определить границы дороги на РЛИ, полученном в АРЛС.

Границы дороги являются прямыми линиями на обеих сторонах дороги. Из-за кругового сканирования антенной, отражение от границ на дальней зоне будет иметь большой размер по азимутальному дискрету. Размер каждой отсканированной ячейки увеличивается по мере увеличения дальности до АРЛС [50].

Границы дороги представляют собой распределенными целями. Отражение радиолокационных сигналов представляет собой отражения от тела сложной формы. Модель таких целей рассматриваются разными источниками литератур.

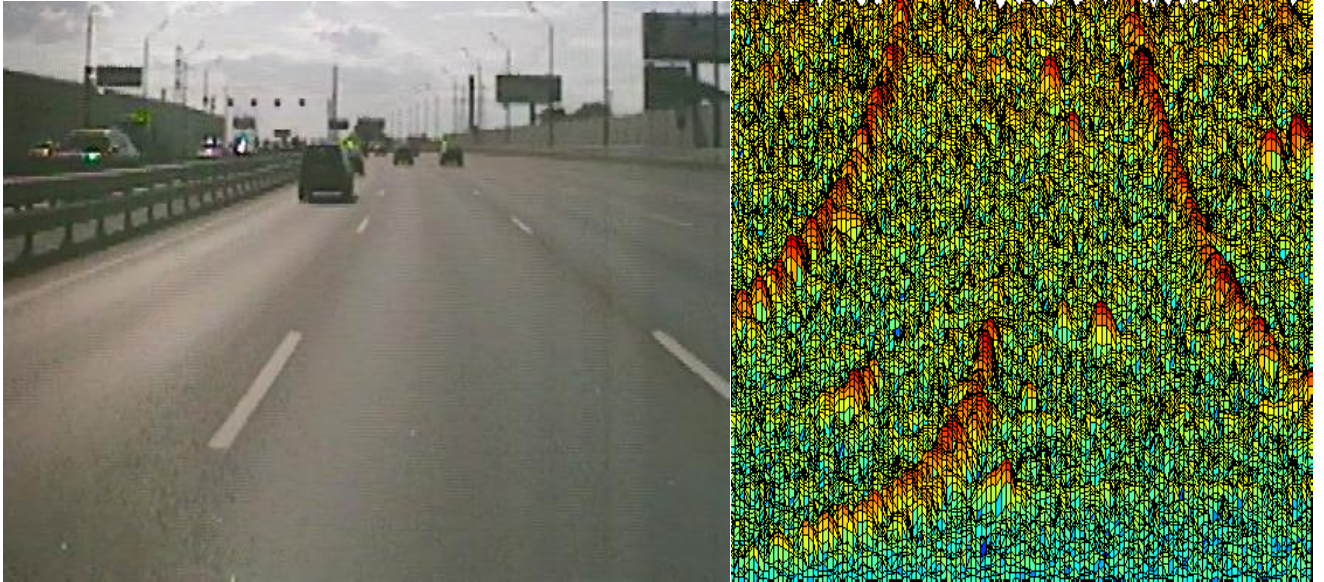


Рисунок 3.5 - Видеоизображение и РЛИ дороги с металлическими ограждениями

Основой математических моделей электромагнитного взаимодействия является строгая математическая формулировка физического явления в виде системы интегрально-дифференциальных уравнений Максвелла. Методологические различия в решении таких систем уравнений формируют некоторый базис математических моделей. При анализе полей рассеяния объектами сложной пространственной конфигурации необходимо вводить различные упрощения и допущения при решении системы уравнений Максвелла. Применение чисто математических приемов совместно с пониманием физики электродинамических процессов рассеяния, привело к созданию так называемых физических моделей [43, 48]. Наибольший интерес представляют феноменологические и аналоговые модели.

Феноменологическая модель строится на основании непосредственного наблюдения процесса. Распространение получили феноменологические модели,

основанные на лучевых представлениях полей рассеяния и модели, базирующиеся на принципе Гюйгенса-Френеля. Первая модель подчиняется принципам геометрической оптики [44, 46]. В этом случае, предполагают, что размеры объекта должны быть много больше длины волны, фронт падающей волны должен быть плоским, а дифракционное поле порождается только частью падающих лучей. Точность решения во многом зависит от области пространства примыкающего к освещенной части поверхности объекта. Согласно второй феноменологической модели рассеянное поле формируется на основании постулатов физической оптики [45, 56], при этом, каждая точка волнового фронта рассеянного поля рассматривается как источник вторичных сферических волн. В итоге, рассеянное поле представляет собой суперпозицию волновых фронтов с учетом не только амплитуд, но и пройденных расстояний. Анализ литературы показал, что для таких моделей достаточно сложно точно определить фазы и амплитуды вторичных волн. Обычно, фазы вторичных волн принимают одинаковыми в пределах заданной зоны, это в свою очередь уменьшает вычислительную сложность модели, и как следствие, ведет к снижению точности [44]. Поиск компромисса между точностью модели и ее сложностью привел к появлению аналоговых моделей.

Наблюдение явлений подобных исследуемому, формирует аналоговую модель. Такой моделью принято называть модель «блестящих» точек [43], согласно которой, рассеянное поле формируется совокупностью точечных целей, расположенных на поверхности объекта [49].

В [43,45,49] показывает, что отражение радиоволн от тел сложной геометрической формы носит локальный характер, т.е. на поверхности объекта возникает небольшое количество участков с интенсивным отражением. Таким образом, участок любой поверхности пространственный сложный объект можно представить в виде совокупности участков локального отражения. Следовательно, в результате такого представления общее поле, рассеянное объектом, есть суперпозиция полей отдельных локальных источников. Такая

модель называется моделью локальных источников. Каждый участок локального отражения имеет свою амплитудную и фазовую характеристику рассеяния, что усложняет получение результирующего поля.

В [43] рассматривается модель Де Лано. Ее основное отличие от модели локальных источников, заключается в вероятностном описании характеристик поля локальных участков отражения. В частности, оказывается, что напряженности отраженного от сложной цели поля распределены по закону (3.6).

Основными недостатками обеих моделей является проблема выбора участков локального отражения на поверхности объекта, и как следствие, не высокая точность расчета отраженного поля. Поэтому основными критериями адекватности таких моделей служат сопоставления результатов моделирования либо с результатами достоверного эксперимента, либо с результатами точного (или асимптотически точного) аналитического решения.

Для моделирования процесса определения границ дороги используется последняя модель с законом (3.6) отражения сигналов. Граница дороги будет отражать радиосигналы при облучении ее ДН антенны. При облучения границ радиосигналами в каждом смежном положении ДН будет появляться отраженное поле, имеющее вид плотности двумерного нормального закона определения с отклонениями, соответствующими числам попадающих точек границ в ДН по дальности и азимуту.

Состояние дороги с границами при облучении диаграммной направленностью на левую границу показано на рисунке 3.6.

В данной модели, дорога с шириной d имеет два металлических ограждения (левого, правого). АРЛС находится в центре дороги. Область поиска места нахождения границ выбирается размерами шириной $2d$ для полного покрытия области нахождения границ, высотой h , выбирающей для отдельного наблюдения концов дороги в случае однополосная дорога (для АРЛС МАИ,

максимально $h = 120\text{м}$). Угол сканирования начинается с минимального положения до максимального (Рисунок 3.6а, для левой границы). Минимальное значение угла сканирования вычисляется соотношением (3.2) зависимо от высоты h и ширины d . Максимальное значение угла сканирования α_{max} конкретизируется параметрами в выбранной АРЛС (в макете АРЛС МАИ $\alpha_{max} = 45^\circ$).

$$\alpha_{min} = a \sin\left(\frac{d}{2h}\right) \quad (3.8)$$

Отражение радиосигналов АРЛС от границы (Рисунок 3.6) при каждом смежном положении антенны представляется собой в совокупность матриц точек с количествами столбцов и строк, меняющимися зависимо от текущего положения ДН.

При малом значении угла сканирования α , количество столбцов и строк будет больше, чем при большом его значении. Для АРЛС МАИ вычисление выполняется для разрешающей способности по дальности $\delta_R = 0,5\text{м}$ и по азимуту $\delta_\alpha = 1^\circ$. После преобразования полярного РЛИ в прямоугольное, размеры каждой ячейки РЛИ будут $0,5 \times 0,5\text{м}$. Как показано на рисунке 3.6б, когда определенная часть границы попадает в зону дискрета дальности, тогда азимутальный размер отражения этой части будет длиной хорды сектора данного азимутального угла сканирования. Параллельно с этим, в одном положении антенны могут попадать несколько ячеек дальности так, и несколько азимутальных ячеек зависимо от конкретной АРЛС (в АРЛС МАИ диаграммы направленности антенны разделяется на 3 ячейки (3 дискрета) (Рисунок 3.6б).

Область сканирования границы (на рисунке 3.6б – левая граница) и количество точек в зависимости от угла сканирования вычисляются следующим:

Дальности краев азимутального сектора ДН размером δ_α будут:

$$\begin{aligned} R_i &= \left(\frac{d}{2}\right) / \cos(90 - \alpha_i) \quad , \\ R_{i+1} &= \left(\frac{d}{2}\right) / \cos(90 - \alpha_i - \delta_\alpha) \end{aligned} \quad (3.9)$$

где: d – ширина дороги; α_i – i -ое угловое положение ДН; δ_α – азимутальная разрешающая способность АРЛС.

Количество дальномерных ячеек границ дороги, находящихся в текущем положении ДН будет :

$$N_{Ri} = R_i - R_{i+1} = \left(\frac{d}{2}\right) \left[\frac{1}{\cos(90 - \alpha_i)} - \frac{1}{\cos(90 - \alpha_i - \delta_\alpha)} \right] / \delta_R$$

при разрешающей способности по дальности в прямоугольном РЛИ: $\Delta_y = \delta_R = 0,5\text{м}$, то:

$$N_{Ri} = d \cdot \left[\frac{1}{\cos(90 - \alpha_i)} - \frac{1}{\cos(90 - \alpha_i - \delta_\alpha)} \right] \quad (3.10)$$

Количество горизонтальных ячеек РЛИ вычисляется в зависимости от длины хорда попадающего сектора каждого положения ДН на границе дороги отдельно для каждого дискрета дальности:

$$l_{Ri} = \delta_\alpha \cdot R_i \quad (3.11)$$

$$N_{\alpha i} = \frac{l_{Ri}}{\Delta_y} = 2l_{Ri}$$

при горизонтальной разрешающей способности в прямоугольном РЛИ: $\Delta_x = 0,5\text{м}$, то:

$$N_{\alpha i} = 2l_{Ri} \quad (3.12)$$

Определяя положений антенн при секторе сканирования от α_{\min} до α_{\max} :

$$\alpha_i = \alpha_{\max} - i \cdot \delta_\alpha, \quad (3.13)$$

где i – индекс положений, можно вычислить соответствующие матрицы вертикальных и горизонтальных ячеек границ дороги, попадающих в ДН каждых смежных секторов сканирования.

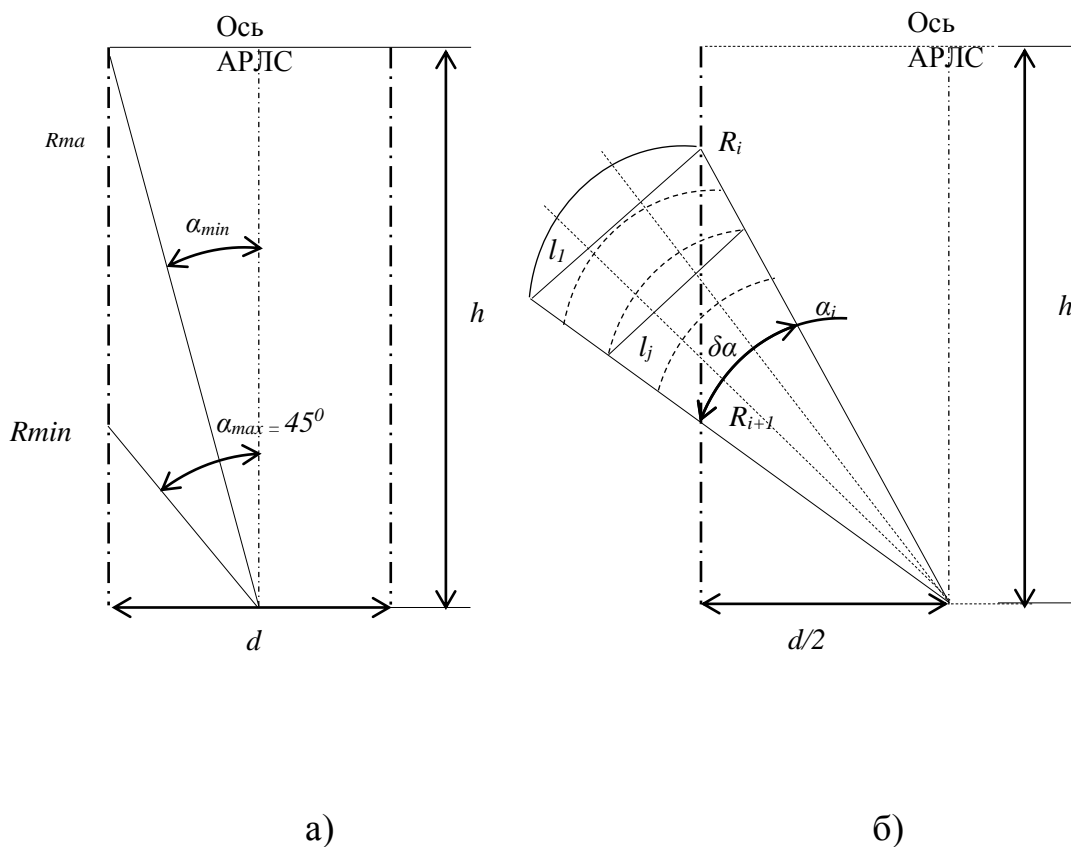


Рисунок 3.6 - Иллюстрации к вычислению параметров модели для определения границ дорог.

После определения количество ячеек для каждого, используя нормальный закон распределения (3.3) для моделирования границ на прямоугольном РЛИ. Типичные значения вертикальных и горизонтальных ячеек для соответствующих положений при $h = 100\text{м}$, $d = 20\text{м}$, $\alpha_{\max} = 45^0$ приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Типичные размеры отражения от границ

R_i, M	$\alpha_i, ^\circ$	N_{Ri}	N_{ai}	R_i, M	$\alpha_i, ^\circ$	N_{Ri}	N_{ai}	R_i, M	$\alpha_i, ^\circ$	N_{Ri}	N_{ai}
100	5.71	30.00	4.00	29.59	19.71	3.00	2.00	18.00	33.71	1.00	1.00
85.01	6.71	22.00	3.00	28.23	20.71	3.00	1.00	17.55	34.71	1.00	1.00
74.11	7.71	17.00	3.00	26.99	21.71	3.00	1.00	17.12	35.71	1.00	1.00
65.70	8.71	14.00	3.00	25.86	22.71	3.00	1.00	16.72	36.71	1.00	1.00
59.02	9.71	11.00	3.00	24.83	23.71	2.00	1.00	16.34	37.71	1.00	1.00
53.59	10.71	10.00	2.00	23.89	24.71	2.00	1.00	15.98	38.71	1.00	1.00
49.09	11.71	8.00	2.00	23.02	25.71	2.00	1.00	15.64	39.71	1.00	1.00
45.30	12.71	7.00	2.00	22.22	26.71	2.00	1.00	15.32	40.71	1.00	1.00
42.07	13.71	6.00	2.00	21.48	27.71	2.00	1.00	15.02	41.71	1.00	1.00
39.27	14.71	5.00	2.00	20.79	28.71	2.00	1.00	14.74	42.71	1.00	1.00
36.84	15.71	5.00	2.00	20.16	29.71	2.00	1.00	14.46	43.71	1.00	1.00
34.70	16.71	4.00	2.00	19.56	30.71	2.00	1.00	14.21	44.71	1.00	1.00
32.80	17.71	4.00	2.00	19.01	31.71	2.00	1.00				
31.11	18.71	4.00	2.00	18.49	32.71	1.00	1.00				

3.2.2. Компьютерный эксперимент

На рисунке 3.7 показан результат моделирования прямоугольного РЛИ 100x40м (200x80 ячеек) с нанесенными линиями отражения от границ. Ширина дороги составляет 20м (40 ячеек).

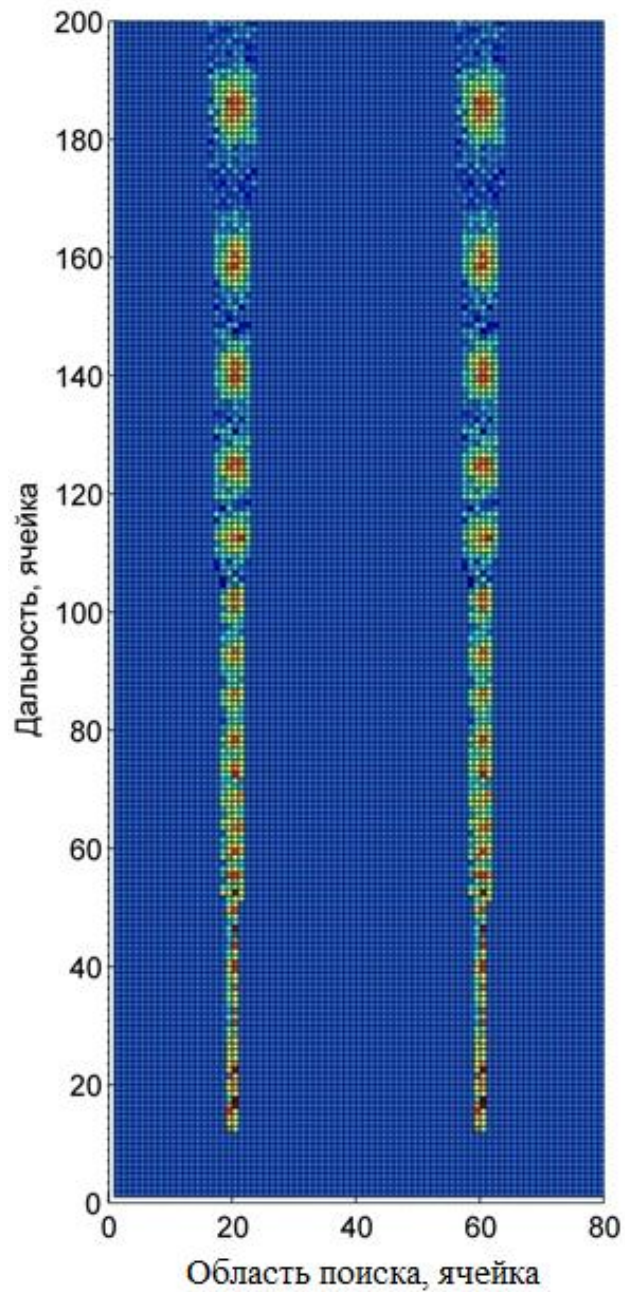


Рисунок 3.7 - Модель границ для определения положения границ на дороге.

На рисунке 3.8 показывается степень разброса измеренного расстояния до левой границы. Можно определить на этом Рисунок среднее значение расстояния до левой границы равно 20 ячейкам, а СКО не превышает 3 ячеек.

Это соответствует модельному варианту – расстояние до левой границы составляет 10м, а погрешность измерения меньше 1,5м.

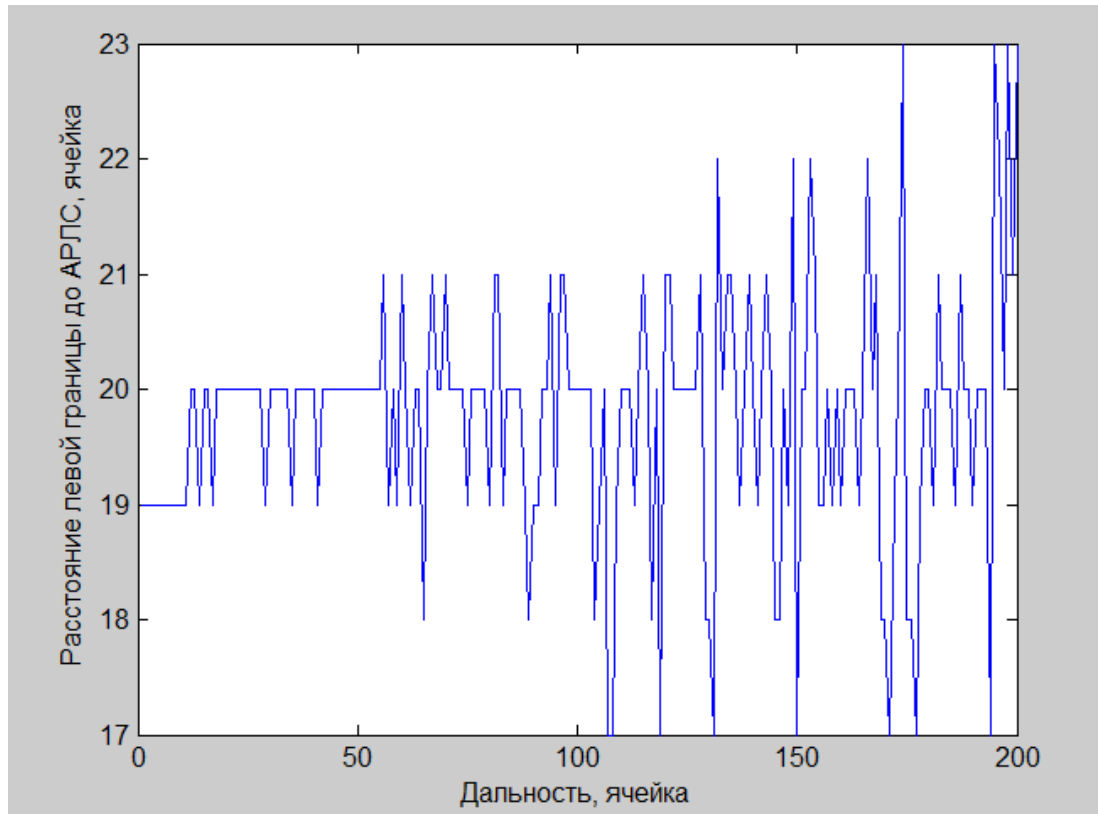


Рисунок 3.8 - Разброс расстояния до левой границы дороги.

3.2.3. Анализ результата моделирования

По результатам моделирования границ дороги, представляющих подобным реальным РЛИ для границ на дороге. По увеличению дальности наблюдения размер границ на РЛИ в полярной системе координат увеличивается точно таким же как в реальных данных, полученных при натуральных экспериментах макета АРЛС МАИ.

По расчётам, степень разброса можно трактовать о том, что степень разброса зависит от дальность наблюдения границы при определении границ. Размер погрешности определения границ дороги при дальность наблюдения до 100м не превышает 1,5м.

3.3. Выводы

1. Разработана модель для измерения размеров РЛИ автомобилей в качестве ДО, подтверждающая сущность процесса измерения их размеров при движении на дороге с разными дальностями.

2. Оценено влияние аддитивных шумов на модель в измерении размеров РЛИ автомобилей. Начиная с ОСШ больше 10 дБ наблюдается, что относительная погрешность измерения размеров дальномерного и горизонтального (азимутального) сечения не превышает 10% и 15%.

3. Разработана модель границ дороги для проверки работоспособности алгоритма определения дорожных границ. Данный алгоритм успешно выполнит свою функцию в модельном исследовании.

4. Оценена степень разброса расстояний до границ дороги, показывающая, что при дальности наблюдения до 100м перед АРЛС размер погрешности не превышает 1,5м.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Результаты определения размеров РЛИ автомобилей

В процессе статистического анализа РЛ сигнатур переменными параметрами являлись дальность и угол азимута объекта относительно АРЛС. В результате для каждого эксперимента обрабатывался большой объем данных. Примеры полученных РЛ сечений по дальности и по азимуту для РЛИ легкового автомобиля представлены на рисунке 4.1.

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 на рисунке 4.1 является линией усреднённых значений амплитуд отраженных сигналов.

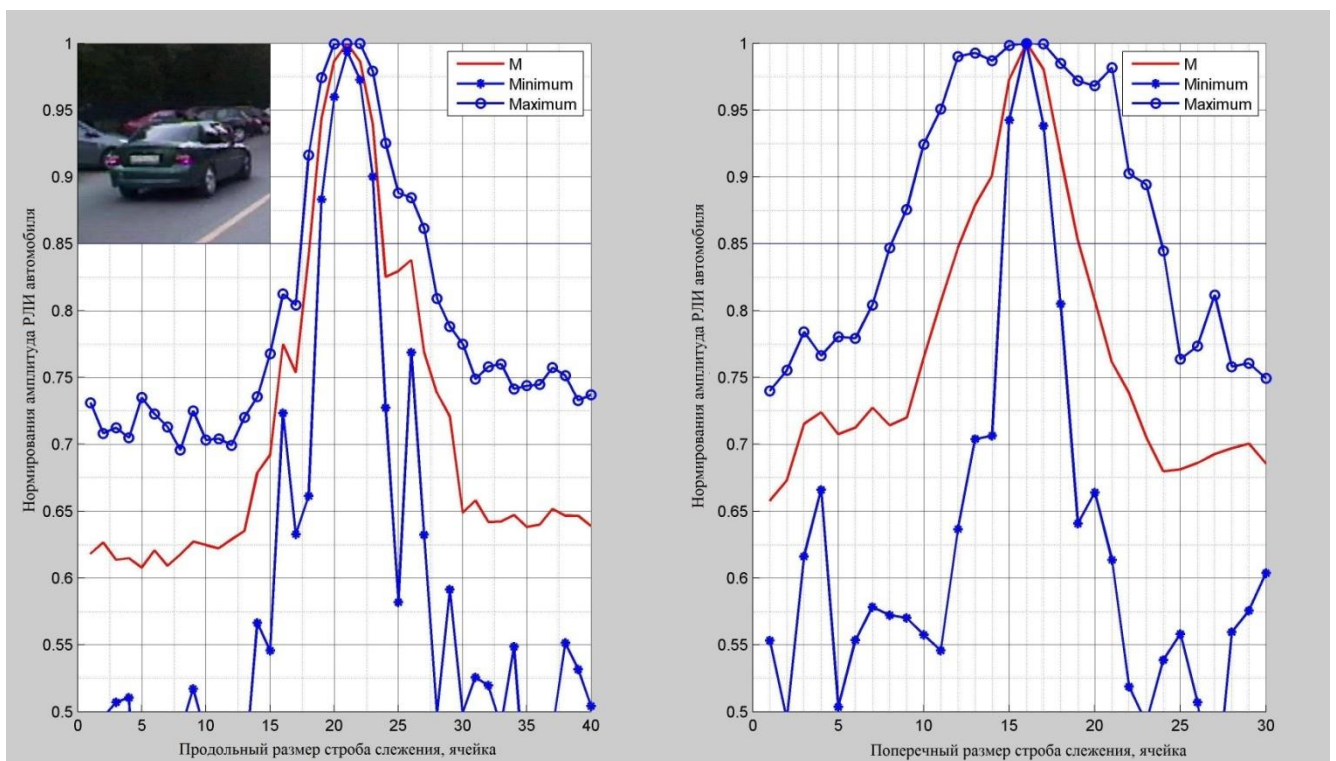


Рисунок 4.1 - Легковой автомобиль и его РЛ-сечения по дальности и по азимуту

Анализ усреднённых РЛ сечений показал, что в каждом РЛИ легкового автомобиля существует одна точка максимума мощности отраженных сигналов. Однако в силу сильно флюктуирующего значения этого максимума, а также его пространственного смещения, данный признак трудно использовать для последующей идентификации объекта. 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 азимуту показал достаточно стабильный характер значений их ширины (по определённому уровню), которые слабо зависят от ракурса, начиная с определённой дальности до автомобиля.

В таблице 4.2 на второй и четвертой строках указаны значения ширины РЛ сечений в условных единицах по дальности (D_R) и по азимуту ($D\alpha$), а на третьей и пятой строках соответствующие среднеквадратические отклонения этих значений.






Таблица 4.1. Параметры РЛ сечений легкового автомобиля

Параметры сечения	Размер, м
D_R	5.14
σ_D	0.48
$D\alpha$	2.52
σ_α	0.35

На основе разработанной методики был проведен статистический анализ РЛ-сигнатур для других объектов дорожного движения. Результаты этого анализа в виде параметров РЛ-сечений приведены в таблице 4.2.

Можно вычислить по таблице 4.2 размеры центральных сечений РЛИ автомобилей (стоящих и подвижных) в движении АРЛС с погрешностью определения продольного размера сечения РЛИ автомобиля меньше 10%, для азимутального размера не превышает 15%.

Таблица 4.2. Размеры центральных РЛ сечений автомобилей на дороге

Параметры	Специальный автомобиль малого размера	Грузовик малого размера	Грузовик среднего размера	Специальный автомобиль большого размера	Троллейбус
					
$D_R, \text{ м}$	4,60	5,80	5,53	11,88	16,34
$\sigma_R, \text{ м}$	0,41	0,61	0,56	1,17	1,54
$D_\alpha, \text{ м}$	1,80	2,10	3,28	3,92	5,02
$\sigma_\alpha, \text{ м}$	0,30	0,29	0,47	0,57	0,74

Анализ полученных результатов показывает, что ширина РЛ сечений по дальности и по азимуту различных объектов дорожного движения является достаточно информативным параметром и может быть использована для автоматизированной процедуры их последующей классификации.

Вычислена ракурсная зависимость размеров центральных сечений РЛИ автомобилей при движении на дороге, имеющая малую угловую зависимость при наблюдении на автомобили под малым углом меньше 14° .

4.2. Результаты определения границ дороги

Пример применения разработанного алгоритма построения границ проезжей части асфальтовой дороги с металлическими ограждениями для случая прямолинейного движения автомобиля с АРЛС показан на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 - Оптическое и радиолокационное изображения участка асфальтовой дороги с металлическим ограждением с нанесёнными линиями обочин

На рисунке 4.3 показаны различные результаты применения данного алгоритма для разных типов переходов «дорожно-полотно - обочина».

Как показан на рисунке 4.3 границы на дороге для других типов переходов тоже определены с помощью разработанного алгоритма, показывающий возможность его применения на практике при отсутствии или плохой видимости предоставления водителю ориентации местоположения автомобиля на дороге.

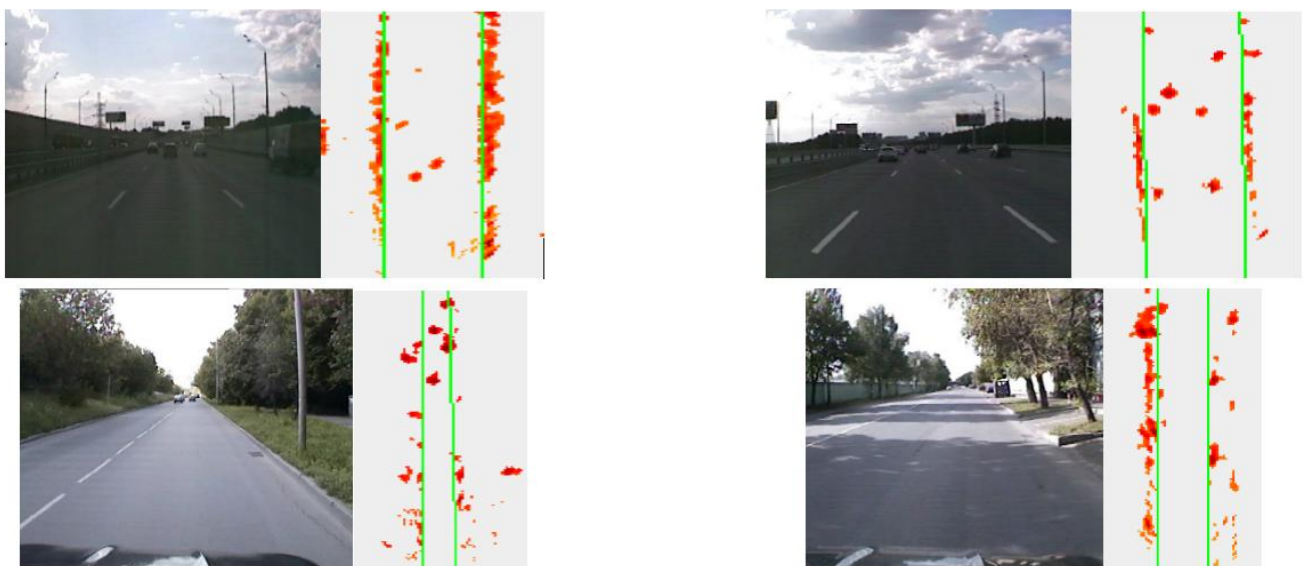
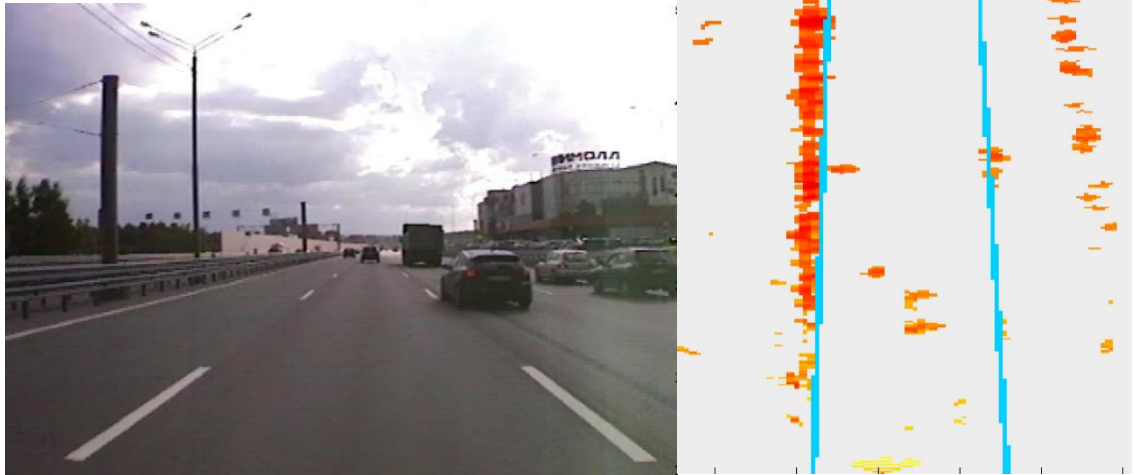


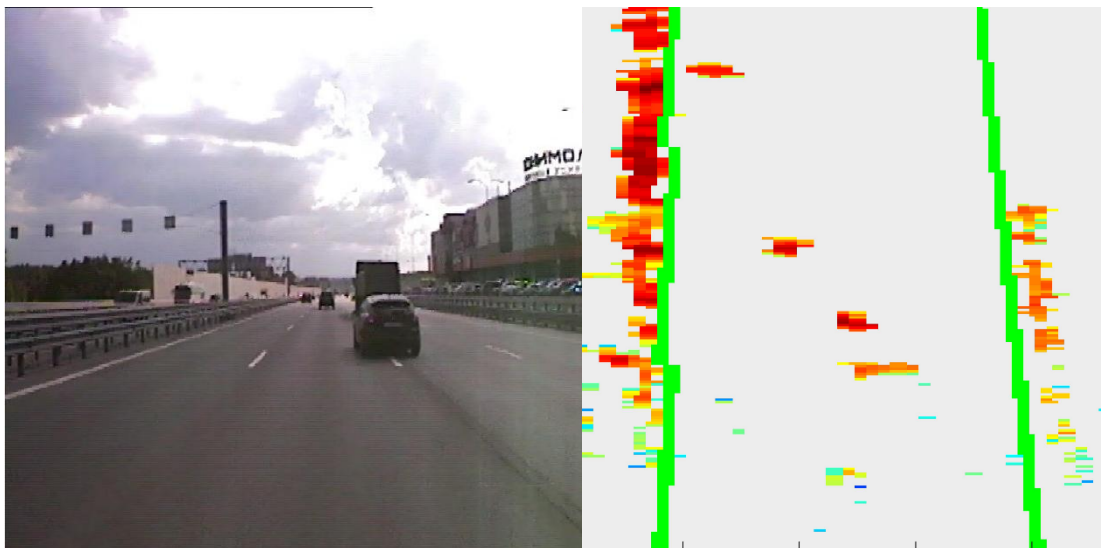
Рисунок 4.3 - Результаты построения границ проезжей части для различных дорог

4.3. Результаты расширения расстраиваемой области радиолокационного изображения

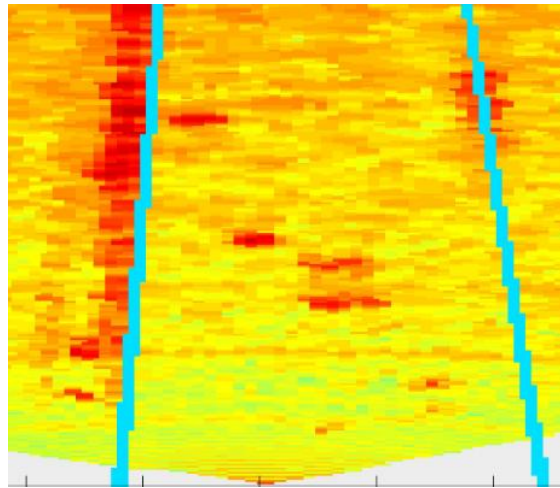
Результаты преобразования РО в расширенную показаны на рисунке 4.4. для различных РЛИ с наложенными дорожными границами, полученными от раннего определения дорожных границ для разных коэффициентов расширения (1,7 а) и 2,5 б)) с подавлением шумов и без него.



а)



б)



в)

Рисунок 4.4 - Видеоизображение и расширенная РО РЛИ дорожной участки с разными коэффициентами а) $k = 1,7$ б) $k = 2,5$ в) $k = 2,5$ без подавления шумов.

Размер РЛИ автомобиля на расстоянии 100м увеличивается в 1,9 раз при коэффициентом расширения 2,5)) с подавлением шумов и без него.

4.4. Выводы

1. Результаты экспериментов показаны эффективность работы разработанных алгоритмов (измерения размеров РЛИ автомобилей, определения границ дороги, расширения РО РЛИ) на практике.

2. Полученные размеры РЛИ ДО в измерении для реальных совпадают с теми, что в модельных случаях. Это подтверждает работоспособность данного алгоритма.

3. Ракурсная зависимость размеров центральных сечений показывает, что при малом угле сканировании перед АРЛС, размеры сечений мало изменяются.

4. Разработанный алгоритм определения дорожных границ, показывающий эффективность при обработки РЛИ с границами дороги, оборудующей металлическими ограждениями. Данный алгоритм тоже работает при других обочинах и это дает водителю возможность оценить положение

автомобиля с АРЛС при движении на непривычной дороге в плохом условии видимости.

5. Погрешность определения дорожных границ не превышает 1,5м в панорамной АРЛС.

6. Результаты применения алгоритма расширения рассматриваемой области РЛИ показывают эффективность данного алгоритма, приводящего РО на экране водителя с применением техники прямой перспективы к РЛИ, подобному визуальному наблюдению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, выполненные в диссертационной работе, позволили разработать алгоритмы для написания программного обеспечения экспериментальных образцов автомобильной РЛС переднего (кругового) обзора, которая формирует высокоинформативное панорамное РЛИ местности в реальном времени и обеспечивает обнаружение опасных объектов, определения их границ дороги, расширения рассматриваемой области радиолокационного изображения в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведён обзор систем помощи водителя в управлении автомобилями в различных условиях и констатировать в развитие автомобильных радиолокационных станций предупреждений столкновений транспортных средств из за их возможности всепогодных применений, большой дальностью действия и большого угла обзора. Тут же указывается необходимость разработки различных алгоритмов для написания программного обеспечения АРЛС в обработке радиолокационных данных со особенностями представления радиолокационного изображения на экране водителя.

2. Разработан новый алгоритм измерения размеров РЛИ дорожных объектов с примером в измерение размеров центральных сечений РЛИ автомобилей на дороге в городских условиях. Относительная погрешность измерения размеров центральных сечений РЛИ автомобилей не превышает 10% для продольных сечений, и 10% для горизонтальных сечений.

3. Проведена оценка ракурсной зависимости размеров РЛИ автомобилей, указывающая, что при малом угле наблюдения со стороны АРЛС (меньше 14°) размеры центральных сечений РЛИ автомобилей практически не изменяется. Это приносит возможность определения реальных размеров транспортных средств на дороге по их радиолокационным размерам центральных сечений.

4. Разработан новый устойчивый алгоритм определения дорожных границ, работающий на разных типах дороги и при различной загруженности дороги другими дорожными объектами.

5. Оценена погрешность определения дорожных границ в моделировании, также на реальных радиолокационных данных. Результаты оценки показывают совпадение вычисления на обеих данных (модельных и реальных) и это подтверждение работоспособность разработанного алгоритма на практике.

6. Разработан новый алгоритм повышения качества визуализации РЛИ на экране монитора АРЛС на основе расширения РЛИ РЛД при формировании и отображении панорамных РЛИ в АРЛС. Показано, что применение полученного алгоритма позволяет повысить качество идентификации размеров участников движения, подобных визуальному представлению. При правильном выборе коэффициентов расширений можно предоставлять информацию на экране водителя максимально близко к человеческим глазам.

7. Результаты обработки реальных данных совпадают с компьютерным моделированием показываются работоспособность разработанных алгоритмов и их точность функционирования.

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 сокращений и условных обозначений

АЦП	Аналогово-цифровой преобразователь
АРЛС	Автомобильная радиолокационная станция
АКК	Адаптивный круиз-контроль
БВ	Бортовой вычислитель
БПФ	Быстрое преобразование Фурье
ПЭВМ	Персональная электронно-вычислительная машина
ДНА	Диаграмма направленности антенны
ДТП	дорожно-транспортное происшествие
ЗС	Зондирующий сигнал
ИК	Инфракрасный
ЛЧМ	Линейная частотная модуляция
РО	Рассматриваемая область радиолокационных изображений
РЛД	Радиолокационные данные
РЛИ	Радиолокационное изображение
РЛС	Радиолокационная станция
РПС	Радиолокационная станция предупреждения столкновений
САУ	Система автоматического управления
ТС	Транспортные средства
ЦОС	Цифровая обработка сигналов

ЦАП	Цифро-аналоговый преобразователь
ЧМ	Частотная модуляция
ЭВМ	Электронная вычислительная машина
ADAS	Advanced driver-assistance systems
LIDAR	Light detection and ranging
ESR	Electronically Scanning Radar
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FSK	Frequency shift keying
FSCW	Frequency-stepped continuous wave

Список литературы

1. Z. Sun, G. Bebis and R. Miller, "On-road Vehicle Detection: A review," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 28, no. 5, (2006), pp. 694-711.
2. Л.А. Долгова, Е.Г. Рылякин, Г.Н. Василиади “автоматизированная система предотвращения аварийных столкновений автомобилей”. Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности" (<http://ipb.mos.ru/ttb>) Выпуск № 4 (62), 2015 г.
3. Светлана Сысоева. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности // Компоненты и технологии. 2006. № 8, 9, 10, 11. 2007. № 2, 3, 4, 8.1
4. Светлана Сысоева “Датчики. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Часть 6. Радары”. Журнал “Компоненты и технология”, №3, 2007.
5. Михаил Парнес. Применение радарных датчиков в автомобиле// Компоненты и технологии. 2008. №1. с. 41 – 44.
6. Нуждин, В.М. и др. Система радиовидения «Авторадар». Управление движением автомобиля // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2000. – № 5. – С. 48–51.
7. Maria S. Greco “Automotive Radar” 2012 IEEE Radar Conference, May 7-11, Atlanta.
8. New Trends and Developments in Automotive System Engineering / Ed. by Prof. Marcello Chiaberge. Intech.– 2011.– 664 p.
9. Сысоева, С. Интеллектуальные автомобильные системы и датчики / М. Компоненты и технологии. №1. 2012.

10. Automotive 24 GHz Short Range Radar Sensors with Smart Antennas / M. Schneider, V. Grosset al. // Proceeding of German Radar Symposium 2002, Bonn, September 2002.
11. Development of future short-range radar technology / K.M. Strohm, H.-L. Bloecher, R. Schneider, J. Wenger // European Radar Conference. Paris, France.– 2005.– pp. 165-168.
12. Wenger, J. Automotive radar-status and perspectives // Proceeding of Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Palm Springs, USA, 2005. pp. 21-24.
13. Dominik, H. Short Range Radar – Status of UWB Sensors and their Applications / H. Dominik // Proceedings of the 4th European Radar Conference. Munich, Germany.– 2007.– pp. 251254.
14. Issakov, V. Microwave Circuits for 24 GHz Automotive Radar in Silicon-based Technologies, DOI 10.1007/978-3-642-13598-9_12, © Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg.– 2010.
15. The European Telecommunications Standards Institute. ETSI EN 301 091-1 V2.1.1 (2017-01). Short Range Devices; Transport and Traffic Telematics (TTT); Radar equipment operating in the 76 GHz to 77 GHz range; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU; Part 1: Ground based vehicular radar.
16. Шишанов, С.В. Система кругового обзора для транспортных средств на основе сверхширокополосных датчиков [Текст] / С.В. Шишанов, А.В. Мякинков // Известия высших учебных заведения России. Радиоэлектроника, 2015.– № 2.– С. 55–61.
17. Low-Cost Long-Range Radar for Future Driver Assistance Systems / G. Kühnle, H. Mayer, H. Olbrich et al, // Auto Technology, 2003. Vol. 4. pp. 2-5.

18. Wenger, J. Automotive radar-status and perspectives // Proceeding of Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Palm Springs, USA, 2005. pp. 21-24.

19. Сысоева, С. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Часть 1. Новые технологии и применения датчиков автомобильных систем помощи водителю [Текст] / С. Сысоева // Компоненты и технологии, 2006.– № 8.– стр. 34-44.

20. 79 GHz UWB automotive short range radar – Spectrum allocation and technology trends / H.-L. Bloecher, A. Sailer, G. Rollmann, J. Dickmann // Advance in Radio Science.– 2009. – № 7.– pp. 61-65.

21. 79 GHz Band Ultra-Wideband Automotive Radar / K. Ohguchi, M. Shono, M. Kishida // FUJITSU TEN Technical Journal. 2013.-№.39. pp. 9-14.

22. Bridzolar, D. Directions of development of automotive radar: the band 79 GHz / Magazine “Organization and road safety”, Moscow, Russia, 2013, № 4.

23. 79 GHz Band High-Resolutions Millimeter-wave Radar / M. Kishida, K. Ohguchi, M. Shono // FUJITSU TEN Technical Journal. Vol. 51. 2015.-№.4. pp.55-59.

24. Electronically-Scanning Millimeter-Wave Radar for Forward Objects detection / A. Kawakubo, S. Tokoro et al. // Proceeding of SAE Congress'2004. Detroit. USA. 2004. pp. 127-134.

25. Features of formation of radar-tracking and optical images in a mobile test complex of radiovision systems of the car. / Andrey Ananekov, Anton Konovaltsev, Alexey Kukhorev, Vladimir Nuzhdin, Vladimir Rastorguev // Journal of Telecommunications and Information Technology. Warsaw. Poland. 2009. №1. pp.29-33.

26. Буй Чи Тхань. Алгоритмы обработки сигналов в автомобильных радиолокаторах предупреждения столкновений // диссертация канд. тех. наук. Московский авиационный институт, 2016.

27. Ананенков А.Е., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., и др. Особенности радиолокационных образов в системах радиовидения ММ-диапазона // Инновации. 2005. № 6. С. 98–104.

28. Ananenkov A.E., Konovaltsev A.V., Nuzhdin V.M., Rastorguev V.V., Sokolov P.V. Optical and Microwave Technologies for Telecommunication Networks. Editor Otto Strobel. Chapter 11. Optical Data-Bus and Microwave Systems for Automotive Application in Vehicles, Airplanes and Ships. Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons, Ltd. United Kingdom. 2016.

29. Ananenkov A.E., Nuzhdin V.M., Rastorguev V.V., Sokolov P.V. and Schneider V.B. System Radiovision for Movement Automation of the Vehicles Column. Proceeding of 16th International Conference on Transparent Optical Networks - ICTON'2014, Graz, Austria, July 6th – 10th, 2014, Mo.D7.2 978-1-4799-5601-2/14/\$31.00 ©2014 IEEE Publication Year: 2014, Page(s): 1 – 6.

30. Нуждин В. М, Расторгуев В. В., Шнайдер В. Б. Исследование точности определения местоположения транспортного средства относительно границ дороги. Журнал радиоэлектроники, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова, электронный журнал, ISSN 1684-1719, №8/2014.

31. Шнайдер В.Б. Радиолокационная система обеспечения безопасности движения наземных транспортных средств. Диссертация на соискание учёной степени к.т.н. Специальность 05.12.14: Радиолокация и радионавигация. М.: МАИ. 2014.

32. Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Сидоров Н.В., Сулимов Ю.О. Исследование автомобильной РЛС переднего обзора с частотной модуляцией // Труды 11-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, КрыМиКо-2001», Севастополь, ISBN 966-7968-00-6, 2001.

33. Ананенков А.Е., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Скосырев В.Н. Особенности оценки характеристик обнаружения в РЛС малой дальности // Радиотехника. – 2013. – № 11. – С. 35–38.
34. Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Соколов П.В., Скосырев В.Н. Статистический подход к радиолокационному распознаванию объектов по дальностным портретам. Труды VI научно-технической конференции «Радиооптические технологии в приборостроении». – Россия, Туапсе, 2008.
35. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Александров А.В. Сигнатурная идентификация объектов в сверхширокополосной радиолокации. Доклад 5-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М. Россия. 2003. с. 249-251.
36. Ефимов Е.Н., Шевгунов Т.Я. Идентификация точечных рассеивателей радиолокационных изображений с использованием нейронных сетей радиально-базисных функций. // Труды МАИ. – 2013. – № 68.
37. Туров В.Е., Гвоздарев А.С., Кренев А.Н., Полубехин А.И., Ильин Е.М., Применение радиоголографического подхода к задаче идентификации групповых целей в РЛС X-диапазона. // Вестник Сибирского университета потребительской кооперации. 2016. №3. с.139-147.
38. Коновалюк М.А., Кузнецов Ю.В., Баев А.Б. Идентификация параметров многоточечной цели по комплексному радиолокационному изображению в широкополосной радиолокации. 3-я международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2009), РНТОРЭС им. А.С. Попова, г. Суздаль, 22-24 сентября 2009, с. 48 - 52.
39. Andrey Ananenko, Anton Konovaltsev, Vladimir Nuzhdin, Vladimir Rastorguev, Pavel Sokolov – “Characteristics of Radar Images in Radio Vision Systems of the Automobile”, Proceeding of International Conference on Transparent

Optical Networks – ICTON-MW'08, Marrakech, Morocco, December 11-13th, 2008.
- IEEE Catalog Number: CFP0833D-CDR, ISBN: 978- 1-4244-3485-5, Library of Congress: 2008910892.

40. Radar Handbook, Third Edition. Editor Merrill I. Skolnik, Copyright © 2008 by the McGraw-Hill Companies, ISBN 978-0-07-148547-0.

41. А.И.Кибзун, Е.Р.Горяинова, А.В.Наумов, А.Н.Сиротин теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 224 с.

42. Давенпорт В.Б., Рут В.Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. М.: ИЛ, 1960. - 467 с.

43. Е.А. Штагер, Рассеяние радиоволн на телах сложной формы, М., Радио и связь, 1986г., 184с.

44. В.А. Боровиков, Б.Е. Кинбер, Геометрическая теория дифракции, М., Связь, 1978г., 248с.

45. П.Я. Уфимцев, Метод краевых волн в физической теории дифракции, М., Сов. радио, 1962г., 234с.

46. Г.Т. Марков, Б.М. Петров, Г.П. Грудинская, Электродинамика и распространение радиоволн, учебн. пособие для вузов, М. Сов. радио, 1969г., 376с.

47. Буй Ши Хань. В. В. Расторгуев. Анализ характеристик радиолокационных сигнатур дорожных объектов в автомобильной РЛС предупреждения столкновений // Электросвязь – №8/2017. с. 55-61.

48. М.Е. Варганов, Ю.С. Зиновьев, Л.Ю. Астанин и др.; под ред. Л.Т. Тучкова, Радиолокационные характеристики летательных аппаратов, М., Радио и связь, 1985г., 236с.

49. А.А. Коростелев, Н.Ф. Ключев, Ю.А. Мельник и др.; под ред. В.Е. Дулевича, Теоретические основы радиолокации, М., Сов. Радио, 1978г., 608с.

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