

На правах рукописи

БУЙ ЧИ ТХАНЬ

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В РАДИОЛОКАТОРАХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ
СТОЛКНОВЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Специальность: 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва-2016

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

- Научный руководитель - Доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоприёмные устройства» МАИ
Расторгуев Владимир Викторович
- Официальные оппоненты - Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ОАО «РТИ им. А.Л. Минца»
Шмелев Александр Борисович
- Кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства», МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нониашвили Михаил Ильич
- Ведущая организация - АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР»

Защита диссертации состоится « 27 » декабря 2016 г. в 11-30 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 « » октября 2016 года.

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

М.И. Сычев

Актуальность работы

Одной из главных причин увеличения количества несчастных случаев на дороге является ограниченная оптическая видимость, вызванная наличием дождя, тумана, снега, дыма, пыли и т.п. Эта ситуация серьезно обостряется в осенний и весенний периоды для участков дорог со сложным рельефом с резкими (в десятки метров) перепадами высот, особенно в странах с большой плотностью дорожного движения. Поэтому проблема обеспечения безопасного движения транспортных средств (ТС) в условиях ограниченной оптической видимости является чрезвычайно актуальной.

Развитие технологий создания информационных датчиков и микроконтроллеров приблизили распространение интеллектуальных систем безопасности движения ТС, к которым относятся системы помощи водителю. Для обеспечения безопасного движения автомобиля в настоящее время используются различные датчики: видео и инфракрасные, радарные, лазерные и ультразвуковые, а также датчики дождя и уровня освещённости.

Многие современные автомобили оборудуются системами помощи водителю и датчиками от таких компаний, как Bosch, Denso, Eaton, Hella, Melexis, Mitsubishi, Osram, Valeo и Raytheon.

В последние годы для обеспечения движения ночью, на автомобилях начинают активно применяться ИК - камеры (Forward Looking InfraRed - FLIR), которые формируют изображение подобно обычным видеокамерам, но используют для этого диапазон невидимого света (с длиной волны 3-5 или 8-15 мкм). Однако наличие снега, дождя, дыма и тумана с высокой плотностью является ограничением для применения стандартных видео- и ИК камер.

Ультразвуковые датчики помощи водителю при парковке, основанные на измерении расстояния между автомобилем и препятствием, имеют ограниченную дальность действия (< 10 м).

Важнейшим преимуществом радарных датчиков является их нечувствительность к погодным условиям, сезонам и времени суток. Кроме того, радары характеризуются большой дальностью действия, широкой областью обзора и высоким пространственным разрешением.

В настоящее время в мире для повышения безопасности движения ТС производится много радаров, в первую очередь для автомобилей и судов. По дальности работы автомобильные радиолокаторы предупреждения столкновения (РПС) подразделяют на радары: большой дальности (Long Range Radar - LRR) - для систем автоматизированного круиз-контроля (АКК), средней дальности (Medium Range Radar - MRR) для предупреждения перекрестного движения и помощи при смене полосы, и малой дальности (Short-Range Radar - SRR), которые обнаруживают препятствия/пешеходов на малой дальности.

Известные автомобильные радары (АР) **малой дальности (SRR)** обычно имеют максимальную дальность обнаружения до 50м, сектор обзора в азимутальной плоскости лежит в пределах $\pm 65^\circ$, поддержки АКК и парковки.

Радиолокационный датчик **средней дальности (MRR)** компании Bosch, который работает в диапазоне частот 76 - 77 ГГц, является стандартом для АР практически во всех странах мира. При этом, вариант этого АР для переднего обзора имеет угол обзора по азимуту до ± 45 градусов и дальность обнаружения до 160 метров от автомобиля-носителя. Вариант MRR обзора позади автомобиля имеет угол обзора по азимуту до ± 75 градусов и дальность до 90 метров.

АР **большой дальности (LRR)** позволяет наблюдать объекты в диапазоне от 10 до 250м. Основной функцией этих радиолокаторов является обеспечение работы системы АКК. Например, радарный датчик AC20 TRW Automotive выполняет измерение расстоя-

ния в диапазоне 1 - 200 м с точностью 1 м, измерение скорости в диапазоне до 250 км/ч с точностью $\pm 0,1$ км/ч и сканирование по азимуту в угловом секторе $\pm 6^\circ$ с точностью $\pm 0,3^\circ$.

Проведённый обзор известных достижений в области создания современных радарных датчиков показал их основные недостатки:

1. Ограниченная информативность формируемого радиолокационного изображения (РЛИ) дороги, автомобилей, препятствий и окружающей местности, обусловленная недостаточной разрешающей способностью радаров по дальности и азимуту.

2. Ограниченность азимутального сектора обзора (апертурный угол порядка 12°) в дальней зоне обнаружения ($R > 120$ м), что не позволяет осуществить обнаружение препятствий в повороте и за ним.

3. Невозможность одновременного измерения двух горизонтальных составляющих вектора скорости автомобиля, что в условиях скользкой дороги и при плохой оптической видимости приводит к съезду автомобилей в кювет.

Поэтому современные АР не могут решить комплексную задачу предупреждения столкновений, а также управления (в том числе, автоматизированного) автомобилем при ограниченной или отсутствии оптической видимости.

Проблемными задачами, связанными с проектированием РЛС обеспечения безопасности движения, занимались различные учёные, как в России, так и других странах. Прежде всего, необходимо отметить основополагающие работы таких выдающихся российских учёных в области радиолокации, как профессор П.А.Бакулев, профессор Ю.Г.Сосулин, профессор В.Н.Скосырев. 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. Кроме того, вопросы разработки радиолокаторов ближней дальности рассмотрены в трудах Шелухина О.И., Елистратова В.В., Ананенкова А.Е., Шнайдера В.Б. Среди зарубежных учёных необходимо отметить труды: M.Skolnik, P.Russer, R.Rollman, M. Schneider, R.Schmidt.

В МАИ на кафедре 407 разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец панорамной РЛС обзора пространства ближнего радиуса действия, который в силу очень высокой информативности его РЛИ получил название системы радиовидения (СРВ). Созданная СРВ обладает высоким дальномерным и азимутальным пространственным разрешением, а также высокой скоростью обновления информации в реальном времени, соизмеримой с телевизионными системами.

Поскольку основной задачей СРВ является своевременное обнаружение препятствий на дороге и предотвращение столкновения с ними, то в дальнейшем РЛС такого типа будем называть радаром предупреждения столкновений (РПС).

При создании РПС было решено большое количество задач, однако, работы по анализу статистических характеристик рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) на таких объектах, как: автомобили, объекты дорожной инфраструктуры в РПС не были завершены. Не были рассмотрены вопросы влияния параметров антенной системы на характеристики обнаружения объектов в РПС, не рассмотрены вопросы измерения горизонтального вектора скорости, не рассмотрены алгоритмы обработки радиолокационных изображений (РЛИ) для их адекватного восприятия водителем. Поэтому можно констатировать, что вопросы построения алгоритмов формирования и обработки РЛИ остаются открытыми и разработка эффективных методов обработки сигналов в РПС ТС является актуальной задачей.

Результаты этих исследований должны обеспечить:

– расширение возможностей и областей применения РПС в различных (не только автомобильных) ТС;

- повышение эффективности методов обработки отраженных сигналов в РПС,
- расширение функциональных возможностей РПС за счет высокой информативности РЛИ;
- адекватность формируемого для водителя РЛИ.

Цель работы – разработка эффективных алгоритмов обработки сигналов в радарх предупреждения столкновений транспортных средств для измерения расстояния и скорости сближения с опасными объектами в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие основные задачи:

1. На основании проведённого сравнительного анализа затухания ЭМВ миллиметрового (ММ) и инфракрасного (ИК) диапазона длин волн в гидрометеорах и пыли, подтверждены преимущества ММ диапазона и обоснован выбор частотного диапазона для проектирования РПС.

2. Проведён анализ технических характеристик РПС, важных для проектирования радара, в частности, оценены характеристики рассеяния ЭМВ на объектах движения и дана оценка влияния уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенны (ДНА) РПС на характеристики разрешения объектов - участников движения.

3. Разработан корреляционный алгоритм измерения горизонтальных составляющих вектора скорости автомобиля и дана оценка погрешностей измерения.

4. Проведён анализ погрешностей измерения координат, наблюдаемых на РЛИ объектов (в том числе, погрешности измерения углового положения автомобиля относительно оси дороги и расстояния до границы дороги), на основе которого даны рекомендации по выбору технических параметров РПС.

5. Разработан новый алгоритм повышения качества визуализации РЛИ на экране РПС, позволяющий облегчить его восприятие оператором (водителем).

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Проведен анализ влияния уровня боковых лепестков ДНА РПС в азимутальной плоскости при одновременном наблюдении объектов дорожной инфраструктуры (автомобили, пешеходы и т.п.) с разницей в величине эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) более 20 дБ, подтвердивший возможность их раздельного наблюдения.

2. Разработан корреляционный алгоритм измерения горизонтальных составляющих вектора скорости автомобиля, основанный на оценке смещения максимума взаимно-корреляционной функции (ВКФ) последовательных кадров РЛИ, полученных при движении автомобиля, позволяющий измерить не только путевую скорость, но и скорость сноса автомобиля, которую невозможно измерить никаким другим датчиком.

3. Предложен новый алгоритм нелинейного масштабирования РЛИ, который позволяет повысить качество визуализации объектов на экране монитора РПС, особенно когда автомобили двигаются на узком участке дороги и при малом азимутальном расстоянии между объектами движения.

Практическая значимость диссертации состоит в следующем:

1. Разработанный в диссертации корреляционный алгоритм измерения двух горизонтальных составляющих вектора скорости автомобиля позволяет обеспечить маневрирование и управление его движением в условиях скользкой дороги и при плохой оптической видимости.

2. На основании выполненного в диссертации анализа погрешностей измерения координат наблюдаемых объектов, границы дороги и угла отклонения строительной оси автомобиля от оси дороги, доказана возможность повышения точности определения границ

коридора безопасности в РПС, и, тем самым, повышения безопасности движения автомобиля.

3. Разработанное прикладное программное обеспечение, реализующее алгоритм нелинейного масштабирования РЛИ, позволяет обеспечить его обработку и отображение оператору (водителю) в реальном масштабе времени.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ влияния уровня боковых лепестков ДНА в азимутальной плоскости в радиолокаторе предупреждения столкновений, подтвердивший возможность раздельного наблюдения объектов дорожной инфраструктуры (автомобили, пешеходы и т.п., по основному и боковому лепестку) с разницей в величине эффективной поверхности рассеяния более 20 дБ.

2. Корреляционный алгоритм измерения горизонтальных составляющих вектора скорости автомобиля, основанный на оценке смещения максимума взаимно-корреляционной функции (ВКФ) последовательных кадров РЛИ, полученных при движении автомобиля, позволяющий измерить не только путевую скорость, но и скорость сноса автомобиля, которую невозможно измерить никаким другим датчиком.

3. Алгоритм нелинейного масштабирования панорамных РЛИ, позволяющий увеличить безопасность движения за счет улучшения визуального отображения объектов (участников движения) на экране монитора РПС при малом ($< 1^\circ$) азимутальном разрешении между объектами движения на дальности свыше 100 м.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов статистического анализа, применением адекватных методик инженерного проектирования РПС, а также экспериментальной проверкой предложенных алгоритмов обработки РЛИ, полученных в результате натурных испытаний макета РПС.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы были использованы при проведении научных исследований, выполненных совместно с сотрудниками НИО кафедры радиоприёмных устройств МАИ, а также в лекционном курсе «Радиотехнические системы видения транспортных средств», читаемом студентам факультета «Радиоэлектроника летательных аппаратов» МАИ.

Личный вклад автора состоит в следующем:

- проведён сравнительный анализ преимуществ применения ММ диапазона длин волн по сравнению с ИК диапазоном при работе РПС в гидрометеорах и пыли;
- проведён анализ технических требований к РПС, в частности, оценены характеристики рассеяния ЭМВ на объектах движения и дана оценка влияния уровня боковых лепестков ДНА РПС в азимутальной плоскости при одновременном наблюдении объектов (участников движения) с большой (> 20 дБ) разницей в величине ЭПР;
- разработан корреляционный алгоритм измерения горизонтальных составляющих вектора скорости автомобиля и проведена оценка потенциальной точности измерения;
- разработан алгоритм нелинейного масштабирования РЛИ при его отображении на экране РПС.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- XII Молодёжная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь - перспективные технологии». Москва, Россия, 11 декабря 2014.
- 17th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2015, Budapest, Hungary, 5-9 July, 2015.
- XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2016». Москва, Россия, 12-15 апреля 2016.

- XXII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, Россия, 19-21 апреля 2016.

Публикации. Результаты исследований, выполненных в диссертации, представлены в 6 печатных трудах, в том числе в 2 статьях в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 4 тезисах докладов научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 109 машинописных листах и состоит из 5 глав, введения, заключения и списка использованных источников. Иллюстративный материал представлен в виде 62 рисунков и 14 таблиц. Список литературы включает 68 наименований.

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 для уточнения требований к параметрам передатчика и приёмника РПС на основании аналитического обзора литературы проведено сравнение затухания ЭМВ ММ и ИК диапазона длин волн в гидрометеорах и пыли.

Проведённый анализ затухания ЭМВ в гидрометеорах и пыли показал, что РПС ММ диапазона сохраняет высокую эффективность работы в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости в отличие от камер ИК диапазона, и позволяет решить проблему обеспечения безопасности движения автомобиля в этих условиях.

Во второй главе диссертации приведены результаты анализа технических характеристик РПС, важных для проектирования радара, в том числе:

- результаты анализа характеристик рассеяния ЭМВ от наблюдаемых объектов, расположенных на различных типах земной поверхности, и наблюдаемых под настильными углами;
- результаты сравнительного анализа методов повышения разрешающей способности РПС при измерении угловых (в первую очередь, азимутальных) координат объектов;
- результаты оценки влияния уровня боковых лепестков ДНА РПС на характеристики различения объектов с большой (> 20 дБ) разницей в величине ЭПР.

Данные результаты, полученные в процессе выполнения диссертационной работы, базируются на многолетних исследованиях РЛС ММ диапазона длин волн, которые проведены учёными кафедры радиоприёмных устройств Московского авиационного института (национального исследовательского университета). На рис. 1 приведён экспериментальный макет РЛС ММ диапазона, а на рис. 2 внешний вид мобильного испытательного комплекса.



Рисунок 1. Экспериментальный макет



Рисунок 2. Мобильный стенд

Основные характеристики экспериментального макета РПС приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики РПС

Дальность действия, м	5 - 250
Разрешение по дальности, м	< 1
Разрешение по азимуту, градус	1
Рабочая частота, ГГц	39
Мощность излучения, мВт	60
Антенна:	волноводно-щелевая
Сектор сканирования антенны по азимуту, градус	60 - 120
Координаты изображения	азимут-дальность
Число информационных точек изображения, за один кадр	256 × 512
Энергопотребление	< 100 Вт (12 - 24 В)
Скорость обновления информации	8-10 (Гц)

В результате анализа технических характеристик РПС установлено следующее:

1. Величины ЭПР (УЭПР) шероховатой поверхности (асфальт, бетон, пашня, поверхность покрыта растительностью и др.) изменяются в большом диапазоне ($1 \div 10^{-5}$) для углов визирования $\theta \leq 85^{\circ}$. Известная зависимость мощности отражающего сигнала от величин ЭПР наблюдаемых объектов и дальности R до них, позволила оценить динамический диапазон приёмника РПС, выбрать его энергетические характеристики при проектировании, а также группировать и распознавать наблюдаемые в РПС объекты.

2. Использование методов сверхразрешения, основанных на анализе корреляционной матрицы сигналов, таких как MUSIC, ESPRIT позволяет обеспечить достаточную разрешающую способность по угловой координате с малым размером антенной системы. Однако эффективность данных методов обеспечивается только в случае небольшого угла обзора в азимутальной плоскости по сравнению с волноводно-щелевой антенной в рассматриваемой РПС. Кроме того, применение антенной решётки с современными методами обработки сигналов требует выполнения ряда технических параметров используемых сигналов, параметров приёмных каналов, и также требует большого количества каналов радиолокационного приёмника, что существенно повышает стоимость РПС.

3. Учитывая нелинейный характер АЧХ усилительного тракта приемника РПС в зависимости от дальности, которая имеет вид: $K_{прм}(R) = K_0 R^{\alpha}$, ($2 \leq \alpha \leq 3$), установлено, что влияние уровня боковых лепестков ДНА на характеристики наблюдения объектов на дороге с большой разницей (> 20 дБ) в величине ЭПР является незначительным.

Проведённые многочисленные лабораторные и экспериментальные исследования показали, что РПС позволяет сформировать панорамное РЛИ на экране монитора в заданном угловом секторе на дальностях от 5 до 250 м в координатах азимут-дальность с требуемым разрешением и в реальном времени. Обработка результатов натурных испытаний, выполненная в диссертации, подтвердила расчётные значения технических характеристик РПС.

Третья глава диссертации посвящена разработке алгоритма измерения горизонтальных составляющих вектора скорости движения автомобиля с помощью РПС в случае

утраты сцепления колёс с дорогой или недостаточной оптической видимости (сильный дождь, снег и т.п.).

Так как РПС установлен на подвижном носителе, то смещение РЛИ по азимуту и дальности может произойти не только из-за движения носителя, но и из-за присутствия случайных нестабильностей. Причинами данных нестабильностей являются:

1. Изменения уровня яркости между кадрами, которые связаны со случайным характером принятого отраженного от наблюдаемых объектов сигнала, а также изменением рассеивающих свойств наблюдаемых объектов в процессе движения радара, так и шумами внешнего и внутреннего происхождения.

2. Нестабильности формирования РЛИ по углу азимута, которые вызваны нестабильностью скорости вращения антенны РПС.

3. Присутствием несколько движущихся объектов в пределах формируемого изображения. В результате на пространственной ВКФ может возникать несколько пиков, положение которых соответствует различным векторам движения каждого из объектов.

Для уменьшения влияния негативных факторов и, как следствие, увеличения точности измерения горизонтального вектора скорости необходимо осуществить дополнительную фильтрацию результатов измерений, например, использовать алгоритм покадрового усреднения (рис. 3) или алгоритм медианной фильтрации (рис. 4).

Для алгоритма покадрового усреднения вектора скорости автомобиля горизонтальные составляющие вектора скорости автомобиля вычисляются по следующим формулам:

$$V_{OY} = \frac{F\delta_R}{3} \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 n_{R,i}, [м/с], \quad V_{OX} = V_{OY} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{12} \sum_{i=1}^4 n_{\alpha,i} \delta_{\alpha} \right), [м/с].$$

По алгоритму медианной фильтрации вектора скорости автомобиля, приведённому на рис. 4, конечной оценкой вектора скорости будет считаться усреднённое значение второго и третьего сдвига РЛИ после фильтрации. В данном случае горизонтальные составляющие вектора скорости автомобиля вычисляются по следующим формулам:

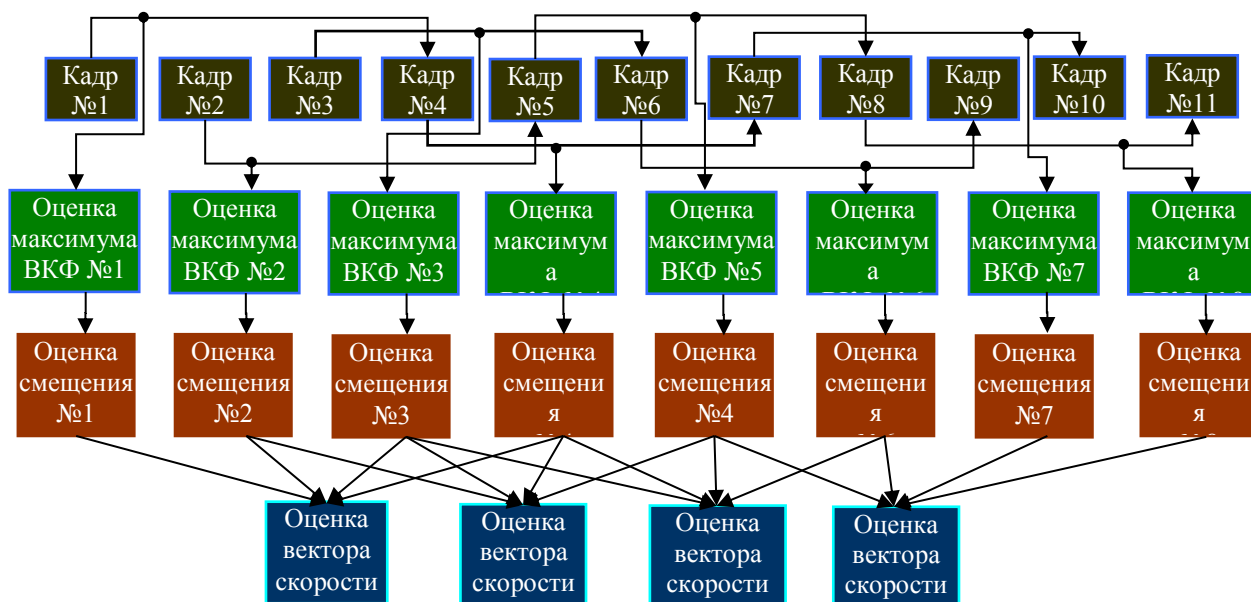


Рисунок 3. Алгоритм покадрового усреднения оценок горизонтального вектора скорости автомобиля через четыре последовательных кадров

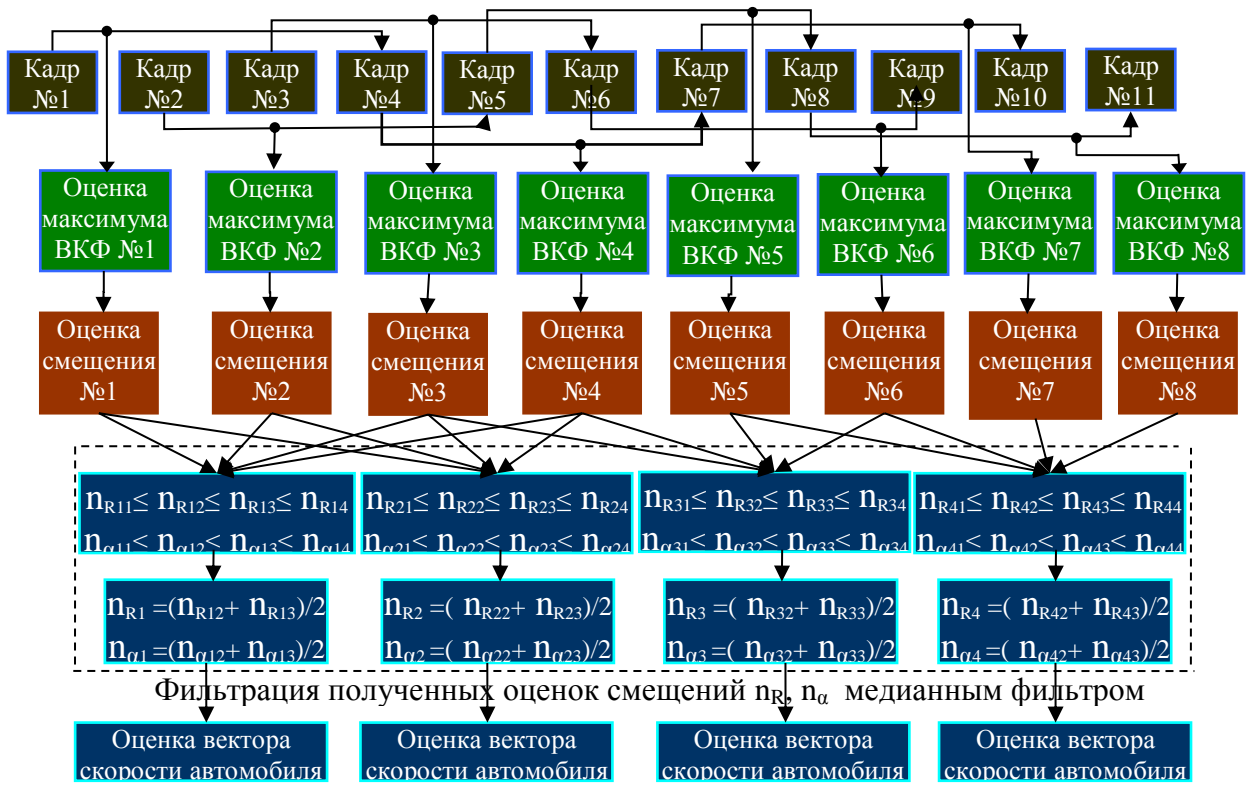


Рисунок 4. Алгоритм медианной фильтрации оценок горизонтального вектора скорости автомобиля через четыре последовательных кадра

$$V_{OY} = \frac{F\delta_R}{3} \frac{1}{2} \sum_{i=2}^3 n_{R,i}, [M/c], \quad V_{OX} = V_{OY} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{6} \sum_{i=2}^3 n_{\alpha,i} \delta_{\alpha} \right), [M/c],$$

здесь: F - темп обзора в РПС (кадров в секунду), δ_R и δ_{α} - размеры дискрета по дальности и азимуту, соответственно, n_{α} - вычисленный сдвиг по азимуту, n_R - вычисленный сдвиг по дальности

На рис. 5а,б приведены оптическое изображение (ОИ) и синхронное ему РЛИ участка дороги, формируемое в макетном образце РПС, на рис. 6- двумерная ВКФ двух кадров РЛИ (1-го и 6-го кадра), а на рис. 7а,б - нормированные сечения ВКФ по дальности и азимуту, соответственно, по двум кадрам (для 1-го и 2-го кадра, 1-го и 3-го, 1-го и 4-го, 1-го и 5-го, 1-го и 6-го, 1-го и 7-го, 1-го и 8-го).



Рисунок 5а. ОИ участка дороги



Рисунок 5б. РЛИ того же участка дороги

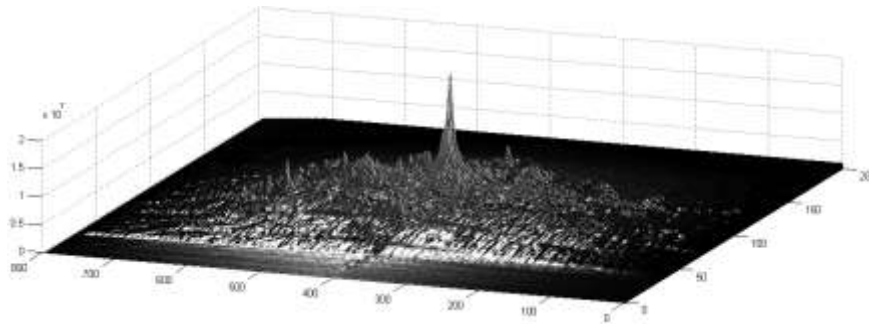


Рисунок 6. Двумерная ВКФ по двум кадрам РЛИ

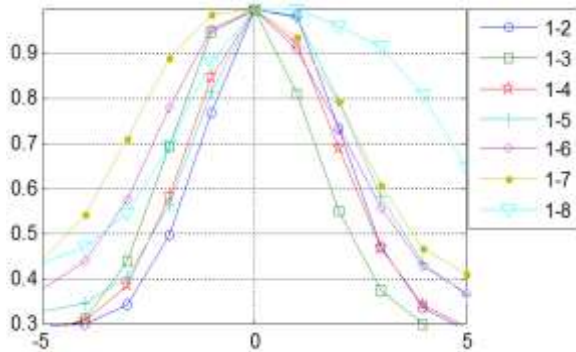


Рисунок 7а. Нормированные сечения ВКФ по дальности

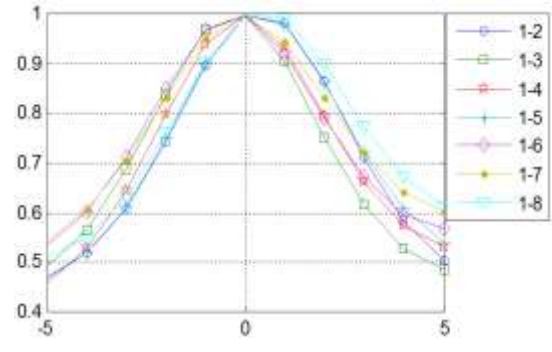


Рисунок 7б. Нормированные сечения ВКФ по азимуту

Анализ сечений ВКФ, приведённых на рис. 7 показывает, что:

- характеристики ВКФ (максимум, ширина, количество мод) зависят от свойств соседних двух кадров. Степень корреляции двух кадров РЛИ k и $k+j$ уменьшается при большом значении j ;
- одномодовый характер ВКФ позволяет сделать вывод о её пригодности для использования в анализируемом измерителе скорости;
- в случае работы алгоритма в области, в пределах которой присутствует несколько других движущихся объектов, точность измерения скорости автомобиля не будет снижаться.

В общем случае, если применяется корреляционный алгоритм между k и $k+j$ кадром ($j = 1, 2, 3 \dots$), то модуль горизонтальных составляющих вектора скорости автомобиля вычисляется по следующим формулам:

1. По алгоритму усреднения вектора скорости:

$$V_{OY} = F\delta_R \left(\frac{1}{(4j)} \sum_{i=1}^4 n_{R,i} \right), [M/c], \quad V_{OX} = V_{OY} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{(4j)} \sum_{i=1}^4 n_{\alpha,i} \delta_{\alpha} \right), [M/c],$$

2. По алгоритму медианного фильтра вектора скорости:

$$V_{OY} = F\delta_R \left(\frac{1}{(2j)} \sum_{i=2}^3 n_{R,i} \right), [M/c], \quad V_{OX} = V_{OY} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{(2j)} \sum_{i=2}^3 n_{\alpha,i} \delta_{\alpha} \right), [M/c],$$

Из данных выражений следует, что погрешность измерения горизонтальных составляющих вектора скорости (V_{OY}, V_{OX}) автомобиля определяется погрешностью оценки смещения n_R и n_{α} .

Обработка результатов натурных испытаний макетного образца РПС (рис. 8), позволяет оценить эффективность данных алгоритмов.



Рисунок 8а. ОИ лоцируемой сцены

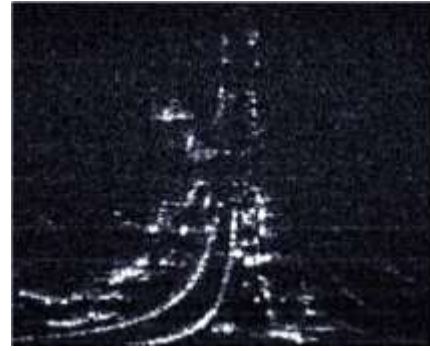


Рисунок 8б. РЛИ той же сцены

На рис. 9 приведена зависимость усреднённых значений оценки смещения максимума ВКФ $\left(\frac{1}{4j} \sum_{i=1}^4 n_{R,i}\right)$, $\left(\frac{1}{2j} \sum_{i=2}^3 n_{R,i}\right)$ от величины j .

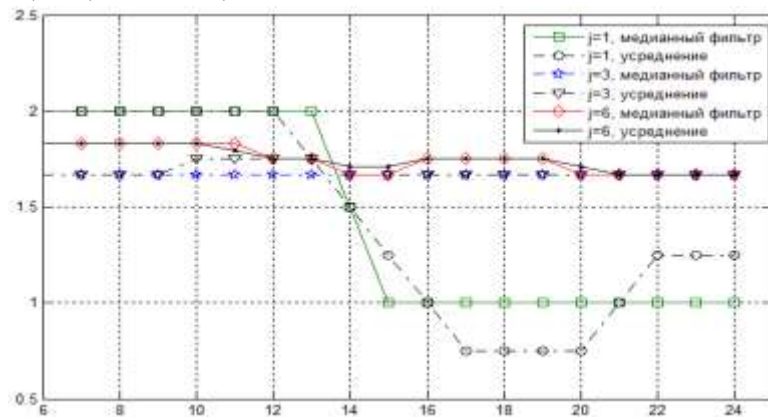


Рисунок 9

Анализ результатов вычислений (рис. 9) показал, что наиболее эффективным методом решения поставленной задачи измерения горизонтального вектора скорости автомобиля является применение корреляционного алгоритма обработки РЛИ с медианным фильтром через четыре кадра.

В четвертой главе диссертации выполнены следующие исследования:

- оценены статистические характеристики флюктуаций спектра сигнала биений в РПС;
- проведён анализ погрешности измерения координат, наблюдаемых на РЛИ объектов (в том числе, измерения углового положения автомобиля относительно оси дороги и расстояния до границы дороги);
- оценены погрешности измерения отклонения строительной оси автомобиля от оси дороги α и расстояния до границы дороги p , а также предложены пути повышения точности этих измерений.

В результате выполненных исследований:

1. Показано (по итогам обработки большого количества РЛИ, полученных по результатам натурных испытаний макета РПС), что расширение ширины спектра сигнала биений зависит от рассеивающих свойств объекта, от угла ориентации ДНА на наблюдаемые (протяжённые) объекты, а также от расстояния до них (рис. 10, три типа дороги). Чем больше расстояние R (N_R) и азимутальный угол отклонения ДНА θ (N_θ) относительно оси дороги, тем больше расширение спектра.



Пример-1



Пример-2



Пример-3

Рисунок 10. Примеры различных участков дороги

2. Установлено, что расширение спектра сигнала биений приводит к увеличению погрешности измерения азимутального угла θ и расстояния R до наблюдаемых объектов.

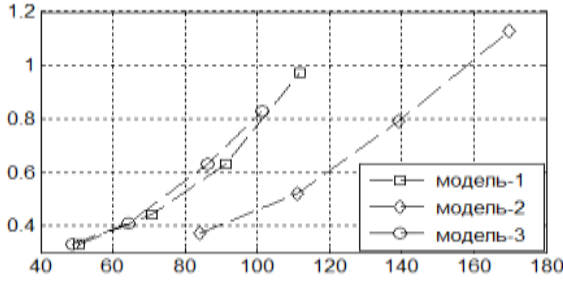


Рисунок 11. Зависимость $\sigma_{\Delta NR}$ от $\langle N_R \rangle_{N_\theta}$

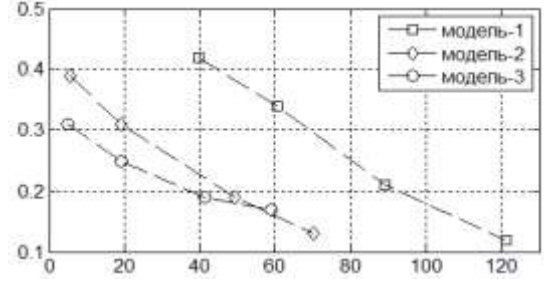


Рисунок 12. Зависимость $\sigma_{\Delta N\theta}$ от $\langle N_\theta \rangle_{N_R}$

На рисунках 11 и 12 приведена зависимость среднеквадратического отклонения (СКО): $\sigma_{\Delta NR}$ и $\sigma_{\Delta N\theta}$ измеренных значений R и θ от величины азимутального угла и расстояния до наблюдаемых объектов в соответствии с третьим примером обочины дороги при $n = 12$.

На рис. 11,12 обозначено: $\langle N_R \rangle_{N_\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{R_i}$ - среднее значение измеренного расстояния до обочины в соответствии с сечением по азимутальным углам N_{θ_j} , $\langle N_\theta \rangle_{N_{R_j}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{\theta_i}$ -

среднее значение измеренного азимутального угла в соответствии с сечением по дальностям N_{R_j} , n - количество кадров, $(F_R)_{\max}, (F_\theta)_{\max}$ - максимальные значения амплитуды спектра сигналов, отражённых от обочины, в сечениях по дальности и азимуту;

3. Оценены статистические характеристики ошибок измерения углового положения и расстояния до обочины: $\Delta\alpha$ и $\Delta\rho$, которые включают оценку средних значений и величины СКО для последовательности значений $\{\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots, \Delta\alpha_n\}$ и $\{\Delta\rho_1, \Delta\rho_2, \dots, \Delta\rho_n\}$ известным образом.

Результаты расчета зависимости ошибок от величин ΔR , $\Delta\theta$, ρ и α показывают, что с ухудшением параметров разрешения ΔR , $\Delta\theta$ погрешности измерения $\Delta\alpha$ и $\Delta\rho$ также увеличиваются.

Пятая глава диссертации посвящена разработке алгоритмов повышения качества визуализации РЛИ на экране монитора РПС, основанных на применении нелинейных алгоритмов обработки, сформированных РЛИ.

Важной особенностью панорамных РЛИ, формируемых в РПС в координатах дальность - азимут, является известный факт, заключающийся в том, что с увеличением дальности ширина отображаемого участка на РЛИ уменьшается, в результате экран РПС используется малоэффективно (изображение дорожного полотна занимает малую часть экранного пространства).

Обработка результатов натурных испытаний макета РПС, выполненная в диссертации, позволила оценить эффективность визуализации наблюдаемых объектов с учётом геометрии их визирования, влияния различных дорожных покрытий и уточнить параметры ширины полосы, резервных зон и т.д.

В результате для увеличения информативности РЛИ в диссертации впервые рассмотрена возможность применения нелинейного алгоритма изменения масштаба РЛИ по азимуту.

Принцип формирования РЛИ с применением нелинейного масштаба по азимуту заключается в следующем:

1) Значения радиояркостей первого кадра РЛИ (N_θ, N_R – размер кадра РЛИ по азимуту и дальности, $N_{\theta=0^\circ}$ – азимутальный угол, совпадающий с направлением оси автомобиля) будут записаны в массив «А»;

2) Размер (N_a, N_R – размер кадра по азимуту и дальности) формирования РЛИ (кадра) в нелинейном масштабе по азимуту выбран,

3) Распределение радиояркостей $I(i, j)$ кадра РЛИ, записанного в массиве «А», переписывается в массив «В», который соответствует распределению $I(k, j)$ в нелинейном масштабе по азимуту. Здесь:

$$k_i \leq k \leq k_{i+1}, k_i = \text{round}(\log_2(i) * 100), k_{i+1} = \text{round}(\log_2(i+1) * 100).$$

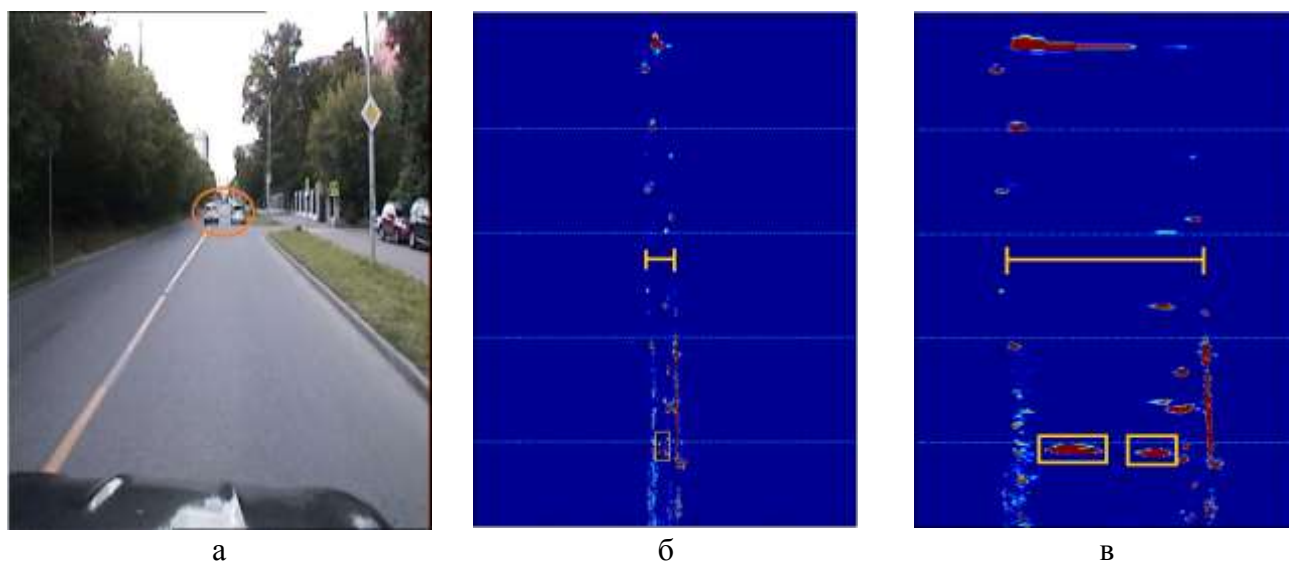


Рисунок 13. Результаты обработки экспериментальных РЛИ, в системе координат ХОУ: а - ОИ наблюдаемой сцены, б – РЛИ в полярной системе координат, в - преобразованное РЛИ с применением нелинейного масштабирования по азимуту.

На рисунке 13в приведён результат обработки РЛИ, полученного в РПС, того же участка местности в системе координат ХОУ с применением нелинейного масштабирования по азимуту, который подтверждает повышение вероятности правильной идентификации (разрешения) объектов при малом ($< 1^0$) азимутальном разрешении между объектами движения на дальности свыше 100 м.

Таким образом, в сервисной программе формирования и отображения РЛИ в РПС есть возможность включения разработанной подпрограммы нелинейного масштабирования выводимого изображения в реальном масштабе времени.

В результате выполненных исследований разработан новый алгоритм нелинейного расширения масштаба РЛИ по азимуту, который позволяет увеличить ширину отображае-

мого участка ДП на экранном пространстве, повысить вероятность правильной идентификации (разрешения) объектов и, тем самым, облегчает его восприятие оператором (водителем).

Заключение

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведён сравнительный анализ затухания ЭМВ ММ и ИК диапазона в гидрометеорах и пыли, который показал, что РПС ММ диапазона сохраняет высокую эффективность работы в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости в отличие от камер ИК диапазона, и позволяет решить проблему обеспечения безопасности движения автомобиля в условиях ограниченной или отсутствия оптической видимости.

2. Оценены характеристики рассеяния ЭМВ на наблюдаемых в РПС под настильными углами объектах, которые расположены на различных типах земной поверхности, что позволяет сформулировать специфические требования для проектирования РПС, в частности, выбрать его энергетические характеристики, оценить динамический диапазон приёмника РПС и др.

3. Проведен анализ влияния уровня боковых лепестков (УБЛ) ДНА РПС в азимутальной плоскости при одновременном наблюдении объектов дорожной инфраструктуры (автомобили, пешеходы и т.п.) с разницей в величине ЭПР больше 20 дБ, который установил, что при величине УБЛ выше -20 дБ это влияние незначительно, и подтвердил возможность их раздельного наблюдения.

4. Учитывая высокую информативность РЛИ в РПС, разработан корреляционный алгоритм измерения горизонтальных составляющих вектора скорости автомобиля, основанный на оценке смещения максимума взаимно-корреляционной функции (ВКФ) последовательных кадров РЛИ, полученных при движении автомобиля. Оценка потенциальной точности измерения вектора скорости показала, что применение данного алгоритма наиболее эффективно в сочетании с медианным фильтром.

5. В результате обработки большого количества РЛИ, полученных по результатам натурных испытаний макета РПС, установлено, что расширение ширины спектра сигнала биений, влияющее на точность измерения дальности, зависит не только от рассеивающих свойств объекта, но и от угла ориентации ДНА на наблюдаемые (протяжённые) объекты, а также расстояния до них.

6. Проведена оценка погрешностей измерения азимутального угла и расстояния от носителя РПС до наблюдаемых объектов (в первую очередь, обочины дороги), которая позволяет сформулировать рекомендации по выбору технических параметров РПС, а также предложить методы повышения точности измерения координат, наблюдаемых в РПС объектов.

7. Разработаны новые алгоритмы повышения качества визуализации объектов на экране монитора РПС, основанные на применении нелинейного масштабирования при отображении панорамных РЛИ в РПС. Показано, что применение данных алгоритмов позволяет повысить вероятность правильной идентификации участников движения и значительно повысить максимальную дальность этой идентификации, особенно, когда автомобили, двигаются на узком участке дороги и при малом азимутальном расстоянии между объектами движения.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Буй Чи Тхань - Влияние пыли и гидрометеоров на работу радиолокационной системы малой дальности / Тезисы докладов 12-й молодежной научно-технической конфе-

ренции «Радиолокация и связь - перспективные технологии». Москва, 11 декабря 2014, стр. 21-22.

2. A.E. Ananenkov, Bui Chi Thanh, L.A. Gerasimov, V.V. Rastorguev, P.V. Sokolov - Evaluation of vehicle movement speed by the means of the automobile radar data / 17th International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON'2015, Budapest, Hungary, 5-9 July, 2015.

3. Буй Чи Тхань, Д.В. Марин, В.В. Расторгуев - Повышение качества формирования радиолокационного изображения в системах радиовидения транспортных средств/ XXII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация – Навигация и связь». Воронеж, Россия, 19-21 апреля 2016, С. 1148-1156.

4. Буй Чи Тхань, Д.В. Марин, В.В. Расторгуев - Сравнение ослабления электромагнитных волн миллиметрового и инфракрасного диапазонов в гидрометеорах и пыли/ Труды МАИ. Выпуск №84.

5. Буй Чи Тхань, Д.В. Марин - Разработка алгоритма измерения скорости движения транспортного средства с помощью автомобильного радара / XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2016». Москва, Россия, 12-15 апреля 2016, С. 594.

6. Буй Чи Тхань, Д.В. Марин, В.В. Расторгуев - Разработка алгоритма измерения скорости движения транспортного средства с помощью панорамного автомобильного радара/ Электросвязь. Тема номера: «Человеческий капитал – главный актив отрасли связи», июль 2016.

Множительный центр МАИ (НИУ)
Заказ от « 21 » октября 2016 г. Тираж 80 экз.