

На правах рукописи

Городничев Михаил Геннадьевич

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ МОДЕЛИ СЛЕДОВАНИЯ ЗА ЛИДЕРОМ**

Специальность 05.13.17 — Теоретические основы информатики

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования "Московском техническом университете связи и информатики" на кафедре математической кибернетики и информатики

Научный руководитель: Буслаев Александр Павлович
д.ф.-м.н., проф.
ФГБОУ ВПО "МАДИ", зав. кафедрой высшей математики

Официальные оппоненты:
Валуев Андрей Михайлович
д.ф.-м.н., доц.
НИТУ МИСиС, профессор
Чурбанова Наталья Геннадьевна
к.ф.-м.н., с.н.с.
Институт прикладной математики
им. М.В.Келдыша РАН, с.н.с.

Ведущая организация: Федеральная служба охраны
Российской Федерации
Управление информационно-телекоммуникационного обеспечения службы специальной связи и информации

Защита состоится « ___ » _____ 20__ г. в ___ часов на заседании диссертационного совета № Д 219.001.03 при Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-455

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский технический университет связи и информатики».

Автореферат разослан « ___ » _____ 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н., доц., Ерохин С.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Поток как совокупность движущихся по одному носителю частиц (объектов) является классическим предметом исследования. Это прежде всего классическая динамика систем: жесткая сцепка, упругие силы, нелинейные колебания, рассматриваемые в середине 20 века Мандельштамом Л.И., Андроновым А.А., Виттом А.А., Хайкиным С.Э. и др. Однако современные тенденции состоят в том, что частицы становятся всё более сложными и далеко не всегда их поведение оценивается ньютоновскими законами, взаимодействием соседних частиц.

Более общий подход к классификации движущихся цепочек получил название частицы с мотивированным поведением, куда вполне можно отнести биологические объекты. Технологические процессы многих производств содержат цепочки искусственных объектов с программируемым поведением. Наконец, социальные (пешеходы) или социально-технические системы (трафик) в полной мере представляют сегодня интерес для исследования в связи с безопасностью движения и оптимизацией, которая позволит при заданных ограничениях уменьшить потери времени при совершении поездок. Существенный вклад в развитие методов математического моделирования социально-технических систем внесли отечественные и зарубежные учёные: А.С. Бугаёв, А.П. Буслаев, А.М. Валуев, В.В. Козлов, А.Г. Таташев, Б.Н. Четверушкин, Н.Г. Чурбанова, М.В. Яшина и др.

Начиная с середины 20 века активно развивалась вычислительная техника в разных областях. Процесс информатизации сказался на социальных и социально-технических системах. Безопасность и оптимизация передвижения частиц с мотивированным поведением становятся одним из главных предметов исследования специалистов в связи с бурным развитием этих систем. Для решения данных задач необходимо проводить исследования с помощью средств вычислительной техники, разработки математических моделей и методов взаимодействия информационным процессом.

Существенный вклад в развитие инфокоммуникационных технологий внесли отечественные и зарубежные учёные: А.С. Аджемов, В.М. Вишневецкий, В.Н. Гордиенко, А.Е. Кучерявый, А.В. Пестряков, А.П. Пшеничников, К.Е. Самуйлов, В. Столлингс, Ю.Л. Леохин и др.

Актуальность темы определяется необходимостью совершенствования существующих моделей и разработки новой модели поведения цепочки частиц, позволяющих достичь максимальной безопасности и оптимизации передвижения. Разработать на их основе систему управления и анализа передвижения частиц с мотивированным поведением.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка методов интеллектуального мониторинга, моделирование движения потока частиц в социально-технических системах, разработка математических моделей, алгоритмов, исследование модели движения с числовыми характеристиками, полученными посредством *современных информационных технологий*, разработка интеллекту-

альной системы, позволяющей эффективно управлять движением частиц.

Задачами исследования являются:

1) обзор существующих моделей и исследование мотивации поведения частиц в динамических системах, в частности, социально-технических системах;

2) разработка методов интеллектуального мониторинга и исследование качественных свойств поведения цепочки частиц с заданными граничными условиями на их основе;

3) создание математической модели, описывающей поведение цепочки частиц;

4) исследование аналитическими методами качественных свойств созданной модели;

5) численные методы исследования и реализация модели посредством современных ИКТ;

6) оценка адекватности модели.

Объект исследования

Объектом исследования являются в широком смысле потоки частиц с мотивированным поведением, и, как базовые примеры, трафик и аналогичные социально-технических системы.

Предметом исследования являются аналитические аспекты инфокоммуникационных технологий для идентификации характеристик, моделирования и управления потоками частиц с мотивированным поведением.

Достоверность и обоснованность. Достоверность и обоснованность научных результатов работы подтверждается адекватностью применяемых при исследовании математических методов, соответствием выдвинутым положениям и результатам моделирования, апробацией созданного программного обеспечения. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена большим объёмом экспериментального материала, использованием современных средств компьютерного моделирования, статистическими методами обработки данных. Работа соответствует паспорту специальности: 05.13.17 «Теоретические основы информатики» и относится к исследованиям, в том числе с помощью средств вычислительной техники, информационных процессов, информационных потребностей коллективных и индивидуальных пользователей, а также разработке теоретических основ создания программных систем для новых информационных технологий.

Методы исследования

При решении поставленных задач в диссертационной работе использованы:

1) методы цифровой обработки сигналов;

2) синхронные и асинхронные методы передачи данных;

3) численные методы математического анализа;

4) качественные методы исследования нелинейных уравнений и неравенств;

5) методы автоматизированной обработки данных.

Информационную базу исследования составили научные и информационные публикации в отечественной и зарубежной литературе, журнальные статьи, научные доклады, материалы конференций, семинаров; статистические данные Федеральной службы государственной

статистики РФ.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Созданы и апробированы модели автоматического детектирования параметров потоков частиц, движущихся однонаправлено в цепочке.
2. Создана модель "Следования за лидером" и модель "Заднего привода" с различными граничными условиями, в точных математических постановках.
3. Исследованы качественные свойства нелинейной модели. Получены условия при которых движение будет устойчивым, что позволяет рационально организовывать потоки, а так же обеспечивать безопасность.
4. Разработан инфокоммуникационный метод реализации математической модели движения на примере трафика.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в том, что проведён полный цикл исследования проблемы, которая состоит в следующем:

- 1) идентификации наблюдаемой системы (или определение параметров через техническое задание)
- 2) создании математической модели движения цепочки
- 3) исследовании качественных свойств модели
- 4) реализации созданной математической модели, как потока частиц с мотивированным поведением
- 5) проверке адекватности полученных результатов на реальных данных

Практическая ценность данной работы состоит в том, что разработаны методы, максимально адаптированные к теме трафик и пешеходов (пешеходные) потоков.

Реализация результатов исследования

Результаты работы и полученные оценки были апробированы и проверены в ходе теоретических и экспериментальных исследований в рамках выполнения проектов РФФИ:

11-01-12140-офи-м-2011, Теоретические и вычислительные методы исследования динамических систем на сложных сетях, 2011 - 2012, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук

11-07-00622-а, Алгоритмические и программные аспекты автоматической обработки видеоряда в задаче восстановления характеристик потоков частиц на сложной сети, 2011 - 2013, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования Московский технический университет связи и информатики

12-01-00794-а, Точные и асимптотические оценки характеристик монотонного случайного блуждания на сложных целочисленных решетках и применение к исследованию трафика, 2012 - 2014, Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное учреждение высшего профес-

сионального образования Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

13-01-12064, Модели, математические задачи и теоремы о насыщенных потоках на сложных сетях - кольчугах, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук

НОЦ ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г. ГК № 14.740.11.0397 от 20.09.2010 «Теоретические и прикладные вопросы создания систем интеллектуального мониторинга и управления распределенными процессами», ФГБОУ ВПО «МТУСИ»

Минобрнаука РФ: № 7.7723.2013 «Мониторинг, моделирование и мобилизация в распределенных социально-технических системах транспорта, связи и логистики», 2013, ФГБОУ ВПО «МАДИ»

Минобрнаука РФ № 2.723.2014 Компьютерные методы моделирования трафика на сетях и инфокоммуникационные технологии верификации и тестирования, 2013, ФГБОУ ВПО «МАДИ».

Разработанные методы сбора, обработки данных и методы исследования использовались на занятиях в курсах подготовки по специальности 230100 - « Информатика и вычислительная техника » и внедрены в учебный процесс кафедры математической кибернетики и информатики МТУСИ, кафедры высшей математики "МАДИ", имеются акты внедрения.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: МТУСИ, 2011г., 9-ой международной научно-технической конференции «Traffic and Granular Flow», МТУСИ, Москва 2011г., «Саратовская зимняя школа», 2012 г., 12-ой и 14-ой международной научно-технической конференции «Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering», 2012 г. и 2014 г., международной научно-технической конференции «Polish-British Workshop», 2013 г., международной научно-технической конференции «Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX», 2013 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 7 статей - в международных рецензируемых изданиях, приравненных к списку ВАК, и материалах международных конференций. Три работы опубликованы в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. В опубликованных работах автору принадлежат теоретические исследования, экспериментальные результаты и выводы.

Личное участие автора

Результаты измерений, разработка методов исследования и анализ результатов получены самостоятельно. Все натурные эксперименты проведены и проанализированы лично.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанные автоматические методы интерактивного и пассивного идентификации

параметров потока частиц, позволяют более точно определить наблюдаемый процесс и учесть его особенность при создании модели.

2. Поставленные и исследованные аналитическим и имитационным методами модели "Следования за лидером" и "Заднего привода", позволяют построить сбалансированный процесс наблюдения, прогноза и управления потоком с целью увеличения безопасности и повышения эффективности, а также в критических режимах.

3. Разработанные автоматические инфокоммуникационные технологии, позволяют снизить степень свободы (непредсказуемости) человеческого фактора в социально-технической системе и, более того, реализовать режим связного движения в рамках моделей "Следования за лидером" и "Заднего привода".

4. Реализованная схема управления цепочкой частиц позволяет эффективно управлять в критических режимах, узких местах и т.д.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов, библиографического списка из 72 наименований отечественных и зарубежных авторов. Объем работы 114 стр. печатного текста, 47 рисунков, 14 таблиц и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и обозначена цель исследований, показана научная новизна и практическая значимость результатов диссертации.

Одна из первых, бурно развивающихся, социально-технических систем является трафик. В 1910 г. начался процесс автомобилизации. Процесс автомобилизации сопровождался такими факторами, как увеличение количества автомобилей, увеличение средней массы, увеличение средней скорости автомобилей

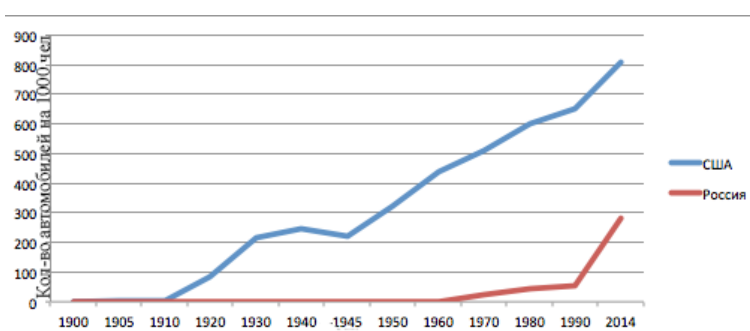


Рис. 1: Динамика автомобилизации в США и России, [<https://engineering.purdue.edu>]

Основными причинами начала автомобилизации является изобретение в 1885 г., а впоследствии патентование первого самодвижущегося экипажа с бензиновым двигателем, применение конвейерной сборки автомобилей, построение первой дороги с твёрдым беспыльным покрытием в 1914 году. Однако, данный процесс имел и негативные аспекты, такие как, большое количество ДТП, выбросы вредных веществ в окружающую среду, возникновение заторов, которые

приводят к другим проблемам. Например, экономическим потерям.

С середины 20 века активно развивалась вычислительная техника в разных областях, в том числе автомобилестроении. Для повышения безопасности и оптимизации передвижения производители разрабатывали и интегрировали в автомобилестроение инфокоммуникационные средства. В 1978 году на Mercedes-Benz класса S была установлена первая интеллектуальная система, *антиблокировочная система тормозов*. В 2008 году была создана интеллектуальная система, разрабатываемая компанией Volvo, защиты при столкновении. В 2010 году была разработана система обнаружения помех.

Гриншильдс в 1933 г. разработал первый метод измерения характеристик автотранспортных потоков. В этом методе в качестве оконечного устройства использовалась камера. Гриншильдс снимал поток, затем ручным способом оценивал интенсивность и получал зависимость расстояния между транспортными средствами от скорости их движения. В результате им получена фундаментальная диаграмма транспортного потока.

Параллельное развитие вычислительной техники, автомобилестроения и теории потоков подготовило почву для качественного совершенствования подходов к моделированию потоков частиц в социально-технических системах.

В первой главе рассмотрены методы интерактивного и пассивного исследования цепочки частиц с мотивированным поведением. В качестве основного допущения постулируются нелинейные зависимости между расстоянием до впереди-идущего элемента и скоростью $d = f(v)$, где f вообще говоря нелинейная функция. Поэтому, центральной задачей первой главы является исследование способов восстановления функции f по измерениям потока. Классическая модель f - это квадратичная зависимость $d = f(v) = a_0 + a_1v + a_2v^2$, где параметры a_0, a_1, a_2 имеют определённую физическую интерпретацию. Например, в трафике, a_0 - это статический габарит автомобиля, a_1 - задержка реакции водителя или время обработки информации автоматом, который управляет автомобилем. Наконец, a_2 - коэффициент, пропорциональный максимально возможному торможению.

При моделировании цепочки частиц основными параметрами является безопасное расстояние между частицами (d). Для оценки данного параметра используются пассивные и интерактивные методы. К пассивным относится получение характеристик о поведении частиц в целом и дальнейшая обработка для получения статистических данных. К интерактивным относится непосредственная обратная связь с оконечными устройствами, возможность управления ими.

В первой главе рассматриваются интерактивные и пассивные методы на примере трафика, но могут быть применены для любой цепочки с мотивированным поведением. Выбор предмета приложения связан как с актуальностью темы, так и доступом к оконечным устройствам, которые задействованы исследуемых системах.

Пассивный метод основан на оконечных устройствах, в диссертационной работе, это микроволновый радар SSHD. Прибор предназначен для интеллектуального мониторинга характери-

стик автотранспортных потоков.

Данный прибор позволяет измерять *количество проехавших автомобилей*, верхнюю квантиль скорости, *скорость*, *дистанцию между автомобилями*, направление движения, занятость, загрузку по полосам, определять наличие автомобилей и производить их классификацию. Прибор имеет 5-кратную разрешающую способность, рабочую зону до 80 метров. Данные о параметрах транспортных потоков сохраняются в оперативной памяти. Рабочая частота прибора 24-24.25 ГГц. Управление и настройки осуществлялись по беспроводной связи - bluetooth. Принцип действия основан на использовании радиоволн. Радиосвязь Bluetooth осуществляется в ISM-диапазоне (англ. Industry, Science and Medicine), который используется в различных бытовых приборах и беспроводных сетях (свободный от лицензирования диапазон 2,4-2,4835 ГГц). В Bluetooth применяется метод расширения спектра со скачкообразной перестройкой частоты (англ. Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Метод FHSS прост в реализации, обеспечивает устойчивость к широкополосным помехам и оборудование относительно недорогое.

Прибор определяет интенсивность, скорость, наблюдаемых движущихся объектов, и т.д. по следующему принципу: на каждой полосе, существует детектируемая область известного размера. Прибор фиксирует время прохождения автомобиля через эту область, и на основании этого высчитываются параметры. Данный метод дает погрешность в нескольких процессах. Для определения применимости метода необходимо оценить погрешность.

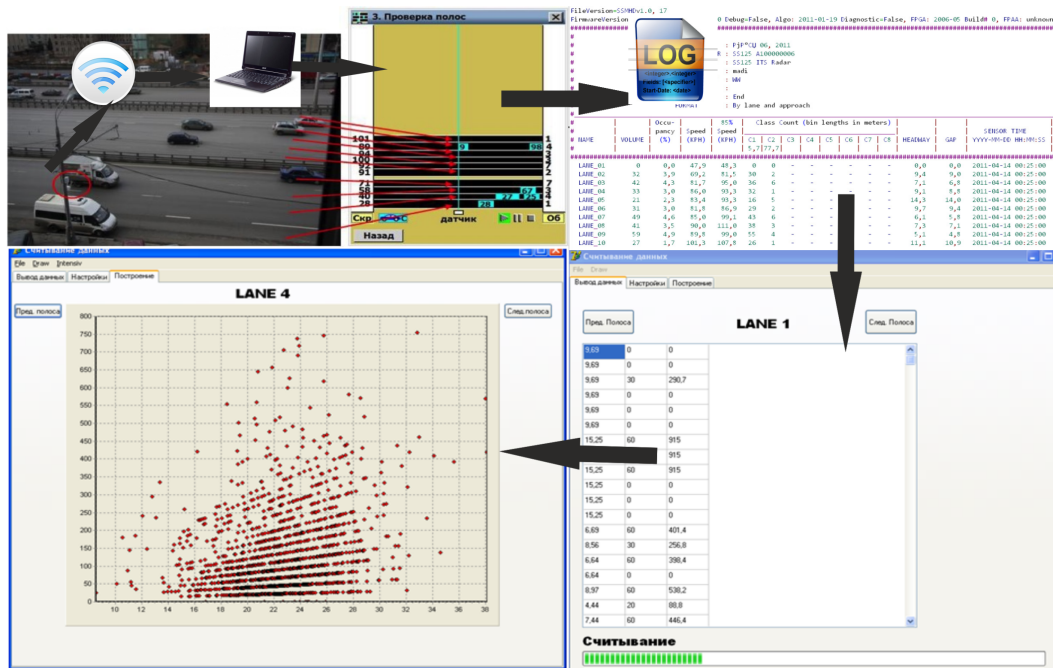


Рис. 2: Цикл автоматической обработки информации и анализ характеристик

Для автоматизированного сбора, обработки и анализа получаемых данных, разработана теоретическая основа и реализовано программное обеспечение. Приложение обрабатывает log файлы SSM HD, строит по ним аналитические графики, аппроксимирует выделенные сектора, на-

ходит коэффициенты a, b полученных прямых ($y = ax + b$), выводит статистические показатели. На основе данного метода возможно автоматизировано производить оценку параметров a_0, a_1, a_2 .

По результатам анализа была выявлена закономерность и сделан вывод, что *можно выделить от 13 до 16 психологических типов водителей.*

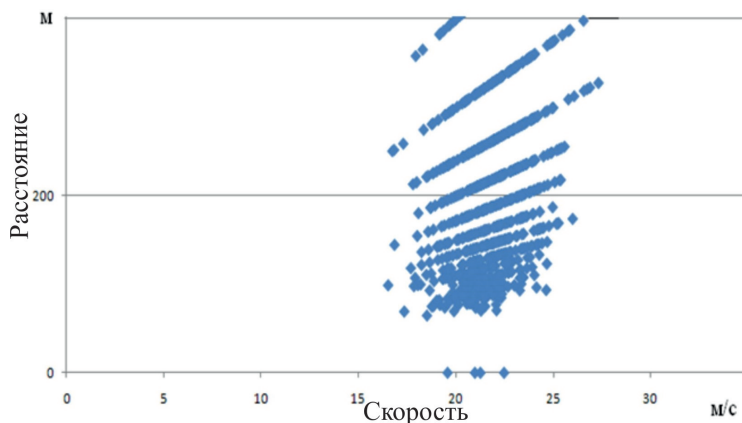


Рис. 3: Разбиение социально-технической системы на типы

Для проверки адекватности оценки параметров необходимо понимать какова погрешность метода измерения, для этого были произведены замеры характеристик потока при разных скоростных режимах

$$\begin{cases} a_0 + a_1 v_1 + a_2 v_1^2 = d_1 \\ a_0 + a_1 v_2 + a_2 v_2^2 = d_2 \\ a_0 + a_1 v_3 + a_2 v_3^2 = d_3 \end{cases}$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & v_1 & v_1^2 \\ 1 & v_2 & v_2^2 \\ 1 & v_3 & v_3^2 \end{pmatrix}, \det A = (v_3 - v_2)(v_2 - v_1)(v_3 - v_1), \text{ где } v_1 < v_2 < v_3, \text{ матрица } A \text{ хорошо}$$

обусловлена, т.е. $\det A \gg 0$. Ошибка восстановления параметров a_0, a_1, a_2 пропорциональна ошибке идентификации расстояния между автомобилями и обратно пропорциональна $\det |A|$, то погрешность измерения будет зависеть только от правой части, т.е. от погрешности измерения расстояния между автомобилями. Расстояние между автомобилями равняется отношению v/q , где q - интенсивность, v - скорость, тогда $v/q - v_1/q_1 = (vq_1 - qv_1)/q^2$, где $q = \varepsilon + q_1, v = \varepsilon + v_1$, тогда $\varepsilon(v - q)/q^2$. Максимальная погрешность ε порядка 10%, следовательно погрешность определения расстояния между автомобилями не будет превышать 10%.

Получены рекомендации для повышения точности измерений радара. Для повышения точности работы оконечного устройства необходимо выполнить следующие условия при установки: место установки датчика следует подбирать так, чтобы все контролируемые полосы располагались на расстоянии порядка 80 метров от датчика и были параллельны между собой. Следует

избегать поглощения радиоизлучения такими препятствиями, как деревья, дорожные знаки и другие элементы дороги. Минимальный монтажный сдвиг (расстояние между датчиком и краем первой полосы) составляет 1,8 м.

При выполнении вышеописанных условий, оценка погрешности: минимальное детектируемое расстояние между двумя транспортными средствами: 1,67 м, погрешность определения скорости ± 5 км/ч $\approx 10\%$ (так как рассматривается режим движения от 50 до 110 км/ч), погрешность определения интенсивности по полосам: $\pm 10\%$.

Интерактивный метод исследования подразумевает, что в роли конечных устройствах выступают мобильные устройства, с возможностью обратной связью. К данному методу относится система SSSR (Студент-Смартфон-Сервер-Распределение), разработанной в НОЦ ИМСУТ МТУСИ.

Имеется два автомобиля - ведущий и ведомый. В каждый установлен смартфон. Каждую секунду смартфоны сохраняют свои gps координаты и текущее время в файл. По окончании поездки, файлы отправляются на сервер. На сервере файл обрабатывается и строятся 2 зависимости:

- Зависимость расстояния между смартфонами от времени.
- Зависимость расстояния между смартфонами от скорости ведомого.

Для эксперимента необходимо достаточное количество спутников GPS, отсутствие большого скопления частиц (автомобилей) на дороге. Отсутствие спутников не даёт получать текущее положение, а большое скопление частиц искажает исследуемую зависимость.

Перед началом эксперимента в мобильном приложении выбирается тип клиента (ведущий или ведомый). При нажатии кнопки *Начать передачу* происходит автоматическое сохранение GPS данных в файл в память смартфона.

На рисунке 4 красные точки так же значения расстояния полученные экспериментально. Можно видеть, что здесь полученные точки уже не совпадают с прямой Гриншильдса, поэтому было построено приближение методом наименьших квадратов. Получившиеся коэффициенты параболы: $a=5.89594, b=0.41231, c=6.8121$.

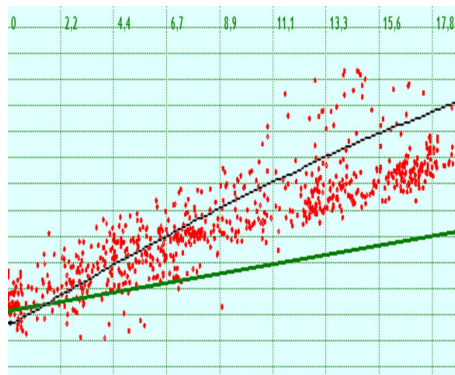


Рис. 4: Оценка параметров по результатам исследования

Погрешность данного метода в основном зависит от точности устройств глобального позиционирования. На точность показания приемника устройств глобального позиционирования влияют разные факторы. Большинство из них воздействует на радиосигнал на пути его прохождения от спутника до приемника; они описаны ниже. Из-за помех при прохождении тропосферы и облаков водяного пара возникают ошибки в синхронизации, поскольку сигнал проходит несколько большее расстояние, чем расстояние по прямой.

Ниже указан вклад различных источников погрешности позиционирования:

Источник погрешности	Вклад в общую величину погрешности
Часы спутника	1.5 м
Отклонение орбиты	2.5 м
Ионосфера	5.0 м
Тропосфера	0.5 м
Многолучевая погрешность	0.5 м
Типичная погрешность показаний	до 4м

Рис. 5: Оценка погрешности позиционирования

Для оценки погрешности данного метода был проведен эксперимент по измерению точности позиционирования бытового приемника в смартфоне. Два смартфона со встроенными GPS приемниками были помещены в автомобиль и весь маршрут находились на расстоянии одного метра. Автомобиль двигался по установленному маршруту. Средняя разность скоростей за весь путь составила 5,06 км/ч, это примерно 9-11% с учётом того, что скорость движения составила 50-60 км/ч.

Вторая глава посвящена теоретическим постановкам и исследованию нескольких моделей движения цепочки частиц.

Рассматривается движение частиц в одном направлении друг за другом

$$x_0(t) < x_1(t) < \dots < x_{n+1}(t), \forall t > 0,$$

где $x_n(t)$ - траектория движения частицы с номером n по прямой.

Основным понятием является *динамический габарит*. Динамический габарит рассматривается как расстояние безопасности в зависимости от скорости с коэффициентами, определяемыми в главе 1. Предполагается однотипный динамический габарит, т.е. не рассматривается разный характер управления.

Система дифференциальных неравенств эквивалентна условиям безопасного движения

$$x_{n+1}(t) - x_n(t) \geq C_0 + C_1 \dot{x}_n(t) + C_2 \dot{x}_n^2(t). \quad (1)$$

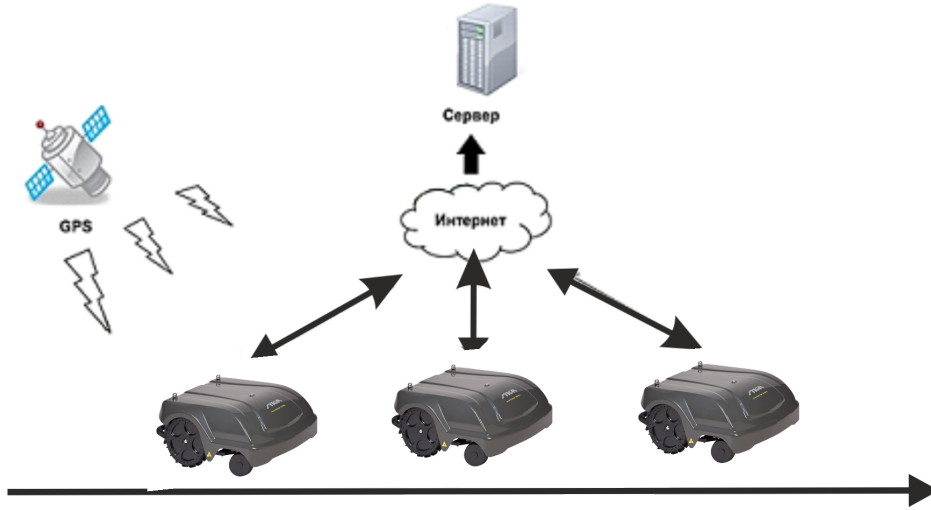


Рис. 6: Схема движения цепочки

Предполагается, что скорость \dot{x}_n - абсолютно непрерывна и ограничена

$$|\dot{x}_n(t)| \leq M_1, \forall n = 0, \dots, N, \forall t > 0, \quad (2)$$

и, учитывая однонаправленность движения (в положительном направлении),

$$0 \leq \dot{x}_n(t) \leq M_1, \forall n = 0, \dots, N, \forall t > 0, \quad (3)$$

ускорение \ddot{x}_n существует почти всюду и ограничена

$$M_2 \leq \ddot{x}_n(t) \leq M_3, \forall n = 0, \dots, N, \forall t > 0 \quad (4)$$

где M_2 и M_3 , вообще говоря, несимметричны и связаны с торможением (сцепление) и ускорением (двигатель).

Движение цепочки называется тотально-связным, если в (1) все нестрогие неравенства суть равенства; и *частично связным*, если некоторые неравенства в разное время являются строгими неравенствами, а другие - равенствами. В работе рассматривается тотально-связное движение.

Для классификации имеет смысл рассматривать один из следующих вариантов динамического габарита:

(а) *Военная колонна (МС)*

$$C_2 = C_1 = 0; C_0 = a.$$

(б) *Линейный динамический габарит (LDG)*

$$C_2 = 0; C_1 = C_0 = a.$$

(с) *Классический динамический габарит (квадратичная зависимость) (CDG)*

$$C_0 = a, C_1 = b, C_2 = c.$$

Заметим, что в случае автомобильного трафика a - статический габарит автомобиля

Некоторые факты целесообразно исследовать в общем случае

(d) *Обобщенный динамический габарит (GDG) $d(y)$,*

где $d(y)$ – монотонно возрастающая и неограниченная функция неотрицательного аргумента, непрерывная и дифференцируемая, $d(0) = 1$.

Модель "Следования за лидером". Постановка задачи

Имеется цепочка частиц x_1, \dots, x_{N+1} . $\forall n = 0, \dots, N$ справедливо

$$\begin{cases} x_{n+1}(t) - x_n(t) = C_0 + C_1 \dot{x}_n(t) + C_2 \dot{x}_n^2(t) \\ 0 \leq \dot{x}_n(t) \leq M_1, \forall n = 0, \dots, N, \forall t > 0 \\ \left| \ddot{x}_n(t) \right| \leq M_2, \forall n = 0, \dots, N, \forall t > 0 \end{cases} \quad (5)$$

начальные условия

$$x_1(0) = x_1, \dots, x_n(0) = x_n. \quad (6)$$

Граничное условие (7) - модель "Следования за лидером"

$$x_{N+1}(t) = f(t), \quad (7)$$

где задаётся функция $f(t)$ движения x_{N+1} частицы (лидера). Необходимо восстановить функцию движения последующих частиц. Модель (5)-(7) называется моделью "Следования за лидером".

Модель "Заднего привода". Постановка задачи

$$\begin{cases} x_{n+1}(t) - x_n(t) = C_0 + C_1 \dot{x}_n(t) + C_2 \dot{x}_n^2(t) \\ 0 \leq \dot{x}_n \leq M_1, \forall n = 0, \dots, N, \forall t > 0 \\ \left| \ddot{x}_n \right| \leq M_2, \forall n = 0, \dots, N, \forall t > 0 \end{cases} \quad (8)$$

начальные условия

$$x_1(0) = x_1, \dots, x_n(0) = x_n. \quad (9)$$

Граничное условие (10) - модель "Заднего привода"

$$x_1(t) = f(t) \quad (10)$$

где задаётся функция $f(t)$ движения последней частицы x_1 . Модель (8)-(10) называется моделью "Заднего привода".

Исследование модели "Следования за лидером" (5)-(7) и модели "Заднего привода" (8)-(10)

В работе исследованы основные вопросы: существование решения в задачах (5)-(7) и (8)-(10), устойчивость относительно механических параметров, т.е. коэффициентов C_0, C_1, C_2 и ограничений M_1, M_2 . Если $f(t)$ будет удовлетворять ограничениям, будут ли удовлетворять ограничениям траектории последующих частиц?

Линейный динамический габарит в модели "Следования за лидером"

В модели "Следования за лидером" изучена проблема существования решений. Доказано, что при движении лидера близком к равномерному $x_{N+1} = f(t) \equiv t$ существует решение. Найден явный вид:

$$x_{N-k} = t - 2(k+1) + d_{N-k}e^{-t} + d_{N-k+1}te^{-t} + \frac{d_{N-k+2}}{2}t^2e^{-t} + \dots + \frac{d_N}{k!}t^k e^{-t}, \quad (11)$$

где $k = 0, 1, \dots, N-1$.

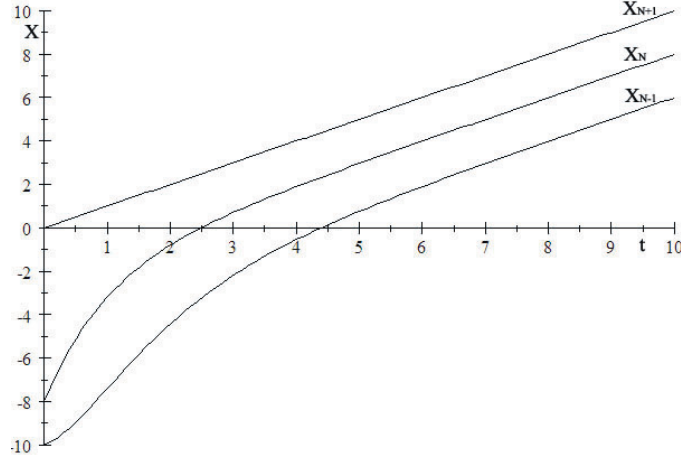


Рис. 7: Траектории движения частиц в модели "Следования за лидером"

В работе исследованы качественные свойства модели и доказано, что при движении лидера близком к равномерному $x_{N+1} = f(t) \equiv t$ все частицы цепочки будут сходиться к равномерному движению.

Линейный динамический габарит в модели "Заднего привода".

Исследован вопрос существования цепочки. Доказано, что при движении аутсайдера по гармоническому закону $x_1(t) = t + a \sin \omega t + b \cos \omega t$ и $M_1 = M_2 = 1$, можно утверждать, что если $\forall N \exists a, b, \omega$ такие, что выполняется неравенство $\omega^2(\omega^2 + 1)^N(a^2 + b^2) \leq 1$, то связная цепочка длины N существует.

Колебания с маленькой амплитудой и большой частотой в модели "Заднего привода" приводят к нарушению связности цепочки. В модели "Следования за лидером" подобные колебания не нарушают связность цепочки. *Это принципиальная разница модели "Следования за лидером" от модели "Заднего привода".*

Квадратичный динамический габарит

Пусть $x_n(t)$ и $x_{n+1}(t)$ - траектории ведомого и ведущего соответственно. Тогда

$$\ddot{x}_n + \dot{x}_n - (x_{n+1} - x_n - 1) \leq 0,$$

Доказано, если $M_1 \leq M_2$, то существует связная движущаяся цепочка произвольной конечной длины при допустимом поведении ведущего.

$$0 \leq x_{n+1} - x_n \leq M_1^2 + M_1 + 1.$$

Таким образом получено, что *ограничение на скорость ведомого равносильно ограничению на расстояние между ведомым и ведущим.*

Теперь будем предполагать, что функция $f(t)$ динамического габарита общего вида.

Общий вид модели "Следования за лидером"

Модель "Следования за лидером" сводится к системе дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n = f(\dot{x}_n).$$

где $x_n(t)$ координаты частиц,

$$x_n(t) < x_{n+1}(t), n = 1, 2, \dots$$

Функция f , из условия $x > 0$, непрерывная с несколькими последовательными производными, положительная, монотонная и выпуклая. Для упрощения примем

$$f(0) = 1.$$

Пусть g - это функция, обратная функции f . Тогда система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\dot{x}_n = g(x_{n+1} - x_n), n = 1, \dots, N - 1.$$

Для $N = 2$, доказано, что $\dot{x} > 0$ (скорость положительна) $\forall t > 0$, если x является решением $\dot{x} = g(r - x)$.

Даны достаточные условия на параметры для существования связной цепочки частиц длины N .

Получены точные оценки ускорения ведомого в зависимости от характеристик.

Во второй главе исследованы проблемы возникающие при решении задачи "Следования за лидером" и задачи "заднего привода". Установлено, что базовым понятием является функция динамического габарита, как зависимости расстояния между частицами от скорости, параметры которой зависят от многих факторов. Исследованы теоретические условия для обеспечения тотально-связного движения цепочки частиц. Получена классификация вариантов функции динамического габарита, и определены задачи динамики цепочки в зависимости от структуры граничных условий, а именно формализованы задачи "Следования за лидером" и "Заднего привода". Изучена проблема существования решения в каждой модели. Исследованы качественные свойства моделей. Получены ограничения на параметры модели, обеспечивающие тотально-связное движение.

В третьей главе рассматривается метод управления цепочки частиц с мотивированным поведением. Концепция главы состоит в следующем. На основе результатов, полученных во второй

главе, модели с функцией расстояния, идентифицируемой согласно методам, представленных в первой главе, построена численная схема решения - прогноз на ближайшую перспективу. Информация о состоянии цепочки и отклонения от модели обрабатывается центром (сервером) и затем поступает в виде директив частицам для коррекции скоростного режима. В реальных условиях, рассматривая цепочку частиц с мотивированным поведением, как автотранспортный поток, существует проблема. Водитель оценивает динамический габарит приближённо. Поэтому актуальна разработка распределённой системы для реализации связного движения на основе теоретических моделей сформулированных во второй главе.

Инфокоммуникационные методы моделирования движения цепочки

Для цепочки частиц с мотивацией, в которых находятся программируемые инфокоммуникационные средства, например смартфоны или блок управления, под управлением которого находится частица, может быть реализовано движение. В диссертационной работе разработан инфокоммуникационный метод управления на примере автотранспортного потока. В качестве окончательного устройства используется смартфон с устройством глобального позиционирования и выходом в интернет.

Постановка задачи

Имеется n -ое число автомобилей (клиентов), на одной полосе движения. На приборной панели каждого автомобиля установлен смартфон со специальным приложением. Смартфоны отправляют свое текущее положение на сервер. Сервер обрабатывает полученную информацию и отправляет необходимый режим движения соответствующему клиенту. Оповещение водителя об изменении скоростного режима может производиться либо графически, либо звуком.

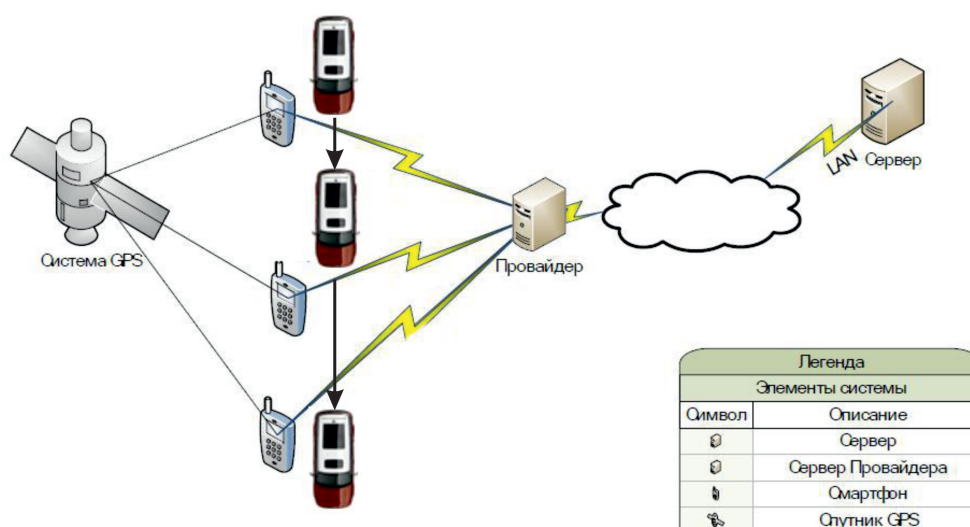


Рис. 8: Принципиальная схема системы

Обратная связь: управление оконечными устройствами

Задав распределенную задачу, определив какие устройства будут составлять распределенную сеть, оператор может установить, по какому принципу будет происходить обратная связь для управления оконечными устройствами.

Реализация обратной связи полностью зависит от распределенной задачи и используемого протокола передачи данных. В реализованной системе сервер работает по протоколу ТСР. Протокол ТСР - протокол управления передачей, предназначен для передачи данных в сетях и подсетях ТСР/IP. Протокол ТСР был выбран для обеспечения надёжности. Надёжность достигается благодаря предварительной установке связи, существованию повторных запросов в случае потери данных и устранения дублирования при получении двух копий одного пакета. В отличие от UDP гарантирует получение данных в той же последовательности, в которой они были отправлены.

Сервер отображает подключившихся/отключившихся клиентов, время подключения, IP-адрес. Подключение клиентов реализовано на асинхронной модели программирования, для того чтобы не принимать излишней многопоточности и клиенты могли подключаться на один и тот же порт. Создана надстройка над протоколом ТСР: при подключении клиента, для поддержания с ним соединения, создаётся отдельный поток. Каждый такой поток периодически (раз в 5 секунд) опрашивает клиентов для подтверждения того, что они находятся в сети и доступны. Количество клиентов достаточно велико и ограничено возможностями операционной системы (порядка 10000).

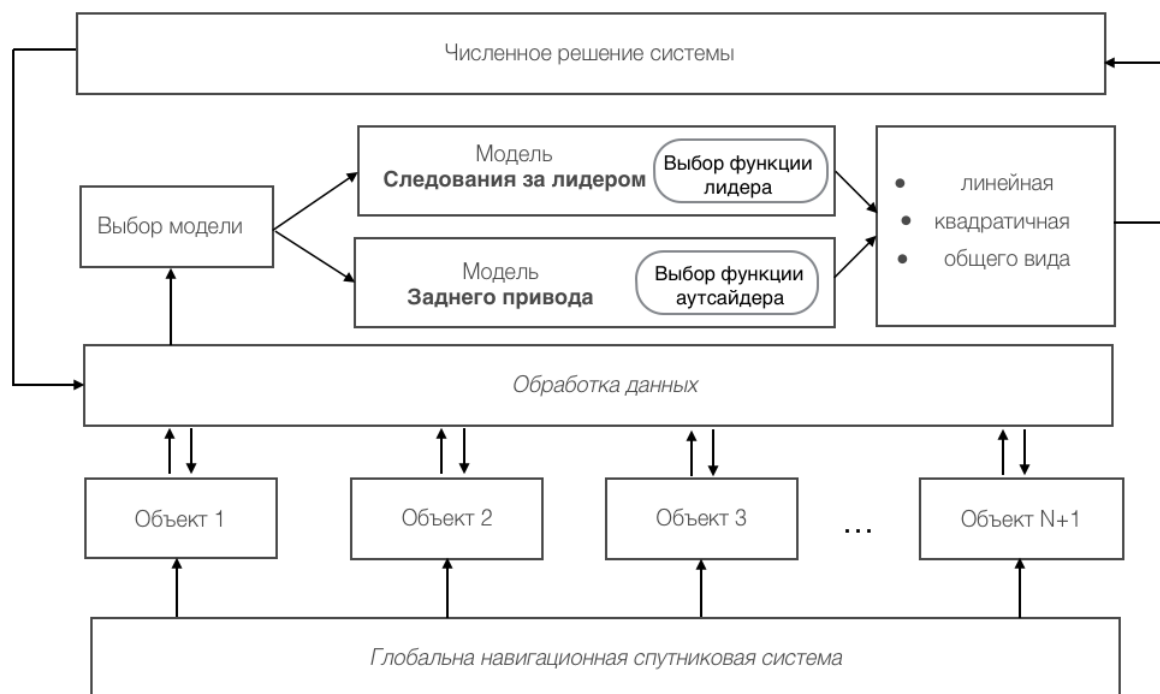


Рис. 9: Схема информационных потоков системы

Пример реализации системы управления

Сервер получает текущие широту и долготу от каждого из смартфонов. В зависимости от модели движения определяется необходимая скорость для каждого из клиентов. После подключения к серверу, клиент сравнивает скорость пришедшую от сервера со своей текущей скоростью и в зависимости от диапазона изменения (погрешности) оповещает водителя:

- Графическим оповещением
- Звуковым оповещением ("Быстрее", "Медленнее")

Для апробации и проверки адекватности созданной модели, необходимо сравнить с реальными данными, полученных в первой главе. В рамках диссертационной работы для этой цели создано имитационное программное обеспечение, выполняющее численное исследование системы дифференциальных уравнений для модели "Следования за лидером" и "Заднего привода".

Пусть $X(t) = (x_1(t), \dots, x_{N+1}(t))$ – вектор состояния потока для задач "Следования за лидером" (5)-(7) (или "Заднего привода" (8)-(10)). Если неравенства (5)-(7) (или (8)-(10)) выполняются строго, то из общих теорем для ОДУ следует существование решения этих задач в некоторой окрестности $(t, t + \delta)$.

Состояние системы, при котором по крайней мере одно из неравенств становится равенством назовем *критическим*. Необходимо описать поведение системы вблизи критического режима.

Будем считать, что частица в случае выхода на критический режим по скорости сохраняет граничное значение до тех пор, пока соответствующее неравенство справедливо или не обратится в равенство. В этом случае ускорение равно нулю, а в момент выхода на критический режим получается удар. Аналогично правило и по ускорению. Фазовые ограничения (6)-(7) и (9)-(10) приводят к тому, что существование решения (5)-(7) и (8)-(10) даже при гладких функциях f и $g = f^{-1}$ не гарантировано.

Таким образом, задание существования решения сводится к качественному исследованию решения нелинейного уравнения

$$\begin{cases} \dot{y} = g(h(t) - y) & (12) \\ y(t) \leq h(t) & (13) \\ 0 \leq \dot{y}(t) \leq M_1 & (14) \\ M_2 \leq \ddot{y}(t) \leq M_3 & (15) \end{cases}$$

В имитационной модели используются численные методы Эйлера и Рунге-Кутты, так же используется численное дифференцирование. Реализована модель на языке программирования C# в среде разработки Visual Studio 2010. Метод Эйлера является сравнительно грубым и применяется на практике в основном для проведения ориентировочных расчетов. Погрешность метода Эйлера сильно зависит от величины шага интегрирования.

В реализуемой программе используется метод Рунге-Кутты четвёртого порядка. В программе задаются граничные условия, начальные условия, длина, коэффициент M_1 - ограничение на скорость сверху, M_2 - ограничение на ускорение снизу (торможение), M_3 - ограничение на ускорение сверху (разгон), C_0 - средняя длина автомобиля, C_1 - время реакции водителя, C_2 - функция торможения. Данные параметры исследовались в главе 1 и 2 диссертационной работы.

Современные коэффициенты потока автотранспортных средств получены в первой главе посредством интерактивных и пассивных методов исследования. Коэффициент $C_0 \approx 5.7$ (м). Среднее время реакции водителя $C_1 \approx 0.504$ (с). Среднее время реакции водителя индивидуально для каждого водителя и меняется от разных факторов (возраста, усталости водителя, психического состояния). В зависимости от степени усталости водителя его время реакции меняется в 1.5 раза. При канализированном движении время реакции водителя сильно зависит от расстояния до лидера. На стандартных дорогах время реакции водителя меняется от 0.4 до 0.5 с. Коэффициент C_2 сильно зависит от дорожных условий, например для сухого асфальта $C_2 \approx 0.00285$ (c^2/m), в случае обледенения асфальта $C_2 \approx 0.1650$ (c^2/m). Коэффициент C_2 так же сильно зависит от шероховатости дороги, которая неоднородна по ширине в связи с износом в местах наиболее частых проходов колёс (колея), материала покрытия и его истираемости, рисунка протектора шины, внутреннего давления в шинах, нагрузки на колёса, температуры покрытия.

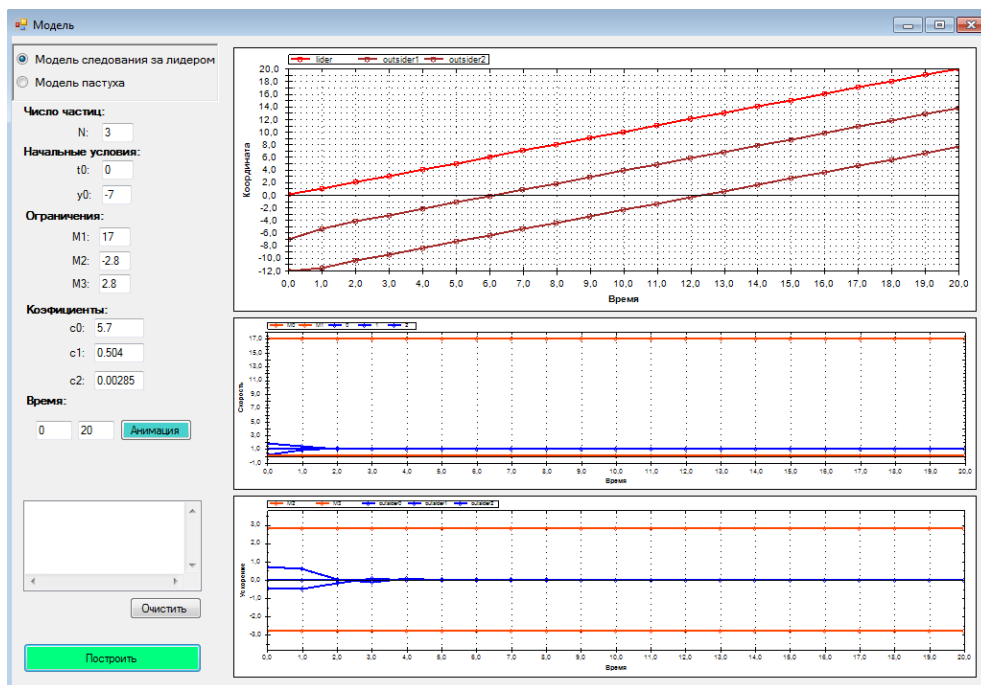


Рис. 10: Интерфейс имитационного приложения

На рисунке 10 представлен интерфейс приложения. Верхний график показывает зависимость координат каждой частицы от времени. Средний график рисунка 10 показывает зависимость скорости каждой частицы цепочки от времени, а также ограничения на скорость (скорость должна быть положительна и меньше коэффициента M_1). Нижний график рисунка 10 демон-

стрирует зависимость ускорения от времени и его ограничения M_2 , M_3 . Если скорость или ускорение какой-либо частицы выходит за ограничения, то выводится сообщение о номере частицы и моменте времени нарушения правил.

Данная программа поддерживает режим анимации движения каждой частицы во времени. Имитационное приложение позволяет исследовать критические режимы.

Для анализа взята функция в виде:

$$x(t) = \begin{cases} \frac{t^2}{2} - \frac{\pi t}{2}, & \text{если } 0 \leq t \leq \pi; \\ -\frac{t^2}{2} - \frac{\pi t}{2}, & \text{если } -\pi \leq t \leq 0. \end{cases} \quad (16)$$

Рассмотрим поставленную задачу с граничными условиями: $x_n = f(x)$, где $f(x)$ равна (16). Согласно (6) задача сводится к модели "Следования за лидером". Будем считать, что две соседние частицы связаны соотношением: $x_{n+1} - x_n = C_0 + C_1 \dot{x}_n + C_2 \dot{x}_n^2$. Начальные условия: $x_2(0) = 0$; $x_1(0) = -5$. Возьмём $C_0 = 5.7$ (м), среднее время реакции водителя $C_1 = 0.504$ (с), $C_2 = 0.00285$ (c^2/m), $M_1 = 17$ (м/с), $M_2 = -2.8$ (m/c^2), $M_3 = 2.8$ (m/c^2). Результат моделирования приведён ниже.

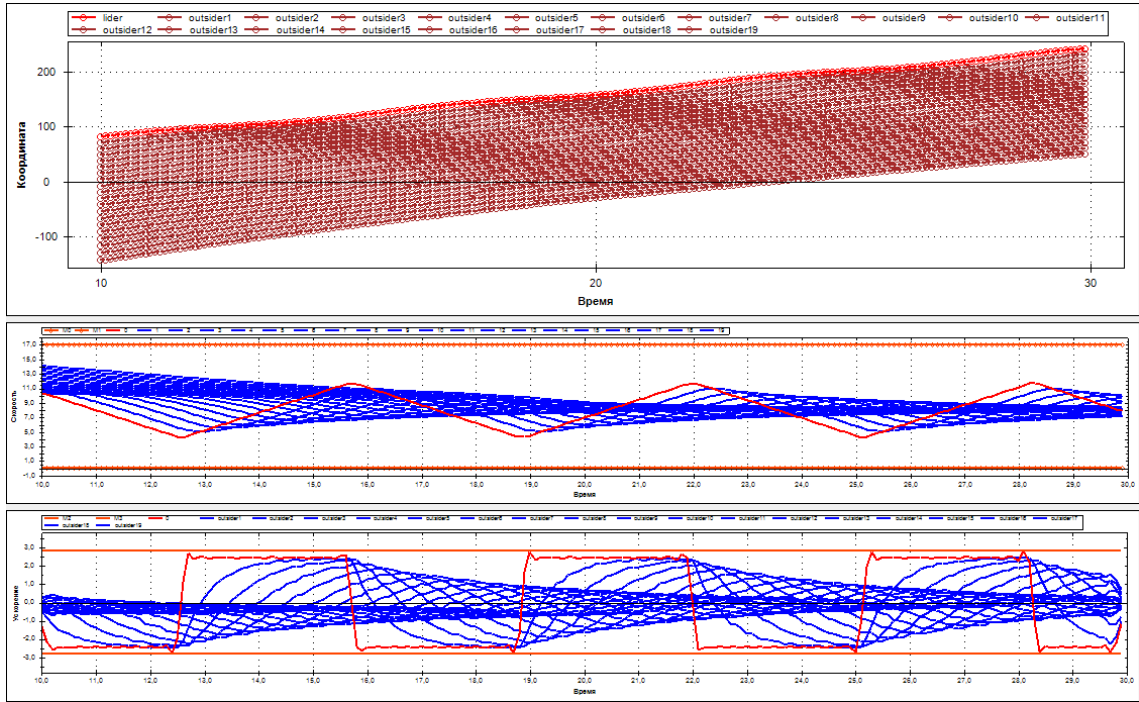


Рис. 11: Результаты моделирования

График на рис. (10) зависимости координаты частиц от времени подтверждает теорию трёх фаз Кернера. На графике отчетливо видна фаза F (свободный поток - Free flow), в этой фазе достаточно невысокой плотности, частицы устанавливают комфортную для них скорость. Это хорошо видно на среднем графике зависимости скорости от времени рис. (8). На данном участке частицы достигают максимальной скорости. Далее происходит спонтанный $F \rightarrow S \rightarrow J$ переход,

т.е. наблюдается увеличение плотности (например связанное с возникновением преграды на дороге, узкого места). Скорость частиц уменьшается и становится меньше скорости движения частиц в свободном потоке, и наблюдается локальный затор, т.е. фаза J широкого движущегося кластера.

Можно сделать вывод, что при таком режиме движения лидера, удовлетворяющего условиям (5)-(7), все частицы данной цепочки так же будут удовлетворять данным условиям.

Используя разработанную систему управления можно формировать связные цепочки автомобилей любой длины. Применяя данную систему можно эффективно (без потерь скорости) регулировать проезд узких мест, преодолевать критические режимы и т.д. Возможно прогнозировать поведение цепочки частиц, так как в основе лежат математические модели с точными постановками и исследованиями качественных свойств. Разработанную систему можно применять к управлению движения цепочками, не только для автотранспорта, но и в любой другой социальной и социально-технической сферах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны автоматические инфокоммуникационные технологические цепочки активного и пассивного типа для идентификации параметров потока частиц

2. Для одного из важнейших приложений - социально-технической системы - трафик, выявлен одностипный спектр психотипов, выражающегося в оценке безопасного расстояния при фиксированной скорости.

3. Поставлена и исследована аналитическими и симмуляционными методами модель "Следования за лидером". Установлена сходимоть потока к равномерному режиму движения лидера.

4. Поставлена и исследована аналитическими и симмуляционными методами модель "Заднего привода". Установлен эффект неустойчивости, при котором низкоамплитудные высокочастотные колебания около равномерного заднего привода приводит к нарушениям связного движения.

5. Разработаны автоматические инфокоммуникационные технологии, позволяющие снизить степень свободы (непредсказуемости) человеческого фактора в социально-технической системе и более того реализовать режим движения в рамках моделей "Следования за лидером" и "Заднего привода".

6. На примере стандартных оконечных устройств реализована схема управления цепочкой автомобилей в критических режимах, узких местах и т.д.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

1. Buslaev A.P., Gorodnichev M.G. Microwave Eye of "Big Brother": What is Visible from the Window of MADI. Ninth International Conference on Traffic and Granular Flow 2011. Book of abstracts. M. T — Comm, 2011, 338 — 340 p.
2. Буслаев А.П., Городничев М.Г., Яшина М.В. Интеллектуальные системы: SSHD — мониторинг многополосного движения и автоматическая обработка информации о трафике. Учебное пособие. М. - МГУСИ, 2012, — 100 стр.
3. Буслаев А.П., Городничев М.Г. О некоторых математических задачах в модели следования за лидером. Саратовская зимняя школа, тезисы доклада. 2012 - 1 с.
4. Gorodnichev M.G. Some mathematical problems of car-following model. Proc. of Int. Conf. CMMSE 2012, V.2. 673-677.
5. Gorodnichev M.G., Nigmatulin A.N. Technical and program aspects on monitoring of highway flows (case study of Moscow city), Ninth International Conference on Dependability and Complex Systems, DepCoS-RELCOMEX 2013.
6. Gorodnichev M.G., On mathematical modelling of totally-connected movement, Polish-British Conference 2013, PBW13, June, 2013
7. Alexander P. Buslaev, Mikhail G. Gorodnichev, Andrew V. Provorov. One- dimensional Models of Particles Flow and Infocommunication Methods of Verification. The 2014 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI'14), March 10-12, 2014, Las Vegas, USA
8. Buslaev A.P., Gorodnichev M.G., On methodological aspects of traffic theory, Proc. of Int. Conf. CMMSE 2014, 3-7 july, 2014
9. A.P. Buslaev, M.G. Gorodnichev, A.V. Provorov, M.V. Yashina, Quality Properties of Connected Flow Model and Application fo traffic, International conference on advanced technology science, ICAT'14, 12-15 August, 2014