

На правах рукописи



ШНАЙДЕР ВИКТОР БОРИСОВИЧ

**РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ
НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва-2014

Работа выполнена на кафедре радиоприемных устройств Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

- Научный руководитель - Кандидат технических наук, доцент
Расторгуев Владимир Викторович
- Официальные оппоненты - Доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
ОАО «РТИ им. А.Л. Минца»
Шмелев Александр Борисович
- Кандидат технических наук, начальник от-
дела по разработке радиолокационных
комплексов космического базирования
ОАО «НИИ ТП»
Коваленко Александр Иванович
- Ведущая организация: - ФГУП «Центральный научно-
исследовательский радиотехнический ин-
ститут имени академика А.И Берга»

Защита диссертации состоится «23» декабря 2014 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу:

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

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте www.mai.ru и в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.03, д.т.н., профессор



М.И. Сычев

Актуальность темы исследования

При управлении транспортными средствами (ТС) в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости задача обеспечения безопасности движения является чрезвычайно актуальной.

Известны различные системы для решения данной задачи, такие как адаптивный круиз - контроль, система предупреждения столкновений в полосе движения автомобиля, система удержания автомобиля в полосе движения и другие. Ключевым элементом таких систем, как систем автоматического управления, является датчик обнаружения препятствий. В зависимости от назначения все датчики этих систем можно разделить на: оптические, ультразвуковые и радиолокационные.

Оптические датчики видео и инфракрасного (ИК) диапазонов широко применяются в автомобилях, однако объединяет их серьезный недостаток: неработоспособность в условиях отсутствия оптической видимости (дождь, снег, туман, пыль).

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

Поэтому основным датчиком, который сохраняет свою работоспособность в условиях отсутствия оптической видимости и тем самым обеспечивает безопасность движения, является радиолокационный датчик, например, автомобильный радар (АР). В настоящее время производителями предлагается рынку несколько таких АР: радары ближней зоны < 50м, которые работают в диапазоне 24 ГГц; радары дальней зоны < 250м, которые работают в диапазоне 77 ГГц.

Основные недостатки существующих АР заключаются в следующем: низкая азимутальная и дальностная разрешающая способность, ограниченный азимутальный сектор обзора, низкая информативность радиолокационного изображения (РЛИ) и отсутствие возможности обнаруживать границы дороги. Эти недостатки не позволяют с помощью таких АР решить задачу обеспечения безопасности движения, а также управления автомобилем при ограниченной или отсутствии оптической видимости.

Поэтому решение этих задач для ТС возможно только при использовании панорамного радиолокатора переднего обзора малой дальности с высоким пространственным разрешением. Такой радиолокатор, имея очень высокую информативность РЛИ, фактически является системой радиовидения ТС.

Создание панорамных РЛС переднего обзора ТС связано с целым рядом технических трудностей таких как: выбор частотного диапазона, типа зондирующего сигнала, адекватной антенной системы, приёмо-передающего модуля, модуля

ля цифровой обработки сигнала и соответствующего программно-аппаратного комплекса. В результате, во всем мире создано всего несколько образцов таких РЛС: например, радар системы “DISTRONIC PLUS” компании Mercedes-Benz, радар ESR (Electronically Scanning Radar) компании Delphi Automotive.

Исследованиями, связанными с поставленными в диссертации проблемными задачами, занимались различные группы учёных и исследователей, как в нашей стране, так и за рубежом. Прежде всего, необходимо отметить основополагающие работы таких выдающихся учёных в области радиолокации, как профессор П.А.Бакулев, профессор Ю.Г.Сосулин, профессор Скосырев В.Н.. Большое влияние на разработку и создание первых панорамных РЛС для ТС (прежде всего автомобильных РЛС - 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 с частотной модуляцией (ЧМ) зондирующего сигнала миллиметрового (ММ) диапазона длин волн. Однако работы по анализу статистических характеристик рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) на объектах дорожной инфраструктуры не были осуществлены, не были рассмотрены вопросы построения модели фоноцелевой обстановки (ФЦО) в таких АРЛС.

В целом 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 поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие основные 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 и угловой ориентации автомобиля 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 автомобильной РЛС и обобщения данных известных источников определены закономерности статистических характеристик рассеяния ЭМВ различными объектами дорожной инфраструктуры и ТС при настильных углах визирования, и построена модель фоноцелевой обстановки 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 учётом 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:

- 12th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2010, Munich, Germany, June 27 - July 1, 2010.
- 10-й Международной научно-технической конференции «АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА-2011»: СПб, 2011г.
- 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 6 - 10, 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 введения четырех глав, заключения и списка использованных источников. Иллюстративный материал представлен в виде 43 рисунков и 12 таблиц. Список литературы включает 55 наименования.

Содержание работы

Во введении описана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследований, приведена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены известные технические решения проблемы обеспечения безопасности движения ТС в условиях отсутствия оптической видимости. Показано, что решение данной проблемы заключается в использовании панорамного радиолокатора переднего обзора (АРЛС) с высоким пространственным разрешением. Сформулированы специфические особенности АРЛС, отличающие данный радар от других классов РЛС, а именно:

- необходимость отслеживания динамичных объектов на сверхмалых дальностях требует высокого темпа получения и обновления информации на индикаторе, соизмеримого с темпом обновления в телевизионных системах;
- разрешающая способность радиолокационного датчика должна позволять выделять препятствия (автомобиль, человек и т.д.) в пределах собственной полосы движения на дистанции не менее длины тормозного пути и должна составлять 1-2 м по дальности и менее 1° в плоскости сканирования;
- высота подъёма фазового центра антенной системы над поверхностью дороги очень мала и практически находится в интервале 0,4-2 м, что обуславливает малые (настильные) углы падения ЭМВ на наблюдаемую поверхность;
- в разрешённом для АРЛС частотном диапазоне (24 и 77 ГГц) асфальтовое покрытие дороги, над которым ВСЕГДА находится антенная система АРЛС, представляет собой практически зеркальную отражающую поверхность, что обуславливает многолучевое распространение ЭМВ и приводит к значительным флюктуациям интенсивности принятого сигнала;
- малая дальность нахождения объектов наблюдения от АРЛС при высоких характеристиках направленности антенны приводит к тому, что цели находятся не только в дальней зоне антенны, но и в промежуточной зоне Френеля или в ближней зоне, что требует учёта этих факторов при расчётах ширины диаграммы направленности (ДНА) и коэффициента усиления антенной системы;

- ключевое требование к АРЛС это низкая стоимость, малые вес и габариты радиолокационного оборудования, низкое энергопотребление.

Приводятся результаты исследований и технические характеристики экспериментальных макетов АРЛС ММ-диапазона длин волн, созданных в научном коллективе кафедры радиоприёмных устройств МАИ. Анализ этих исследований позволил определить и перечень нерешённых задач, в частности:

- отсутствуют завершённые исследования статистических характеристик рассеяния ЭМВ на объектах дорожной обстановки естественного и искусственного происхождения, что не позволяет построить адекватную модель фоноцелевой обстановки для АРЛС;
- отсутствуют методика проектирования тракта приёма и обработки отражённого сигнала в АРЛС;
- отсутствуют исследования, направленные на параметрическую оптимизацию основных модулей тракта приёма и обработки сигнала в АРЛС;
- отсутствуют требования к программно-аппаратному комплексу АРЛС;
- не разработаны, программно не реализованы и практически не апробированы алгоритмы обработки РЛИ для получения изображения в удобном для водителя формате.

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

Вторая глава диссертации посвящена разработке модели фоноцелевой обстановки (ФЦО) в АРЛС. Данная модель базируется на основе анализа статистических характеристик рассеяния ЭМВ на подстилающей земной поверхности, а также на протяжённых объектах искусственного происхождения, расположенных на такой поверхности. Модель ФЦО строится на основании обобщения известных данных литературных источников и анализа экспериментальных результатов характеристик отражения, полученных при помощи макета АРЛС.

Модель ФЦО включает в себя:

1. Априорные сведения о параметрах движения ТС и характеристиках дорожной обстановки: дорога прямая или имеет небольшой изгиб, настильные углы визирования, парность обочины, известна номенклатура объектов искусственного происхождения, которые являются препятствиями.

2. Измеренные характеристики рассеяния различных типов подстилающей поверхности и различных объектов (ЭПР, УЭПР), а также законы распределения отражённых сигналов.

При построении модели ФЦО необходимо учитывать тот факт, что автомобили, участвующие в дорожном движении, находятся на асфальтовом покрытии, которое для ЭМВ ММ-диапазона может считаться «зеркально отражающим». В этом случае неизбежно многолучевое распространение зондирующего и отражённого от «цели» сигнала. Условия, при котором возникает этот эффект, приведены на рисунке 1.

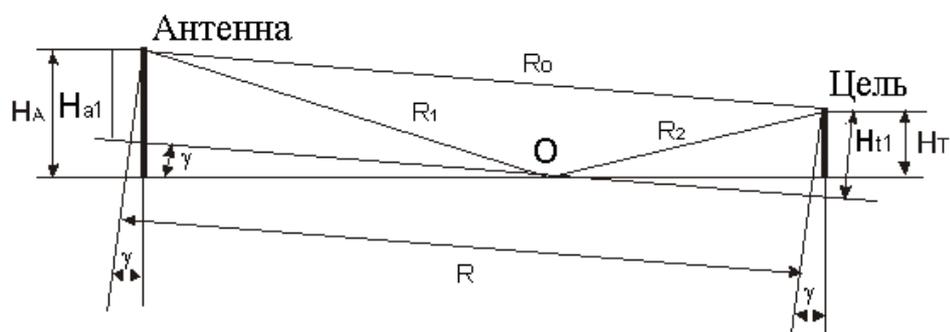


Рисунок 1. Геометрия расположений фазового центра антенны и объекта

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):

$$H_{t1} = H_t - \Delta H, \quad H_{a1} = H_a + \Delta H, \quad \Delta H = \gamma \frac{R_0}{2} \quad (1)$$

Учитывая полученные соотношения в формуле (1) получим зависимость величины ЭПР: $S_{\text{ЭФ}}$ от случайного угла наклона отражающей поверхности:

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

Считая, что угол наклона поверхности отражения γ носит случайный характер и характеризуется нормальным законом распределения $W(\gamma)$, получаем выражение для среднего значения ЭПР:

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

Графики зависимости средней ЭПР $\langle S \rangle$ от дальности до цели при различных значениях дисперсии угла наклона γ_s поверхности отражения представлены на

рисунке 2 для трёх значений СКО σ_γ : 0.2° , 0.1° , 0.05° . Высота подвеса антенны и высота подвеса цели составляет 1,5 м.

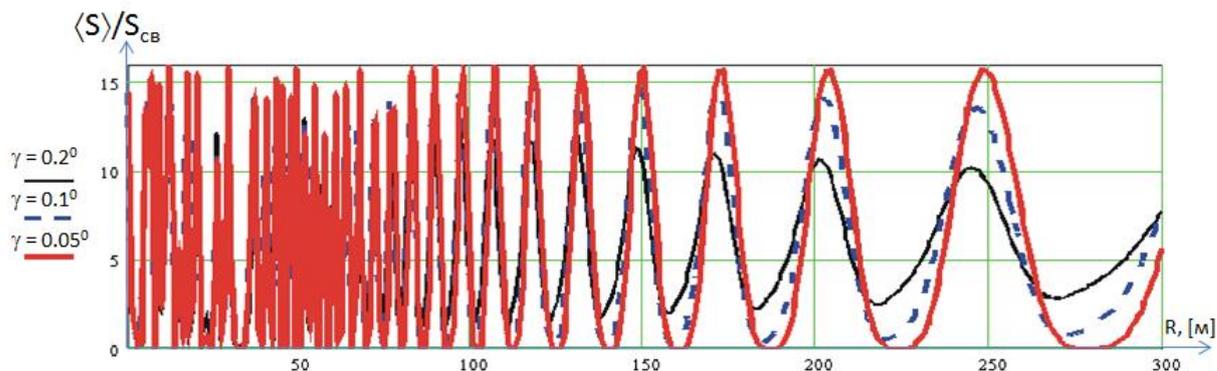


Рисунок 2. Зависимость $\langle S \rangle$ от дальности до цели при различных значениях дисперсии угла наклона γ

Анализ показал, 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 приёмного тракта АРЛС.

Следует отметить, что приведённые в литературе данные по характеристикам ЭПР объектов, таких как человек, автомобиль, необходимо дополнить данными по ЭПР объектов дорожной инфраструктуры, которые в литературе практически не представлены. Так же в открытых источниках нет данных по величинам УЭПР подстилающих поверхностей при настильных углах визирования менее 10 градусов

Для анализа характеристик ЭПР и УЭПР проведены исследования результатов натурных испытаний макета АРЛС ММ-диапазона в типовых дорожных ситуациях. Данный анализ экспериментальных данных позволил получить недостающие сведения о характеристиках рассеяния ЭМВ для таких объектов, как обочина, металлические ограждения, столбы освещения, кромка леса, человек на дороге.

Результаты оценки величины ЭПР для различных типов обочины дороги, полученные при обработке РЛИ, представлены в таблице 1.

Таблица 1. ЭПР обочины дороги

R [м]	30	60
S_{ϕ} [м ²]	0,1 - 0,6	0,3 - 1,1

В диссертации проведён статистический анализ экспериментальных данных макета АРЛС, который позволил оценить диапазон ЭПР обочины для различных типов дороги (таблица 1), металлических ограждений ($10 \div 100 \text{ м}^2$) и других объектов дорожной инфраструктуры и прилегающей местности. В процессе анализа

проведена оценка ЭПР человека ($3 \div 13 \text{ м}^2$). Результаты измерений хорошо совпадают с опубликованными данными.

Проведена оценка характерных величин УЭПР подстилающих и распределённых поверхностей (таких как, песок, трава, открытый грунт), который составил 0.002 – 0.08. Учтена интерференция за счет многолучевого распространения. На основании данного анализа с учётом обобщения известных опубликованных результатов была построена модель характерной ФЦО для АРЛС.

Полученная модель ФЦО является необходимым источником исходных данных для создания методики проектирования АРЛС.

Третья глава диссертации посвящена разработке инженерной методики проектирования АРЛС.

АРЛС, как было показано выше, относится к РЛС малой дальности, разработке и исследованию отдельных аспектов которых посвящена масса работ. Сформулированные в главе 1 особенности АРСЛ позволяют ввести достаточно чёткие ограничения и показатели качества при проведении поиска структуры АРЛС и последующей параметрической оптимизации параметров системы.

Наиболее адекватной структурной схемой, которая обеспечивает требуемую разрешающую способность по дальности (1-2 м), заданный размер «слепой» зоны и отвечает критерию минимальной стоимости, является структура РЛС с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) зондирующего сигнала (ЗС) и приёмником гомодинного типа (рисунок 3).

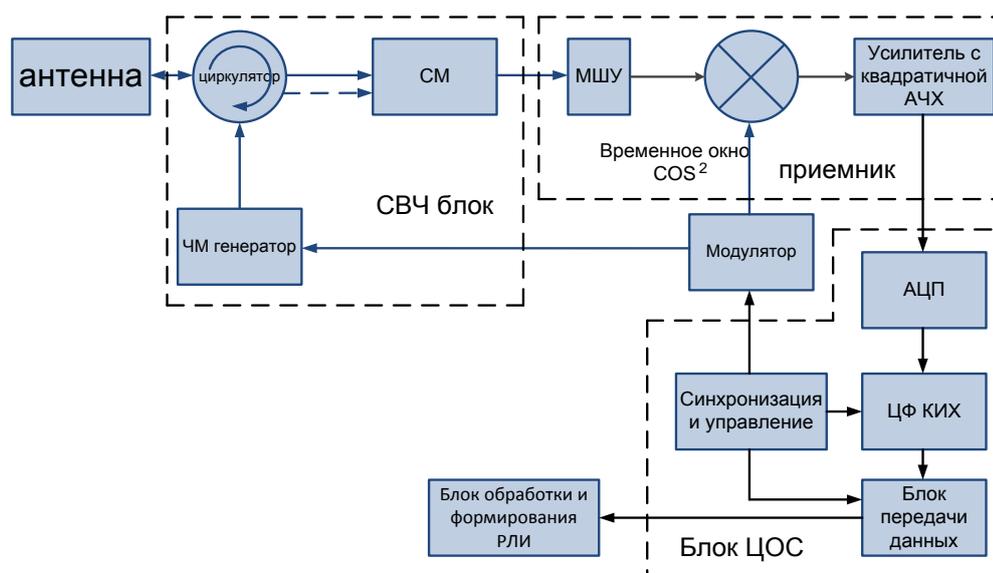


Рисунок 3. Структурная схема АРЛС

Гомодинный приёмник АРЛС с непрерывной ЛЧМ зондирующего сигнала строится по классической квазиоптимальной корреляционной схеме, которая реа-

лизует частотное сжатие широкополосного принятого сигнала в смесителе и его последующее усиление в относительно узкой полосе частот.

В работе представлена методика расчета параметров элементов структурной схемы. Входные данные, необходимые для расчёта АРЛС, задаются исходя из предъявляемых технических требований к АРЛС, с учетом специфики ее применения и ФЦО.

Пример методики расчета параметров структурной схемы АРЛС приведён в диссертации для следующих исходных данных: разрешающая способность АРЛС по дальности 1.5 м; дальность действия 250 м; ширина ДНА в азимутальной плоскости 1^0 , в угломестной плоскости 20^0 ; темп обзора 10 Гц. Для таких тактических характеристик АРЛС были получены следующие параметры приёмопередающего тракта: частота модуляции: $F_m=8$ кГц; девиация частоты: $F_{dev}=150$ МГц; максимальная частота биений на входе приёмника: $f_p=2.4$ МГц;

Во второй главе было показано, что наблюдаемые в АРЛС объекты характеризуются следующими диапазонами значений ЭПР $S_{эф} = 1 - 100$ м² и УЭПР $S_{эф} = 0.01 - 0.1$ м².

В соответствии с выбранной структурной схемой построения АРЛС сигнал с антенны попадает напрямую на вход балансного смесителя, коэффициент шума которого составляет 13 дБ. Такой подход позволяет существенно снизить стоимость АРЛС.

Для мощности передатчика $P_{ПРД} = 70$ мВт, коэффициента усиления антенны $G = 400$ и длины волны $\lambda = 8$ мм, на графиках (рисунок 4) представлена зависимость максимальной частоты модуляции от требуемого отношения сигнал/шум на дальности 100 м при различных величинах ЭПР.

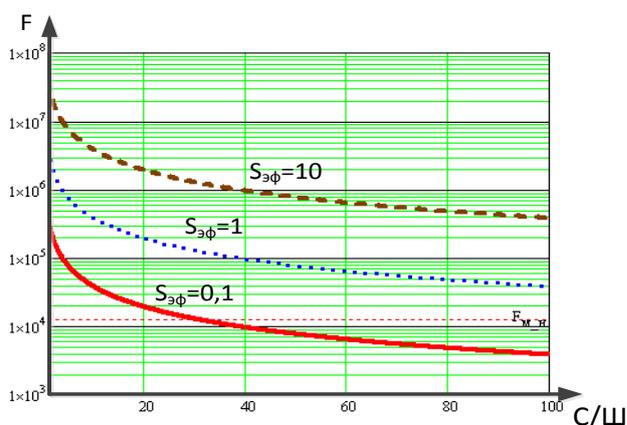


Рисунок 4. Зависимость частоты модуляции от требуемого отношения сигнал/шум на дальности 100 м для различных величин ЭПР

Из графиков (рисунок 4) видно, что отношение сигнал/шум при обнаружении объектов с ЭПР: 1 – 100 м² и при использовании ЛЧМ сигнала выбранной длительности, превышает пороговое значение обнаружителя (с $F_{ЛТ} = 10^{-6}$, $F_{ПО} = 0.5$) до дальностей 300 м.

Динамический диапазон принимаемых сигналов определяется выражением:

$$D = \frac{P_{MAX}^{PP}}{P_{MIN}^{PP}} = \frac{S_{ЭФ}^{MAX}}{(R_{MIN})^4} \cdot \frac{(R_{MAX})^4}{S_{ЭФ}^{MIN}}.$$

В результате для рассмотренных выше дальностей и параметров отражения объектов эта величина составит: $D = 120$ дБ, а с учётом интерференции достигает величины 132 дБ. Для уменьшения динамического диапазона принимаемых сигналов применяется известная в практике радиовысотометрии частотная коррекция. Отличием от радиовысотомера, в АРЛС применяется квадратичная характеристика АЧХ усилительного тракта, которая компенсирует зависимость мощности отраженного сигнала от дальности, устраняя множитель $(R_{MAX})^4 / (R_{MIN})^4$.

Тогда АЧХ квадратического корректора с учётом значений частоты девиации и модуляции АРЛС, указанных выше, принимает вид, приведённый на рисунке 5.

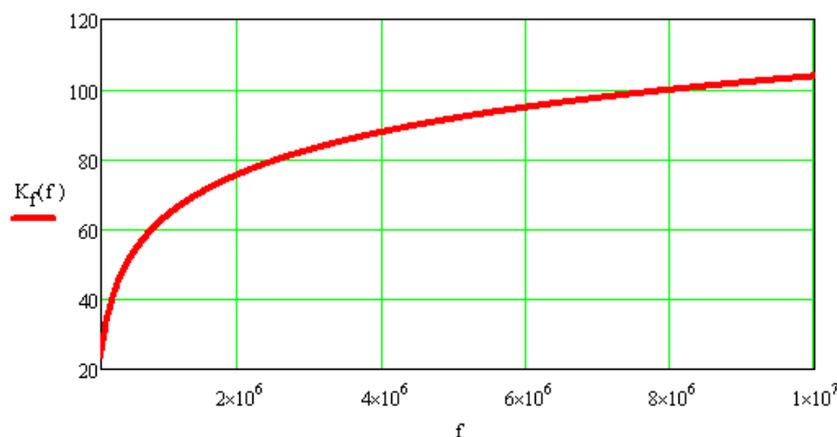


Рисунок 5. Квадратичная АЧХ усилителя

Необходимо отметить, что при выборе параметров приёмного тракта обеспечено линейное усиление сигналов, пришедших от отражателей, расположенных на максимальной дальности, до уровня $P_{0MAX} = 10-20$ мВт, что соответствует амплитуде сигнала 1-2 вольт на нагрузке АЦП - 100 Ом.

В то же время, применение квадратичной характеристики АЧХ приводит к существенному возрастанию уровня боковых лепестков функции неопределённости ЗС. Для устранения этого эффекта в приёмнике АРЛС необходимо ввести специальную весовую обработку отражённого сигнала, которая заключается в операции умножения сигнала на функцию временного окна типа $\cos^2\left(\pi \cdot \frac{t}{T_M}\right)$.

На рисунке 6 представлены графики функций неопределённости ЗС для исходного сигнала биений $S_1(f)$, сигнала с учётом частотной коррекции $S_2(f)$ и сигнала, на выходе частотного корректора с учётом модуляции функцией временного окна $S_3(f)$.

Как следует из рисунка 6, введение функции временного окна компенсирует негативные факторы частотного корректора, но при этом снижает потенциал сигнала и разрешающую способность АРЛС примерно в два раза. Это обстоятельство требует внесения поправочных коэффициентов при выборе мощности излучения и частоты девиации ЗС.

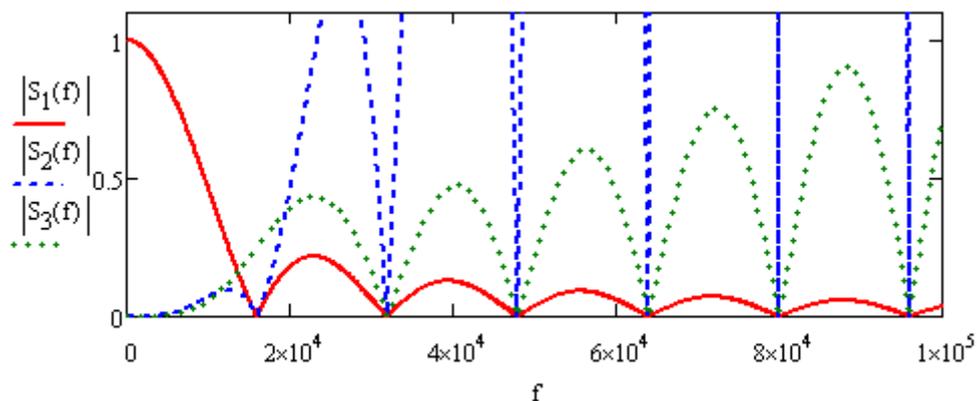


Рисунок 6. Спектры сигнала биений при частотной коррекции и модуляцией временным окном

Разработанная методика инженерного расчета параметров блоков структурной схемы АРЛС позволяет: 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. Определена структура погрешностей АРЛС.

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

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию и разработке программно-алгоритмического обеспечения АРЛС.

Комплекс алгоритмов 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 границ дороги сопряжена с рядом трудностей принципиального характера, а именно: из-за движения автомобиля обочина постоянно меняется (меняется расстояние от отражателей до края полосы движения, а также УЭПР края дороги). Таким образом, необходимо обнаружить и отслеживать дистанцию в определённых угловых каналах до распределённой, сильно флюктуирующей цели. Предложенные ниже алгоритмы ограничены случаем прямого участка дороги или пологого поворота. Случаи сложных развязок и перекрёстков в диссертации не рассматривались.

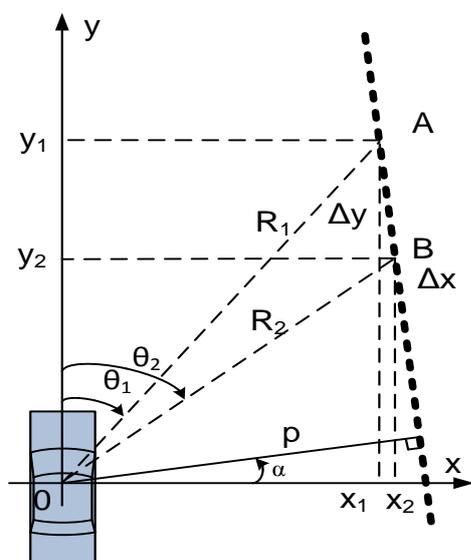


Рисунок 7. Расположение автомобиля на дороге

В работе показано, что при сканировании в азимутальной плоскости, последовательно облучая участки поверхности дорожного полотна и окружающей местности (рисунок 7) под углами θ_1 и θ_2 и измеряя дальности R_1 и R_2 , можно сформировать оценку расстояния от автомобиля до обочины: $p = R_1 \sin(\theta_1 - \alpha) = R_2 \sin(\theta_2 - \alpha)$ и угла отклонения оси ТС от направления дорожного полотна:

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

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

Каждый i -й канал измерителя анализирует сечение РЛИ по дальности (рисунки 8,9,10).



Рисунок 8. Оптическое изображение

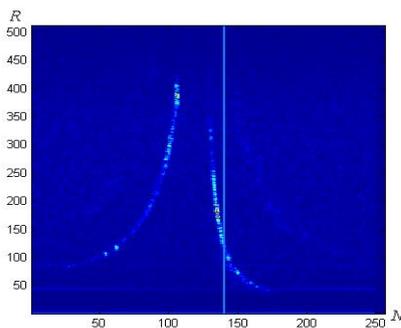


Рисунок 9. Радиолокационное изображение

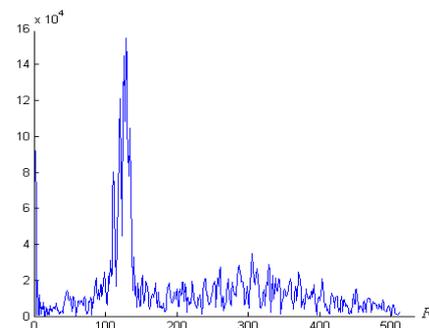


Рисунок 10. Сечение РЛИ по дальности

На рисунке 8 представлено оптическое изображение асфальтовой дороги, а на рисунке 9 синхронное ему РЛИ, сформированное при помощи АРЛС, на котором показано вертикальной линией сечение РЛИ по дальности (рисунок 10).

Задача построения границ дорожного полотна сводится к определению дальности до обочины во всех направлениях θ , в которых происходит зондирование, и последующим статистическим расчётом искомым параметров p и α (рисунок 7). Данную задачу можно разбить на следующие этапы:

Задаётся диапазон допустимых значений величины $\alpha \in [-5^\circ, 5^\circ]$, $p \in [\frac{d_m}{2}, n_n d_n + \frac{d_m}{2}]$, где d_m – ширина автомобиля, d_n – ширина полосы движения, n_n – количество полос движения. Данный диапазон выбирается исходя из априорных сведений о типах дороги и ширины полосы движения.

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 зондирования (сечения РЛИ по азимуту).

Границы зоны поиска по дальности зависят от номера канала

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

Азимутальный сектор обзора разделяется на сектор поиска левой и правой обочины

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

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

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

В итоге на радиолокационном изображении выбирается область, где происходит измерение расстояния до обочины (рисунок 11).

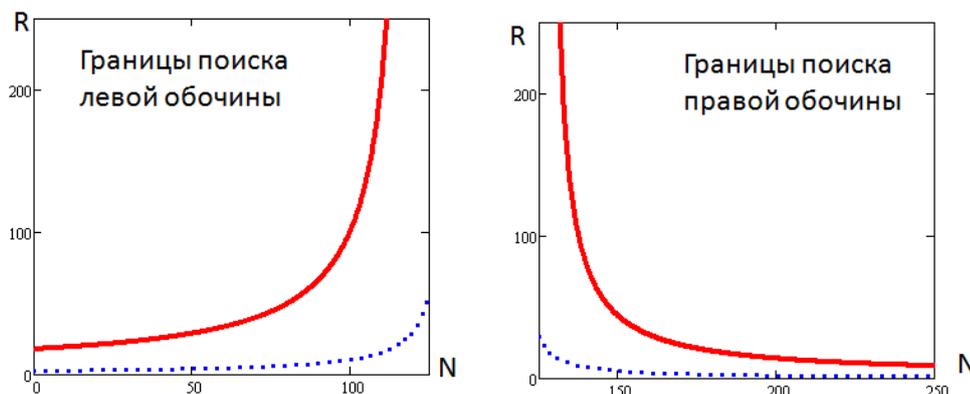


Рисунок 11. Границы поиска обочины

На рисунке 11 пунктирной линией показана ближняя граница зоны поиска, а сплошной линией – дальняя граница.

Вычисление значений p_L , p_R , α осуществляется, используя оценки дальности до границы дорожного полотна в каналах (R_i):

$$\left\{ \begin{array}{l} p_R(N_i, R_i) = R_i \sin\left(\Theta_{view}\left(\frac{N_i}{N_{3u}} - \frac{1}{2}\right) + \alpha\right) \\ p_L(N_i, R_i) = -R_i \sin\left(\Theta_{view}\left(\frac{N_i}{N_{3u}} - \frac{1}{2}\right) + \alpha\right) \\ \alpha(N_i, R_i) = \arctan\left(\frac{R_i \sin\left(\Theta_{view}\left(\frac{N_i}{N_{TX}} - \frac{1}{2}\right)\right) - R_{i-1} \sin\left(\Theta_{view}\left(\frac{N_{i-1}}{N_{TX}} - \frac{1}{2}\right)\right)}{R_i \cos\left(\Theta_{view}\left(\frac{N_i}{N_{TX}} - \frac{1}{2}\right)\right) - R_{i-1} \cos\left(\Theta_{view}\left(\frac{N_{i-1}}{N_{TX}} - \frac{1}{2}\right)\right)}\right) \end{array} \right.$$

Вычисление средних значений M и среднеквадратических отклонений σ для оценочных значений p и α осуществляется по формулам:

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

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

Фильтрация аномальных точек.

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

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

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.

Решение задачи предотвращения столкновений обеспечивается обнаружением препятствий и последующим манёвром ТС или торможением. Критерием разделения объектов на препятствия и неопасные объекты является **коридор безопасности** (КБ) - область пространства перед автомобилем вдоль дороги (рисунок 10), ограниченная по длине и ширине:

$$- \text{ширина коридора безопасности } d = d_m + d'_m,$$

где d_m – ширина автомобиля, d'_m – запас по расстоянию с учетом возможных погрешностей измерений, прямолинейности движения автомобиля и возможной подвижности препятствий.

- длина коридора безопасности

$$L = L_{трм}(V) + V T_{обн} + V T_{обр},$$

где: V – скорость движения автомобиля, $L_{трм}$ – тормозной путь, $T_{обн}$ – время обнаружения препятствия, $T_{обр}$ – время, необходимое на обработку сигнала об обнаружении препятствия системой управления автомобилем. Исходя из оценок длины тормозного пути автомобиля и времени реакции на препятствие, максимальная длина коридора безопасности составляет 80 – 100 м, минимальная дальность 1-3 м.



Рисунок 12. Коридор безопасности

На рисунке 12 обозначено:

1. зона риска
2. границы коридора безопасности
3. металлическое ограждение
4. граница дорожного полотна
5. кромка леса

Задача алгоритма обнаружения препятствий (рисунок 13) заключается в обнаружении превышений порога по шумам в пределах КБ.

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

Разработанные алгоритмы, результаты работы которых представлены на рисунке 13, 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.



Рисунок 13. Определение дальности до автомобиля в пределах КБ

Формирование интерфейса оператора. Одна из основных задач алгоритмов обработки РЛИ в АРЛС заключается в представлении информации таким образом, чтобы она легко воспринималась слабо подготовленным в области радиолокации оператором. Поэтому для удобства восприятия оператором целесообразно проводить преобразование исходного цифрового массива РЛИ по результатам первичной обработки, формируемого в координатах дальность-азимут, в более удобную систему координат.

Результат преобразования координат представлен на рисунке 14.

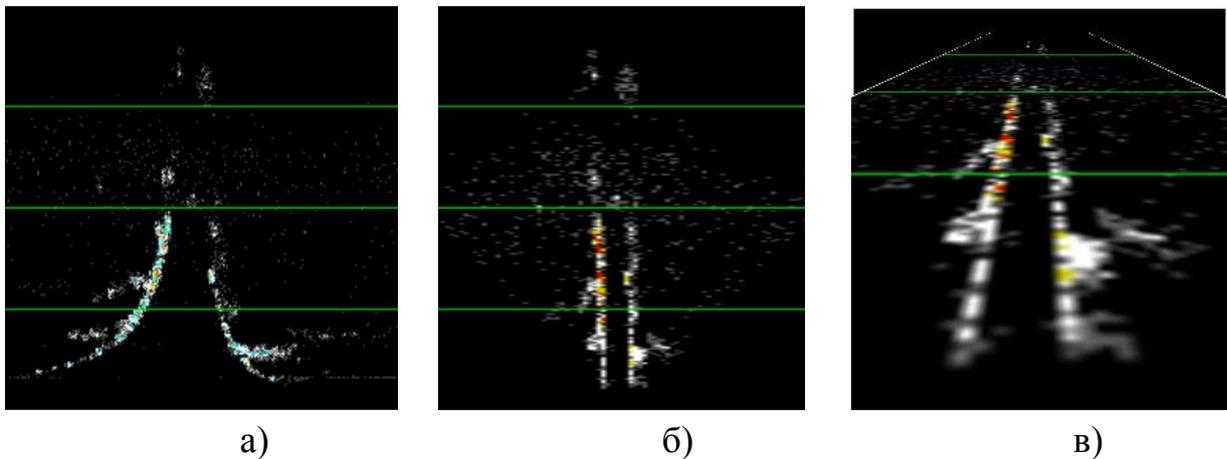


Рисунок 14. РЛИ в случае а) не преобразованных координат;
 б) преобразованное РЛИ в полярных координатах;
 в) РЛИ с преобразованием «прямая перспектива»

Основной недостаток полярной системы координат (рисунок 14б) - интерполяция значений радиолокационного сигнала на малых дальностях в область изображения меньшей площади, что может приводить к потере данных, причём в наиболее важной зоне непосредственно перед ТС.

Преобразование в вид «прямой перспективы» с одной стороны позволяет потерять меньше информации в ближней зоне (наиболее значимой для обнаружения препятствий) и с другой стороны позволяет представить объекты на местности в привычном для оператора виде (с меньшими искажениями).

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 10^0). Показано, что эффект многолучевого распространения отражённых ЭМВ, который возникает при наблюдении объектов на фоне подстилающей поверхности, приводит к существенным флюктуациям 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. Предложена и обоснована структурная схема построения АРЛС, которая позволяет удовлетворить сформулированным требованиям к системе.

5. 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 способности канала связи на выходе блока ЦОС.

6. Разработан алгоритм многоканального следящего измерителя расстояния до обочины с использованием априорной информации о характере границы доро-

ги, 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.

7. 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.

8. Реализованы алгоритмы первичной обработки и формирования панорамного РЛИ, выделения коридора безопасности, определения расстояния до препятствий, 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 их 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. 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.

2. Обработка радиолокационных изображений РЛС обзора летного поля и обеспечение слежения за малоподвижной целью / Шнайдер В.Б. / Тезисы 10-й международной конференции «Авиация и космонавтика-2011»: 2011г., стр. 214.

3. 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.

4. Ананенков А.Е., Коновальцев А.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Соколов П.В., Шнайдер В.Б. 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.

5. 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. 2012. т.19, №1, стр. 123-127.

6. Ананенков А.Е., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Шнайдер В.Б. Отражения от водной поверхности при использовании сверхкороткоимпульсной радиолокационной станции // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск №76, 2014.

7. Ananenkov Andrey, Nuzhdin Vladimir, Rastorguev Vladimir, Sokolov Pavel, Shnajder Victor. System radiovision for movement automation of the vehicles column // 16th International Conference on Transparent Optical Networks - ICTON'2014, Graz, Austria, July 6th – 10th, Mo.D7.2.

8. Ананенков А.Е., Морозов Г.А., Нуждин В.М., Карпышев А.В., Расторгуев В.В., Шнайдер В.Б. Микроволновый датчик определения дистанции вертолётной системы пожаротушения // Журнал «Известия вузов. Авиационная техника». 2014. №4.

9. 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.

10. 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.