

Разработка архитектуры интеллектуальной системы управления дорожным движением

С. А. Селиверстов

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН;
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого;
Высшая школа интеллектуальных систем и
суперкомпьютерных технологий;
seliverstov_s_a@mail.ru

А. М. Сазанов¹, К. В. Никитин², Е. Н. Бендерская³,
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого;
Высшая школа интеллектуальных систем и
суперкомпьютерных технологий
¹arseny.sazanov@gmail.com,
²execiter@mail.ru, ³elena.n.benderskaya@gmail.com

Я. А. Селиверстов

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН
silver8yr@gmail.com

Аннотация. Обосновывается актуальность разработки архитектуры интеллектуальной системы управления дорожным движением. Описываются транспортные проблемы, решение которых возможно в рамках использования интеллектуальных транспортных систем. Проводится глубокий анализ современных работ в области создания архитектур интеллектуального управления транспортом. С учетом современных требований и микросервисно-ориентированных подходов выполняется разработка архитектуры интеллектуальной системы управления дорожным движением. Описываются ее преимущества.

Ключевые слова: архитектура интеллектуальной транспортной системы, интеллектуальная система управления дорожным движением, управление светофором, умный светофор, микросервисная архитектура

I. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня современные крупные города и мегаполисы выступают генераторами и концентраторами социально-экономических, инновационно-технологических, производственных и транспортно-логистических процессов [1].

Устойчивый рост численности населения, уровня автомобилизации, и мобильности, вследствие запаздывания развития транспортной среды и внедрения новых технологий в элементы управления транспортной системой, становятся причиной возникновения сложных проблем [2, 3]. Явные из них это – транспортные заторы, нарушения расписания движения пассажирского транспорта, дорожно-транспортные происшествия, повышенное загрязнение городской среды; косвенные – увеличение стоимости перевозки, рост логистических расходов ухудшение здоровья населения, психологическая напряженность по причине простоя в пробке или опоздания, снижение удовлетворенности из-за некачественной транспортной услуги и другие. По данным

[4, 5] совокупные убытки от простоя в пробках составили 124 млрд долларов и по прогнозам оценкам специалистов [5] эта сумма может возрасти до 50 % к 2030 г. Прерывистые движения на низких скоростях в пробках увеличивают уровень загрязнения окружающей среды твердыми частицами (PM_{2,5}, PM₁₀) и углекислым газом, что является причиной увеличения заболеваемости и смертности [5, 6]. В [5] указывается, что 1 % (184 000 смертей) всех смертей связан с загрязнением воздуха. Таким образом, проблемы, вызванные транспортом, представляют собой серьезный вызов на пути устойчивого развития общества.

Снижение влияния и/или полное разрешение всего комплекса вышеописанных проблем связывается с применением развитых интеллектуальных систем управления дорожным движением (ИСУДД) [7].

Внедрение таких систем позволит осуществлять мониторинг дорожных событий, ситуационный анализ транспортного потока, непрерывное адаптивное управление и контроль работы светофорных объектов на дорожной сети, информирование участников дорожного движения о предпочтительных маршрутах, регулирование приоритетности проезда и др., тем самым значительно улучшить такие ключевые факторы как безопасность, экологичность, производительность и качество удовлетворения пользователей транспортными услугами.

Повышения качества процессов ИСУДД зависит от надлежащего сбора, обработки, хранения и использования данных [8], а также интеграцией с другими приложениями. В свою очередь источниками генерации данных выступают подвижные транспортные объекты, пассажиры, транспортные средства, городской маршрутный транспорт, грузовой транспорт, электронные датчики и детекторы, системы видеонаблюдения, мобильные системы и иные системы мониторинга и глобального позиционирования и другие. Следовательно, современная ИСУДД должна обеспечивать непрерывный прием, обработку больших

данных в реальном времени, отвечать ключевым требованиям производительности, масштабируемости быть гибкой и расширяемой, что позволит наилучшим образом выполнять заявленные требования. Именно о разработке такой современной архитектуры интеллектуальной системы управления дорожным движением и пойдет речь в данной статье.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы заключается в разработке микросервисно-ориентированной архитектуры интеллектуальной системы управления дорожным движением, призванной обеспечить:

- реализацию безопасной, отказоустойчивой системы управления дорожным трафиком и учет основных моделей угроз;
- организацию интеллектуального адаптивного управления группой светофоров;
- организацию динамического календарного и временного управления светофорами;
- разработку независимого и универсального промежуточного устройства для реализации расширенного управления произвольными дорожными контроллерами;
- интеграцию всех существующих детекторов дорожной обстановки (в том числе и новых виртуальных петель, сниферов, и т.д.), с целью использования получаемой информации для оперативного управления дорожным трафиком;
- разработку цифровой модели дорожной сети, с целью прогнозирования дорожной обстановки в режиме реального времени;
- возможность быстрого модульного расширения системы;
- использование безопасных протоколов для организации обмена информации внутри системы.

III. СВЯЗАННЫЕ РАБОТЫ

Процессы развертывания интеллектуальных транспортных систем (ИТС) первого, второго и третьего поколения, а также теоретические аспекты ИТС описываются в [9]. В [10] определяются и анализируются требования и оценка ИТС, описываются компоненты и функции системы управления ИТС на разных уровнях.

Интеллектуальная система управления светофорами на основе потока видеоданных, с учетом распознавания транспортных средств и управления движением по полосам предложена в [11]. Фреймворк, реализующий интеллектуальное управление светофорами с учетом оптимизации трафика и приоритета специального транспорта рассматривается в [12]. Особенности разработки систем управления данными о трафике на основе облачных вычислений H-TDMS рассматриваются в [13]. В [14] разрабатывается сложная архитектура

управления трафиком на основе комбинации архитектуры управления городским движением и архитектуры управления движением на автомагистралях, предложенная система интеллектуального управления позволяет оптимизировать трафик на макро и микроуровне с учетом стратегии адаптивного управления движением. Система оперативного видеонаблюдения за дорожным движением и механизм динамического контроля сигналов дорожного движения и обнаружения аварий описывается в [15]. В [16] исследуются стратегии управления трафиком в городах с использованием сервисов ИТС, и предлагается подход к оптимизации трафика, основанный на плавном прохождении трафика по сети. Интеллектуальная система управления трафиком на основе облачных вычислений и анализа данных предлагается в [17]. Для прогнозирования оптимальных маршрутов и фиксации аварийности используется машинное обучение. Система обнаружения и оценки транспортных заторов на дорогах с использованием данных, получаемых от мобильных телефонов в качестве детекторов трафика, рассматривается в [18]. В трендах развития «Умного города» в [19] предложена адаптивная система интеллектуального управления дорожным движением в «Умных городах», работа которой опирается на способность учиться на опыте, самосовершенствоваться и анализировать динамику трафика с помощью методов, основанных на парадигме восприятия.

В области исследований, связанных с расширением функционала ИТС, целесообразно отметить следующие работы. Система автоматического анализа качества дорожной инфраструктуры на основе классификации отзывов по настройкам с использованием наивного алгоритма Байеса предложена в [20]. Разработка интеллектуальной системы организации транспортной среды в мегаполисе, с учетом концепций «Умного города» и «Устойчивого развития» описывается в [21]. Особенности построения когнитивной мультимодальной транспортной системы, ее структуры и специфики функционирования когнитивного мультимодального транспорта рассматриваются в [22].

Последние работы в области разработки современных архитектур интеллектуальных транспортных систем и систем управления дорожным движением отдают предпочтение микросервисной архитектуре с широким использованием систем оркестрации, нативной интеграции с CI/CD, следующей духу нового подхода DevSecOps при построении системы [23]. Ускорение производительности вычислений при работе с большими данными достигается использованием гибрида между потоковой и пакетной обработкой. Это способствует адаптируемости и масштабируемости архитектуры и повышает эффективность управления динамическими процессами транспортной системы. В [24] гибкая архитектура для управления транспортными потоками в режиме реального времени была реализована с использованием распределённого программного брокера Kafka с целью ускорения процессов анализа больших данных в ИТС. В [25] для повышения эффективности системы управления дорожным движением и когнитивного анализа

использовалась межуровневая архитектура LoRa и алгоритм машинного обучения. В [26] исследуется применение самоорганизующихся многоуровневых интегрированных архитектур для систем управления трафиком для повышения безопасности дорожного движения и уменьшения заторов.

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие актуальные тренды в области создания ИСУДД, а именно: микросервисно-ориентированная архитектура, использование больших данных, платформа распределенной потоковой передачи на основе Apache Kafka, возможность подключения датчиков, детекторов и других инструментов, масштабируемость, функциональная совместимость, адаптируемость, создание отчетов в реальном времени, организация безопасной работы светофорных объектов в режиме «24/7», при любых внештатных происшествиях по календарному плану, а также ситуативное регулирование при внештатных событиях и др.

IV. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ

Руководствуясь современными трендами, установленными в результате анализа последних работ в области разработке архитектур ИТС и пользовательскими требованиями, предлагается следующая архитектура, ориентированная на микросервисный подход и обработку больших данных. Общий вид разработанной архитектуры интеллектуальной системы управления дорожным движением представлен на рис. 1.

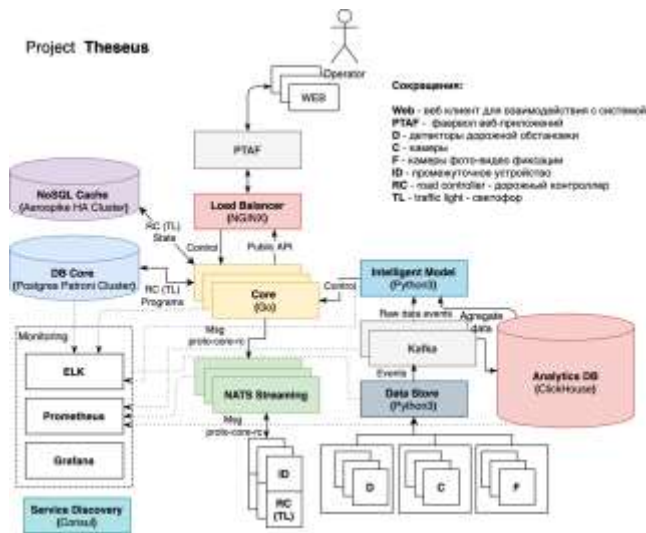


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы управления дорожным движением

Исходя из заявленных целей, разрабатываемая система включает следующие компоненты (в скобках дано наименование компонента согласно рис. 1):

1. Интеллектуальная управляющая модель (Intelligent Model) – сервис, совмещающий в себе функции моделирования и управления дорожным трафиком в рамках календарного/временного плана или адаптивного ситуативного управления.

2. Детекторы (D) – совокупность всех средств мониторинга (детекторы, видео детекторы, локальные петлевые детекторы, радиодетекторы, камеры обзорного видеонаблюдения и т.д.) и измерения дорожно-транспортной обстановки на дорогах, информация от которой подается на вход интеллектуальной модели.

3. Ядро (Core) – центральный высоконагруженный сервис, состоящий из нескольких экземпляров развернутый в рамках нативного Kubernetes облака от VMware (Tanzu), управляющий дорожными контроллерами за счет взаимодействия с клиентами (промежуточными устройствами), получающий данные от интеллектуальной модели (по протоколу gRPC), а также от АРМ операторов (HTTP, GraphQL) и применяющий эти данные для управления в режиме реального времени. В состав ядра входит база данных, предназначенная для хранения всех данных по светофорным объектам, маршрутам и другой необходимой информации для обеспечения управления, кеш на базе Aerospike для обеспечения быстрого отклика на управляющие воздействия и ответ на информацию, получаемую промежуточных устройства.

4. Промежуточные устройства (ID) – разрабатываемые на базе одноплатных компьютеров семейства ARMv8 (Cortex) с операционной системой из семейства GNU/Linux устройства, являющиеся связующим звеном между ядром и дорожным контроллером, выполняющие функции отслеживания рабочей фазы и управления дорожным контроллером. Задача промежуточных устройств состоит в том, чтобы унифицировать работу Ядра с разнородным множеством различных дорожных контроллеров от различных производителей, каждый из которых может работать на своем программном обеспечении и по своему протоколу, при этом протоколы могут отличаться друг от друга.

5. Дорожные контроллеры (RC) – оконечные устройства управления светофорами – контроллеры светофоров, осуществляющие локальное или адаптивное управление светофорными объектами.

6. База данных ядра (DB Core, Postgres Patroni HA Cluster) – основная база данных для сервиса ядра, используется для хранения всех данных от промежуточных устройств, дорожных контроллеров, планов координаций, программ и других.

7. Кеш (NoSQL Cache, Aerospike HA Cluster) – используется для кеширования общих данных для экземпляров ядра (обычно данные по промежуточным устройствам и дорожным контроллерам).

8. База данных для аналитики (Analytics DB, ClickHouse) – колоночная система управления базами данных необходимая сервису Intelligent Model используется для накопления и агрегирования информации о дорожно-транспортной обстановке, а также для предварительной обработки данных от детекторов, камер и т.д.

9. Брокер сообщений (NATS Streaming) – в рамках системы это единая шина данных управления, связывающая ядро и клиенты (промежуточные

устройства), используется для организации гарантированной доставки управляющих воздействий (команд) а также для получения обратной связи (ошибок, статусов) от промежуточных устройств о состоянии подконтрольных им дорожных контроллеров.

10. Балансировщик нагрузок (Load balancer, NGINX) – используется для балансировки нагрузки по протоколам (HTTP, GraphQL) от веб приложения ядра с помощью которой операторы системы управляют светофорными объектами.

11. Протоколы обнаружения сервисов (Service Discovery, Consul) – используются для динамического обнаружения сервисов в системе (каждый инстанс сервиса, в том числе БД, NATS самостоятельно регистрируется в Consul, передавая свой адрес (url) для опроса состояния и статуса (health check) и ip адрес и порт на котором он расположен), также используются и как KV хранилище.

12. Система мониторинга, логирования (Monitoring) – система отображения графической ситуационной информации по работе системы в режиме реального времени, на базе Grafana, Prometheus, ELK.

Разработанная архитектура ориентирована на микросервисный подход, использует как потоковую обработку, так и пакетную обработку данных, обладает высокой гибкостью, что позволяет разработчикам обновлять компоненты системы, без отключений, обеспечивает более безопасный процесс развертывания и повышенное время безотказной работы.

V. ВЫВОД

Глубокая интеллектуализация процессов управления дорожным движением с учетом интеграции смежных приложений таких как – интеллектуальный мониторинг, рекомендательные сервисы и другие, становятся основой современных ИТС и умных городов. Поэтому разработка архитектуры ИТС является актуальной научной задачей. В данной работе в соответствие с пользовательскими требованиями и современными подходами мы предложили и разработали микросервисно-ориентированную архитектуру интеллектуальной системы управления дорожным движением. Разработанная архитектура согласуется с интеллектуальными моделями схожих функциональных систем [24–26], допускает интеграцию с приложениями Интернета вещей и может быть интегрирована в обобщенную структуру умного города [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Concilio G., Li C., Rausell P., Tosoni I. Cities as Enablers of Innovation. In: Concilio G., Tosoni I. (eds) // *Innovation Capacity and the City*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham. 2019. pp 43-60. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00123-0_3

[2] Goyal, S.K., Ghatge, S.V., Nema, P. et al. Understanding Urban Vehicular Pollution Problem Vis-a-Vis Ambient Air Quality – Case Study of a Megacity (Delhi, India) // *Environ Monit Assess* 119, 2006. pp 557–569. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9043-2>

[3] Seliverstov, S., & Seliverstov, Y. Developing principles for building transport networks of conflict-free continuous traffic. // *Transportation*

Research Procedia, 36, 2018. pp 689–699. [doi:10.1016/j.trpro.2018.12.122](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.122)

[4] uINRIX Americans will waste 2.8 trillion dollars on traffic by 2030 if gridlock persists. [Online]. Available: <http://www.inrix.com/press/americans-will-waste-2-8-trillion-on-traffic-by-2030-if-gridlock-persists/>

[5] Wan, K., Nguyen, N., & Alagar, V. Dependable Traffic Control Strategies for Urban and Freeway Networks. // *Mobile Networks and Applications*, 21(1), 2016. pp 98–126. [doi:10.1007/s11036-016-0681-0](https://doi.org/10.1007/s11036-016-0681-0)

[6] Glazener, A., & Khreis, H. Transforming Our Cities: Best Practices Towards Clean Air and Active Transportation // *Current Environmental Health Reports*. 2019. pp 1-16. [doi:10.1007/s40572-019-0228-1](https://doi.org/10.1007/s40572-019-0228-1)

[7] Chmiel, W., Dańda, J., Dziech, A. et al. INSIGMA: an intelligent transportation system for urban mobility enhancement // *Multimed Tools Appl* 75, pp 10529–10560. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-3367-5>

[8] Cheng C., Wu J. Intelligent Management and Control of Transportation Hubs Based on Big Data Technology. In: Xu Z., Parizi R., Hammoudeh M., Loyola-González O. (eds) *Cyber Security Intelligence and Analytics. CSIA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1147. Springer, 2020 pp 676-679. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43309-3_100

[9] Nowacki G. Development and Standardization of Intelligent Transport Systems // *TransNav, the Internat. J. on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 6. No. 3. 2012. pp. 403–411.

[10] Shaheen, S. A., & Finson, R. Intelligent Transportation Systems. // *Encyclopedia of Energy*, 2004. pp 487–496. [doi:10.1016/b0-12-176480-x/00191-1](https://doi.org/10.1016/b0-12-176480-x/00191-1)

[11] Jahnvi S., Prasanth G., Priyanka D., Sneeth A., Navya M. Intelligent Traffic Light Management System. In: Kiran Mai C., Kiranmayee B.V., Favorskaya M.N., Chandra Satapathy S., Raju K.S. (eds) // *Proceedings of International Conference on Advances in Computer Engineering and Communication Systems. Learning and Analytics in Intelligent Systems*, vol 20. Springer, Singapore. 2021. pp 489-498. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9293-5_45

[12] Shelke, M., Malhotra, A. & Mahalle, P.N. Fuzzy priority based intelligent traffic congestion control and emergency vehicle management using congestion-aware routing algorithm. // *J Ambient Intell Human Comput*. 2019. p 18. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01523-8>

[13] Hua X., Wang J., Lei L., Zhou B., Zhang X., Liu P. (2016) H-TDMS: A System for Traffic Big Data Management. In: Wu J., Li L. (eds) // *Advanced Computer Architecture. ACA 2016. Communications in Computer and Information Science*, vol 626. Springer, Singapore. 2016. pp 85-96. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2209-8_8

[14] Wan, K., Nguyen, N., & Alagar, V. Dependable Traffic Control Strategies for Urban and Freeway Networks. // *Mobile Networks and Applications*, 21(1), 2016. pp 98–126. [doi:10.1007/s11036-016-0681-0](https://doi.org/10.1007/s11036-016-0681-0)

[15] Maha Vishnu, V.C., Rajalakshmi, M. & Nedunchezian, R. Intelligent traffic video surveillance and accident detection system with dynamic traffic signal control. // *Cluster Comput* 21, 2018. pp 135–147. <https://doi.org/10.1007/s10586-017-0974-5>

[16] Żochowska, R., & Karoń, G. ITS Services Packages as a Tool for Managing Traffic Congestion in Cities // *Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives*, 2015, pp 81–103. [doi:10.1007/978-3-319-19150-8_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19150-8_3)

[17] Khanna A., Goyal R., Verma M., Joshi D. (2019) Intelligent Traffic Management System for Smart Cities. In: Singh P., Paprzycki M., Bhargava B., Chhabra J., Kaushal N., Kumar Y. (eds) *Futuristic Trends in Network and Communication Technologies. FTNCT 2018. Communications in Computer and Information Science*, vol 958. Springer, Singapore. 2019. pp 152-164. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3804-5_12

[18] Quang, T.M., Kamioka, E.: Granular Quantifying Traffic States Using Mobile Probes. // In: 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall, 2010, pp. 1–6.

[19] Gora, P., & Wasilewski, P. Adaptive System for Intelligent Traffic Management in Smart Cities // *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, pp 525–536. [doi:10.1007/978-3-319-09912-5_44](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09912-5_44)

- [20] Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A., Malygin I.G., Korolev O.A. Traffic safety evaluation in northwestern federal district using sentiment analysis of internet users' reviews // *Transportation Research Procedia. XIV International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (OTS-2020)*. 2020. pp 626-635.
- [21] Telang S., Chel A., Nemade A., Kaushik G. Intelligent Transport System for a Smart City // In: Tamane S.C., Dey N., Hassanien AE. (eds) *Security and Privacy Applications for Smart City Development. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 308. Springer, Cham. 2021, pp 171-187. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53149-2_9
- [22] Malygin I.G., Korolev O.A., Komashinskiy V. Introduction into cognitive multimodal transportation systems // *Transportation Research Procedia. XIV International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (OTS-2020)*. 2020. pp. 273-279. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.033>
- [23] Asaithambi, S. P. R., Venkatraman, R., & Venkatraman, S. MOBDA: Microservice-Oriented Big Data Architecture for Smart City Transport Systems // *Big Data and Cognitive Computing*, 4(3), 17. 2020, p 27. doi:10.3390/bdcc4030017
- [24] Amini, S., Gerostathopoulos, I., & Prehofer, C. Big data analytics architecture for real-time traffic control // *2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. 2017. pp 1-7. doi:10.1109/mtits.2017.8005605
- [25] Seo, S.B., Yadav, P. & Singh, D. LoRa based architecture for smart town traffic management system // *Multimed Tools Appl*. 2020. pp 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10091-5>
- [26] Zalila-Wenkstern R., Steel T., Leask G. A Self-organizing Architecture for Traffic Management. In: Weyns D., Malek S., de Lemos R., Andersson J. (eds) // *Self-Organizing Architectures. SOAR 2009. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6090. Springer, Berlin, 2010. pp 230-250. Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14412-7_11