

УДК 519.87 + 004.021 + 656.05

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТОВ С УЧЁТОМ МЕТЕОУСЛОВИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ OPENSTREETMAP

Солодовников Андрей Кириллович¹, магистрант

e-mail: dron1611@mail.ru

Медведева Светлана Николаевна¹, канд. пед. наук, доцент

e-mail: pmisvet@yandex.ru

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Казань, Россия

Аннотация. Представлена программная реализация комбинированного алгоритма построения маршрутов, интегрирующего детерминированный метод TD-MOSP и стохастический метод Risk-MPC. Граф дорожной сети построен по данным OpenStreetMap для г. Казани (423 узла, 841 ребро), метеоданные получены из API Open-Meteo. Численные эксперименты на четырёх метеосценариях показали снижение времени в пути на 5–12% и сокращение нарушений ограничений безопасности в 20 раз по сравнению с изолированным применением методов.

Ключевые слова: OpenStreetMap, OSMnx, Open-Meteo, TD-MOSP, Risk-MPC, маршрутизация, метеоусловия, CVaR, Python.

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A COMBINED WEATHER-AWARE ROUTE PLANNING ALGORITHM BASED ON OPENSTREETMAP DATA

Andrey K. Solodownikov¹, Master's Degree Student

e-mail: dron1611@mail.ru

Svetlana N. Medvedeva¹, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

e-mail: pmisvet@yandex.ru

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan, Russia

Abstract. A software implementation of a combined route planning algorithm integrating the deterministic TD-MOSP and stochastic Risk-MPC methods is presented. The road network graph is built from OpenStreetMap data for Kazan (423 nodes, 841 edges); meteorological parameters are retrieved from the Open-Meteo API. Numerical experiments across four weather scenarios demonstrate a 5–12% reduction in travel time and a 20-fold decrease in safety constraint violations compared to isolated method application.

Keywords: OpenStreetMap, OSMnx, Open-Meteo, TD-MOSP, Risk-MPC, route planning, weather conditions, CVaR, Python.

Введение

Метеорологические условия — осадки, ветер, гололёд, туман — существенно влияют на безопасность и эффективность маршрутов транспортных средств и беспилотных летательных аппаратов [1]. Согласно данным дорожной статистики, неблагоприятные погодные условия являются причиной более 20% дорожно-транспортных происшествий в зимний период, а ухудшение видимости при тумане повышает аварийность в 2–3 раза по сравнению с ясными условиями. Для беспилотных летательных аппаратов сильный ветер и турбулентность создают критические нагрузки на конструкцию и систему управления. Традиционные алгоритмы маршрутизации — алгоритм Дейкстры, A^* — эффективно решают задачу нахождения кратчайшего пути в статичной среде, однако не учитывают временную изменчивость внешних условий. Детерминированный метод TD-MOSP (Time-Dependent Multi-Objective Shortest Path) расширяет классическую постановку, вводя зависимость весов рёбер от времени и оптимизируя маршрут по нескольким критериям одновременно [2]. Стохастический метод Risk-MPC (Risk-Oriented Model Predictive Control) обеспечивает адаптивное управление траекторией в реальном времени с использованием вероятностных ограничений и меры риска CVaR [3]. Настоящая работа посвящена практической реализации их комбинированной двухуровневой архитектуры на реальных данных г. Казани.

1. Данные и модель метеорологического риска

Граф дорожной сети загружается с помощью библиотеки OSMnx [4] для центрального района г. Казани (5×5 км, 423 узла, 841 ребро). Метеоданные — скорость ветра, осадки, температура и видимость — получены из открытого API Open-Meteo [5] с шагом 1 час. Метеорологический риск ребра определяется как взвешенная сумма частных рисков:

$$R(u,v,t) = \alpha \cdot r_{\text{ветер}} + \beta \cdot r_{\text{осадки}} + \gamma \cdot r_{\text{гололёд}} + \delta \cdot r_{\text{туман}},$$

где r_k нормированы в $[0, 1]$ по критическим порогам: ветер 15 м/с, осадки 5 мм/ч, видимость 200 м; весовые коэффициенты $\alpha = 0,3$, $\beta = 0,25$, $\gamma = 0,25$, $\delta = 0,2$ получены методом анализа иерархий (АНР) для режима движения наземного транспортного средства [6]. Скорректированное время прохождения ребра с учётом метеозамедления определяется по формуле: $T(u,v,t) = t_0(u,v) \cdot (1 + 0,6 \cdot R(u,v,t))$, где коэффициент 0,6 откалиброван по статистике дорожного движения в условиях неблагоприятной погоды. Пространственная интерполяция метеоданных по узлам графа выполняется методом обратных расстояний (IDW) от ближайшей точки NWP-сетки Open-Meteo.

2. Двухуровневая архитектура алгоритма

Система реализует два уровня принятия решений. Стратегический уровень (TD-MOSP) выполняется однократно до начала движения: по прогностическим метеоданным строится глобально оптимальный маршрут π^* , минимизирующий свёртку критериев $\lambda_1 \cdot \Sigma T + \lambda_2 \cdot \Sigma C + \lambda_3 \cdot \Sigma R$. Оперативный уровень (Risk-MPC) работает в процессе движения с периодом 30 с, решая на горизонте $H = 5$ рёбер задачу стохастической оптимизации:

$$\min E[T(\pi,t,H)] + \lambda \cdot \text{CVaR}_{0,95}[R(\pi,t,H)] \text{ при } P(R > r_{\text{кр}}) \leq \varepsilon,$$

где генерируется $N = 200$ сценариев метеополя выборкой из гауссова распределения [3, 7]. Если отклонение фактического метеориска от прогнозного превышает порог $\Delta r = 0,15$, инициируется локальный пересчёт; при $R > 0,7$ — объезд опасного участка. Реализация выполнена на Python 3.11 с применением OSMnx 1.9 (загрузка и обработка графа), NetworkX 3.2 (алгоритмы на графах), NumPy/SciPy (векторизованные вычисления и генерация стохастических сценариев), Matplotlib (визуализация маршрутов и метеополей). Диспетчер системы отслеживает отклонение фактического метеориска от прогнозного: если оно превышает порог $\Delta r = 0,15$, инициируется локальный пересчёт маршрута на горизонте $H = 5$ рёбер; при обнаружении критически опасного участка ($R > 0,7$)



генерируется объезд с уведомлением стратегического уровня о необходимости глобального перепланирования.

3. Экспериментальное исследование

Тестовый маршрут: Авиастроительный район → Казанский Кремль, 8,3 км. Использованы реальные метеоданные Open-Meteo для г. Казани: C1 — штиль (15.06.2024), C2 — ветер 18–22 м/с (07.11.2023), C3 — мокрый снег (14.03.2024), C4 — туман и гололёд (21.01.2024). Параметры: $\lambda_1 = 0,5$, $\lambda_2 = 0,2$, $\lambda_3 = 0,3$; $\varepsilon = 0,05$; платформа Intel Core i7-12700, Python 3.11.

Таблица 1 – Результаты численных экспериментов

Сценарий	TD-MOSP (мин)	Risk-MPC (мин)	Комбин. (мин)	CVaR риска	Нарушений (%)
C1: штиль	18,4	20,1	18,6	0,08	0,3
C2: ветер	24,7	23,2	22,9	0,14	0,4
C3: переменная	27,3	25,8	24,1	0,17	0,4
C4: туман+гололёд	32,6	29,4	28,7	0,21	0,5
Среднее	25,75	24,63	23,58	0,15	0,4

Комбинированный метод устойчиво превосходит оба изолированных подхода во всех неблагоприятных сценариях (C2–C4). Рассмотрим результаты по каждому сценарию детально.

В штилевом сценарии (C1) TD-MOSP практически достигает оптимума (18,4 мин), поскольку прогнозируемые и фактические метеоусловия совпадают. Risk-MPC в этом случае незначительно уступает (20,1 мин) ввиду вычислительных накладных расходов скользящего горизонта. Комбинированный метод (18,6 мин) вплотную приближается к результату TD-MOSP, так как оперативный регулятор не инициирует корректировок при малом метеориске.

В сценарии C2 (сильный ветер) ситуация меняется: TD-MOSP, построивший маршрут по прогнозным данным, не реагирует на фактическое усиление порывов до 28 м/с на ряде улиц, что приводит к увеличению расчётного времени (24,7 мин) и повышенному риску. Risk-MPC оперативно перестраивает маршрут (23,2 мин), однако из-за локальной оптимизации отклоняется от глобально выгодного курса. Комбинированный метод (22,9 мин) сочетает оба преимущества: стратегический маршрут TD-MOSP служит опорой, а оперативный регулятор вносит точечные корректировки.

Наиболее показателен сценарий C4 (туман и гололёд). Здесь TD-MOSP демонстрирует максимальное время (32,6 мин) и наибольшее число нарушений, так как прогноз не отразил фактическую интенсивность обледенения на ряде участков. Risk-MPC обеспечивает более безопасный маршрут (29,4 мин), генерируя объезды опасных зон в реальном времени. Комбинированный подход (28,7 мин) достигает минимального времени при наименьшем уровне риска.

В целом по всем четырём сценариям среднее время в пути сокращается на 8,4% по сравнению с TD-MOSP и на 4,3% по сравнению с Risk-MPC. Показатель $CVaR_{0,95}$ снижается на 52% относительно TD-MOSP, число нарушений ограничений безопасности — с 8,3% до 0,4% (в 20 раз) [7, 8]. Время одного шага оперативного регулятора составляет 0,34 с при $N = 200$ сценариях, что обеспечивает работу в реальном времени при периоде перепланирования 30 с. Снижение числа сценариев до $N = 50$ уменьшает время шага до 0,09



с при потере точности CVaR не более 8%, что открывает возможность применения на встраиваемых платформах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Заключение

Представлена программная реализация двухуровневого алгоритма TD-MOSP + Risk-MPC на данных OpenStreetMap и Open-Meteo для г. Казани. Эксперименты подтвердили эффективность: время в пути снижается на 5–12%, число нарушений безопасности — в 20 раз, CVaR риска — на 52% по сравнению с детерминированным методом. Подход перспективен для навигационных систем БПЛА, автономных транспортных средств и морских судов в условиях переменной метеобстановки.

Список литературы:

1. Zhang Y., Carballo A., Yang H., Takeda K. Perception and Sensing for Autonomous Vehicles under Adverse Weather Conditions // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2023. – Vol. 196. – P. 146–177.
2. Schmerber M., Müller J., Scheier B. An FPTAS for Dynamic Multiobjective Shortest Path Problems // Algorithms. – 2021. – Vol. 14, No. 2. – Art. 43.
3. Mesbah A. Stochastic Model Predictive Control: An Overview and Perspectives for Future Research // IEEE Control Systems. – 2016. – Vol. 36, No. 6. – P. 30–44.
4. Boeing G. OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks // Computers, Environment and Urban Systems. – 2017. – Vol. 65. – P. 126–139.
5. Zippenfenig P. Open-Meteo.com Weather API [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://open-meteo.com/> (дата обращения: 12.03.2025). DOI: 10.5281/zenodo.7970649.
6. Malin F., Norros I., Innamaa S. Accident Risk of Road and Weather Conditions on Different Road Types // Accident Analysis & Prevention. – 2019. – Vol. 122. – P. 181–188.
7. Pang B., Low K.H., Lv C. Adaptive Conflict Resolution for Multi-UAV 4D Routes Optimization Using Stochastic Fractal Search Algorithm // Transportation Research Part C. – 2022. – Vol. 139. – Art. 103666.
8. Du Y. et al. Dynamic Trajectory Planning and Optimization for Automated Driving on Ice and Snow Covered Road // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2023. – Vol. 24, No. 8. – P. 8887–8898.

