

МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ В СКЛАДСКОЙ СИСТЕМЕ УЧЕТА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ С ВРЕМЕННЫМИ ОКНАМИ

С. Д. Котляр, А. Н. Кривцов (Санкт-Петербург)

Автоматизация ритейла – актуальная тема для производителей ИТ-решений и бизнес-консультантов. Сетевая розница, независимо от конкретного рынка, всегда стремится к сокращению издержек в масштабах всего бизнеса, и глобальные ИТ-компании очень серьезно конкурируют за клиентов из этой отрасли. Российская розница несколько отстает от многих западных рынков в плане концентрации и уровня конкуренции, но и здесь идет серьезная борьба за прибыль. Определяющей задачей торговли, является выбор временного окна доставки заказа клиенту, а также время начала сборки заказов, так как минимизация времени нахождения собранного заказа позволяет сокращать издержки на аренду складов и тем самым дает возможность расширить ассортиментный ряд при равной площади склада, удовлетворив при этом потребности клиента.

Класс задач, занимающихся поиском оптимальных маршрутов транспортных средств, называют задачами маршрутизации транспортных средств (The vehicle routing problems – VRP).

Обычно задача маршрутизации выведена в отдельную функцию системы управления и планирования транспортом (TMS). Однако для многих компаний решение TMS-систем является дорогостоящим продуктом и обладает избыточным функционалом, а задача сводится к грамотному распределению заказов между курьерскими компаниями по рейсам. Поэтому уже сейчас многие разработчики складских систем управления (WMS) задаются вопросом, как предложить компаниям единую систему для полноценной организации доставок и контроля перемещения товара от распределительного центра до конкретного клиента с возможностью автоматически строить маршрутизацию всех заказов и определять приоритеты для своевременной сборки заказов. Таким образом, на рынке существуют всевозможные системы для автоматизации всех бизнес-процессов предприятий. Однако на уровне предприятий онлайн-ритейла, где наибольшую роль играет автоматизация и контроль распределительного центра и WMS-системы, содержание и обслуживание двух отдельных систем WMS и TMS оказывается дорогостоящим. В случаях малого и среднего бизнеса зачастую функционал TMS системы оказывается избыточным, поэтому возникает вопрос автоматизации процесса маршрутизации в рамках единой системы (WMS-системы).

В статье рассматривается моделирование процесса маршрутизации и предлагается дискретно-событийная модель этого процесса в системе складского учета на основе применения транспортной задачи с добавлением ограничения на время посещения каждого из клиентов (VRP with Time Windows, VRPTW).

Математическая модель задачи транспортной маршрутизации

Ниже представлено описание математической модели задачи VRPTW.

Пусть имеется некоторый направленный граф $G=(V, A)$ с множеством вершин $|V|=n+2$, так что n вершин представляют n клиентов, и A – множество дуг графа. Вершина 1-го поставщика чаще обозначается как депо (depot) или склад, с которого товары развозятся по клиентам.

Предположим, что K множество транспортных средств и $|K|=m$, m — количество машин. Каждый клиент i обслуживается в течение времени обслуживания s_i . Время обслуживания в депо s_0 , т.е. время необходимое на загрузку заказов, не учитывается в задаче и равно нулю, так как комплектация товара происходит заранее и входит в задачу складского процесса. Время возвращения в депо s_{n+1} также нулевое, $s_0 = s_{n+1} = 0$.

Объем заказа, поставляемого i -му клиенту, обозначается буквой q_i , Q обозначает пропускную способность транспортного средства. Пусть t_{ij} обозначает время, необходимое для перемещения от клиента i к клиенту j , и c_{ij}^{k} , $(i, j) \in A$ - стоимость поездки от клиента i к клиенту j . Бинарная переменная x_{ijk}^{k} , $(i, j) \in A, k \in K$ равна 1 тогда и только тогда, когда путь (i, j) обслуживается транспортным средством k . Предположим также, что $\delta^+(i) = \{j: (i, j) \in A\}$ и $\delta^-(j) = \{i: (i, j) \in A\}$.

Чтобы сформулировать задачу с временными окнами необходимо ввести следующие параметры:

- 1) $[a_i, b_i]$ – временной интервал доставки для выполнения запроса клиента i $i \in N = V \setminus \{0, n+1\}$;
- 2) $[a_0, b_0], [a_{n+1}, b_{n+1}]$ – временной интервал для депо;
- 3) $a_0 = \min_{i \in N} \{a_i - t_{0i}\}$;
- 4) $b_0 = \max_{i \in N} \{b_i - t_{0i}\}$;
- 5) $a_{n+1} = \min_{i \in N} \{a_i + s_i + t_{i, n+1}\}$;
- 6) $b_{n+1} = \max_{i \in N} \{b_i + s_i + t_{i, n+1}\}$;
- 7) w_i^k , $i \in N, k \in K$ – момент времени, когда транспортное средство k начинает обслуживание клиента i .

Согласно Барнхарту и Лапорту [1] модель VRPTW может быть описана как модель многотоварного сетевого потока с временными окнами и ограничением по грузоподъемности следующим образом:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i, j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k$$

при условии:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ij}^k = 1, i \in N \tag{1}$$

$$\sum_{j \in \delta^+(0)} x_{0j}^k = 1, k \in K \tag{2}$$

$$\sum_{j \in \delta^-(j)} x_{ij}^k - \sum_{j \in \delta^+(j)} x_{ij}^k = 0, k \in K, j \in N \tag{3}$$

$$\sum_{j \in \delta^-(n+1)} x_{i, n+1}^k = 1, k \in K \tag{4}$$

$$x_{ij}^k (w_i^k + s_i + t_{ij} - w_{ij}^k) \leq 0, k \in K, (i, j) \in A \tag{5}$$

$$a_i \leq w_i^k \leq b_i, k \in K, i \in V \tag{6}$$

$$\sum_{i \in N} q_i \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ij}^k \leq Q, k \in K \tag{7}$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, k \in K, (i, j) \in A \tag{8}$$

Целевая функция направлена на минимизацию общих затрат на маршрутизацию транспортных средств. Ограничения (1) и (2) указывают, что каждый клиент должен посещаться ровно один раз, и каждое транспортное средство должно использоваться ровно один раз, что означает, что у каждого транспортного средства есть только один маршрут. Ограничения (3) и (4) необходимы для обеспечения того, чтобы не нарушалась согласованность потока в каждой вершине маршрута. Начиная маршрут, каждое транспортное средство выходит из депо ровно один раз и в конце его маршрута возвращается в депо также ровно один раз; если автомобиль прибывает к клиенту, он должен покинуть этого клиента после завершения службы доставки. Следующие два ограничения используются для устранения подциклов и обеспечения согласованности окон времени. Ограничения (7) определяют ограничение грузоподъемности (ёмкости) транспортного средства. Последнее выражение определяет формат переменной принятия решения x_{ij}^k .

Следует отметить, что описанная выше модель VRPTW предполагает, что обслуживание клиента не может начаться раньше установленного времени, даже если автомобиль прибыл на место раньше.

Проблема VRPTW является NP-трудной задачей. Хотя существуют некоторые точные алгоритмы, которые используют методы математического программирования для нахождения оптимального решения VRPTW, эти алгоритмы обычно позволяют решить обсуждаемую проблему только для случаев, в которых используется до 100 клиентов в течение соответствующего периода времени [2]. Следовательно, многие исследования сосредоточены на разработке соответствующей эвристики для решения VRPTW, именно поэтому основное внимание в литературе и исследованиях уделяется эвристическим алгоритмам.

Подходы к решению задач VRPTW

Эвристические подходы являются мощной альтернативой точным методам решения VRPTW, поскольку они способны довольно быстро по сравнению с точными методами разрабатывать решения соответствующего качества.

Первый класс эвристики – конструктивная эвристика – нацелен на то, чтобы построить допустимое решение, путем вставки в частичные маршруты клиентов, которые будут посещаться один за другим. Процедуру вставки можно выполнить последовательно или параллельно. Каждая конструктивная эвристика определяется и отличается выбором, сделанным для двух основных вариантов:

- последовательность вставки клиентов в маршрут;
- между какими двумя соседствующими в текущем маршруте клиентами выбранный клиент должен быть вставлен.

Алгоритм эвристической вставки «Insertion heuristic I1» последовательно организует маршруты и нацелен на максимизацию выгоды посещения клиента не по прямому маршруту, а по частичным составляющим. Соответствующий алгоритм включает следующее:

1) Инициализация:

Выбор изначального клиента:

- 1 вариант: первый клиент – самый дальний, не добавленный в маршрут;
- 2 вариант: первый клиент – не добавленный в маршрут клиент с самой ранней верхней границей временного окна доставки.

2) Итерация:

- последовательность: выбор из оставшихся клиентов одного с максимальным берегающим значением, принимая во внимание расстояние от депо и затраты на вставку;
- место: добавление выбранного клиента в текущий маршрут на позицию, минимизируя стоимость меры дополнительного времени и дополнительного расстояния, необходимого для посещения клиента.

3) Терминация:

- 1 случай: все клиенты добавлены в маршрут;
- 2 случай: невозможно найти следующего клиента с допустимым вариантом вставки в маршрут, т.е. добавление в маршрут клиента вызовет нарушение некоторых ограничений.

Если на этапе завершения имеет место второй случай, текущий маршрут должен быть завершен, и новый маршрут должен быть инициализирован. Алгоритм повторяется до тех пор, пока не наступит первый вариант терминации, то есть больше не останется клиентов, которые должны быть посещены. [3]

Реализация дискретно-событийной модели в системе складского учета

Алгоритм автоматизации основан на задаче VRPTW, описанной в предыдущей главе. Наша дискретно-событийная модель предполагает, что все транспортные средства начинаются и заканчиваются в распределительном центре. Количество вершин VRP – это количество клиентов. Вершины задаются от 0 до количества клиентов – 1. По умолчанию начало каждого маршрута происходит в депо, т.е. равен 0. Далее, эвристикой находится первое допустимое решение. Начинаем маршрут в «начальной» вершине, прибавляем его к узлу, который производит самый дешевый сегмент маршрута, далее расширяем маршрут, путем итерации до тех пор, пока последняя вершина не будет прибавлена к маршруту. Затем в решение добавляются ограничения временного окна и грузоподъемности транспортного средства. Находится оптимальный маршрут.

Результатом является множество маршрутов, оптимизированных по временным окнам. Набор маршрутов характеризуется совокупной нагрузкой ранее посещаемых мест, а также временным окном, в которое водитель должен приехать в каждый пункт.

Заключение

Статья показывает, что задача VRPTW может быть взята за основу для автоматизации и построения модели маршрутизации заказов онлайн-ритейла малого и среднего бизнеса.

Литература

1. **Barnhart C., Laporte G.** (Eds.), (2007). Handbook in OR & MS, Vol. 14. P. 367–428.
2. **Fisher, M.L., Jörnsten, K.O., Madsen, O.B.G.** Vehicle routing with time windows – two optimization algorithms. Operations Research 45 (1997). P.488–492.
3. **Solomon M.M.** Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. Operations Research (1987). P.254–265.
4. **Сергеев В.И., Григорьев М.Н., Уваров С.А.** Логистика: информационные системы и технологии: Учебно-практическое пособие. М.: Издательство Альфа-Пресс, 2009. 608 с.
5. **Lao H.C., Liang Z.** Pickup and delivery with time windows: Algorithms and test case generation. International Journal on Artificial Intelligence Tools (Architectures, Languages, Algorithms) 11 (3), 2002. P.455–472.