УДК 519.857

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕВОЗОК НА ОДНОПУТНОМ УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ С РАЗЪЕЗДОМ

А.А. Лазарев[1,2,3,4], Е.Г. Мусатова[1], И.А. Тарасов[1,2]
[1]Институт проблем управления РАН, Москва, Россия;
[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
[3]НИУ «Высшая школа экономики»;
[4]Московский физико-технический институт (ГУ).

В работе предлагается алгоритм решения задачи планирования движения поездов между двумя станциями, соединенными однопутной железной дорогой с разъездом. Трудоёмкость алгоритма составляет $O(n^2)$ операций, где n — количество поездов.

Введение

Рассматривается задача построения оптимального расписания движения поездов по однопутному участку железной дороги. Имеется два множества поездов, N_1 и N_2. Поезда множества N_1 следуют со станции 1 на станцию 2, поезда множества N_2 следуют в обратном направлении со станции 2 на станцию 1. Между станциями находится разъезд для пропуска встречных поездов. В разъезде есть главный путь для безостановочного движения поездов и один дополнительный путь для пропуска встречных поездов. Необходимо построить расписание движения поездов, т.е. установить порядок следования поездов с первой и второй станций.

На практике рассматриваемая задача возникает на обособленных участках железнодорожной сети, например, узкоколейных железных дорогах, использующихся для межцеховых перевозок на промышленных предприятиях. Другая область приложения — формирование расписания поездов в случае закрытия второго участка железнодорожного пути (так называемая задача об «узких местах», или «bottleneck»).

Обзор моделей и методов железнодорожного планирования может быть найден, например, в [1-3]. В данных публикациях обосновывается важность задач оптимизации движения на однопутных железных дорогах как с практической, так и с теоретической точки зрения. Действительно, данные задачи привлекают большое внимание специалистов, что подтверждается растущим с каждым годом количеством публикаций по этой тематике.

В работе [4] впервые была показана связь задач построения расписания на однопутной железной дороге с классической задачей теории расписаний с несколькими приборами. Данный подход, в котором участки пути выступают в роли приборов, а поезда — в роли работ, неоднократно применялся и в других публикациях (см. [5-8]).

Данная работа является продолжением исследований, начатых авторами в [9]. Для минимизации максимального временнóго смещения и суммы взвешенных моментов окончания перевозок на основе метода динамического программирования предлагается алгоритм решения трудоёмкости $O(n^2)$ операций, где n — количество поездов на станциях.

1. Математическая постановка задачи

Рассматривается модель, в которой разъезд имеет один дополнительный путь, вмещающий один поезд (будем считать, что любой поезд помещается в разъезд). Схема разъезда приведена на рис. 1. Путь разделен разъездом на два сегмента, назовем сегмент между станцией 1 и разъездом сегментом A (слева от разъезда на рис. 1), а между разъездом и станцией 2 – сегментом B (справа от разъезда на рис. 1).

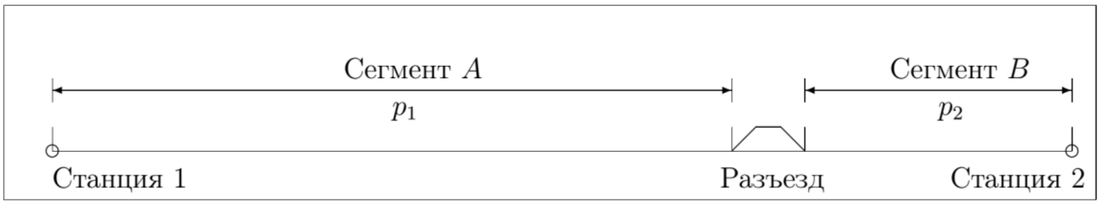

Рис.1. Схема пути

Необходимо для каждого поезда из N_1 и N_2 составить расписание, т.е. указать время отправления и время стоянки в разъезде.

Перечислим исходные данные задачи:

- между станциям находится один разъезд, вместимость которого — один поезд;
- скорость движения поездов одинакова и постоянна;
- время прохождения поездом участков пути A и B равно соответственно p_1 и p_2;
- без потери общности будем предполагать, что $p_1 \geq p_2$;
- количество поездов множества N_1 равно n_1, множества N_2 — n_2;
- для каждого поезда i, отправляющегося со станции s, $i \in N_s$, $s \in \{1, 2\}$, известны директивный срок поезда d_s^i и весовой коэффициент w_s^i (характеризует важность поезда);
- все поезда доступны для отправления в начальный момент времени 0.

Технические ограничения и требования безопасности в модели описываются следующим образом:

- ни на одном из сегментов не могут одновременно находиться поезда, отправляющиеся с разных станций;
- задано минимальное время между отправлением двух поездов с одной станции и прибытием двух поездов к разъезду;
- есть минимальный интервал между прибытием поезда на станцию и отправлением поезда с той же станции.

Будем считать в двух последних ограничениях интервал безопасности одинаковым и обозначим его как β, $\beta \le p_2 \le p_1$.

Необходимо составить оптимальное расписание движения поездов, т.е. указать:

- время отправления поезда i, идущего с s-й станции, — S_s^i, $i \in N_s$, $s \in \{1,2\}$;
- время стоянки поезда i, идущего со станции s, в разъезде — τ_s^i, $i \in N_s$, $s \in \{1,2\}$.

Обозначим время прибытия поезда i, идущего с s-й станции, как C_s^i, тогда:

$$C_s^i = S_s^i + p_1 + \tau_s^i + p_2. \tag{1.1}$$

Будем рассматривать следующие целевые функции:

1) минимизация максимального временнóго смещения
$$L_{max} = \max_{i \in N_s,\ s \in \{1,2\}} \{C_s^i - d_s^i\}; \tag{1.2}$$
2) минимизация взвешенной суммы моментов прибытия поездов на станции назначения
$$\sum w_j C_j = \sum_{i \in N_s,\ s \in \{1,2\}} w_s^i C_s^i. \tag{1.3}$$

В соответствии с общепринятой трехпозиционной системой обозначений [10], для данных задач можно ввести краткие обозначения

$$STRSP2\ \textit{-siding}||L_{max},$$
$$STRSP2\ \textit{-siding}||\sum w_j C_j,$$

где $STRSP2$ — Single Track Railway Scheduling Problem with two stations.

2. Алгоритм динамического программирования

Выбор порядка движения поездов с разных станций на практике определяется диспетчером. Перечислим все возможные решения диспетчера:

- если в разъезде нет поезда:
  1) отправить поезд со станции 1 без остановки в разъезде;

2) отправить поезд со станции 2 без остановки в разъезде;
3) отправить поезд со станции 1 в разъезд, кроме того, отправить поезд со станции 2 без остановки в разъезде (остановка в разъезде целесообразна только для пропуска поездов с другой станции);
4) отправить поезд со станции 2 в разъезд, кроме того, отправить поезд со станции 1 без остановки в разъезде;

- если в разъезде есть поезд со станции 1:

5) отправить поезд со станции 2 без остановки в разъезде, поезд в разъезде не покидает его;
6) отправить поезд из разъезда на станцию 2 в момент освобождения участка B;

- если в разъезде есть поезд со станции 2:

7) отправить поезд со станции 1 без остановки в разъезде, поезд в разъезде не покидает его;
8) отправить поезд из разъезда на станцию 1 в момент освобождения участка A.

Таким образом, диспетчер определяет порядок движения поездов, последовательно выбирая для каждого поезда один из приведенных вариантов, зависящих от того, занят разъезд или нет. На основе вышеприведенных стратегий диспетчера вводятся состояния системы.

Алгоритм динамического программирования последовательно решает подзадачи со всеми возможными количествами поездов на первой и второй станциях, начиная с минимальных значений, с учетом всех возможных состояний системы в начале движения поездов в подзадачах.

Поскольку для задачи порядок движения поездов на каждой станции может быть определен заранее (для $STRSP2\text{ -}siding||L_{max}$ — в порядке неубывания директивных сроков, а для задачи $STRSP2\text{ -}siding||\sum w_jC_j$ — в порядке неубывания весов), то в алгоритме динамического программирования достаточно перебрать $O(n_1n_2)$ вариантов состояний системы.

Заключение

Разработан алгоритм динамического программирования для двух целевых функций: максимального временно́го смещения и суммы взвешенных моментов окончания перевозок. Предложенный метод учитывает специфические свойства задачи, такие как правила перехода между состояниями и неизменность порядка отправления поездов при оптимальном расписании для данных целевых функций при сдвиге расписания на произвольный временно́й интервал.

В дальнейшем планируется разработка алгоритмов решения для задач с другими целевыми функциями, а также с дополнительными свойствами модели, такими как интервалы доступности движения на участках пути, различные моменты поступления на станции отправления и скорости движения поездов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 15-07-03141, № 15-07-07489)

Список литературы

1. Harrod, S.S. A tutorial on fundamental model structures for railway timetable optimization / Steven S. Harrod // Surveys in Operations Research and Management Science. — 2012. — V. 17, № 2. — P. 85 – 96.

2. Oliveira, E.S. Solving Single-Track Railway Scheduling Problem Using Constraint Programming: Ph.D. thesis / University of Leeds. — 2001.

3. Railway track allocation: Models and methods / R.M. Lusby, J. Larsen, M. Ehrgott, D. Ryan // OR Spectr. — 2011. — V. 33, № 4. — P. 843-883.

4. Szpigel, B. Optimal train scheduling on a single line railway / B. Szpigel // Oper Res. — 1973. — P. 344–351.

5. Brucker, P. Scheduling Algorithms / P. Brucker. — 3rd edition. — Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2001.

6. Gafarov, E.R. Two-station single-track railway scheduling problem with trains of equal speed / E.R. Gafarov, A. Dolgui, A.A. Lazarev // Computers and Industrial Engineering. — 2015. — V. 85, P. 260-267.

7. Harbering, J. Single track train scheduling. — Institute of Numerical and Applied Mathematics. — 2015. — preprint, 18 pages.

8. Sotskov, Y. Shifting bottleneck algorithm for train scheduling in a single-track railway / Y. Sotskov, O. Gholami // Proccedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems, Part 1, Bucharest/Romania. — 2012. — P. 87–92.

9. Лазарев, А.А. Составление оптимального расписания движения поездов между двумя станциями, соединенными однопутной железной дорогой с разъездом / А.А. Лазарев, И.А. Тарасов // Управление большими системами. — 2015. — № 58. — С. 244–284.

10. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey / R.L. Graham, E.L. Lawler, J.K. Lenstra, A.H.G. Rinnooy Kan // Annals of Discrete Mathematics. — 1979. — V. 5. — P. 287–326.