

На правах рукописи

Обертов Дмитрий Евгеньевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩИХСЯ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Андреевский Борис Ростиславич

Официальные оппоненты: **Небылов Александр Владимирович**
доктор технических наук,
профессор
Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
заведующий кафедрой
Аэрокосмических измерительно-
вычислительных комплексов

Пелевин Александр Евгеньевич
доктор технических наук, старший
научный сотрудник
Государственный научный центр
Российской Федерации
ОАО «Концерн «ЦНИИ
«Электроприбор», заместитель
главного конструктора

Ведущая организация: ОАО «Концерн «Гранит-Электрон»

Защита состоится 25 декабря 2014 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.227.03 при Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, ауд. 562.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49 и на сайте ipro.ifmo.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дударенко Наталия Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) приобретают в настоящее время все возрастающее значение. Появление ИТС дает широкие возможности для контроля дорожного движения в целях повышения безопасности, уменьшения пробок на дорогах, ведения статистики движения, определении классов транспортных средств, контроля скорости и других приложений. Разработке и внедрению ИТС в странах с развитой дорожной структурой уделяется повышенное внимание, как это видно по значительным объемам финансирования всевозможных научно-исследовательских программ. В настоящее время в Российской Федерации, согласно утвержденной Федеральным дорожным агентством Транспортной стратегии РФ на период до 2030, развитию транспортной системы также уделяется возрастающее внимание. Главной задачей государства в сфере функционирования и развития транспортной системы России является создание условий для экономического роста, повышения конкурентоспособности национальной экономики и качества жизни населения через доступ к безопасным и качественным транспортным услугам, превращение географических особенностей России в ее конкурентное преимущество. Для достижения указанных целей предусматривается, в числе прочего, сбалансированное развитие интегрированной инфраструктуры транспортных коммуникаций всех видов транспорта, ликвидация разрывов и узких мест транспортной сети, ограничивающих ее пропускную способность, увеличение пропускной способности и скоростных параметров транспортной инфраструктуры, а также создание интеллектуальных транспортных систем с использованием глобальной навигационной системы ГЛОНАСС и современных инфотелекоммуникационных технологий. Настоящая диссертационная работа посвящена задаче совершенствования аппаратно-алгоритмической структуры систем идентификации транспортных средств (ТС), как одной из подзадач создания ИТС.

Научной базой диссертации являются труды Л. Н. Козлова, О. Г. Кокаева, А. Б. Куржанского, Ю. А. Лукомского, А. С. Мишарина, Л. Б. Рапопорта, В. Бирка (*W. Birk*), П. Варайи (*P. Varaiya*), Н. Лундберга (*N. Lundberg*), Л. Рилискиса (*L. Riliskis*), Синг-Юи Чеунга (*Sing-Yiu Cheung*), Р. Хостеллера (*R. Hostettler*) и их коллег.

К настоящему времени основные результаты по созданию систем идентификации движущихся по дороге ТС получены в странах Евросоюза. В частности, с 2010 г. в Техническом университете г. Лулео (Швеция), совместно с промышленными организациями (компании *Geveko*, *Eistec*), выполняется проект *iRoad*, посвященный созданию дорог будущего, способных воспринимать и обрабатывать информацию, принимать решения, обме-

ниваться данными и выполнять нужные действия. Основные исследования диссертационной работы выполнены в рамках указанного проекта, в котором автор данной диссертации принимал непосредственное участие.

Целью исследования диссертации является разработка алгоритмов обнаружения, определения классов и скорости ТС.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие **задачи исследования**:

- Разработка алгоритма оценивания скорости ТС с использованием магнитометров. Алгоритм оценки скорости основывается на измерении угла между осью датчика, перпендикулярной дороге, и автомобилем.
- Разработка алгоритма обнаружения ТС с помощью акселерометров на основе применения амплитудного и временного порога обнаружения.
- Разработка алгоритма идентификации классов ТС с помощью акселерометров и магнитометров на основе комбинации метода обнаружения и метода оценки скорости.
- Анализ спектральных данных с акселерометров для задач обнаружения и идентификации ТС на основе применения преобразования Фурье.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

- Разработан и исследован новый алгоритм обнаружения ТС с использованием одного акселерометра, устанавливаемого на дорожную разметку для измерения вибраций дороги, вызванных ТС.
- Разработан и исследован новый алгоритм оценки скорости ТС с использованием одного магнитометра на основе измерения угла между осью датчика, перпендикулярной дороге, и автомобилем.
- Предложен метод оценки скорости транспортного средства на основе измерения магнитного пути.
- Разработан и исследован новый алгоритм определения классов ТС с помощью сенсорного узла, представляющего собой комбинацию магнитометра и акселерометра.
- Разработан новый метод идентификации классов ТС по колесной базе с помощью одного сенсорного узла с такой комбинацией датчиков.
- Разработана методика выбора параметров алгоритмов обнаружения и идентификации методами временного и спектрального анализа.

На защиту выносятся:

- Алгоритм обнаружения ТС с использованием одного акселерометра, устанавливаемого на дорожную разметку.
- Алгоритм определения скорости ТС с помощью одного магнитометра.

- Алгоритм идентификации классов ТС по колесной базе, являющимся комбинацией алгоритмов обнаружения ТС и определения скорости ТС;
- Программная реализация алгоритма идентификации классов ТС в MATLAB 2009.

Практическая значимость работы. В результате выполнения диссертации создан теоретико-методологический инструментарий решения практических задач по обнаружению ТС, определению их скорости и идентификации классов. Разработаны специальные алгоритмы решения поставленных задач. Разработана программная реализация алгоритмов с использованием среды MATLAB 2009. Идентификация классов ТС по колесной базе с помощью одного сенсорного узла была решена впервые и, таким образом, имеет большое практическое значение. Практическая значимость работы подтверждается экспериментальными исследованиями, использованием в НИР кафедры, проекте *iRoad* (Лулео, Швеция) и заявкой на европейский патент *EP 2 677 323 A1. (12). European Patent Application. 25.12.2013, No 12172521.2.*

Результаты внедрения. Теоретические и практические исследования диссертации используются в учебном процессе модулей «Цифровые системы управления» и «Цифровая техника систем управления» по направлениям подготовки магистров 27.04.03 «Системный анализ и управление», 27.04.04 «Управление в технических системах». На кафедре Систем управления и информатики Университета ИТМО построен научно-технический комплекс для исследования интеллектуальных транспортных систем. Данный комплекс базируется на программе в системе MATLAB, разработанной соискателем и представленной в приложении диссертации.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы: методы системного анализа, общей теории систем, автоматизированного управления, планирования эксперимента, цифровой обработки информации, спектрального, временного и частотного анализа данных, методы фильтрации помех, преобразование Фурье.

Достоверность и обоснованность научных результатов подтверждается применением апробированных методик, сертифицированных приборов, оборудования и программного обеспечения; воспроизводимостью и согласованностью данных, полученных в ходе экспериментов; положительным внедрением результатов работы в проекте *iRoad*. Разработанная методология, комплекс алгоритмов и технологии управления базируются на фундаментальных положениях ряда научных дисциплин, включая общую теорию систем, системный анализ, математическую физику, теорию управления.

Апробация работы. Результаты научных исследований по теме дис-

сертации доложены и получили положительную оценку на двух международных конференциях *IEEE 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR 2014)*, *6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT 2014)*, четырех российских научно-технических конференциях: I-й Всероссийский конгресс молодых ученых, апрель, 2012, Университет ИТМО, Санкт-Петербург; XIV конференция молодых ученых «Навигация и управление движением», март, 2012, ЦНИИ Электроприбор, Санкт-Петербург; XLII научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО, февраль, 2013, Санкт-Петербург; XLIII научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО, февраль, 2014, Санкт-Петербург, а также на семинарах кафедры систем управления и информатики НИУ ИТМО.

Полнота изложения положений и результатов, выносимых на защиту, в опубликованных работах.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в **четыре** публикациях, входящих в список периодической печати, рекомендованный ВАК РФ на соискание ученой степени кандидата технических наук [1–4], в трудах **двух** рецензируемых конференций, проводимых международным научным обществом *IEEE: MMAR 2014* [5] и *ICUMT 2014* [6], размещаемых в базе данных *IEEE Xplore* и индексируемых в системе цитирования *Scopus*. Результаты работы опубликованы также в тезисах I-го Всероссийского конгресса молодых ученых [7].

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве. В [3, 6, 7] соискателем предложено использование алгоритма *Average bar* для классификации ТС с помощью магнитометров, предложена структура базы данных эталонов скорости и использование скользящего среднего для сглаживания данных. В [4] предложены алгоритмы обнаружения ТС с помощью акселерометров, подсчета ТС и подсчета количества осей ТС. В [1, 5] автором предложен алгоритм идентификации классов ТС по колесной базе с помощью акселерометров.

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Диссертационная работа выполнена в рамках целевых федеральных программ: ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы (соглашение №14.В37.

21.0406); ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы (соглашение №14.В37.21.0421); ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы (соглашение №14.В37.21.0659).

Объем и структура работы. Диссертационная работа объемом 120

страниц состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 100 наименований и двух приложений.

Содержание работы Во введении обоснована актуальность задач, рассматриваемых в диссертационной работе. Показана необходимость совершенствования аппаратно-алгоритмической структуры систем идентификации движущихся ТС, как составной части реализации Транспортной стратегии РФ. Сформированы цели и задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе диссертации описаны существующие в настоящее время технологии получения информации о движущихся по дороге ТС, дано описание проблемы и приведена мотивация исследований. Рассмотрены различные имеющиеся интеллектуальные транспортные системы, описаны задачи решаемые этими системами, их достоинства и недостатки и намечен план дальнейших исследований.

Во втором разделе описан алгоритм определения скорости ТС с использованием магнитометра. Предложен метод оценки скорости транспортного средства на основе измерения магнитного пути.

В предположении, что автомобили движутся по прямой линии перпендикулярной (или параллельной) осям датчика нетрудно получить, что магнитный путь S_M зависит от скорости V ТС; расстояния от траектории движения до датчика и класса транспортного средства.

Таким образом, ограничившись тем, что производится оценка скорости автомобилей, движущихся только по ближней к датчику полосе, для ТС одного класса получим одинаковое значение магнитного пути S_M :

$$S_M = t_{M1} \cdot V_1 = t_{M2} \cdot V_2 = \dots = t_{Mn} \cdot V_n, \quad (1)$$

где n – количество исследуемых автомобилей одного класса.

Создав экспериментальным путем базу данных, в которой для каждого класса записаны эталонные значения t_{ME} для известной скорости V_E , неизвестную нам скорость найдем по формуле, вытекающей из (1):

$$V = \frac{t_{ME} \cdot V_E}{t_M}, \quad (2)$$

где t_M – время, за которое исследуемый автомобиль проезжает магнитный путь S_M .

Для определения скорости автомобиля по формуле (2) необходимо знать его класс. В данной работе исследуется способ классификации автомобилей по их магнитным свойствам, то есть по магнитному пути на фиксированной скорости, например, при $V_E = 30$ км/ч.

Для определения классов ТС будут использоваться метод среднего значения. Данный метод предполагает определять классы ТС по их «подписям» – измерениям проекций B_X , B_Y и B_Z . Измерения магнитометра в промежутке времени въезда и выезда автомобиля в зону чувствительности датчика по каждой оси разделяются на 20 окон, и для каждого окна находится среднее значение. Полученные средние значения нормируются в пределах $[-1, 1]$. Нормированные значения x_{measured} сравниваются с эталонными значениями x_{etalon} , записанными в базе. С этой целью вычисляется евклидово отклонение по всем трем осям для каждого из 20 окон:

$$E_d = \sqrt{\sum_{i=1}^{60} (x_{\text{etalon}} - x_{\text{measured}})^2} \quad (3)$$

Для снижения вычислительных затрат рекомендуется использовать процедуру сжатия данных и вместо 60 точек x_{measured} и x_{etalon} использовать только пять, но такое сокращение может привести к росту ошибок при классификации автомобиля.

Таким образом, оценка скорости проводится по следующему алгоритму [3]:

1. Сравнивая методом среднего значения данные, полученные в результате измерений, и данные, хранящиеся в базе, определяется класс транспортного средства.

2. По формулам $\alpha(t) = \arctan\left(\frac{B_x(t)}{B_y(t)}\right)$ и $t_M = t_{+40} - t_{-40}$ рассчитываются значения функции $\alpha(t)$ и находится значение t_M .

3. Зная t_{ME} и V_E для данного класса, по (2) находится скорость исследуемого автомобиля. Для автоматизированного определения скорости была написана соответствующая программа для пакета МАТЛАВ, приведенная в приложении к диссертации.

В работе представлены результаты проверки работоспособности алгоритма. В качестве анализируемых данных использовались измерения, полученные в ходе 20 экспериментов на полигоне *Arctic Falls* (Швеция) с транспортными средствами четырех различных классов: микроавтобус; автомобиль с прицепом; грузовой автомобиль; грузовик с прицепом, движущимися по ближней, относительно датчика, полосе на скоростях 30, 40, 50, 60 и 70 км/ч. Для измерения реальной скорости использовался датчик фирмы *Racelogic*, точность которого составляет 0.1 км/ч. В качестве эталонных, для каждого из представленных классов, были взяты данные, полученные на скорости 30 км/ч.

Для 14 наборов экспериментальных данных получено, что максимальная ошибка измерения составила 8.67% [6]. Погрешность возникает из-за наличия помех и варьирования расстояния между датчиком и траекторией движения транспортного средства при эксперименте.

Основные результаты раздела опубликованы в [3, 6].

В третьем разделе диссертации рассматриваются проблемы обнаружения ТС с помощью акселерометров. Описан алгоритм для обнаружения ТС и разделения по времени одного автомобиля от другого. Приведены результаты обработки данных с помощью алгоритма, демонстрирующие его эффективность.

Общим и простым предположением при рассмотрении транспортного средства, движущегося вдоль дороги, является, что каждая колесная пара (ось) вызывает вибрацию, распространяющуюся в асфальте как волна. Поэтому для транспортного средства с M осями вибрации можно рассматривать как происходящие из M эквивалентных источников вибрации [4].

Вибрации, происходящие от различных осей достигают датчика с задержкой Δt в зависимости от колесной базы b (пространственное разделение источников) и скорости ТС V . Очевидна зависимость между колесной базой и скоростью: $\Delta t = b/V$.

Вибрационная характеристика для одной оси может быть описана некоторым импульсом $p_i(t)$. Форма импульса может быть представлена гауссовой кривой [4] $p_i(t) = A_i \exp(-a_i(t-t_i)^2)/2$ где A_i , a_i , t_i – параметры формы импульса. Для ТС, которое имеет n осей, модель может быть представлена как суперпозиция импульсов $p_i(t)$: $M(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t)$. Например, для легкового автомобиля $n = 2$, $A_1 = 2$, $a_1 = 2$, $t_1 = 3$ с, $A_2 = 1$, $a_2 = 6$, $t_2 = 5$ с. В модели также должны учитываться помехи. Тогда используется выражение $M(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) + \xi(t)$, в котором помеха $\xi(t)$ может быть представлена как квадрат белого гауссового шума.

Если временной интервал Δt умножить на скорость автомобиля V , получим *колесную базу* W – расстояние между соседними осями автомобиля: $W = \Delta t \cdot V$.

Алгоритм обнаружения ТС представлен на рисунке 1 и заключается в выполнении следующих операций.

1) Исходные данные, полученные с акселерометров, фильтруются полосовым фильтром, потому что рассматриваем частотный диапазон, соответствующий области максимальных амплитуд сигнала. Предварительная обработка сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье и коротко-

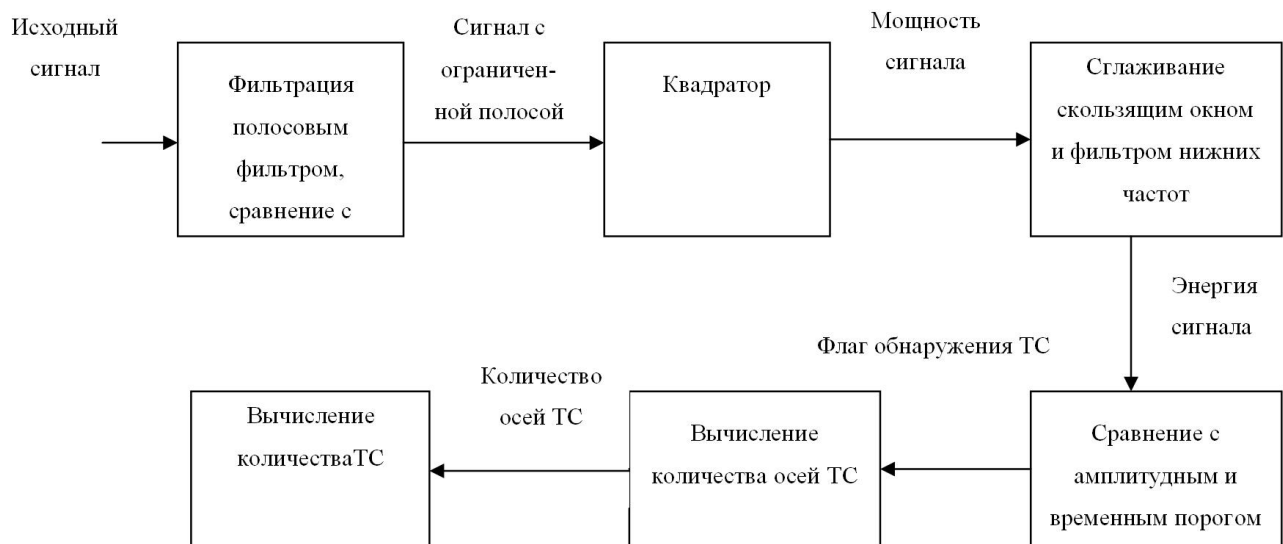


Рисунок 1 — Последовательность действий по обнаружению и подсчету количества ТС.

оконного преобразования Фурье выполняется в некотором диапазоне частот $[f_b, f_u]$ [Гц], где f_b, f_u – подлежащие выбору параметры алгоритма. Такая обработка необходима для исключения низкочастотных и высокочастотных помех. Рекомендуется использование эллиптического фильтра, потому что он обеспечивает максимальное затухание сигнала в полосе задерживания. Частоты среза ПФ f_b, f_u выбираются на основе предварительной обработки данных и анализе спектральных характеристик. Экспериментально получены значения $f_b = 850$ Гц, $f_u = 1750$ Гц.

2) Данные, полученные на выходе полосового фильтра, возводятся в квадрат: $z(iT) = y(iT)^2$, где $i = 0, 1, 2, \dots$ – дискретное время; T – интервал квантования (величина, обратная частоте дискретизации датчика).

3) Найденные значения сигнала сравниваются с порогом, все значения, которые меньше порога, обнуляются.

Выполняется сглаживание данных с помощью скользящего окна с временем сглаживания t , после чего сигнал $z(it)$ фильтруется эллиптическим фильтром нижних частот (ФНЧ). Далее, полученные значения сравниваются с порогом; величинам, не превосходящим порога, присваивается нулевое значение.

4) Амплитудный и временной порог используются для удаления пиков с малой амплитудой и маленькой шириной импульса (временной порог). Если сигнал выше порогов обнаружения, то выдается флаг обнаружения ТС.

5) Для вычисления количества осей ТС используется алгоритм поиска максимумов кривой y_i .

Измеряемый сигнал предварительно фильтруется, возводится в квад-

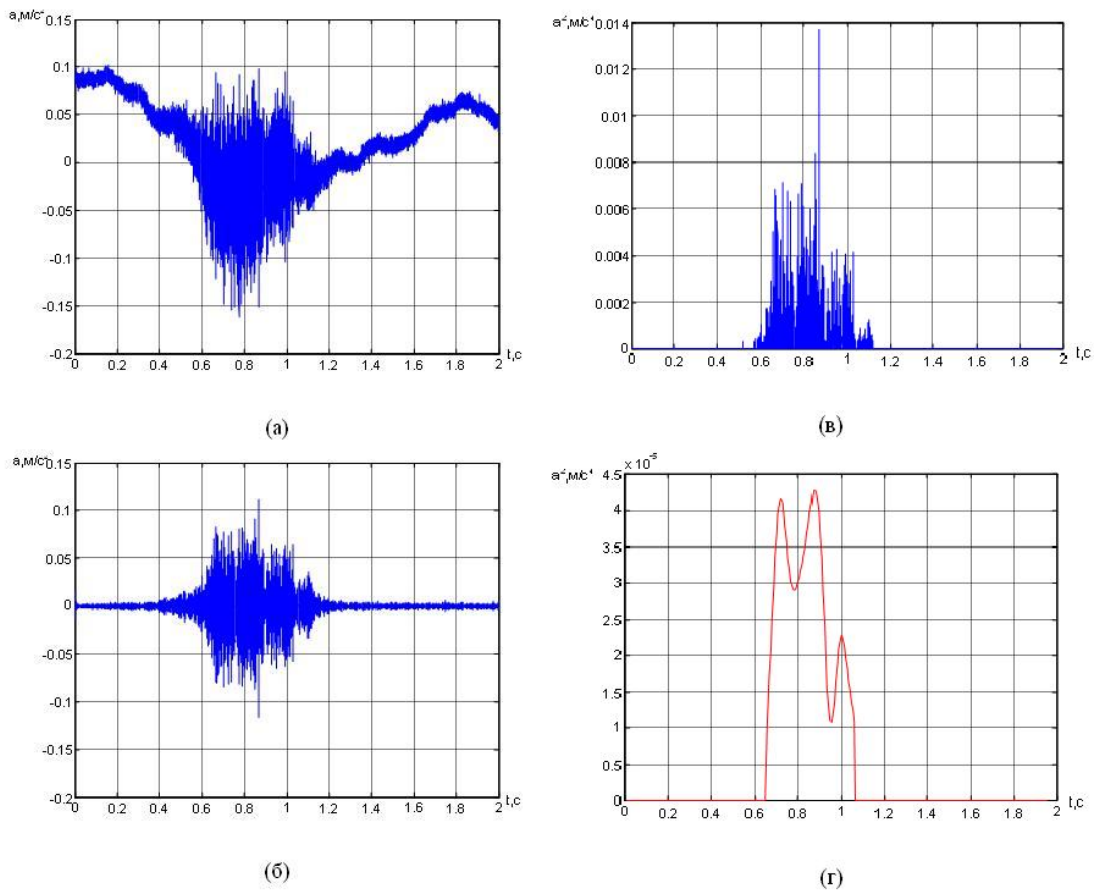


Рисунок 2 — Пример обнаружения ТС и определения количества осей.

рат и сглаживается скользящим окном и фильтром нижних частот для расчета энергии. На рисунке 2 показан пример обнаружения легкового автомобиля с прицепом. Количество осей может быть найдено очень легко по 2-г, путем анализа производной сигнала, т.е. нахождением количества максимумов сигнала.

Энергетическая оценка затем используется для обнаружения изменений в энергии. Наиболее простой путь для обнаружения ТС считать отрезки, когда энергия превышает порог амплитудный порог G . Однако амплитудного порога самого по себе не достаточно, поскольку он также создает определенные проблемы. Чтобы избежать ложных сигналов обнаружения вводится временной порог T_G . Пока t_{last} – разница во времени между последним превышением порога и текущим временем t – меньше, чем временной порог T_G , предполагается, что любое превышение порога обусловлено этим же ТС.

Выбор двух параметров напрямую влияет на вероятность ложного обнаружения и ошибок. Низкопороговое решение позволяет обнаруживать транспортные средства, которые имеют только низкий уровень энергии, но повышает вероятность ложного обнаружения в связи с другими сейсмиче-

скими возмущениями или транспортными средствами в соседних полосах в то же время. Высокопороговое решение, очевидно, уменьшает вероятность ложного обнаружения ТС, но не позволит обнаруживать некоторые ТС. Пороги рекомендуется выбирать исходя из вероятности ложного обнаружения с использованием вероятностного подхода.

Второй параметр, временной порог, определяет, какая должна быть минимальная разница во времени между двумя транспортными средствами в ряду. Небольшой временной порог дает обнаружение ТС с короткими интервалами следования, но увеличивает вероятность ложного обнаружения в связи с многочисленными обнаружения одного и того же транспортного средства. Большой временной порог, с другой стороны, снижает частоту ложных обнаружений, но увеличивает количество пропущенных (необнаруженных) ТС. Идеальная длительность временного порога зависит от скорости ТС и расстояния между соседними транспортными средствами.

Автором данной работы было при проведении экспериментов было получено 138 правильных обнаружений из 140 ТС.

Подход к решению этой проблемы заключается в использовании адаптивного временного порога, который устанавливается в зависимости от измеряемой энергии и количества осей. Другая возможность состоит в изменении решения, что автомобиль прошел только после того, как порог был превышен в течение определенного времени.

Второй алгоритм – алгоритм оценки расстояния между осями. Результаты экспериментов подтверждают возможность определения параметров ТС с различным числом осей [4].

В работе показано, что с еще одним параметром – скоростью автомобиля – легко вычисляется колесная база ТС. По колесной базе можно делать полноценную идентификацию классов ТС.

В четвертом разделе рассматривается задача идентификации классов ТС с помощью акселерометров. Узлы-датчики, состоящие из одного акселерометра и магнитометра, устанавливаются на дорожную разметку. Датчики обмениваются информацией по беспроводной сети между собой и серверами, расположенными вдоль дороги. Акселерометры измеряют вибрации дороги, за счет чего отсутствует непосредственный контакт датчиков с автомобилями. Магнитометры измеряют магнитные поля, создаваемые автомобилями, которые можно использовать для измерения скорости ТС. В данной работе скорость считается известной.

Предложен алгоритм определения классов автомобилей, основанный на измерениях с акселерометров. На первых шагах процедуры обработки данных с акселерометров выполняется предварительная обработка и обна-

ружение автомобилей. Затем следует обработка данных для классификации автомобилей. Предварительная обработка данных осуществляется согласно следующим шагам [1]:

1. Первоначальные данные, полученные с акселерометров, фильтруются полосовым фильтром. Предварительная обработка сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье и короткооконного преобразования Фурье выявила частотный диапазон от 850 до 1750 Гц. Такая обработка необходима для исключения низкочастотных и высокочастотных помех. Частоты среза ПФ выбираются на основе предварительной обработки данных и анализе спектральных характеристик.

Данные, полученные на выходе полосового фильтра, возводятся в квадрат: $z(iT) = y(iT)^2$, где $i = 0, 1, \dots$ – дискретное время; T – интервал квантования.

2. Сигнал сравнивается с порогом, все значения, которые меньше порога, обнуляются:

3. Производится сглаживание с помощью скользящего окна с временем сглаживания t .

4. Сигнал $z(i)$ фильтруется эллиптическим фильтром нижних частот (ФНЧ), частота среза выбирается в зависимости от скорости ТС: $w = f(V)$ [Гц], где V – скорость ТС, км/ч.

5. Значения сигнала сравниваются с порогом, если они меньше порога, то обнуляются:

6. Алгоритм поиска максимумов кривой y_i анализирует производную y'_i для поиска максимумов.

7. Для удаления «плохих» пиков (максимумов) используется порог. Мы не анализируем колесную базу меньше 70 см (0.70 м), так как не существует ТС с такой колесной базой. Колесная база может быть найдена оператором $(time2(i + 1) - time2(i)) \cdot V$.

8. Амплитудный и временной порог используются для удаления пиков с малой амплитудой и маленькой шириной импульса (временной порог). Рекомендовано выбирать порог амплитуды составляющим 8 % от максимального значения амплитуды импульса. Временной порог пересчитывается в расстояние, аналогично расчету колесной базы. Ширина импульса умножается на скорость. Не анализируются импульсы шириной меньше 70 см.

9. Выполняется алгоритм определения колесной базы.

Алгоритм классификации ТС представлен на рисунке 3. Графики сигналов [1] в важнейших точках алгоритма для идентификации ТС представлены на рисунке 4.

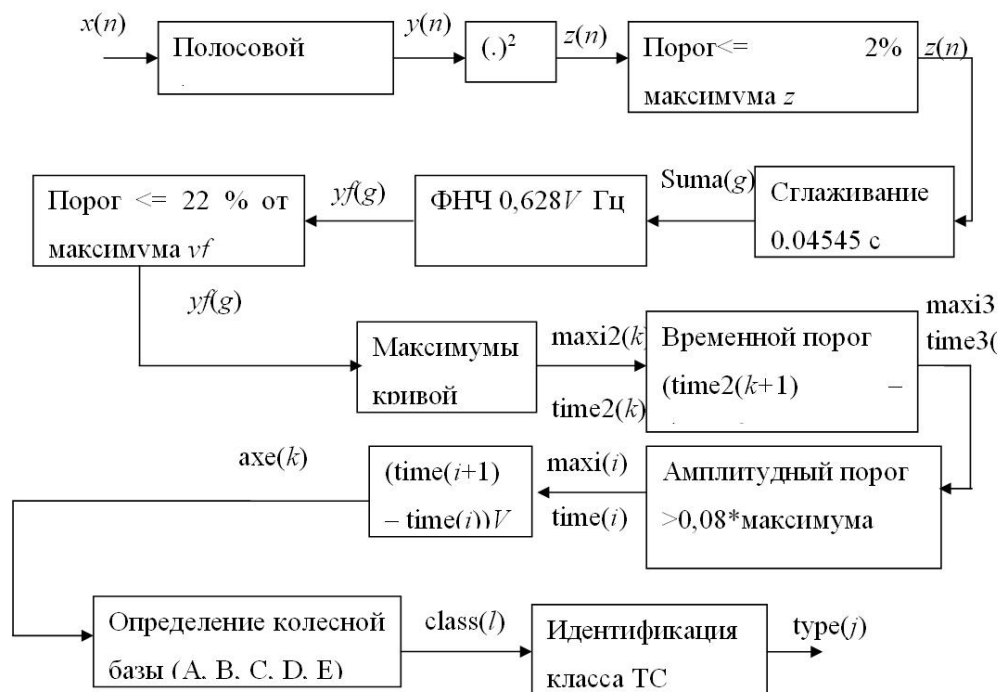


Рисунок 3 — Последовательность действий для идентификации классов ТС с использованием акселерометров.

Алгоритм тестирован с помощью серии экспериментов окрестности г. Лулео (Швеция). Основные результаты раздела опубликованы в [1].

В пятом разделе диссертации представлен спектральный анализ данных с акселерометров для задач обнаружения и идентификации ТС. Рассмотрены проблемы частотного и временного анализа вибраций дорожного покрытия, которые вызваны проезжающими транспортными средствами. Вибрации измеряются акселерометрами, устанавливаемыми на дорожную разметку. Реализуется предварительная обработка данных перед дальнейшим использованием их для анализа параметров движения транспортного потока. Приведены результаты обработки данных с помощью спектрального анализа и фильтрации.

Рассмотрим компоненты вибрации по трем осям OX , OY , OZ для легкового автомобиля. Ось OY направлена вдоль полотна в направлении движения, ось OX направлена вдоль полотна перпендикулярно движению, и ось OZ перпендикулярно полотну дороги. Сейсмические волны, вызванные любой формой возбуждения, распространяются как объемные (P - и S -волны) и поверхностные (волны Лява и Рэлея). В зависимости от способа распространения волны имеют различную степень затухания. Поверхностные волны испытывают ослабление $1/\sqrt{r}$ в однородной среде, где r – расстояние от источника волны до рассматриваемой точки. Объемные

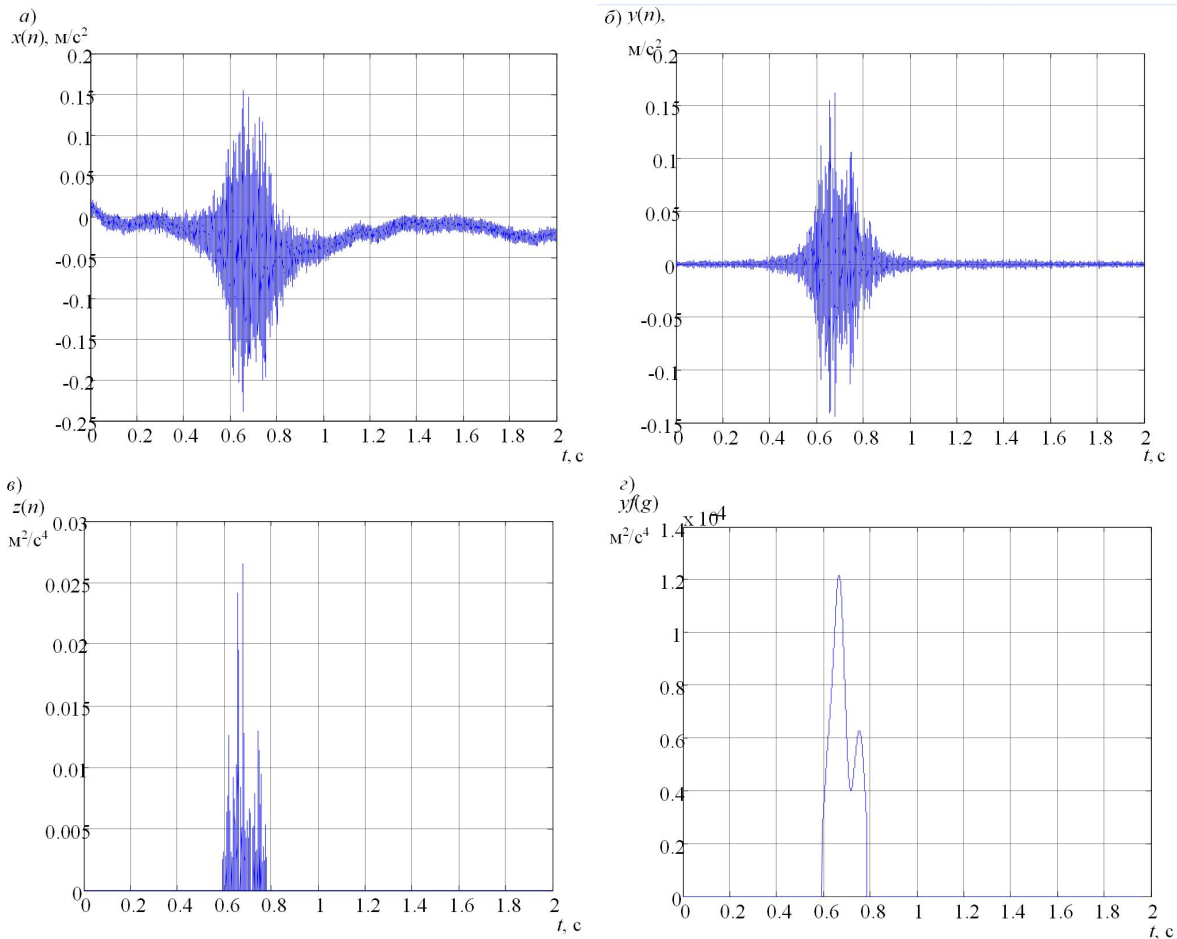


Рисунок 4 — Графики сигналов в важных точках последовательности действий.



Рисунок 5 — Сенсорный узел измерительной установки.

волны ослабляются пропорционально в однородной среде. P -волны и волны Лява являются основной причиной горизонтальных вибраций в X - и Y - направлениях. Волны Рэлея являются главной причиной вертикальных вибраций в Z -направлении. Кроме того известно, что колебания, в близких к поверхности слоях несут около $2/3$ энергии в поверхностной волне и только $1/3$ распространяется в виде объемных волн.

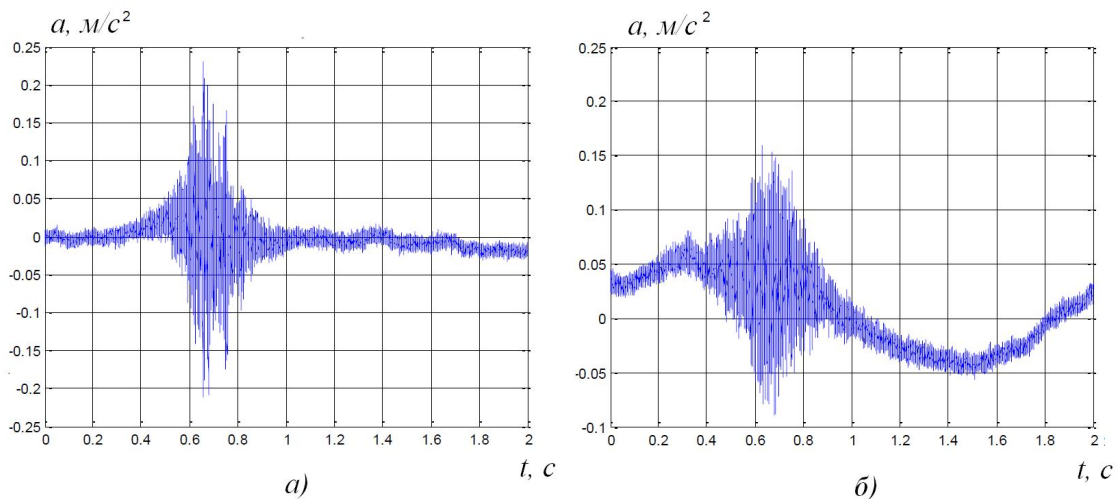


Рисунок 6 — Вибрации дороги в двух перпендикулярных направлениях (а – OX , б – OY).

Частотные характеристики сигналов, полученных от разных видов транспорта, имеют схожие компоненты. В общем случае можно выделить две характерные полосы частот: до 1750 Гц и полосу от 2 кГц до 3 кГц. Отчетливо видно, что наиболее информативной является полоса частот от 850 Гц до 1750 Гц. Однако сигнал вибрации, вызванной проездом грузовика, содержит высокоэнергетические компоненты на более высоких частотах, от 3.5 кГц до 4 кГц. Это свойство сигнала может быть использовано для идентификации ТС [2].

Анализ спектральных характеристик на рисунке 7 показывает, что максимум энергии сигнала приходится на частотный диапазон $850 \div 1750$ Гц. Он, однако, содержит значительное число как высокочастотных, так и низкочастотных помех, вызванных присутствием на дороге посторонних источников шумов. Дальнейшая обработка сигнала целесообразна после фильтрования сигналов помех полосовым фильтром. В работе был предложено использование эллиптического фильтра, который обеспечивает максимальное затухание в полосе задерживания по сравнению с другими типами фильтров.

Результаты временного анализа для легкового автомобиля, движущегося со скоростью $V = 22$ м /с представлены на рисунке 6. Такая же закономерность сохраняется и для других типов ТС.

При частотном анализе применены быстрое преобразование Фурье и короткоконное преобразование Фурье.

На рисунке 7-а представлен результат применения быстрого преобразования Фурье сигнала, полученного от легкового автомобиля, движущегося со скоростью 22 м/с; на рисунке 7-б – сигнала от грузовика с прицепом,

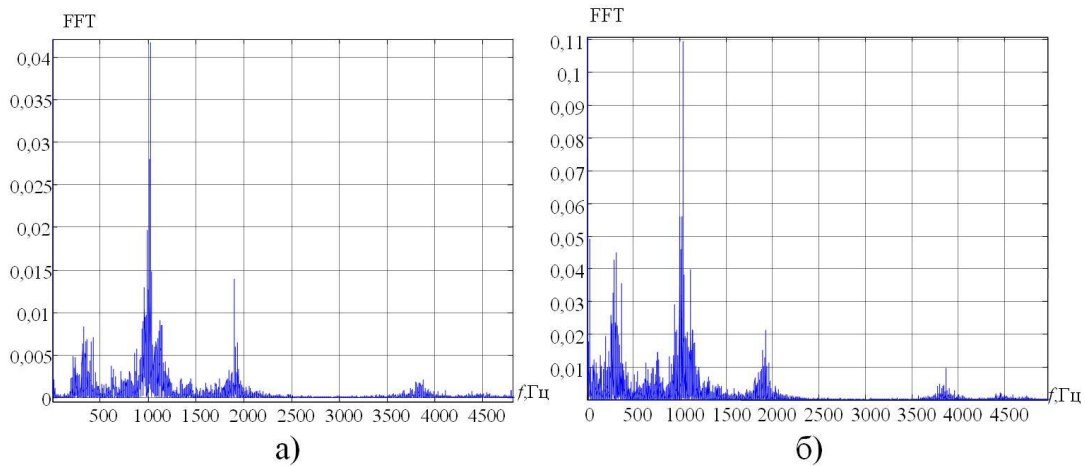


Рисунок 7 — Результаты применения быстрого преобразование Фурье для сигнала от легкового автомобиля (а), $V = 22$ м/с и грузовика с прицепом (б), $V = 25$ м/с.

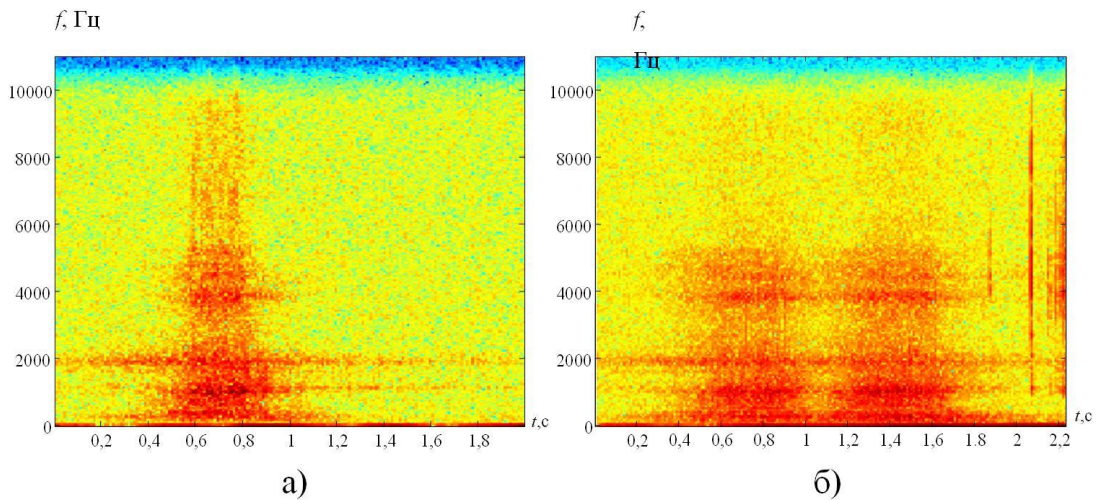


Рисунок 8 — Результат применения короткооконного преобразование Фурье.

движущегося со скоростью 25 м/с.

На рисунке 8 показаны результаты короткооконного преобразования Фурье для тех же сигналов. Затемненные области на рисунке 8 соответствуют наибольшим амплитудам сигнала.

Последующая обработка сигнала от движущих ТС включает в себя исключение отрицательных значений путем возведения в квадрат, сглаживание с помощью скользящего окна или фильтра нижних частот и нахождение амплитудного порога для обнаружения транспортного средства и временного порога, позволяющего разделять транспортные средства, движущиеся в сравнительной близости. Отметим, что данный метод позволяет определить скорость ТС с использованием двух акселерометров.

Заключение.

В диссертационной работе разработаны и экспериментально исследованы алгоритмы обнаружения ТС с использованием одного акселерометра, устанавливаемого на дорожную разметку для измерения вибраций дороги, вызванных ТС, оценки скорости ТС с использованием одного магнитометра, предложен метод оценки скорости движения транспортного средства на основе измерения магнитного пути. Также, разработан и экспериментально исследован алгоритм определения классов ТС с помощью сенсорного узла, включающего магнитометр и акселерометра, на основе чего разработан новый метод идентификации классов ТС по колесной базе. Разработана методика выбора параметров алгоритмов обнаружения методами временного и спектрального анализа. Получены статистические результаты по обнаружению и идентификации ТС на основе приведенных методов.

Эти результаты могут быть использованы в реальной жизни в ИТС при определении классов ТС по количеству осей и по колесной базе ТС.

Для будущих исследований предложены пути повышения точности предлагаемых алгоритмов, например, отслеживанием подпространства. Должны быть выполнены исследования о влиянии между источником вибрации и точки измерения. Должно быть проанализировано и оценено влияние другими источниками, такими как мотоциклы и пешеходы.

Следует также учесть, что требуется применение миниатюрных и недорогих встраиваемых систем с ограниченными возможностями обработки и датчиками с гораздо меньшей производительностью, чем те, которые были использованы при экспериментах. Это налагает определенные ограничения на возможности и производительность системы.

Публикации по теме диссертации

Публикации в журналах из списка ВАК

- 1 Обертов Д. Е. Алгоритм идентификации классов транспортных средств с помощью акселерометров [Текст] / Д. Е. Обертов , В.М. Бардов // Информационно–управляющие системы. – 2012. – № 5 (60). - С. 15–18. – 0.25/0.20 п.л.
- 2 Обертов Д. Е. Спектральный анализ данных с акселерометров для задач обнаружения и идентификации транспортных средств [Текст] / Д. Е. Обертов // Научно–технический вестник ИТМО. – 2012. – № 5 (8). - С. 44–50. – 0.5/0.5 п.л.
- 3 Обертов Д. Е. Оценивание скорости транспортных средств с использованием магнитометра [Текст] / Д. Е. Обертов , В. М. Бардов // Информационно–управляющие системы. – 2013. – № 4 (65). - С. 21–26. – 0.375/0.185 п.л.
- 4 Обертов Д. Е., Бардов В. М. Алгоритм обнаружения транспортных средств с помощью акселерометров [Текст] / Д. Е. Обертов, В.М. Бардов // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 6 (67). – С. 6–13. – 0.5/0.4 п.л.

Публикации в трудах международных конференций

- 5 Obertov D. Vehicle Classification Using Measurements From Accelerometers Mounted On The Road Surface[Текст] /D. Obertov , V. Andrievsky // Proceedings of the 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR 2014). Micedzyzdroje, Poland. September 2–5. – 2014. - P. 413–417. – 0,31/0,25 п.л.
- 6 Obertov D. Vehicle Speed Estimation Using Roadside Sensors[Текст]/D. Obertov , V. Bardov , V. Andrievsky // Proceedings of the 6th Int. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2014), St. Petersburg, Russia. October 2–6. –2014. IEEE Press. - P. 207–213. – 0,44/0,22 п.л.

Публикация в трудах Всероссийской конференции

- 7 Обертов Д. Е. Определение параметров транспортного средства с использованием датчиков дорожного покрытия /Д. Е. Обертов, В. М. Бардов // Тез. докл. I Всероссийского конгресса молодых ученых / СПб: СПбГУ ИТМО. – Апрель, 2012. - С. 196–197. – 0.125/0.06 п.л.