

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
«МАИ»

На правах рукописи

Шнайдер Виктор Борисович



РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Специальность 05.12.14
«Радиолокация и радионавигация»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук, доцент
Расторгуев Владимир Викторович

Москва - 2014

Оглавление

Введение.....	4
1 Постановка задачи исследования	13
1.1 Анализ состояния проблемы	13
1.2 Специфика АРЛС.....	18
1.3 Основные задачи проектирования АРЛС.....	24
1.4 Прототипы АРЛС.....	25
2 Разработка модели фоноцелевой обстановки	29
2.1 Влияние переотражений от поверхности дороги на яркостное	29
изображение формируемое АРЛС.....	29
2.2 Анализ характеристик рассеяния ЭМВ на подстилающих	35
поверхностях применительно к условиям визирования в АРЛС.....	35
2.3 Сравнение контрастности РЛИ, полученных в X и Ka диапазонах.....	44
3 Разработка методики проектирования АРЛС	51
3.1 Выбор и обоснование технических требований к АРЛС.....	51
3.2 Выбор и обоснование структурной схемы АРЛС.....	56
3.3 Методика расчёта структурной схемы АРЛС	64
4 Алгоритмическое и программное обеспечение АРЛС.....	69
4.1 Задачи вторичной обработки РЛИ в АРЛС	70
4.2 Алгоритм измерения расстояния до границы дороги	71
и определения ориентации автомобиля на дороге.....	71
4.3 Оценка допустимой погрешности измерения расстояния	74
до обочины.....	74
4.4 Алгоритм построения границ дорожного полотна.....	76

4.5 Программная реализация алгоритма измерения расстояния до.....	79
границ дороги и определения ориентации автомобиля на дороге.....	79
4.6 Алгоритм обнаружения препятствий в пределах КБ	84
4.7 Алгоритмы формирования и обработки РЛИ в АРЛС.....	87
Заключение	99
Список сокращений и условных обозначений.....	101
Список литературы	103

Введение

Актуальность работы

При управлении транспортными средствами (ТС) в условиях ограниченной или отсутствующей оптической видимости существенно возрастает вероятность дорожно-транспортных происшествий (ДТП), поэтому задача обеспечения безопасности движения в таких условиях является очень актуальной.

По данным американского агентства NHTSA [2,9], ДТП чаще всего связаны с невнимательностью водителя (68%), с несоблюдением дистанции (19%), а также с недостаточной информацией, получаемой водителем во время движения. При этом, степень информированности водителя о ситуации на дороге находится в прямой зависимости от условий оптической видимости, таких как:

- освещённость дороги и обочины;
- наличие качественной разметки и указателей;
- степень загрязнённости остекления кабины;
- наличие гидрометеообразований (сильного снегопада, ливневых дождей, тумана), смога, пыли и других мешающих факторов.

Задача улучшить информированность водителя о дорожной ситуации была поставлена давно, и для её решения во многих странах предложены программы по созданию и внедрению различных систем активной безопасности, которые помогают водителю управлять автомобилем в условиях ограниченной оптической видимости, а в будущем и полностью заменили бы его [3,5,6,7,9,52,55].

Ключевым элементом систем автоматического управления, является сенсор. В зависимости от принципа действия все сенсоры этих систем можно разделить на оптические, ультразвуковые и радиолокационные.

Оптические сенсоры видео и инфракрасного (ИК) диапазонов широко применяются в автомобилях, однако объединяет их два серьёзных недостатка: неработоспособность в условиях отсутствия оптической видимости (дождь, снег, туман, пыль); а также невозможность измерять расстояние до объектов.

Ультразвуковые сенсоры имеют ограниченную дальность действия (<10м) и используются главным образом для обеспечения парковки автомобиля.

Поэтому основным сенсором, который сохраняет свою работоспособность в условиях отсутствия оптической видимости и тем самым обеспечивает безопасность движения ТС, является радиолокационный сенсор.

В целом, большинство известных и представленных в настоящее время на рынке сенсоров либо решают задачу предотвращения столкновения с препятствием в пределах полосы движения (например, радары системы Audi pre sense, радар системы “DISTRONIC PLUS” компании Mercedes-Benz), либо обладают ограниченной (до 3-6 градусов) разрешающей способностью в азимутальной плоскости (например, радар фирмы Delco [9,10]).

Если азимутальное разрешение таких сенсоров не позволяет однозначно определить находится ли посторонний объект внутри полосы движения перед автомобилем (или, например, припаркован на обочине), то такая система будет постоянно требовать остановки, либо снижения скорости для решения задачи безопасного проезда другими средствами, имеющими меньшую дальность видения в сложившихся погодных условиях. Большинство дорог имеет такие объекты дорожной инфраструктуры, как знаки, столбы, ограждения и т.п. Эти объекты, согласно проведенным исследованиям [3], имеют эффективную поверхность рассеяния (ЭПР), достаточную для их обнаружения. Поэтому для обеспечения безостановочного движения необходимо обеспечить азимутальное разрешение радиолокационного сенсора не менее $0,7 - 1$ градус, достаточное для разделения объектов находящихся в полосе движения и вне полосы, на дистанции превышающей тормозной путь. Кроме того, радиолокационный сенсор должен обеспечивать необходимый сектор обзора в азимутальной плоскости.

Проведенный обзор известных технических решений показал, что ни один из представленных на рынке и проектируемых радиолокационных сенсоров не позволяют получить высокоинформативное панорамное радиолокационное изображение (РЛИ) с требуемым азимутальным разрешением и разрешением по дальности, необходимые для безопасного управления движением автомобиля в

условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

Поэтому можно утверждать [27,30,31], что основным путём решения актуальной **проблемы** повышения безопасности и управления движением наземных транспортных средств в условиях отсутствия или ограниченной оптической видимости является предоставление водителю достоверной информации о дорожной ситуации перед ТС в реальном времени. Для получения такой информации необходимо решить **задачу** создания панорамной автомобильной РЛС (АРЛС), вопросам разработки которой и посвящена диссертационная работа.

АРЛС относится к классу РЛС малой дальности, называемыми например в [12] системами ближней радиолокации (СБРЛ), однако к ней предъявляются ряд специфических требований, сформулированных в первой главе.

Исследованиями, связанными с поставленными в диссертации проблемными областями, занимались различные группы исследователей, как в нашей стране, так и за рубежом. Прежде всего, необходимо отметить основополагающие работы таких учёных, как П.А.Бакулев, Ю.Г.Сосулин. Большое влияние на разработку и создание первых панорамных РЛС для ТС (АРЛС) оказали многолетние исследования известных специалистов МАИ: Нуждина В.М., Расторгуева В.В., Чукина Л.Ф., Давидича И.В.. Все эти специалисты являются учениками известного в СССР учёного, профессора, доктора технических наук, ведущего специалиста в области радиолокации протяжённой земной поверхности – Жуковского А.П.. Кроме того, вопросы разработки радиолокаторов ближней дальности рассмотрены в трудах Шелухина О.И., Елистратова В.В. Среди зарубежных учёных необходимо отметить труды: M.Skolnik, P.Russer, R.Rollman, M. Schnider, R.Schmidt.

Специалистами кафедры радиоприёмных устройств МАИ с 1994 года ведутся работы по созданию АРЛС. Несколько лет назад были разработаны и изготовлены экспериментальные макеты АРЛС [21,27,30,31] с частотной модуляцией (ЧМ) зондирующего сигнала ММ диапазона длин волн. Данные макеты позволили провести обширные натурные эксперименты и получить большое количество экспериментальных данных о характеристиках радиолокационного отражения от характерных объектов дорожной инфраструктуры, автомобилей и подстилающих

поверхностей различного типа. Однако работы по анализу статистических характеристик рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) на указанных объектах не были осуществлены, не были рассмотрены вопросы построения модели фоноцелевой обстановки (ФЦО) в таких АРЛС.

Рассмотренные в работах [22,23,29,33,35,36,39,40,50] отдельные аспекты создания аппаратных и программных средств для АРЛС не дают разработчику аппаратуры РЛС конкретных рекомендаций и методик по выбору структуры и расчёту параметров АРЛС. В работах [27,30] ставится задача, которую должна решать АРЛС. В работах [20,32,53] приведены особенности радиолокационных систем, применяемых при настильных углах визирования. Общие подходы к обработке радиолокационных изображений с целью повышения информированности водителя приведены в работах [35,36].

Поэтому можно констатировать, что вопросы выбора и обоснования параметров панорамных РЛС, исходя из решаемой ТС задачи; вопросы создания аппаратно-программного комплекса таких РЛС; вопросы построения алгоритмов формирования и обработки РЛИ остаются открытыми.

Цель работы – разработка алгоритмов обработки сигналов и программного обеспечения, а так же технических требований автомобильной РЛС панорамного обзора, предназначенной для обнаружения опасных объектов и измерения расстояния до них в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

Для достижения поставленных целей в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Сформулировать требования к АРЛС, которые обеспечивают выполнение задач предотвращения столкновений и локальной навигации ТС при недостаточной или отсутствии оптической видимости.
2. Провести статистический анализ результатов экспериментальных исследований по рассеянию ЭМВ миллиметрового диапазона на подстилающих поверхностях и различных типах ТС при настильных углах визирования и в различных дорожных ситуациях, по результатам которого построить модель характерной фоноцелевой обстановки (ФЦО) для АРЛС.

3. Обосновать структурную схему построения автомобильной РЛС, разработать методику выбора и расчета ее параметров на основе сформулированных требований.
4. Разработать многоканальный измеритель расстояния до обочины, необходимый для определения местоположения автомобиля и угловой ориентации на дороге.
5. Реализовать и практически апробировать алгоритмы обработки радиолокационных сигналов в макете АРЛС.
6. Оценить эффективность алгоритмов обнаружения и измерения расстояния до объектов.

Научная новизна работы

На основе обработки результатов натурных экспериментов макетов АРЛС и обобщения данных известных источников определены закономерности статистических характеристик рассеяния ЭМВ различными объектами дорожной инфраструктуры и ТС при настильных углах визирования, и построена модель ФЦО применительно к АРЛС наземных ТС.

Введён новый критерий (коридор безопасности), связывающий параметры АРЛС со скоростью движения ТС для решения задачи предотвращения столкновений с опасными объектами.

Разработан алгоритм многоканального следящего измерителя расстояния до распределенной цели (обочины дороги). Приведена оценка погрешности измерения расстояния для разработанного алгоритма.

Практическая значимость результатов работы

Разработана модель фоноцелевой обстановки в АРЛС, которая позволяет корректно и обосновано провести выбор параметров АРЛС для конкретного типа ТС.

Разработана методика проектирования АРЛС, основанная на модели фоноцелевой обстановки и сформулированных требований к АРЛС.

Разработано прикладное программное обеспечение, реализующее алгоритмы формирования и обработки РЛИ в АРЛС, которые позволяют решить задачу

обеспечения безопасности и управления движением в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальная модель характерной фоноцелевой обстановки (ФЦО) для автомобильной РЛС позволяет оценить диапазон величин ЭПР объектов дорожной инфраструктуры, который составляет $1 \div 100 \text{ м}^2$, значений удельных ЭПР наблюдаемых подстилающих поверхностей в пределах $0,0035 \div 0,08$ и сформировать исходные данные для расчёта энергетических параметров автомобильной РЛС.
2. Методика проектирования АРЛС, включающая параметрическую оптимизацию зондирующего сигнала, блоков структурной схемы и учитывающая скорость и габариты ТС, позволяет рассчитать параметры автомобильной РЛС для обнаружения объектов и разделения их на опасные и неопасные на дальностях $150 \div 300 \text{ м}$ при заданных показателях качества обнаружения.
3. Алгоритм построения многоканального следящего измерителя дальности до распределённой цели (обочины дороги) в автомобильной РЛС с использованием априорной информации о характере цели обеспечивает измерение местоположения автомобиля на дороге с точностью порядка $0,5 \text{ м}$.

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, обуславливается корректным введением ограничений и подтверждается использованием апробированных методов статистического анализа и высокой степенью совпадения результатов математического моделирования и натурального эксперимента, а также экспериментальной проверкой предложенных алгоритмов формирования и обработки РЛИ, полученных с помощью макета АРЛС. Проведенные исследования экспериментальных РЛИ показали эффективность использования предложенных алгоритмов для выполнения целевых задач АРЛС.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы были использованы при проведении совместных научных исследований с предприятиями промышленности (в частности, при выполнении сотрудниками НИО кафедры радиоприёмных устройств МАИ по заказу фирмы NanoENS Co., Ltd, Suwon, Республика Корея, научно-исследовательской работы «Модель датчика обнаружения препятствий и предупреждения столкновений»). Кроме того, результаты, полученные в диссертации, используются при выполнении сотрудниками НИО факультета радиоэлектроники летательных аппаратов МАИ научно-исследовательской работы в рамках проекта при поддержке Министерства образования и науки РФ, код проекта 780, а также в учебном процессе кафедры радиоприёмных устройств факультета радиоэлектроники летательных аппаратов МАИ в дисциплине "Радиотехнические системы видения транспортных средств".

Личный вклад соискателя

На основе анализа результатов экспериментальных исследований макетов АРЛС, разработана модель характерной ФЦО, позволяющая сформировать исходные данные для проектирования и расчёта основных параметров АРЛС.

Предложен критерий разделения объектов на опасные и безопасные, позволяющий сформулировать требования к антенной системе АРЛС.

Разработана методика расчёта параметров АРЛС, обеспечивающая выполнение специфических требований к АРЛС с учетом характерной фоноцелевой обстановки.

Разработан многоканальный следящий измеритель расстояния до обочины с использованием априорной информации, который позволяет решать задачу удержания автомобиля в своей полосе движения. Проведена оценка погрешности измерения расстояния до обочины.

Реализованы алгоритмы первичной обработки, формирования изображения, выделения коридора безопасности, определения расстояния до препятствия, которые апробированы на реальных экспериментальных данных и подтверждена их работоспособность в реальном масштабе времени.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- 10-й Международной научно-технической конференции «АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА-2011»: СПб, 2011г.
- 12th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2010, Munich, Germany, June 27 - July 1, 2010.
- 14th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2012, Coventry, England, July 2 – 5, 2012.
- Научно-технической конференции «Радиооптические технологии в приборостроении», г.Туапсе, Россия, 1-7 сентября 2013г.
- 16th International Conference on Transparent Optical Networks ICTON'2014, Graz, Austria, July 6th – 10th, 2014.

Публикации. Результаты исследований, выполненных в диссертации, представлены в 10 печатных трудах, в том числе в 4 статьях в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 6 тезисах докладов научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 109 машинописных листах и состоит из 4 глав, заключения и списка литературы. Иллюстративный материал представлен в виде 43 рисунка и 12 таблицы. Список литературы включает 55 наименований.

В главе 1 показано, что решение проблемы обеспечения безопасности и управления движением автомобиля в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости заключается в использовании панорамной АРЛС переднего обзора с высоким пространственным разрешением. Сформулированы специфические особенности АРЛС, отличающие данный радар от других классов РЛС. Приводятся результаты исследований и технические характеристики прототипов АРЛС ММ-диапазона длин волн. Сформулированы основные задачи исследований, которые решаются в диссертации.

В главе 2 представлены результаты разработки модели ФЦО в АРЛС. Данная модель базируется на основе анализа статистических характеристик рассеяния

ЭМВ на подстилающей земной поверхности, а также на протяжённых объектах искусственного происхождения. Модель ФЦО строится на основании обобщения известных данных литературных источников и анализа экспериментальных результатов характеристик отражения, полученных при помощи макета АРЛС. Для анализа характеристик ЭПР и УЭПР проведены исследования результатов натуральных испытаний макета АРЛС ММ-диапазона в типовых дорожных ситуациях. Полученная модель ФЦО является необходимым источником исходных данных для создания методики проектирования и выбора параметров АРЛС.

В главе 3 представлены результаты разработки инженерной методики проектирования АРЛС и расчёта параметров элементов структурной схемы. Приводятся результаты оценки динамического диапазона принимаемых сигналов в АРЛС и показана необходимость применения в приёмном тракте квадратического корректора и модулятора с функцией «временного» окна. Определена структура погрешностей АРЛС.

В главе 4 сформулированы основные задачи обработки радиолокационных данных в АРЛС, разработан и экспериментально проверен алгоритм измерения расстояния до границ дороги и определения ориентации автомобиля на дороге, дана оценка допустимой погрешности измерения расстояния до обочины. Приведены результаты разработки и экспериментальной проверки многоканального следящего обнаружителя распределённой цели (обочины дороги) с использованием априорной информации.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1 Постановка задачи исследования

1.1 Анализ состояния проблемы

С развитием автомобилестроения во всем мире существенно увеличилась интенсивность и плотность транспортных потоков на дорогах при одновременном возрастании средней скорости движения. При этом резко возрастает число аварий и дорожно-транспортных происшествий (ДТП). В результате ДТП превратились в одну из серьезнейших проблем мирового масштаба, для решения которой ведется поиск способов повышения безопасности дорожного движения.

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 [2,9], 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:

- освещённость дороги и обочины;
- наличие качественной разметки и указателей;
- степень загрязнённости остекления кабины;
- наличие гидрометеообразований (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.

Причём из всего парка автомобилей можно выделить те, которые наиболее часто подвергаются действию этих негативных факторов. Так если обычный легковой автомобиль, принадлежащий частному водителю, эксплуатируется преимущественно в светлое время суток, то, например, магистральный тягач или междугородный автобус эксплуатируются всесезонно, причём зачастую именно в тёмное время суток, когда дороги свободнее. Кроме того, для целого ряда специальных транспортных средств (машины скорой помощи, полиции, пожарные машины, машины перевозки специальных грузов), необходимо осуществлять всепогодное и круглосуточное движение, причём с достаточно высокими скоростями (> 60 км/час) в условиях действия всех выше перечисленных негативных факторов.

Особенно актуальна эта задача при эксплуатации автомобилей в условиях Крайнего Севера по зимним трассам (где очень высока вероятность снегопада в зимний период), а также в песчаных и пустынных районах (где часто бывают песчаные и пыльные бури).

Задача улучшить информированность водителя о дорожной ситуации была поставлена давно, и для ее решения во многих странах предложены программы по созданию и внедрению различных систем, которые помогают водителю управлять автомобилем в условиях ограниченной оптической видимости, а в будущем и полностью заменили бы его [3,5,6,7,9,52,55]. В России, Германии, США, Японии, Франции, начиная с 90-х годов прошлого века, ведётся большое количество научно-исследовательских работ по созданию различных систем и датчиков, позволяющих снизить вероятность дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

По большому счёту специалисты в области автомобильной электроники концентрируют свои усилия на двух направлениях – развитие информационного обеспечения дорожной инфраструктуры и создание «разумного» автомобиля, которые, тесно связаны между собой. Пожалуй, сегодня наиболее продуктивно развиваются информационные технологии «разумного» автомобиля. Остановимся на некоторых из них.

Например, эту задачу стараются решить путём установки на автомобиль «умных» оптических средств, а также путём внедрения инфракрасных систем ночного видения, как активных, так и пассивных. Например, в 2000 году компания General Motors (GM) совместно с компанией Raytheon Systems создала пассивную инфракрасную систему “Night Vision” [2,9,13]. Эта система, фиксируя естественное тепловое излучение объекта, дает водителю возможность контролировать дорожную обстановку на расстоянии в два раза большем, чем то, которое способны осветить самые современные фары в режиме дальнего света. Однако, в странах с высокой среднесуточной температурой воздуха - более 15° - 20° , система “Night Vision” может оказаться неработоспособной.

В 2009 году компания Mercedes-Benz стала устанавливать на свои автомобили активные инфракрасные системы “Night View Assist Plus”, которые обеспечивают качественное изображение дороги и пешеходов на дальности до 250 м [10]. Однако, применение в таких системах неохлаждаемых тепловизоров делает их работу зависимыми от погодных условий. Так, при слабом тумане дальность видимости составляет 500-1000 м, а при сильном тумане или сильной песчаной буре может снижаться до десятков и даже нескольких метров.

Недостаток этих решений очевиден – из всех негативных факторов, снижающих оптическую видимость, они борются только с недостаточной освещённостью. Поэтому известные методы решения задачи повышения безопасности движения с помощью установки на автомобиль оптических и ИК датчиков, работающих в различных световых диапазонах, малоэффективны в сложных погодных условиях, при наличии дыма, пыли, а ультразвуковые датчики ограничены в дальности действия.

Таким образом, основным путём решения **актуальной проблемы** повышения безопасности движения, в условиях отсутствия или ограниченной оптической видимости, является использование на автомобиле радиолокационного датчика миллиметрового (ММ) диапазона длин волн, работа которого не зависит ни от времени суток, ни от погодных условий (снег, дождь, туман), ни от наличия дыма, пыли.

За последнее десятилетие основные исследования и разработки в области создания автомобильного радара были сосредоточены на освоении следующих диапазонов частот [4-8]: 24 ГГц – для радара ближней дальности (SRR, до 50 м), 76 - 77 ГГц для радара большой дальности (LRR, 150 – 200 м). В последнее время ведутся активные исследования в области использования диапазона 79 ГГц [11]. При этом освоение нового частотного диапазона 77 – 81 ГГц осуществляется с целью уменьшения массогабаритных характеристик радара при сохранении высокой информативности изображения. Однако, стоимость СВЧ модулей в этом диапазоне пока высока, что снижает коммерческий эффект внедрения.

До сих пор функции автомобильного радара были направлены преимущественно на повышение удобства и безопасности вождения. В частности, это применение автомобильного радара в качестве сенсоров адаптивной системы поддержания заданной скорости (адаптивный круиз-контроль), системы предупреждения об опасности столкновения в полосе движения. Например, компания Audi предлагает технологию, обладающую возможностью «предвидения» аварии - Audi pre sense [10]. Так, адаптивный круиз-контроль включает в себя не только функцию Stop & Go и систему безопасности “Audi pre sense front”, но и функцию автоматического поддержания дистанции (на скорости от 0 до 250 км/ч). Компания Delphi Automotive предлагает электронно-сканирующий радар ESR (Electronically Scanning Radar), работающий в двух режимах: среднем и дальнем диапазоне дальностей [6,10]. При работе в среднем диапазоне (режим SRR) на дальности до 60 м ESR позволяет обнаруживать автомобили и пешеходов, а в дальнем диапазоне (режим LRR) на дальности до 174 м - определяет дальность и скорость до 64 объектов на пути движения автомобиля.

Несомненно, широкому внедрению автомобильного радара способствовали успехи исследователей и инженеров различных стран, в развитии современных технологий создания СВЧ модулей радаров в виде Monolithic Microwave Integrated Circuit (ММИС), которые базируются на использовании SiGe и GaAs технологий, а также в развитии высокоскоростных аналогово-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых (ЦАП) преобразователей для микроконтроллеров.

Основные технические требования к автомобильному радару сводятся к необходимости обеспечить требуемую дальность действия, которая для современных автомобилей должна составлять не менее 250 м; обеспечить высокое пространственное разрешение (по дальности – менее 1 м, и по углу азимута: $0,7 - 1^{\circ}$), обеспечить необходимый темп обзора пространства перед автомобилем – не менее 10 гц.

Если азимутальное разрешение автомобильного радара не позволяет однозначно определить находится ли посторонний объект внутри полосы движения перед автомобилем (или, например, припаркован на обочине), то такая система будет постоянно требовать остановки, либо снижения скорости для решения задачи безопасного проезда другими средствами, имеющими меньшую дальность видения в сложившихся погодных условиях. В 21 веке большинство дорог имеет объекты дорожной инфраструктуры – знаки, столбы, ограждения и т.п. Эти объекты дают, согласно проведённым исследованиям [3], достаточный уровень отражённого сигнала. Поэтому необходимо обеспечить азимутальное разрешение авторадара, достаточное для разделения объектов находящихся в полосе движения и вне полосы на дистанции, превышающей тормозной путь.

В целом, проведённый обзор показал, что большинство представленных в настоящее время на рынке автомобильных радаров либо решают задачу предотвращения столкновения с препятствием в пределах полосы движения, либо обладают ограниченной (до 3-6 градусов) разрешающей способностью в азимутальной плоскости. Поэтому можно констатировать, что ни один из представленных на рынке и проектируемых автомобильных радаров не позволяют получить высокоинформативное панорамное РЛИ с азимутальным разрешением $0,7-1$ градус и разрешением по дальности ~ 1 м, необходимые безопасного управления движением автомобиля в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

Исследования, проведённые в процессе выполнения диссертационной работы, базируются на многолетних исследованиях учёных кафедры радиоприёмных устройств Московского авиационного института (национального исследовательского университета). Эти исследования были, направлены на создание экспери-

ментального образца панорамного радиолокационного датчика переднего обзора автомобиля (АРЛС), работающего в ММ диапазоне длин волн, не имеющая аналогов на мировом рынке [3,19].

Данный образец АРЛС предназначен для формирования панорамного РЛИ дорожной обстановки впереди автомобиля. Водитель в условиях отсутствия оптической видимости может наблюдать на экране индикатора в салоне автомобиля препятствия, границы дороги, попутные, встречные, а также припаркованные у обочины транспортные средства в пределах рабочей дальности с учетом динамики движения собственного автомобиля.

Поэтому можно констатировать, что создание и применение АРЛС позволит существенным образом повысить безопасность движения на дорогах, в том числе за счет автоматизации управления автомобилем в критической ситуации и снижения влияния на безопасность движения человеческого фактора.

1.2 Специфика АРЛС

АРЛС относится к классу навигационных РЛС малой дальности, что определяет ряд особенностей в обработке и представлении (индикации) радиолокационной информации. Например, фоновое РЛИ от подстилающей земной поверхности и местных предметов (МП) является информативным для решения навигационной задачи и выдаётся пользователю (в отличие от РЛС обзора воздушного пространства, где оно является мешающим и подавляется процедурами СДЦ). Продукты вторичной обработки (выделенные встречные и попутные автомобиля, с прогнозом их движения, границы дорожного полотна, продукты комплексирования в GPS и ЦКМ) могут присутствовать в виде векторных масок, наложенных на фоновое РЛИ.

Особенности, отличающие АРЛС от других классов РЛС, можно подразделить на следующие:

- Особенности назначения;

- Особенности, связанные с характерными габаритами типовых целей и наблюдаемой сцены;
- Особенности геометрии наблюдения;
- Особенности, связанные с широким диапазоном отражающей способности наблюдаемых сцен и диапазоном дальностей.
- Особенности массового применения;
- Особенности электромагнитной совместимости;
- Экологические особенности.

Особенности назначения.

Необходимость отслеживания динамичных объектов на сверхмалых (применительно к традиционной радиолокации) дальностях требует **высокого темпа получения и обновления информации** на индикаторе, соизмеримого с темпом обновления в телевизионных системах. Наличие удобного и дружелюбного интерфейса, позволяющего водителю мгновенно и адекватно отреагировать на изменившуюся ситуацию. Задержки на обработку информации должны быть менее времени формирования кадра радиолокационного изображения (работа в режиме «мягкого» реального времени – с задержками менее кадра 0,1 сек.). Достигнутый практически в экспериментальном образце АРЛС темп получения радиолокационного изображения составляет 8 Гц.

Темп обновления информации на индикаторе желательно повысить до 16 - 60 Гц для облегчения восприятия оператором. Задача повышения темпа отображения решается интерполяцией первичного РЛИ и перестройкой изображения на индикаторе. Для этого алгоритм обработки РЛИ должен автоматически и постоянно формировать оценку вектора собственной скорости автомобиля относительно неподвижных МП и обочин дороги. Эту оценку можно реализовать аналогично известным корреляционным ДИСС, используя анализ данных из нескольких разнесенных азимутальных каналов, или используя данные спидометра. По полученному вектору скорости интерполированное РЛИ (полученное с меньшим темпом) может выводиться на индикатор несколько раз (до получения следующего кадра)

с соответствующим смещением, обеспечивая непрерывность движения выводимой картинке. Из области анализа корреляционного измерителя скорости целесообразно исключить зону (прямо перед автомобилем) в которой вероятно появление движущихся относительно земной поверхности объектов. Учёт скорости движения на формирование изображения может определять масштаб выводимого изображения: с ростом скорости на индикаторе отображается РЛИ до большей дальности.

Особенности, связанные с характерными габаритами типовых целей и наблюдаемой сцены.

Поскольку задача номер один для АРЛС это обнаружение препятствий в своей полосе движения (автомобиль, человек и т.д.), то разрешающая способность радиолокационного датчика должна позволять локализовать эти объекты в пределах собственной полосы движения до дистанции не менее длины тормозного пути.

Таким образом, для коридора безопасности шириной, например 2 м, разрешающая способность по азимуту для АРЛС должна быть порядка 1 м на дальности 60 м (или не хуже 1^0). Разрешающая способность по дальности должна позволять обнаруживать примыкание дорог (или перекрёстки), что требует разрешения на уровне 1-2 м.

В созданном образце АРЛС реализовано разрешение по азимуту: $0,7^0$ и по дальности: 1-1,5 м. Поэтому при характерных размерах автомобиля от 3 до 18 м практически все цели для АРЛС являются пространственно распределёнными (многоточечными) и требуют для анализа привлечения кластерных процедур.

Радиометрическое разрешение АРЛС должно позволять устойчиво обнаруживать слабоконтрастные границы поверхностей, отличающихся по величине удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) [3,25] менее, чем на 10 дБ. Такое разрешение необходимо для обнаружения естественных границ дороги при отсутствии искусственных ограждений.

Все указанные выше характеристики должны обеспечиваться в достаточно широком (30-90 градусов) азимутальном секторе обзора перед автомобилем.

Столь высокие характеристики *разрешения* обеспечивают уникальную детализацию (*информативность*) РЛИ в АРЛС и не характерны для большинства радиолокационных станций других типов.

Особенности геометрии наблюдения.

Поскольку АРЛС размещается на автомобиле, то высота подъёма фазового центра антенной системы над поверхностью (полотном дороги) очень мала и практически находится в интервале 0,4-2 м. Это обуславливает малую величину углов падения ЭМВ на наблюдаемую поверхность (так называемое *настильные углы визирования*). Все объекты и препятствия в пределах заданной дальности, наблюдаются (и должны автоматически выделяться) на фоне отражений от подстилающей поверхности.

Малая дальность нахождения объектов наблюдения от АРЛС при высокой направленности антенной системы приводит к тому, что цели находятся не только в дальней зоне антенны $R > 2D^2/\lambda$ [1,12], но и в промежуточной зоне Френеля и в ближней, что требует учёта при расчётах ширины диаграммы направленности (ДНА) и коэффициента усиления антенной системы. В разрешённом частотном диапазоне для АРЛС асфальтовое покрытие дороги, над которым ВСЕГДА находится антенная система АРЛС, представляет собой практически зеркальную отражающую поверхность, что обуславливает многолучевое распространение ЭМВ. Известно, что многолучёвое распространение сигналов приводит к значительным флюктуациям интенсивности принятого сигнала [3]. Для АРЛС эта проблема устраняется естественным способом за счёт движения автомобиля, однако алгоритмы обнаружения препятствий должны учитывать значительные флюктуации интенсивности сигнала от препятствий, возвышающихся над дорожным полотном.

Известны классы РЛС, работающие с *настильными* углами визирования – например судовые РЛС, однако для них высота установки антенной системы над поверхностью значительно больше, и идеальная зеркальная гладь водной поверхности – скорее исключение.

Особенности, связанные с широким диапазоном отражающей способности наблюдаемых сцен и диапазоном дальностей.

Поскольку АРЛС должна информировать водителя о ВСЕХ препятствиях в направлении движения вплоть до зоны кратно превышающей длину тормозного пути, то мёртвая зона радиолокационного датчика должна заканчиваться не далее 0,2-0,5 м от переднего бампера автомобиля. Даже при размещении датчика на крыше автомобиля, размер мёртвой зоны не должен превышать 1,5-2м. Учитывая рабочую дальность АРЛС 150-250м и четвёртую степень зависимости мощности сигнала от дальности, диапазон варьирования мощности принятого сигнала только в следствии изменения дальности – не менее 80 дБ. Диапазон изменения ЭПР целей – порядка 30 дБ, однако кроме препятствий АРЛС необходимо обнаруживать слабо контрастные границы дорожного полотна вплоть до УЭПР -20дБ (при площади элемента селекции 1-3м). Таким образом, динамический диапазон принимаемых сигналов АРЛС достигает 130 дБ. Любой сигнал в этом диапазоне не только не должен выводить аппаратуру из строя, но и не должен увеличивать ошибок определения координат препятствий. Работа со значительными динамическими диапазонами входных сигналов присуща некоторым типам РЛС (например, метео РЛС [15,18]), однако типовые технические решения этой проблемы – многоканальные (либо логарифмические) приёмники достаточно дороги, поэтому необходимо использовать ВАРУ или другие методы сжатия динамического диапазона принимаемого сигнала.

Особенности массового применения.

Ключевая особенность АРЛС это низкая стоимость, малые вес и габариты радиолокационного оборудования, низкое энергопотребление. Аппаратура АРЛС не должна нарушать аэродинамику и дизайн автомобиля. Большинство известных радиолокационных станций со сравнимыми характеристиками детальности представления обстановки и точности определения углов и дальностей недопустимо дороги и громоздки для их массового применения на автомобиле. При построении АРЛС мы не можем пожертвовать ни точностью, ни детальностью, ни темпом обновления данных – ибо иначе вся затея создания АРЛС становится бессмыслен-

ной. Однако мы можем смело ограничить диапазон рабочих дальностей системы до 250 или даже 150 м. Ограничение рабочей дальности – единственный ресурс для снижения габаритов, массы и стоимости АРЛС до приемлемых величин для массового пользователя. И это требование (удешевление датчика) заставляет отказаться от многих применяемых в традиционных радиолокаторах решений.

Особенности электромагнитной совместимости (ЭМС).

Необходимость массового применения заставляет иначе взглянуть на проблему ЭМС – количество одновременно работающих АРЛС в ближайшее время будет значительно. Хорошим подспорьем решения этой задачи является выбранный в Европе диапазон таких устройств – 77 ГГц, (второй разрешённый диапазон 24 ГГц) обеспечивающий относительно быстрое затухание излучения радиолокационного датчика в атмосфере и осадках, однако в пределах радиуса действия неизбежно будут работать несколько таких радиолокационных датчиков. Они не должны не только создавать фатальных взаимных помех, но и увеличивать погрешности измерения друг для друга. Дополнительные возможности решения этой проблемы лежат в области алгоритмов обработки и учёта (синхронизации) режимов работы соседних АРЛС по технологиям взаимодействия Car-to-Car.

Экологические особенности.

Ввиду постоянной работы АРЛС в непосредственной близости от людей необходимо обеспечить предельно малый уровень СВЧ излучения. С одной стороны введённое ранее ограничение на рабочий диапазон дальностей уже ограничивает уровень необходимого излучения, с другой стороны дополнительные механизмы защиты должны предоставлять узконаправленный характер излучения и расположение антенного модуля вне корпуса автомобиля. Вопросы управляемого снижения уровня излучения радиолокационных средств в обитаемых зонах уже поднимались в [7].

Помимо указанных особенностей к АРЛС предъявляются неспецифические, но весьма серьёзные требования по стабильности формируемых РЛИ и точности определения координат объектов наблюдения.

Таким образом, определены рамочные требования к АРЛС, которые необходимо уточнить и детализировать, с учётом характерной фоноцелевой обстановки в условиях дорожного движения.

1.3 Основные задачи проектирования АРЛС

Задачи создания и внедрения АРЛС на современные ТС средства далеко не решены. Среди этих проблемных задач можно выделить следующие:

- выбор оптимального частотного диапазона [7];
- выбор оптимального размера разрешения в азимутальной плоскости. Этот выбор ограничен массогабаритными размерами антенной системы (АРЛС должна устанавливаться на легковой автомобиль), что накладывает ограничения на ширину ДНА в выбранном частотном диапазоне [4]. Кроме того, требования обеспечить малую дальность «слепой» зоны накладывает ограничения на ширину апертуры антенны;
- выбор оптимального размера элемента разрешения по дальности;
- обеспечение малой мощности излучения в широком частотном диапазоне требует применения широкополосных зондирующих сигналов (ЗС), например, сигналов с ЛЧМ с уровнем боковых лепестков функции селекции менее 20 дБ;
- формирование и обработка панорамного РЛИ в реальном времени [39,40];
- создание адекватной системы отображения РЛИ и синхронизации [39];
- необходимость сделать дешёвую, малогабаритную АРЛС накладывает ограничения на скорость обработки РЛИ;
- любое ухудшение погодных условий, полное отсутствие оптической видимости (плотный снег, туман, дождь, пыль, дождь) и освещённости не должно мешать работе АРЛС;
- поиск и построение алгоритмов вторичной обработки РЛИ в реальном масштабе времени для адекватного восприятия дорожной обстановки водите-

лем, а также возможности интерактивного управления движением транспортного средства [36].

Указанные выше задачи можно условно разделить на задачи создания аппаратуры и задачи создания программного комплекса. Данные задачи не являются независимыми, актуальны при создании АРЛС и на сегодняшний день полностью не решены.

1.4 Прототипы АРЛС

Исследования, направленные на создание экспериментальных образцов АРЛС были начаты специалистами кафедры радиоприемных устройств Московского авиационного института (национального исследовательского университета) в 1995 году. В 1998 году был создан и испытан первый экспериментальный макет АРЛС с импульсной модуляцией зондирующего сигнала, работающий в диапазоне 39 ГГц [19,20]. Фактически данный макет позволял устойчиво видеть только автомобили и крупные препятствия на дальностях до 50-150м с разрешением 1,5-6м и в азимутальном секторе обзора $\pm 45^{\circ}$. Основным недостатком данной АРЛС был узкий динамический диапазон не позволявший видеть обочину и, следовательно, определять границы дороги.

Поэтому в 2001 году были созданы экспериментальные макеты АРЛС с непрерывным зондирующим сигналом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), работающие в диапазоне 39 ГГц (рис.1.1) и в разрешённом для таких радаров диапазоне 77 ГГц (рис. 1.2) [20]. Применение ЛЧМ позволило поднять энергетический потенциал АРЛС на 40 дБ и улучшить разрешение до 1,5-2 м. Применение новой антенны вытекающей волны [24] позволило настолько снизить массу и габариты системы, что она по этим параметрам приблизилась вплотную к ИК системам автомобиля.

Проведённые многочисленные лабораторные и экспериментальные исследования показали, что АРЛС 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. Данная АРЛС предоставляет водителю возможность четко наблюдать на РЛИ границы автодороги, двигающиеся и стоящие автомобили (как встречные, так и попутные), иные предметы и препятствия на ней.



Рисунок 1.1 Макет АРЛС Ка диапазона

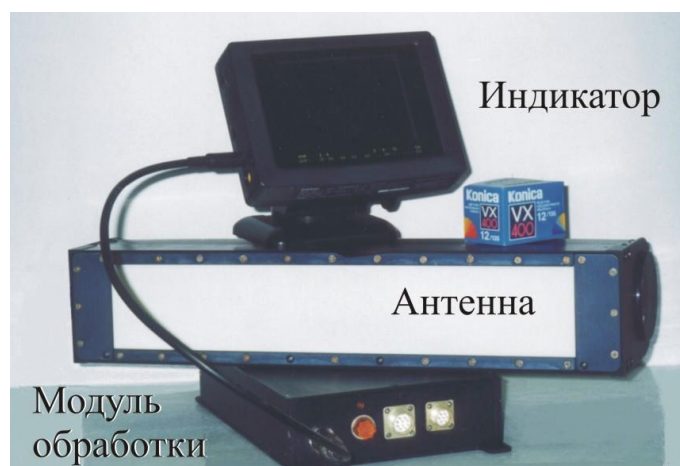


Рисунок 1.2 Макет АРЛС W диапазона

Основные характеристики макетов АРЛС приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Основные характеристики АРЛС

Дальность действия, м	5 - 250
Разрешение по дальности, м	< 1
Разрешение по азимуту, градус	1
Рабочая частота, ГГц	39 или 76
Мощность излучения, мВт	30 - 60
Антенна:	волноводно-щелевая (39 ГГц) или голографическая (76 ГГц)
Сектор сканирования антенны в азимутальной плоскости, градус	90 ⁰ (39 ГГц) 30 ⁰ (76 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

Цифровая обработка сигналов в АРЛС позволяет не только сформировать радиолокационное изображение, но и измерить ширину дорожного полотна, расстояние до левой и правой обочины, провести виртуальную разметку полос движения и сформировать оценки дальности для препятствий, находящихся в «полосе» движения собственного автомобиля (транспортного средства).

На рисунке 1.3 представлен пример детального отображения дорожной ситуации, полученный при помощи макета АРЛС.

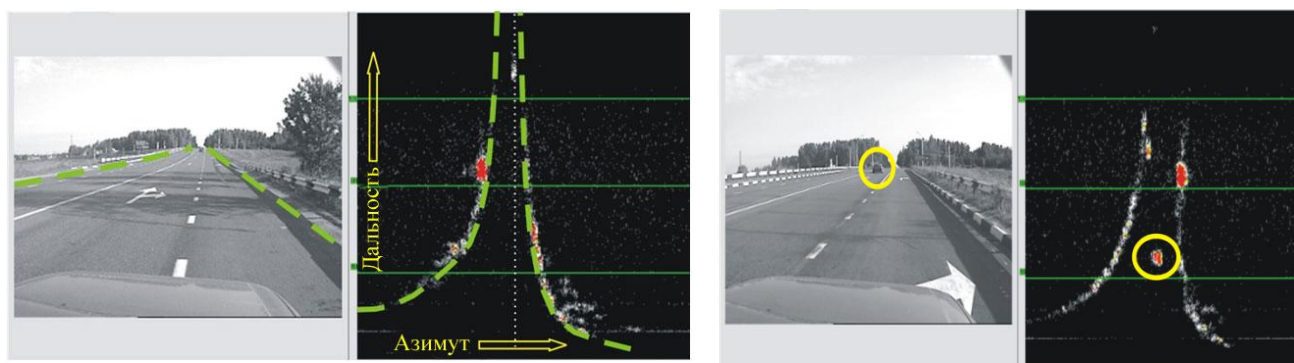


Рисунок 1.3. Изображение дорожной ситуации, полученное при помощи видеокамеры (слева) и АРЛС (справа)

Цветом выделены граница дороги и автомобиль на оптическом и радиолокационном изображениях.

Все созданные экспериментальные образцы АРЛС являются экологически безопасными, поскольку излучаемая мощность системы в несколько раз меньше мощности излучения мобильного телефона стандарта GSM.

Накопленный большой объем экспериментальных данных позволяет дополнить известные из литературы оценки характеристики рассеяния ЭМВ на объектах и подстилающих поверхностях.

Выводы к разделу 1

1. Проведённый анализ литературы показал, что ни один из представленных на рынке и проектируемых автомобильных радаров не позволяют получить высокоинформативное панорамное РЛИ с азимутальным разрешением 0,7-1 градус и

разрешением по дальности ~ 1 м, необходимые безопасного управления движением автомобиля в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости. Обширные работы по внедрению автомобильных радаров предупреждения столкновений доказывают, что такие радары нужны, их незаменимость осознана разработчиками. Однако массового распространения они не получают поскольку создателям автомобильных радаров до сих пор не удавалось обеспечить панорамный высокодетальный обзор за разумную цену.

2. Установлено, что применение панорамного радиолокатора со сканированием в азимутальной плоскости и с узким антенным лучом (АРЛС) решает проблему обеспечения безопасности и управления движением ТС в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

3. Сформулированные специфические требования и особенности, отличающие АРЛС от РЛС других классов, не позволяют использовать существующие локационные датчики. Установлено, что полноценная АРЛС на рынке не представлена до сих пор, что доказывает актуальность и практическую значимость исследований, проводимых в диссертации.

4. Проведенные многочисленные лабораторные и экспериментальные исследования макетов АСРВ, созданных в МАИ, позволили накопить большой объем экспериментальных данных, на основе которых необходимо создать модель характерной фоноцелевой обстановки (ФЦО), позволяющий сформировать исходные данные для расчета основных параметров АРЛС.

5. Для создания полноценной АРЛС необходима методика, позволяющая спроектировать АРСЛ с учетом рассмотренных специфических требований, в том числе разработать и программно-алгоритмическое обеспечение. В частности необходимо программно реализовать и практически апробировать алгоритмы обработки РЛИ в АРЛС для решения задач обеспечения безопасности движения ТС.

2 Разработка модели фоноцелевой обстановки

В предыдущей главе были сформулированы требования к АРЛС, как панорамному радиолокатору со сканированием в азимутальной плоскости, способному предоставить информацию о дорожной ситуации и обнаружить препятствие в пределах коридора безопасности, границы дорожного полотна.

В характерных дорожных ситуациях наблюдаются не столько рассеяние от однородных поверхностей, сколько рассеяние на переходах от одного типа поверхности к другому, например, при переходах от дороги к ограждениям, объектам дорожной инфраструктуры, обочине, и т.д. При разработке модели ФЦО при настильных углах визирования необходимо учитывать переотражения от «гладких» поверхностей, таких, как асфальтовое покрытие.

2.1 Влияние переотражений от поверхности дороги на яркостное изображение формируемое АРЛС

Автомобили, участвующие в дорожном движении будут находиться над асфальтовым покрытием, которое для волн ММ диапазона в некотором приближении может считаться «зеркально отражающим». В этом случае возможно многолучевое распространение зондирующего и отраженного от «цели» сигнала, что приведёт к синфазному суммированию сигналов пришедших разными путями. Синфазное суммирование сигналов происходит в раскрыве апертуры антенны и может привести к существенному изменению амплитуды принятых сигналов. Подобная ситуация была рассмотрена в работе [28], где показано что в этом случае интенсивность сигнала может меняться в пределах 12 дБ.

Будем считать, что наблюдается точечная цель, расположенная на заданной высоте $H_{ц}$ над поверхностью. Геометрия задачи приведена на рисунке 2.1. В этом случае при многолучевом распространении сигналов происходит их синфазное суммирование на входе приемной антенны, приводя к изменению амплитуды отраженного сигнала.

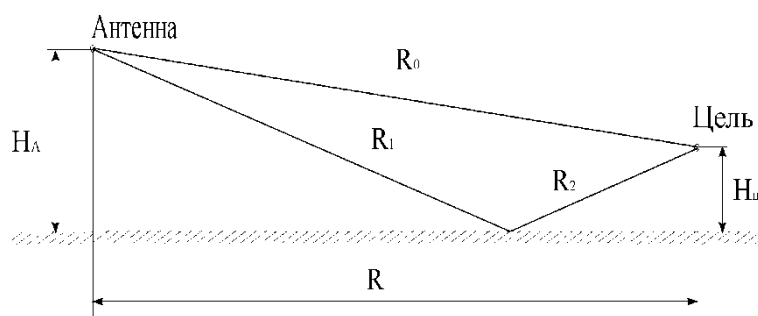


Рисунок 2.1. Многолучевое распространение сигналов

При этом эффективное или реально измеренное значение $S_{\text{ЭФ}}$ будет связано с значением $S_{\text{ЭФ}_\text{св}}$ в свободном пространстве в соответствии с соотношением [1]:

$$S_{\text{ЭФ}} = S_{\text{ЭФ}_\text{св}} \left[\exp(2ikR_0) + 2K_f \cdot \exp(ik(R_0 + R_1 + R_2)) + K_f^2 \cdot \exp(2ik(R_1 + R_2)) \right]^2 \quad (2.1)$$

где $S_{\text{ЭФ}_\text{св}}$ – эффективная площадь автомобиля (цели) в свободном пространстве;

k – волновой коэффициент $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda} \right)$;

R_0 – расстояние от приемной (передающей) антенны до цели;

R_1 – расстояние от приемной антенны до точки переотражения на поверхности земли;

R_2 – расстояние от точки переотражения до цели;

H_A – высота подвеса антенны;

$H_Ц$ – высота расположения фазового центра цели;

K_f – коэффициент отражения Френеля.

В ММ диапазоне волн поверхность асфальта можно считать практически идеально отражающей (при настильных углах облучения), что позволяет полагать $K_f = -1$. Тогда соотношение (2.1) преобразуется к виду:

$$S_{\text{ЭФ}} = S_{\text{ЭФ}_\text{св}} \cdot 16 \sin^4 \left(\frac{\pi(R_1 + R_2 + R_0)}{\lambda} \right), \quad (2.2)$$

где λ – длина волны АРЛС.

Последнее выражение удобно представить как функцию высоты подвеса антенны (H_A), цели ($H_Ц$) и дальности R , тогда при условии того что дальность R

существенно больше высоты подвеса антенны и цели ($R \gg H_A$ и $R \gg H_C$), справедливы следующие приближения:

$$R_0 = \sqrt{R^2 + (H_A - H_C)^2} \cong R + \frac{(H_A - H_C)^2}{2R};$$

$$R_1 + R_2 = \sqrt{R^2 + (H_A + H_C)^2} \cong R + \frac{(H_A + H_C)^2}{2R} \quad (2.3)$$

После подстановки приближительных значений R_0 и $R_1 + R_2$ в (2.2) получим искомое соотношение:

$$S_{\text{ЭФ}} = S_{\text{ЭФ}_{\text{СВ}}} \cdot 16 \sin^4 \left(\frac{2\pi H_A H_C}{\lambda R} \right) \quad (2.4)$$

Возрастание $S_{\text{ЭФ(авт)}}$ в 16 раз будет иметь место при условии равенства аргумента синуса - $\frac{\pi}{2}$;

$$2\pi \frac{H_A H_C}{\lambda \cdot R} = \frac{\pi (2n-1)}{2}; \quad \text{где } n=1,2,3 \text{ и т.д.} \quad \text{или } R = \frac{4H_A H_C}{\lambda} \quad (2.5)$$

На рис.2.2 приведен график зависимости $S_{\text{ЭФ}}/S_{\text{ЭФ}_{\text{СВ}}}$ от дальности до цели, расположенной над поверхностью на высоте $H_A=1$ м. Представленная зависимость имеет осциллирующий вид и характеризует изменение интенсивности принятого сигнала в зависимости от дальности до цели.

Анализ полученных соотношений показывает, что при лоцировании объектов и в частности автомобилей, расположенных на асфальтовой поверхности, возможно существенное (в 16 раз) возрастание интенсивностей отраженных сигналов, что приводит к необходимости расширять динамический диапазон приемных устройств АРЛС [28].

Данный анализ был выполнен при условии плоской, зеркальной отражающей поверхности. На самом деле в месте отражения луча от поверхности Земли всегда существуют неровности, которые вносят некоторый случайный наклон отражающей области, что приводит к изменению путей распространения переотраженных поверхностью сигналов.

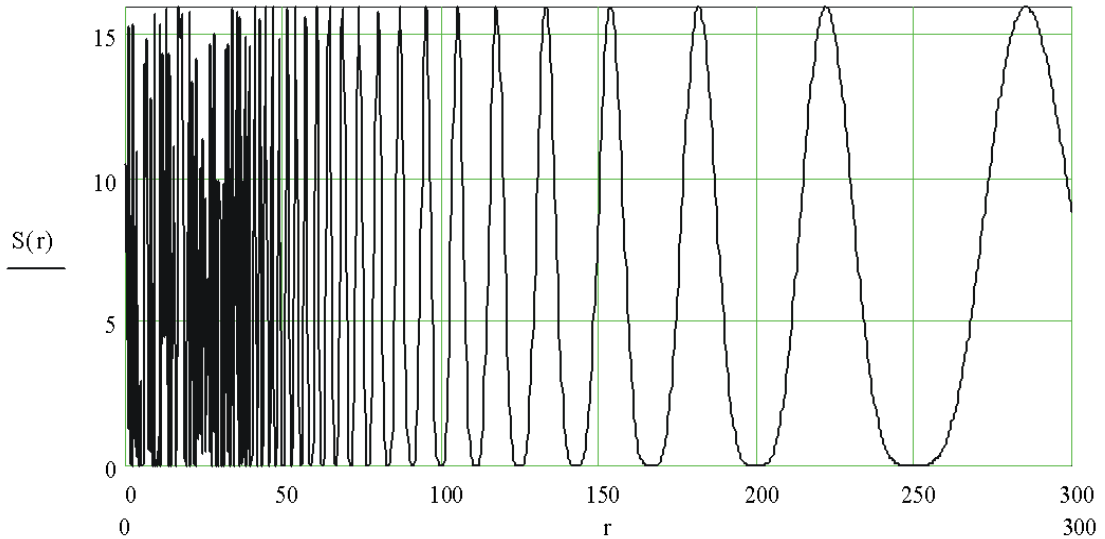


Рисунок 2.2. Зависимость $S_{ЭФ}/S_{ЭФ_СВ}$ от дальности до цели, расположенной над поверхностью на высоте $H_A=1$ м

На рисунке 2.3 представлены геометрические соотношения для описанных выше условий, т.е. появления случайного наклона поверхности γ , возникающего в области существенной для формирования переотраженного сигнала.

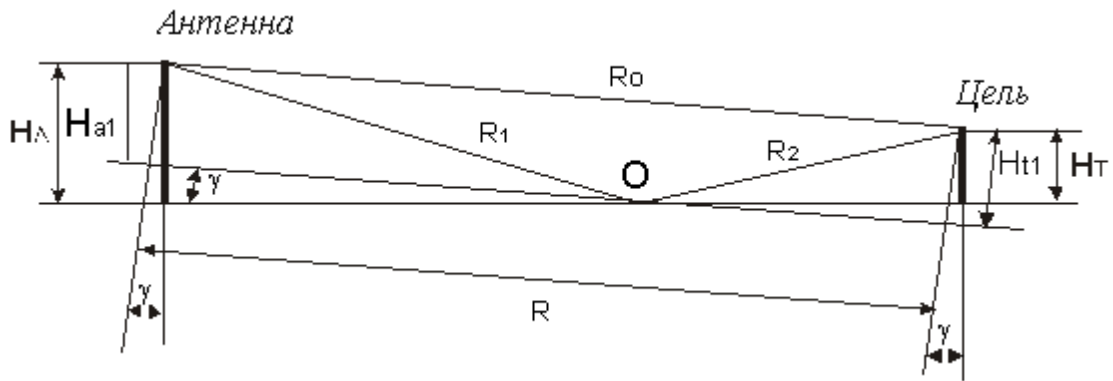


Рисунок 2.3. Геометрические соотношения расположений фазового центра антенны и объекта.

Случайный наклон поверхности на угол γ в месте переотражения из-за неровности земной поверхности приводит к изменению углов падения и отражения, что можно представить в виде изменения высоты подвеса цели и антенны. Наличие положительного угла γ приводит к увеличению высоты подвеса антенны и уменьшению высоты цели (при отрицательном наоборот).

$$H_{t1} = H_t - \Delta H, \quad H_{a1} = H_a + \Delta H, \quad \Delta H = \lambda \frac{R_0}{2} \quad (2.6)$$

Учитывая соотношения (2.6) найдем зависимость величины $S_{\text{ЭФ}}$ от случайного угла наклона отражающей поверхности:

$$S_{\text{ЭФ}} = S_{\text{эф.св}} \cdot 16 \sin^4 \left(2\pi \frac{(H_A + \Delta H_{a1})(H_{\text{ц}} - \Delta H_{t1})}{\lambda R} \right) = S_{\text{эф.св}} \cdot 16 \sin^4 \left(2\pi \frac{(H_A + \lambda R/2)(H_{\text{ц}} - \lambda R/2)}{\lambda R} \right) \quad (2.7)$$

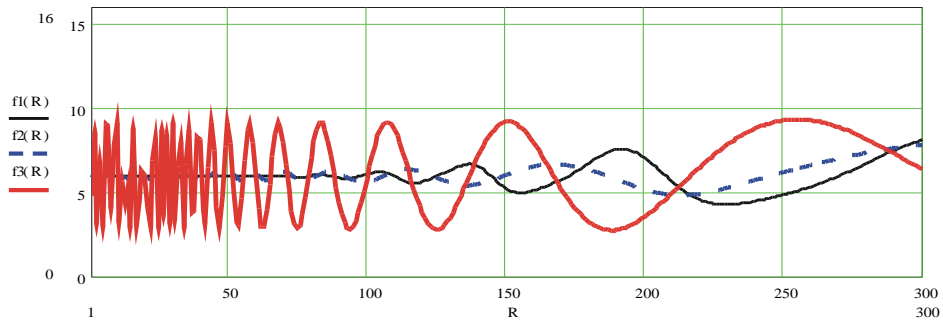
Будем считать, что угол наклона поверхности отражения γ носит случайный характер и характеризуется нормальным законом распределения $W(\gamma)$, тогда среднее значение ЭПР будет определяться следующим соотношением:

$$\langle S \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} W(\gamma) S_{\text{ЭФ}}(\gamma) = \int_{-\gamma_s}^{\gamma_s} \frac{e^{-\gamma^2}}{\sqrt{2\pi}\gamma_s} S_{\text{эф.св}} \cdot 16 \sin^4 \left(2\pi \frac{(H_A + \lambda R/2)(H_{\text{ц}} - \lambda R/2)}{\lambda R} \right) \quad (2.8)$$

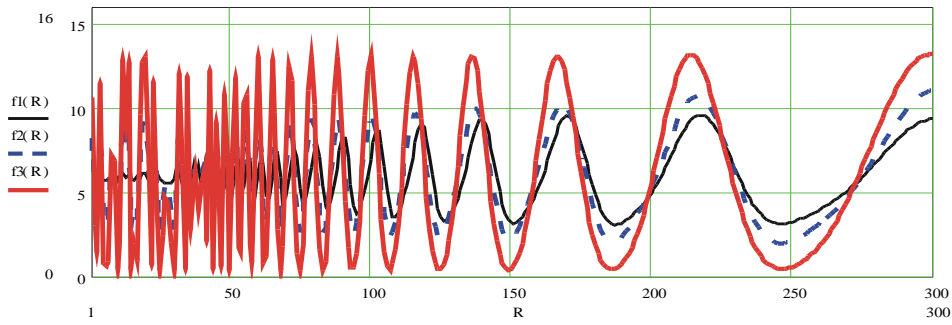
Графики зависимости $\langle S \rangle$ от дальности до цели при различных значениях дисперсии угла наклона γ_s представлены на рисунке 2.4 для трех значений: 0.2^0 (кривая f1), 0.1^0 (кривая f2), 0.05^0 (кривая f3). Высота подвеса антенны фиксируется на значении 1,5 м, характерном для АРЛС. Высоту подвеса цели изменяем от 0.5м до 2.5м через 0.5м.

Анализ представленных графиков показывает, что при высоте цели порядка 0,5м, наблюдается эффективное усреднение флуктуаций интенсивностей в рабочем диапазоне дальностей (10÷300м). Средняя ЭПР в этом случае увеличивается в 6 раз по сравнению с ЭПР в свободном пространстве.

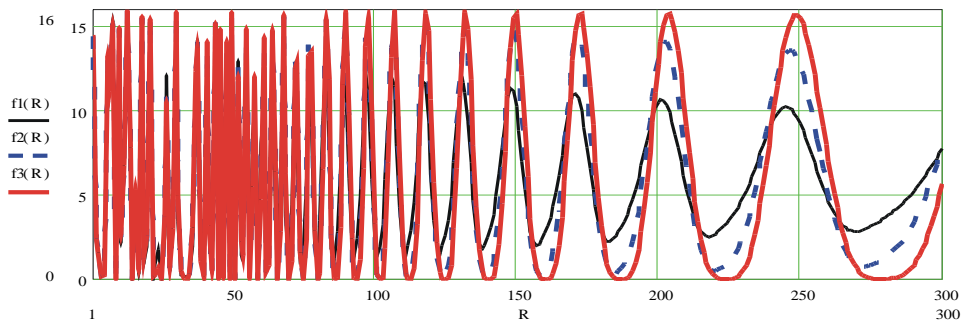
$$H_{II}=0.5M.$$



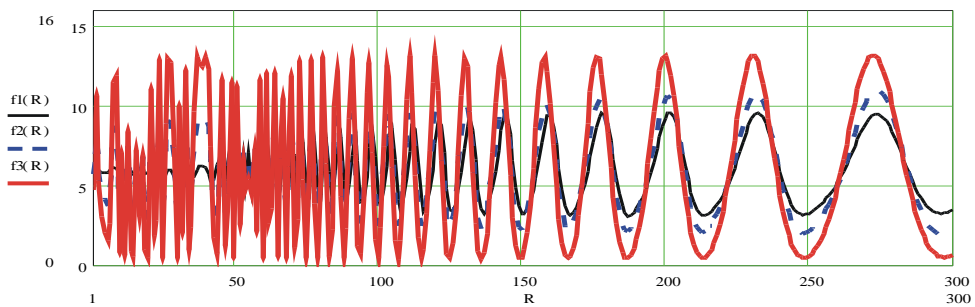
$$H_{II}=1M$$



$$H_{II}=1.5M$$



$$H_{II}=2M$$



$$H_{II}=2.5M$$

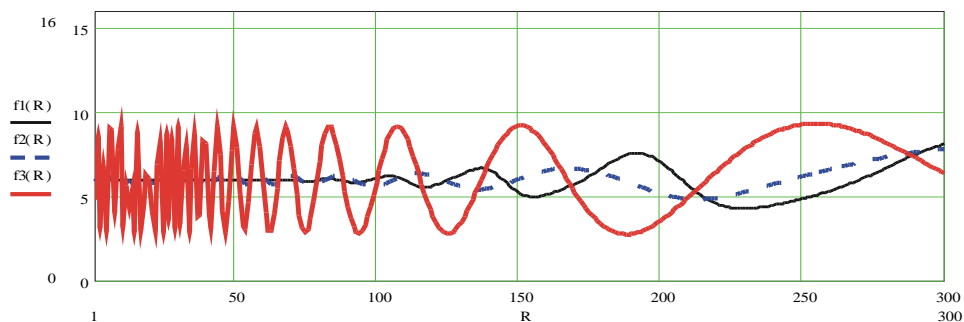


Рисунок 2.4. Зависимости $\langle S \rangle$ от дальности до цели при различных значениях дисперсии угла наклона γ_s , при фиксированных значениях высоты подвеса антенны и цели

Экспериментальные измерения ЭПР автомобилей (раздел 2.2), расположенных на асфальтовом покрытии подтвердили эффект возрастания ЭПР. При этом отражения от автомобиля устойчиво наблюдались на всех дальностях, и практически отсутствовали ситуации с пропаданием отраженных сигналов при взаимном перемещении цели и локатора. Это подтверждает наличие эффекта усреднения отражений при движении объектов локации и самого локатора.

Так же можно сделать вывод о том, что отражения от автомобилей в основном формируются элементами, расположенными на небольшой высоте над поверхностью Земли.

2.2 Анализ характеристик рассеяния ЭМВ на подстилающих поверхностях применительно к условиям визирования в АРЛС

Проведенный анализ литературы (раздел 1) показал, что характеристики рассеяния ЭМВ на подстилающих поверхностях (для дорожной обстановки) и переходов от одного типа поверхности к другому при настильных углах визирования $\leq 10^0$ изучены недостаточно.

Для решения задач проектирования АРЛС и формирования требований к аппаратно-программному комплексу АРЛС необходимо иметь недостающие сведения о характеристиках рассеяния ЭМВ от объектов дорожной инфраструктуры при настильных углах визирования. С этой целью в течении ряда лет с помощью макетов АРЛС были проведены натурные исследования характеристик рассеяния в выбранном частотном диапазоне и в типовых дорожных ситуациях. В результа-

те проведенный в диссертации статистический анализ экспериментальных данных, накопленных при проведении натурных испытаний макета АРЛС, позволил получить недостающие сведения о характеристиках рассеяния ЭМВ.

Методика эксперимента

Для создания аналитической модели рассеяния ЭМВ типовыми объектами искусственного происхождения была разработана методика и программа экспериментальных измерений величины ЭПР характерных для АРЛС целей: дорожные знаки, табло, дорожные ограждения, различные типы автомобилей. Суть этой методики заключается в следующем.

В соответствии с известной формулой радиолокации мощность сигнала, отраженного точечной целью, определяется соотношением:

$$P_{прм} = \frac{P_{прд} G_A^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} S_{эф} , \quad (2.9)$$

которое справедливо при условии, что отражающий объект имеет реальные геометрические размеры меньше, чем разрешающая способность радиолокатора. На дальностях $R > 15$ м для уголкового отражателя это условие справедливо.

В выражении (2.9) обозначено: $P_{прм}$ - мощность принятого сигнала; $P_{прд}$ - мощность излученного сигнала; G_A - КНД (коэффициент направленного действия) антенны; λ - длина волны несущего колебания; R - дальность до отражающего объекта; $S_{эф}$ - оцениваемый параметр, эффективная площадь отражения (рассеяния) - ЭПР.

Таким образом, из выражения (2.9) следует, что для оценки величины $S_{эф}$ необходимо измерить мощность принятого сигнала и определить коэффициент передачи АРЛС, как измерительной системы:

$$K_0(R) = \frac{P_{прд} G_A^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} K_{пр}(R)$$

Данный коэффициент $K_0(R)$ зависит от дальности и, следовательно, эту зависимость необходимо учитывать при проведении измерений ЭПР объектов расположенных на различных дальностях.

Необходимо отметить, что в приемнике АРЛС реализована частичная компенсация падения интенсивности принятых сигналов, обусловленная множителем (R^{-4}) , позволяющая существенно снизить динамический диапазон принятых сигналов, подлежащих измерению. Анализ результатов калибровки АРЛС для калибровочного уголкового отражателя показал, что коэффициент передачи измерительной системы может быть аппроксимирован следующей степенной функцией:

$$K_0(R) = 10^4 \cdot (R)^{-1.7}, \quad (2.10)$$

при этом значения R , в аппроксимирующей функции подставляются в метрах.

Тогда, для оценки величины ЭПР - $S_{эф}$ реальных объектов может быть использована следующая связь измеренных интенсивностей $I_{изм}^*(R)$:

$$S_{эф} = \frac{I_{изм}^*(R)}{K_0(R)} = I_{изм}^*(R) \cdot 10^{-4} \cdot (R)^{1.7}, \quad (2.11)$$

где: $I_{изм}^*(R)$ - измеренная интенсивность сигнала, отраженного исследуемым объектом, который расположен на дальности R .

Таким образом, выражение (2.11) устанавливает взаимосвязь между оценкой измеренной интенсивности локационного изображения цели - $I_{изм}^*$, значением $S_{эф}$ и дальностью R .

Результаты натуральных экспериментов

В соответствии с разработанной методикой и программой натуральных испытаний была проведена серия экспериментов с макетом АРЛС. На этапе стендовой калибровки макета была проведена калибровка системы АРЛС по дальности. Была проведена проверка линейности частотной модуляции зондирующего сигнала, потребовавшая дополнительной коррекции модуляционной характеристики. Для согласования уровней сигнала на выходе приёмника и входе блока цифровой обработки сигнала (ЦОС) максимальное значение сигнала был выбрано на уровне 0,6 В.

Анализ зависимости интенсивности шумов от частоты в приемном тракте показал, что средняя интенсивность шума во всём диапазоне частот сигнала бие-

ний до 2,4 МГц (а следовательно и дальностей) меньше 1 отсчёта младшего разряда (не превосходит шумов квантования АЦП).

Если принять во внимание данный факт, то можно построить график потенциальной радиометрической чувствительности АРЛС, которая является функцией обратной коэффициенту передачи приемного тракта:

$$S_{\min} = \frac{1}{K_0(R)} = 10^{-4} * R^{1.7} \quad (2.12)$$

В таблице 2.1 и на рис.2.5 приведены рассчитанные по выражению (2.12) значения радиометрической чувствительности АРЛС.

Таблица 2.1. Значения радиометрической чувствительности АРЛС

R [М]	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
S_{\min} [М ²]	0.016	0.03	0.05	0.07	0.1	0.13	0.17	0.2	0.25	0.29	0.34	0.39

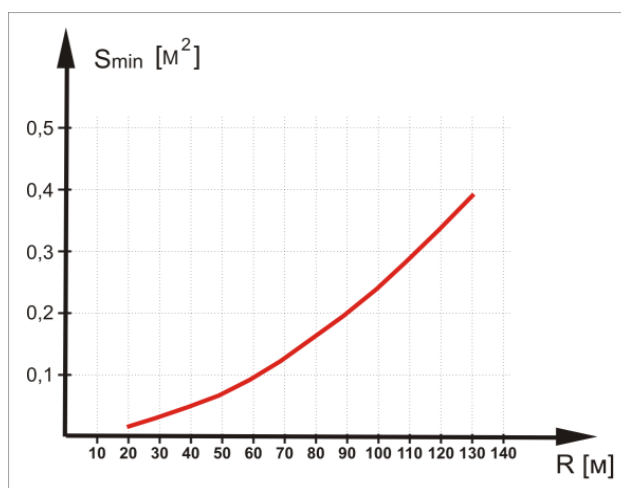


Рисунок 2.5. Значение радиометрической чувствительности АРЛС

Анализ зависимости радиометрической чувствительности показывает, что с ростом дальности чувствительность АРЛС уменьшается от 0,02 м² до 0,4 м², приблизительно в 20 раз, а динамический диапазон приемного тракта АРЛС определяется динамическим диапазоном десятиразрядного АЦП и имеет величину порядка 50 дБ.

При проведении испытаний АРЛС в качестве объектов локации были выбраны три типа загородных магистральных трасс, характерных для европейской части России:

- Четырёхполосная скоростная магистраль с разделительной полосой шириной до 10м;
- Двухполосная магистраль с двухсторонним движением;
- Однополосная асфальтированная дорога местного значения.

Как показали теоретические и предварительные экспериментальные исследования [20,29,32], интенсивность радиолокационных сигналов, отражённых от ОИП (автомобилей, ограждений, дорожных знаков и т.д.) имеет на 3-4 порядка большую величину, чем отражения от естественных протяжённых объектов локации: обочины и прилегающей местности.

При достаточной интенсивности отражений от обочины и прилегающей к магистрали местности, можно получить информацию о параметрах дорожного полотна, его ширине, наличии поворотов и пересечений с другими магистралями, а также о положении ТС на полотне дороги.

Необходимо отметить, что характеристики отражения ЭМВ относительно обочины дороги и прилегающей местности, при незначительных высотах подъёма АРЛС относительно дороги (порядка 1,5 м) и настильных углах визирования в настоящее время изучены слабо. Поэтому основное внимание в данном разделе уделено проблеме «радиовидимости» дорожного полотна и оценке ЭПР обочины и прилегающей местности: лесных и кустарниковых массивов, а также различных типов ограждений.

Процедура измерения ЭПР состояла в следующем.

Для уменьшения флюктуаций оцениваемых интенсивностей и, соответственно, ЭПР, используется операция временного (покадрового) усреднения, которая весьма эффективна для стационарных и относительно таких однородных объектов локации, как обочина, однородный лесной массив.

При проведении измерений в качестве типового режима использовалось равновесное усреднение сформированного РЛИ по 20 кадрам.

Далее с помощью программы измерения интенсивности отражений, указывались необходимые координаты (азимут и дальность) исследуемого объекта.

Меняя положение измерительного маркера на РЛИ, измеряются значения интенсивностей отраженного сигнала, соответствующие исследуемому объекту.

На рис.2.6 приведён пример радиолокационного и оптического изображений однополосной асфальтовой дороги местного значения. Обочина дороги покрыта сухой травой с отдельно стоящими деревьями. На РЛИ хорошо видны отражения от обочины.

Результаты измерения отражений от обочины, полученные при обработке РЛИ, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 ЭПР обочины дороги местного значения

R [м]	30	60
$S_{эф}$ [м ²]	0,6	1,1



Рисунок 2.6. Радиолокационное и оптическое изображение однополосной асфальтовой дороги

Результаты измерения ЭПР обочины для четырёхполосной магистрали (рис.2.7) дают следующие значения (таблица 2.3):

Таблица 2.3 ЭПР обочины для двухполосной магистрали.

R [м]	30	60
$S_{эф}$ [м ²]	0,1	0,3

Радиолокационное и оптическое изображения, соответствующие этому случаю приводятся на рис.2.7. Внешний край обочины четырехполосного шоссе покрыт песком и пылью, которые формируют отражения.

Результаты измерения ЭПР леса для сцены, представленной на рис.2.7, сведены в таблицу 2.4, анализ которой показывает, что ЭПР незначительно возрастает с увеличением дальности.

Таблица 2.4. ЭПР леса

R [м]	24	30	48	64	72	96	108	120	132
$S_{эф}$ [м ²]	4,4	2,4	5	11	7,1	13	26	24	52

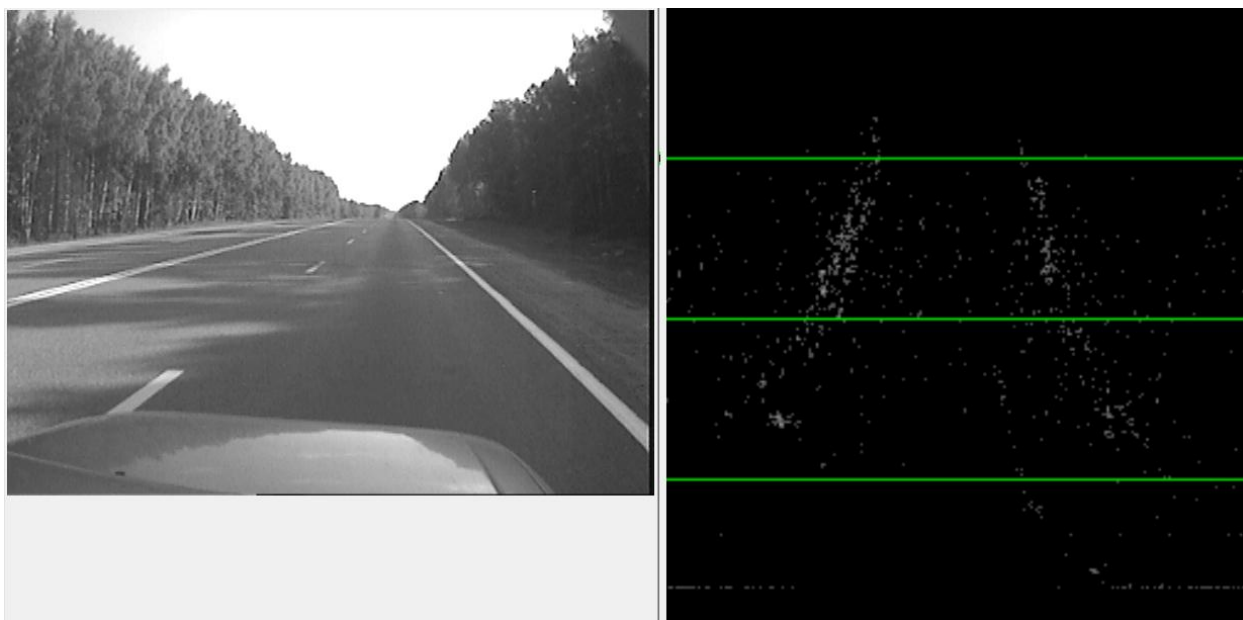


Рисунок 2.7. Радиолокационное и оптическое изображение четырёхполосной магистрали

На рис.2.8 представлено совместное изображение четырёхполосной магистрали, проходящей через лесной массив, с фрагментами металлических ограждений.

Статистическая обработка полученных РЛИ позволила оценить значения ЭПР металлических ограждений. Результаты измерения ЭПР ограждений представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 ЭПР металлического ограждения

R [м]	20	40	60	80	100	120
$S_{эф}$ [м ²]	7	10	70	102	75	68

Величина ЭПР зависит от дальности. Так, для дальности $R = 80$ м, ЭПР ограждений максимальна и достигает величины порядка 100 м^2 , на дальностях 20 - 40 м ЭПР ограждений уменьшается на порядок, что обусловлено уменьшением интерференционного эффекта.

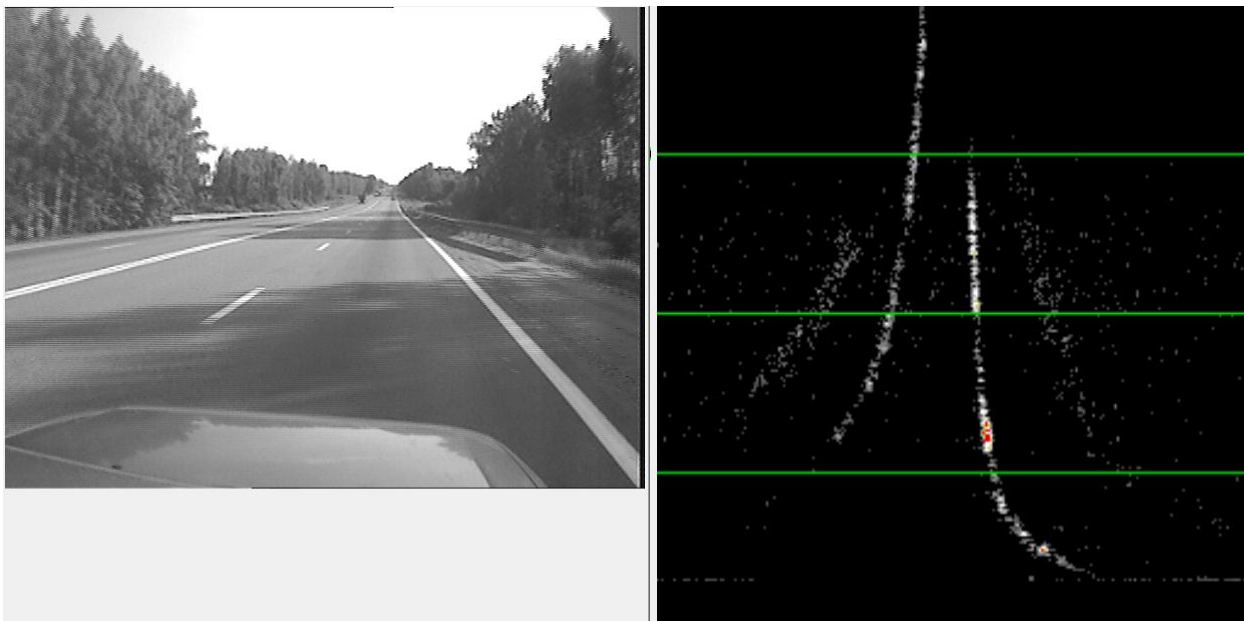


Рисунок 2.8. Радиолокационное и оптическое изображение металлического ограждения.

Совместное радиолокационное и оптическое изображение магистрали, проходящей через населённый пункт, приведено на рис.2.9.

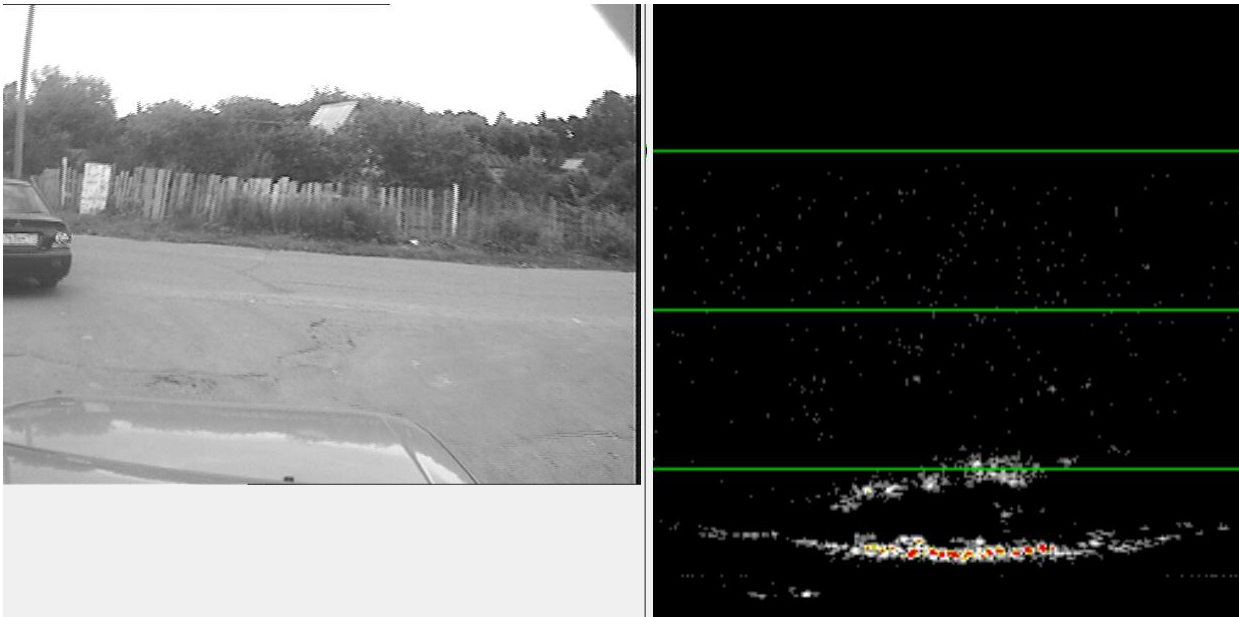


Рисунок 2.9. Радиолокационное и оптическое изображение магистрали, проходящей через населённый пункт

Анализ этих РЛИ показывает, что отражения от ограждений, в виде деревянного забора с каменными столбами, расположенного рядом с дорожным полотном, имеют достаточно высокую интенсивность и отчётливо наблюдаются во всём диапазоне рабочих дальностей РЛС. Измеренная ЭПР имеет величину порядка $20 - 40 \text{ м}^2$.

На рисунке 2.10 представлено совместное радиолокационное и оптическое изображение человека, находящегося на асфальтовом покрытии.

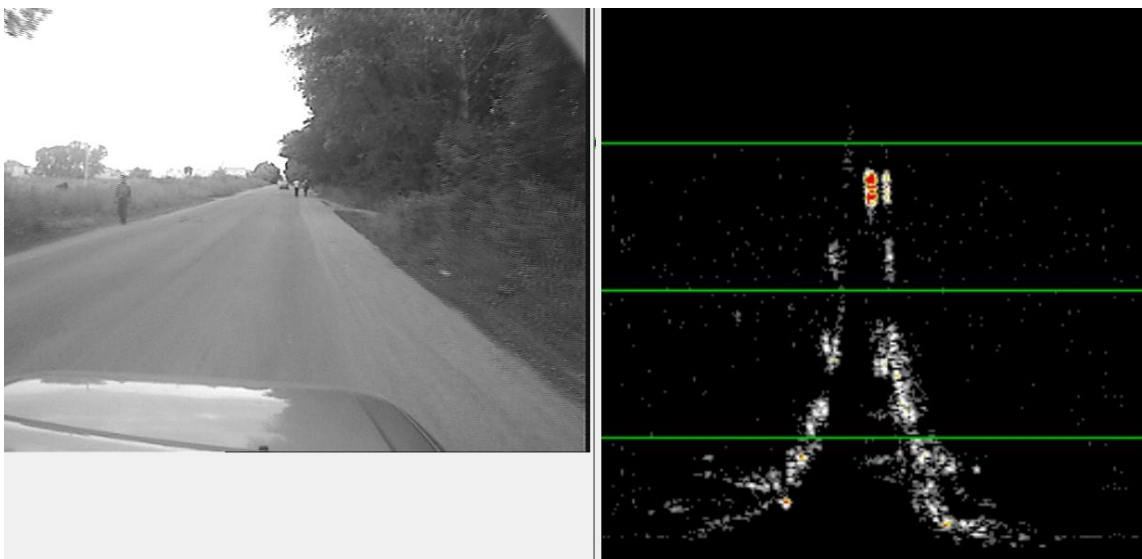


Рисунок 2.10. Совместное радиолокационное и оптическое изображение человека

Результаты измерения ЭПР человека, не очищенные от влияния интерференционного множителя, представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. ЭПР человека

R [м]	50	60	70	90
$S_{эф}$ [м ²]	7	5	13	3

Таким образом, путём статистического анализа результатов экспериментальных исследований по рассеянию ЭМВ ММ диапазона на подстилающих поверхностях, различных типах ТС и объектах дорожной инфраструктуры получены оценки величин их ЭПР, на базе которых можно построить модель ФЦО.

2.3 Сравнение контрастности РЛИ, полученных в Х и Ка диапазонах

Одним из важнейших вопросов создания АРЛС является правильный выбор частотного диапазона. Очевидно, что изменение диапазона приведет к изменению и параметров формируемого РЛИ.

Теоретически очевиден рост значений ЭПР уголкового отражателя пропорционально квадрату роста несущей частоты. Однако, для различных типов подстилающей поверхности (например, травы, пашни), и ряда точечных объектов, например человека, эта закономерность не является очевидной. Поэтому в процессе исследований требуется уточнить их отражающие свойства с целью обоснованного выбора динамического диапазона ПРМ РЛС, и в конечном итоге разумно ограничить стоимость конечного изделия. С этой целью был создан мобильный испытательный стенд для экспериментальных испытаний РЛС Х и К-диапазонов. Основное внимание в разделе уделено сравнению реальных РЛИ, полученных в Х и К-диапазонах в ходе натурных испытаний.

Характеристики экспериментальных макетов РЛС

Созданные научным коллективом кафедры 407 МАИ экспериментальные макеты РЛС Х и К диапазонов объединены в испытательный комплекс в виде двух автономных, измерительно-информационных систем (рисунок 2.11), в кото-

рых совмещение и привязка радиолокационных изображений осуществляется на конечном этапе вывода изображений на экран общего цифрового монитора.



Рисунок 2.11. Внешний вид мобильного испытательного комплекса
Характеристики экспериментальных макетов РЛС приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Характеристики экспериментальных макетов РЛС

Диапазон	Х	К
Ширина ДНА в азимутальной плоскости	1°	1°
Ширина ДНА в угломестной плоскости	8°	20°
КНД	35 дБ	28 дБ
Зондирующие сигналы	СКИ	ЛЧМ
Частота повторения	10 кГц	8 кГц
Полоса ЗС	100 МГц	150 МГц
Тип ПРМ	супергетер- одинный	гомодинный
Чувствительность ПРМ	110 дБ/Вт	90 дБ/Вт
Динамический диапазон ПРМ	35 дБ	30 дБ
АЦП	8 разрядное	10 разрядное

Цифровые части обеих РЛС включают: скоростные 8-10 разрядные АЦП, системы синхронизации, обработки, регистрации и отображения первичной ра-

диолокационной информации, которые реализованы на платформе двух высокопроизводительных ЭВМ.

Результаты экспериментальных исследований

Наблюдалась общая для двух РЛС сцена, фазовые центры антенн были подняты на 3-3,5 м над поверхностью и разнесены по азимуту на 2,5 м.

Для проведения исследования контрастности РЛИ была выбрана сцена, содержащая различные типы подстилающей поверхности. В качестве реперных целей были использованы уголковые отражатели. Вид лоцируемой сцены и реперных целей приведены на рис. 2.12 и 2.13.

При проведении экспериментальных измерений необходимо учитывать эффекты, связанные с многолучевым распространением ЭМВ при возвышении лоцируемого объекта над подстилающей поверхностью. Для уменьшения влияния «многолучевости», реперный уголковый отражатель располагался непосредственно на поверхности пашни и по нему производилась калибровка РЛС. Полученные РЛИ приведены на рис. 2.14 и 2.15.



Рисунок 2.12. Вид лоцируемой сцены.



Рисунок 2.13. Вид реперных целей.

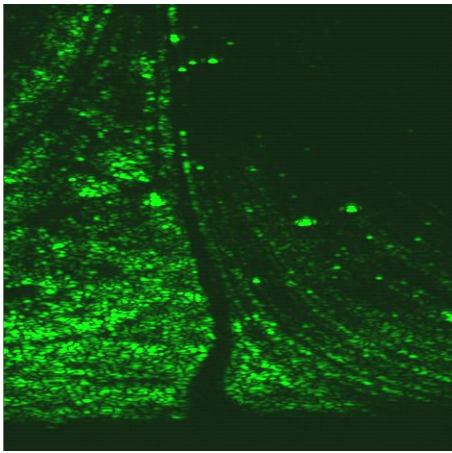


Рисунок 2.14. РЛИ полученное в X-диапазоне.

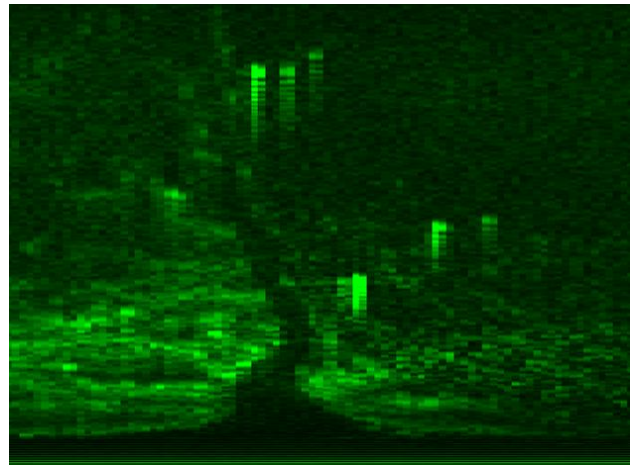


Рисунок 2.15. РЛИ полученное в Ka-диапазоне.

На рис.216 представлена интерференционная картина, полученная при движении человека по грунтовой дороге в направлении от РЛС. Синий цвет соответствует – К диапазону, красный – X диапазону.

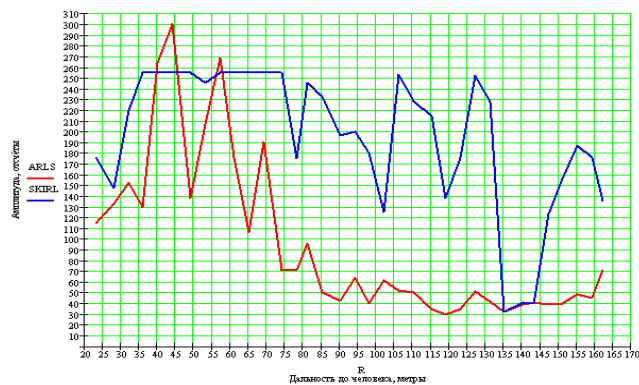


Рисунок 2.16. Интерференционная картина

Известный в оптике и радиофизике эффект Релея получил отражение в ходе эксперимента: из-за настильных углов визирования отражающими стали даже такие шероховатые поверхности как грунтовая дорога.

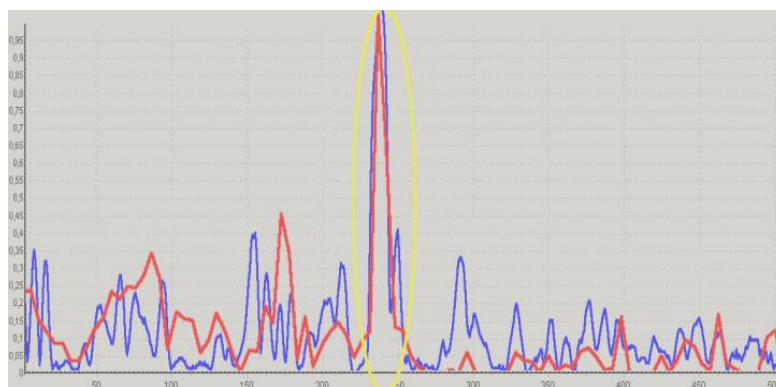


Рисунок 2.17. Азимутальное сечение РЛИ

Азимутальное сечение РЛИ приведено на рис. 2.17. Красным показана зависимость интенсивности отражения от азимута для К-диапазона, синим – для Х-диапазона. Для удобства сравнения контрастностей проведено нормирование (отражение от человека принято за 1). Дальность до человека $R=160\text{м}$, $\Delta R=1,5\text{м}$, $\Delta\Theta_{аз} = 1^\circ$. На сечении наглядно видно (выделено желтым цветом) не только преимущество Х-диапазона в контрастности, но и различный характер отражений от травяного покрова в различных диапазонах. В К-диапазоне трава отражает ЭМВ хуже, а пашня лучше.

Усреднённые значения интенсивностей в отсчётах АЦП (по множеству реализаций и азимуту) для различных целей сведены в таблицу 2.8.

Таблица 2.8. Средние интенсивности (в отсчётах) для различных целей.

	Реперный отражатель	Человек	Трава	Пашня
Х-диапазон	220	250	30	12,5
К-диапазон	490	130	50	40

Оценка величины удельной ЭПР (УЭПР) подстилающих поверхностей проводилась по следующим соотношениям:

$$\sigma_0 = \frac{\langle U_{отр.пов} \rangle^2}{\langle U_{р.о.} \rangle^2} \cdot \frac{S_{р.о.}(\lambda)}{R \cdot \Delta R \cdot \Delta\Theta_{аз}},$$

где $\langle U_{р.о.} \rangle$, $\langle U_{отр.пов} \rangle$ - средние интенсивности сигналов от реперного отражателя и объекта соответственно,

$R, \Delta R$ - дальность и разрешающая способность РЛС по дальности,
 $\Delta \Theta_{аз}$ - эффективная ширина ДНА по азимуту,
 $S_{p.o.}$ - ЭПР реперного уголкового отражателя (24 и 365 м² для X и K диапазонов соответственно).

Результаты расчётов УЭПР травяного покрова, пашни и грунтовой дороги представлены в таблице 2.9 и хорошо согласуются с известными результатами для X и K диапазонов [20].

Таблица 2.9. Удельные ЭПР естественных покровов

	X-диапазон	K-диапазон
Пашня	$\sigma_0 = 0,002$	$\sigma_0 = 0,0035$
Грунтовая дорога	$\sigma_0 = 0,0017$	$\sigma_0 = 0,003$
Травяной покров	$\sigma_0 = 0,0037$	$\sigma_0 = 0,08$

Таким образом, можно сделать вывод о преимуществах ММ диапазона в радио наблюдаемости естественных покровов (обочины). Кроме того очевидными преимуществами ММ диапазона является компактные размеры антенных систем АРЛС.

Выводы к разделу 2

1. Учитывая, что АРЛС ТС всегда находится над гладкой поверхностью дорожного полотна и работает при настильных углах визирования, установлено, что при наблюдении объектов на фоне подстилающей поверхности возникает многолучевое распространение отраженных ЭМВ.

2. Показано, что данный эффект приводит к существенным флюктуациям интенсивностей отраженного сигнала в требуемом диапазоне дальностей (10-300м). Так, величина средней ЭПР объекта в этом случае увеличивается в 6 раз по сравнению с величиной ЭПР этого объекта в свободном пространстве.

3. На основании обобщения известных данных и анализа экспериментальных результатов, полученных при помощи макета АРЛС, составлена модель

ФЦО, которая позволила оценить диапазон величин ЭПР объектов дорожной инфраструктуры (1..100 м²), УЭПР наблюдаемых подстилающих поверхностей и сформировать исходные данные для расчёта энергетических параметров АРЛС.

4. Для выбора частотного диапазона проведено сравнение характеристик рассеяния ЭМВ на подстилающих покровах и объектах дорожной инфраструктуры в X и Ka диапазонах. Показано, что преимущества в наблюдаемости имеет MM диапазон длин волн.

3 Разработка методики проектирования АРЛС

Сформулированные в главе 1 специфические особенности АРЛС позволяют ввести достаточно чёткие ограничения и показатели качества при проведении поиска структуры АРЛС и последующей параметрической оптимизации, как основных модулей, так и всей системы в целом.

3.1 Выбор и обоснование технических требований к АРЛС

Применение АРЛС возможно в широком диапазоне технических отраслей, начиная от карьерных самосвалов и заканчивая транспортными средствами на воздушной подушке [51,54]. Рассматриваемая методика проектирования АРЛС подходит для различных типов транспортных средств, однако, для примера, выбрана наиболее массовая сфера применения – автомобили.

При движении автомобиля в условиях отсутствия оптической видимости необходимо с помощью АРЛС обеспечить обнаружение препятствий в пределах своей полосы движения и отсутствие ложных срабатываний при обнаружении препятствий на обочине (припаркованных автомобилей и столбов) и на полосе соседнего (встречного) движения. Такая задача может быть выполнена при введении коридора безопасности (КБ) – области пространства вблизи автомобиля вдоль траектории его движения (рис. 3.1, 3.2)

При обнаружении препятствий в коридоре следует маневр или торможение.

Вокруг КБ располагается область «зоны риска» находящаяся в своей половине проезжей части. Вне зоны риска с одной стороны граница дороги (обочина, отбойник) с другой полоса встречного движения или разделитель. В этой зоне возможно нахождение объектов или боковых лепестков от них.

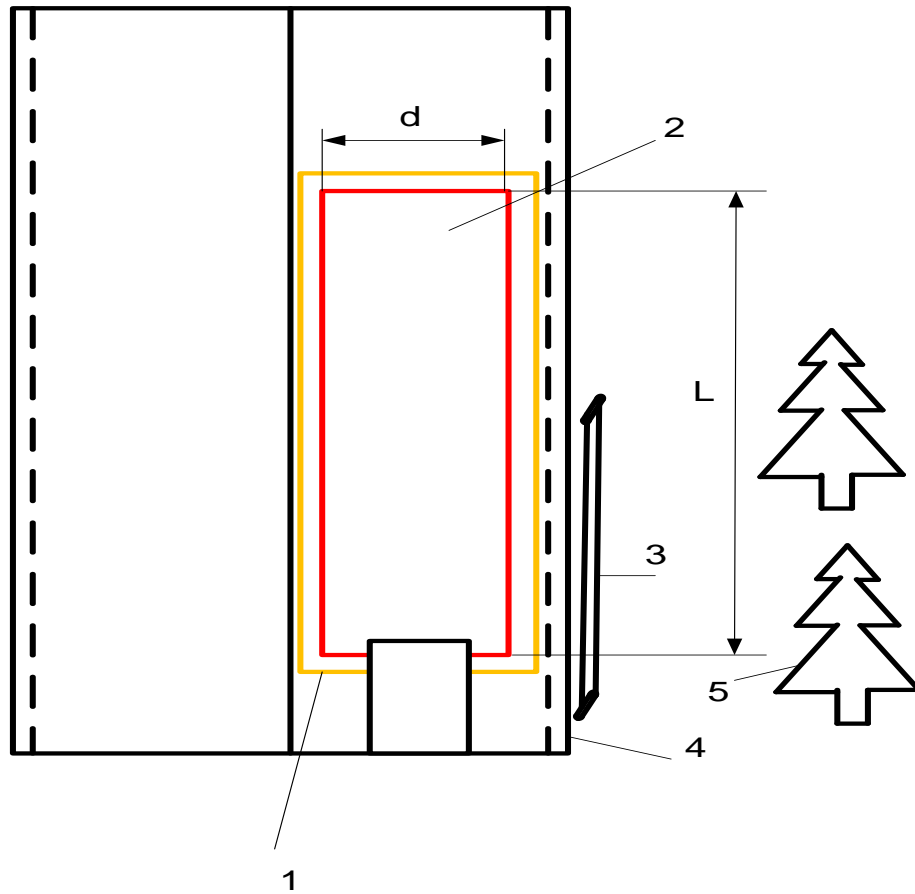


Рисунок 3.1 Схематическое изображение КБ и зоны риска



Рисунок 3.2 КБ и зона риска в условиях реальной дорожной обстановки.

На рисунках 3.1 и 3.2 изображено:

- [1] Зона риска расположена внутри проезжей части попутного направления, превышает КБ и ее ширина зависит от ширины дороги.
- [2] Граница КБ.
- [3] Металлическое ограждение
- [4] Граница дорожного полотна
- [5] Кромка леса

Ширина КБ определяется простым выражением:

$$d = L_{\text{авт}} + \delta_{\text{авт}},$$

где: $L_{\text{авт}}$ – ширина автомобиля, $\delta_{\text{авт}}$ – запас по расстоянию с учетом возможных погрешностей измерений, прямолинейности движения автомобиля и возможной подвижности препятствий.

Длина КБ определяется простым выражением:

$$L = L_{\text{тор}}(V) + V(T_{\text{обн}} + T_{\text{ср}}),$$

где: V - скорость движения автомобиля, $L_{\text{тор}}$ - тормозной путь, $T_{\text{обн}}$ - время обнаружения препятствия, $T_{\text{ср}}$ - время, необходимое на обработку сигнала об обнаружении препятствия системой управления автомобилем.

Исходя из оценок длины тормозного пути [41] и времени реакции водителя на препятствие 0.2 с, максимальная длина КБ составляет 80 – 100 м.

В условиях плотного городского движения количество ложных обнаружений препятствий будет велико. Следовательно, на первом этапе следует ввести некоторые ограничения на условия, при которых будет эксплуатироваться АРЛС:

- дорога прямая или слабо поворачивает (поднимается, опускается) и просматривается на всем протяжении рабочей области АРЛС;
- на дороге в данный момент отсутствует интенсивное движение (оптической видимости нет и управлять ТС без АРЛС затруднительно);
- дорога имеет ширину не менее двух полос движения ТС;
- у дороги есть обочина или ограждение, от которых может формироваться отражённый сигнал (хотя бы справа по ходу движения).

Сформулируем основные требования к АРЛС.

1. Ширина ДНА АРЛС в азимутальной плоскости должна позволять однозначно оценивать наличие/отсутствие препятствия в пределах КБ. Для этого необходимо, чтобы ширина ДНА в азимутальной плоскости обеспечивала на максимальной дальности элемент разрешения, который равен ширине КБ. В этом случае ширина ДНА должна быть менее 1° .

2. Ширина ДНА в угломестной плоскости должна позволить обеспечить наблюдение дорожного полотна при различных уклонах дороги. Таким образом, дорога должна постоянно находиться в пределах сектора обзора и при подъёмах и спусках не должна выпадать из зоны сканирования. Соответственно, исходя из характера рельефа местности, выбирается ширина ДНА в угломестной плоскости. Для средней полосы России уклон дорог [42] составляют около $\pm 10^{\circ}$. Для 10° – 15° , соответственно ширина ДНА в угломестной плоскости должна составлять 20° – 30° .

3. Сектор обзора (сканирования) ДНА по азимуту выбирается исходя из необходимости обнаружения обочины дороги (металлического ограждения) вблизи автомобиля. Например, если антенна располагается на крыше автомобиля (высота $\sim 1,5 - 2$ м) и ширина ДНА в угломестной плоскости составляет 20° , а высота металлического ограждения составляет 1 м, то минимальное расстояние, при котором возможно обнаружение ограждения, составляет 3 м. Поэтому, если автомобиль (фазовый центр антенны) находится на расстоянии 2 м от обочины, то азимутальный сектор обзора должен составлять $\sim 90^{\circ}$ градусов.

4. Инструментальная дальность АРЛС должна значительно превышать длину КБ и составлять величину: 150 – 300 м.

5. Разрешающая способность по дальности выбирается исходя из требуемой точности определения дальности, из требований классификации препятствий (например, требование наличия нескольких элементов разрешения для одного объекта, типа легкового автомобиля).

Таким образом, основной задачей АРЛС является получение панорамного РЛИ с детальным отображением дорожной ситуации, формирование КБ и обнаружение препятствий, находящихся в пределах КБ.

Рассмотрим типичную дорожную ситуацию при движении автомобиля вдоль дорожного ограждения (рис. 3.3). При расположении антенны на крыше автомобиля высота фазового центра $L_a = 1,5$ м [43]. Минимальное расстояние, при котором можно обнаружить границу дороги (имеющую высоту L_r), будет равно $L_{min} = \frac{L_a - H_r}{\sin(\frac{\alpha}{2})}$. Для ширины ДНА в угломестной плоскости $\alpha = 20^\circ$ (ориентированного параллельно плоскости строительных осей автомобиля) и высоты границы дороги (металлического ограждения) $H_r = 1$ м, минимальное расстояние обнаружения границы дороги будет составлять 2.9 м. Следовательно, размер «слепой» зоны АРЛС должен быть менее 2.9 м.



Рисунок 3.3. Взаиморасположение фазового центра антенны, автомобиля и границы дороги

При расположении фазового центра антенны на расстоянии 2 м от границы дорожного полотна, сектор обзора $\theta = 2 \times \arcsin\left(\frac{L_r}{L_{min}}\right)$ должен быть не менее 88° .

Учитывая скорости современных автомобилей скорость сканирования антенны АРЛС, как было показано в главе 1, должна составлять не менее 10-20 Гц.

Таким образом, технические требования к разрабатываемой АРЛС, учитывающие специфику применения (глава 1) и фоновую обстановку (глава 2), приведены в таблице 3.1

Таблица 3.1. Требования, предъявляемые к параметрам АРЛС

Входные параметры	Обозначение	Ограничения
Дальность действия	R_{max}	300 м
Разрешающая способность по дальности	δR	1.5 м
Азимутальный сектор обзора	θ	90^0
Ширина КБ	d_n	3 м
Ширина автомобиля	L_m	2 м
Скорость сканирования	$F_{ск}$	16 Гц
Диапазон ЭПР наблюдаемых целей	D	55 дБ

3.2 Выбор и обоснование структурной схемы АРЛС

Структурная схема АРЛС выбирается исходя из требований, перечень которых приведён в таблице 3.1, и специфических особенностей АРЛС, детально рассмотренных в главе 1.

По принципу излучения все РЛС можно разделить на системы с импульсным и непрерывным излучением. Структурная схема типовой импульсной РЛС представлена на рисунке 3.4.

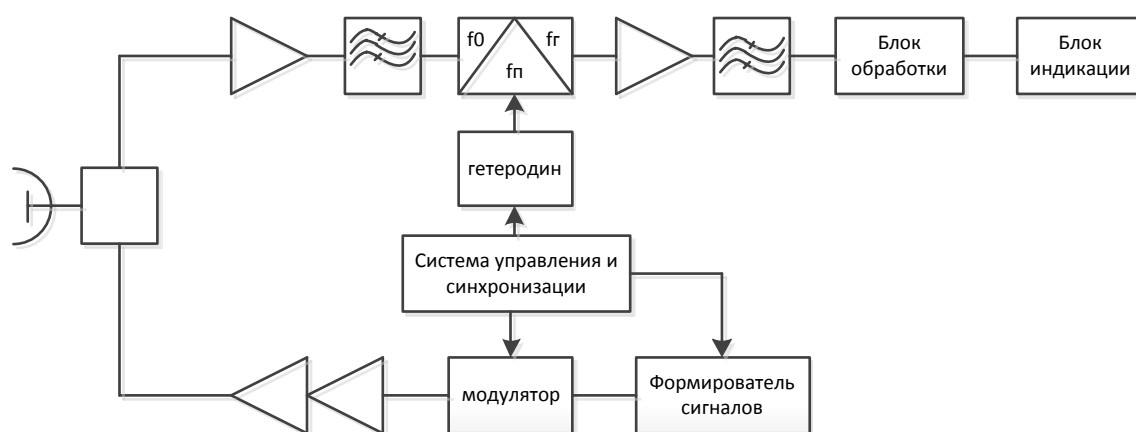


Рисунок 3.4. Структурная схема импульсной РЛС

Известно [1,46,48], что для обеспечения высокой разрешающей способности РЛС по дальности необходимо минимизировать длительность ЗС (после сжатия). Так для обеспечения разрешения по дальности 1,5 м, требуемая длительность ЗС должна составлять 10 нс. Однако, сокращение длительности излучения приводит к необходимости увеличения мощности излучения (импульсной мощности передатчика - ПРД). Поэтому, к определённым недостаткам такой структурной схемы можно отнести высокую стоимость окончательного усилителя ПРД и АЦП (для обеспечения высокой разрешающей способности по дальности).

Другим известным вариантом построения РЛС является применение в РЛС ЗС с непрерывной линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [44,49]. Применение ЗС с ЛЧМ позволяет существенно увеличить энергетический потенциал РЛС, а выбор соответствующих значений девиации частоты - обеспечить необходимое разрешение по дальности. Кроме того, в этом случае при построении РЛС может быть использован простой гомодинный ПРМ, структурная схема которого приведена на рисунке 3.5.

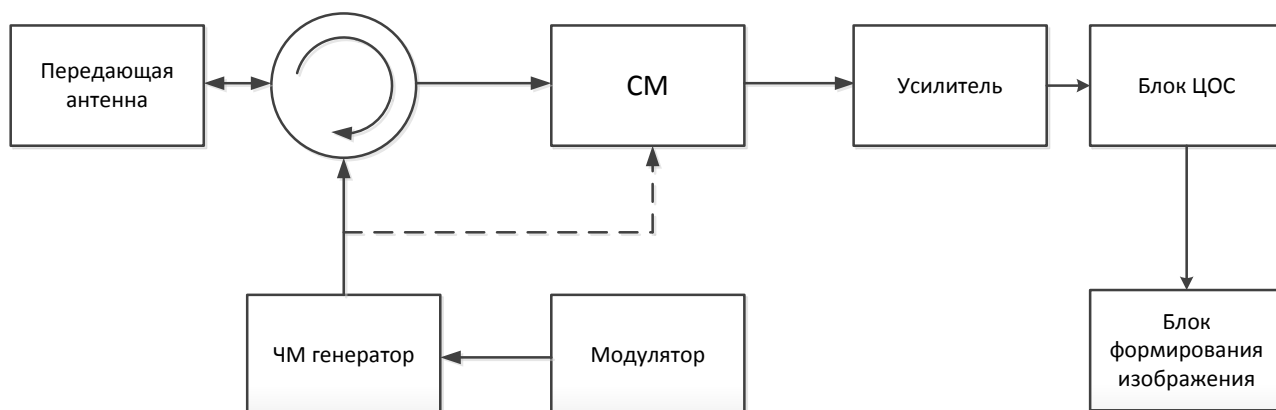


Рисунок 3.5. Структурная схема РЛС с ПРМ гомодинного типа

Данная структура построения РЛС позволяет: добиться минимальной слепой зоны; ПРД может иметь в скажность раз меньшую мощность, чем у импульсной РЛС; минимизируется стоимость РЛС за счет упрощения приёмопередающего тракта. Другое достоинство данной структурной схемы – это компрессия полосы частот [16, 44]. В РЛС такого типа оцифровывается сигнал бие-

ний, полоса которого на 2 и более порядков меньше, чем полоса ЗС, определяющего разрешающую способность РЛС по дальности. Данное обстоятельство позволяет существенно снизить стоимость АЦП и схем обработки.

Учитывая указанные выше преимущества, в качестве основной структурной схемы построения АРЛС в работе выбирается схема РЛС с ПРМ гомодинного типа.

Динамический диапазон сигналов на входе ПРМ АРЛС зависит от значений $P_{\text{MAX}, \text{MIN}}$ – максимальной и минимальной мощности принятых сигналов. При этом, максимальная мощность принятых сигналов соответствует сигналам рассеянными точечными объектами, расположенными на минимальных дальностях ($R = 1,5 \div 2$ м) и имеющих максимальную ЭПР: $10^2 - 10^3 \text{ м}^2$. При этом, максимальная величина ЭПР $S_{\text{ЭФ MAX}}$, которая составляет величину порядка 100 м^2 , соответствует отражениям от большегрузных автомобилей. Однако, как показано в главе 2, величина $S_{\text{ЭФ MAX}}$ может многократно возрасти вследствие интерференции (вызванной многолучевым распространением сигналов).

Минимальный уровень обнаруживаемых сигналов в АРЛС будет соответствовать сигналам, отражённым от протяжённых поверхностей с учетом скользящего падения ЭМВ, например отражений от обочины и прилегающих к дороге поверхностей. В этом случае величина ЭПР может быть оценена по формуле:

$$S_{\text{ЭФ}}^{\text{MIN}} = \frac{c}{2\Delta f_c} \cdot R \cdot \Delta\theta_{\text{AZ}} \cdot \sigma_0, \quad (3.1)$$

где: $2\Delta f_c$ – полоса зондирующего сигнала;

c – скорость распространения электромагнитных волн;

R – дальность до отражающего элемента;

$\Delta\theta_{\text{AZ}}$ – эффективная ширина ДНА в азимутальной плоскости.

Используя формулу радиолокации, для мощности принятого сигнала [1,46] нетрудно оценить динамический диапазон входных сигналов. Как показано в главе 2 применительно к рассматриваемой АРЛС указанный динамический диапазон превышает величину 130 дБ.

Очевидно, что реализация достаточно широкополосного (полоса на несущей частоте превышает 300 МГц) приёмника с таким динамическим диапазоном представляется достаточно сложной технической задачей. Однако проблема создания усилительного устройства с широким динамическим диапазоном может быть в нашем случае обойдена применением гомодинного приёма (кратно уменьшающего полосу принимаемых сигналов) и частотного экспандирования принятых сигналов. Данное обстоятельство позволяет на выходе последних каскадов усилительного устройства добиться существенного сужения динамического диапазона усиливаемых сигналов.

Кроме того, для уменьшения динамического диапазона может быть использована зависимость интенсивности принятых сигналов от дальности или частоты, путём применения нелинейной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) усилителя – корректора. Наиболее просто реализуется квадратичная (по амплитуде) частотная характеристика. Введение квадратичной АЧХ усилителя сигнала биений выравнивает мощность сигналов, принятых от целей расположенных на различных дальностях и имеющих одинаковую величину $S_{ЭФ}$. При этом динамический диапазон всех сигналов сужается до динамического диапазона наблюдаемой сцены (рис. 3.6).

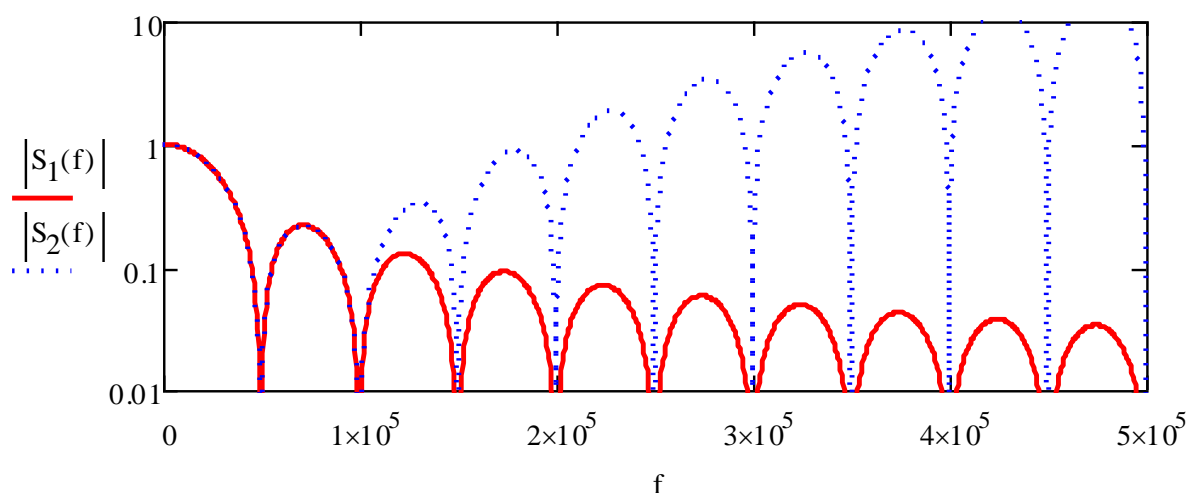


Рисунок 3.6. Спектр сигнала биений без ($S_1(f)$) и с учетом ($S_2(f)$) частотной коррекции

Однако кроме отмеченного положительного эффекта сужения динамического диапазона, возникает проблема возрастания уровня боковых лепестков (УБЛ) функции неопределённости ЛЧМ сигнала. Это возрастание УБЛ создаёт существенные помехи – пространственную засветку экрана по дальности, следующую следом за сигналом, который соответствует отражению от объекта.

Для устранения этого эффекта, а так же паразитной амплитудной модуляции генератора, управляемого напряжением (ГУН), в приёмном модуле АРЛС применяется функция «временного окна» в виде функции $\cos^2\left(\pi \cdot \frac{t - T_M/2}{T_M}\right)$, которая модулирует по амплитуде, принятый сигнал биений (рис. 3.7).

Несложно показать, что в этом случае огибающая спектра сигнала биений будет иметь вид функции:

$$S(\omega) = \frac{\sin(\omega - \omega_B)}{2(\omega - \omega_B)} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{T_M(\omega - \omega_B)}{2\pi}\right)^2} \quad (3.2)$$

где ω_B - частота биений.

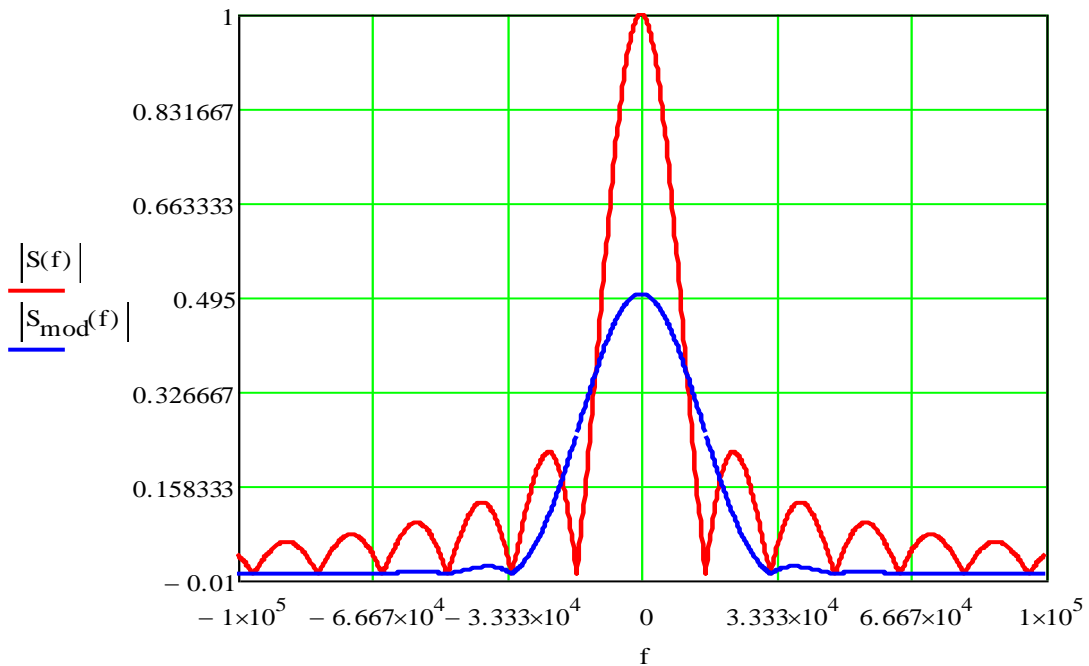


Рисунок 3.7. Спектр сигнала биений $S(f)$ и спектр сигнала биений, модулированный функцией временного окна $S_{mod}(f)$

В отличие от функции $\frac{\sin\left(\frac{(\omega - \omega_0)T_M}{2}\right)}{\frac{(\omega - \omega_0)T_M}{2}}$, огибающая спектра сигнала биений на выходе приёмного устройства $S(\omega)$ – имеет более широкий основной лепесток и боковые лепестки, которые спадают быстрее - обратно пропорционально третьей степени частоты. Таким образом, введение квадратичной АЧХ приводит к компенсации сомножителя $\frac{1}{1 - \left(\frac{(\omega - \omega_0)T_M}{2\pi}\right)^2}$, и, следовательно, после перемножения и последующего усилителя-корректора с квадратичной АЧХ спектр огибающей сигнала биений будет иметь вид функции:

$$S(\omega) \cdot K_{\text{VC}}(\omega) = T_M \frac{\sin\left(\frac{(\omega - \omega_0)T_M}{2}\right)}{(\omega - \omega_0)T_M/2} \quad (3.3)$$

В результате не будет наблюдаться нежелательного роста УБЛ (рис.3.8).

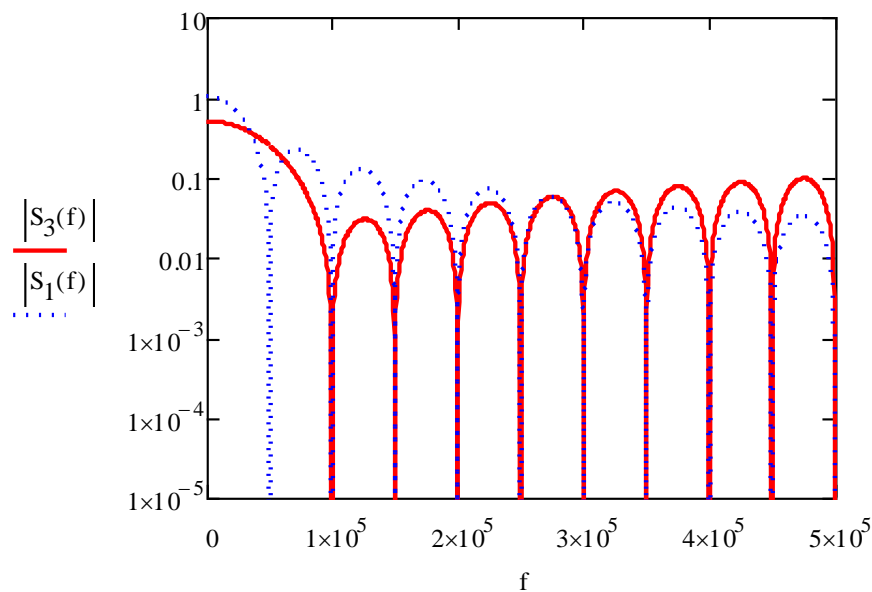


Рисунок 3.8. Спектр сигнала биений без ($S_3(f)$) и с учётом ($S_1(f)$) преобразований

Естественно, что введение функции временного окна приводит к некоторому снижению потенциала АРЛС. Этим снижением потенциала приходится расплачиваться за уменьшение уровня боковых лепестков и сужение динамического диапазона сигналов поступающих на вход цифровой части АРЛС.

С учётом приведённых выше обоснований структурная схема построения АРЛС выглядит следующим образом (рис.3.9):

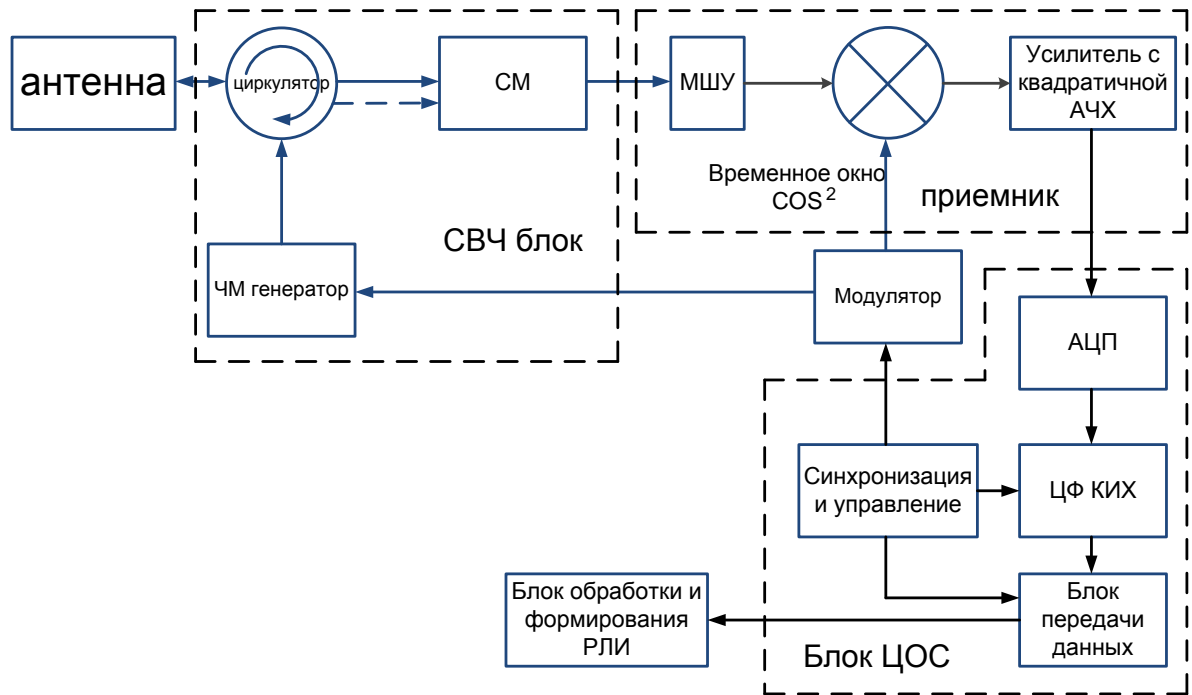


Рисунок 3.9. Структурная схема АРЛС

Структурная схема АРЛС (рисунок 3.9) функционально состоит из следующих основных блоков:

- приёмно-передающей антенны,
- блока СВЧ,
- блока приёмника (ПРМ),
- блока цифровой обработки сигнала (ЦОС),
- блока обработки и формирования РЛИ

Приёмно-передающая антенна АРЛС выполнена в виде узконаправленной антенны бегущей волны с шириной диаграммы направленности (ДНА) в азимутальной плоскости менее 1° . Ширина ДНА в угломестной плоскости составляет 20° . Коэффициент усиления антенны равен: $G = 400$. Для обеспечения сканирования, осуществляется вращение антенны шаговым двигателем, с частотой обзора 10 Гц. Для контроля начала сектора сканирования в азимутальной плоскости установлен «Датчик положения антенны».

Блок СВЧ состоит из трех отдельных модулей: модуля ПРД, модуля аттенуатора и модуля балансного смесителя (СМ).

Модуль ПРД содержит генератор высокой частоты (ГВЧ) с усилителем и обеспечивает мощность ЗС ~ 100 мВт. В блоке ПРД с помощью «Модулятора ЛЧМ» обеспечивается линейная частотная модуляция ЗС. В качестве модулирующего сигнала используется периодический линейно нарастающий сигнал.

Модуль балансного смесителя предназначен для перемножения входного, отражённого от цели сигнала, с опорным сигналом передатчика мощностью 1 мВт, предварительно полученного с направленного ответвителя.

Блок цифровой обработки сигнала (ЦОС) состоит из трёх основных модулей: аналого-цифрового преобразователя (АЦП), генератора тактовых импульсов (ГТИ) и устройства сопряжения с бортовым цифровым вычислителем.

Генератор тактовых импульсов (ГТИ) обеспечивает формирование всех служебных и управляющих сигналов и частот.

Модулятор COS используется для формирования временного окна, с которым перемножается сигнал биений. Использование временного окна позволяет подавить паразитную амплитудную модуляцию ГУН и уменьшить уровень боковых лепестков спектра сигнала биений. Сигнал с выхода модулятора представлен на осциллограмме (рисунок 3.10).

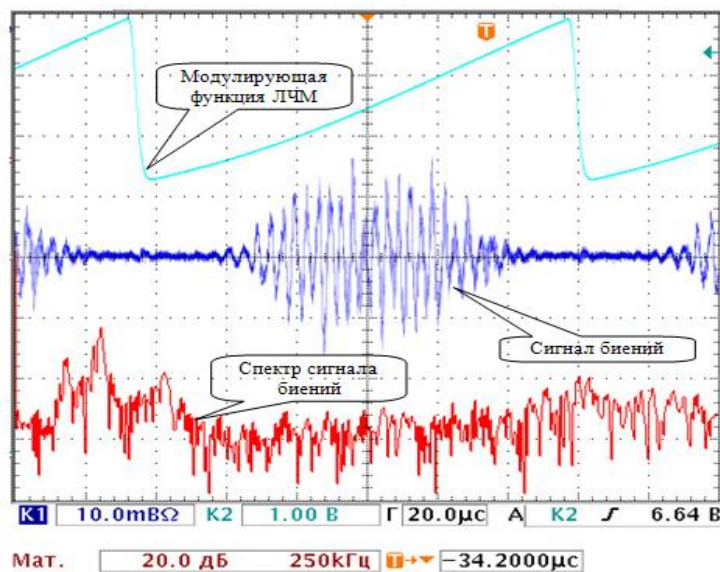


Рисунок 3.10. Осциллограммы и спектрограммы сигналов в АРЛС

Усилитель с квадратичной АЧХ используется для компенсации зависимости амплитуды сигнала биений от расстояния до цели, от которой приходит отражённый сигнал. Использование данного усилителя позволяет уменьшить динамический диапазон сигнала подаваемого на вход АЦП.

Блок обработки и формирования РЛИ вычисляет спектр сигнала биений каждого отражённого сигнала (смотри осциллограмму рисунок 3.10) и тем самым формируется один столбец по дальности формируемого РЛИ. Накапливая отдельные столбцы РЛИ в процессе сканирования антенны в азимутальной плоскости, вычислитель формирует первичное РЛИ в координатах азимут – дальность и производит его обработку для представления на индикаторе.

3.3 Методика расчёта структурной схемы АРЛС

Расчет параметров блоков структурной схемы АРЛС проводится с учетом выбранной структурной схемы АРЛС и сводится к последовательному выполнению следующих действий:

1. Расчёт ширины ДНА.

Ширина ДНА должна обеспечивать обнаружение препятствий на требуемой дальности в пределах КБ и отличать их от безопасных объектов, находящихся на обочине. С другой стороны, линейные размеры антенны не должны превышать габариты автомобиля, что накладывает ограничения на минимальную ширину ДНА

$$\frac{\lambda}{L_M} < \Delta\theta < \arcsin\left(\frac{d_n}{R_{max}}\right)$$

где: $\Delta\theta$ – ширина ДНА,

λ - длина волны ЗС,

2. Определение периода модуляции ЗС, исходя из требуемых соотношений сигнал/шум.

Период модуляции определяется следующим выражением:

$$F_M = \frac{P_{TX} G_A^2 \lambda^2 S_{\text{эф}}}{(4\pi)^3 R^4 k_a q k T_{\Sigma} N_{\text{noise}} 10^{10^4} \frac{\alpha R}{\theta}}$$

где: G_A – коэффициент усиления антенны,

P_{TX} – средняя мощность передатчика,

k_a – коэффициент аподизации, учитывающий расширение спектра при модуляции сигнала биений функций временного окна,

q – отношение сигнал/шум на выходе фильтра Фурье,

N_{noise} – коэффициент шума ПРМ,

R – дальность, [м],

α – затухание волн в атмосфере.

При этом нижняя граница частоты F_M определяется соотношением:

$$F_{M_{\min}} > \frac{360 F_{sc}}{\theta}, \text{ где } F_{sc} \text{ – частота сканирования}$$

На рисунке 3.11 представлена зависимость максимальной частоты модуляции от требуемого отношения сигнал/шум на дальности 100 м при различных величинах ЭПР.

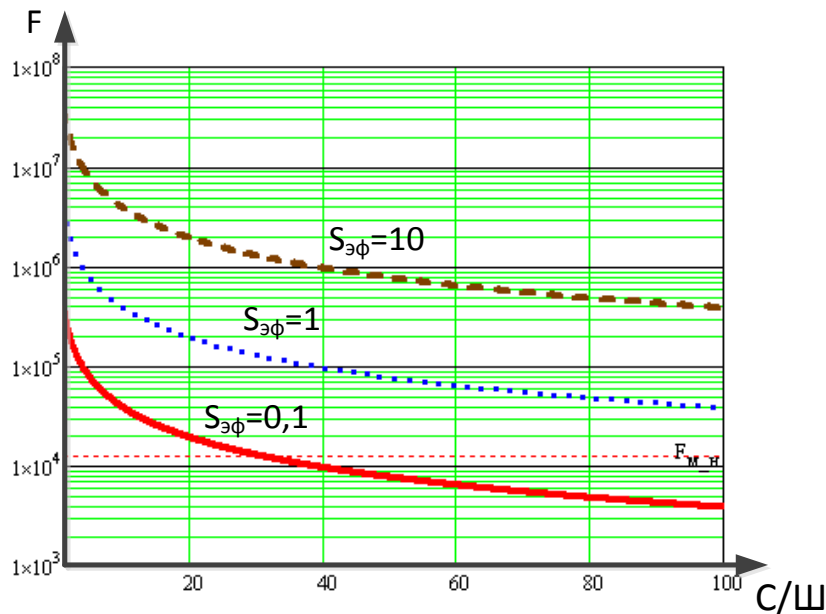


Рисунок 3.11. Зависимость максимальной частоты модуляции от требуемого отношения сигнал/шум на дальности 100 м для различных величин ЭПР

3. Количество зондирований в секторе обзора по азимуту:

$$N_{TX} = \frac{\Theta_{view} F_M}{360 F_{CK}} \quad (3.3.3), \text{ где } \Theta_{view} - \text{сектор обзора}$$

4. Определение полосы зондирующего сигнала:

$$\Delta F = \frac{k_a c}{2 \delta R}$$

5. Определение диапазона частот сигнала биений (полоса НЧ)

$$F_b = \frac{4 \Delta F F_M R}{c}$$

6. Определение максимального коэффициента усиления ПРМ, исходя из выбранного АЦП:

$$K_{ПРМ} = \begin{cases} \frac{U_{ADC}^2 (4\pi)^3 (cf)^4 k_a^2}{R_{ADC} P_{TX} G_A^2 \lambda^2 S_{max} (4\Delta F F_M)^4} & , f \leq \frac{4\Delta F F_M R_{max}}{c} \\ 0 & , f > \frac{4\Delta F F_M R_{max}}{c} \end{cases}$$

где: U_{ADC} – шкала АЦП

R_{ADC} – входное сопротивление АЦП

c – скорость света

7. Выбор частоты дискретизации

$$F_d > 2 \frac{K}{6n} F_b,$$

где: K - коэффициент подавления сигнала за пределами рабочей полосы частот,

n - порядок аналогового фильтра.

8. Выбор разрядности АЦП, исходя из соотношения

$$l_{ADC} > \frac{D}{6} + 1,$$

где D – динамический диапазон ЭПР наблюдаемых объектов, с учётом интерференции.

9. Определение пропускной способности канала связи на выходе блока ЦОС.

Так как частота дискретизации существенно превышает требуемую частоту по теореме Котельникова, то на выходе ЦФ проводится децимация отсчетов. Поток данных на выходе ЦФ будет составлять:

$$\rho_{FIR} = \frac{l_{ЦФ} F_d}{k_{dec}},$$

где: l_{FIR} - разрядность отсчетов на выходе ЦФ, которая выбирается исходя

из соотношений $2^{-l_{FIR}} \leq 10^{\frac{K}{10}}$

$$k_{dec} \leq \frac{\frac{K}{26n}}{2} - \text{коэффициент децимации}$$

В результате поток данных на выходе блока ЦОС определяется в виде:

$$\rho_{DSP} = \frac{\rho_{FIR} \theta_{view}}{360}$$

10. Определение количества точек БПФ.

$$N_{БПФ} = 2^{\text{round}(\log_2 \frac{2R_{max}}{\delta R})}$$

Предложенная методика инженерного расчёта структурной схемы АРЛС позволяет на этапе проектирования провести обоснованный выбор и оптимизацию всех основных параметров АРЛС [49].

Учитывая структурную схему построения АРЛС, можно выявить основные источники погрешностей измерения и провести их классификацию. Погрешности АРЛС могут быть подразделены на две группы.

К первой группе относятся методические погрешности, обусловленные работой АРЛС на малых расстояниях от отражающей поверхности. Они связаны с:

- кривизной волнового фронта падающей и отражённой ЭМВ,
- вторичным эффектом Доплера,
- траекторными нестабильностями АРЛС, вызванными колебаниями ТС,
- случайным характером изменения отражающих свойств подстилающей поверхности,
- принятым способом обработки отражённого сигнала.

Ко второй группе относятся инструментальные погрешности, связанные с:

- неточностью установки антенны АРЛС,
- неидеальностью модулей обработки,
- погрешностями, возникающими при прохождении сигналов через приёмный тракт.

Выводы к разделу 3

1. В результате проведённых исследований введено новое понятие – коридор безопасности, в качестве критерия разделения объектов на опасные и безопасные (известное в практике судовождения). Использование данного критерия позволяет обоснованно подойти к выбору параметров антенной системы АРЛС.

2. Показано, что исходя из типа ТС, входными данными для расчёта АРЛС, являются диапазон рабочих дальностей, разрешающая способность по дальности и азимуту, сектор обзора в азимутальной плоскости, ширина КБ, ширина автомобиля, частота сканирования.

3. Предложена и обоснована структурная схема построения АРЛС, которая позволяет удовлетворить сформулированным требованиям к системе.

4. Разработана методика инженерного расчета параметров блоков структурной схемы АРЛС, позволяющая: исходя из тактических условий и типа ТС, рассчитать требуемую ширину ДНА по азимуту и углу места, оценить необходимый сектор сканирования антенны в азимутальной плоскости; исходя из разрешающей способности по дальности, диапазона рабочих дальностей и наблюдаемых целей определить период модуляции ЗС, количество зондирований в секторе обзора, полосу зондирующего сигнала, диапазон частот сигнала биений, коэффициент усиления приемника, количество фильтров БПФ и количество точек индикатора. Показано, что коэффициент подавления внеполосного сигнала накладывает дополнительные ограничения на частоту дискретизации, разрядность АЦП и пропускную способность канала связи на выходе блока ЦОС.

Таким образом, предложенная методика позволяет разработать аппаратную часть АРЛС, однако для целевого применения АРЛС необходима разработка программно-алгоритмического обеспечения.

4 Алгоритмическое и программное обеспечение АРЛС

Комплекс аппаратно-программных средств АРЛС не может функционировать без алгоритмического и программного обеспечения (ПО). Алгоритмическое и программное обеспечение можно в первом приближении разделить на необходимое для выполнения целевой задачи и без которого невозможно применение АРЛС (например, преобразование сигнала биений в РЛИ и визуализация РЛИ), и сервисное, задача которого состоит в автоматизации и облегчения работы водителя-оператора (например, преобразование координат и т.д.). Поэтому в диссертации проведена систематизация алгоритмов необходимого ПО и разработаны определённые алгоритмы сервисного ПО. Существенное внимание в данном разделе уделено вопросам программной реализации и проверки алгоритмов необходимого ПО, а также разработанных алгоритмы сервисного ПО. Учитывая ограниченные вычислительные ресурсы блока ЦОС и работы АРЛС в реальном масштабе времени, должна быть проведена оценка эффективности и реализуемости ключевых алгоритмов. Критерием эффективности в данном случае является возможность выполнения штатных задач АРЛС, а именно: наблюдение и измерение расстояния до потенциально опасных объектов в пределах КБ, а также границ дороги.

Комплекс алгоритмов вторичной обработки включает: алгоритмы обнаружения и сопровождения, представляющих опасность объектов, с измерением дальности и параметров их движения; алгоритмы обнаружения границ дороги и решение навигационной задачи; алгоритмы формирования интерфейса оператора-водителя в АРЛС.

Задача обнаружения потенциально опасного объекта после адаптивного порога достаточно тривиальна и будет рассмотрена в разделе 4.6. Нетривиальной является задача обнаружения границ дороги и измерения расстояния до них. Рассмотрению этого вопроса посвящены разделы 4.2 – 4.5. Основная задача интерфейса оператора-водителя: представить информацию так, чтобы она легко воспринималась слабо подготовленным в области радиолокации оператором (рассмотрена в разделе 4.7).

4.1 Задачи вторичной обработки РЛИ в АРЛС

Для создания комплекса аппаратно-программных средств АРЛС необходимо разработать соответствующее программно-алгоритмическое обеспечение для решения следующих задач:

- Выделение края дороги и (при наличии) разделительной границы между полосами встречного движения.
- Классификацию типа края - грунтовая обочина, металлический или бетонный барьер, противозумовые щиты.
- Определение текущей ширины дороги, попутной и встречной полосы движения.
- Определение кривизны дороги, формирование предупреждающего сообщения.
- Выделение изолированных придорожных объектов инфраструктуры (столбы освещения, километровые столбы и т.д.) и оценку их текущих координат.
- Выделение неподвижных предметов в коридоре безопасности и оценку их текущих координат, формирование предупреждений об опасном сближении.
- Выделение, оценку текущих координат и скоростей и классификация движущихся объектов (легковой автомобиль, среднеразмерный и большеразмерный грузовые автомобили, мотоцикл-велосипед, пешеход) в пределах коридора безопасности и примыкающей зоны риска. Прогноз их движения, оценка степени опасности и выдача предупреждений.
- Приведение данных к единому моменту времени (с учётом разновременности получения первичных данных с разных азимутов), с упреждением на время задержки человеческого восприятия.
- Символическую, легко воспринимаемую человеком визуализацию выходной информации, обеспечивающую чёткое и однозначное разъяснение смысла сигнала предупреждения.
- Функциональную связь с другими информационными датчиками автомобиля (спидометром, датчиком поворота).

- Возможность привязки отображаемой обстановки как к продольной оси автомобиля, так и к оси дороги.

Учитывая большое количество и сложность реализации всего программно-алгоритмического обеспечения, в диссертации уделено внимание разработке и реализации только ключевых алгоритмов.

4.2 Алгоритм измерения расстояния до границы дороги и определения ориентации автомобиля на дороге

Обнаружение обочины дороги и её аппроксимация на индикаторе оператора позволяет извлекать из РЛИ АРЛС оперативную навигационную информацию для управления ТС. Задача обнаружения границ дороги сопряжена с рядом трудностей принципиального характера, а именно: из-за движения автомобиля характер обочины постоянно меняется, меняется расстояние от отражателей до края полосы движения, УЭПР края дороги. Таким образом, необходимо обнаружить и отслеживать дистанцию в определённых угловых каналах до распределённой сильно флюктуирующей цели. Из-за отклонения ТС от оси дороги расстояние до границы дороги в различных угловых каналах меняет свой характер (закон расположения), однако при движении в плавном повороте происходят аналогичные явления. Разрешить эту задачу позволяет априорно парный характер обочин дороги. Предложенные ниже алгоритмы ограничены случаем прямого участка дороги или пологого поворота. Случаи сложных развязок и перекрёстков в диссертации не рассматривались.

Диаграмма направленности АРЛС сканирует в азимутальной плоскости, последовательно облучая участки поверхности дорожного полотна и окружающей местности. Геометрические соотношения, поясняющие процедуры обзора пространства, представлены на рисунке 4.1.

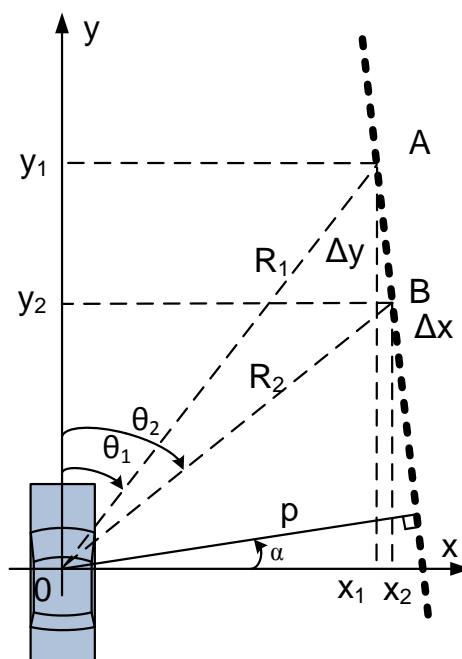


Рисунок 4.1. Геометрия задачи. Расположение автомобиля на дороге.

Узкий в азимутальной плоскости антенный луч, совершает сканирование, последовательно занимая положение, характеризуемое углом $\Omega_{sc}t = \theta$. Отсчет азимутальных углов осуществляется от оси ОУ слева направо к правой границе дорожного полотна. Для последовательных положений луча $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ осуществляется измерение времени запаздывания сигнала, отражённого от границы перехода «дорожное полотно-обочина».

Задачу определения ширины дорожного полотна в первом приближении упростим, и будем искать алгоритм, позволяющий по данным, полученным от АРЛС, определить расстояния от автомобиля до обочины. АРЛС проводит измерения в системе координат (ОХУ), привязанной к строительным осям автомобиля. Высокдетальное РЛИ, формируемое АРЛС [23], позволяет определить не только расстояние до обочины, но и угол α , характеризующий ориентацию автомобиля относительно дорожного полотна.

Будем полагать, что граница «дорожное полотно-обочина» может быть аппроксимирована прямой линией, которая в системе координат РЛС (начало системы координат привязано к ТС) характеризуется уравнением (4.1):

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha - p = 0, \quad (4.1)$$

где α - угол между границей дорожного полотна и осью ОУ, p - расстояние от границы до начала системы координат, x и y - это координаты произвольной точки на плоскости РЛИ.

На рисунке 4.1 в системе координат, привязанной к строительным осям ТС, представлено положение автомобиля на дороге, граница которой показана пунктиром.

АРЛС осуществляет сканирование пространства перед автомобилем и осуществляет измерение дальности R и угла θ , под которыми приходят сигналы, отражённые от границы «дорога - обочина». Уравнение, характеризующее линию ОА в плоскости XOY можно записать в виде аналогичном (4.1):

$$x \cos \theta - y \sin \theta = 0, \quad (4.2)$$

Знак «-» в выражении (4.2) связан с тем, что значения угла θ и угла α берутся в разных направлениях.

Координаты точки A - точки пересечения двух прямых, определяются из совместного решения (4.1) и (4.2):

$$\begin{cases} B_1 & A_1 & C_1 \\ y \cdot \sin(\alpha) + x \cdot \cos(\alpha) - p = 0 \\ B_2 & A_2 \\ y \cdot \sin(\theta) + x \cdot \cos(\theta) = 0 \end{cases}$$

$$x_1 = \frac{\begin{vmatrix} B_1 & C_1 \\ B_2 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}} = \frac{p \cdot \sin \theta_1}{\sin(\theta_1 - \alpha)}; \quad y_1 = \frac{\begin{vmatrix} C_1 & A_1 \\ 0 & A_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}} = \frac{p \cdot \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 - \alpha)} \quad (4.3)$$

и соответственно дальность от начала координат до точки $A(x_1, y_1)$ определяется в виде:

$$R_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} = \frac{p}{\sin(\theta_1 - \alpha)} \quad (4.4)$$

В связи с тем, что в выражения (4.3 и 4.4) входят неизвестные величины p и α , необходимо еще одно измерение величин R_2 и θ_2 :

$$R_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} = \frac{p}{\sin(\theta_2 - \alpha)} \quad (4.5)$$

Таким образом для определения этих неизвестных параметров p и α необходимо совместное решение уравнений (4.4) и (4.5).

$$R_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} = \frac{p}{\sin(\theta_1 - \alpha)} \quad R_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} = \frac{p}{\sin(\theta_2 - \alpha)} \quad (4.6)$$

Если взять отношение двух приращений:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = R_2 \sin \theta_2 - R_1 \sin \theta_1$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 = R_2 \cos \theta_2 - R_1 \cos \theta_1$$

то выражение для вычисления искомого угла α запишется в виде:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \cong \frac{R_2 \sin \theta_2 - R_1 \sin \theta_1}{R_2 \cos \theta_2 - R_1 \cos \theta_1} \quad (4.7)$$

Тогда расстояние до обочины p находится из подстановки (4.7) в (4.4) и (4.5):

$$p = R_1 \sin(\theta_1 - \alpha) = R_2 \sin(\theta_2 - \alpha) \quad (4.8)$$

Таким образом, измерение в АРЛС двух дальностей R_1 и R_2 и соответственно двух углов θ_1 и θ_2 позволяет с помощью выражения (4.7) определить угол отклонения оси ТС от направления дорожного полотна α , а по формуле (4.8) найти расстояние до обочины p [50].

4.3 Оценка допустимой погрешности измерения расстояния до обочины

Рассмотрим погрешность измерения параметра p на больших дальностях.

Полагаем, что α известная величина (в частном случае ось ТС ориентирована вдоль направления границы дорожного полотна). В этих условиях при малых значениях угла θ параметр p определяется из выражения (4.8):

$$p = R \sin \theta \approx R \theta \quad (4.9)$$

Тогда, с учётом (4.9) относительная ошибка измерения p определяется следующим выражением:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta \theta}{\theta}$$

где: $\frac{\Delta R}{R}$ и $\frac{\Delta \theta}{\theta}$ относительные погрешности измерения дальности R и угла θ .

В АРЛС в первом приближении погрешность измерения дальности до границы раздела «дорожное полотно-обочина» определяется дальномерным разрешением АРЛС и составляет единицы метров (1 ÷ 2м). Относительная

ошибка измерения дальности для $R = 50 \div 80$ м составит:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1 \div 2}{50 \div 80} = 0,02 \div 0,025 = 2 \div 2,5\%$$

Относительная ошибка измерения угла при малой ширине ДНА в азимутальной плоскости определяется выражением:

$$\frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{\Delta \theta_{az}/2}{\theta},$$

где $\Delta \theta_{az}$ - эффективная ширина ДНА в азимутальной плоскости ($\Delta \theta_{az} \sim 1^\circ$),

θ - величина измеряемого угла.

Если считать, что автомобиль движется в правой крайней полосе и расстояние до обочины составляет 3 метра, то тогда на дальности $R = 50 - 80$ м, угол θ может принимать значения:

$$\sin \theta = \frac{P}{R} \approx \theta = \frac{3}{50 \div 80} \frac{360}{2\pi} = \frac{3 \times 60}{50 \div 80} = 3,5^\circ \div 2,25^\circ$$

$$\frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{0,5}{3,5 \div 2,25} = 0,14 \div 0,22 = 14 \div 22\%$$

Результаты данного анализа показывают, что в итоговой погрешности преобладает ошибка, обусловленная низкой точностью измерения угловой координаты θ , поэтому можно считать:

$$\frac{\Delta P}{P} \approx \frac{\Delta \theta}{\theta} = 14 \div 20\%$$

При этом абсолютное значение ошибки ΔR при величине $p = 3$ м дает погрешность $\Delta p \approx 3 \times 0,2 = 0,6$ м, что можно считать приемлемой величиной.

Можно организовать измерение расстояния до другой, правой (левой) обочины, а также использовать априорные сведения о ширине дорожного полотна, которое стандартизовано. Так, если ширина дорожного полотна составляет величину 8 метров, то соответствующий измеряемый угол θ :

$$\theta = \frac{P}{R} = \frac{(8 - 3) 360}{50 \div 80 2\pi} = \frac{5 * 60}{50 \div 80} = 6 \div 3,75 \text{ (градусы)}$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{0,5}{6 \div 3,75} = 0,08 \div 0,13 = 8 \div 13\% = 0,65 \text{ м}$$

Таким образом, относительная ошибка измерения уменьшается при увеличении θ , но абсолютная – остаётся неизменной.

4.4 Алгоритм построения границ дорожного полотна

На основе методов измерения расстояния до границы дороги и определения угла отклонения движения автомобиля от направления дороги, рассмотренных в разделе 4.2, разработан многоканальный измеритель границ дорожного полотна, алгоритм которого представлен ниже.

Каждый i -й канал обнаружителя представляет собой сечение РЛИ по дальности (рис.4.2, 4.3, 4.4).



Рисунок 4.2. Оптическое изображение

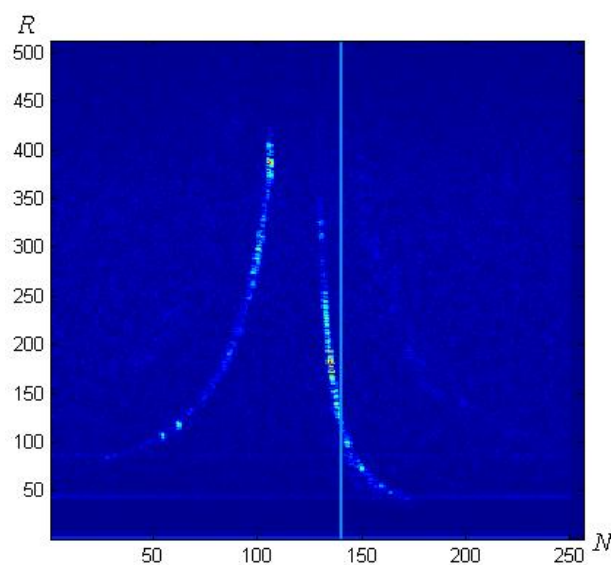


Рисунок 4.3. Радиолокационное изображение

На рисунке 4.2 представлено оптическое изображение, а на рисунке 4.3 синхронное ему РЛИ, сформированное на выходе АРЛС. На рисунке 4.4 приведено сечение РЛИ по дальности, которое показано вертикальной линией на рис. 4.3.

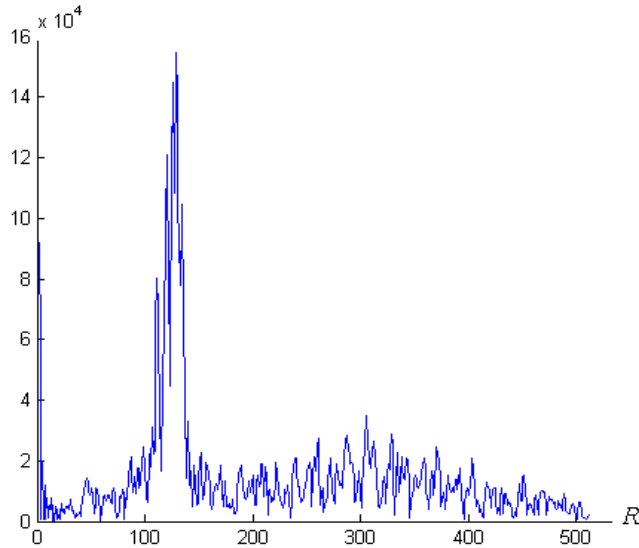


Рисунок 4.4. Сечение РЛИ по дальности

Задача построения границ дорожного полотна сводится к определению дальности до обочины во всех направлениях θ , в которых происходит зондирование, и последующим статистическом расчете искомых параметров p и α . Данную задачу можно разбить на следующие этапы:

1. Задаётся диапазон допустимых значений величины $p \in [\frac{L_M}{2}, n_n L_n + \frac{L_M}{2}]$ $\alpha \in [-5^\circ, 5^\circ]$. Данный диапазон выбирается исходя из априорных сведений о типах дороги, ширины полосы движения.
2. Угол θ выражается через технические параметры АРЛС $\theta = \theta_{view} \left(\frac{N}{N_{TX}} - \frac{1}{2} \right)$, где θ_{view} - сектор сканирования, N_{TX} - количество периодов зондирования ЛЧМ сигнала за время наблюдения сектора, N - номер сечения РЛИ по азимуту.
3. Границы зоны поиска по дальности зависят от номера канала

$$\Delta R(N) = \frac{\Delta p}{\sin \left(\theta_{view} \left(\frac{N}{N_{TX}} - \frac{1}{2} \right) - \Delta \alpha \right)}$$

4. Азимутальный сектор обзора разделяется на сектор поиска левой и правой обочины

$$N \in \left(0, \left(\arcsin \left(\frac{-p_{L_min}}{R_{max}} \right) + \alpha_{max} + \frac{\theta_{view}}{2} \right) \frac{N_{TX}}{\theta_{view}} \right) \cup \left(\left(\arcsin \left(\frac{p_{R_max}}{R_{max}} \right) + \alpha_{min} + \frac{\theta_{view}}{2} \right) \frac{N_{TX}}{\theta_{view}}, N_{TX} \right)$$

$S_L = \left(0, \left(\arcsin \left(\frac{-p_{L_min}}{R_{max}} \right) + \alpha_{max} + \frac{\Theta_{view}}{2} \right) \frac{N_{TX}}{\Theta_{view}} \right)$ – сектор поиска левой обочины

$S_R = \left(\left(\arcsin \left(\frac{p_{R_max}}{R_{max}} \right) + \alpha_{min} + \frac{\Theta_{view}}{2} \right) \frac{N_{TX}}{\Delta\theta_{ск}}, N_{TX} \right)$ – сектор поиска правой обочины

В итоге на радиолокационном изображении выбирается область, где происходит измерение расстояния до обочины (рис.4.5)

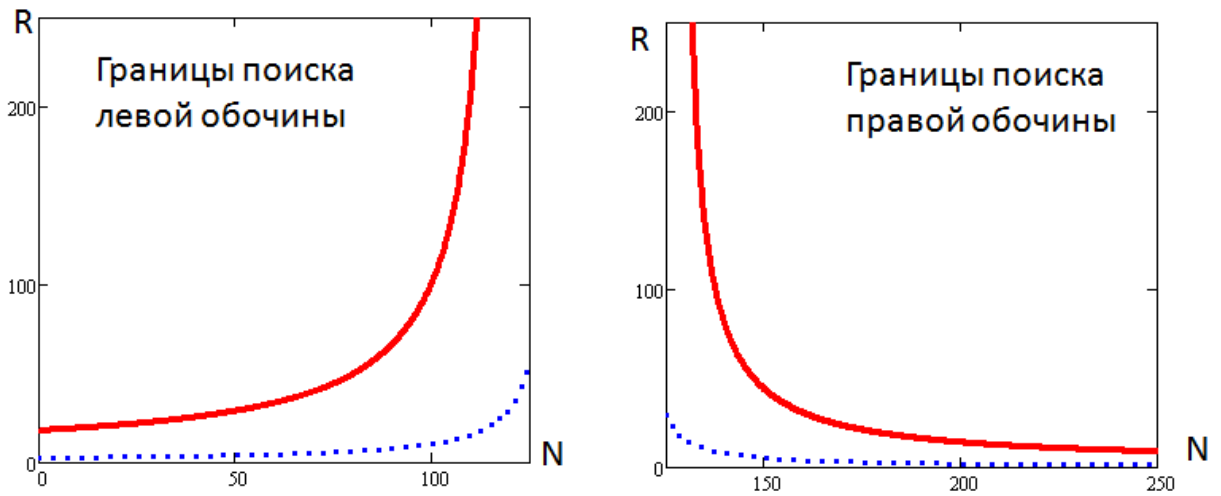


Рисунок 4.5. Границы поиска обочины.

(Пунктирной линией показана ближняя граница зоны поиска, сплошной линией – дальняя граница)

5. Вычисление значений p_L , p_R , α осуществляется, используя оценки дальностей до границы дорожного полотна в каналах (R)

$$\left\{ \begin{array}{l} p_R(N_i, R_i) = R_i \sin \left(\Theta_{view} \left(\frac{N_i}{N_{зу}} - \frac{1}{2} \right) + \alpha \right) \\ p_L(N_i, R_i) = -R_i \sin \left(\Theta_{view} \left(\frac{N_i}{N_{зу}} - \frac{1}{2} \right) + \alpha \right) \\ \alpha(N_i, R_i) = \arctan \left(\frac{R_i \sin \left(\Theta_{view} \left(\frac{N_i}{N_{TX}} - \frac{1}{2} \right) \right) - R_{i-1} \sin \left(\Theta_{view} \left(\frac{N_{i-1}}{N_{TX}} - \frac{1}{2} \right) \right)}{R_i \cos \left(\Theta_{view} \left(\frac{N_i}{N_{TX}} - \frac{1}{2} \right) \right) - R_{i-1} \cos \left(\Theta_{view} \left(\frac{N_{i-1}}{N_{TX}} - \frac{1}{2} \right) \right)} \right) \end{array} \right.$$

6. вычисление средних значений m и среднеквадратических отклонений σ для оценочных значений p и α .

$$M[p] = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^m p(N_n, R_n); \quad M[\alpha] = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^m \alpha(N_n, R_n)$$

$$\sigma[p] = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{n=1}^m p(N_n, R_n) - M[p]\right)^2} \quad \sigma[\alpha] = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{n=1}^m \alpha(N_n, R_n) - M[\alpha]\right)^2}$$

7. Фильтрация аномальных точек.

Так как ширина дороги постоянна, то можно из массива \mathbf{R} получить выборку R' , по следующему критерию $p_i - M[p] < \sigma$

$$\bar{R} \xrightarrow{p_i - M[p] < \sigma} \bar{R}'$$

8. Определение экстраполированных значений p и α для формирования оценок этих величин в следующем кадре РЛИ:

$$p \in [M[p] - n \cdot \sigma[p], M[p] + n \cdot \sigma[p]]$$

$$\alpha \in [M[\alpha] - n \cdot \sigma[\alpha], M[\alpha] + n \cdot \sigma[\alpha]]$$

Таким образом, в АРЛС в результате обработки РЛИ можно измерять расстояние до обочины дороги, ширину дороги и угол ориентации автомобиля относительно границы дороги, что позволяет обеспечить не только безопасное движение, но и управление ТС в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

4.5 Программная реализация алгоритма измерения расстояния до границ дороги и определения ориентации автомобиля на дороге

Программа измерения расстояния до границ дороги реализована как последовательное выполнение ряда операций. Первым реализуется алгоритм поиска границ дороги (рис 4.6).

В данном алгоритме анализируется массив радиолокационных данных (RLDP), который содержит амплитуды модулей отражённых сигналов, представляющий собой радиояркое изображение местности.

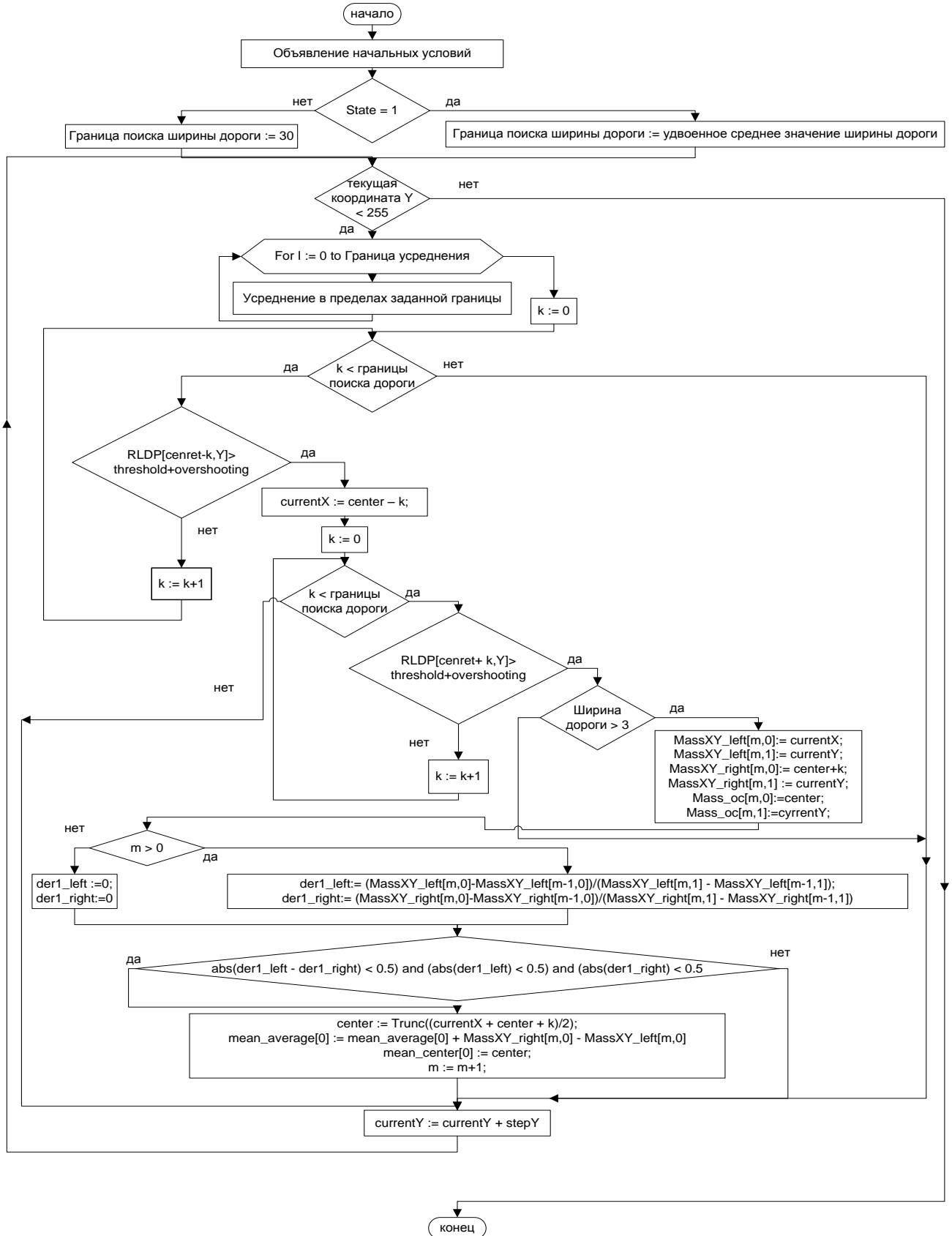


Рисунок 4.6. Алгоритм нахождения границы дороги

Под объявлением начальных условий понимается выставление значений всех констант, участвующих в обработке, таких, как координата центра дороги перед машиной, граница поиска дороги и граница усреднения отражённого сигнала, шаг выбора сечений и номер отсчёта дальности, по которому берётся первое азимутальное сечение.

Результатом работы данного алгоритма являются найденные координаты центра и среднее значение ширины дороги.

Поиск границ обочины происходит «снизу вверх», т.е. сначала рассматривается сечение по дальности, соответствующее области пространства, расположенной перед АРЛС. Учитывая, что автомобиль движется по дороге, а дорога не меняет значение мгновенно, то в центре сечения выбранной области расположена проезжая часть, принимаемая за центр дороги.

Далее слева и справа от центра дороги на расстоянии, соответствующем ширине дороги ведётся усреднение. К полученному результату прибавляем некоторое значение (подобрано с учётом мощности шумов на соответствующей дальности) и получаем значение порога, превышение которого будет указывать на границу проезжей части. Порог сравнивается с передним фронтом азимутального сечения РЛИ.

Граница дороги в данном сечении считается найденной только в случае нахождения как левой, так и правой границы. Например, в случае узкой дороги, если в выбранную область попадает автомобиль, то в выбранной области граница дороги не будет найдена, т.к. в область усреднения попадёт значение отражённого сигнала от автомобиля, имеющего значительно большее значение ЭПР, чем обочина и порог будет выбран таким, что не найдётся координат, в которых сигнал превышает этот порог.

Ширина дороги в пределах кадра считается величиной постоянной, поэтому ведётся усреднение ширины дороги, найденной в каждом сечении, по всему кадру. Также имеется возможность вести усреднение по нескольким кадрам.

После получения координат центра дороги и ее ширины необходимо отфильтровать полученные значения. Фильтрация проводится методом анализа N

превышений порога из M наблюдений. Структурная схема алгоритма фильтрации приведена на рисунке 4.7. При нахождении границ дороги используется переменная $state$, которая указывает на предысторию текущего кадра. Значение данной переменной «1» указывает на то, что было принято четыре кадра подряд, при анализе которых было найдено более пяти координат центра дороги в каждом кадре.

Также в алгоритме поиска границ дороги имеются массивы $MassXY_left$ и $MassXY_right$, в которые записываются координаты левой и правой обочины.

На основе координат левой и правой обочины вычисляются приращения левой и правой границы. Данные значения используются при принятии решения об увеличении метки указателя ячейки массива найденных координат. Если величина производных велика, то метка увеличиваться не будет, и записанные значения будут затёрты новыми значениями.

В алгоритме фильтрации (рис. 4.7) первым делом рассматривается качество нахождения границ дороги. Если количество каналов, в которых наблюдается превышение порога, меньше пяти, то измеренное расстояние до границы дороги считается неправильными и значения в обработку не поступают.

Подсчёт «уверенно» принятых кадров ведётся счётчиком cnt_cadr . При значении этого счётчика больше пяти, ведётся усреднение значений ширины дороги по пяти кадрам и значений координат центра дороги перед автомобилем. Также переменной $state$ присваивается значение «1», которая анализируется в предыдущем алгоритме.

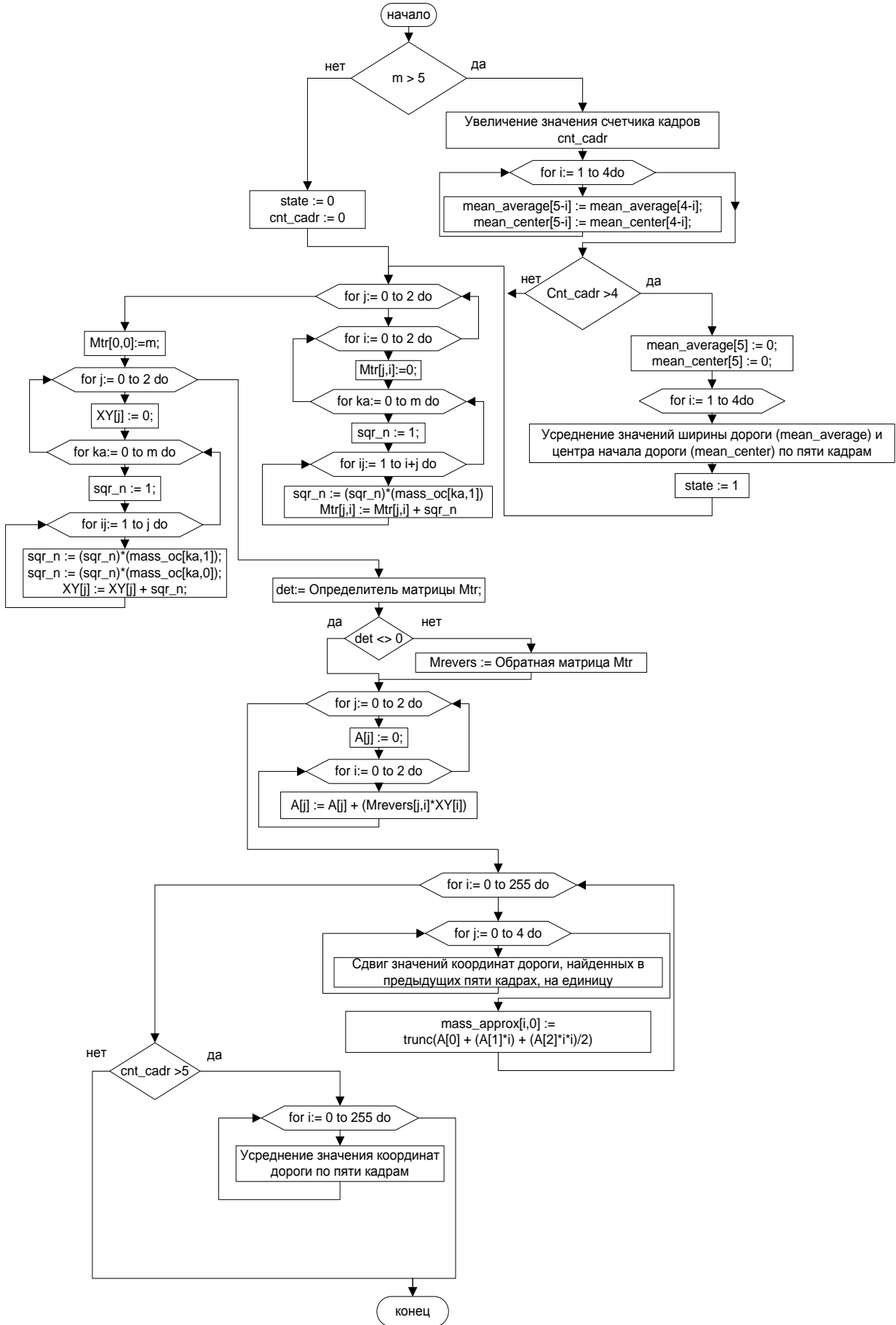


Рисунок 4.7 Алгоритм фильтрации координат дороги

После завершения усреднения реализуется алгоритм аппроксимации. Первым делом вычисляется матрица Mtr и матрица XU . Далее находится определитель матрицы Mtr , который записывается в переменную det . Если определитель не равен нулю, то вычисляется матрица $Mrevers$, обратная матрице Mtr . Далее вычисляется матрица коэффициентов полинома A .

После нахождения матрицы коэффициентов полинома вычисляется значение этого полинома в каждой точке в диапазоне расположения дороги. Если количество кадров, для которых найдены координаты дороги, больше пяти, то ведётся усреднение аппроксимированных значений по пяти кадрам.

Аппроксимированные границы дороги представлены на рис. 4.8.



Рисунок 4.8 Граница дороги после аппроксимации

В итоге имеется граница проезжей части, с которой можно сопоставить границы КБ, жёстко связанные со строительными осями автомобиля и углом поворота колёс.

4.6 Алгоритм обнаружения препятствий в пределах КБ

После выполнения алгоритма обнаружения и аппроксимации границ дороги выполняется алгоритм поиска препятствий. Задача алгоритма: путем анализа РЛИ обнаружить превышение порога по шумам в пределах КБ и зоне риска. Как правило, зона риска распространяется на всю ширину проезжей части (исключая

многополосные автобаны). Поскольку все без исключения цели на РЛИ представлены более чем одним пикселом (функция селекции имеет два отсчёта по азимуту и три по дальности), обнаружение ведётся скользящим окном (стробом поиска), согласованным с функцией селекции.

В данном алгоритме исходными данными являются аппроксимированные координаты центра дороги и ее ширина. При условии, что дорога найдена ($state = 1$) производится последовательный поиск препятствий путём перемещения строба поиска построчно слева направо снизу вверх и интегрирования в пределах этого строба значений РЛИ.

В случае, если проинтегрированное значение превышает пороговое значение, рассматривается, как далеко было предыдущее превышение порога. Если предыдущее превышение было далее одного элемента селекции, то увеличивается счётчик обнаруженных целей и координаты новой цели записываются в массив.

Структурная схема алгоритма представлена на рис. 4.9.

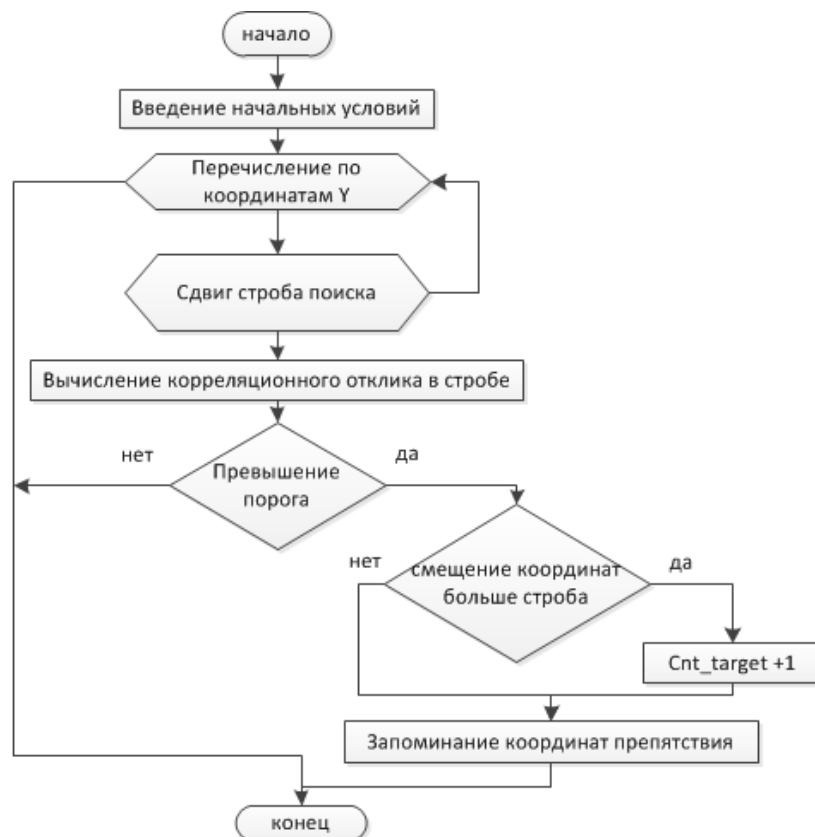


Рисунок 4.9. Алгоритм поиска потенциально опасных объектов

Обнаружение потенциально опасных объектов происходит путем последовательного перемещения строба дальности в пределах дороги и анализа значений величины, полученной интегрированием значений радиояркости сформированного РЛИ в пределах этого строба. При превышении порогового значения запоминаются координаты места, где расположен строб.

Дальность до потенциально опасных объектов определяется по координатам максимума, полученного обработкой РЛИ скользящим двумерным окном с точностью до пиксела. Результаты применения данного алгоритма при обработке РЛИ, полученных в результате натурных испытаний макета АРЛС приведены на рис. 4.10.



Рисунок 4.10. Определение дальности до автомобиля в пределах КБ

Разработанные алгоритмы, результаты работы которых представлены на рисунке 4.10, реализованы в виде программного обеспечения, работающего на персональном компьютере (на базе процессора intel i3) в реальном масштабе времени, что доказывает возможность их выполнения в рамках бюджетных технических решений.

4.7 Алгоритмы формирования и обработки РЛИ в АРЛС

Одной из важных задач, которую должно решать ПО, является формирование РЛИ в АРЛС в виде символической, легко воспринимаемой водителем визуальной информации, которое обеспечивает чёткое и однозначное разъяснение смысла сигнала предупреждения и обеспечивает возможность совершать манёвры. Поэтому в диссертации была проведена апробация алгоритмов, направленных на решение данной задачи, а именно: алгоритм преобразования координат, фильтрации и квантования по радиояркости.

Алгоритм преобразования координат

Для удобства восприятия оператором целесообразно проводить преобразование исходного массива, как результата первичной обработки, формируемого в координатах дальность-азимут в более удобную систему координат.

Как известно [1, 46,47] в классических РЛС отображение РЛИ осуществляется на аналоговом индикаторе с радиально-круговой развёрткой (ИКО). В случае же использования для обработки и отображения РЛ информации ПЭВМ, изображение в конечном итоге выводится с помощью стандартного TFT дисплея, который имеет строчную развёртку и прямоугольный (телевизионный) растр.

Данные, которые поступают из блока ЦОС представляют собой двумерный массив в виде строк по дальности, причём каждая строка соответствует своему значению азимута. Таким образом, в памяти образуется прямоугольный массив, в котором по горизонтали (в строках) расположены отсчёты по азимуту, а по вертикали (в столбцах) – отсчёты по дальности.

Учитывая обе указанные выше особенности, а именно прямоугольный растр устройства отображения и формирование РЛ информации в виде прямоугольного массива, очевидным является следующее решение - осуществлять непосредственный вывод РЛИ на индикатор РЛС без дополнительных преобразований. Т.е. каждый отсчёт отображается одной точкой на экране ПЭВМ, сообразно своему положению в массиве данных. Характерный вид получаемого при этом изображения показан на рис.4.11. Именно такой подход к отображению информации и был использован на ранних этапах разработки специального программного обеспечения макета АРЛС.

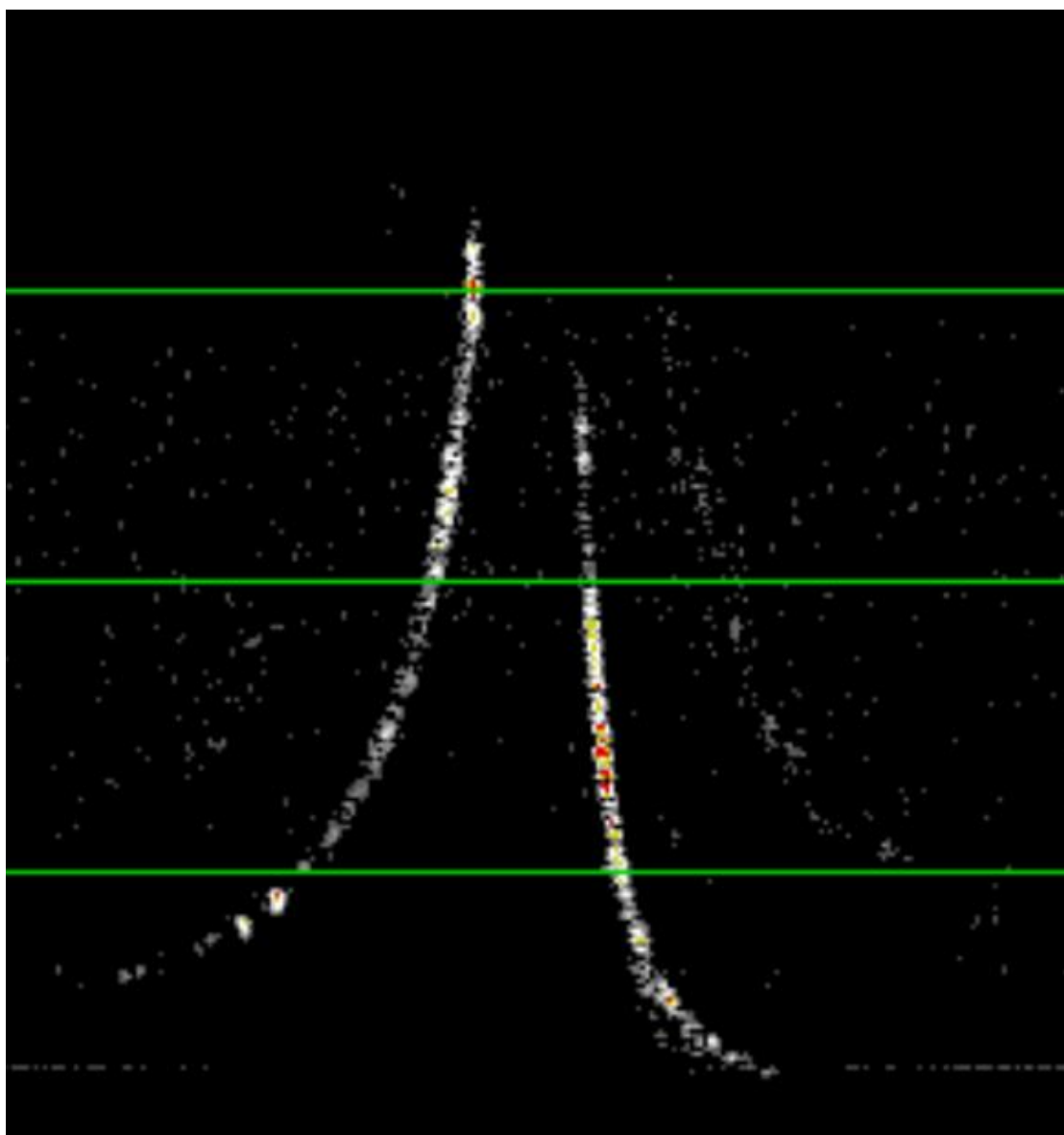


Рисунок 4.11. РЛИ прямого отрезка дороги в случае не преобразованных координат

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 рис.4.11 показано РЛИ для прямого отрезка дороги протяжённого по дальности, на котором хорошо виден переход от дорожного полотна к обочине.

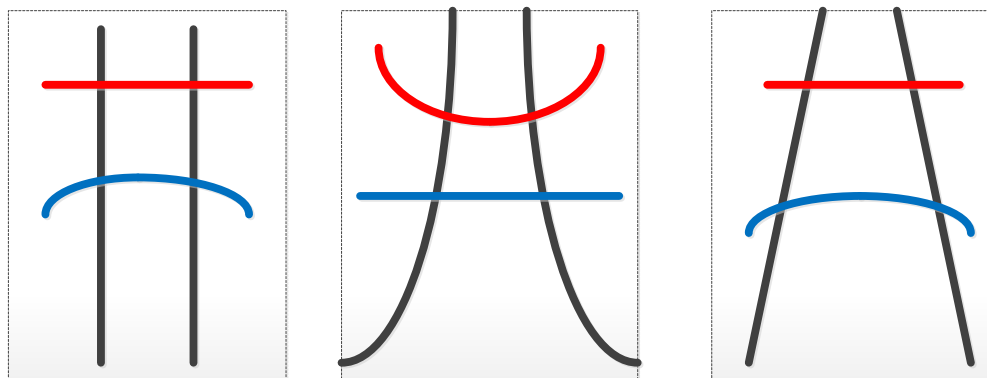
Искажения, возникающие при использовании подобного механизма отображения, можно охарактеризовать следующим образом:

во-первых: 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.

во-вторых: 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 рис.4.12.

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.



Объекты на местности

Объекты на РЛИ без преобразований

Объекты на РЛИ с преобразованием «прямая перспектива»

Рисунок 4.12. Схематичное изображение характерных искажений

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

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.

Поскольку основной целью, которую преследует использование вычислителя в АРЛС, является выдача конечных результатов в наиболее удобной и наглядной форме, естественно возникает необходимость осуществлять в реальном времени преобразование получаемого изображения в другую, например, полярную систему координат.

Основной недостаток полярной системы координат – интерполяция отметок на малых дальностях в область меньшей площади, что может приводить к потере данных, причём в наиболее важной зоне непосредственно перед ТС. Причём отображение всё равно будет происходить на экране с прямоугольным растром, что несколько усложняет данную задачу. Разумным компромиссом между двумя описанными проекциями видится вывод изображения в виде «прямой перспективы» (рис. 4.12). Преобразование в вид прямой перспективы с одной стороны позволяет меньше потерять информации в ближней зоне (наиболее значимой для обнаруже-

ния препятствий) и с другой стороны позволяет представить объекты на местности в привычном для оператора виде (с меньшими искажениями).

При этом необходимо отметить, что преобразование координат преследует цель получить изображение РЛ кадра наиболее удобное для быстрой оценки всей ситуации в целом. Т.е. 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, простота и наглядность его результатов для водителя-оператора АРЛС.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы из элементов прямоугольного массива, для которых известна дальность R и угловое положение α которому они соответствуют, сформировать изображение в прямоугольном растре, которое бы соответствовало представлению этих данных в полярных координатах индикатора. Схематично процесс преобразования полярных координат объекта на местности, для которых известна дальность R и угловое положение α , в прямоугольные координаты на мониторе, показан на рис.4.13.

В качестве примера применения данного алгоритма на рисунке 4.14 приведено не преобразованное, а на рисунке 4.15 преобразованное РЛИ участка дорожного полотна. Как видно из рис.4.15 преобразование координат формирует хорошо различимый коридор между двумя сторонами дороги, который пригоден для управления ТС. На рисунке 4.16 приведён пример преобразования РЛИ в виде «прямой перспективы».

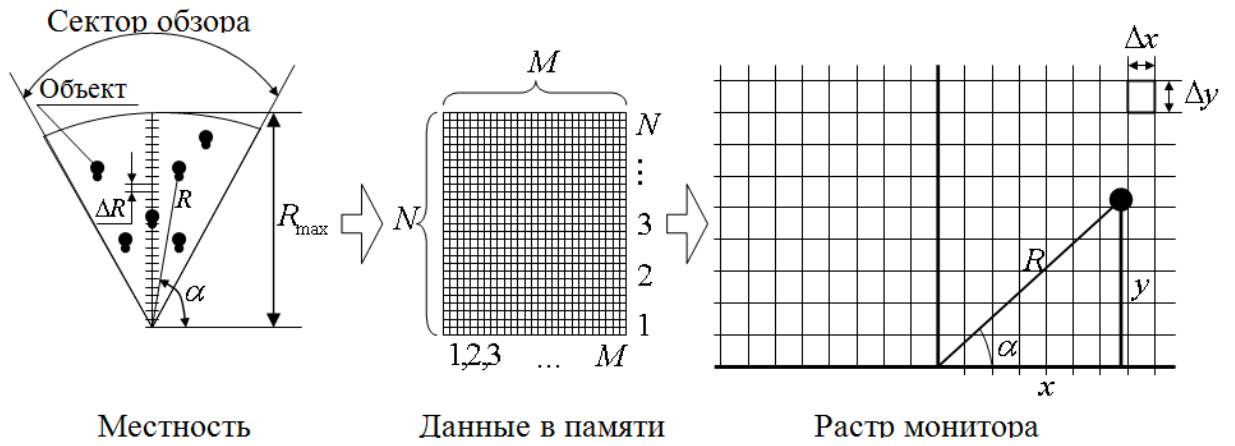


Рисунок 4.13. Схема преобразования координат точки РЛИ от координат на местности до прямоугольных координат на мониторе

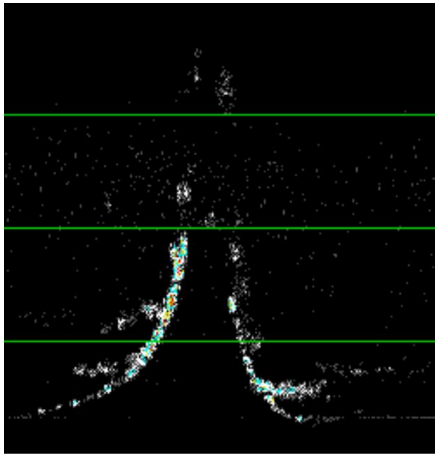


Рисунок 4.14. РЛИ в случае не преобразованных координат

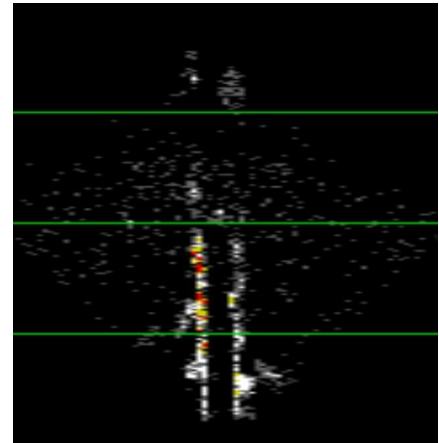


Рисунок 4.15. Преобразованное РЛИ в полярной системе координат

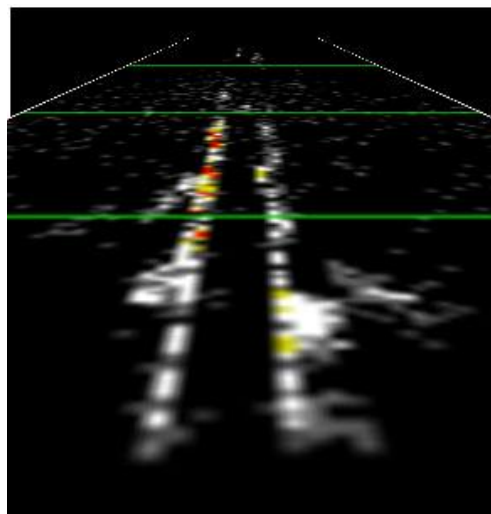


Рисунок 4.16. РЛИ с преобразованием «прямая перспектива»

Алгоритм фильтрации (покадрового усреднения)

Наблюдения отклика от точечной цели показали, что сигнал имеет сильно флюктуирующий по амплитуде характер. Кроме флюктуации амплитуды принятого сигнала мешающим фактором является наличие аддитивных тепловых шумов приёмника, явно заметных на изображении. Поэтому для уменьшения этого влияния кадры РЛИ должны быть подвергнуты фильтрации от шумов и усреднению по выборке.

Введение возможности покадрового усреднения РЛИ (рисунок 4.18) позволяет наблюдать более чёткое изображение, тем самым обеспечивается существенное улучшение качества формируемого РЛИ.

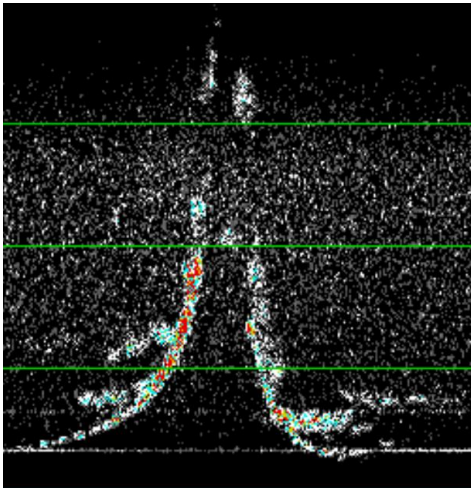


Рисунок 4.17. РЛИ без усреднения

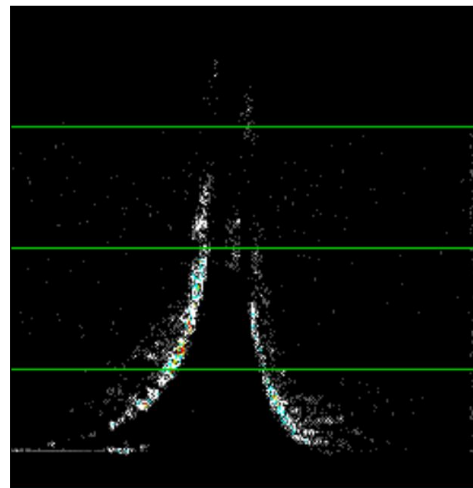


Рисунок 4.18. РЛИ с пяти кадрowym усреднением

Алгоритм квантования РЛИ по интенсивности

РЛИ после процедуры БПФ представляет собой изображение дорожной обстановки в заданном секторе сканирования в градациях серого цвета в координатах азимут-дальность. Очевидно, что такое изображение представляет малоинформативную картинку.

Оператору или водителю, малознакомому с РЛИ, сложно различить объекты, отображённые на экране. Для того чтобы сделать это изображение более понятным для восприятия человеческим глазом можно воспользоваться известным и

достаточно простым алгоритмом квантования изображения по интенсивности. Данный алгоритм позволяет «окрасить» наше изображение и тем самым увеличить его информативность и сделать его более понятным для восприятия.

Метод квантования по интенсивности и цветового кодирования [36] является одним из примеров обработки изображения в псевдоцветах. Обработка изображения в псевдоцветах (называемых также ложными цветами) подразумевает присвоение цветов пикселям полутонового изображения на основе некоторого определённого правила. Термин псевдоцвет, или ложные цвета, используется для того, чтобы отличать цветные изображения, полученные в результате присвоения цветов точкам монохромного изображения, от изображений в натуральных цветах. Основное применение псевдоцветов — это визуализация и интерпретация человеком той информации, которая содержится в полутоновых изображениях или видеопоследовательностях. Основным стимулом к использованию псевдоцветов является то обстоятельство, что человек способен различать тысячи оттенков цвета и только около двух десятков оттенков серого.

Если рассматривать изображение как поверхность в трехмерном пространстве, где интенсивность отвечает третьей пространственной координате, то данный метод можно представлять себе как метод, основанный на проведении плоскостей, параллельных координатной плоскости изображения. Каждая такая плоскость «разрезает» поверхность по области пересечения.

Присвоим каждой из сторон показанной на рис.4.19 плоскости свой цвет, и будем кодировать пиксели, которым отвечают точки поверхности, лежащие выше плоскости, одним цветом, а пиксели, которым отвечают точки поверхности, лежащие ниже плоскости - другим. Точкам, которые соответствуют пересечению плоскости с поверхностью, можно присвоить любой из двух выбранных цветов. В результате мы получаем двухцветное изображение.

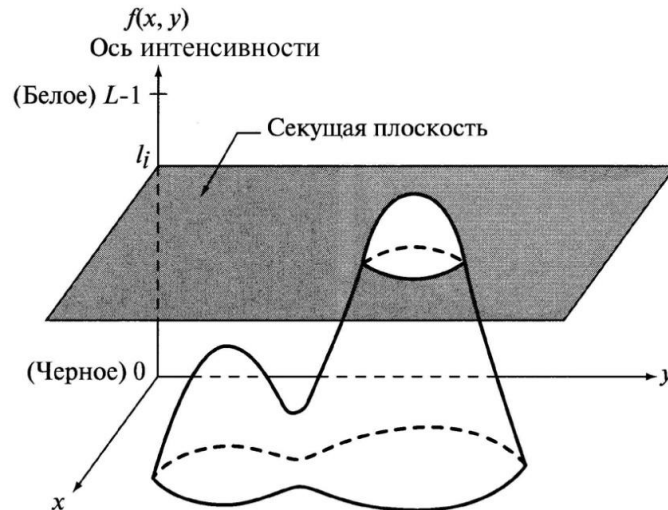


Рисунок 4.19. Геометрическое объяснение алгоритма квантования по интенсивности

Концепция секущих плоскостей полезна, главным образом, для геометрической интерпретации метода квантования.

Рис.4.20 иллюстрирует альтернативный способ построения алгоритма квантования по интенсивности.

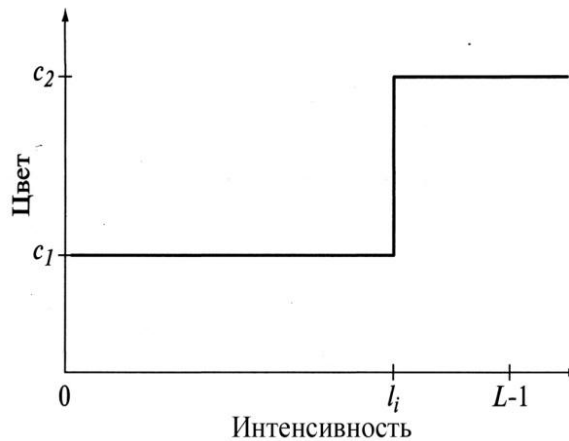


Рисунок 4.20. Альтернативный способ построения алгоритма квантования по интенсивности

Преобразование входного значения в один из двух цветов, в зависимости от того, превышает это значение данную величину l_i или нет, осуществляется при помощи представленной на рис.4.20 функции преобразования. Если использовать большее число уровней, то функция преобразования имеет ступенчатую форму.

Недостаток такого метода состоит в том, что интенсивность, квантованная по диапазонам, которым были поставлены в соответствие различные цвета не учитывает, какую информацию несут значения интенсивности на конкретном изображении.

В диссертации проведена апробация применения алгоритма шестиуровневого квантователя интенсивности сигнала. В результате, весь диапазон интенсивностей РЛ сигналов представляется 6 оттенками, сильно отличающимися друг от друга, и, как следствие, хорошо воспринимается человеческим глазом. Кроме того, в значительной степени уменьшается флуктуация интенсивности.

Значения порогов квантования были выбраны не случайно. Существующий диапазон интенсивностей отражённых сигналов для всех участников дорожного движения и прилегающей местности был разделён на несколько характерных групп. Данное разделение осуществлено по характеристикам и настройкам приёмника АРЛС, а также известного соотношения амплитуды выходного сигнала и значения ЭПР объектов. По результатам экспериментов были определены соотношения амплитуды выходного сигнала приёмника и интенсивности сигнала при формировании РЛИ, что позволило выбрать пороги квантования (Таблица 4.1).

Таблица 4.1 Пороги квантования

Объекты	ЭПР, м ²	Интервал квантования	Цвет
Шум	<0.01	0 ÷ 70	чёрный
Обочина дороги, трава и т.п.	0.01 ÷ 0.1	70 ÷ 127	серый
Люди	0.1 ÷ 1.0	127 ÷ 255	белый
Дорожные знаки, железные ограждения	1.0 ÷ 2.0	255 ÷ 383	синий
Легковые автомобили	2.0 ÷ 10.0	383 ÷ 512	жёлтый
Грузовые автомобили и др. крупные объекты	>10	> 512	красный

Как видно из таблицы 4.1 в интервале квантования от 0 до 70 обычно присутствуют шумы, окрашивая их в чёрный цвет, мы делаем их незаметными, что

позволяет выводить на экран более чёткую картинку. Если значение интенсивности более 512, то данный уровень отражённого сигнала характерен для близко расположенных по дальности объектов, т.е. потенциально опасных для движущегося автомобиля. Поэтому целесообразно данный объект выделять на дисплее красным цветом.

Радиолокационное изображение после процедуры БПФ представляет собой изображение, представленное на рис. 4.21.

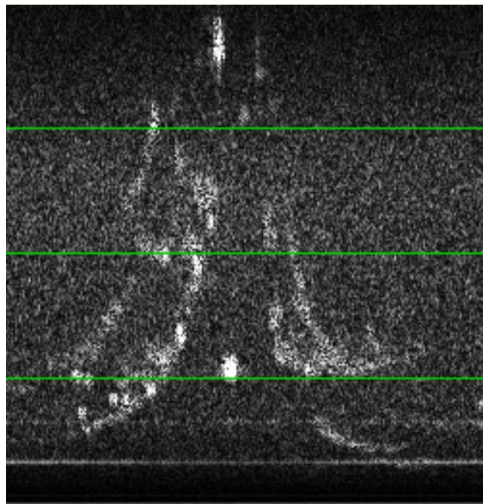


Рисунок 4.21. Исходное РЛИ

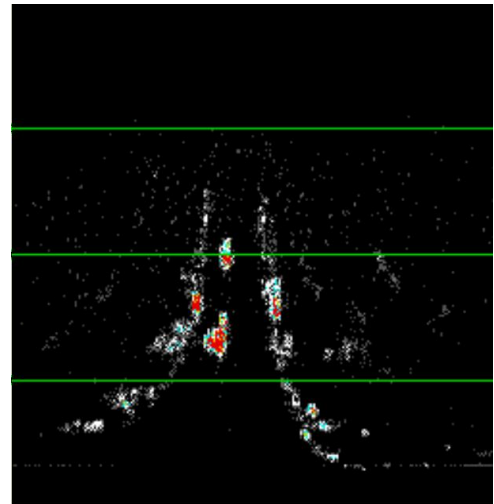


Рисунок 4.22. РЛИ с квантованием по интенсивности

В результате применения алгоритма квантования РЛИ по интенсивности, осуществляется покадровая обработка РЛИ поступающего после БПФ. Каждое значение массива данных сравнивается с определённым значением порога интенсивности, тем самым определяется каким цветом окрасить данный элемент РЛИ (рис. 4.22). Использование алгоритма квантования по интенсивности позволяет акцентировать внимание на отдельные объекты, например автомобили.

Выводы к разделу 4

1. Реализованы важнейшие алгоритмы первичной обработки, визуализации, выделения коридора безопасности, определения расстояния до препятствия, без которых невозможно использование АРЛС по целевому назначению. Предло-

женные алгоритмы обработки апробированы на экспериментальных данных и подтверждена их работоспособность. Вычислительная сложность выбранных алгоритмов позволяет обеспечивать работу в реальном масштабе времени, используя бюджетные (недорогие) технические решения.

2. Разработана структура алгоритмов вторичной обработки РЛИ, позволяющих решать следующие задачи обработки данных в АРЛС: задачи обнаружения и сопровождения представляющих угрозу объектов дорожного движения, измерения дистанции и параметров их движения; обнаружения границ дороги и решение локальной навигационной задачи; формирования интерфейса оператора АРЛС.

3. Разработан многоканальный следящий измеритель расстояния до обочины с использованием априорной информации о характере границы дороги, как распределённой цели. Проведена оценка погрешности измерения расстояния до обочины, которая позволяет решать задачу удержания автомобиля в своей полосе движения.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Сформулированные специфические требования и особенности, на основе проведённого анализа литературы, отличающие АРЛС от РЛС других классов. Показано, что только применение панорамной РЛС переднего обзора со сканированием в азимутальной плоскости и с узким антенным лучом (АРЛС) решает проблему обеспечения безопасности и управления движением ТС в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости. Установлено, что ни одна из панорамных АРЛС до сих пор на рынке не представлена, что доказывает актуальность и практическую значимость исследований, проводимых в диссертации.

2. Установлено, что величина средней ЭПР объекта увеличивается в 6 раз по сравнению с величиной ЭПР этого объекта в свободном пространстве в условиях работы АРЛС при малых углах визирования (менее 100). Показано, что эффект многолучевого распространения отражённых ЭМВ, который возникает при наблюдении объектов на фоне подстилающей поверхности, приводит к существенным флуктуациям интенсивностей отражённого сигнала в требуемом диапазоне дальностей (10-300м).

3. Разработана модель характерной ФЦО на основе экспериментальных исследований макетов АРЛС, позволяющая сформировать исходные данные для проектирования и расчёта основных параметров АРЛС.

4. Введено новое понятие – коридор безопасности, в качестве критерия разделения объектов на опасные и безопасные. Использование данного критерия позволяет обоснованно подойти к выбору параметров антенной системы АРЛС.

5. Предложена и обоснована структурная схема построения АРЛС, которая позволяет удовлетворить сформулированным требованиям к системе.

6. Разработана методика расчёта параметров структурной схемы АРЛС, позволяющая:

- исходя из тактических условий и типа ТС, рассчитать требуемую ширину ДНА по азимуту и углу места, оценить необходимый сектор сканирования антенны в азимутальной плоскости;
- исходя из разрешающей способности по дальности, диапазона рабочих дальностей и наблюдаемых целей определить период модуляции ЗС, количество зондирований в секторе обзора, полосу зондирующего сигнала, диапазон частот сигнала биений, коэффициент усиления ПРМ, количество фильтров БПФ и количество точек индикатора. Показано, что коэффициент подавления внеполосного сигнала накладывает дополнительные ограничения на выбор частоты дискретизации, разрядность АЦП и пропускную способность канала связи на выходе блока ЦОС.

7. Разработан алгоритм многоканального следящего измерителя расстояния до обочины с использованием априорной информации о характере границы дороги, как протяженного объекта. Проведена оценка погрешности измерения расстояния до обочины. Многоканальный следящий измеритель на основе данного алгоритма позволяет решать задачу удержания автомобиля в своей полосе движения.

8. Реализованы алгоритмы первичной обработки, формирования изображения, выделения коридора безопасности, определения расстояния до препятствия, без которых невозможно использование АРЛС по целевому назначению. Предложенные алгоритмы обработки апробированы на экспериментальных данных и подтверждена их работоспособность. Вычислительная сложность выбранных алгоритмов позволяет обеспечивать работу в реальном масштабе времени.

9. Разработана структура алгоритмов вторичной обработки РЛИ, позволяющая решать такие задачи обработки данных в АРЛС, как обнаружение и сопровождение представляющих угрозу объектов дорожного движения; измерение дистанции и параметров их движения; обнаружение границ дороги и решение локальной навигационной задачи; формирование интерфейса оператора АРЛС.

Список сокращений и условных обозначений

АЦП	Аналогово-цифровой преобразователь
АРЛС	Автомобильная радиолокационная станция
БПФ	Быстрое преобразование Фурье
ГВЧ	Генератор высокой частоты
ГУН	Генератор управляемый напряжением
ГТИ	Генератор тактовых импульсов
ДНА	Диаграмма направленности антенны
ДИСС	Доплеровский измеритель скорости и сноса
ДТП	Дорожно-транспортные происшествия
ЗС	Зондирующий сигнал
ИКО	Индикатор кругового обзора
ИК	Инфракрасный
КБ	Коридор безопасности
ЛЧМ	Линейная частотная модуляция
МП	Местные предметы
ПРД	Передатчик
ПРМ	Приемник
ПО	Программное обеспечение
РЛИ	Радиолокационное изображение
РЛС	Радиолокационная станция
СДЦ	Селекция движущихся целей
СМ	Смеситель
СБРЛ	Система ближней радиолокации
СВЧ	Сверхвысокочастотный
ТС	Транспортные средства
УБЛ	Уровень боковых лепестков
УЭПР	Удельная эффективная поверхность рассеяния
ФЦО	Фоноцелевая обстановка

ЦОС	Цифровая обработка сигналов
ЦФ	Цифровой фильтр
ЦКМ	Цифровая карта местности
ЦАП	Цифро-аналоговый преобразователь
ЧМ	Частотная модуляция
ЭПР	Эффективная поверхность рассеяния
ЭМС	Электромагнитная совместимость
ЭВМ	Электронная вычислительная машина
ЭМВ	Электромагнитные волны
ESR	Electronically Scanning Radar, электронно-сканирующий радар
GPS	Global Positioning System, глобальная система позиционирования
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit, монолитная высокочастотная интегральная схема
LRR	Long range radar, радар дальнего действия
SRR	Short range radar, радар ближней дальности

Список литературы

1. Radar Handbook, Third Edition. Editor Merrill I. Skolnik, Copyright © 2008 by the McGraw-Hill Companies, ISBN 978-0-07-148547-0.
2. Communication in Transportation Systems. Editor Otto Strobel, IGI Global, USA, 2013, ISBN 978-1-4666-2976-9.
3. Нуждин В.М., Сулимов Ю.О., Сидоров Н.В., Ключарев М.Ю., Ананенков А.Е. (2001): Влияние переотражений от поверхности Земли на формируемое автомобильной РЛС яркостное изображение. Радиотехника, №3.
4. M. Schneider, V. Groß et al, Automotive 24 GHz Short Range Radar Sensors with Smart Antennas, *German Radar Symposium 2002*, Bonn, September 2002.
5. G. Kühnle, H. Mayer, H. Olbrich et al, Low-Cost Long-Range Radar for Future Driver Assistance Systems, *Auto Technology*, vol. 4/2003, pp. 2-5, 2003.
6. A. Kawakubo, S. Tokoro et al., Electronically-Scanning Millimeter-Wave RADAR for Forward Objects detection, *SAE Congress 2004*, pp. 127-134, Detroit, 2004.
7. Y. Asano, S. Ohshima et al, Proposal of Millimeter-Wave Holographic Radar with Antenna Switching, *Int. Microwave Symposium 2001*, Phoenix, Az, May 2001.
8. R. O. Schmidt, Multiple emitter location and signal parameter estimation,”, *Proc. RADC Spectrum Estimation Workshop*, RADC-TR-79-63, Rome Air Development Center, Rome, NY, Oct. 1979, p. 243 (reprinted in *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-34, pp. 276-280, 1986).
9. Schneider Martin (2005): Automotive Radar – Status and Trends. Robert Bosch GmbH, Corporate Research, *Proceeding of German Microwave Conference - GeMiC 2005*, University of Ulm, Germany, April 5 – 7.
10. Сысоева С. Мир МЭМС. Интеллектуальные автомобильные ассистенты и датчики. Функций – больше, «железа» - меньше. Компоненты и технологии. 2011. № 6.

11. David Bridzolara (2013): Directions of development of automotive radar: the band 79 GHz. Magazine "Organization and road safety, Moscow, Russia, N 4.
12. Шелухин О.И. Радиосистемы ближнего действия, М: «Радио и связь», 1989г, ISBN 5-256-00337-2.
13. S.Sorokin, Выбор тепловизионного оборудования, Алгоритм Безопасности, 2011г., №5.
14. Vladimir Rastorguev, Victor Shnajder – Radiometric sensor of movement speed of vehicles, Proceeding of 12th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2010, Munich, Germany, June 27 - July 1, 2010. IEEE Catalog Number: CFP10485-USB, Print ISBN: 978-1-4244-7797-5 Digital Object Identifier: [10.1109/ICTON.2010.5549089](https://doi.org/10.1109/ICTON.2010.5549089).
15. Штагер Е. А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. Москва: Радио и связь, 1986
16. Ананенков А.Е., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Скосырев В.Н. Особенности оценки характеристик обнаружения в РЛС малой дальности. Радиотехника, №11, 2013г.
17. A.E. Ananenko, A.V. Konovaltsev, V.M. Nujdin, V.V. Rastorguev, V.N. Skosirev, Management of radiated power: A necessary direction of development of radars of land transport systems, 15th International Conference on Transparent Optical Networks Cartagena, Spain, June 23-27 ICTON'2013, Digital Object Identifier: [10.1109/ICTON.2013.6602737](https://doi.org/10.1109/ICTON.2013.6602737), ISSN: 2161-2056
18. Р. Довиак, Д. Зрнич, Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения, Л. Гидрометеиздат 1988.
19. 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.
20. Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Сидоров Н.В., Сулимов Ю.О. АСРВ ММ диапазона, как средство исследования объ-

ектов естественного и искусственного происхождения. «Электроника и информатика», №4, 2002 г.

21. A.E. Ananenko, A.V. Konovaltsev, V.M. Nujdin, V.V. Rastorguev, V.N. Skosirev - "Features of dispersion of wideband probing signals in Radio Vision Systems of the MM – wavelength", Symposium on Sensors for Driver Assistance Systems, September 21-22, 2006, Technische Akademie Heilbronn, Germany.
22. Кухорев А.А., Нуждин В.М., Соколов П.В. «Разработка цифрового модуля авторадара, обеспечивающего предупреждение транспортных средств и устраняющего факторы, сдерживающие дальнейшую коммерциализацию». Труды Всероссийского молодёжного научноинновационного конкурса-конференции «Электроника-2006», Зеленоград, 30 ноября 2006г.
23. Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Кухарев А.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Скосырев В.Н. Особенности построения высокоинформативной системы радиовидения ММ-диапазона длин волн с частотной модуляцией. 2-я Российская научно-техническая конференция «Радиовысотометрия - 2007», Каменск-Уральский, октябрь 2007г.
24. Yevdokymov A. P. and Kryzhanovskiy V. V. Diffraction radiation antennas for SHF and EFH radiosystems, A.Ya. Usikov Institute of Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine, International Conference on Antenna Theory and Techniques, 17-21 September, 2007, Sevastopol, Ukraine, pp. 59-64
25. Andrey Ananenko, Anton Konovaltsev, Vladimir Nujdin, 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
26. Andrey Ananenko, Anton Konovaltsev, Alexey Kukhorev, Vladimir Nujdin, Vladimir Rastorguev, Features of formation of radar-tracking and optical images

- in a mobile test complex of radiovision systems of the car, Journal of Telecommunications and Information Technology, Warsaw, Poland, 1/2009, pp.29-33.
27. Расторгуев В.В., Нуждин В.М., Сидоров Н.В., Сулимов Ю.О. и др. Система радиовидения «АвтоРадар». Электроника: наука, технология, бизнес, №5, 2000г.
28. Нуждин В.М., Сулимов Ю.О., Сидоров Н.В., Ключарев М.Ю., Ананенков А.Е. Влияние переотражений от поверхности земли на формируемое автомобильной РЛС яркостное изображение. Радиотехника, №3, 2001г.
29. Нуждин В.М., Сулимов Ю.О., Сидоров Н.В., Ключарев М.Ю., Ананенков А.Е. Определение коэффициента передачи тракта автомобильного радиолокатора 8-мм диапазона по результатам натурных испытаний. //Радиотехника, №3, 2001г.
30. Нуждин В.М., Сидоров Н.В. Система радиовидения для мониторинга трубопровода, Труды 11-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии - КрыМиКо-2001», Севастополь, ISBN 966-7968-00-6, Украина, 2001г.
31. Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Шевцов В.А. Интерактивная система радиовидения для управления движением наземных транспортных средств в условиях отсутствия оптической видимости, доклад на Международной научно-технической конференции «Инноватика-2004», Сочи, 2004.
32. Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Шевцов В.А. Особенности радиолокационных образов в системах радиовидения ММ-диапазона, С.-П., «Инновации», №6, 2005г., стр. 98-104.
33. Бакалов В.П. Улучшение азимутальной разрешающей способности радиолокационного изображения, Журнал «Информационно-измерительные и управляющие системы», Издательство «Радиотехника», Москва, 2007г.
34. А.Е.Ананенков, А.В.Коновальцев, В.М.Нуждин, П.В.Соколов, В.Н.Скосырев: Статистический подход к радиолокационному распознаванию объектов по дальностным портретам. Труды VI научно-технической

конференции «Радиооптические технологии в приборостроении», г.Туапсе, сентябрь 2008г.

35. В.П.Бакалов, А.А.Кухорев, В.М.Нуждин: Цифровая обработка радиолокационного изображения. Оценка и коррекция азимутальной составляющей сигнальной функции обзорного радиолокатора. Труды VI научно-технической конференции «Радиооптические технологии в приборостроении», г.Туапсе, сентябрь 2008г.
36. Andrey Ananenkov, Anton Konovaltsev, Vladimir Nujdin, Vladimir Rastorguev, Pavel Sokolov, Algorithms of Processing of Radar Images in Radio Vision Systems of the Car, Proceeding of International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON-MW'09, Angers, France, December 10-12th, 2009. IEEE explore, Digital library **E-ISBN:** 978-1-4244-5746-5, Print ISBN: 978-1-4244-5745-8, Digital Object Identifier: [10.1109/ICTONMW.2009.5385559](https://doi.org/10.1109/ICTONMW.2009.5385559)
37. Vladimir Rastorguev, Christian Betz, Otto Strobel, Optimizations of Parameters of the Radiometric Sensor of Movement Speed of Vehicles, Proceeding of 13th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2011, Stockholm, Sweden, June 26 – June 30, 2011. IEEE Catalog Number: CFP10485-USB, Print ISBN: 978-1-4577-0882-4/11/\$26.00 ©2011 IEEE.
38. Ананенков А.Е., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Соколов П.В., Шнайдер В.Б. К вопросу обнаружения линий электропередач вертолётной радиолокационной станцией переднего обзора. Вестник Московского Авиационного Института т.19 №1, 2012г., стр.123-127.
39. В.В.Франтов Автомобильная РЛС (АРЛС) миллиметрового диапазона с непрерывным частотно-модулированным сигналом. Труды II Международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях»: Сборник научных докладов, М: МГСУ, 2010 г., стр.476.
40. Шнайдер В.Б. Обработка радиолокационных изображений РЛС обзора летного поля и обеспечение слежения за малоподвижной целью. Тезисы док-

ладов 10-й Международной конференции «АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА-2011»: СПб, 2011г., стр. 214.

41. О. Растегаев. Демонстрация тормозных сил. Москва, Авторевю, 2001г №1
42. СНиП 2.05.02-85
43. <http://www.lada.ru/>
44. Комаров И.В., Смольский С.М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний - Москва, Горячая линия – Телеком, 2010г., ISBN 978-5-9912-0103-2
45. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. Москва, Радиотехника, 2008, ISBN: 978-5-88070-180-3
46. Бакулев П.А. Радиолокационные системы Москва, Радиотехника, 2004, ISBN 5-93108-027-9
47. Верб В.С. Системы радиуправления. Книга 1. Состояние и тенденции развития систем радиуправления - Москва, Радиотехника, 2013г, ISBN 978-5-88070-347-0
48. Воскресенский Д.И. Канащенков А.И. Активные фазированные антенные решетки - Москва, Радиотехника, 2004г., ISBN 5-93108-045-7
49. Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Шнайдер В.Б. Обоснование структуры и расчет параметров автомобильного радиолокатора. Радиооптические технологии в приборостроении: рабочие материалы научно-технической конференции, п. Небуг, Краснодарский край, Россия, 31 августа – 6 сентября 2014 г.
50. 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.
51. Шнайдер В.Б. [и др.]. Микроволновый датчик определения дистанции вертолётной системы пожаротушения. Журнал «Известия вузов. Авиационная техника». 2014. №4.

- 52.Шнайдер В.Б. [и др.]. Система радиовидения для автоматизированного управления движением транспортной колонны. Радиооптические технологии в приборостроении: рабочие материалы научно-технической конференции, п. Небуг, Краснодарский край, Россия, 1-7 сентября 2013г. стр. 305 – 314.
- 53.Шнайдер В.Б. [и др.]. Отражения от водной поверхности при использовании сверхкороткоимпульсной радиолокационной станции. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск №76, 2014.
- 54.Safety of helicopter transport by means of remote sensing. A.E. Ananenko, V.M. Nuzhdin, V.V. Rastorguev, P.V. Sokolov Victor Shnajder. 14th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2012, Coventry, England, July 2 – 5, 2012
- 55.Ananenko Andrey, Nuzhdin Vladimir, Rastorguev Vladimir, Sokolov Pavel, Shnajder Victor. System radiovision for movement automation of the vehicles column. ICTON'2014, Graz, Austria, July 6th – 10th, Mo.D7.2.