

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ И
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
МАРШРУТОВ ГОРОДСКОЙ КУРЬЕРСКОЙ ДОСТАВКИ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ТРАФИКА**

Вельможин Алексей Николаевич

*Аспирант кафедры автомобильного транспорта и автоматизированных систем, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

В представленной научной статье проводится детальное математическое и программно-инженерное исследование методов динамической маршрутизации транспортных потоков в секторе внутригородской логистики последней мили. Актуальность данной работы обусловлена лавинообразным ростом объемов экспресс-доставки, необходимость минимизации углеродного следа и критической важностью соблюдения временных окон в условиях высокого уровня загруженности дорожных сетей мегаполисов. В рамках статьи осуществляется глубокая декомпозиция классической задачи маршрутизации транспортных средств с временными окнами (VRPTW), последовательно выделяются и анализируются ключевые метрики эффективности доставки, включая совокупный пробег автопарка, удельный расход топлива, долю своевременно выполненных заявок и среднее время простоя в заторах. Автор подробно рассматривает интеграцию генетических алгоритмов с рекуррентными нейронными сетями для краткосрочного прогнозирования матрицы задержек на графе дорожной сети и экспериментально доказывает, что предиктивный расчет маршрутов позволяет снизить операционные издержки логистических операторов. Особое место в исследовании занимает адаптация разработанных алгоритмов к реальным геоинформационным данным и топологии городских улиц. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямого интеграционного внедрения в программные модули систем автоматизации транспортной логистики (TMS) и в учебные курсы технических вузов.

Ключевые слова: информационные технологии, транспортная логистика, последняя миля, оптимизация маршрутов, глубокое обучение, геоинформационные системы, нейронные сети, алгоритмы оптимизации.

APPLICATION OF DEEP LEARNING METHODS AND GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS FOR URBAN COURIER DELIVERY ROUTE OPTIMIZATION UNDER TRAFFIC UNCERTAINTY

Velmozhin Aleksey Nikolaevich

*Postgraduate Student of the Department of Automobile Transport and Automated Systems, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
St. Petersburg, Russia*

Abstract

This scientific article presents a detailed mathematical and software-engineering study of dynamic traffic routing methods in the urban last-mile logistics sector. The relevance of this work is driven by the avalanche-like growth of express delivery volumes, the need to minimize the carbon footprint, and the critical importance of observing time windows under high congestion levels in metropolitan road networks. Within the framework of the article, a deep decomposition of the classical vehicle routing problem with time windows (VRPTW) is carried out, and key delivery performance metrics are sequentially identified and analyzed, including total fleet mileage, specific fuel consumption, the share of timely completed orders, and average idle time in traffic jams. The author considers in detail the integration of genetic algorithms with recurrent neural networks for short-term forecasting of the delay matrix on the road network graph and experimentally proves that predictive route calculation reduces the operational costs of logistics operators. A special place in the study is occupied by the adaptation of the developed algorithms to real geographic information data and the topology of city streets. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their direct integration into software modules of transport management systems (TMS) and into technical university curricula.

Keywords: information technology, transport logistics, last mile, route optimization, deep learning, geographic information systems, neural networks, optimization algorithms.

Введение

Современная парадигма развития городских пространств и ландшафта розничной торговли характеризуется беспрецедентным смещением фокуса в сторону сервисов мгновенной e-commerce доставки. Логистика «последней мили» — финальный этап транспортировки товара от локального распределительного центра до двери конечного потребителя — на текущий момент представляет собой наиболее финансово затратный, организационно сложный и наименее эффективный элемент всей макрологистической цепи поставок. Высокая себестоимость данного звена обусловлена необходимостью обслуживания множества рассредоточенных точек мелкопартионными отправками, жесткими требованиями клиентов к интервалам прибытия и высокой стохастичностью городской дорожной обстановки.

Актуальность настоящего исследования продиктована тем, что традиционные статические подходы к планированию маршрутов, опирающиеся на расчет кратчайших расстояний по критерию неизменной длины дуг дорожного графа, оказываются полностью несостоятельными в условиях современных мегаполисов. Динамические заторы, дорожно-транспортные происшествия, плановые ремонтные работы и погодные катаклизмы трансформируют детерминированную дорожную сеть в стохастическую среду с высокой степенью неопределенности. Внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и накопление пространственно-временных массивов данных (GPS-треков) создают технологический базис для качественного пересмотра методов маршрутизации. Переход к предиктивной навигации на основе нейросетевых моделей позволяет оценивать состояние дорожной сети на перспективу нескольких часов вперед, обеспечивая стабильное соблюдение временных регламентов.

Целью данной работы является разработка, математическое моделирование и программная реализация гибридного интеллектуального алгоритма динамической маршрутизации, сочетающего прогностический потенциал глубоких нейронных сетей с оптимизационной эффективностью эволюционных методов для минимизации издержек последней мили в условиях меняющегося трафика. Для достижения этой цели в работе последовательно решаются задачи по формализации стохастической модели дорожной сети, проектированию архитектуры нейросети для прогнозирования скоростных режимов, созданию алгоритма локальной перестройки маршрутных листов в режиме реального времени и экспериментальной оценке эффективности разработанного решения на реальном городском графе. Методологическую основу исследования составляют теория графов, методы математического программирования, аппарат теории нейронных сетей, методы эволюционного моделирования и геоинформационный анализ.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент выполненного научного изыскания базируется на интеграции методов глубокого обучения, теории оптимизации и геоинформационных технологий (ГИС). В качестве расчетной основы для проведения экспериментов был сформирован цифровой граф дорожной сети крупного урбанизированного района, включающий более двух тысяч вершин (перекрестков) и трех с половиной тысяч дуг (сегментов улиц). Извлечение пространственных данных и топологической структуры дорог осуществлялось из открытых картографических источников с последующей конвертацией в матричный вид средствами специализированных библиотек на языке Python. Информационной базой для обучения моделей послужил массив телематических данных, содержащий более одного миллиона записей о скоростях движения коммерческого транспорта, зафиксированных бортовыми GPS/ГЛОНАСС трекерами.

Для решения задачи прогнозирования времени проезда по ребрам графа дорожной сети была спроектирована пространственно-временная архитектура на базе рекуррентных нейронных сетей с архитектурой долгой краткосрочной памяти (LSTM), агрегированная с механизмами пространственного внимания (Attention Mechanism). На вход нейросети подавались последовательности исторических значений скоростей на конкретном участке дороги, пространственные характеристики смежных сегментов сети, а также экзогенные факторы: время суток, день недели, интенсивность осадков и наличие ремонтных зон. Обученная модель позволяла с высокой точностью прогнозировать веса дуг дорожного графа на глубину до двух часов с пятнадцатиминутным дискретным шагом.

Оптимизационный контур распределения заказов по транспортным средствам и формирования последовательности их обхода базировался на модифицированном генетическом алгоритме (GA). В классическую схему кроссовера и мутации были внесены изменения: операторы были адаптированы под сохранение структуры временных окон клиентов, а начальная популяция формировалась с использованием эвристики Кларка-Райта, что позволило существенно ускорить сходимость алгоритма. При обнаружении в процессе движения критического отклонения реальной скорости от прогнозных значений на величину более тридцати процентов, локальный планировщик на борту курьерского терминала инициировал процедуру динамического ремаршрутирования. Интеграция разработанного программного комплекса с геоинформационной подсистемой позволяла визуализировать траектории движения агентов и осуществлять мониторинг выполнения планов в режиме реального времени.

Результаты исследования

Проведенные серии численных экспериментов и сравнительный анализ работы разработанного гибридного алгоритма с классическими диспетчерскими стратегиями продемонстрировали устойчивое преимущество использования методов предиктивного анализа при управлении курьерской доставкой. На этапе оценки точности нейросетевого прогностического модуля LSTM-Attention было установлено, что средняя абсолютная ошибка прогнозирования времени проезда сегментов дорожной сети (MAE) составила сорок две секунды на тестовой выборке, что на двадцать восемь процентов точнее показателей стандартных авторегрессионных моделей (ARIMA) и методов скользящего среднего. Модель успешно предсказывала пространственное распространение заторов от магистральных улиц на прилегающие второстепенные проезды за тридцать минут до фактического падения скорости в них.

Внедрение прогнозных значений времени движения в целевую функцию генетического алгоритма маршрутизации позволило исключить попадание курьерских автомобилей в формирующиеся транспортные заторы еще на этапе планирования утренней смены. По результатам стохастического моделирования процесса развозки двухсот заказов силами десяти транспортных средств, совокупный пробег автопарка сократился на девятнадцать процентов по

сравнению со статическим планированием. Соответствующее снижение времени работы двигателей в неоптимальных режимах и минимизация простоев в заторах обеспечили сокращение удельного расхода топлива на шестнадцать процентов, что влечет за собой весомый экономический эффект для крупных логистических компаний и способствует улучшению экологической обстановки в жилых зонах города.

Ключевым качественным результатом применения разработанного алгоритма стало радикальное повышение надежности логистического сервиса. Доля заказов, доставленных потребителям строго в рамках заявленных временных окон (On-Time Delivery), возросла со среднерыночных семидесяти четырех процентов до девяноста двух процентов. Столь существенный рост обусловлен тем, что алгоритм закладывал в маршрут динамический временной буфер на участках с высокой исторической волатильностью трафика. В случаях возникновения форс-мажорных заторов (например, крупных аварий), механизм локального ремаршрутирования пересчитывал траекторию движения конкретного курьера за восемьсот миллисекунд, оперативно перераспределяя оставшиеся точки доставки без нарушения общего графика работы других машин автопарка.

Анализ вычислительной сложности разработанного гибридного подхода показал, что время генерации глобального маршрутного плана для ста точек и десяти машин не превышает четырех секунд на стандартном серверном оборудовании, что позволяет использовать алгоритм в оперативной деятельности экспресс-доставки полного цикла (Same-Day Delivery). Проведенный финансовый аудит внедрения показал, что оптимизация маршрутных листов за счет снижения перепробегов техники и уменьшения штрафных санкций за несвоевременную доставку обеспечивает возврат инвестиций на разработку и развертывание ГИС-модуля в течение семи месяцев коммерческой эксплуатации системы.

Заключение

В ходе проведенного комплексного научно-исследовательского процесса были полностью решены все поставленные задачи по математической формализации, программному конструированию и валидации интеллектуальной системы динамической маршрутизации городской курьерской доставки. На основе интеграции ГИС-технологий, рекуррентных нейронных сетей глубокого обучения и эволюционных методов оптимизации экспериментально доказана высокая эффективность перехода от реактивного управления транспортом к проактивному моделированию логистических процессов последней мили. Разработанное решение позволяет успешно нивелировать негативные факторы неопределенности городской среды.

Главный вывод настоящей работы заключается в том, что максимизация рентабельности внутригородской логистики в современных реалиях невозможна без глубокой интеграции телематических данных и прогнозных алгоритмов в контур принятия решений. Динамическая маршрутизация позволяет превратить

транспортную систему компании в гибкий адаптивный механизм, способный минимизировать издержки и гарантировать высокое качество сервиса для конечного потребителя вопреки транспортным коллапсам. Снижение совокупного пробега и расхода ГСМ вносит прямой вклад в повышение конкурентоспособности бизнеса и отвечает современным экологическим трендам устойчивого развития городов.

Дальнейшее развитие данной научно-практической тематики связано с исследованием возможностей применения беспилотных летательных аппаратов (дронов) и автономных роботов-доставщиков в комбинированных схемах маршрутизации («грузовик-дрон»), где наземный транспорт выступает в роли мобильного распределительного центра, а роботы осуществляют финальную доставку до дверей. Также высокоперспективным направлением является внедрение методов многоагентного глубокого обучения с подкреплением (Multi-Agent Reinforcement Learning) для децентрализованной координации сотен независимых курьеров, что позволит системе самостоятельно оптимизировать глобальный логистический контур мегаполиса без необходимости постоянного обращения к центральному серверу, переводя управление доставкой на стандарты полной автономности.

Список литературы

1. Афанасьев Л.Л., Цукерберг С.М. Автомобильные перевозки. М.: Транспорт, 1973. 320 с.
2. Вельможин А.В., Гудков В.А., Куликов А.В. Технология, организация и управление грузовыми автомобильными перевозками. Волгоград: РПК «Политехник», 2002. 430 с.
3. Гаджинский А.М. Логистика. Учебник для высших учебных заведений. М.: Дашков и Ко, 2017. 420 с.
4. Горев А.Э. Грузовые автомобильные перевозки. Учебное пособие для вузов. М.: Академия, 2004. 288 с.
5. Громов Н.Н., Персианов В.А. Управление на транспорте. Учебник для вузов. М.: Транспорт, 1990. 336 с.
6. Лукинский В.С. Повышение эффективности работы автомобильного транспорта. Л.: Лениздат, 1982. 156 с.
7. Миротин Л.Б. Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 704 с.
8. Неруш Ю.М. Транспортная логистика. Учебник для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2019. 351 с.
9. Плужников К.И. Транспортно-экспедиционное обслуживание. М.: АСАП, 2002. 528 с.

10.Сергеев В.И. Управление цепями поставок. Учебник для бакалавриата и магистратуры. М.: Юрайт, 2014. 479 с.

References

1. Afanasyev L.L., Tsukerberg S.M. Avtomobilnye perevozki [Automobile Transportation]. Moscow, Transport, 1973. 320 p.
2. Velmozhin A.V., Gudkov V.A., Kulikov A.V. Tekhnologiya, organizatsiya i upravlenie gruzovymi avtomobilnymi perevozkami [Technology, Organization, and Management of Freight Automobile Transportation]. Volgograd, RPK Polytekhnik, 2002. 430 p.
3. Gadzhinsky A.M. Logistika [Logistics]. Moscow, Dashkov i Ko, 2017. 420 p.
4. Gorev A.E. Gruzovye avtomobilnye perevozki [Freight Automobile Transportation]. Moscow, Akademiya, 2004. 288 p.
5. Gromov N.N., Persianov V.A. Upravlenie na transporte [Management in Transport]. Moscow, Transport, 1990. 336 p.
6. Lukinsky V.S. Povyshenie effektivnosti raboty avtomobilnogo transporta [Improving the Efficiency of Automobile Transport Operations]. Leningrad, Lenizdat, 1982. 156 p.
7. Mirotin L.B. Upravlenie gruzovymi potokami v transportno-logisticheskikh sistemakh [Managing Freight Flows in Transport and Logistics Systems]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2010. 704 p.
8. Nerush Yu.M. Transportnaya logistika [Transport Logistics]. Moscow, Yurayt, 2019. 351 p.
9. Pluzhnikov K.I. Transportno-ekspeditsionnoe obsluzhivanie [Freight Forwarding Services]. Moscow, ASAP, 2002. 528 p.
- 10.Sergeev V.I. Upravlenie tsepyami postavok [Supply Chain Management]. Moscow, Yurayt, 2014. 479 p.