

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Осанов В.А., Цыдилин Д.И., Разуваев А.В., Ульянов Д.М., Коняева О.С.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: osanov97v@mail.ru

В условиях стремительного развития технологий и увеличения числа автомобилей интеллектуальные транспортные системы становятся неотъемлемым инструментом для создания более эффективной, комфортной и устойчивой городской среды. Данная работа посвящена проектированию архитектуры транспортной системы на основе стандарта V2S и концепции туманных вычислений в целях снижения времени задержки в передаче данных, улучшения оперативности принятия решений и повышения надежности управления трафиком. Для обоснования эффективности применения предлагаемого подхода проводится имитационное моделирование облачной и туманной архитектуры системы интернета вещей. В работе анализируются ключевые параметры транспортной системы, такие как задержка передачи данных, нагрузка на серверные мощности, а также экономическая эффективность. Результаты моделирования показывают, что туманные вычисления значительно снижают задержки, но требуют больше вычислительных ресурсов, тогда как облачная архитектура минимизирует нагрузку на серверы, хотя может характеризоваться задержками. Исследование подчеркивает важность выбора подходящей архитектуры в зависимости от требований к скорости обработки и ресурсам сети.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система, стандарт V2X, распределенные вычисления, туманные вычисления, облачные вычисления, сетевая архитектура, задержка

Введение

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) сегодня приобретают особую значимость [1–2] в связи с ростом объема городского трафика и усложнением транспортной инфраструктуры. Такие системы позволяют повысить безопасность на дорогах, снижая количество аварий за счет своевременного анализа и реагирования на дорожные ситуации. Кроме того, интеллектуальные технологии способствуют оптимизации движения, уменьшая пробки и сокращая время в пути.

Одной из ключевых задач современных ИТС является необходимость оперативной обработки данных в условиях высокой нагрузки, обеспечения отказоустойчивости и минимизации задержек. Актуальность работы обусловлена растущими требованиями к быстродействию, надежности и экономической эффективности ИТС. В условиях стремительного роста транспортной инфраструктуры необходимо учитывать особенности различных архитектурных подходов, чтобы обеспечить баланс между вычислительной мощностью, задержкой передачи данных и затратами на инфраструктуру.

Согласно результатам [3] традиционные централизованные подходы, такие как облачные вычисления, обеспечивают мощные аналитические возможности, но могут не справляться с требованиями к задержке передачи данных и избыточной нагрузкой на сеть. В то же время децентрализо-

ванные модели (туманные вычисления) позволяют перераспределять нагрузку и обрабатывать данные ближе к их источнику, сокращая время отклика системы и повышая ее адаптивность [4].

Настоящее исследование посвящено проектированию архитектуры интеллектуальной транспортной системы на основе тумана, а также анализу концепций облачных и туманных вычислений в телекоммуникационных системах.

Назначение интеллектуальных транспортных систем

ИТС является комплексом технологических решений, направленных на эффективное управление транспортными потоками, повышение безопасности и улучшение качества обслуживания всех участников дорожного движения [1]. Она объединяет современные информационные и коммуникационные технологии с транспортной инфраструктурой, позволяя создавать надежные и устойчивые транспортные системы посредством решения определенного набора задач:

1. Мониторинг обстановки на дорогах – отслеживание состояния трафика с помощью камер и датчиков, чтобы в реальном времени выявить заторы, аварии и другие критические ситуации, а также экстренно реагировать на них [5].

2. Управление светофорами и транспортными потоками на основе собранных данных, с возможностью изменения их циклов в зависимости от текущей загруженности дорог [6].

3. Информирование пассажиров – предоставление информации о состоянии общественного транспорта через мобильные приложения и электронные табло на остановках [7].

4. Оптимизация маршрутов – анализ данных о движении и выбор оптимальных маршрутов для водителей и общественного транспорта, с целью сокращения времени в пути и снижения уровня стресса у пользователей [8].

5. Экологическая устойчивость, так как настройки системы способствует снижению выбросов углекислого газа, поощряя использование экологически чистых видов транспорта, таких как электромобили и велосипеды [9].

6. Интеграция различных видов транспорта посредством создания единой платформы для взаимодействия между различными транспортными средствами, включая автомобили, автобусы, велосипеды и пешие маршруты [10].

7. Анализ данных и прогнозирование будущих потребностей [11].

В качестве основных источников данных выступают [12]:

1. Датчики и камеры, установленные вдоль дорог и на перекрестках, фиксирующие данные о скорости, плотности движения, количестве автомобилей и даже о состоянии дорожного покрытия. Камеры могут также использоваться для распознавания номерных знаков и мониторинга нарушений правил дорожного движения.

2. GPS-устройства транспортных средств, передающие информацию о местоположении и маршруте в реальном времени. Это позволяет отслеживать движение общественного транспорта и частных автомобилей.

3. Мобильные приложения, собирающие данные о маршрутах, времени в пути и условиях на дорогах, что также может быть передано в центральную систему.

4. Социальные сети, где пользователи могут делиться информацией о заторах, авариях и других событиях на дороге, становятся важным источником данных.

Беспроводные сети, такие как Wi-Fi, 4G/5G и LoRaWAN, обеспечивают передачу данных от этих источников в центральный контрольный центр. После этого контрольный центр осуществляет их обработку с помощью алгоритмов анализа/моделирования и принимает решение в соответствии с определенным сценарием [13]. Каждый сценарий, в свою очередь, использует определенный набор функций под необходимые задачи. Исходной информацией может выступать управляющий сигнал для актуатора. Наличие

беспроводной сети обеспечивает передачу данных и управляющих сигналов в режиме реального времени и быструю реакцию на изменения.

Актуаторы выполняют функции, которые обеспечивают автоматическое реагирование на изменения в дорожной обстановке. В роли актуаторов могут использоваться светофоры, управляющие устройства для дорожных знаков и т.д. [14].

Получатели информации в ИТС представляют собой различные системы и пользователей, которые используют собранные данные для принятия решений [15]:

1. Водители и пассажиры получают информацию, предоставляемую через мобильные приложения и электронные табло, которая помогает им принимать обоснованные решения о маршрутах, времени отправления и способах передвижения.

2. Органы управления, городские власти и транспортные компании используют данные для анализа эффективности транспортной системы, планирования новых маршрутов и внедрения улучшений в инфраструктуру.

3. Научные и аналитические организации на основе собранных данных проводят исследования и разработку новых технологий, направленных на совершенствование транспортной системы и повышение ее устойчивости.

Архитектура

Одним из главных стандартов для организации архитектурного решения транспортной системы выступает стандарт V2X (Vehicle-to-Everything – транспортное средство ко всему) в диапазоне 5,9 ГГц [16]. Он обеспечивает эффективное взаимодействие между транспортными средствами, инфраструктурой и другими участниками дорожного движения.

Стандарт V2X включает в себя несколько подкатегорий: V2P (Vehicle-to-Pedestrian – транспортное средство к пешеходу), V2N (Vehicle-to-Network – транспортное средство к сети), V2V (Vehicle-to-Vehicle – транспортное средство к транспортному средству) и V2I (Vehicle-to-Infrastructure – транспортное средство к инфраструктуре). Для обмена данными между автомобилями используется стандарт V2V. Например, автомобили могут сообщать о своем местоположении, скорости и направлении движения, что помогает предотвратить столкновения и улучшить общую безопасность на дорогах. Роль стандарта V2I заключается в организации связи между транспортными средствами и дорожной инфраструктурой, такой как светофоры, дорожные

знаки и камеры. V2P направлен на обеспечение взаимодействия между транспортом и пешеходами. Автомобили могут обнаруживать пешеходов вблизи дороги и предупреждать водителей о потенциальных опасностях. Этот стандарт включает использование мобильных приложений, которые позволяют пешеходам взаимодействовать с автомобилями. Для обмена информацией от транспорта с облачными и сетевыми ресурсами используется стандарт V2N.

V2X строится на технологиях беспроводной связи, таких как DSRC (Dedicated Short-Range Communications – специальные беспроводные коммуникации на коротких расстояниях) и C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything – сотовое транспортное средство ко всему) [17]. DSRC обеспечивает высокоскоростную передачу данных на короткие расстояния, что подходит для обмена информацией между автомобилями и инфраструктурой. C-V2X, основанный на мобильных сетях, позволяет построить более широкую связь и интеграцию с существующими сетями связи.

DSRC основан на стандартах IEEE 802.11p, который является расширением Wi-Fi для короткосрочной связи. Основные протоколы и технологии [18], используемые в DSRC, включают:

1. WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments – беспроводной доступ в транспортных средах) определяет, каким образом устройства должны взаимодействовать и обмениваться информацией в условиях движения.

2. SAE J2735 определяет сообщения, которыми могут обмениваться транспортные средства и инфраструктура.

C-V2X использует существующие сотовые сети и основан на стандартах 3GPP [18], включая:

1. Интерфейс PC5 позволяет транспортным средствам обмениваться данными напрямую друг с другом и с инфраструктурой без необходимости задействования промежуточных базовых станций, гарантируя при этом низкие задержки и высокую надежность.

2. Интерфейс Uu использует существующие сотовые сети для передачи данных, что позволяет транспортным средствам получать информацию из облачных сервисов и других источников.

Туманные вычисления

Широко используемыми архитектурными решениями для IoT-систем (Internet of Things – Интернет вещей) [19] являются следующие концепции:

1. Облачные вычисления (Cloud Computing, Cloud), обеспечивающие централизованную об-

работку данных на мощных удаленных серверах, что позволяет выполнять сложные аналитические задачи и реализовывать сценарии штатного и нештатного управления дорожной инфраструктурой. Однако данный подход увеличивает задержки и нагрузку на сеть [20].

2. Туманные вычисления (Fog Computing, Fog) представляют собой промежуточный вариант, распределяя часть вычислений ближе к источнику данных, что снижает задержку и нагрузку на облако [21].

Выбор концепции зависит от нескольких ключевых факторов:

1. Количество устройств в сети – централизованные облачные решения подходят для крупных распределенных систем, в то время как туманные вычисления эффективны для обработки данных в распределенной среде.

2. Тип и объем данных – передача текстовых, аудио- и видеоданных требует разных подходов к обработке и хранению информации.

3. Экономические затраты – облачные решения могут быть дорогостоящими из-за затрат на передачу и обработку данных в центрах обработки, тогда как туманные архитектуры позволяют снизить расходы на инфраструктуру за счет распределенной обработки.

С ростом требований к скорости обработки данных и уменьшению задержек в связи с развитием технологий, таких как автономные автомобили и системы управления движением, возникает необходимость применения туманных вычислений в ИТС. Они предполагают распределение вычислительных ресурсов ближе к источнику данных, что позволяет снизить задержки и повысить скорость реакции систем.

В случае применения тумана вся территория покрытия ИТС разделяется на области, каждая из которых будет иметь свой туманный узел, к которому подключаются все устройства системы, находящиеся в его территориальной зоне. Каждый узел подключается к центральному облачному серверу и в случае поступления от пользователя сложной задачи, требующей большого количества вычислительных ресурсов, отправляет запрос на облако. Если задача является относительно несложной, то ее обработка и выполнение происходит сразу в узле тумана. Данный подход позволяет разгрузить облачный сервер и ускорить процесс работы системы. Узлы тумана могут быть представлены разнообразными устройствами, например, такими как сетевой маршрутизатор.

Шлюзы IoT служат связующим звеном между сенсорами и узлом туманных вычислений.

Они обрабатывают данные, поступающие от различных устройств, и могут выполнять предварительный анализ информации. Для этих целей используются различные протоколы связи, такие как MQTT или CoAP, для передачи данных в узел туманных вычислений.

Технологии Wi-Fi и LTE/5G предоставляют высокоскоростную передачу данных между узлами тумана и облачной инфраструктурой, позволяя обеспечить быструю реакцию на изменения в дорожной ситуации.

Использование технологий туманных вычислений и стандарта V2X позволяют совместно организовать надежную и высокоэффективную архитектуру интеллектуальной транспортной системы [22].

Построенная на основе стандарта V2X и туманных вычислений интеллектуальная транспортная система представлена в виде гибридной топологии, которая сочетает элементы как звездной, так и ячеистой архитектуры (рисунок 1).

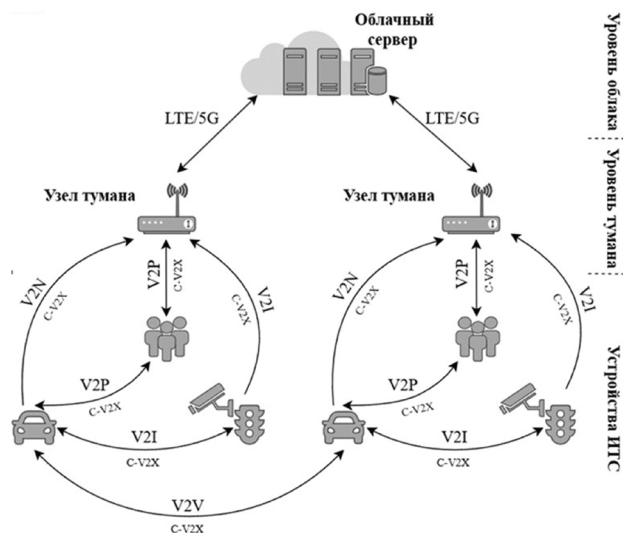


Рисунок 1. Обобщенная архитектура интеллектуальной транспортной системы на основе стандарта V2X и туманных вычислений

Транспортные средства, подключенные к системе, обмениваются данными не только с центральным узлом, но и напрямую друг с другом (V2V), а также с инфраструктурой (V2I), что создает динамическую сеть ячеистого типа. Связь всех элементов ИТС с соответствующим узлом тумана и последующая связь всех узлов с одним облачным сервером соответствует звездной архитектуре.

Моделирование туманной и облачной архитектуры

Для оценки эффективности применения туманных вычислений в ИТС осуществляется моделирование двух IoT-систем, на основе об-

лачной и туманной архитектур, с последующим анализом полученных результатов.

Моделирование архитектуры распределенных вычислений проводится с целью:

1. Анализа влияния распределенной обработки данных в туманных узлах на общую производительность системы.
2. Определения зависимости задержки передачи данных от распределения вычислительных ресурсов между узлами тумана и облака.
3. Оценки нагрузки на облако и узлы тумана при обработке данных от IoT-устройств, выполняющих роль источников данных ИТС.
4. Исследования влияния конфигурации сети (пропускная способность, скорость связи) на общую производительность системы.
5. Сравнение облачной архитектуры с туманной по ключевым показателям (загрузка процессора, энергопотребление).

В качестве среды моделирования используется среда iFogSim – специализированный симулятор, разработанный для моделирования распределенных вычислительных систем, включающих как облачные, так и туманные узлы [23]. Он обеспечивает имитацию выполнения задач в гетерогенной среде, позволяя анализировать ключевые метрики: задержку, загрузку процессора, потребление памяти и сетевые характеристики. Данный симулятор поддерживает моделирование различных уровней вычислений (облако, туман, конечные устройства), учитывает сетевую топологию, а также дает возможность гибко задавать сценарии взаимодействия между узлами.

Реализация модели архитектуры облачных вычислений в iFogSim представлена на рисунке 2. Данная схема иллюстрирует централизованную обработку данных, соответствующую концепции облачных вычислений. Вначале создается объект FogDevice, представляющий облачный дата-центр. Ему назначаются вычислительные мощности (таблица 1): центральный процессор, оперативная память, накопитель/емкость хранения. Дата-центр напрямую соединен с различными конечными IoT-устройствами: исполнительными устройствами (Actuator), выполняющими управляющие действия, и датчиками (Sensor) для сбора информации из окружающей среды. Все запросы от конечных устройств отправляются в облако (Cloud) через сеть. Обратный поток данных поступает после обработки на облачном сервере.

Реализация модели архитектуры туманных вычислений в iFogSim представлена на рисунке 3.

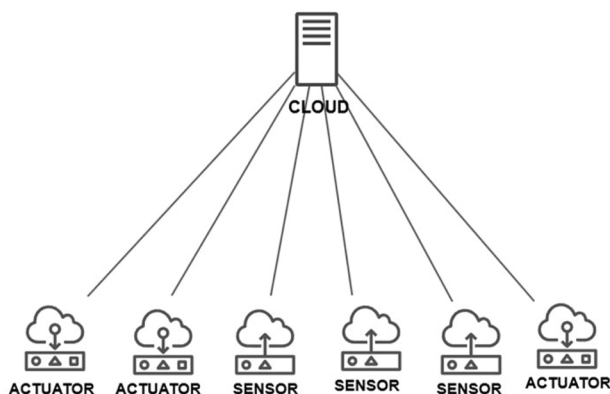


Рисунок 2. Модель облачной архитектуры

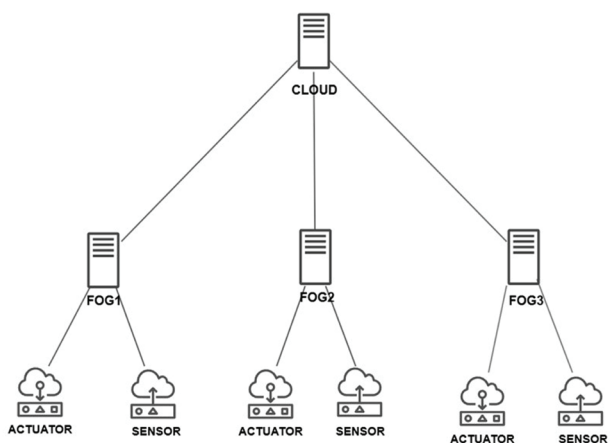


Рисунок 3. Модель туманной архитектуры

Таблица 1. Параметры моделирования облачного сервера

Параметр	Значение
Уровень иерархии облака	1
Пропускная способность восходящего канала	200 бит/с
Пропускная способность нисходящего канала	100 бит/с
Вычислительная мощность сервера	800 Mips
Оперативная память	16 ГБ
Показатель стоимости или ресурсоемкости вычислений	2

Центральный сервер (Cloud) играет роль основного вычислительного узла, который связан с промежуточными узлами тумана (Fog1, Fog2, Fog3), выполняющими распределенную обработку данных. Параметры серверов узлов тумана (таблица 2) задаются аналогично облачному.

Каждый узел подключен к исполнительным устройствам (Actuator) и датчикам (Sensor). Такая архитектура позволяет снизить нагрузку на облако, перерабатывая часть данных на уровне узлов тумана.

Таблица 2. Параметры моделирования сервера узла тумана

Параметр	Значение
Уровень иерархии облака	2
Пропускная способность восходящего канала	100 бит/с
Пропускная способность нисходящего канала	50 бит/с
Вычислительная мощность сервера	300 Mips
Оперативная память	4 ГБ
Показатель стоимости или ресурсоемкости вычислений	2

Работу всех датчиков определяют такие параметры как:

- тип – вид измеряемого датчиком параметра;
- тип распределения – способ распределения значений измеряемого параметра, в данной работе указан как Normal (нормальное распределение), то есть значение параметра изменяется в соответствии с гауссовым распределением;
- среднее значение – среднее ожидаемое значение параметра;
- стандартное отклонение – стандартное отклонение измеряемых значений, определяющее пределы колебания измеряемой величины от среднего значения.

При моделировании описанных выше архитектур использовалось по 15 конечных IoT-устройств, при этом задержка при передаче данных между узлами была установлена равной 5, то есть передача данных от узла тумана к облаку занимала 5 мс. Задержка определяет, насколько быстро данные передаются между узлами и влияет на общую производительность системы. Чем меньше значение задержки, тем быстрее идет взаимодействие между компонентами системы.

В качестве устройства, на котором проводилось моделирование, использовался персональный компьютер со следующими характеристиками: GPU –NVIDIA GeForce RTX 3050; CPU – 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400F @ 2.60GHz; RAM – Kingston FURY Beast Black RGB [KF432C16BBAK2/16] 16 ГБ.

Результаты

Одним из ключных параметров оценки результатов моделирования системы является время работы. Среда моделирования позволяет оценить следующие параметры времени: время исполнения облака, задержка, итоговое время исполнения. Последний параметр отражает общее время, необходимое для завершения выполнения задач в симуляционной модели распределенных вычислений. Оно складывается из следующих составляющих:

- время обработки, затраченное на выполнение вычислений на виртуальных машинах или физических узлах в облачной инфраструктуре;
- время передачи данных, необходимое для передачи данных между устройствами;
- время ожидания, в течение которого задачи находятся в очереди на обработку;
- время инициализации для подготовки системы к выполнению задачи, включая настройку необходимых ресурсов.

Полученные результаты (таблицы 3-4) временных параметров моделирования облачной и туманной архитектуры показывают, что туманная архитектура демонстрирует более высокую эффективность по временным показателям по сравнению с облачной. Среднее время исполнения и задержка в туманных вычислениях значительно ниже, чем в облачных. Это также отражается на итоговом времени исполнения – в туманных системах оно составляет в среднем 165,31 мс против 290,96 мс в облачных. Такие результаты подтверждают, что туманные вычисления обеспечивают более быструю обработку данных.

Таблица 3. Оценка временных показателей моделирования облачной модели

Критерии оценки времени	Время		
	мин.	сред.	макс.
Время исполнения облака, мс	257,22	262,59	270,39
Задержка, с	0,04	0,06	0,09
Итоговое время исполнения, мс	285,57	290,96	296,88

Таблица 4. Оценка временных показателей моделирования туманной модели

Критерии оценки времени	Время		
	мин.	сред.	макс.
Время исполнения облака, мс	127,71	148,21	160,69
Задержка, с	0,001	0,006	0,009
Итоговое время исполнения, мс	147,77	165,31	193,53

На рисунке 4 показан график зависимости использования процессора (CPU) и оперативной памяти (RAM) от количества пользователей для двух вычислительных архитектур. График иллюстрирует, как количество пользователей

влияет на использование ресурсов в облаке и тумане. С увеличением числа пользователей нагрузка на узлы тумана возрастает (сплошная линия). В отличие от облачных серверов, туманные вычисления происходят на локальном уровне, что требует значительных вычислительных мощностей. Так при 1000 пользователей загрузка процессора туманных узлов достигает пика в 140 условных единиц. Потребление оперативной памяти в тумане (штриховая линия) растет плавно и остается заметно ниже, чем загрузка процессора. Это свидетельствует о том, что туманная архитектура делает основной упор именно на вычисления, а не на хранении данных.

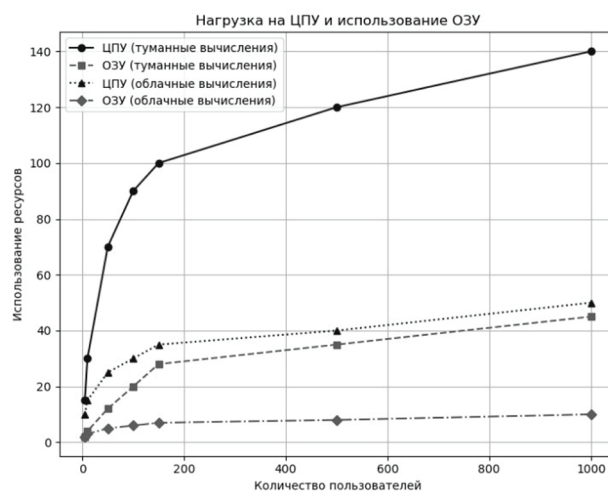


Рисунок 4. Результаты моделирования загрузки центрального процессора (CPU) и оперативной памяти (RAM)

В то же время моделирование облачных серверов показывает, что загрузка процессора облака (пунктирная линия) растет медленнее, чем у тумана. Даже при максимальном числе пользователей (1000) она достигает 40 условных единиц. Это объясняется тем, что облако распределяет вычислительную нагрузку между мощными удаленными центрами обработки данных, снижая нагрузку на отдельные узлы. Потребление оперативной памяти в облаке (штрих-пунктирная линия) показывает самый низкий уровень среди всех метрик. При увеличении числа пользователей она практически не изменяется, что говорит о высокой масштабируемости облачных решений.

Таким образом, туманные вычисления требуют больше процессорных и оперативных ресурсов по сравнению с облачными, но обеспечивают быструю обработку данных (таблица 4) благодаря локальному выполнению вычислений. Облако, напротив, менее требовательно к ресурсам и эффективно распределяет нагрузку, хотя могут

создавать задержки из-за необходимости передавать данные в удаленные дата-центры.

Для более наглядной оценки различий между архитектурами стоит рассмотреть абсолютные значения загрузки ресурсов при максимальном количестве пользователей. Согласно полученным данным, при 1000 конечных пользователей в туманной системе процессорная нагрузка достигает 70%, а использование оперативной памяти – 8 ГБ. Подобные значения обусловлены тем, что вычисления выполняются на распределенных узлах, максимально приближенных к источникам данных, что снижает сетевые задержки, но требует значительного количества локальных ресурсов.

В случае облачной архитектуры, напротив, загрузка CPU составляет 37%, а объем используемой оперативной памяти не превышает 3 ГБ. Это объясняется тем, что значительная часть вычислений централизуется на облачных серверах, что позволяет снизить нагрузку на периферийные устройства, но может увеличивать время отклика системы. Таким образом, при высокой нагрузке туман обеспечивает быструю обработку данных за счет использования локальных ресурсов, в то время как облако демонстрирует высокую масштабируемость и эффективность распределения нагрузки между удаленными центрами обработки информации.

На рисунке 5 отображается показатель влияния количества пользователей на нагрузку сети в двух исследуемых топологиях. В тумане нагрузка на сеть значительно выше, чем в облачной топологии. С увеличением числа пользователей нагрузка на сеть в туманных вычислениях растет почти линейно (сплошная линия). Особенно резко нагрузка увеличивается с 10 до 200 пользователей, что указывает на пороговые значения, после чего объем передаваемых данных возрастает. При 1000 пользователей нагрузка на сеть в тумане достигает 2500 кбит/с, что подтверждает высокую потребность в сетевых ресурсах. В то же время в облачной топологии (штриховая линия) рост нагрузки на сеть происходит медленнее. Даже при 1000 пользователей нагрузка не превышает 500 кбит/с, что говорит о меньшем объеме данных, передаваемых через сеть. Этот факт связан с централизованной обработкой данных и использованием более эффективных механизмов передачи информации, что снижает требования к сетевым ресурсам. Таким образом, туманные вычисления требуют гораздо больше сетевых ресурсов, поскольку обработка данных происходит ближе к конечным устройствам, что увеличивает

объем передаваемых данных внутри локальной сети. В то же время облачные решения, хотя и генерируют меньшую нагрузку на сеть, могут сталкиваться с проблемой задержек, связанных с необходимостью передачи данных в удаленные центры обработки.

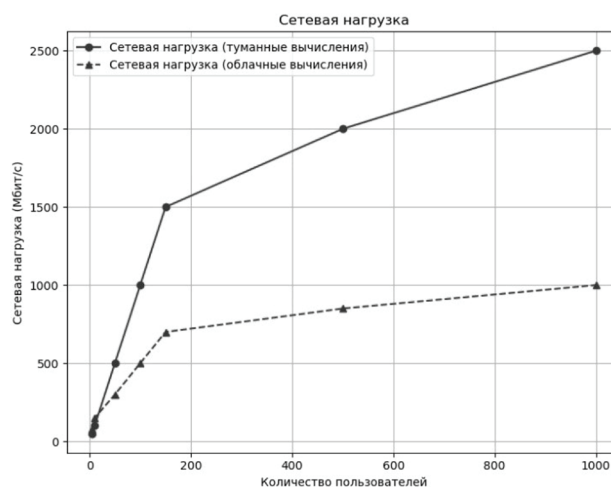


Рисунок 5. Результаты моделирования нагрузки сети

Облако имеет большую задержку, но меньшую нагрузку на сервер, тогда как туман снижает задержку, но требует больше вычислительных ресурсов. Это видно из результатов моделирования, представленных в таблицах 3–4 и рисунках 4–5. Таким образом, облако снижает нагрузку на сервер, но увеличивает задержку обработки данных, а туман уменьшает задержку, но требует больших вычислительных мощностей.

Заключение

В работе рассмотрена обобщенная архитектура интеллектуальной транспортной системы на основе стандарта V2X. В роли централизованного блока обработки и хранения данных, поступающих с различных устройств, используются облачные вычисления. Однако здесь возникает необходимость минимизировать задержки при обработке данных и повысить надежность работы. Для решения этой задачи предложено использовать туманные вычисления. Спроектирована и описана архитектура интеллектуальной транспортной системы на основе стандарта V2X и туманных вычислений.

На основе проведенного имитационного моделирования для обоснования эффективности предложенного подхода к организации архитектуры ИТС можно сделать следующие выводы:

1. Обработка данных на локальных узлах в туманной архитектуре существенно снижает задержки и улучшает отклик системы, так как данные обрабатываются ближе к конечному устрой-

ству. Это повышает общую производительность системы, особенно в приложениях с низкой задержкой. Однако, для обеспечения этого эффекта требуется больше вычислительных ресурсов на локальных узлах, что может стать ограничением при большом числе пользователей.

2. В топологии тумана высокая нагрузка на сеть возникает из-за необходимости передачи данных между узлами, особенно при увеличении числа пользователей. При недостаточной пропускной способности сети это может привести к перегрузке и снижению производительности. В облаке нагрузка на сеть менее выражена, однако зависимость от сетевой пропускной способности остается значимой для увеличения времени обработки данных.

Таким образом, система на основе тумана снижает задержку и повышает скорость обработки данных за счет локальной обработки, однако требует большего количества вычислительных и энергетических ресурсов на узлах. Облачная модель минимизирует нагрузку на локальные серверы, но может страдать от увеличения задержек и сетевого трафика. Таким образом, выбор между архитектурой ИТС на основе тумана или облака зависит от баланса между задержками, нагрузкой на вычислительные ресурсы и требованиями к сети. Для минимизации задержек и сетевого трафика предпочтительнее использовать туманные вычисления. При этом эффективная организация качественного распределения ресурсов в тумане позволит снизить нагрузку на узлы.

Литература

1. Минниханов Р.Н., Дагаева М.В., Махмутова А.З. Развитие ИТС: единые цифровые платформы для безопасного управления транспортной системой // Безопасность дорожного движения. 2022. № 3. С. 19–22.
2. Жанказиев С.В., Воробьев А.И., Воробьева Т.В. Концептуальные подходы к созданию комплексного полигона ИТС // Транспорт Российской Федерации. 2020. № 3–4 (88–89). С. 31–35.
3. Fog computing: platform and applications / S. Yi [et al.] // Third IEEE Workshop on Hot Topics in Web Systems and Technologies (HotWeb). Washington, USA, 2015. P. 73–78. DOI: 10.1109/HotWeb.2015.22
4. Осанов В.А., Карташевский И.В. Обзор решений задачи распределения ресурсов в туманных вычислениях // Инфокоммуникационные технологии. 2022. Т. 20, № 4 (80). С. 49–63. DOI: 10.18469/ikt.2022.20.4.07
5. Application of fleet management in intelligent transport systems / P. Brlek [et al.] // 57th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST). Ohrid, North Macedonia, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEST55168.2022.9828676
6. Macheret P.D., Savchuk R.R., Shkuratov G.I. Intelligent transport systems: Analysis of the current state and prospects of development // International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). Yaroslavl, Russian Federation, 2021. P. 234–237. DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642830
7. Creß C., Bing Z., Knoll A.C. Intelligent transportation systems using roadside infrastructure: A literature survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2024. Vol. 25, no. 7. P. 6309–6327. DOI: 10.1109/TITS.2023.3343434
8. Gendreau M., Potvin J.-Y. Handbook of Metaheuristics. Luxembourg: Springer, 2010. 672 p.
9. A decentralized ITS architecture for efficient distribution of traffic task management / A.F. Santamaria [et al.] // 11th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC). Prague, Czech Republic, 2018. P. 1–5. DOI: 10.23919/WMNC.2018.8480933
10. Cui Y., Lei D. Design of highway intelligent transportation system based on the internet of things and artificial intelligence // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 46653–46664. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3275559
11. Zhang H., Lu X. Vehicle communication network in intelligent transportation system based on Internet of Things // Computer Communications. 2020. Vol. 160. P. 799–806. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.03.041
12. Intelligent transport systems: Technologies and applications / A. Perallos [et al.]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2015. 376 p.
13. ГОСТ Р 56294–2014. Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональной и физической архитектурам интеллектуальных транспортных систем. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.
14. Development of the intelligent traffic management system architecture / S.A. Seliverstov [et al.] // XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). SPb., 2021. P. 200–203. DOI: 10.1109/SCM52931.2021.9507125
15. Saleem M., Poslad S., Asif W. Internet of things: Smart ubiquitous architecture of intelligent

- transport system // 2nd European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS). Bern, Switzerland, 2018. P. 88–99. DOI: 10.1109/EECS.2018.00026
16. Kabashkin I. Reliable V2X communications for safety-critical intelligent transport systems // Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). Riga, Latvia, 2017. P. 251–255. DOI: 10.1109/RTUWO.2017.8228543
 17. Kezia M., Anusuya K.V. A comparative analysis of resource allocation in VANET using DSRC and C-V2X // International Conference on Intelligent Systems for Communication, IoT and Security (ICISCOIS). Coimbatore, India, 2023. P. 449–453. DOI: 10.1109/ICISCOIS56541.2023.10100441
 18. Enabling DSRC and C-V2X integrated hybrid vehicular networks: Architecture and protocol / Z.H. Mir [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 180909–180927. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3027074
 19. Интернет вещей / А.В. Росляков [и др.]; под ред. А.В. Рослякова. Самара: ПГУТИ, ООО «Издательство Ас Гард», 2014. 340 с.
 20. Enhancing quality of service (QoS) in cloud computing / V. Sharan [et al.] // 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Delhi, India, 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10308034
 21. Martinez I., Senhaji Hafid A., Jarray A. Design, resource management and evaluation of fog computing systems: A survey // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 8, no. 4. P. 2494–2516. DOI: 10.1109/IJOT.2020.3022699
 22. Плотников П.В., Владыко А.Г. Анализ подходов к оптимизации V2X-систем: кластеризация, граничные и туманные вычисления // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10, № 3. С. 7–22. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-3-7-22
 23. Ворожцов А.С., Тутова Н.В. Имитационное моделирование туманных вычислительных сред с использованием инструментария iFogSim // Технологии информационного общества: материалы XIV Международной отраслевой научно-технической конференции. М., 2020. С. 492–495.

Дата поступления 28.02.2025

Дата принятия 28.03.2025

Осанов Владимир Андреевич, старший преподаватель кафедры управления в технических системах (УТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 339-11-00 (доб. 2281). E-mail: osanov97v@mail.ru

Цыдили Данила Игоревич, студент ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 339-11-00 (доб. 2281). E-mail: danil.cydilin.2007@mail.ru

Разуваев Александр Вячеславович, студент ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 339-11-00 (доб. 2281). E-mail: razuvaev.sasha2015@yandex.ru

Ульянов Даниил Михайлович, студент ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 339-11-00 (доб. 2281). E-mail: bastarsy@gmail.com

Коняева Ольга Сергеевна, к.т.н., доцент кафедры УТС ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 339-11-00 (доб. 2281). E-mail: o.konyaeva@psuti.ru

UDC 004.75

DOI: 10.18469/ikt.2025.23.1.10

ISSUE OF THE FOG COMPUTING APPLICATION IN INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS

Osanov V.A., Tsydilin D.I., Razuvaev A.V., Ulianov D.M., Konyaeva O.S.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: osanov97v@mail.ru

With the rapid development of automotive technologies and the increase in the number of cars, intelligent transportation systems are becoming an indispensable tool for creating a more efficient,

comfortable and sustainable urban environment. This article is devoted to the design of the transport system architecture based on the V2S standard and the concept of fog computing in order to reduce delays in data transmission, improve the efficiency of decision-making and increase the reliability of traffic management. To justify the effectiveness of the proposed approach, simulation modeling of the cloud and fog architectures of the Internet of Things system is carried out. The work analyzes key parameters such as data transmission delay, server load, and cost-effectiveness. The results show that fog computing significantly reduces delays but requires more computing resources, while the cloud architecture minimizes the load on servers but may encounter delays. The study emphasizes the importance of choosing an appropriate architecture depending on the requirements for processing speed and network resources.

Keywords: *intelligent transportation system, V2X standard, distributed computing, fog computing, cloud computing, network architecture, latency*

Osanov Vladimir Andreyevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Senior Teacher of Management in Technical Systems Department. Tel. +7 846 339-11-00 (ext. 2281). E-mail: osanov97v@mail.ru

Tsydilina Danila Igorevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Student. Tel. +7 846 339-11-00 (ext. 2281). E-mail: danil.cydilin.2007@mail.ru

Razuvaev Aleksandr Vyacheslavovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Student. Tel. +7 846 339-11-00 (ext. 2281). E-mail: razuvaev.sasha2015@yandex.ru

Ulianov Daniil Mikhailovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Student. Tel. +7 846 339-11-00 (ext. 2281). E-mail: bastarsy@gmail.com

Konyaeva Olga Sergeevna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Associated Professor of Management in Technical Systems Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 846 339-11-00 (ext. 2281). E-mail: o.konyaeva@psuti.ru

References

1. Minnikhanov R.N., Dagaeva M.V., Makhmutova A.Z. Development of intelligent transport systems: unified data platforms for safe transport system management. *Bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya*, 2022, no. 3, pp. 19–22. (In Russ.)
2. Zhankaziev S.V., Vorob'ev A.I., Vorob'eva T.V. Conceptual approaches to building an integrated testing range for intelligent transport systems. *Transport Rossijskoj Federacii*, 2020, no. 3–4 (88–89), pp. 31–35. (In Russ.)
3. Yi S. et al. Fog computing: Platform and applications. *Third IEEE Workshop on Hot Topics in Web Systems and Technologies (HotWeb)*. Washington, USA, 2015, pp. 73–78. DOI: 10.1109/HotWeb.2015.22
4. Osanov V.A., Kartashevskiy I.V. Review of solutions to the problem of resource allocation in fog computing. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2022, vol. 20, no. 4 (80), pp. 49–63. DOI: 10.18469/ikt.2022.20.4.07 (In Russ.)
5. Brlek P. et al. Application of fleet management in intelligent transport systems. *57th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*. Ohrid, North Macedonia, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICEST55168.2022.9828676
6. Macheret P.D., Savchuk R.R., Shkuratov G.I. Intelligent transport systems: Analysis of the current state and prospects of development. *International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*. Yaroslavl, Russian Federation, 2021, pp. 234–237. DOI: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642830

7. Creß C., Bing Z., Knoll A.C. Intelligent transportation systems using roadside infrastructure: A literature survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, vol. 25, no. 7, pp. 6309–6327. DOI: 10.1109/TITS.2023.3343434
8. Gendreau M., Potvin J. Y. *Handbook of Metaheuristics*. Luxembourg: Springer, 2010, 672 p.
9. Santamaria A.F. et al. A decentralized ITS architecture for efficient distribution of traffic task management. *11th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*. Prague, Czech Republic, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.23919/WMNC.2018.8480933
10. Cui Y., Lei D. Design of highway intelligent transportation system based on the internet of things and artificial intelligence. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 46653–46664. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3275559
11. Zhang H., Lu X. Vehicle communication network in intelligent transportation system based on Internet of Things. *Computer Communications*, 2020, vol. 160, pp. 799–806. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.03.041
12. Perallos A. et al. *Intelligent Transport Systems: Technologies and Applications*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2015, 376 p.
13. GOST R 56294–2014. Intelligent transport systems. Requirements for functional and physical architectures of intelligent transport systems. Moscow: Standartinform, 2018, 12 p. (In Russ.)
14. Seliverstov S.A. et al. Development of the intelligent traffic management system architecture. *XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. Saint Petersburg, 2021, pp. 200–203. DOI: 10.1109/SCM52931.2021.9507125
15. Saleem M., Poslad S., Asif W. Internet of things: Smart ubiquitous architecture of intelligent transport system. *2nd European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS)*. Bern, Switzerland, 2018, pp. 88–99. DOI: 10.1109/EECS.2018.00026
16. Kabashkin I. Reliable V2X communications for safety-critical intelligent transport systems. *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*. Riga, Latvia, 2017, pp. 251–255. DOI: 10.1109/RTUWO.2017.8228543
17. Kezia M., Anusuya K.V. A Comparative analysis of resource allocation in VANET using DSRC and C-V2X. *International Conference on Intelligent Systems for Communication, IoT and Security (ICISCoIS)*. Coimbatore, India, 2023, pp. 449–453. DOI: 10.1109/ICIS-CoIS56541.2023.10100441
18. Mir Z.H. et al. Enabling DSRC and C-V2X integrated hybrid vehicular networks: Architecture and protocol. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 180909–180927. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3027074
19. Roslyakov A.V. et al. *Internet of Things*. Ed by A.V. Roslyakov. Samara: PGUTI, OOO «Izdatel'stvo As Gard», 2014. 340 p. (In Russ.)
20. Sharan V. et al. Enhancing quality of service (QoS) in cloud computing. *14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Delhi, India, 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10308034
21. Martinez I., Senhaji Hafid A., Jarray A. Design, resource management and evaluation of fog computing systems: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, vol. 8, no. 4, pp. 2494–2516. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3022699
22. Plotnikov P.V., Vladiko A.G. Analysis of approaches to optimization of V2X systems: Clustering, edge and fog computing. *Trudy uchebnyh zavedenij svyazi*, 2024, vol. 10, no. 3, pp. 7–22. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-3-7-22 (In Russ.)
23. Vorozhtsov A.S., Tutova N.V. Simulation modeling of fog computing environments using the iFogSim toolkit. *Tekhnologii informacionnogo obshchestva: materialy XIV Mezhdunarodnoj otraslevoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii*. Moscow, 2020, pp. 492–495. (In Russ.)

Received 28.02.2025

Accepted 28.03.2025