

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ

Филимонов А.Б., Пак А.О.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Ключевые слова: морской контейнерный терминал, диспетчеризация AGV, управление транспортными потоками, оптимизация, целочисленное линейное программирование, генетический алгоритм, среда программирования MATLAB.

Аннотация. Обсуждаются вопросы диспетчерского управления горизонтальными перевозками средствами AGV в морских контейнерных терминалах. Рассматривается задача распределения транспортных средств по заданным маршрутам перевозки контейнеров. Контейнеры должны быть перемещены из оперативных грузовых площадок к определенным для каждой партии груза местам хранения. Соответственно определены маршруты перемещения контейнеров. Ставится задача оптимизации транспортных потоков по критерию минимизации общего времени длительности перевозок. Поставленная задача сводится к задаче целочисленного линейного программирования, для решения которой предложен генетический алгоритм, который реализуется в среде программирования MATLAB с использованием библиотеки Global Optimization Toolbox.

OPTIMIZATION OF THE DISTRIBUTION OF TRANSPORT FLOWS IN THE CONTAINER TERMINAL

Filimonov A.B., Pak A.O.

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Keywords: sea container terminal, AGV dispatching, traffic flow control, optimization, integer linear programming, genetic algorithm, MATLAB programming environment.

Abstract. The issues of dispatch control of horizontal transportation by means of AGVs in sea container terminals are discussed. The problem of distributing vehicles along specified routes for the transportation of containers is considered. Containers must be moved from operational cargo areas to storage locations designated for each consignment. Accordingly, the routes of movement of containers are determined. The task is to optimize traffic flows according to the criterion of minimizing the total time of the duration of transportation. The task boils down to the problem of integer linear programming, for the solution of which a genetic algorithm is proposed, which is implemented in the MATLAB programming environment using the Global Optimization Toolbox library.

Введение

Морские контейнерные терминалы (МКТ) играют важную роль в глобальных цепочках поставок. Контейнеризация является удобным способом объединения грузов и их дальнейшей транспортировки. Для перевозки используются контейнеры, соответствующие стандартным международным требованиям по классификации ISO.

Сегодня крупный терминал обрабатывает миллионы контейнеров в год. Эффективность работы МКТ определяется его производительностью и эксплуатационными расходами. Перспективы повышения эффективности

работы контейнерного терминала связаны с совершенствованием автоматизации его производственных процессов и, в частности, с повышением уровня автоматизации внутритерминальных контейнерных перевозок.

Разработчики систем автоматизации контейнерных терминалов сталкиваются со сложными исследовательскими проблемами, которые привлекают большое внимание со стороны научного сообщества. Направления этих исследований отражают работы [1-5].

Пропускная способность МКТ зависит от состава и организации работы наземного транспорта. Несмотря на небольшие расстояния доставки грузов в контейнерных терминалах, данный вид перевозок может оказывать существенное влияние на логистические затраты.

При необходимости большого объема перемещений внутри терминала наиболее логичным является использование роботизированных тележек AGV (Automated Guided Vehicle). При этом эффективность грузоперевозок определяется стратегией оперативного управления работой AGV. Вопросы автоматизации диспетчерского управления AGV в МКТ рассматриваются в литературе [4, 6-9]. В этих работах обсуждаются современные операционные парадигмы транспортных операций в МКТ, вопросы построения математических моделей процессов контейнерной перевозки средствами AGV, стратегии планирования маршрутов движения и диспетчеризации AGV, алгоритмы и методы оптимизации грузопотоков с целью сокращения времени выполнения транспортных задач.

Постановка задачи оптимизации транспортных потоков

Полагаем, что для перемещения контейнеров между грузовыми фронтами и зонами складирования используются автоматические транспортные платформы AGV. Далее для простоты полагаем, что каждая AGV-тележка перевозит один TEU-контейнер.

Контейнеры должны быть перемещены из оперативных грузовых площадок к определенным для каждой партии груза местам хранения. Соответственно, определены маршруты перемещения контейнеров. Таким образом, число мест загрузки и разгрузки AGV совпадают.

Считаем, что процесс грузоперевозок организован следующим образом: заданы маршруты перевозки контейнеров, все AGV, выделенные для перевозок, распределены по этим маршрутам, причем состав AGV на маршрутах не меняется. Задача заключается в таком формировании групп AGV на маршрутах, которое является оптимальным по критерию общего рабочего времени грузоперевозок. Перевозочный процесс считается завершенным после доставки последнего контейнера к месту выгрузки.

Перейдем к математической формализации задачи.

Введем обозначения:

r – число маршрутов для перевозки контейнеров;

C_i – число контейнеров в i -м месте загрузки AGV, $i = \overline{1, r}$;

M – общее число AGV, задействованных в процессе грузоперевозок;

m_i – число AGV, прикрепленных к i -му маршруту;

τ_i^+ τ_i^- – соответственно время проезда AGV по i -му маршруту от места погрузки к месту выгрузки (хранения) контейнеров и время возврата к месту погрузки;

T_i – длительность перевозок груза на i -м маршруте.

В процессе перевозок задействованы все имеющиеся AGV так что

$$\sum_{i=1}^r m_i = M. \quad (1)$$

Для перевозки груза по заданному маршруту может потребоваться несколько ходок (туда и обратно) каждой AGV, причем время оборота AGV на i -м маршруте равно сумме $\tau_i^+ + \tau_i^-$.

Весь груз должен быть перемещен в места складирования. Учтем, что C_i может быть не кратно m_i . Выполним следующее разложение чисел C_i ($i = \overline{1, r}$):

$$C_i = \mu_i m_i + \nu_i.$$

где μ_i – неотрицательное целое, а

$$0 < \nu_i \leq m_i.$$

Нетрудно проверить, что μ_i равно частному от деления $C_i - 1$ на m_i :

$$\mu_i = [(C_i - 1) / m_i], \quad (2)$$

Здесь квадратные скобки $[\cdot]$ обозначают операцию взятия целой части числа.

Заметим, что число ходок всех AGV по i -му маршруту равно $\mu_i + 1$, причем при последней ходке AGV не возвращаются к месту погрузки контейнеров.

Время перемещения партии контейнеров на отдельных маршрутах находится по формулам

$$T_i = (\tau_i^+ + \tau_i^-) \mu_i + \tau_i^-, \quad i = \overline{1, r}. \quad (3)$$

Общее время длительности перевозочного процесса:

$$T = \max_{1 \leq i \leq r} T_i. \quad (4)$$

Задача оптимизации транспортных потоков заключается в минимизации общего времени длительности перевозок:

$$T \rightarrow \min. \quad (5)$$

Сделаем важное замечание: в постановке задаче не принимается во внимание время загрузки-разгрузки AGV, так как оно определяется лишь общим числом контейнеров в грузовых партиях и не влияет на выбор стратегии перевозок.

Алгоритмизация задачи оптимизации транспортных потоков

Далее полагаем, $M \geq r > 1$. В качестве неизвестных выберем следующие переменные:

$$x_i = m_i \quad (i = \overline{1, n}), \quad (6)$$

где

$$n = r - 1. \quad (7)$$

Подчеркнем, что эти переменные являются целочисленными:

$$x_i \in \mathbf{N} \quad (i = \overline{1, n}), \quad (8)$$

где $\mathbf{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$ – множество натуральных чисел.

Исходя из смысла рассматриваемой задачи, наложим ограничения на введенные переменные

$$x_L \leq x_i \leq x_U \quad (i = \overline{1, n}), \quad (9)$$

где

$$x_L = 1, \quad x_U = M - r + 1.$$

Учтем соотношение

$$m_r = M - \sum_{i=1}^{r-1} m_i, \quad (10)$$

причем

$$m_r \geq 1. \quad (11)$$

В силу (1) с учетом (6), (7), (10) и (11) справедливо неравенство

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq M - 1. \quad (12)$$

Введем n -мерный вектор-столбец неизвестных переменных:

$$\mathbf{x} = \text{col}(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Неравенство (12) можно записать в векторно-матричной форме

$$\mathbf{Ax} \leq b. \quad (13)$$

где $\mathbf{A} - 1 \times n$ – матрица, все элементы которой равны единицы, а b – скаляр:

$$\mathbf{A} = [1, 1, \dots, 1], \quad b = M - 1.$$

Критерий эффективности (4) является n -мерной функцией

$$T = F(\mathbf{x}),$$

определяемой соотношениями (7), (6), (10), (2), (3), (4).

Оптимизационная задача (5) с учетом ограничений (8), (9), (13) является задачей целочисленного линейного программирования. Для ее решения предлагается применять генетический алгоритм. Необходимое программное средство предоставляет библиотека Global Optimization Toolbox системы MATLAB, где генетический алгоритм реализован в виде функции `ga`. Фрагмент программы для решения рассматриваемой оптимизационной задачи имеет следующий вид:

```

n=r-1;
A=ones(1,n);b=M-1;
Aeq=[];beq=[];
lb=ones(n,1);
ub=(M-r+1)*ones(n,1);
nonlcon=[];
intcon=[1:n];
[xopt,Topt]=ga(@F,n,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,intcon)

```

Здесь x_{opt} и T_{opt} – полученное решение оптимизационной задачи и значение целевой функции соответственно.

Отметим, что целевая функция $F(\mathbf{x})$ программируется в виде отдельного М-файла с именем F.

Пример

Продемонстрируем результат решения поставленной оптимизационной задачи на модельном примере: $r = 4$, $M = 35$, $\tau_i^+ = \tau_i^- = \tau_i$ ($i = \overline{1, r}$). Остальные исходные данные приведены в следующей таблице.

i	1	2	3	4
τ_i , мин	5	3	6	4
C_i	250	300	350	150

Результаты вычисления оптимального решения, полученного с применением функции ga :

$$\mathbf{x} = \text{col}(9, 8, 13);$$

$$m_1 = 9, m_2 = 8, m_3 = 13, m_4 = 5;$$

$$T_1 = 550, T_2 = 525, T_3 = 583, T_4 = 472;$$

$$T_{opt} = 583 \text{ (мин)}.$$

Для сравнения приведем результаты расчета временных характеристик процесса транспортировки контейнеров для другого распределения AGV по тем же маршрутам. Положим

$$m_1 = 9, m_2 = 9, m_3 = 9, m_4 = 8.$$

Тогда

$$T_1 = 550, T_2 = 469, T_3 = 847, T_4 = 296;$$

$$T_{max} = 847 \text{ (мин)}.$$

Заключение

Одно из направлений повышения эффективности работы контейнерного терминала связано с совершенствованием автоматизация внутритерминальных контейнерных перевозок. В статье ставится и решается задача оптимального распределения транспортных средств по заданным маршрутам перевозки контейнеров. В качестве критерия оптимальности принимается общее рабочее время грузоперевозок. Дана формализация поставленной задачи как задачи целочисленного линейного

программирования. Для ее решения предлагается применять генетический алгоритм. Обсуждается программная реализация алгоритма с применением математического пакета MATLAB. Приведен модельный пример решения рассматриваемой оптимизационной задачи.

Список литературы / References

1. Steenken D., Voß S., Stahlbock R. Container terminal operation and operations research – a classification and literature review // OR Spectrum. 2004, vol. 26, pp. 3-49.
2. Zehendner E. Operations management at container terminals using advanced information technologies. – HAL Id: tel-00972071, 2013. – 211 p.
3. Carlo H.J., Vis I.F.A., Roodbergen K.J. Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme // European Journal of Operational Research. 2014, vol. 236(1), 36 p.
4. Gharehgozli A.H., Roy D., Koster R. Sea container terminals: New technologies, OR models and Emerging Research Areas. ERIM Report Series Reference, no. ERS-2014-009-LIS. 49 p.
5. Edirisooriya T., Bandara Y.M. An Optimization Strategy for Inter Terminal Transportation (ITT) of Containers: Case of Port of Colombo // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2017, vol. 11, 18 p.
6. Cheng Y.L., Sen H.C., Natarajan K., Teo C., Tan K. Dispatching Automated Guided Vehicles in a Container Terminal // Technical Report. National University of Singapore. 2003, 31 p.
7. Cao J., Shi Q., Lee D.H. A Decision Support Method for Truck Scheduling and Storage Allocation Problem at Container // Tsinghua science and technology. 2008, vol. 13, no. S1, pp. 211-216.
8. Li Q., Adriaansen A.C., Udding J.T., Pogromsky A.Y. Design and Control of Automated Guided Vehicle Systems: A Case Study // Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011, pp. 1352-13857.
9. Carlo H.J., Vis I.F.A., Roodbergen K.J. Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme // European Journal of Operational Research. 2014, vol. 236 (1), 36 p.

Филимонов Александр Борисович – доктор технических наук, профессор	Filimonov Alexandr Borisovich – doctor of technical sciences, professor
Пак Александр Олегович – аспирант flimon_ab@mail.ru	Pak Alexander Olegovich – graduate student

Received 17.09.2023