

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА МАРШРУТА КОНСОЛИДАЦИИ ЗАКАЗОВ НА СКЛАДЕ НА ОСНОВЕ СОВОКУПНОСТИ МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Си Ту Тант Син

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва

Ключевые слова: консолидация заказов, складская логистика, фулфилмент операции, метаэвристические алгоритмы, задача о ранце, задача коммивояжера, жадный алгоритм, муравьиный алгоритм, система управления складом.

Аннотация. В статье представлена методика оптимизации маршрутов консолидации заказов на складе. Решаются две главные задачи: отбор приоритетных товаров с помощью задачи о ранце и построение оптимального маршрута через задачу коммивояжера. Шестиэтапный процесс включает динамическое программирование, применение жадного алгоритма для начального маршрута и его последующую оптимизацию муравьиным алгоритмом. Тестирование доказывает, что данный метаэвристический подход превосходит стандартные алгоритмы WMS, сокращая среднюю длину маршрута сборки на 5-10%.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CHOOSING A ROUTE FOR CONSOLIDATING ORDERS IN A WAREHOUSE BASED ON A SET OF METAHEURISTIC ALGORITHMS

Si Thu Thant Sin

National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd, Moscow

Keywords: order consolidation, warehouse logistics, fulfillment operations, metaheuristic algorithms, knapsack problem, traveling salesman problem, greedy algorithm, ant colony optimization, warehouse management system.

Abstract. This article presents a methodology for optimizing warehouse order consolidation routes. It addresses two main challenges: selecting priority items by solving the knapsack problem and determining the optimal picking sequence via the traveling salesman problem. The six-stage process utilizes dynamic programming, a greedy algorithm for initial routing, and ant colony optimization for refinement. Testing confirms this method of measurement outperforms standard WMS algorithms, successfully reducing average route lengths by 5-10%.

Теоретические аспекты оптимизации фулфилмента и консолидации заказов

Оптимизация и улучшение эффективности фулфилмент операций является важной задачей. Успешная логистика и эффективное использование складских пространств стали краеугольными камнями для преуспевающих компаний. Особое значение в этом контексте приобретает процесс фулфилмента, который включает подготовку и отправку заказов с фулфилмент-центров или складских площадей. На этом пути одним из ключевых аспектов является организация работы внутри склада, а именно – выбор маршрута для экономии времени, сил и ресурсов при сборе и комплектации заказов [1].

Для решения задачи выбора маршрута консолидации заказов необходимо сначала отобрать наиболее приоритетные товары, а затем определить оптимальный маршрут, проходящий через каждую из отобранных позиций один

раз. Данная проблема включает два этапа: решение задачи о ранце для отбора товаров и решение задачи коммивояжера для построения маршрута.

Разработка поэтапной методики на основе метаэвристических алгоритмов

Методика выбора маршрута консолидации товаров при инвентаризации на складе состоит из нескольких этапов, каждый из которых направлен на решение конкретной подзадачи. Эти этапы включают сбор данных, отбор товаров, формирование маршрута и оптимизацию. Рассмотрим каждый из этих этапов подробно.

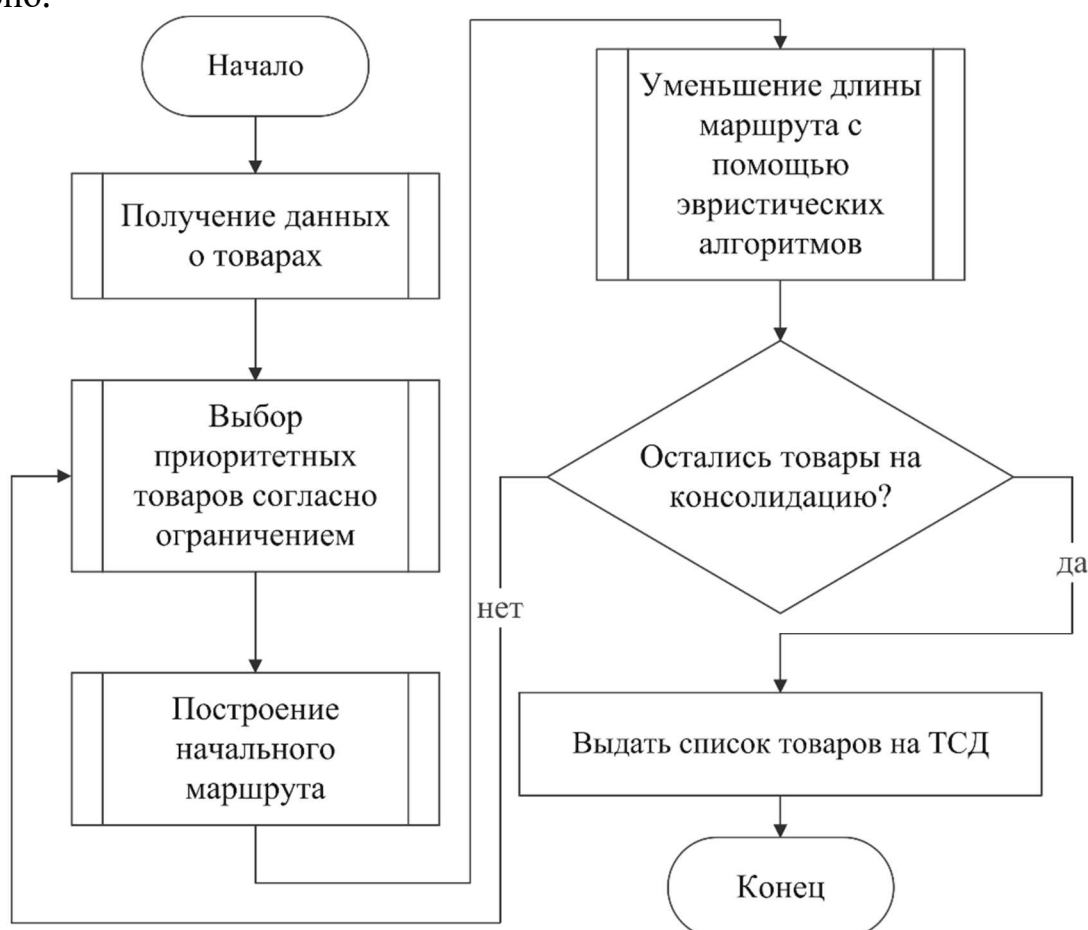


Рис. 1. Общая схема алгоритма построения маршрута

Рассмотрим каждый этап разработанной методики отдельно.

Этап 1.

На первом этапе собираются и обрабатываются все необходимые данные о товарах, складских ячейках и других логистических параметрах. Этот этап включает несколько подэтапов, каждый из которых обеспечивает сбор и подготовку данных, необходимых для последующих этапов алгоритма [2].

Вес товара m_i может быть получен из системы управления складом (WMS), баз данных поставщиков или через прямое измерение товаров на складе. Формат данных: вес каждого товара m_i должен быть представлен в килограммах (кг).

Приоритет товара p_i может быть установлен на основе планируемой даты и времени отгрузки товара. Чем раньше дата и время отгрузки, тем выше должен быть приоритет. Приоритет каждого товара представляется числом, которое может быть нормировано в диапазоне от 0 до 1.

Габариты товаров могут быть получены из спецификаций продуктов, предоставленных производителями или поставщиками. Габариты (длина l_i , ширина d_i , высота h_i) каждого товара представлены в метрах (м).

Объем каждого товара v_i рассчитывается по формуле:

$$v_i = d_i \cdot h_i \cdot l_i. \quad (1)$$

Объем каждого товара представляется в кубических метрах (м³).

Местоположение товаров может быть получено из системы управления складом (WMS), где указаны координаты каждой товарной ячейки. Координаты местоположения каждого товара на складе представлены в виде двух чисел x_i , y_i . Координаты считаются в метрах.

Грузоподъемность и объем тележки берется из спецификаций производителя или технической документации склада. Максимальная грузоподъемность представляется в килограммах (кг). Максимальный объем тележки представляется в кубических метрах (м³).

Формирование матрицы расстояний между товаром: на этом этапе создается матрица расстояний, которая является ключевым элементом для дальнейшего формирования и оптимизации маршрута [3]. Каждый товар на складе имеет свои координаты x_i и y_i . Эти координаты получены на предыдущих этапах сбора данных. Расстояние между любыми двумя товарами i и j рассчитывается с использованием формулы Евклидова расстояния:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}. \quad (2)$$

Это вычисление производится для всех пар товаров, что позволяет создать полную матрицу расстояний. Матрица расстояний D размерностью n на n (где n – количество товаров) заполняется вычисленными значениями d_{ij} , где каждый элемент представляет собой расстояние между товаром i и j . Диагональные элементы D принимают значение 0, так как расстояние товара до самого себя равно нулю. Матрица расстояний имеет следующий вид:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & d_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & d_{nn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Этап 2.

На втором этапе отбираются товары, которые будут включены в маршрут, с учетом ограничений тележки кладовщика. Этот этап решает задачу о рюкзаке, где необходимо максимизировать сумму приоритетов отобранных товаров, соблюдая ограничения по весу и объему тележки.

Параметры задачи:

- 1) n – общее количество товаров;
- 2) m_i – вес i -го товара;
- 3) v_i – объем i -го товара;
- 4) p_i – приоритет i -го товара;

5) C_v – максимальный объём тележки;

6) C_m – максимальная грузоподъемность тележки;

7) x_i – бинарная переменная, которая принимает значение 1, если i -й товар включен в выборку, и 0 в противном случае.

Целевая функция: максимизация суммарной полезности отобранных товаров:

$$\max \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i. \quad (4)$$

Ограничения по весу:

$$\sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i \leq C_m. \quad (5)$$

Ограничения по объёму: $\sum_{i=1}^n v_i \cdot x_i \leq C_v$.

Бинарные переменные: $x_i \in \{0,1\}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$.

Для решения задачи о рюкзаке используется метод динамического программирования. Этот метод позволяет эффективно найти оптимальное решение при заданных ограничениях [4]. После работы алгоритма мы должны получить список отобранных товаров: $S = \{i \mid x_i = 1\}$.

Суммарную полезность отобранных, товаров, а также вес и объем отобранных товаров можно рассчитать по формулам:

$$P_s = \sum_{i \in S} p_i; M_s = \sum_{i \in S} m_i; V_s = \sum_{i \in S} v_i. \quad (6)$$

Этап 3.

На третьем этапе строится начальный маршрут, проходящий через все товары, подлежащие консолидации. Для этого решается задача коммивояжера с использованием жадного алгоритма и матрицы расстояний, полученной на первом этапе.

Параметры задачи:

m – количество товаров на отбор полученных на прошлом этапе;

d_{ij} – расстояние между товарами i и j , полученное из матрицы расстояний.

Целевой функцией данной задачи является минимизация длины маршрута представленной формулой:

$$\min \sum_{i=1}^{m-1} d_{i,i+1} + d_{m,1}. \quad (7)$$

Решение данной задачи можно реализовать с помощью жадного алгоритма [5]. Работу жадного алгоритма можно описать как последовательность действий:

1. Инициализация - начнём с пустого множества решений $S = \emptyset$;

2. Итерационный процесс (повторяем пока не прошли по всем вершинам);

– выбор кандидата: определяем множество кандидатов, $C \subseteq E \setminus S$, где E – множество всех элементов.

– минимизация локального выбора – выбираем элемент $e \in C$, который минимизирует локальную целевую функцию f :

$$e = \arg \min \left(f \left(S \cup \{e\} \right) \right). \quad (8)$$

Обновление решения – добавляем выбранный элемент e в текущее решение:
 $S = S \cup \{e\}$.

3. Итерационный процесс прекращается, когда невозможно выбрать новый элемент: $C = \emptyset$.

Этап 4.

Этот этап предполагает использование муравьиного алгоритма для улучшения решения, полученного с помощью жадного алгоритма. Этап состоит из следующей последовательности действий:

1. Инициализация феромонов. На прошлом этапе мы получили S – набор вершин, полученных с помощью жадного алгоритма. Этот маршрут представляет собой последовательность $S_{\text{жадный}} = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$. Инициализируем феромоны на всех путях в графе G , пусть τ_{ij} обозначает количество феромонов на пути между товаром i и j . На начальном этапе алгоритма можно установить небольшое количество феромонов на всех путях: $\tau_{ij} = \tau_0, \forall (i, j)$, где τ_0 – начальное значение феромона.

2. Увеличиваем количество феромонов на путях, которые составляют маршрут S . Пусть Q – некоторое большое значение, которое пропорционально значимости феромона. Обновление феромонов можно выполнить следующим образом:

$$\tau_{i,i+1} = \tau_{i,j+1} + \frac{Q}{L_{\text{жадный}}}, \forall (v_{i,i+1}) \in S_{\text{жадный}}, \quad (9)$$

где L – общая длина маршрута S .

3. Располагаем m муравьёв, где $m \ll n$; случайным образом по всем n товарам.

4. Каждый муравей начинает строить маршрут, посещая каждую вершину ровно один раз. Выбор следующей вершины j из текущей i осуществляется по вероятности P_{ij} :

$$P_{ij} = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in N, k=0}^n ([\tau_{ik}]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta)}; \quad (10)$$

где τ_{ij} – количество феромонов на пути, $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ – обратная длина пути, α и β –

параметры алгоритма, управляющие значимостью феромонов и длины пути соответственно, а N_i – множество вершин, ещё не посещённых муравьём.

5. После того, как все муравьи построили свои маршруты, обновляем феромоны на всех путях:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{i,i+1} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k;$$

где ρ – коэффициент испарения феромонов $0 < \rho < 1$, $\Delta \tau_{ij}^k$ – количество феромонов, оставленных k -м муравьём на пути i, j :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{если муравей прошел, по пути } i, j; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (11)$$

где Q – константа, а L_k – длина пути пройденного k -м муравьем.

6. Запоминаем лучший найденный маршрут за все итерации, и повторяем шаги 3, 4, 5 пока не выполнится условие остановки (например ограничение по времени выполнения алгоритма, или отсутствие улучшений в течение определенного количества итераций).

Верификация результатов и оценка эффективности предложенного подхода

Этап 5.

Проверка и верификация полученного решения включает в себя два основных шага: проверку вместимости товаров в тележку кладовщика и проверку корректности построенного маршрута. Необходимо убедиться, что все выбранные для консолидации товары с их весом и объёмом помещаются в тележку кладовщика, учитывая её ограничения по весу и объёму. Для выполнения данной проверки требуется выполнить ряд действий. Рассчитать вес и объём товаров на консолидацию:

$$M_{total} = \sum_{i=1}^n m_i; V_{total} = \sum_{i=1}^n v_i. \quad (12)$$

Произвести проверку того, что вес и объем товаров не превышает ограничения на тележку кладовщика полученные на первом этапе:

$$M_{total} < M_{max}; V_{total} < V_{max}. \quad (13)$$

На втором шаге необходимо проверить, что построенный маршрут охватывает все товары, и каждый товар посещается только один раз. Для этого надо выполнить следующие шаги:

Пусть маршрут R представлен как упорядоченный список посещаемых вершин графа: $R = [r_1, r_2, \dots, r_n]$.

Проверяем что все точки маршрута уникальны, а также что длина множества маршрута равна количеству товаров: $|R| = |T|$.

Проверяем что маршрут включает все товары, а именно что:

$$\{r_1, r_2, \dots, r_n\} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}. \quad (14)$$

Этап 6. Формирование списка товаров и их мест расположений на складе для отправки на ТСД кладовщику включает создание упорядоченного и четко структурированного списка товаров, который будет передан на терминал сбора данных (ТСД) кладовщика. На данном этапе множество отсортированных товаров на четвертом этапе преобразуется в массив данных, в котором указаны местоположение товара на складе, идентификатор товара, его вес и объем, которые надо передать на терминал сбора данных кладовщика.

На рисунке 2 представлены результаты ста тестов, по поиску маршрута с помощью жадного алгоритма, который используется в большинстве WMS, а также два варианта разработанного алгоритма, учитывающего решения задачи о рюкзаке и не учитывающего его.



Рис. 2. График сравнение длин маршрутов, в каждом из тестовых запусков

Как мы можем видеть из результатов тестирования, разработанный алгоритм показывает результаты лучше, чем жадный алгоритм в среднем уменьшая длину маршрута на 5-10%.

Список литературы

1. Si Thu Thant Sin. Development of a Model and Algorithms for Trigger Control of Technological Processes of Resource Provision // Advances in Automation VI. RusAutoCon 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1324. Springer, Cham, 2025. doi.org/10.1007/978-3-031-82494-4_13.
2. Стерлигова А.Н. Управление запасами в цепях поставок: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 430 с.
3. Бродецкий Г.Л. Моделирование логистических систем. Оптимальные решения в условиях риска. – М.: Вершина, 2006. – 376 с.
4. Si Thu Thant Sin, Portnov E.M., Bain A.M. Research and Development of Algorithms for Dispatching Tasks in Distributed Computing Systems // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 700-704.
5. Сумец А.М. Выбор стратегии управления товарными запасами с учетом фактора сезонности // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D: Экономические и юридические науки. – 2010. – №4. – С. 163-170.

Сведения об авторе:

Си Ту Тант Син – к.т.н., докторант.