

На правах рукописи



Глазунов Вадим Валерьевич

**Математическое и программное
обеспечение сетецентрической системы управления
доступом мобильных абонентов к информационным сервисам**

Специальность 05.13.11 —
«Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Курочкин Михаил Александрович

Официальные оппоненты: **Бобцов Алексей Алексеевич**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой систем управления и информатики,
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Макарук Роман Валерьевич,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией кафедры САПРиУ(ТУ),
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится 31 мая 2018 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.18 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21, 9-й учебный корпус, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.229.18,
кандидат технических наук, доцент



Васильев Алексей Евгеньевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Использование беспроводных технологий передачи данных в мобильных транспортных сетях создает основу для развития интеллектуальных транспортных систем. Расширение спектра информационных услуг, предоставляемых сервисным центрам, службам управления движением, водителям и пассажирам, позволяет повысить безопасность участников движения, увеличить пропускную способность автомагистралей, повысить комфорт пассажиров.

В настоящее время ведущими автомобильными компаниями ведутся работы по установке на борту автомобиля телематических устройств, позволяющих поддерживать непрерывную двунаправленную цифровую связь с другими участниками движения и дорожными службами. Повышению эффективности такого взаимодействия препятствуют следующие ограничения: несовместимость беспроводных технологий передачи данных, наличие зон с отсутствием покрытия локальными и глобальными сетями передачи данных, отсутствие информации о скоростях передачи и загрузке сетей на маршруте движения, разная ценовая политика провайдеров подключения к сервисам глобальных и локальных сетей, невозможность отправки данных по нескольким каналам одновременно. Наличие этих ограничений не позволяет осуществлять долгосрочное и оперативное планирование обмена данными между автомобилями и облачными сервисами. Решением проблемы является получение достоверных данных о беспроводных сетях обеспечивающих доступ к сети Internet по всему маршруту движения транспортного средства, что позволит выполнять прогнозирование времени и стоимости обмена данными с информационными системами. Автоматизация процессов сбора и обработки данных о телематической обстановке требует разработки математического и программного обеспечения системы управления доступом мобильных абонентов к информационным сервисам и является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Теоретические и практические вопросы информационного обмена в стационарных и мобильных беспроводных сетях, определяют такие аспекты взаимодействия как: использование протоколов динамической маршрутизации, протоколов прикладного и транспортного уровня, создание гетерогенных сетей с несколькими физическими уровнями. Рассмотрению этих аспектов посвящены работы зарубежных и российских ученых: Вишневского В. М., Ефименко Д. Б., Комашинского В. И., Винокурова В. М., Пуговкина А. В., Philip Levis, Dr. Wan Tat Chee, J. D. Gibson. Существующие подходы к решению задачи передачи сообщений при неустойчивой связи со стационарным узлом заключаются в использовании глобального канала данных между объектами, подключении к стационарному локальному беспроводным сетям и к объектам дорожной инфраструктуры. Такие подходы предложены и развиты в работах: Колыбельникова А. И., Тулякова Ю. М., Шувалова В. П., Po-Lung Tien, Sandford Bessler.

Однако основной нерешенной проблемой является разработка методов доступа к информационным сервисам в районах, где стационарные узлы передачи данных не покрывают все зоны перемещения транспортных средств в интеллектуальных транспортных системах.

Тематика работы связана с решением задач повышения эффективности процессов обработки и передачи данных в компьютерных сетях с использованием моделей, методов, алгоритмов и программной инфраструктуры для организации

глобально распределенной обработки данных сетевыми программами с поддержкой сетевых протоколов.

Целью диссертационного исследования является разработка математического и программного обеспечения для организации взаимодействия информационных сервисов с мобильными объектами на всей траектории их движения через локальные телематические ресурсы стационарных и мобильных точек доступа.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **задачи**:

1. Разработка математической модели каналов сети передачи данных для сокращения времени маршрутизации сообщений между мобильными объектами.
2. Разработка имитационной модели взаимодействия мобильных объектов и информационных систем в беспроводных динамических сетях с ограниченным временем существования.
3. Разработка метода и алгоритмов объединения мобильных объектов в сети передачи данных и настройки динамической маршрутизации с использованием сервиса обобщения и структуризации телематических данных.
4. Разработка архитектуры и программной реализации системы обеспечения двунаправленного обмена данными мобильного объекта и информационных систем.
5. Исследование эффективности применения протоколов динамической маршрутизации в сетях мобильных объектов с изменяющейся топологией.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель сети передачи данных для маршрутизации сообщений между мобильными объектами на основе динамического графа с процедурами перерасчета весов.
2. Предложен метод и реализованы алгоритмы управления сетями для настройки динамической маршрутизации данных, отличающиеся оценкой состояния каждого мобильного объекта с учетом глобальной конфигурации сети.
3. Создана имитационная модель динамической сети мобильных объектов, отличающаяся поддержкой нескольких одноранговых гетерогенных сетей и динамической маршрутизацией данных между ними.
4. Разработана архитектура системы управления двунаправленным доступом мобильного объекта к информационным сервисам, отличающаяся наличием модуля выбора каналов передачи данных на основе запроса приложения, глобальных правил передачи данных и телематической обстановки.
5. Полученные результаты компьютерного и натурального моделирования позволяют выбрать протоколы динамической маршрутизации для минимизации потерь данных в одноранговых сетях с ограниченным временем существования.

Практическую значимость определяют:

1. Реализация имитационной модели мультипротокольного узла в среде NS-3, обеспечивающая моделирование протоколов динамической маршрутизации в условиях движения мобильных объектов.
2. Реализация программно-аппаратного стенда исследования временных характеристик протоколов маршрутизации и методика проведения

- экспериментов для оценки применимости различных протоколов динамической маршрутизации в условиях движения мобильного объекта в городской среде для передачи пользовательского трафика.
3. Программная реализация алгоритмов и протоколов согласованного управления данными телематической карты с использованием бортового мультипротокольного узла, обеспечивающая решение задач управления в реальном масштабе времени.
 4. Реализация программно-аппаратной архитектуры мультипротокольного узла, которая позволяет поддерживать маршрутизацию между несколькими сетями передачи данных, использующими локальные и глобальные беспроводные сетевые технологии.
 5. Программная реализация алгоритмов объединения и настройки динамической маршрутизации на борту транспортного средства, обеспечивающая упреждающее планирование соединений с использованием сервиса телематической карты.

Результаты могут быть использованы для управления группами наземных и воздушных объектов, в том числе и автономных роботов. Программно-аппаратное решение мультипротокольного узла используется в автомобильном подразделении Ford Motor Company.

Объектом исследования является математическое и программное обеспечение сетевых систем управления информационными ресурсами абонентов мобильной гетерогенной сети.

Предметом исследования являются свойства алгоритмов систем многопротокольной маршрутизации мобильных абонентов в компьютерных сетях с динамической топологией.

Методология и методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач применялись методы системного анализа, средства имитационного моделирования, технологии модельных и натурных экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель сети передачи данных мультипротокольных узлов мобильных объектов в форме динамического графа, отражающая динамику состояния транспортной и телематической компонент, сокращающая накладные расходы на формирование путей передачи данных до $O(e \log_2 n)$.
2. Метод управления динамической сетью, алгоритмы управления ресурсами мобильного объекта и облачного сервиса телематических данных, отличающиеся оценкой состояния каждого мобильного объекта с учетом глобальной конфигурации сети, обеспечивающие упреждающее планирование трафика в интеллектуальных транспортных системах.
3. Дискретно-событийная имитационная модель динамической сети мобильных объектов, отличающаяся реализацией динамической маршрутизации данных между одноранговыми сетями, позволяющая моделировать перераспределение потоков данных между сетями в мультипротокольных узлах.
4. Клиент-серверная архитектура распределенной системы доступа мобильного объекта к информационным сервисам, отличающаяся наличием модуля выбора каналов передачи данных на основе запроса приложения, глобальных правил передачи данных и телематической обстановки, обеспечивающая максимальное использование пропускной

способности выбранных локальных и глобальных каналов связи на всем маршруте движения транспортного средства.

5. Инструментальные средства для проведения компьютерного и натурального моделирования позволяющие выбрать протоколы динамической маршрутизации для минимизации потерь данных в одноранговых сетях с ограниченным временем существования.
6. Комплекс программного обеспечения для организации взаимодействия информационных сервисов с мобильными объектами на всей траектории движения через локальные телематические ресурсы стационарных и мобильных точек доступа.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов и сформулированных выводов обеспечивается корректным применением математического аппарата, использованием сертифицированного программного обеспечения для проведения вычислительных экспериментов, близостью результатов натурального и имитационного моделирования. Результаты исследований согласуются с результатами других авторов.

Апробация работы.

Научные результаты и основные положения работы докладывались и обсуждались на конференциях: «International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics»: 10th, Рейкьявик (Исландия) 2013; 11th, Вена (Австрия) 2014; 14th, Мадрид (Испания) 2017, «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург (Россия) 2013, «Методы и технические средства обеспечения безопасности информации», Санкт-Петербург (Россия) 2013, «Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, NEW2AN», Санкт-Петербург (Россия) 2014, «Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops», Санкт-Петербург (Россия) 2014, «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах», Санкт-Петербург (Россия) 2014, «Vehicle Technology and Intelligent Transport System»: 1st, Лиссабон (Португалия) 2015; 2nd, Рим (Италия) 2016, «Open Innovations Association, FRUCT», Ярославль (Россия) 2015, «Telematics and Future Generation Networks», Куала-Лумпур (Малайзия) 2015, «Soft Computing and Measurements», Санкт-Петербург (Россия) 2017.

Результаты включены в научные отчеты по грантам: РФФИ №13-07-12106 офи м «Сетецентрические модели и телематические сервисы для развития информационно-транспортной инфраструктуры города» 2013–2015, №16-29-04319 офи м «Контекстно-ориентированные методы принятия решений и планирования операций смешанной группой мобильных роботов» 2016–2018 и URP Ford Motor Research «Реконфигурируемые телематические сервисы для перспективных облачно-ориентированных автомобильных сервисов управления и навигации» 2013–2016. Результаты работы поддержаны грантом правительства Санкт-Петербурга в конкурсе для студентов и аспирантов 2013.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 02.03.01, 02.04.01 «Математика и компьютерные науки» в СПбПУ. Получено свидетельство о регистрации ЭВМ 2013661712 «Программа имитационного моделирования одноранговой MESH сети подвижных мультипротокольных узлов». Получен международный патент «Multiprotocol vehicle communications. United States Patent No: 9565625, Anaqua Invention Record Id No: 83527358».

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 23 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 11 — в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science.

Личный вклад. Все основные результаты работы, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений. Объем диссертации 123 страницы текста с 39 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 115 наименований.

Содержание работы

Во **введении** приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены основные цели и задачи, дана характеристика научной новизны и практической значимости, представлены выносимые на защиту научные положения. Приведены данные об апробации работы и публикациях.

В **первой главе** рассмотрена проблема предоставления мобильным абонентам доступа к информационным ресурсам облачных сервисов в зонах с неустойчивой связью. Качество обслуживания в облачно-ориентированной среде определяется надежностью оборудования сторонних производителей и качеством покрытия сотовых сетей. В качестве перспективного направления рассматривается вариант организации подвижной самоорганизующейся локальной сети автомобилей с точками выхода в облачную среду. Облачная среда предоставляет сервисы мобильным абонентам и взаимодействует с административными, техническими и технологическими службами дорожного движения, экстренными службами, аудио и видео ресурсами сети — такой способ информационного обмена называется интеллектуальной транспортной системой (ИТС).

Пример информационного взаимодействия абонентов с облачным сервисом в условиях отсутствия прямого доступа к облачным сервисам в ИТС приведен на рис. 1. В данном сценарии у абонента n_1 отсутствуют каналы связи для доступа к сети Internet, а также отсутствует подключение к стационарным точкам Wi-Fi. Абонент n_1 использует абонента n_2 , находящегося в mesh-сети в качестве мобильного ретранслятора данных, через которого передает данные абоненту n_3 , который оснащен выходами в глобальную сеть. Решение о выборе маршрутизации между сетями принимается на основе политик доступа, заданных при настройке абонентом сети.

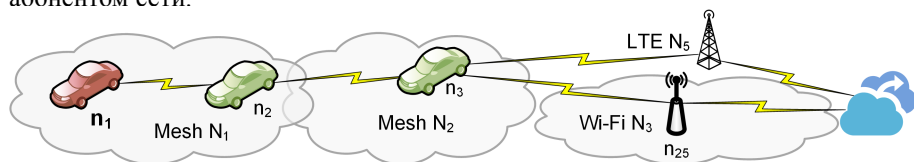


Рис. 1 — Взаимодействие мобильных абонентов с облачным сервисом

Выполнена классификация абонентского трафика в сетях ИТС, приведенная в таблице 1. Классификация показала, что время жизни передаваемых данных изменяется в диапазоне от миллисекунд для потоковых протоколов реального времени до не ограниченных временными рамками событийных сценариев.

Исходные данные для постановки задачи доступа мобильного абонента к облачным сервисам в зонах с неустойчивой связью:

- множество мобильных объектов, расположенных в двумерном пространстве, координаты которых изменяются во времени;

Таблица 1 — Сценарии обмена данными между абонентами ИТС

| Объем сообщения, Кбайт | Регулярность обновления | Класс трафика | Типы каналов | Приоритет | Время жизни |
|--|-------------------------|---------------|-----------------|-----------|---------------|
| Сообщение об оперативных изменениях в транспортной сети | | | | | |
| 10 – 100 | событийно | диалоговый | WAN, MESH | средний | часы–дни |
| Сбор и отображение данных о местоположении других автомобилей | | | | | |
| 10 – 10 ³ | постоянно | фоновый | WAN, MESH | средний | минуты |
| Автоматическое сохранение треков движения транспортного средства | | | | | |
| 10 – 10 ³ | постоянно | фоновый | WAN, MESH | средний | до отправки |
| Передача сообщений об аварийных ситуациях | | | | | |
| 10 – 100 | событийно | взаимод. | WLAN, WAN, MESH | высокий | до реакции |
| Дистанционная загрузка новых версий программного обеспечения | | | | | |
| 10 ³ – 10 ⁵ | эпизодически | фоновый | WLAN, WAN, MESH | низкий | до завершения |
| Аудио и видео консультации водителя о техническом состоянии автомобиля | | | | | |
| 10 ³ – 10 ⁵ | эпизодически | поточковый | WLAN, WAN, MESH | средний | сеанс связи |
| Телекоммуникационная среда для пассажиров автомобилей | | | | | |
| 10 ⁴ – 10 ⁵ | постоянно | поточковый | WLAN, MESH | низкий | сеанс связи |
| Сообщения о необходимости прохождении ремонта | | | | | |
| 100 – 10 ³ | событийно | взаимод. | WAN | высокий | до события |
| Дистанционное управление агрегатами автомобиля | | | | | |
| 10 – 10 ³ | событийно | взаимод. | WAN | высокий | до события |

- множество сетей, образованных между мобильными объектами, где каждый объект является подвижным ретранслятором;
- траектория движения мобильного объекта, ограниченная полосами движения автотранспорта;
- множество стационарных точек доступа, через которые осуществляется доступ к информационным сервисам;
- объем и время жизни данных, передаваемых от мобильного объекта в информационные сервисы.

Во **второй главе** выполнена постановка задачи пересылки определенного объема данных от абонента в заданных ограничениях пропускной способности и времени, в общем виде она описывается как транспортная задача, она же задача Монжа-Канторовича и является математической задачей линейного программирования. В терминах сложности вычислений задача относится к классу сложности P . В своем классическом виде задача заключается в составлении плана перевозок грузов от поставщиков к потребителям с минимизацией стоимости или затрат времени на осуществление перевозок. Задача может быть сформулирована в сетевой постановке. При этом все поставщики и потребители представляют собой единые сущности, называемые сетевыми узлами, поставки от которых задаются положительными значениями ребер графа, а потребности — отрицательными. Дополнительно вводятся ограничения пропускной способности между сетевыми узлами.

Задача передачи заданного потока данных θ от сетевого узла s к сетевому узлу d , оснащенный выходом в облако, сводится к задаче нахождения потока минимальной стоимости с использованием теории графов и теоремы Форда-Фалкерсона.

Динамический граф G , как модель мобильной динамической mesh-сети, представляет собой последовательность сменяющих друг друга во времени графов

G_t , не имеющих параллельных ребер и петель, смена которых описывается операциями: удаление и добавление ребра, удаление и добавление вершины, приоритетное присоединение вершин и ребер. Последовательность графов, составляющая динамический граф, описывается траекторией динамического графа. Ограничение на время жизни потока θ задается абонентом. Ограничение на пропускную способность и метрика каналов определяются телематической компонентой сети.

Задана сеть $G = \{N, E, B, M\}$, где N — полное множество вершин в графе, E — полное множество ребер в графе. Каждая дуга (x_i, x_j, t_k) характеризуется пропускной способностью $b(x_i, x_j, t_k) \in B$, где $t_k \in \mathbb{N}_0, t_k = [0, 1, 2, \dots, T]$ и неотрицательной стоимостью $m(x_i, x_j, t_k) \in M$ пересылки потока из x_i в x_j вдоль дуги (x_i, x_j) в момент времени t_k . В сети G определена величина максимального потока ω_{\max} от s к d . Если $\theta > \omega_{\max}$, то решения нет.

$b(e_{ij}, t_k)$ — функция динамики веса ребра в графе, при этом если $b(e_{ij}, t_k) = 0$, считаем что $e_{ij} \notin E^{t_k}$, то есть ребра e_{ij} в графе G в данный момент t_k не существуют. Пусть в начальный момент $t_k = 0$, а также при $t_k < 1, \forall e_{ij} \in E^{t_k} : b(e_{ij}, t_k) = 0$. Тогда $\forall t_k \geq 1$

$$b(e_{ij}, t_k) = \begin{cases} b(e_{ij}, t'_k) + \alpha_{et} - \delta\phi, & \text{если } b(t_k) > 0 \\ 0, & \text{если } b(t_k) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Если же $\theta \leq \omega_{\max}$, то может быть найдено несколько потоков для величины θ от сетевого узла s к d . Следовательно, математическая модель задачи записывается следующим образом:

$$Z = \sum_{(x_i, x_j, t_k) \in E} m(x_i, x_j, t_k) \omega(x_i, x_j, t_k) \quad (2)$$

$$Z \rightarrow \min,$$

где $\omega(x_i, x_j, t_k)$ — поток по дуге (x_i, x_j) в момент времени t_k при ограничениях:

$$0 \leq \omega(x_i, x_j, t_k) \leq m(x_i, x_j, t_k), \exists (x_i, x_j, t_k) \in E \quad (3)$$

$$\sum_{x_i \in N} \omega(s, x_i, t_k) - \sum_{x_i \in N} \omega(x_i, s, t_k) = \theta, s \in N \quad (4)$$

$$\sum_{x_i \in N} \omega(d, x_i, t_k) - \sum_{x_i \in N} \omega(x_i, d, t_k) = -\theta, d \in N \quad (5)$$

$$\sum_{x_i \in N} \omega(x_j, x_i, t_k) - \sum_{x_i \in N} \omega(x_i, x_j, t_k) = 0, \forall x_i, x_j \neq s, d \quad (6)$$

где в (3) — указано ограничение пропускной способности потока, в (4) — уравнение истока, в (5) — уравнение стока, в (6) — условие сохранения потока, определяющее отсутствие потери потока внутри сети.

Если μ — кратчайший путь от s к d в сети $G = (N, E, M)$ и $\theta < b_{\min}(\mu)$, то весь поток θ направляется вдоль пути μ . В противном случае решение задачи строится следующим образом: находится кратчайший путь μ от s к d и максимально возможный поток $\omega(\mu)$ для этого пути. Если $\theta \leq \omega_{\max}(\mu)$, то задача решена. Если нет, то сеть модифицируется следующим образом: относительно потока ω существует сеть $G' = (N', E', B', M')$, в которой:

1. $N' = N, E' = E \cup W$, где W — множество фиктивных дуг.
2. Если $(x_j, x_i, t_k) \in N'$ и $\omega(x_j, x_i, t_k) > 0$, то дуга (x_i, x_j, t_k) включается в множество W . При этом полагается $b'(x_i, x_j, t_k) = \omega(x_j, x_i, t_k)$, $m'(x_i, x_j, t_k) = -m(x_j, x_i, t_k)$. Условие применяется только к дугам, по которым передается поток ω .

3. Для всех ненасыщенных дуг, где нет противоположного потока $(x_i, x_j, t_k) \in N'$, $\omega(x_i, x_j, t_k) < b(x_i, x_j, t_k)$ и $\omega(x_j, x_i, t_k) = 0$ полагают $b'(x_i, x_j, t_k) = b(x_i, x_j, t_k) - \omega(x_i, x_j, t_k)$, $m'(x_i, x_j, t_k) = m(x_i, x_j, t_k)$.
4. Для всех насыщенных дуг $(x_i, x_j, t_k) \in N'$, $\omega(x_i, x_j, t_k) = b(x_i, x_j, t_k)$ и $\omega(x_j, x_i, t_k) = 0$ полагают $b'(x_i, x_j, t_k) = 0$, $b'(x_i, x_j, t_k) = \infty$.

Для нахождения кратчайшего пути в исходной и модифицированной сети требуется использовать алгоритм Дейкстры, время выполнения которого в худшем случае ограничено $O(n^2)$. Однако, если количество дуг e значительно меньше n^2 , то время выполнения алгоритма сокращается до $O(e \log_2 n)$. Для уменьшения сложности поиска маршрутов будем считать, что в каждом отдельном случае пересылки сообщения существует только один источник — узел сети, генерирующий исходящий сетевой трафик, для которого и выполняется поиск маршрута к узлу, выполняющему функции шлюза доступа к глобальной сети. Такое предположение допустимо, потому что любую сеть можно свести к графу с одним источником, путем добавления фиктивных узлов и дуг с нулевым весом. Таким образом, можно уменьшить количество дуг, используя алгоритм выделения компонентов сильной связности для подсетей, число переходов до которых превышает h . Это достигается за счет того, что пропускная способность при использовании беспроводных каналов связи уменьшается пропорционально количеству переходов: $(\frac{1}{2})^{h-1}$.

В **третьей главе** предложен метод управления сетями, построена имитационная модель динамической сети мобильных объектов, разработаны алгоритмы и архитектура системы управления соединениями. Суть метода управления динамической сетью заключается в использовании индивидуальной модели устаревания стоимости каждого ребра графа. Предложенный метод управления сетями, изображенный на рис. 2, включает следующие этапы:

1. Пользовательское приложение формирует минимальную допустимую пропускную способность θ .
2. Алгоритм выбора маршрута запрашивает граф связей в заданном регионе. В ответ возвращается множество мобильных узлов и их связи, включающие пропускную способность каждого ребра.
3. Для каждого ребра вычисляется функция устаревания на основе информации о скорости и направлении движения мобильного объекта.
4. На основе графа и метрик формируется отсортированная таблица маршрутов доступа к облаку.
5. Для передачи данных выбирается маршрут с наименьшей метрикой, после чего модифицируется таблица маршрутизации ОС.
6. Если маршрута, где $\theta \leq p_1$, не существует, то выбирается несколько каналов передачи данных с наибольшими метриками, с использованием механизма агрегации $\sum_{k=1}^q p_k$, где q такое количество каналов, которое необходимо задействовать для удовлетворения критерия минимальной пропускной способности для приложения.
7. Если суммарная пропускная способность не достаточна для данного приложения, то запускается алгоритм отложенной отправки сообщений.

Для проверки работоспособности концепции МПУ в динамических mesh-сетях в различных условиях эксплуатации разработана имитационная модель работы динамической сети, компоненты которой приведены на рис. 3. Модель позволяет исследовать свойства сетевого трафика и протоколы динамической маршрутизации в mesh-сети, включающей точки доступа в глобальные сети, путем

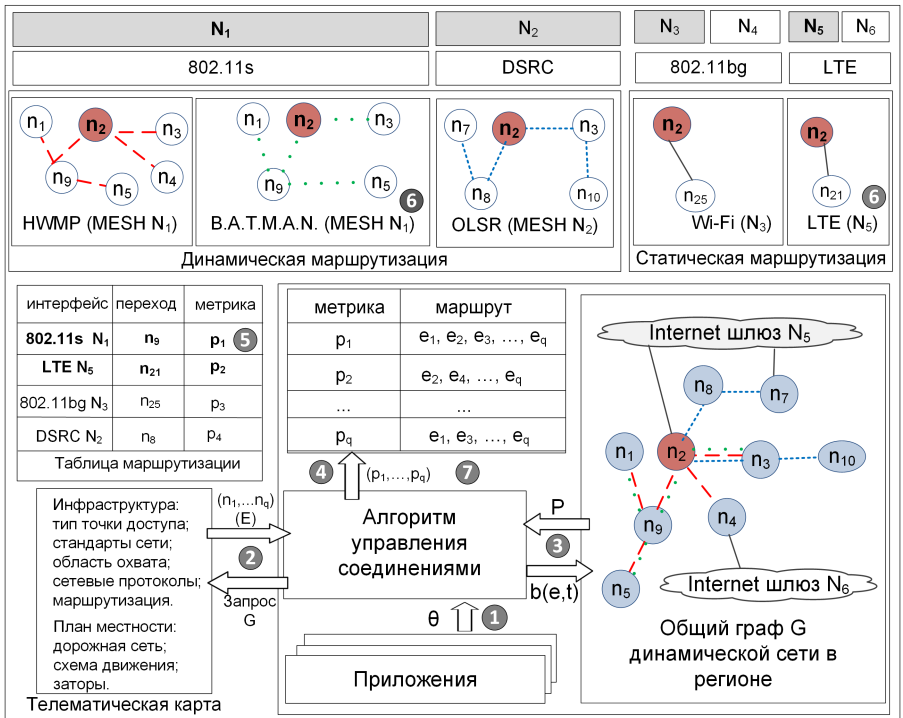


Рис. 2 — Метод управления беспроводными сетями

настройки транспортной и телематической компоненты. Телематическая компонента позволяет настраивать следующие параметры: протокол динамической маршрутизации; скорость передачи данных, количество узлов, одновременно передающих данные; объем передаваемых данных; тип транспортного протокола; количество шлюзов в сети. Транспортная компонента включает следующие параметры: топологию дорожной сети, желаемую скорость движения автомобиля, коэффициенты ускорения и торможения, минимально допустимое расстояние между автомобилями, геометрические характеристики автомобиля. Топология дорожной сети включает следующие ограничения: количество полос, вектор движения по полосам, коэффициенты снижения скорости при поворотах, светофоры с двумя состояниями. В процессе моделирования для каждого узла регистрируется: время отправки и получения пакета, число отправленных и потерянных пакетов, IP адреса отправителей и получателей данных.

Предложенная модель включает модуль сопряжения протоколов динамической маршрутизации, реализованный через создание виртуального узла. Виртуальный узел позволяет объединить методы динамической и статической маршрутизации внутри движущегося объекта. Модуль сопряжения состоит из узлов, включающих сетевые интерфейсы типов локальных и глобальных технологий: 4G, Wi-Fi, Mesh. Существующая программная реализация поддерживает технологии LTE, 802.11a, 802.11bg, 802.11s.

Разработанная модель была реализована в среде NS-3, которая является дискретно-событийным симулятором телекоммуникационных систем. Модель

позволяет исследовать характеристики протоколов динамической маршрутизации во время движения мобильных абонентов с учетом модели движения транспорта Intelligent Driver Model с набором сетевых интерфейсов. Для синтеза мультипротокольного узла добавлен новый класс, расширяющий перечень доступных сетевых интерфейсов узла следующим набором: 802.11abg, mesh в реализации 802.11s, LTE, а также протоколами динамической маршрутизации: DSDV, AODV, OLSR, HWMP. Настройка параметров движущегося объекта происходит централизованно с использованием функций ядра среды моделирования.



Рис. 3 — Компоненты имитационной модели функционирования телематической компоненты ИТС

Для управления данными о телематической обстановке с учетом географической компоненты разработаны два алгоритма: определения момента передачи координат транспортного средства; передачи данных в облачный сервис. Разработанные алгоритмы позволяют: получить координаты транспортного средства, рассчитать оценку времени доставки сообщения, вычислить поправки координат и фиксацию прогнозируемого положения транспортного средства. Блок-схема алгоритмов приведена на рис. 4.

Алгоритм использует в качестве исходных данных координаты транспортного средства, полученные из глобальной системы позиционирования GPS, и список доступных беспроводных сетей. Список формируется путем последовательного сканирования и перебора всех доступных сетевых интерфейсов. Полученные данные включают в себя массив координат, идентификаторов сетей и уровней сигналов. Момент опроса задается динамически или статически в зависимости от скорости движения мобильного объекта и объема получаемого списка сетей. Облачный сервис «телематическая карта», получив список, обновляет информацию о списке доступных сетей и уровнях сигналов на основе местоположения передаваемого мобильным объектом. Обратный алгоритм запрашивает информацию о сетях в текущем местоположении либо в заданном регионе от сервиса телематической карты. На основе этих данных мобильный объект актуализирует локальную копию идентификаторов сетей, уровней сигнала в заданном регионе. Разработанный алгоритм позволяет обеспечить постоянное обновление, накопление и получение данных о телематической обстановке между мультипротокольными узлами и облачным сервисом от множества мобильных объектов.

Разработан алгоритм управления соединениями, позволяющий осуществлять отложенную передачу данных в условиях недостаточной пропускной способности или отсутствия доступных каналов связи. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 6. Критерием успешности выполнения является факт передачи сообщения за указанное время жизни сообщения.

Алгоритм планирования передачи сообщений принимает заявки на передачу сообщений от пользовательских приложений, заявка, представляющая собой объект `AppRequest`, включает в себя: имя приложения, локальный приоритет, направление и тип трафика, а также требуемую пропускную способность. Вторым параметром алгоритма является объект `PolicyRequest`, включающий пользовательские критерии запуска передачи сообщений, такие как: требуемое время начала и предельное время завершения передачи сообщения, необходимый приоритет каналов передачи данных. На первом этапе работы алгоритма происходит фильтрация неактуальных заявок на передачу данных. На втором этапе фильтруются заявки, время обработки которых еще не наступило. На третьем этапе выбираются заявки с наивысшим приоритетом, если таких нет, то со средним или низким приоритетами. На четвертом этапе отбирается заявка с наименьшим необработанным номером. На пятом — запрашивается текущая доступная пропускная способность. На шестом — сравнивается доступная пропускная способность с требованиями приложения, если пропускной способности не достаточно, то выполняется перерасчет с использованием механизма агрегации нескольких сетевых интерфейсов. Если требования приложения все равно не выполняются, то заявка пропускается и алгоритм переходит к этапу 4. На завершающем этапе генерируется и выполняется структура, содержащая сетевые правила, разрешающие прохождение данных в режиме агрегации или резервирования каналов данных.

Результатом выполнения алгоритма является структура, включающая: системное время начала и окончания передачи сообщения, идентификатор обработанного запроса, список требуемых для активации сетевых интерфейсов в системе, режим использования сетевых интерфейсов для механизма агрегации каналов, список портов для которых разрешен обмен данными.

Предлагаемое решение позволяет динамически управлять состояниями соединений, изменяющимися в зависимости от требований приложения или текущего режима движения. Поддерживает технологии резервирования и агрегации каналов данных. Архитектура, приведенная на рис. 5, включает в себя модули: планирования, управления соединениями, генерации правил планирования.

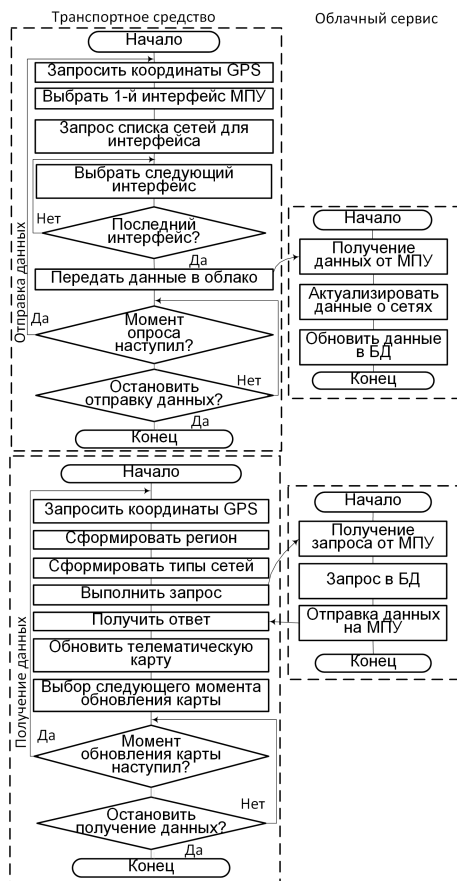


Рис. 4 — Алгоритм обмена данными о сетях с облачным сервисом

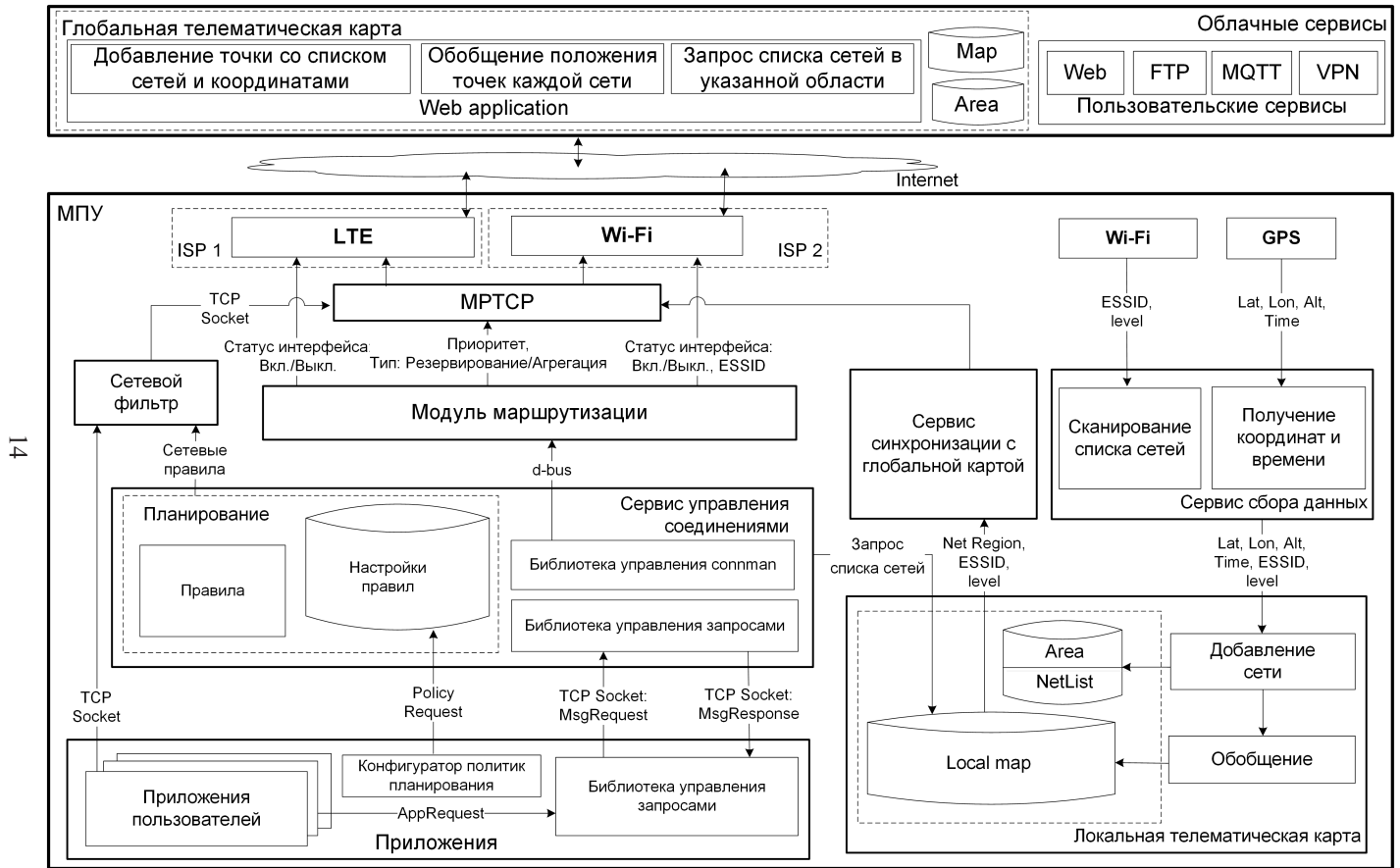


Рис. 5 — Архитектура системы управления соединениями

Разработанная система обеспечения доступа мобильного объекта к информационным сервисам отличается одновременным использованием локальных и глобальных данных, поддержкой двунаправленных потоков сетевого трафика и методом агрегации каналов. Основной цикл системы управления реализован в сервисе управления соединениями, сервис функционирует как отдельное приложение в операционной системе и ожидает подключений от приложений через сетевой сокет. Обмен служебными сообщениями происходит через формат сообщений `MsgRequest/MsgResponse`. Сформированный запрос от приложения добавляется в вектор заявок на передачу данных. Список заявок обрабатывается последовательно всеми правилами планирования, каждое правило представляет собой функцию, содержащую алгоритм планирования, пример такого алгоритма изображен на рис. 6. Для успешной работы алгоритма требуются дополнительные параметры от пользователя, которые формируются в объекте `PolicyRequest`, правила задаются через генератор политик планирования, который является внешним приложением.

Выходными данными является структура `SchedulingResult`. Полученная структура выполняется объектом `PlanExec`, где на основе списка портов генерируются разрешающие правила в сетевом фильтре, которые необходимы для отправки данных пользовательским приложением. Модуль сетевого фильтра должен быть предварительно сконфигурирован на запрещающее правило по умолчанию.



Рис. 6 — Алгоритм управления соединениями

ров модели: сеть 802.11s, LTE; количество мобильных узлов 4-16; интенсивность

Механизм агрегации каналов выполняет функцию мультиплексора каналов и включается отдельно для каждого сетевого интерфейса. Сервис сбора данных выполняет алгоритм обмена данными о сетях с облачным сервисом для передачи координат, списков сетей и уровней сигнала в локальную и глобальную телематические карты, для ускорения сканирования списка беспроводных сетей рекомендуется использовать дополнительный Wi-Fi адаптер. Сервис синхронизации с глобальной картой используется для кэширования выбранных фрагментов с информацией о сетях на траектории движения транспортного средства. Система может быть использована для одного из пользовательских сценариев информационного обмена данными: получение максимальной пропускной способности, обеспечение отказоустойчивости соединений, экономия трафика в глобальных сетях, передача больших объемов данных, превышающих ресурсы доступных сетевых технологий.

В четвертой главе для подтверждения работоспособности разработанных моделей, методов и алгоритмов проведены серии модельных и натурных экспериментов. Для проведения экспериментов определена область допустимых значений изменяемых параметров

передачи данных от узла к облаку от 8 до 2048 Кбит/с; максимальная скорость подвижного объекта 50 км/ч; фрагмент дорожной карты 200x200, цикл с двусторонним движением; модель движения транспорта — IDM; размер сообщения 1 КБ; протоколы маршрутизации HWMP, OLSR, AODV, DSDV; тип трафика TCP, UDP. Результат моделирования приведен на рис. 7.

Исследования протоколов динамической маршрутизации показали, что процент потерянных сообщений при движении мобильного объекта составляет до 30%. Увеличение количества потерянных сообщений до 50% происходит при использовании протоколов на основе состояния канала и скоростях передачи данных более 1024 Кб/сек. Наилучшие результаты на потоках большой интенсивности демонстрируют протоколы AODV, DSDV. Для передачи коротких сообщений с малой интенсивностью наименьшее количество потерь сообщений демонстрирует протокол HWMP.

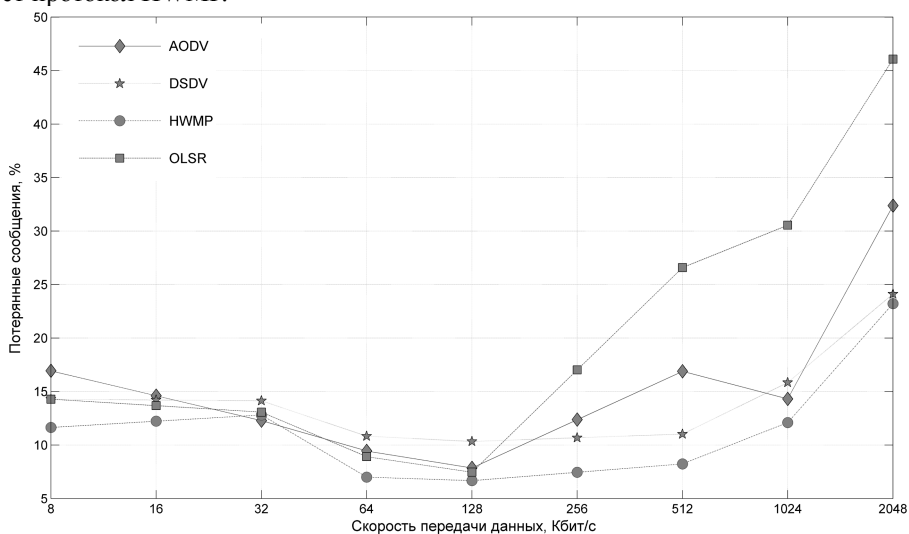


Рис. 7 — Зависимость количества потерянных сообщений от протокола динамической маршрутизации в mesh-сети

Для проверки работоспособности алгоритма и технологии управления данными телематической карты была проведена серия экспериментов, которые демонстрировали этапы обработки и передачи данных о глобальных и локальных беспроводных сетях при движении транспортного средства на городском маршруте. Для этого макет мультипротокольного узла был размещен на транспортном средстве, движущемся по замкнутой траектории. Эксперимент демонстрировал сбор данных о телематической обстановке и состоял в непрерывной регистрации доступности и уровней сигналов глобальной и локальных беспроводных сетей из транспортного средства. На каждом этапе эксперимента задавалась средняя скорость движения, и определялись: время сеанса, число точек GPS, число опросов локальной и глобальной сетей, число зарегистрированных локальных сетей. Во время движения вычислялись: средний уровень сигнала и среднее время видимости сети.

Сводные результаты эксперимента приведены в таблице 2. Число зарегистрированных стационарных беспроводных сетей уменьшается с ростом средней

Таблица 2 — Зависимости обнаружения сетей и объема передаваемых данных от скорости мобильного объекта

| Наименование параметра | Скорость движения, км/ч | | | | | | |
|--|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 15 | 18 | 20 | 23 | 26 | 28 |
| Длительность сеанса регистрации, мин | 16 | 10 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 |
| Объем данных, Кбайт | 697 | 504 | 480 | 457 | 354 | 274 | 200 |
| Доля обнаруженных сетей Wi-Fi из 264, % | 81 | 68 | 68 | 62 | 60 | 60 | 58 |
| Среднее время доступности для выбранных Wi-Fi сетей, с | 28 | 19 | 10 | 7 | 6 | 4 | 3 |

скорости, что вызвано снижением относительной частоты опроса на единицу пути. Объем передаваемых данных монотонно снижается с ростом средней скорости в виду уменьшения числа зарегистрированных сетей, так и меньшего числа опросов сети, вызванного снижением времени движения по траектории. Мультипротокольный узел позволяет осуществлять мониторинг телематической обстановки, которая доступна для передачи данных и на основе этих данных позволяет выбрать сеть с максимальным временем доступа.

Для исследования системы управления соединениями используется инструментальная среда, позволяющая производить натурное моделирование мультипротокольной сети. Параметры эксперимента: Тип агрегации: Dynamic (Wi-Fi+LTE), Static. Объемы данных: 10, 30, 50, 100 МБ. Кол-во потоков: 1, 5. На основе параметров были сформированы следующие сценарии работы каналов: одновременная стабильная работа каналов LTE и Wi-Fi, нестабильная работа технологии Wi-Fi и стабильная работа технологии LTE, нестабильная работа Wi-Fi. Для каждого сценария работы каналов применялись политики использования

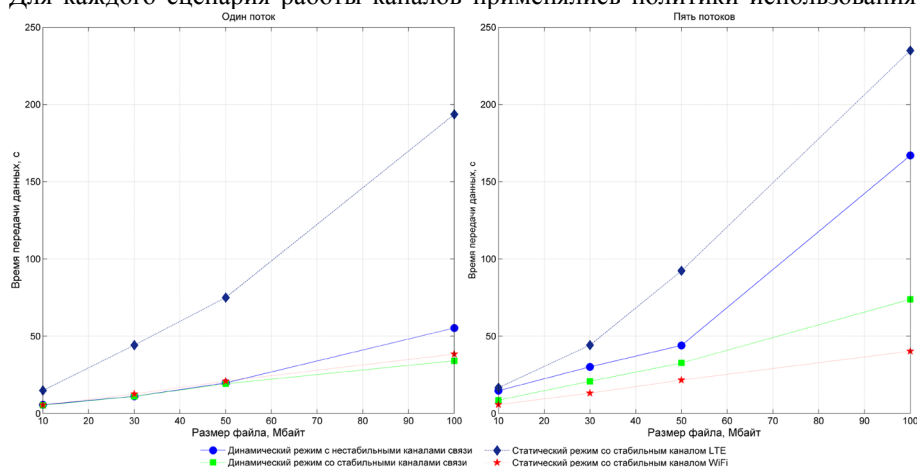


Рис. 8 — Зависимость времени передачи данных от объема передаваемого файла и режима агрегации канала в стабильном и нестабильном режимах каналов: агрегация и резервирование. Объем передаваемых данных в контексте одного сценария изменяется в диапазоне от 10 до 100 МБ. Режим сетевого взаимодействия: в первом случае динамическое использование алгоритма с MPTCP, во

втором случае статическое распределение каналов с отдельным использованием каналов Wi-Fi или LTE. Конфигурация потоков МРТСП задается двумя режимами 1 и 5, режим 5 позволяет согласовывать каналы с различными задержками и скоростями передачи данных путем создания нескольких потоков, режимы 2–4 для ТСП протокола аналогичны 1. Для эмуляции нестабильности канала связи Wi-Fi используется модель помех, описывающая движение объекта в городской среде.

Результаты тестирования системы управления соединениями показали преимущество использования механизмов агрегации каналов для стабильных каналов связи, где динамическое включение протокола дает до 40% преимущества в скорости передачи данных по сравнению с системами, использующими один глобальный или локальный канал передачи данных.

Заключение. В диссертационной работе предложено решение актуальной научно-технической задачи разработки математического и программного обеспечения для организации взаимодействия мобильных объектов и информационных сервисов в интеллектуальных транспортных системах на всей траектории движения через локальные телематические ресурсы стационарных и мобильных точек доступа. В процессе решения данной задачи были получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель сети передачи данных мультипротокольных узлов мобильных объектов на основе динамического графа, отражающая динамику состояния транспортной и телематической компонент, сокращающая накладные расходы на формирование путей передачи данных.
2. Сформулирован метод управления динамической сетью, на основе которого разработаны алгоритмы управления ресурсами мобильного объекта и облачного сервиса телематических данных, отличающиеся мониторингом каждого мобильного объекта с учетом глобальной конфигурации сети и обеспечивающие перспективное планирование трафика в интеллектуальных транспортных системах. Получена программная реализация алгоритмов и протоколов согласованного управления данными телематической карты с использованием бортового мультипротокольного узла, обеспечивающая решение задач управления в реальном масштабе времени с использованием сервиса телематической карты.
3. Создана дискретно-событийная имитационная модель динамической сети мобильных объектов, отличающаяся реализацией динамической маршрутизации данных между одноранговыми сетями, позволяющая моделировать перераспределение потоков данных между сетями в мультипротокольных узлах.
4. Разработаны инструментальные средства для проведения компьютерного и натурного моделирования, позволяющие выбрать протоколы динамической маршрутизации для минимизации потерь данных в одноранговых сетях с ограниченным временем существования.
5. Разработана архитектура распределенной системы доступа мобильного объекта к информационным сервисам, отличающаяся наличием модуля выбора каналов передачи данных на основе запроса приложения, глобальных правил передачи данных и телематической обстановки, обеспечивающая максимальное использование пропускной способности выбранных локальных и глобальных каналов связи на всем маршруте движения транспортного средства.
6. Реализована программно-аппаратная архитектура мультипротокольного узла, позволяющая обеспечить маршрутизацию между несколькими

сетями передачи данных, использующими локальные и глобальные беспроводные сетевые технологии.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ

1. Глазунов В. В., Курочкин М. А. Программно-аппаратный стенд моделирования протоколов динамической маршрутизации сетевого уровня в мобильной гетерогенной сети // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2014. — Т. 1, №4(200). — С. 29—40.
2. Glazunov V. V., Kurochkin M. A., Popov S. G. Qualification routes messaging for dynamic systems using logical-probabilistic method // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2015. — Т. 1, №1(212). — С. 16—21.
3. Глазунов В. В., Курочкин М. А., Попов С. Г. Технология управления облачным сервисом телематической карты интеллектуальной транспортной системы // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2015. — Т. 1, №2—3(217—222). — С. 19—33.

В сборниках трудов конференций

4. Instrumental environment of multi-protocol cloud-oriented vehicular mesh network / V. Glazunov [и др.] // ICINCO 2013 - Proceedings of the 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. — 2013. — Т. 1. — С. 568—574.
5. Road traffic efficiency and safety improvements trends / V. Glazunov [и др.] // ICINCO 2013 - Proceedings of the 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. — 2013. — Т. 2. — С. 439—446.
6. An experimental comparison of dynamic routing protocols in mobile networks / V. Glazunov [и др.] // ICINCO 2014 - Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. — 2014. — Т. 2. — С. 775—782.
7. Hardware and Software Equipment for Modeling of Telematics Components in Intelligent Transportation Systems / V. Glazunov [и др.] // 14th International Conference, NEW2AN 2014 and 7th Conference, ruSMART 2014, St. Petersburg, Russia, August 27-29, 2014. Proceedings. — Cham : Springer International Publishing, 2014. — С. 598—608.
8. Network synchronization of vehicle multiprotocol unit system clock / V. Glazunov [и др.] // Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2014 6th International Congress on. — 10.2014. — С. 105—110.
9. Prototype of the telematics map cloud service / V. Glazunov [и др.] // Conference of Open Innovation Association, FRUCT. — 2015. — С. 50—55.
10. Methods of interaction between multiprotocol unit and telematics map cloud service / V. Glazunov [и др.] // VEHITS 2015 - Proceedings of the 1st International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. — 2015. — С. 161—166.
11. The implementing of the Internet of things concepts for the continuous provision of informational services for vehicle drivers and passengers / S. Попов [и др.] // Telematics and Future Generation Networks, 2015 1st International Conference on. — 05.2015. — С. 1—5.
12. The algorithm to improve the accuracy of location data of the vehicle in the cloud / V. Glazunov [и др.] // 2015 1st International Conference on Telematics and Future Generation Networks. — 05.2015. — С. 44—48.
13. The Technology of Management of Data About Wireless Networks for Vehicle's Telematics Map / V. Glazunov [и др.] // Proceedings of the International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. — 2016. — С. 138—143.
14. The rules selection algorithm for network traffic of robot groups in intelligent transportation systems / V. V. Glazunov [и др.] // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). — 05.2017. — С. 533—535.