

УДК 519.872.6:004.023

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ВРЕМЕННЫМИ ОКНАМИ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ

Л. Р. Гвоздев, Т. А. Медведева

Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Рассматривается задача нахождения оптимального маршрута транспортных средств с временными окнами и ее математическая постановка. Описываются особенности реализации модифицированного алгоритма муравьиных колоний для решения поставленной задачи маршрутизации. Приведено описание нескольких наборов задач для тестирования реализованного программного средства. Представлены результаты вычислительных экспериментов и их сравнение с лучшими найденными решениями.

Ключевые слова: маршруты транспортных средств, временные окна, объем доставки, ориентированный граф, алгоритм муравьиных колоний, уровень феромона, оптимальное решение.

SOLVING THE PROBLEM OF VEHICLES ROUTING WITH TIME WINDOWS USING THE ANT COLONY ALGORITHM

L. R. Gvozdev, T. A. Medvedeva

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

This article considers the problem of finding the optimal route of vehicles with time windows and its mathematical formulation. The features of the implementation of the modified ant colony algorithm for solving the problem of routing are described. The description of several sets of tasks for testing the implemented software is given. The results of computational experiments and their comparison with the best found solutions are presented.

Keywords: vehicle routes, time windows, delivery capacity, directed graph, ant colony algorithm, amount of pheromone, optimal solution.

Введение. Одной из актуальных задач транспортно-логистической сферы является планирование маршрутов, которое позволяет сократить парк транспортных средств и расходов на их обслуживание, не снижая уровень клиентского сервиса. Проблема маршрутизации транспорта (vehicle routing problem — VRP) относится к задачам логистики [1]. Цель решения VRP — планирование маршрутов для одного или нескольких транспортных средств, которые считаются оптимальными по заданным критериям. В настоящее время вопрос оптимизации транспортной логистики актуален для большинства предприятий. От решения этой задачи зависит формирование цены на товар, причем расходы на доставку товара бывают соизмеримы с его стоимостью. Эффективное планирование маршрутов может существенно уменьшить экономические затраты на транспортировку.

Основная часть. Маршрутизация транспортных средств с временными окнами — задача коммивояжера с такими дополнительными условиями, как:

- добавление временного окна (отрезка времени), в течение которого груз должен быть доставлен;
- максимальная вместимость транспорта;
- время обслуживания клиента;
- ограниченное количество транспортных средств.

Постановка задачи. Транспортное средство (ТС) начинает движение от стоянки (депо) и должно вернуться после завершения маршрута не позже указанного времени. Каждого клиента нужно обслужить ровно один раз. Если транспортное средство прибыло раньше или позже временного окна, то накладывается штраф за каждую единицу времени. Объем доставок на маршруте не должен превышать вместимость ТС. Число использованных на маршрутах транспортных средств не должно превышать заранее заданного количества.

Математическая постановка задачи. Маршрут отдельного ТС моделируется с помощью взвешенного ориентированного графа. Для решения поставленной задачи необходимо минимизировать целевую функцию, представленную в виде:

$$Z = \min \sum_{k=1}^L \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \text{cost}(i, j) \cdot X_{k,i,j} + \sum_{i=1}^N (S_i \cdot \text{eaf} + E_i \cdot \text{laf}). \quad (1)$$

$$X_{k,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } (i, j) \in T_k \\ 0, & \text{если } (i, j) \notin T_k \end{cases} \quad (2)$$

$$S_i = \begin{cases} TS_i - t_i, & \text{если } TS_i - t_i > 0 \\ 0, & \text{если } TS_i - t_i \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$E_i = \begin{cases} t_i - TE_i, & \text{если } t_i - TE_i > 0 \\ 0, & \text{если } t_i - TE_i \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Здесь:

N — количество клиентов;

L — количество задействованных транспортных средств;

$\text{cost}(i, j)$ — функция, возвращающая стоимость переезда между i -м и j -м клиентом;

$X_{k,i,j}$ — элемент матрицы смежности ориентированного графа для k -го транспорта;

S_i — временной промежуток, на который ТС прибыло раньше начала временного окна;

eaf — штраф за прибытие до начала временного окна;

E_i — временной промежуток, на который ТС прибыло позже конца временного окна;

laf — штраф за прибытие после окончания временного окна;

T_k — замкнутый маршрут k -го ТС;

TS_i — начало временного окна i -го клиента;

t_i — время, в которое транспортное средство прибыло к клиенту;

TE_i — конец временного окна i -го клиента;

q_i — объем доставки i -му клиенту;

P — максимальное количество ТС;

C — вместимость одного транспортного средства.

Применение алгоритма муравьиных колоний для решения задачи оптимизации пути с временными окнами. Алгоритм муравьиных колоний (МК) чаще всего применяется к задачам, реализованным в виде графа, и используется в транспортно-логистической сфере. В классической реализации алгоритма МК [2] движение осуществляется на основе вероятностной оценки перспективности перехода в соседние вершины [3]. Вероятность перехода зависит от двух критериев: от опыта предыдущих муравьев и от жадной составляющей алгоритма. Опытом предыдущих муравьев является уровень феромона, оставленный на фрагментах путей. Жадная составляющая алгоритма заключается в принятии локально оптимальных решений на каждом этапе, допуская, что конечное решение также окажется оптимальным. В классической реализации алгоритма МК жадная составляющая — это расстояние между вершинами в графе. Чем ближе рассматриваемая вершина, тем выше вероятность перемещения в нее [4]. В данной реализации алгоритма принято решение добавить дополнительную жадную составляющую — время до конца временного окна: чем ближе конец временного окна, тем выше вероятность выбора данного клиента.

Основные математические соотношения, используемые в алгоритме МК:

$$P_{i,j} = \frac{\tau^{\alpha}_{i,j} \cdot \frac{1}{\eta^{\beta}_{i,j}} \cdot \frac{1}{\omega^{\gamma}_j}}{\sum_{m \in \text{все возможные для посещения узлы}} \tau^{\alpha}_{i,m} \cdot \frac{1}{\eta^{\beta}_{i,m}} \cdot \frac{1}{\omega^{\gamma}_m}} \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{если } (i,j) \in T_k \\ 0, & \text{если } (i,j) \notin T_k \end{cases} \quad (6)$$

$$\tau_{i,j} = (1 - EPR) \cdot \tau_{i,j} + \sum_{k=1}^Z \Delta\tau_{i,j,k} \quad (7)$$

Здесь:

$P_{i,j}$ — вероятность перехода от i -го к j -му клиенту;

$\tau_{i,j}$ — уровень феромона между клиентом i и j ;

$\eta_{i,j}$ — расстояние между клиентами i и j ;

ω_j — время между концом временного окна j -го клиента и текущим временем транспортного средства;

α, β, γ — эмпирические коэффициенты алгоритма;

$\Delta\tau_{i,j,k}$ — количество феромона, которое оставляет k -й муравей между i -м и j -м клиентом;

Q — лучшая длина маршрута;

L_k — длина маршрута, найденная k -м муравьем;

T_k — маршрут k -го муравья;

EPR — коэффициент испарения феромона;

Z — количество муравьев.

Тестирование. В качестве тестовых задач используются некоторые задачи Соломона, представленные в виде шести наборов. Каждая группа сформирована на основании нескольких факторов, влияющих на поведение алгоритмов маршрутизации и планирования:

- географические данные;
- количество клиентов, обслуживаемых транспортным средством;
- процент клиентов, ограниченных во времени;
- плотность и расположение временных окон.

В наборах задач $R1$ и $R2$ географические данные генерируются случайным образом, в $C1$ и $C2$ группируются, а в $RC1$ и $RC2$ представляют собой смесь случайных и кластеризованных структур. Наборы задач $R1$, $C1$ и $RC1$ имеют короткий горизонт планирования, и количество обслуженных на маршруте клиентов не превышает 10. Наборы $R2$, $C2$ и $RC2$ имеют длинный горизонт планирования, позволяющий обслуживать более 20 клиентов одним и тем же транспортным средством [5]. Результаты вычислительных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты вычислительных экспериментов

Номер и группа задачи	Алгоритм МК. Длина маршрута / количество задействованных ТС	Лучшее найденное решение. Длина маршрута / количество задействованных ТС	Процент отклонения маршрута, %
C101	828,94 / 10	828,94 / 10	0
C102	946,09 / 10	828,94 / 10	14
C201	591,56 / 3	591,56 / 3	0
C202	794,38 / 3	591,56 / 3	34
R101	1923,75 / 22	1650,80 / 19	18
R102	1918,63 / 20	1486,12 / 17	15
R201	1575,46 / 9	1252,37 / 4	26

Номер и группа задачи	Алгоритм МК. Длина маршрута / количество задействованных ТС	Лучшее найденное решение. Длина маршрута / количество задействованных ТС	Процент отклонения маршрута, %
R202	1373,28 / 7	1191,70 / 3	15
RC101	1986,75 / 19	1696,95 / 14	17
RC102	1808,07 / 18	1554,75 / 12	16
RC201	1565,65 / 8	1406,94 / 4	11
RC202	1491,22 / 8	1365,65 / 3	9

Заключение. По результатам вычислительных экспериментов можно сделать вывод, что алгоритм муравьиных колоний хорошо приспособлен к решению задачи маршрутизации транспортных средств. Затрачиваемое время на поиск решения достаточно мало в сравнении с точными методами. В дальнейших исследованиях для повышения точности конечного результата целесообразно рассмотреть корректировку эмпирических коэффициентов, отвечающих за оценку перспективности выбора вершины.

Библиографический список

1. Gambardella, L. M. Ant-Q: A Reinforcement Learning Approach to the Traveling Salesman Problem / L. M. Gambardella, M. Dorigo // Twelfth International Conference on Machine Learning, Morgan Kaufmann. — 1995. — P. 252–260.

2. Нейдорф, Р. А. Разработка, оптимизация и анализ параметров классического муравьиного алгоритма при решении задачи коммивояжера в полно-связном графе / Р. А. Нейдорф, О. Т. Ярахмедов // Наука. Технологии. Производство. — 2015. — Т. 2, № 3. — С. 18–22.

3. Нейдорф, Р. А. Статистическое исследование оптимизационных свойств решения классическим муравьиным алгоритмом задачи коммивояжера / Р. А. Нейдорф, О. Т. Ярахмедов // Educatio. — 2015. — № 4 (11). — С. 141–144.

4. Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями / Р. А. Нейдорф, В. В. Полях, И. В. Черногоров, О. Т. Ярахмедов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2016. — № 3 (176). — С. 127–143.

5. Solomon benchmark / TOP transportation optimization portal // sintef: [сайт]. — URL: <https://www.sintef.no/projectweb/top/vrptw/solomon-benchmark/> (дата обращения: 01.04.2022).

Об авторах:

Гвоздев Леонид Русланович, студент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), gvozdev-leonid-95@yandex.ru.

Медведева Татьяна Александровна, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), med.ta1@yandex.ru.

About the Authors:

Gvozdev, Leonid R., Student, Department of Computer Software and Automated Systems, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), gvozdev-leonid-95@yandex.ru.

Medvedeva, Tatyana A., Associate professor, Department of Computer Software and Automated Systems, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), med.ta1@yandex.ru.