

МНОГОСТАДИЙНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК В КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ

Филимонов А.Б.¹, Филимонов Н.Б.^{2,3}

¹*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия;*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия;*

³*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

Ключевые слова: контейнерный терминал, управление грузоперевозками, оптимизация, целочисленное программирование, генетический алгоритм, MATLAB.

Аннотация. Для перевозки контейнеров в контейнерном терминале используются автоматизированные и роботизированные транспортные тележки. Контейнеры должны быть перемещены из оперативных грузовых площадок к заданным местам их хранения. В одной из работ автора решается задача оптимизации транспортных потоков по критерию минимизации общего времени длительности перевозок. Данная задача сводится к задаче целочисленного программирования, для решения которой применяется генетический алгоритм, реализуемый в среде программирования MATLAB. В настоящей работе рассматривается многостадийная модель оптимизации грузоперевозок в контейнерном терминале: процесс перевозок разбивается на последовательность сменяющих друг друга стадий, причем на каждой стадии состав транспортных машин на маршрутах не меняется и при переходе от одной стадии к следующей они могут перебрасываться на другие маршруты.

MULTI-STAGE MODEL FOR CARGO TRANSPORTATION OPTIMIZATION AT A CONTAINER TERMINAL

Filimonov A.B.¹, Filimonov N.B.^{2,3}

¹*MIREA – Russian Technological University; Moscow, Russia;*

²*Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia;*

³*Trapeznikov Institute of Control Problems of RAS, Moscow, Russia*

Keywords: container terminal, cargo transportation management, optimization, integer programming, genetic algorithm, MATLAB.

Abstract. Automated and robotic transport carts are used for container transportation at a sea container terminal. Containers must be moved from operational cargo areas to designated container storage locations. In one of the author's works, the problem of optimizing transport flows is solved according to the criterion of minimizing the total transportation duration. This problem is reduced to an integer programming task, for which a genetic algorithm implemented in the MATLAB programming environment is applied.

The present work considers a multi-stage model for optimizing cargo transportation at a container terminal: the transportation process is divided into a sequence of successive stages. At each stage, the composition of transport vehicles on the routes remains unchanged, and when moving from one stage to the next, the transport vehicles can be reassigned to other routes.

Введение

Контейнерные терминалы (КТ) играют важную роль в транспортной логистике [1]. Они обеспечивают перевалку грузов, т.е. их перемещение из

одной транспортной единицы в другую между различными видами транспорта, а также временное хранение, сортировку и консолидацию грузов. Эффективность работы КТ напрямую влияет на скорость обработки грузов и логистические затраты.

Пространство КТ делится на ряд функциональных зон, включая:

- *технологическую территорию* (зону складирования) - большая часть территории терминала, где контейнеры ожидают отправки и где размещаются открытые площадки для штабелирования контейнеров;

- *тыловой грузовой фронт* (зону перегрузки), где контейнеры перегружают на тот или иной транспорт для дальнейшей отправки.

Для перемещения контейнеров между зонами складирования используются контейнерные транспортирующие машины (КТМ). В частности, это могут быть автоматизированные (AGV, Automated Guided Vehicle) и роботизированные (AMR, Automated Mobile Robot) транспортные тележки.

Современный уровень исследований в области автоматизации управления грузопотоками в КТ отражают работы [2-7].

Так, например, в [2] рассматривается задача диспетчеризации AGV в КТ. Предлагаются математические модели и алгоритмы оптимизации для распределения транспортных средств по задачам с целью минимизации общего времени выполнения операций и сокращения холостых пробегов. При этом используются методы линейного программирования. В работе [4] анализируются математические модели и алгоритмы оптимизации маршрутизации транспорта на основе аппарата линейного и целочисленного программирования. В [5] рассматриваются задачи оптимизации маршрутов AGV с учетом пропускной способности дорог. Здесь применяется жадный алгоритм и обсуждается применение генетических алгоритмов. В [6] рассматриваются задачи маршрутизации и диспетчеризации транспорта в КТ. Маршрутизация AGV выполняется между складом и зоной отгрузки с минимизацией общих затрат (время + энергия + износ) методами линейного и целочисленного программирования. В [7] авторы разрабатывают стратегию оптимизации межтерминальных перевозок контейнеров. Ключевая задача - минимизировать затраты и время на перемещение контейнеров между разными терминалами при сохранении высокой пропускной способности. Автоматизация управления КТ направлена на повышение эффективности его работы, позволяя снизить стоимость и сроки обработки контейнеров на территории терминала. Для данной задачи используются специализированные решения класса TOS (Terminal Operating System).

В [8] рассматривается задача перевозки контейнеров в КТ. Предполагается, что заданы маршруты перемещения грузов. Для перевозки всех контейнеров выделено определенное число КТМ. Задача заключается в таком формировании групп AGV на маршрутах, которое является оптимальным по критерию общего рабочего времени грузоперевозок.

Многостадийная модель перевозки контейнеров

Процесс грузоперевозок разбит на последовательность сменяющих друг друга стадий: в каждой стадии состав КТМ на маршрутах не меняется и при переходе от одной фазы к следующей он может перебрасываться на другие маршруты. Задача заключается в оптимизации общего рабочего времени грузоперевозок.

Перейдем к математической формализации задачи.

Введем обозначения: r – число маршрутов для перевозки контейнеров; C_i – число контейнеров в i -м месте загрузки КТМ, $i = 1:r$; p – число стадий в процессе грузоперевозок; $t = 1:p$ – последовательные номера стадий; M – общее число КТМ, задействованных в процессе грузоперевозок; m_{it} – число КТМ, прикрепленных к i -му маршруту на t -й стадии грузоперевозок; N_{it} – число контейнеров, перевезенных по i -му маршруту на t -й стадии грузоперевозок; $\tau_i^+ \tau_i^-$ – соответственно время проезда КТМ по i -му маршруту от места загрузки к месту хранения контейнеров и время возврата к месту погрузки; τ_i – время оборота КТМ на i -м маршруте: $\tau_i = \tau_i^+ + \tau_i^-$; T_{it} – время перевозок по i -му маршруту на t -й стадии грузоперевозок; T_i – длительность перевозок груза на i -м маршруте.

Разумеется

$$m_{it}, N_{it} \in \mathbf{Z}_+, \quad i = \overline{1, r}, t = \overline{1, p}, \quad \mathbf{Z}_+ = \{0, 1, 2, 3, \dots\}.$$

Считаем, что на каждой стадии перевозок могут быть задействованы все имеющиеся КТМ:

$$\sum_{i=1}^r m_{it} \leq M, \quad t = 1:p.$$

В случае, когда в перевозках задействованы все МКТ, имеем

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{r-1} m_{it} &< M - 1, \\ m_{rt} &\geq 1, \quad t = 1:p. \end{aligned} \tag{1}$$

Учтем, что весь груз должен быть перемещен в места складирования:

$$\sum_{t=1}^p N_{it} = C_i, \quad i = 1:r.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{p-1} N_{it}(t) &\leq C_i, \quad i = 1:r, \\ N_{ip} &= C_i - \sum_{t=1}^{p-1} N_{it}, \quad i = 1:r. \end{aligned} \tag{2}$$

Для перевозки груза по заданному маршруту может потребоваться несколько ходок (туда и обратно) каждой КТМ. Следует отметить, что N_{it} может быть не кратно m_{it} .

Наиболее длительное движение КТМ по всем маршрутам для t -й стадии перевозочного процесса определяется условием

$$T_t = \max_{0 \leq i \leq r} T_{it}. \quad (3)$$

Следовательно, общее время всех перевозок равно

$$T_{\text{total}} = \sum_{t=1}^p T_t. \quad (4)$$

Задача оптимизации грузоперевозок заключается в минимизации общего времени длительности перевозочного процесса:

$$T_{\text{total}} \rightarrow \min.$$

Следует отметить, что если $N_{it} = 0$, то на t -й стадии перевозочного процесса контейнеры по i -му маршруту не перевозятся.

Для случая $N_{it} > 0$ введем обозначения для частного и остатка от деления $N_{it} - 1$ на m_{it} :

$$\mu_{it} = [(N_{it} - 1) / m_{it}], \quad (5)$$

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

Заметим, что число ходок всех КТМ по i -му маршруту равно $\mu_{it} + 1$, причем, при последней ходке КТМ не возвращаются к месту погрузки контейнеров. Таким образом,

$$N_{it} = \mu_{it} m_{it} + v_{it},$$

где $0 < v_{it} \leq m_{it}$.

Время перемещения партии контейнеров на отдельных маршрутах находится по формулам:

$$T_{it} = \tau_i \mu_{it} + \tau_i^-, \quad i = 1:r, t = 1:p. \quad (6)$$

Алгоритмизация задачи оптимизации грузоперевозок

Далее полагаем, что $M \geq r > 1$, $p > 1$, $n = p(r-1) + r(p-1)$, $n_- = p(r-1)$.

В качестве неизвестных выберем n целочисленных переменных:

$$x_k \in \mathbf{Z}_+ \quad (k = \overline{1, n}), \quad (7)$$

где

$$x_k = m_{it} \quad (k = \overline{1, n}) \Leftrightarrow k = (t-1)r + i, \quad t = \overline{1, p}, i = \overline{1, r-1};$$

$$x_k = N_{it} \quad (k = \overline{n_- + 1, n}) \Leftrightarrow k = n_- + (t-1)r + i, \quad t = \overline{1, p-1}, i = \overline{1, r}.$$

Введем n -мерный вектор-столбец неизвестных:

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

Примем следующие ограничения рассматриваемой задачи:

$$x_L \leq x_i \leq x_U^{(1)}, \quad i=1:n_-, \quad x_L \leq x_i \leq x_{iU}^{(2)}, \quad i=n_-+1:n, \quad (8)$$

где

$$x_L = 0, \quad x_U^{(1)} = M - 1,$$

$$x_{kU}^{(2)} = C_i (k = \overline{n_- + 1, n}) \Leftrightarrow k = n_- + (t-1)r + i, \quad t = \overline{1, p-1}, i = \overline{1, r}.$$

Заметим, что

$$N_{ip} = C_i, \quad i = \overline{1, r}.$$

Введем матричные обозначения: E_k – единичная матрица k -го порядка; $O_{k,l}$ – нулевая матрица размера $k \times l$; $U_{k \times l}$ – матрица размера $k \times l$, все элементы которой равны единице; $\otimes$ – кронекерово произведение матриц.

Неравенства (1) можно записать в векторно-матричной форме:

$$A_1 x < b_1. \quad (9)$$

где $A_1 \in \mathbf{R}^{p \times n}$ – $p \times n$ -матрица, а $b_1 \in \mathbf{R}^{p \times 1}$ – вектор-столбец, определяемые формулами

$$A_1 = [E_p \otimes U_{1 \times (r-1)} \mid O_{p \times (n-n_1)}], \quad b_1 = (M-1) \cdot U_{p \times 1}.$$

Неравенства (2) также запишем в векторно-матричной форме

$$A_2 x \leq b_2. \quad (10)$$

где $A_2 \in \mathbf{R}^{r \times n}$ – $p \times n$ -матрица, а $b_2 \in \mathbf{R}^{r \times 1}$ – вектор-столбец:

$$A_2 = [O_{r \times n_-} \mid U_{1 \times (p-1)} \otimes E_r], \quad b_2 = \text{col}(C_1, C_2, \dots, C_r).$$

Введем блочные матрицы

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}.$$

Тогда неравенства (9) и (10) можно объединить:

$$Ax < b. \quad (11)$$

Критерий эффективности (4) является n -мерной функцией

$$T_{\text{total}} = F(x),$$

определяемой соотношениями (3), (6), (5).

Таким образом, рассматриваемая оптимизационная задача

$$F(x) \rightarrow \min \quad (12)$$

с учетом ограничений (7), (8), (11) является целочисленной нелинейной задачей, для решения которой можно применить известные метаэвристические алгоритмы, включая генетический алгоритм в среде MATLAB в пакете Global Optimization Toolbox.

Продemonстрируем результат решения оптимизационной задачи (12), (7), (8), (11) на следующем модельном примере: число маршрутов $r = 3$, $M = 30$, $p = 2$, $\tau_i^+ = \tau_i^- = \tau_i$ ($i = \overline{1, r}$).

Остальные исходные данные приведены в таблице 1.

Табл. 1. Исходные данные

i	1	2	3
τ_i	10	3	8
C_i	250	350	150

Результаты расчета *оптимального распределения* КТМ по маршрутам имеют следующий вид:

$x_{opt} = [7, 12, 17, 6, 12, 80, 33];$
 $m_{opt} = [7, 17; 12, 6; 11, 7];$
 $T_{opt} = [30, 270; 39, 267; 40, 264];$
 $T_{total_opt} = 310,$

а их неоптимальное распределение по маршрутам имеет вид:

$x_{test} = [11\ 5\ 10\ 14\ 150\ 100\ 100];$
 $[m_{test}, T_{test}, T_{total_test}] = FT(x_{test});$
 $m_{test} = [11, 10; 5, 14; 14, 6];$
 $T_{test} = [270, 190; 117, 105; 120, 136];$
 $T_{total_test} = 460.$

Заключение

В статье рассматривается задача оптимального распределения КТМ по заданным маршрутам при многостадийной организации процесса перевозки контейнеров. В качестве критерия оптимальности принимается общее рабочее время грузоперевозок. Дана формализация поставленной задачи как задачи целочисленного программирования. Приведен модельный пример решения поставленной оптимизационной задачи с использованием генетического алгоритма математического пакета MATLAB.

Список литературы

1. Апатцев В.И., Левин С.Б., Николашин В.М. и др. Логистические транспортно-грузовые системы: учебник / Под ред. В.М. Николашина. – М.: Академия, 2003. – 302с.
2. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Соляков О.В., Семёнов А.Д. Морские контейнерные перевозки. – М.: Моркнига, 2019. – 412 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. Edirisooriya T., Bandara Y.M. An Optimization Strategy for Inter Terminal Transportation of Containers: Case of Port of Colombo // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2017, vol. 11, 18 p.
8. Филимонов А.Б., Пак А.О. Оптимизация распределения транспортных потоков в контейнерном терминале // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2023. – №37. – С. 57-62.

References

1. Apattsev V.I., Levin S.B., Nikolashin V.M. and others. Logistic transport and cargo systems: textbook. Edited by V.M. Nikolashin. – M.: Akademiya Publ., 2003. – 302 p.
2. Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Solyakov O.V., Semyonov A.D. Marine Container Transportation. – M.: Morkniga, 2019. – 412 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Edirisooriya T., Bandara Y.M. An Optimization Strategy for Inter Terminal Transportation of Containers: Case of Port of Colombo // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2017, vol. 11, 18 p.
8. Filimonov A.B., Pak A.O. Optimization of transport flow distribution in a container terminal // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023, iss. 37, pp. 57-62.

Филимонов Александр Борисович – доктор технических наук, профессор	Filimonov Aleksandr Borisovich – doctor of technical sciences, professor
Филимонов Николай Борисович – доктор технических наук, профессор	Filimonov Nikolay Borisovich – doctor of technical sciences, professor
nbfilimonov@mail.ru	

Received 20.06.2026