УДК 656
DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.021

Численный метод решения задачи рационального размещения технических средств организации дорожного движения

М.А. Арутюнян✉

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме. В статье представлен один из полученных автором научных результатов в ходе проводимого диссертационного исследования – комбинированный численный метод для решения задачи рационального размещения технических средств организации дорожного движения, основанный на использовании метода градиентного спуска совместно с методом Ньютона-Рафсона. Поднята одна из актуальных проблем развития современного города, заключающаяся в формировании удобной и безопасной дорожно-транспортной инфраструктуры. По данным статистики, в Российской Федерации ежегодно почти 20 % от всего количества дорожно-транспортных происшествий приходится на наезды на пешеходов вне пешеходных переходов. В качестве одного из решений рассматриваемой проблемы предложена установка технических средств организации дорожного движения, в частности, пешеходных переходов на тех улицах, на которых они расположены либо нерационально, либо отсутствуют вовсе. Разработана математическая модель рационального размещения технических средств организации дорожного движения и предложен численный метод ее решения. Отмечено, что предложенный автором комбинированный численный метод позволяет быстро и точно находить оптимальные параметры для разработанной математической модели, что способствует улучшению ее производительности и точности. Обобщено, что совместное применение рассмотренных численных методов является достаточно эффективным способом решения поставленной задачи.

Ключевые слова: численные методы, метод градиентного спуска, метод Ньютона-Рафсона, технические средства организации дорожного движения, безопасность дорожного движения.

Для цитирования: Арутюнян М.А. Численный метод решения задачи рационального размещения технических средств организации дорожного движения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(3). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1556 DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.021

Numerical method for solving the problem of rational location of technical means of traffic management

M.A. Arutiunian✉

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, the Russian Federation

Abstract. The article presents one of the scientific results obtained by the author during his dissertation research – a combined numerical method for solving the problem of rational placement of technical means of traffic management, based on the use of the gradient descent method together with the Newton-Raphson method. One of the pressing problems of the development of a modern city is raised, which is the formation of a convenient and safe road and transport infrastructure. According to statistics, in the Russian Federation every year almost 20% of the total number of road accidents occur in collisions with pedestrians outside pedestrian crossings. As one of the solutions to the problem under consideration, it is proposed to install technical means of organizing traffic, in particular pedestrian crossings, on those streets on which they are either irrationally located or absent altogether. A mathematical model for the rational placement of technical means of traffic management has been developed and a numerical method for its solution has been proposed. It is noted that the combined numerical method proposed by the author allows one to quickly and accurately find the optimal parameters for the developed mathematical model, which helps to improve its performance and accuracy. It is generalized that the joint application of the considered numerical methods is a fairly effective way to solve the problem.

Keywords: numerical methods, gradient descent method, Newton-Raphson method, technical means of traffic management, road safety.

For citation: Arutiunian M.A. Numerical method for solving the problem of rational location of technical means of traffic management. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(3). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1556 DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.021 (In Russ.).

Введение

На сегодняшний день, повышение безопасности дорожного движения является одной из важнейших социально-экономических и демографических задач Российской Федерации. Высокая аварийность на автомобильном транспорте наносит большой ущерб как гражданам, так и обществу в целом. Обеспечение безопасности дорожного движения помогает решать большой комплекс социальных, экономических, демографических проблем, содействует региональному развитию и повышает качество жизни в целом.

В этой связи формирование удобной и безопасной дорожно-транспортной инфраструктуры является одним из актуальных вопросов развития современного города. Отдельно выделена важная проблема повышения безопасности пешеходного движения. Пересечение пешеходами дороги в неположенном месте ведет ко множеству дорожно-транспортных происшествий, увеличивая число жертв среди участников аварий вне транспортных средств, из-за чего решение данной проблемы весьма актуально.

Анализ практической реализации проблемы оценки и повышения пешеходной безопасности показал наличие ряда несоответствий между реальным уровнем практического состояния данной проблемы и требованиями к нему, среди которых важно выделить следующие:

– несоответствие существующих способов оценки и повышения безопасности пешеходного движения, где не учитывается один из таких важных показателей, как «точки притяжения», представляющий собой пункты сосредоточения интересов человека (пешехода), определяющие маршруты и цели их перемещений, реальным;

– несоответствие способов оценки и повышения безопасности пешеходного движения, где не учитывается психология пешеходов, являющихся основным побудителем для движения в какую-либо точку, реальным;

– несоответствие между проведенными в нормативных документах расстояниями между соседними наземными пешеходными переходами (указаны различные расстояния).

Установка технических средств организации дорожного движения (ТСОДД) на тех улицах, на которых они расположены либо нерационально, либо отсутствуют вовсе, может значительно улучшить дорожную обстановку.

С учетом вышеуказанного поставлена задача по определению рациональных мест для установки технических средств организации дорожного движения, в рамках которой разработана математическая модель рационального размещения технических средств организации дорожного движения и предложен численный метод ее решения. Следует также отметить, что реализация предложенного численного метода решения поставленной задачи выполнена с применением современных компьютерных технологий, в том числе методов машинного обучения.

Материалы и методы

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют традиционные и современные научные труды ведущих российских и иностранных научных работников в области численных методов, а также машинного обучения [3–10].

В качестве методов предполагаемого исследования выступают общенаучные методы, статистические способы сбора и обработки информации, индуктивный и дедуктивный методы, сравнительный и статистический анализ, методы машинного обучения.

В ходе проведенного анализа научных трудов по исследуемой тематике выявлено, что до настоящего времени задача по автоматизированному выбору рациональных мест для установки технических средств организации дорожного движения не решалась посредством предложенных автором численных методов, а также не реализовывалась посредством выбранных методов машинного обучения.

Разработанная математическая модель рационального размещения технических средств организации дорожного движения с целью снижения аварийности имеет следующий вид:

$$X^* = Arg\min_{(X)}\big(K(X)\big) = Arg\min_{(X)} \sum_{k=1}^{S}\left(K(s_k)\cdot\left(1-\left(\sum_{i=1}^{F} x_i^k\cdot\gamma\big(f_{i,}s_k\big)\right)\right)\right), \quad (1)$$

при ограничениях:

1) $\forall k \sum_{i=1}^{F} x_i^k \le 1$
2) $\forall i \sum_{k=1}^{S} x_i^k \le W_i$

где $S = \{s_1, \ldots, s_m\}$ – множество всех возможных мест размещения технических средств организации дорожного движения на рассматриваемом участке; $F = \{f_1, \ldots, f_h\}$ – множество видов технических средств организации дорожного движения; $K(X)$ – оценка уровня аварийности на рассматриваемом участке при учете всех видов технических средств организации дорожного движения; $K(s_k)$ – величина уровня аварийности на k-ом возможном месте размещения; x_i^k – бинарная переменная, указывающая на наличие (1) или отсутствие (0) технического средства организации дорожного движения i-го вида на k-ом возможном месте размещения; $\gamma\big(f_{i,}s_k\big)$ – оценка влияния технического средства организации дорожного движения i-го вида на *k-ом* возможном месте размещения на изменение уровня аварийности; W_i – максимальное количество установок технических средств организации дорожного движения i-го вида.

Следует отметить, что в данном исследовании в качестве технического средства организации дорожного движения, требующего нахождение рационального места установки, выбран 1 вид ТСОДД РС – дорожная разметка 1.14.1, 1.14.2, другими словами, пешеходный переход.

Анализ модели (1) показал, что она относится к классу задач линейного булева программирования. Известные на сегодняшний день численные методы, обеспечивающие получение точного решения подобных задач, представляют собой перебор в явном или неявном виде всех ограниченных наложенными условиями вариантов. Заранее оценить общее количество рассматриваемых вариантов и, как следствие, время, затраченное на перебор, не представляется возможным. В связи с этим для указанных выше размерностей получение точного решения за приемлемое время является проблематичным. Ввиду этого предлагается снизить вычислительную сложность вычислительного метода посредством совместного использования методов градиентного спуска и метода Ньютона-Рафсона.

Результаты

Для решения поставленной задачи рационального размещения технических средств организации дорожного движения автором данной статьи предложено использовать комбинированный численный метод, основанный на использовании метода градиентного спуска совместно с методом Ньютона-Рафсона.

Метод Градиентного спуска используется для минимизации функции потерь $K(X)$. На каждом шаге обновление параметров происходит по следующей формуле:

$$X_{k+1} = X_k - \alpha \nabla K(X_k), \quad (2)$$

где X_k – текущее значение параметров; α – скорость обучения; $\nabla K(X_k)$ – градиент функции потерь в точке X_k.

Метод Ньютона-Рафсона использует как первую, так и вторую производные функции для более точного нахождения минимума. Обновление параметров происходит по следующей формуле:

$$X_{k+1} = X_k - H^{-1}(X_k) \nabla K(X_k), \quad (3)$$

где $H(X_k)$ – гессиан функции потерь (матрица вторых производных) в точке X_k.

Комбинированный метод объединяет преимущества метода градиентного спуска и метода Ньютона-Рафсона. На начальных этапах используется метод градиентного спуска для быстрой оптимизации, а затем метод Ньютона-Рафсона для достижения высокой точности. Обновление параметров происходит по следующей формуле:

$$X_{k+1} = X_k - (\beta H^{-1}(X_k) + (1-\beta) I) \nabla K(X_k), \quad (4)$$

где β – параметр, определяющий вклад метода градиентного спуска и Ньютона-Рафсона; I – единичная матрица.

С целью демонстрации эффективности применения предложенного комбинированного численного метода для решения поставленной задачи проведены вычислительные эксперименты.

На Рисунке 1 продемонстрирована визуализация комбинированного метода в сравнении с методом градиентного спуска и метода Ньютона-Рафсона.

Сравнение рассматриваемых методов произведено по следующим критериям:

– скорость сходимости (количество итераций, необходимых для достижения определенной точности);

– точность результата (разница между найденным решением и известным оптимальным решением);

– устойчивость к начальным условиям (вариативность результатов при изменении начальных точек);

– вычислительная сложность (количество вычислительных операций, необходимых для выполнения алгоритма);

– простота реализации (оценка сложности кода и требований к ресурсам).

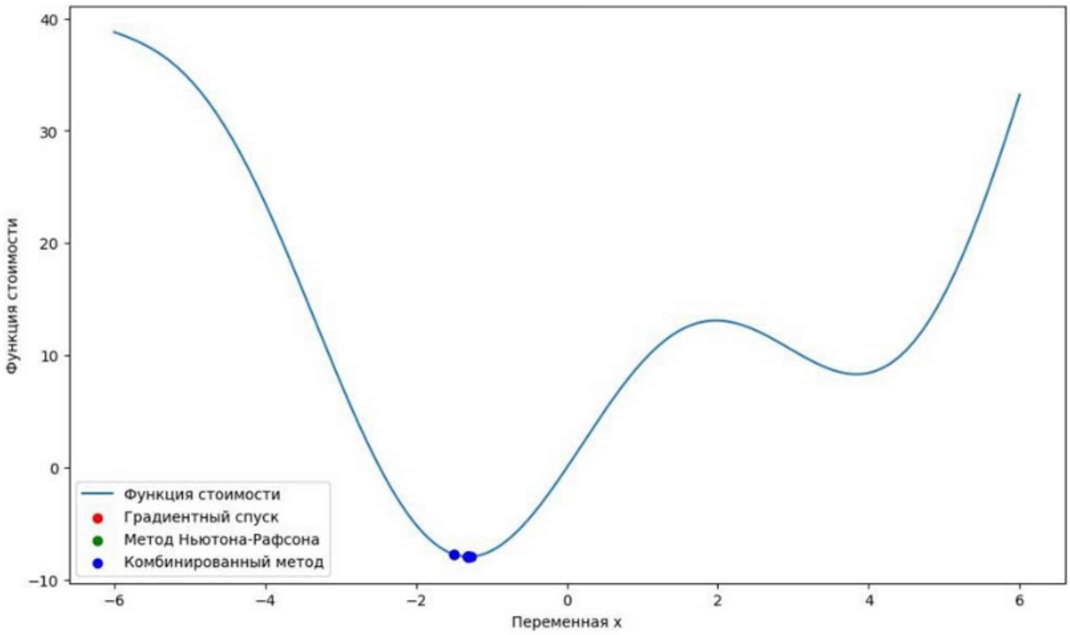

Рисунок 1 – Визуализация методов
Figure 1 – Visualization of methods

Как видно из Рисунка 1, посредством предложенного комбинированного метода нахождение минимума функции производится быстрее и точнее.

Таблица 1 – Сравнение методов
Table 1 – Comparison of methods

Критерий	Комбинированный метод	Метод Градиентного спуска	Метод Ньютона-Рафсона
Скорость сходимости	5 итераций	10 итераций	7 итераций
Точность результата	0,001% отклонение	0,01% отклонение	0,005% отклонение
Устойчивость к начальным условиям	Высокая	Средняя	Низкая
Вычислительная сложность	Низкая	Высокая	Средняя
Простота реализации	Простая	Сложная	Средняя

По полученным результатам, представленным на Рисунке 1 и в Таблице 1, можно сделать следующие основные выводы относительно предложенного комбинированного метода решения задачи:

– метод градиентного спуска обеспечивает быструю начальную оптимизацию, что позволяет быстро приблизиться к минимуму функции потерь;

– метод Ньютона-Рафсона использует информацию о второй производной, что позволяет достичь высокой точности вблизи минимума;

– комбинированный метод снижает вероятность застревания в локальных минимумах и обеспечивает более стабильную сходимость.

Следовательно, совместное применение выбранных методов позволяет объединить преимущества обоих методов и минимизировать их недостатки, что, в свою очередь, позволяет снизить вычислительную сложность, улучшить производительность и точность разработанной математической модели.

Далее описан алгоритм численного метода решения задачи рационального размещения технических средств организации дорожного движения, реализуемый посредством современных компьютерных технологий, в том числе методов машинного обучения.

1. Инициализация:

– определяется количество сценариев N;

– определяется количество ТСОДД;

– задается длина рассматриваемого участка дороги L;

– задается количество секторов S, на которые разделен рассматриваемый участок;

– задается длина каждого сектора L_s.

2. Генерация случайных сценариев.

Для каждого сценария i (где $i = 1, 2, \ldots, N$) генерируется случайный вектор X_i, описывающий размещение ТСОДД.

3. Обучение модели.

Используется алгоритм XGBoost для обучения модели на данных о местах размещениях ТСОДД, видах ТСОДД, уровне аварийности, количестве ДТП, точках притяжения.

4. Оценка уровня аварийности.

Для каждого сценария i вычисляется уровень аварийности $K(X_i)$ с использованием обученной модели.

5. Оптимизация.

Используется комбинированный численный метод, включающий метод градиентного спуска и метод Ньютона-Рафсона для нахождения рационального размещения ТСОДД:

– метод градиентного спуска используется для быстрого нахождения области минимума;

– метод Ньютона-Рафсона используется для точного нахождения минимума.

6. Анализ результатов:

– находится сценарий с минимальным уровнем аварийности: X^*;

– определяем сектор для установки ТСОДД (в данном случае пешеходного перехода) на основе оптимального сценария.

Итак, в ходе проведенного вычислительного эксперимента получены следующие результаты: на рассматриваемом участке дороги минимальный уровень аварийности достигается за счет установки ТСОДД (в данном случае, пешеходного перехода) на секторе 7, при котором аварийность на всем рассматриваемом участке снижается на 3 %, что наглядно продемонстрировано на Рисунке 2.

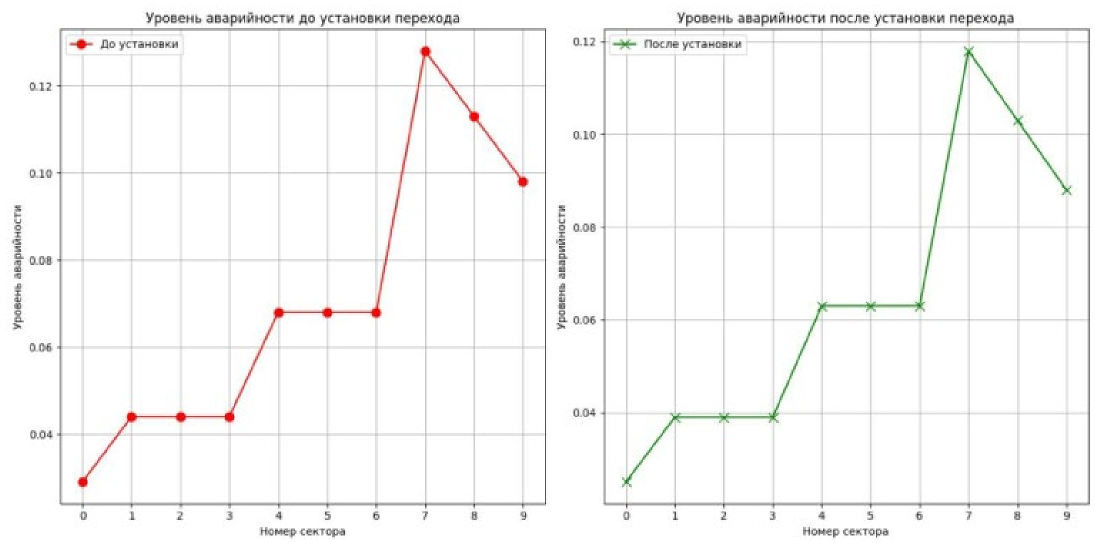

Рисунок 2 – Визуализация уровня аварийности по секторам до и после установки пешеходного перехода
Figure 2 – Visualization of the accident rate by sector before and after the installation of a pedestrian crossing

На графиках, приведенных на Рисунке 2, наглядно можно увидеть, как меняется уровень аварийности на рассматриваемом участке дороги за счет установки пешеходного перехода на секторе 7.

Таким образом, автором разработана математическая модель рационального размещения технических средств организации дорожного движения и предложен комбинированный численный метод ее решения.

Заключение

В настоящей статье рассмотрена одна из актуальных проблем развития современного города, заключающаяся в формировании удобной и безопасной дорожно-транспортной инфраструктуры. В качестве одного из решений рассматриваемой проблемы предложена установка технических средств организации дорожного движения, в частности, пешеходных переходов на тех улицах, на которых они расположены либо нерационально, либо отсутствуют вовсе. Разработана математическая модель рационального размещения технических средств организации дорожного движения и предложен комбинированный численный метод ее решения, основанный на использовании метода градиентного спуска совместно с методом Ньютона-Рафсона. Предложенный автором численный метод позволяет объединить преимущества обоих методов и минимизировать их недостатки. Представленный численный метод позволяет быстро и точно находить оптимальные параметры для разработанной математической модели, что способствует улучшению ее производительности и точности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Арутюнян М.А. Разработка алгоритмического аппарата по обеспечению безопасности дорожного движения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(3). https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.013

Arutiunian M.A. Development of an algorithmic apparatus for ensuring road safety. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). (In Russ.). https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.013

2. Арутюнян М.А. Математическая модель оценки вероятности пересечения улицы пешеходами в некотором случайном месте. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(4). https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.036

   Arutiunian M.A. Mathematical model for estimating the probability of pedestrians crossing a street at some random location. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(4). (In Russ.). https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.036
3. Ilyushin Yu.V., Pervukhin D.A., Klavdiev A.A., Afanaseva O.V., Kolesnichenko S.V. Designing of Distributed Control System with Pulse Control. *Middle East Journal of Scientific Research*. 2014;21(3):436–439.
4. Schapire R.E., Freund Y. *Boosting: Foundations and Algorithms.* Cambridge: The MIT Press; 2012. 526 p.
5. Friedman J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics.* 2001;29(5):1189–1232. https://doi.org/10.1214/aos/1013203451
6. Friedman J.H. Stochastic gradient boosting. *Computational Statistics & Data Analysis.* 2002;38(4):367–378. https://doi.org/10.1016/S0167-9473(01)00065-2
7. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In*: KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 13–17 August 2016, San Francisco, California, USA*. New York: Association for Computing Machinery; 2016. pp. 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785
8. Chen T., Singh S., Taskar B., Guestrin C. Efficient second-order gradient boosting for conditional random fields. In: *Proceeding of the 18th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS'15), 9–12 May 2015, San Diego, California, USA*. 2015. pp. 147–155.
9. Nocedal J., Wright S.J. *Numerical Optimization*. New York: Springer; 2006. 664 p. https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5
10. Ye J., Chow J.-H., Chen J., Zheng Z. Stochastic gradient boosted distributed decision trees. In: *CIKM '09: Proceedings of the 18th ACM conference on Information and knowledge management, 2–6 November 2009, Hong Kong, China.* New York: Association for Computing Machinery; 2009. pp. 2061–2064. https://doi.org/10.1145/1645953.1646301

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Арутюнян Меланя Андраниковна, аспирант, ассистент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: melanya.arutyunyan@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7395-9069

Melania A. Arutiunian, Postgraduate Student, Assistant Lecturer at the Department of Mathematical Modeling and Applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 17.04.2024; одобрена после рецензирования 03.09.2024; принята к публикации 05.09.2024.

The article was submitted 17.04.2024; approved after reviewing 03.09.2024; accepted for publication 05.09.2024.