

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАКЕТОВ ТРАНСПОРТНЫХ УСЛУГ

Савушкин С.А.

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, г. Москва, Россия
ssavushkin@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены факторы, управляющие действиями субъектов транспортного процесса при формировании и исполнении пакетов транспортных услуг. Приводятся математические определения и постановки задач, лежащие в основе алгоритма моделирования пакетов заказов транспортных услуг. Ставится и решается задача минимизации перемещений для выполнения заданного пакета заказов.

Ключевые слова: моделирование, транспорт, услуга, компания, каталог, качество, логистика, алгоритм, симплекс-метод, пакет

Выполнение комплексных транспортных услуг с высоким уровнем логистики требует согласованных действий нескольких компаний или подразделений компании. С другой стороны, процесс цифровой трансформации, переход к цифровой экономике и цифровому транспорту [1] предполагает изучение и систематизацию моделей и механизмов такого взаимодействия. Одним из направлений такого взаимодействия является группировка однотипных базисных услуг в пакеты услуг, исполнение которых может дать экономию, по сравнению с тем, если исполнять эти услуги по отдельности.

В работе [2] строятся модели потока движения в крупномасштабной мультимодальной транспортной сети, рассматриваются вопросы оптимизации ее производительность. В статье [3] рассматривается проблема транспортировки в мультимодальной сети с возможностью слияния и разделения потоков. Проблемы планирования и составления графиков для удовлетворения спроса на железнодорожные перевозки, алгоритмы объединения требований в блоки, закрепление блоков за поездами, функционирование звездообразной транспортной системы, состоящей из узлов и связывающих путей «спиц» рассмотрены в [4]. В статье [5] рассмотрена проблема перераспределения порожних грузовых вагонов. Учитывается не только стоимость отправки вагонов из пункта отправления в пункт назначения, но и стоимость операций в узлах сети, которая зависит от количества отправленных групп вагонов. Проблемы размещения порожних грузовых вагонов, оптимизации размеров парка вагонов рассматриваются в [6]. Предлагается задача целочисленного линейного программирования для определения оптимального компромисса между количеством грузовых вагонов и затратами, связанными с распределением порожних транспортных средств. Методы исследования операций применяются в [7] для решения задач устойчивого планирования в сложной транспортной системе. Решается задача перехода от начального пункта до пункта

назначения через другие промежуточные пункты, через которые проходят маршруты между двумя пунктами. В многоцелевой задаче оптимизации лицо, принимающее решение, получает возможность эффективного выбора лучшего маршрута по компромиссу между критериями, такими как минимизация стоимости перевозки, продолжительности перевозки, максимизация качества обслуживания и др.

Подходы к цифровой трансформации на транспорте, связанные с построением интеллектуального каталога транспортных услуг изложены в [8]. Процесс передачи услуг в цифровой каталог является трудоемким и в [9] рассматриваются вопросы его оптимизации. Вопросы оптимизации структур управления, общие вопросы методологии, разработки и экспертизы больших транспортных систем рассматриваются в [10-11].

Логистическая компания является исполнителем по отношению к грузоотправителю и заказчиком по отношению к перевозчику. Взаимодействуя с грузоотправителями, она формирует пакеты комплексных мультимодальных транспортных услуг. После их декомпозиции и перегруппировки формируются пакеты базовых услуг, которые, далее, исполняются перевозчиками. При формировании пакета заказов исполнителя в ходе взаимодействия с заказчиком должны быть согласованы требования к стоимости перевозки груза и к значениям показателей качества доставки груза.

Пусть имеется список $\{(w_i, t_i, u_i, v_i)\}$ заказов, где $i = \overline{1, n}$ – номер заказа, на перевозку грузов из пункта u_i в пункт v_i , который начинается в момент времени отправления t_i , объем груза – w_i , n – число заказов. Будем считать, что имеется функция предпочтений грузоотправителя $g_i = g_i(d_i, w_i, l_i, K_i)$, где d_i – стоимость заказа, l_i – расстояние перевозки, K_i – интегральный показатель качества исполнения услуги, полученный, например, сверткой всех частных показателей. Свои требования к качеству логистические компании вырабатывают на основе требований грузоотправителя.

Пусть имеются m исполнителей. Будем считать, что для i -го заказа с j -м исполнителем предварительно согласованы значения стоимости d_{ij} и уровня качества K_{ij} . Необходимое условие того, что сделка для заказчика приемлема, задается неравенством: $g_i(d_{ij}, w_i, l_i, K_{ij}) \geq 0$. В противном случае, считаем, что заказчик отказался от данного исполнителя, например, выбрал другого исполнителя или другой вид транспорта.

Множество \bar{J}_i наилучших из приемлемых исполнителей, которым заказчик готов предложить i -й заказ и пакет предложений \bar{I}_j для j -го исполнителя определяются формулами (1):

$$(1) \quad \bar{J}_i = \arg \max_{j \in J_i} g_i(d_{ij}, w_i, l_i, K_{ij}), i = \overline{1, n}, \bar{I}_j = \{i : j \in \bar{J}_i\}, j = \overline{1, m}.$$

Исполнение пакета заказов по единому плану в ряде случаев позволяет использовать производственные возможности более эффективно, чем исполнение заказов независимо. Перевозчики оптимизируют перемещения транспортных средств, а логистические компании могут повысить эффективность, например, группируя мелкие отправки. Обозначим P – предикат, определяющий наличие такого плана и будем писать $P_j(I) = \text{true}$ или просто $P_j(I)$, если такой план для пакета заказов I имеется.

Если выполнение пакета заказов производится по единому плану, то оценить затраты, а значит и прибыль отдельных заказов может оказаться невозможным. Прибыль, получаемая j -м исполнителем от всего пакета, вычисляется по формуле: $f_j(I_j) = \sum_{i \in I_j} f_{ij} - r_0_j = \sum_{i \in I_j} d_{ij} - r_j(I_j) - r_0_j, j = \overline{1, m}$, где

$r_j(I_j)$ – затраты исполнителя на выполнение всего пакета заказов; r_0_j – затраты на обеспечение основной деятельности компании. Приемлемым пакетом для j -ой компании может считаться пакет \bar{I}_j , для которого выполняется условие формулы (2):

$$(2) \quad f_j(\bar{I}_j) \geq 0, j = \overline{1, m}.$$

Задача формирования максимально прибыльного пакета заказов решается как задача оптимизации (3) с ограничениями (2), (4). Эта задача является одним из вариантов «задачи о ранце», которая является NP-сложной.

$$(3) \quad f_j(\bar{I}_j) \xrightarrow{\bar{I}_j \subseteq \bar{I}_j, P_j(\bar{I}_j)} \max, j = \overline{1, m}.$$

Для поддержания нормального ритма работы компании, при выполнении пакета заказов, необходим некоторый минимальный объем денежных средств D_j^{\min} . Объемы расходов не должны превышать некоторое допустимое значение r_j^{\max} . Условия нормального ритма работы j -й компании при выполнении пакета \bar{I}_j можно записать в виде следующих неравенств (4):

$$(4) \quad \sum_{i \in \bar{I}_j} d_{ij} \geq D_j^{\min}, r_j(\bar{I}_j) \leq r_j^{\max}, j = \overline{1, m}.$$

После того как исполнители сформировали свои пакеты заказов, множество исполнителей \bar{J}_i ,

которые готовы выполнить i -й заказ определяется формулой: $\bar{J}_i = \{j = \overline{1, m} : i \in \bar{I}_j\}, i = \overline{1, n}$.

На основе приведенных определений и формул разработан алгоритм моделирования взаимодействия заказчиков с исполнителями, в ходе которых формируются пакеты заказов, а также определяются заказы, которые не могут быть выполнены. Задачу планирования исполнения пакета заказов рассмотрим на примере планирования перемещения порожних железнодорожных вагонов (или других транспортных средств) по транспортной сети. Обозначим U – множество вершин графа транспортной сети. Будем рассматривать задачу перемещений на дискретном временном отрезке длины T , состоящем из дискретных моментов времени, обозначаемых целыми числами $\{1, \dots, T\}$.

Пусть дан пакет заказов \bar{I}_j j -ой компании. Потребности в порожних вагонах или их избыток

можно выразить с помощью матрицы балансов для данного пакета. Элементами этой матрицы являются значения β_u^t для каждого момента времени t и каждого узла сети u , вычисляемые по формуле: $\beta_u^t = \sum_{k \in \bar{I}_j, v_k = u, t_k + t(u, v) \leq t} w_k - \sum_{k \in \bar{I}_j, u_k = u, t_k \leq t} w_k$, $u \in U, t = \overline{1, T}$, где $t(u, v)$ – время перемещения между

вершинами сети u и v . Обозначим: x_{uv}^t – количество порожних вагонов, отправляемых в момент времени t из пункта u в пункт v , $z_u, u \in U$ – распределение порожних вагонов по узлам сети в начальный момент времени. Минимально необходимое количество вагонов и их распределение по сети можно определить, решив задачу оптимизации (6) при ограничениях (5):

$$(5) \quad \sum_{v \in U} (\sum_{\tau \leq t} x_{uv}^\tau - \sum_{\tau \leq t - t(u, v)} x_{vu}^\tau) - z_u \leq \beta_u^t, u \in U, t = \overline{1, T}.$$

$$(6) \quad \sum_{u \in U} z_u \xrightarrow{z_u, x_{uv}^t, u, v \in U, t = \overline{1, T}} \min.$$

Для обеспечения возможности вагонного парка j -й компании выполнения данного пакета заказов должны выполняться ограничения (5) при известных значениях $z_u, u \in U$. Элементы матрицы балансов в этом случае равны: $z_u + \beta_u^t, u \in U, t = \overline{1, T}$. Формула (7) описывает задачу минимизации перемещений порожних вагонов:

$$(7) \quad \sum_{u, v \in U} (\sum_{t=1}^T x_{uv}^t * t(u, v)) \xrightarrow{x_{uv}^t, u, v \in U, t = \overline{1, T}} \min.$$

В приведенных постановках задач обычный симплекс-метод дает целочисленные решения. Выполнен расчет модельного примера, иллюстрирующего алгоритмы формирования пакетов и планирования исполнения.

Исходя из количества вагонов, количества перемещений вагонов и полученного дохода можно оценить эффективность компаний. Дальнейшее развитие модели предполагает изучение механизмов перетекания заказов от менее эффективных к более эффективным компаниям с изменением стоимости, перетекания вагонов из компаний с малым числом заказов к компаниям с большим числом заказов. Многократное решение данной задачи позволяет исследовать динамику этих процессов при различных начальных условиях.

Литература

1. Malygin I., Komashinsky V., and Tsyganov V. “International Experience and Multimodal Intelligent Transportation System of Russia“. Proceedings of the 2017 Tenth Conference "Management of Large-Scale System Develop-

- ment". Moscow: IEEE, 2017. pp. 1-5. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8109658/>
DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109658.
2. *Kwami Sossoe*. Modeling of multimodal transportation systems of large networks. Automatic Control Engineering. Université Paris-Est, 2017. English. <NNT : 2017PESC1196>. <tel-01748442>.
3. *Moccia, Luigi & Cordeau, Jean-François & Laporte, Gilbert & Ropke, Stefan & Maria Pia, Valentini*. (2011). Modeling and Solving a Multimodal Transportation Problem with Flexible-time and Scheduled Services. Networks. 57. 53-68. 10.1002/net.20383.
4. *Berg, Sven and Dieter Veldhuis*. "Demand-to-Train Allocation in a Hub-and-Spoke Network." (2014).
5. *Joborn et al.*: Freight Car Distribution in Scheduled Railways Transportation Science 38(2), pp. 121–134, ©2004 INFORMS
6. *Hungerländer, Philipp and Sebastian Steininger*. "Fleet Sizing and Empty Freight Car Allocation." (2018).
7. *Mnif, M. and Bouamama, S.* A Multi-objective Mathematical Model for Problems Optimization in Multi-modal Transportation Network. DOI: 10.5220/0006472603520358 In Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2017) - Volume 1, pages 352-358 ISBN: 978-989-758-263-9
8. *V. V. Tsyganov and S. A. Savushkin*, "Intellectual Catalog of Digital Rail Transport Services," 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, Russia, 2018, pp. 1-8. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570150
9. *Tsyganov V., and Savushkin S.* Optimization of the Service Catalog of a Large-Scale Corporation/ Proceedings of 2017 Tenth Conference "Management of Large-Scale System Development". Moscow: IEEE, 2017. pp. 1-5. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109699
10. *S. A. Savushkin*, "Equalization of Management Complexities of Transport Networks," 2018 Eleventh International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD, Moscow, Russia, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/MLSD.2018.8551787
11. *Цыганов В.В., Малыгин И.Г., Еналеев А.К., Савушкин С.А.* Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза - СПб: ИПТ РАН, 2016.-216с (ISBN 978-5-9908209-3-7).