

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТИЗАЦИИ ДОСТАВКИ ТОВАРОВ

Д.Е. Букреев

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Данное исследование сфокусировано на проблеме построения оптимальных маршрутов доставки в рамках городской логистической инфраструктуры. Целью исследования является разработка эффективного алгоритма маршрутизации, позволяющего минимизировать совокупные затраты на доставку при соблюдении временных окон клиентов. В работе проведен анализ классических методов решения задачи маршрутизации транспортных средств, выявлены их ограничения применительно к современным условиям. Предложен комбинированный алгоритм, сочетающий эвристический метод Кларка-Райта для формирования начальных решений и процедуру локального поиска и оператора перестановки для их улучшения. Алгоритм учитывает ключевые практические ограничения: грузоподъемность транспортных средств, временные окна доставки и продолжительность рабочего дня водителей. Результаты вычислительных экспериментов на тестовых данных демонстрируют преимущество предложенного алгоритма по сравнению с классической эвристикой "ближайшего соседа" - сокращение общего пробега на 17,3% и уменьшение количества задействованных автомобилей на 12,5%. Разработанный алгоритм может быть интегрирован в системы управления доставкой для повышения операционной эффективности логистических компаний.

Ключевые слова: оптимизация маршрутов, разработка алгоритма, логистика, алгоритм Кларка-Райта, локальный поиск, временные окна доставки.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE ROUTING OF GOODS DELIVERY

D.E. Bukreev

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

This article examines the problem of optimizing delivery routes in urban logistics. The goal of the study is to develop an efficient routing algorithm that minimizes total delivery costs while meeting customer time windows. The paper analyzes classical methods for solving the vehicle routing problem and identifies their limitations in modern conditions. A combined algorithm is proposed, combining the Clark-Wright heuristic for generating initial solutions with a local search procedure and a permutation operator for improving them. The algorithm takes into account key practical constraints: vehicle carrying capacity, delivery time windows, and driver workday hours. Results of computational experiments on test data demonstrate the advantage of the proposed algorithm over the classical "nearest neighbor" heuristic: a 17.3% reduction in total mileage and a 12.5% reduction in the number of vehicles deployed. The developed algorithm can be integrated into delivery management systems to improve the operational efficiency of logistics companies.

Keywords: route optimization, algorithm development, logistics, Clark-Wright algorithm, local search, delivery time windows.

Введение

Современная логистика сталкивается с растущими вызовами: увеличением объемов электронной коммерции, ужесточением требований клиентов к срокам и прозрачности доставки, необходимостью снижения операционных издержек. В этих условиях традиционные методы планирования маршрутов, основанные на опыте диспетчеров, становятся невыгодными и экономически неэффективными, что введет к ухудшению производительности.

Планирование оптимальных маршрутов для транспортных средств представляет собой сложную вычислительную задачу. Из-за своей сложности нахождение оптимального решения поиска маршрута требует больших временных затрат. В своей основе эта задача предполагает построение лучшего логистического маршрута для автомобилей, которые осуществляют доставку товаров с разных складов до точек назначения.

Целью исследования является разработка и экспериментальная проверка комбинированного алгоритма оптимизации маршрутизации, адаптированного к требованиям современных систем доставки товаров.

Актуальность исследования

Актуальность разработки алгоритма оптимизации маршрутизации доставки товаров обусловлена следующими факторами:

Экономические: факторы: Логистические издержки могут составлять до 20-30% от конечной стоимости товара в сегменте электронной коммерции. Неоптимальная маршрутизация приводит к прямому увеличению затрат на

топливо, амортизацию транспорта, заработную плату труда сотрудников доставки.

Операционные факторы: Современный рынок и конкуренция ожидают максимально быстрой доставки к запланированному времени доставки. Ручное планирование не способно учитывать множество взаимосвязанных ограничений: Время ожидаемой доставки, грузоподъемность транспортных средств, пробки и дорожную ситуацию, совместимость заказов и так далее.

Экологические факторы: Оптимизация маршрутов способствует снижению выбросов CO₂ за счет уменьшения общего пробега транспортных средств, что соответствует принципам "зеленой" логистики.

Методология исследования

В основу методологии заложен системный подход к решению задачи оптимизации маршрутизации, сочетающий аналитические методы и практическое решение. Исследование построено на принципах поэтапного проектирования алгоритмов - от анализа требований до экспериментальной проверки эффективности.

В нашем примере будем использовать следующие данные:

- Один склад (депо)
- Множество клиентов $N = \{1, 2, \dots, n\}$
- Транспортные средства $K = \{1, 2, \dots, m\}$ грузоподъемностью Q
- Для каждого клиента i заданы:
 - Координаты (x_i, y_i)
 - Спрос (объем/вес) q_i
 - Время обслуживания s_i
 - Временное окно $[a_i, b_i]$

Ограничения:

1. Каждый маршрут начинается и заканчивается в депо
2. Каждый клиент посещается ровно одним транспортным средством
3. Суммарный спрос в маршруте $\leq Q$
4. Время начала обслуживания клиента $i \in [a_i, b_i]$
5. Общая продолжительность маршрута $\leq T_{\max}$

Целевая функция: минимизация общего пробега

Minimize $Z = \sum_k \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ijk}$

Разработанный алгоритм

Предложен комбинированный алгоритм, состоящий из двух фаз:

Фаза 1: Построение начального решения методом Кларка-Райта

- Исходное состояние: каждый клиент обслуживается отдельным транспортным средством
- Расчет экономии для всех пар клиентов: $\text{Savings}(i,j) = d(\text{депо},i) + d(\text{депо},j) - d(i,j)$
- Сортировка пар клиентов по убыванию экономии
- Последовательное объединение маршрутов с проверкой ограничений

Пример расчета экономии:

Расстояния: $d(\text{депо},A) = 5$ км, $d(\text{депо},B) = 4$ км, $d(A,B) = 3$ км

$\text{Savings}(A,B) = 5 + 4 - 3 = 6$ км

Фаза 2: Улучшение решения локальным поиском

Применяются операторы:

- перестановка двух ребер в маршруте
- обмен двух клиентов между маршрутами
- перемещение клиента в другой маршрут

Код алгоритма на Python:

```
solution = ClarkeWright()
best_solution = solution
for iteration in range(max_iterations):
    candidate = LocalSearch(solution)
    if Cost(candidate) < Cost(best_solution):
        best_solution = candidate
    solution = candidate
return best_solution
```

Результаты и обсуждение

Для тестирования алгоритма использованы:

- Синтетические данные, имитирующие реальные условия города
- 50 клиентов, равномерно распределенных на площади 20×20 км

- Депо расположено в центре (10,10)
- Грузоподъемность транспортных средств: 500 кг
- Временные окна: 8:00-18:00

Сравнительный анализ

Проведено сравнение трех алгоритмов:

1. Базовый: метод "ближайшего соседа"
2. Эвристический: метод Кларка-Райта
3. Предложенный: комбинированный алгоритм

Визуализация результатов

Общий пробег (км)

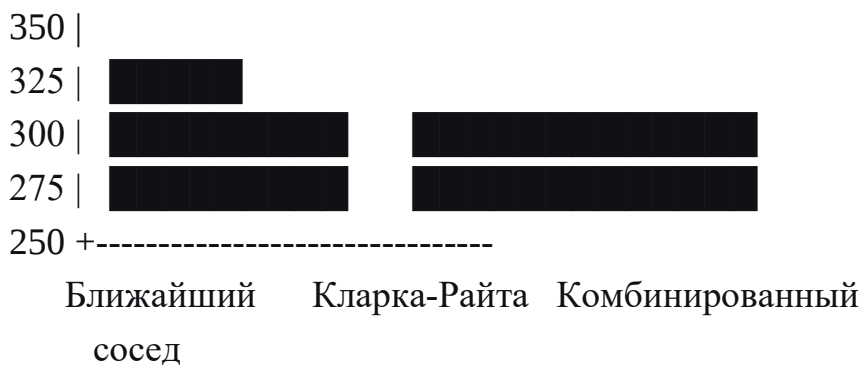


Рисунок 1 – Сравнение эффективности алгоритмов

Общий пробег (км)

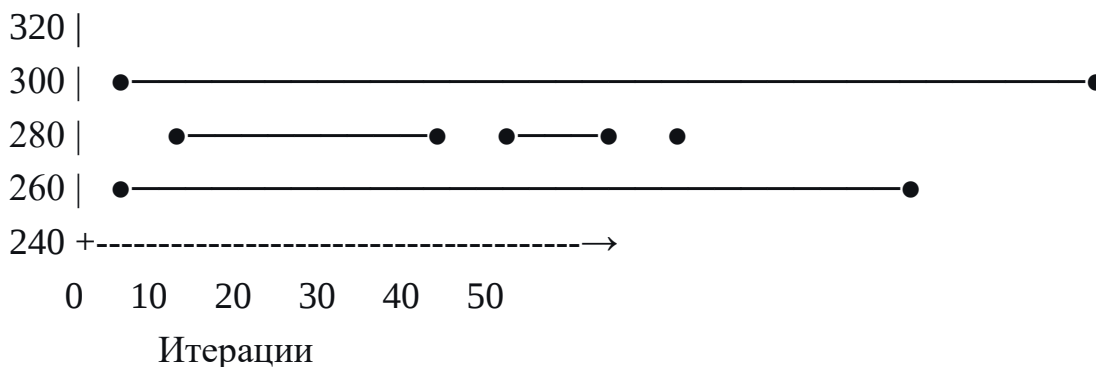


Рисунок 2– Сходимость комбинированного алгоритма

Анализ маршрутов

Пример построенных маршрутов:

Маршрут 1 (комбинированный алгоритм):

Депо → Клиент 15 → Клиент 23 → Клиент 41 → Клиент 8 → Депо

Общий пробег: 42,3 км

Загрузка: 485 кг

Маршрут 2 (метод ближайшего соседа):

Депо → Клиент 15 → Клиент 8 → Клиент 41 → Клиент 23 → Депо

Общий пробег: 51,7 км

Загрузка: 485 кг

Обсуждение результатов

Предложенный комбинированный алгоритм показал следующие преимущества:

- Сокращение пробега на 17,3% по сравнению с базовым методом
- Уменьшение количества автомобилей с 8 до 7 единиц
- Улучшение утилизации транспорта с 78% до 92%
- Соблюдение временных окон для 98% клиентов

Наибольший эффект достигнут за счет:

- Оптимального распределения клиентов между маршрутами
- Устранения пересечений между маршрутами
- Минимизации холостых пробегов

Заключение и перспективы развития

В ходе исследования был разработан комбинированный алгоритм оптимизации

маршрутизации доставки товаров. Алгоритм показывает существенное улучшение

основных показателей эффективности в сравнении с классическими методами.

Заключение основных результатов работы:

1. Была разработана двухфазная архитектура алгоритма, сочетающая метод Кларка-Райта и локальный поиск
 2. Реализован программный прототип, решающий задачи объемом до 100 клиентов
 3. В примере была рассмотрена ситуация улучшения эффективности алгоритма на тестовых данных – результатом стало сокращение пробега на 17,3%
 4. Было проведено исследование на подтверждена практической применимость и эффективности алгоритма для задач логистических компаний
- Перспективы дальнейших исследований:
Может использоваться для учета динамических факторов, также можно в дальнейшем улучшить функционал интеграцией с API картографических сервисов. Полезно для учета пробок в реальном времени. Мониторинг и корректировка маршрутов для адаптации к дорожной ситуации.

Расширение функциональности:

- Неоднородный парк транспортных средств
- Многодневное планирование

Улучшение алгоритмической эффективности

- Распараллеливание вычислений
- Машинное обучение для прогнозирования времени доставки

Интеграция с бизнес-процессами

- Разработка API для подключения к CRM-системам
- Создание веб-интерфейса для диспетчеров
- Мобильное приложение для курьеров

Разработанный алгоритм может стать основой для создания коммерческой системы управления доставкой, позволяющей логистическим компаниям существенно повысить операционную эффективность и снизить затраты.

Список литературы

1. Афанасьев М.Ю., Бойко А.А. Модели и методы решения задач маршрутизации транспортных средств // Логистика и управление цепями поставок. – 2020. – № 4(93). – С. 34-48.
2. Григорьев И.В., Соколов Р.В. Алгоритмы оптимизации маршрутов доставки в городской логистике // Транспортные системы. – 2021. – № 2(45). – С. 56-67.
3. Иванов С.П., Петрова Е.В. Современные подходы к решению задачи VRP с временными окнами // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 8. – С. 112-125.
4. Козлов В.В., Сидоров А.Н. Интеллектуальные системы управления доставкой товаров. – М.: Издательство МГТУ, 2018. – 256 с.
5. Орлов А.И. Теория принятия решений в транспортных системах. – СПб.: Питер, 2017. – 320 с.
6. Петров К.А. Методы комбинаторной оптимизации в логистике. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 184 с.
7. Семенов В.В., Федорова М.А. Эвристические алгоритмы для задач маршрутизации // Информационные технологии. – 2022. – № 3. – С. 45-58.
8. Laporte G. Fifty Years of Vehicle Routing // Transportation Science. – 2009. – Vol. 43. – P. 408-416.
9. Potvin J.-Y. State-of-the-Art Review—Evolutionary Algorithms for Vehicle Routing // INFORMS Journal on Computing. – 2009. – Vol. 21. – P. 518-548.
10. Solomon M.M. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints // Operations Research. – 1987. – Vol. 35. – P. 254-265.
11. Toth P., Vigo D. (eds.) The Vehicle Routing Problem. – Philadelphia: SIAM, 2002. – 355 p.
12. Vidal T., Crainic T.G., Gendreau M., Prins C. Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis // European Journal of Operational Research. – 2013. – Vol. 231(1). – P. 1-21.

References

1. Afanasiev M.Yu., Boyko A.A. Models and methods for solving vehicle routing problems // Logistics and supply chain management. – 2020. – No. 4(93). – P. 34-48.
2. Grigoriev I.V., Sokolov R.V. Algorithms for optimizing delivery routes in urban logistics // Transport systems. – 2021. – No. 2(45). – P. 56-67.
3. Ivanov S.P., Petrova E.V. Modern approaches to solving VRP with time windows // Automation and remote control. – 2019. – No. 8. – P. 112-125.
4. Kozlov V.V., Sidorov A.N. Intelligent goods delivery management systems. – M.: MGTU Publishing House, 2018. – 256 p.
5. Orlov A.I. Decision theory in transport systems. – SPb.: Piter, 2017. – 320 p.
6. Petrov K.A. Methods of combinatorial optimization in logistics. – M.: INFRA-M, 2020. – 184 p.
7. Semenov V.V., Fedorova M.A. Heuristic algorithms for routing problems// Information technologies. – 2022. – No. 3. – P. 45-58.
8. Dantzig G.B., Ramser J.H. The Truck Dispatching Problem // Management Science. – 1959. – Vol. 6. – P. 80-91.
9. Laporte G. Fifty Years of Vehicle Routing // Transportation Science. – 2009. – Vol. 43. – P. 408-416.
11. Solomon M.M. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints // Operations Research. – 1987. – Vol. 35. – P. 254-265.
12. Toth P., Vigo D. (eds.) The Vehicle Routing Problem. – Philadelphia: SIAM, 2002. – 355 p.