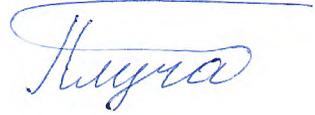


На правах рукописи



Плучевский Андрей Владимирович

**МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕШЕХОДОВ
В ДОРОЖНОЙ СЦЕНЕ ПО МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ
ДОПЛЕРОВСКОЙ СПЕКТРОГРАММЕ ДЛЯ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНОГО
АВТОТРАНСПОРТА**

Специальность:

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: **Гельцер Андрей Александрович**
кандидат технических наук, руководитель
департамента радиолокации АО «Когнитив», г. Томск

Официальные оппоненты: **Шайдуров Георгий Яковлевич**
доктор технических наук, заслуженный деятель науки и
техники РФ, профессор кафедры Радиотехнических
войск военно-космических сил Военно-учебного
центра Сибирского федерального университета,
г. Красноярск

Суханов Дмитрий Яковлевич
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры Радиофизики Национального
исследовательского Томского государственного
университета, г. Томск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«**Омский государственный технический университет**», г. Омск

Защита состоится 25 декабря 2019 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.268.04 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу г. Томск, пр. Ленина, д.40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, д. 146 и на сайте:
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/d8hghnpb>

Автореферат разослан «24» октября 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.268.04,
доктор технических наук, профессор



Акулиничев Ю.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность научной работы. В последние годы в автомобилестроении наметилась устойчивая тенденция в применении бортовых малогабаритных радиолокаторов для создания систем беспилотного транспорта. Как правило, использование радаров ориентировано на решения задач определения расстояния до мобильных и стационарных объектов, их углового положения и скорости. Но всё чаще радиолокаторы применяются для систем построения радиолокационной карты окружающего пространства в качестве составляющего элемента комплекса датчиков, обеспечивающих получение многоплановой информации о дорожной сцене. Таким образом радиолокаторы начинают входить в состав комплексной системы компьютерного зрения.

Одним из важнейших элементов беспилотного автомобиля является система предотвращения столкновений, которая функционирует на основе информации о дорожной сцене, поступающей от системы компьютерного зрения. Среди прочих участников дорожного движения, пешеходы являются объектами повышенной опасности и угрозы непредвиденного столкновения. Поэтому задаче распознавания пешеходов уделяется особое внимание.

В настоящее время задача распознавания пешеходов чаще всего решается с помощью оптических камер, главным недостатком которых является существенное ухудшение качества обнаружения и распознавания объектов в темное время суток и в сложных погодных условиях, что приводит к авариям.

Поскольку радиолокаторы не подвержены влиянию недостаточного и избыточного освещения то, к радиолокаторам входящим в состав систем компьютерного зрения беспилотных транспортных средств, предъявляются требования к обеспечению распознавания объектов дорожной сцены, в том числе пешеходов.

В современных автомобильных радиолокационных системах задача распознавания объектов дорожной сцены осуществляется по эффективной площади рассеяния цели, ее размерам и мгновенному доплеровскому спектру. Но в таких подходах затруднительно отличать пешеходов от объектов с небольшими размерами и медленно движущихся автомобилей. Эта сложность устраняется за счет использования измерений доплеровской spectroграммы с высокой разрешающей способностью по скорости. Наличие частотных составляющих в доплеровском спектре, соответствующих периодическим возвратно-поступательным движениям рук и ног называют эффектом микро-Доплера. Микродоплеровская spectroграмма пешехода (изменение спектра во времени), является уникальной характеристикой, позволяющей отличить его от автомобиля. В данной области среди зарубежных авторов стоит отметить работы V. Chen, B. Erol, S. Z. Gurbuz.

Среди отечественных исследователей стоит отметить работы А.Л. Горелика, Е. О. Евдокимовой, А.В. Кучерявенко.

В большинстве работ, связанных с распознаванием пешехода по сигналу микро-Доплера, используют алгоритмы машинного обучения и нейронные сети. Эти алгоритмы требуют больших вычислительных мощностей и непрозрачны для анализа способа принятия решений.

Поэтому данная диссертация посвящена методу автоматического распознавания пешеходов в дорожной сцене, где обработка доплеровской spectroграммы, как двухмерного радиолокационного изображения, сводится к одномерному пороговому решению по критерию Неймана-Пирсона, характеристики которого хорошо изучены.

Цель диссертационной работы. Целью работы является разработка метода распознавания пешехода на фоне объектов дорожной сцены на основе быстрого преобразования Фурье многокомпонентной доплеровской spectroграммы отраженного сигнала, для улучшения характеристик и расширения возможностей современных радиолокационных систем беспилотного автотранспорта.

Задачи. Для достижения поставленной цели, в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть существующие методы распознавания целей, использующиеся в радиолокационных системах.

2. Провести сравнительный анализ моделей объектов и выбрать общий информационный признак, характеризующий объекты, на основании которого в последствии осуществить распознавание.

3. Предложить алгоритм выделения информационного признака из радиолокационных данных и принятия решения о соответствии объекта одному из заданных классов.

4. Провести натурный эксперимент, подтверждающий работоспособность и улучшение характеристик распознавания разрабатываемого метода.

Методы исследования. В работе применялись следующие методы исследования: методы математического и логического анализа, в том числе методы многомерного анализа данных, методы математического моделирования, методы статистической радиотехники, методы цифровой обработки сигналов и натурный эксперимент.

Научная новизна. В диссертационной работе получен ряд новых результатов, основные из которых сводятся к следующему:

1. Разработаны модели упрощенных доплеровских spectroграмм, определяющие характерные признаки пешехода и автомобиля, отличающиеся тем, что однозначно сопоставляют вид spectroграммы пешехода и движущегося автомобиля при одновременном наблюдении в

дорожной сцене и указывают информационный признак позволяющий их различить.

2. Предложен алгоритм выделения информационного признака пешехода в дорожной сцене на фоне автомобилей по доплеровской spectroграмме, отличающийся тем, что spectroграмма как двухмерное радиолокационное изображение, приводится к усредненному спектру, представленному одномерным вектором.

3. Разработан метод распознавания пешеходов в дорожной сцене на фоне автомобилей, отличающийся тем, что для распознавания предложено использовать сигнал в виде огибающей, изменяющейся во времени амплитуды, каждой частотной компоненты доплеровского спектра, с последующим применением известных методов теории обнаружения сигналов.

Теоретическая значимость полученных результатов. Теоретическая значимость диссертационной работы обусловлена следующим:

1. Разработаны упрощенные модели доплеровских spectroграмм пешехода и автомобиля, определяющие информационный признак, необходимый для распознавания.

2. Предложен метод обработки доплеровской spectroграммы для выделения информационного признака пешехода.

3. Разработан метод распознавания пешеходов по доплеровской spectroграмме на фоне движущихся автомобилей в дорожной сцене, на основе методики обнаружения сигналов.

Практическая значимость полученных результатов. Практическая значимость результатов диссертации заключается в следующем:

1. Разработанный метод может быть использован как для проектирования новых радиолокационных систем беспилотного автотранспорта, так и для улучшения характеристик существующих радиолокационных методов распознавания пешеходов в дорожной сцене.

2. Предлагаемый в диссертации алгоритм цифровой обработки сигналов может быть использован в системах компьютерного зрения для анализа данных, поступающих с бортовых радиолокаторов, являющихся частью таких систем.

3. Результаты диссертационной работы использованы при создании радиолокационного комплекса для беспилотных транспортных средств в АО «Когнитив» и для разработки курса повышения квалификации «Принципы построения радиолокационных датчиков для систем активной безопасности и навигации беспилотных транспортных средств» в центре НИИ «Сенсорика».

Достоверность. Достоверность полученных результатов подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями и

согласованностью результатов диссертации с результатами, полученными другими авторами исследований в данном направлении.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Среднее значение частоты изменения во времени составляющих доплеровского спектра, принимаемого радиолокационного сигнала, является информационным признаком, необходимым для распознавания пешехода в дорожной сцене, содержащей автомобили и другие объекты дорожного движения.

2. Распознавание пешехода в дорожной сцене, содержащей автомобили и другие объекты дорожного движения, производится путем порогового обнаружения сигнала, в качестве которого используется усредненная огибающая изменений во времени амплитуд каждой компоненты доплеровского спектра, принимаемого радиолокационного сигнала.

3. При построении порогового обнаружителя сигнала на основе критерия Неймана-Пирсона, разработанный метод обеспечивает вероятность правильного распознавания пешехода в дорожной сцене, содержащей автомобили и другие объекты дорожной сцены, не хуже 0,9 при вероятности ложной тревоги 10^{-5} при следующих условиях: отношение сигнал/шум больше 20 дБ, разрешающая способность по скорости выше минимальной установленной скорости пешехода в 4 раза, пеленг на цель не более $\pm 60^\circ$ относительно нормали к антенне радиолокатора.

Публикации. В рамках диссертационного исследования опубликовано 6 работ, из них 2 статьи в журналах рецензируемых ВАК, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 2 публикации в иных сборниках и журналах.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены лично автором. Автор самостоятельно провел обзор литературы, разработал алгоритм распознавания, провел экспериментальное исследование. Математическое и программное обеспечение, необходимое для функционирования радиолокатора, сбора данных с радиолокатора и обработки сигналов разработаны автором.

Вопросы цифровой обработки сигналов обсуждались с Г.О. Манохиным, вопросы статистической теории радиотехнических систем обсуждались с Е.П. Великановой. Экспериментальное исследование многокомпонентной доплеровской спектрограммы автомобиля проводилось совместно с А.А. Костаревым.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 101 страницах, состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка из 98 наименований. Работа содержит 58 рисунков, 2 таблицы и 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности исследования, формулировку цели, перечень решенных в работе задач, описание научной новизны, а также научной и практической значимости. Так же во введении сформулированы научные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и приведена информация о публикациях по теме исследования

Первая глава посвящена постановке задачи распознавания, обоснованию использования радиолокатора, в качестве устройства для распознавания, выбору методики измерения и обзору существующих методов распознавания.

Система управления беспилотным транспортным средством выполняет множество функций в различных ситуациях. Одна из этих функций – это предотвращение столкновения транспортного средства с различными объектами дорожной сцены, при этом существуют условия, которые усложняют выполнение этой функции.

Внимание работы сфокусировано на распознавании пешехода, при наблюдении дорожной сцены, включающей как пешеходов, так и движущиеся автомобили.

Актуальность и вынужденная необходимость использования радиолокатора, как средства распознавания, подчеркивается возможностью его применения в сложных погодных условиях и условиях недостаточной видимости.

При обзоре методов измерений основное внимание уделено комбинированному способу получения радиолокационной информации, применяемому в современных автомобильных радиолокационных системах, и основанному на излучении непрерывного линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала с импульсной модуляцией. Фактически излучаются ЛЧМ импульсы малой (10-50 мкс) длительности. В зарубежной литературе такой способ известен как fast-ramp FMCW (Frequency-modulated continuous-wave). Рисунок 1 иллюстрирует принцип измерений.

На схеме (рисунок 1 справа) изображены: генератор синхронизирующих импульсов (ГСИ), модулятор (Мод.), генератор пилообразного напряжения (ГПН), генератор управляемый напряжением (ГУН), усилитель мощности (УМ), усилитель промежуточной частоты (УПЧ). I и Q обозначают синфазный и квадратурный (соответственно) сигнал генератора, подаваемый на смеситель. В тракте приемника приветствуют фильтры высоких частот (ФВЧ) и фильтры низки частот (ФНЧ). АЦП оцифровывает сигнал биений и записывает в буфер данных для последующей обработки. Излучаемые радиопulses когерентны между собой.

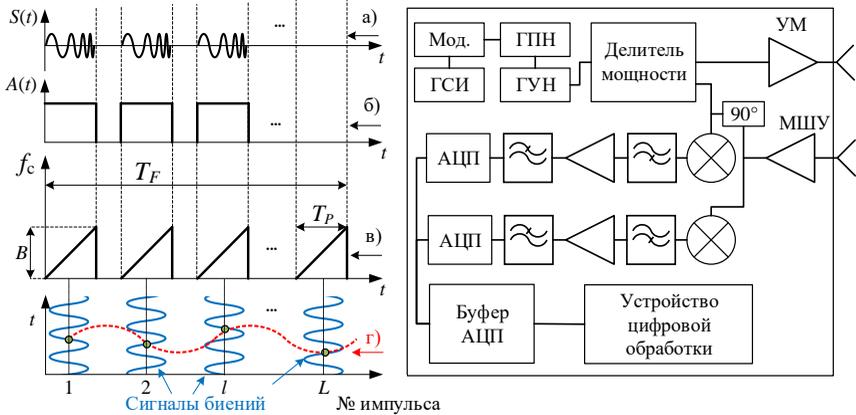


Рисунок 1 – Схема проведения измерений в fast-ramp FMCW методе (слева), где а) излучаемый сигнал; б) импульсная модуляция; в) частота сигнала; г) изменение фазы из-за эффекта Доплера. Устройство радиолокатора (справа)

Формула для анализа сигнала биений после смесителя в конечном виде записывается как

$$y(t, l) = a_0(t) e(j2\pi f_b t) e(j2\pi f_D l T_F), \quad (1)$$

где f_b – частота сигнала биений, f_D – частота Доплера, l – номер импульса, T_F – длительность кадра.

Дальность до объекта оценивается по частоте сигнала биений. Скорость оценивается по изменению фазы сигнала биений между импульсами. Оценка проводится с помощью быстрого преобразования Фурье после того, как все L импульсов в интервале наблюдения оцифрованы.

Разрешающая способность по скорости определяется как

$$\delta v = \frac{c}{T_F 2 f_c}, \quad (2)$$

где c – скорость света, T_F – длительность кадра, f_c – несущая частота.

Разработка метода распознавания радиолокационных целей осуществлена в 3 этапа: 1) Рассмотрение объектов и ситуаций, подлежащих распознаванию; 2) Определение методики измерения и способа выделения информационных признаков; 3) Выбор способа принятия решений.

Далее в главе рассмотрены статистический подход к принятию решений, а также методы машинного обучения и нейронные сети.

Рассмотрены основные виды информационных признаков целей, доступных для измерения с помощью радиолокатора: энергетические признаки, признаки на основе эффекта Доплера, поляризационные признаки объекта.

Энергетические признаки основаны на эффективной площади рассеяния цели (ЭПР) $\sigma_y = 4\pi D^2 (P_1 / P_2)$, где D это расстояние до объекта.

P_1 - плотность потока мощности волны, которая падает на цель, P_2 - плотность потока мощности отраженного сигнала у антенны радиолокатора.

Рассмотрены подходы к распознаванию на основе размеров объекта. Также рассмотрены признаки на основе поляризационной матрицы рассеяния $C = (C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22})$, в которой учитываются изменения вертикальной и горизонтальной составляющих, падающей и принимаемой электромагнитных волн.

Доплеровские признаки получают в ходе анализа доплеровских частот или доплеровского спектра цели. Анализируется как вся полоса доплеровского спектра, так и разные участки полосы по отдельности.

Особенное внимание в работе отводится признакам на основе сигнала микро-Доплера, под которым в научной литературе понимают многокомпонентный доплеровский спектр с гармоническим характером изменения частоты, полученный при измерениях с высокой разрешающей способностью по скорости от целей имеющих в составе поступательно движущиеся части. Характерный сигнал микро-Доплера для пешехода и автомобиля представлен на доплеровской spectroграмме (рисунок 2).

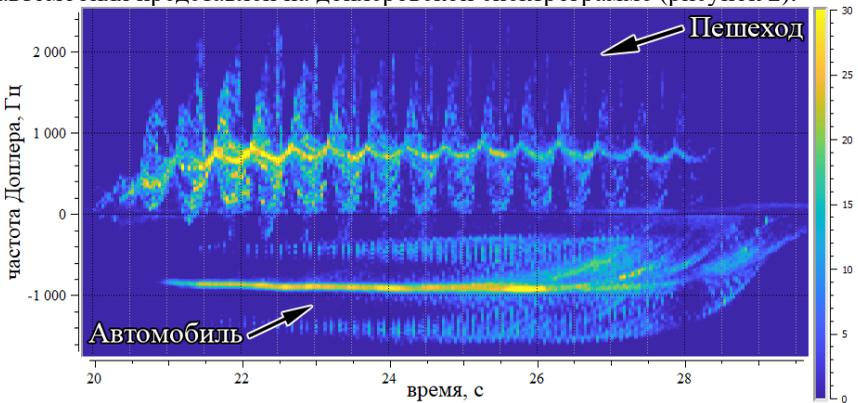


Рисунок 2 – Многокомпонентная доплеровская spectroграмма

Вторая глава посвящена сравнительному анализу многокомпонентных доплеровских spectroграмм пешехода и автомобиля, с последующим представлением упрощенных spectroграмм, наглядно показывающим отличия и вытекающим из этого синтезом алгоритма распознавания пешехода в дорожной сцене по сигналу микро-Доплера.

Доплеровские spectroграммы представлены в виде схематичных изображений из отдельных прямоугольников. Каждый прямоугольник на

изображении показывает наличие частоты Доплера в соответствующий момент времени. Белый цвет обозначает отсутствие сигнала.

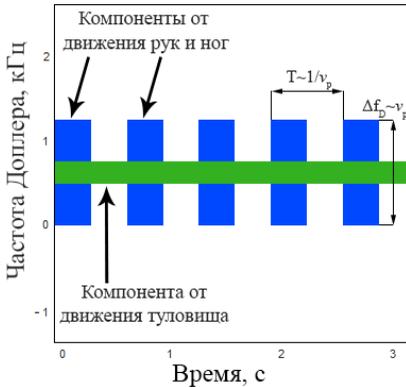


Рисунок 3 – Упрощенная модель доплеровской spectroграммы пешехода, движущегося прямолинейно, равномерно

На рисунке 4 изображен Структурный состав доплеровской spectroграммы автомобиля, движущегося равномерно. Центральная составляющая показывает основную скорость движения автомобиля v_A .

Сверху и снизу от центральной составляющей, при облучении автомобиля под углом, можно увидеть составляющие, полученные по отражению от колес автомобиля. Эти составляющие появляются, из-за того, что, скорость движения отражающих точек колеса отличается от скорости движения точек корпуса автомобиля.

На рисунке 3 представлен Структурный состав доплеровской spectroграммы пешехода. Горизонтальная зеленая полоса в центре показывает частотную компоненту, создаваемую движением туловища. Вертикальными синими полосами обозначены составляющие, сформированные суммарным движением рук и ног.

С помощью преобразования Фурье можно выделить частоту огибающей, вызванной движением конечностей, в срезе spectroграммы по частоте.

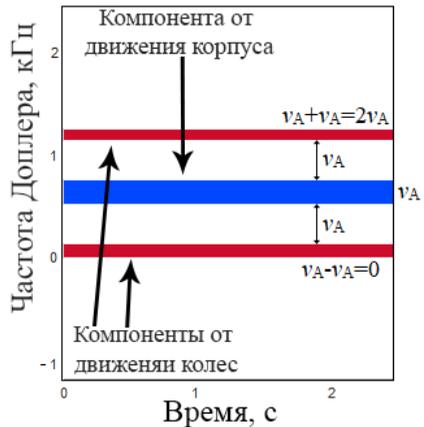


Рисунок 4 – Упрощенная модель доплеровской spectroграммы автомобиля

Ни в одном из срезов spectroграммы автомобиля по частоте нет периодической огибающей.

Метод распознавания, разработанный в диссертации, основан на выделении медленного изменения амплитуды доплеровского спектра, вызванного периодическим движением рук и ног человека при ходьбе. Такой подход, позволяет отличать пешехода от автомобиля несмотря на то, что при

небольших скоростях движения их мгновенная полоса доплеровского спектра имеет сопоставимое значение.

Разработанный алгоритм распознавания пешехода сводится к трем основным шагам.

Шаг 1. На этом выделяется частота изменения амплитуды во времени каждой составляющей доплеровского спектра в многокомпонентной доплеровской спектрограмме. Частоту изменения амплитуды спектральной составляющей называют **каденсной частотой**.

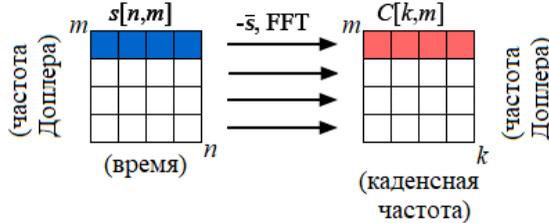


Рисунок 5 – Шаг 1: преобразование Фурье каждого среза частоты Доплера n – время, m – частота Доплера, k – каденсная частота

Из каждого среза частоты Доплера m спектрограммы $s[n,m]$ вычитается среднее значение, а затем производится быстрое преобразование Фурье (FFT) в направлении времени n . Результирующее изображение $C[k,m]$ называется каденсной диаграммой. Способ обработки, представленный шагом 1, рассматривается в научных публикациях с последующим применением алгоритмов машинного обучения для распознавания.

Шаг 2. Если учесть, что характер движения рук и ног симметричный, что подтверждается экспериментальными результатами и научными публикациями в советующей области, то каденсную диаграмму можно усреднить по каждому срезу каденсной частоты k

В результате выполнения шага 1 и 2 получается спектр каденсной частоты. При скорости движения пешехода от 1 км/ч до 7 км/ч, каденсная частота будет лежать в диапазоне от 1 Гц до 2.5 Гц соответственно.

Принятие решения осуществляется на шаге 3.

Шаг 3. К полученному одномерному вектору применяется пороговое решение, как это проиллюстрировано на рисунке 7. В общем случае величина порога, может быть задана различными способами, но в диссертации рассчитывается по критерию Неймана-Пирсона. Величина порогового уровня h определяется вероятностью ложной тревоги P_F .

$$h = \sqrt{-2LnP_F}, \quad (3)$$

где P_F – заданная вероятность ложной тревоги.

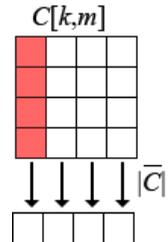


Рисунок 6 – Шаг 2: Усреднение каденсной диаграммы

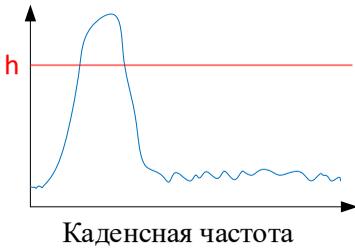


Рисунок 7 – Одномерный вектор, полученный в результате усреднения каденсной диаграммы

Таким образом работе для распознавания пешехода в дорожной сцене, обработка спектрограммы, как двухмерного радиолокационного изображения, последовательно сводится к одномерному пороговому решению.

Известно, что вероятность правильного обнаружения сигнала со случайной амплитудой и начальной фазой на фоне шума аналитически определяется следующим выражением:

$$P_D = P_F^{1 + \frac{q^2}{2}}, \quad (4)$$

где P_F – заданная вероятность ложной тревоги, $q = \sqrt{2E/N}$ – параметр обнаружения, а E/N – отношение сигнал/шум в размах.

Вычисление отношения сигнал/шум в децибелах, из параметра обнаружения q , для сопоставления с результатами эксперимента, осуществляется по формуле

$$SNR_{dB} = 10 \lg \left(\frac{q^2}{2} \right). \quad (5)$$

Кривая, рассчитанная по формуле (4), приведена на рисунке 9 сплошной линией, отношение сигнал/шум для оси абсцисс вычислено по формуле (5).

Далее вероятность правильного обнаружения P_D будет определять корректность отнесения цели b_j к классу A_l – «пешеход», если цель действительно является пешеходом.

Блок схема алгоритма объединяющая последовательность всех действий представлена на рисунке 8.

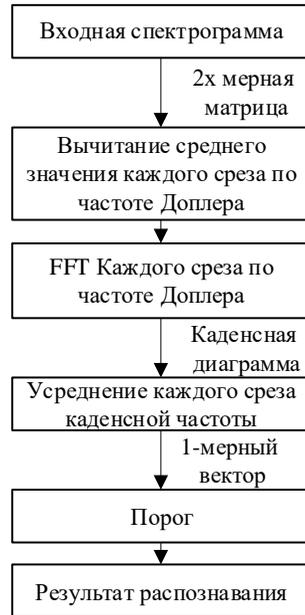


Рисунок 8 – Блок схема алгоритма распознавания

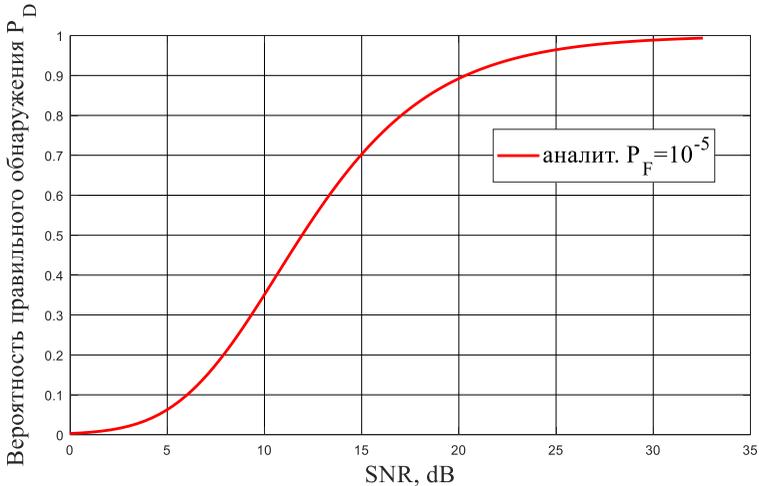


Рисунок 9 – Предполагаемая характеристика помехоустойчивости разработанного метода. Сплошная линия – P_D , рассчитанная по формуле (4), $P_F = 10^{-5}$

В диссертации сформулированы требования к условиям использования метода, для обеспечения корректного результата распознавания: 1) разрешающая способность радиолокационной системы должна быть в 4 раза выше минимального значения установленной скорости целей – $\delta v < 1/4 v_{\min}$ 2) Рабочий диапазон изменения азимута цели необходимо ограничить значениями $0^\circ < \theta < 60^\circ$, где изменение функции косинуса имеет характер близкий к линейному.

В результате разработан алгоритм, в котором при обработке доплеровской spectroграммы, как двухмерного яркостного изображения, последовательно получается одномерный вектор. К этому вектору в последствии, допустимо применить пороговое решение (3).

Проведено сравнение с методами, опубликованными в других работах. Рисунок 10 показывает сопоставление кривых обнаружения. Сложностью при сравнении разработанного метода в диссертации с методами распознавания других авторов стало то, что множество публикаций посвящены алгоритмам машинного обучения и нейронным сетям и рассматривают оптимизацию специфических для этого направления характеристик, а подробные зависимости вероятности правильного обнаружения и от отношения сигнал/шум и от вероятности ложной тревоги не рассматривают. Поэтому для второго источника P_F не указана.

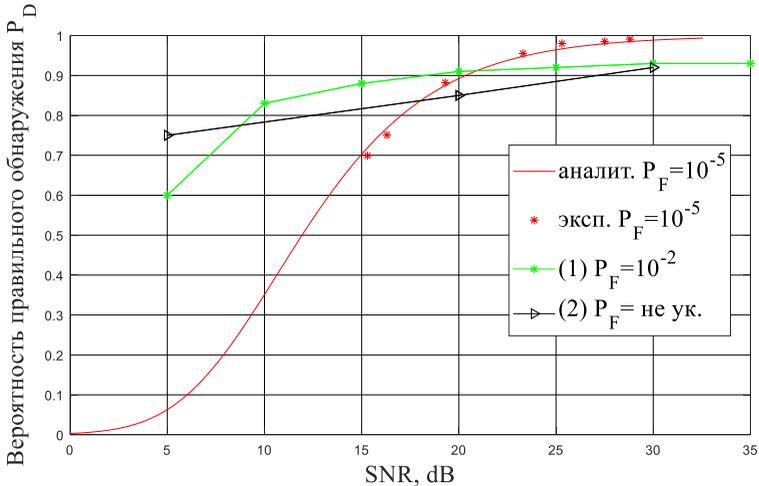


Рисунок 10 – Сравнение характеристик метода, представленного в диссертации, с методами других авторов

1. Erol B. Hyperbolically-warped cepstral coefficients for improved micro-Doppler classification //2016 IEEE Radar Conference (RadarConf). – IEEE, 2016. – PP. 1–6.

2. Gurbuz S. Z. Operational assessment and adaptive selection of micro-Doppler features //IET Radar, Sonar & Navigation. – 2015. – Vol. 9. – №. 9. – PP. 1196–1204.

Из рисунка 10 видно, что вероятность правильного обнаружения разработанного метода выше, при SNR больше 20 дБ.

Приведены рекомендации для применения разработанного алгоритма в радиолокационных системах.

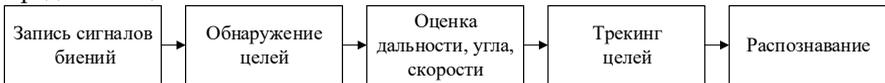


Рисунок 11 – общая схема обработки сигналов

Как показано на рисунке 11, для того чтобы осуществить операцию распознавания в реальном радиолокационном комплексе, сначала необходимо произвести обнаружение целей, затем используя алгоритм трекинга необходимо накопить доплеровскую spectroграмму для каждой цели. После чего, доплеровская spectroграмма поступает на вход разработанного алгоритма.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию и проведению натурного эксперимента с последующим анализом результатов.

Для получения доплеровской spectroграммы использован алгоритм, представленный на рисунке 12. Сигналы биений, полученные при каждом излучении ЛЧМ сигнала (рисунки 1 и 12) записываются в матрицу. Из каждого среза по быстрому времени вычитается его среднее значение для удаления статического фона, затем выполняются FFT для оценки доплеровского спектра. В полученной матрице усредняется каждый срез по частоте Доплера. В результате получается мгновенный доплеровский спектр для формирования spectroграммы. Разрешение по дальности в таком случае отсутствует, но в лабораторных условиях это допустимо ввиду существенного упрощения алгоритма предобработки сигналов.

В эксперименте был использован автомобильный малогабаритный радиолокатор, модель: Texas Instruments AWR1243BOOST. Параметры сигнала: тип сигнала – последовательности коротких ЛЧМ импульсов (fast-ramp FMCW), несущая частота 79 ГГц, полоса ЛЧМ сигнала 4 ГГц (77-81 ГГц), длительность одного импульса $T_p=39$ мкс, период повторения импульсов 156 мкс, количество импульсов в пачке 256, общая длительность пачки $T_F=40$ мс, количество отсчетов АЦП на один импульс 256, АЦП квадратурный, частота оцифровки 5 МГц, частота следования пачек 25 кадров в секунду.

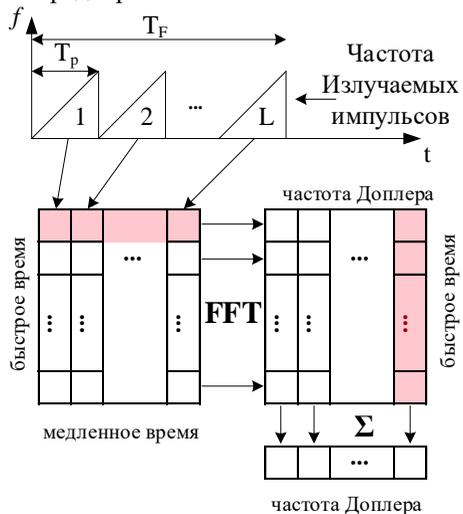


Рисунок 12 –Алгоритм обработки сигнала радиолокатора для получения spectroграммы Доплера

В эксперименте исследовались два типа объектов пешеход (рисунок 13 а) и автомобиль (рисунок 13 б). Пешеход, передвигался прямолинейно вдоль главной оси антенны радиолокатора с тремя разными скоростями, примерно равными 3, 4.5 и 6 км/ч. Исследовалось два типа ходьбы: обычный с естественными махами рук, и без махов, когда руки прижаты к телу. Автомобиль в эксперименте также двигался прямолинейно вдоль оси антенны радиолокатора с различными скоростями 5, 10, 20 км/ч. На рисунке 13 приведены две spectroграммы, выбранные из общего набора экспериментальных spectroграмм.

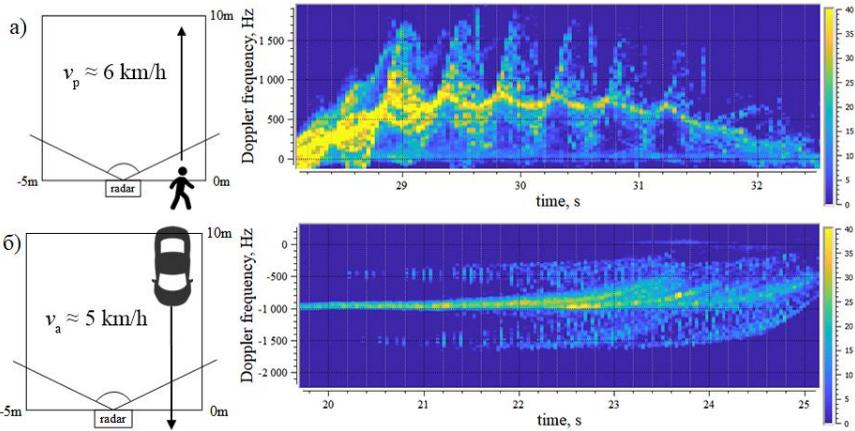


Рисунок 13 – Сценарии эксперимента для полученных данных

Обработка спектрограмм осуществлялась в режиме скользящего окна. Размер окна по времени составлял 1 с, размер окна по частоте Доплера составлял 2 кГц.

Вероятность правильного обнаружения, оценивалась как отношение количества принятых решений о том, что цель является пешеходом, к общему количеству кадров, в которых наблюдается пешеход.

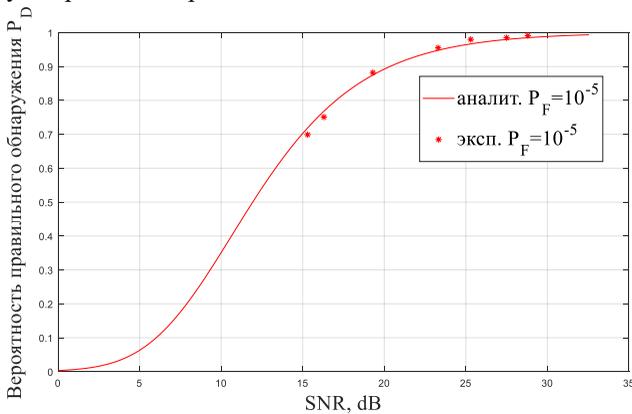


Рисунок 14 – Кривая обнаружения, полученная по аналитическому выражению (4) – сплошная линия и результаты эксперимента – отмечено звездочками

SNR для экспериментальных данных, вычислялось как отношение среднего значения SNR всех точек, относящихся к полезному сигналу, к среднему значению точек, относящихся к шуму.

Основными выводами является следующее. Вероятности правильного обнаружения, полученные экспериментально, совпадают с кривой,

рассчитанной по аналитическому выражению. Это дает основания полагать, что характеристики предлагаемого подхода определяются по формуле (4).

Разработанный метод, обеспечивает корректный результат, даже если пешеход не двигает руками. Вероятность правильного обнаружения P_D составляет не менее 0,9 при вероятности ложной тревоги $P_F=10^{-5}$ и отношении сигнал/шум $SNR \geq 20$. Это позволяет рассчитать зависимость P_D от SNR и для других P_F по формуле (4).

В заключении сведены основные результаты и выводы по проведенному исследованию.

В диссертационной работе проведен анализ различных методов получения информации об окружающем пространстве, применяемых в индустрии беспилотного автотранспорта, и выявлена необходимость использования радиолокаторов для распознавания объектов дорожной сцены.

В диссертации рассмотрен эффект микро-Доплера – описывающий форму доплеровской спектрограммы, полученной от целей, имеющих в своем составе поступательно движущиеся части. Этот эффект проявляется при измерениях с высокой разрешающей способностью по скорости. Изучены существующие модели сигналов многокомпонентных доплеровских спектрограмм пешеходов и автомобилей, а также методы их обработки. Выявлено, что большинство методов основаны на алгоритмах машинного обучения и нейронных сетях, которые создают высокую вычислительную нагрузку на аппаратуру и имеют ненадежный алгоритм принятия решений.

Приведен сравнительный анализ моделей многокомпонентных доплеровских спектрограмм и предложены упрощенные модели доплеровских спектрограмм пешехода и автомобиля, явно указывающие на их различия. В результате синтезирован алгоритм распознавания, преобразующий доплеровскую спектрограмму к одномерному вектору с последующим применением порога, рассчитанного по критерию Неймана-Пирсона.

Проведены моделирование и натурный эксперимент. Подтверждены следующие характеристики метода распознавания: вероятность правильного обнаружения P_D составляет не менее 0,9 при вероятности ложной тревоги $P_F=10^{-5}$ и отношении сигнал/шум SNR не менее 20 дБ. Характеристики метода соответствуют известным характеристикам обнаружения сигнала со случайной амплитудой и случайной фазой на фоне шума.

Диссертационная работа развивает методику анализа сигнала микро-Доплера. Разработанный алгоритм улучшает характеристики существующих методов распознавания пешеходов, расширяет область применения радиолокационных систем распознавания, и укрепляет роль радиолокаторов среди других датчиков в системах компьютерного зрения. Предложенный

алгоритм распознавания может быть использован радиолокационных системах беспилотного транспорта и системах помощи водителю.

В качестве рекомендаций по улучшению разработанного метода, может выступить использование адаптивных пороговых алгоритмов для принятия решений.

Перспективой развития предложенной методики распознавания является разработка комплексного метода распознавания для 4х классов объектов дорожной сцены: пешеходы, автомобили, велосипедисты мотоциклисты.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Плучевский А. В. Выделение различий между пешеходом и автомобилем основанное на применении двумерного дискретного преобразования Фурье для анализа сигнала микро-Доплера // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2019. – Т. 13. – №. 5. – С. 61–68.

2. Плучевский А. В. Метод автоматического распознавания пешеходов в дорожной сцене по сигналу микро-Доплера для радиолокационных систем беспилотного автотранспорта // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2019. – Т. 13. – №. 8. – С. 51–59.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

3. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ №2019618962. Российская Федерация. Программа обработки радиолокационных данных и выделения сигнала микро-Доплера / А. В. Плучевский; правообладатель ОАО Когнитив Роботикс — заявка № 2019617835; заявл. 28.06.2019; зарегистр. 08.17.2019. — 1с.

4. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ №2019619090. Российская Федерация. Программа распознавания пешеходов и автомобилей по сигналу микро-Доплера, версия 1.0 / А. В. Плучевский; правообладатель ОАО Когнитив Роботикс — заявка № 2019617823; заявл. 28.06.2019; зарегистр. 10.17.2019. — 1с.

Публикации в иных сборниках и журналах

5. Плучевский А.В., Бабур Г.П. Быстрая калибровка радиочастотного тракта фазированных антенных решеток в рабочем режиме. // Научная сессия ТУСУР. – 2016. – Ч. 1. – С. 56–59.

6. Плучевский А.В. Применение перцептрона для обработки радиолокационных данных в системах безопасности «умного дома» // Электронные средства и системы управления. – 2018. – Ч. 2. – С. 301–302.