

Методы оптимизации в задачах управления пассажирами и грузовыми перевозками РЖД*

д.ф.-м.н., проф. Лазарев А.А.

Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Московский государственный физико-технический университет



*Работа выполнена при поддержке гранта 13-08-13190 офи_м_РЖД.

Январь 2016

Состав лаборатории

Руководитель:

д.ф.-м.н. Лазарев А.А.

Исполнители:

В.н.с., д.т.н. Ульянов М.В.

С.н.с., к.ф.-м.н. Гафаров Е.Р.

С.н.с., к.ф.-м.н. Мусатова Е.Г.

С.н.с., к.т.н. Некрасов И.В.

Вед. инженер Ефимова Т.С.

Ст. инженер-программист Хуснуллин Н.Ф.

Вед. инженер Архипов Д.И.

Инженер Герасимов А.Р.

Техник Гущина В.П.

Техник Петров А.С.

Техник Сологуб А.А.

Математик Правдивец Н.А.

Математик Тарасов И.А.

Математик Морозов Н.Ю.

Техник Логинов Н.А.

Техник Гущина В.П.

Методы решения задач

- ▶ Методы **динамического программирования**, в т.ч. разработанный в лаборатории Графический метод

Методы решения задач

- ▶ Методы **динамического программирования**, в т.ч. разработанный в лаборатории Графический метод
- ▶ Методы **целочисленного линейного программирования**, в т.ч. метод генерации колонок для задач большой размерности

Методы решения задач

- ▶ Методы **динамического программирования**, в т.ч. разработанный в лаборатории Графический метод
- ▶ Методы **целочисленного линейного программирования**, в т.ч. метод генерации колонок для задач большой размерности
- ▶ Метод **изменения параметров** для получения оценок на точность решения

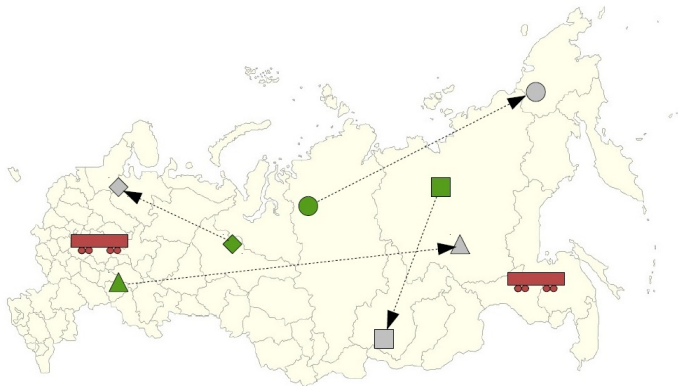
Методы решения задач

- ▶ Методы **динамического программирования**, в т.ч. разработанный в лаборатории Графический метод
- ▶ Методы **целочисленного линейного программирования**, в т.ч. метод генерации колонок для задач большой размерности
- ▶ Метод **изменения параметров** для получения оценок на точность решения
- ▶ Метод **"наполнения множеств"**

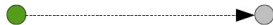
Задачи железнодорожного планирования

- ▶ Задача управления парком грузовых железнодорожных вагонов
- ▶ Задачи формирования железнодорожных составов и расписания их движения
- ▶ Задачи планирования движения поездов между двумя станциями, соединенными однопутной железной дорогой
- ▶ Задача планирования движения поездов по однопутной железной дороге с разъездом

Задача управления парком грузовых железнодорожных вагонов



исходное расположение вагонов



транспортные заказы

Постановка задачи

Исходные данные

- ▶ Железнодорожная сеть (множество станций)
- ▶ Исходное расположение вагонов
- ▶ Транспортные заказы и соответствующие **прибыли**
- ▶ **Стоимость:** стоимость транспортировки и стоимость простоя вагонов

Постановка задачи

Исходные данные

- ▶ Железнодорожная сеть (множество станций)
- ▶ Исходное расположение вагонов
- ▶ Транспортные заказы и соответствующие **прибыли**
- ▶ **Стоимость**: стоимость транспортировки и стоимость простоя вагонов

Найти: **оперативный план**

- ▶ Множество принятых заявок на транспортировку и сроки их выполнения
- ▶ Маршруты пустых и загруженных вагонов для выполнения заявок

Цель

Максимизация общей прибыли

Первое тестирование на реальных данных

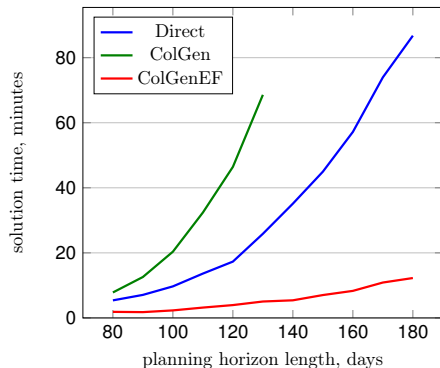
Было использовано **3 подхода к решению** с тремя различными формулировками задачи.

Номер примера	x3	x3double	5k0711q
Станций	371	371	1'900
Заказов	1'684	3'368	7'424
Типов вагонов	17	17	1
Вагонов	1'013	1'013	15'008
Источников	791	791	11'215
Горизонт планирования, дней	37	74	35
Число вершин, тыс.	62	152	22
Число дуг, тыс.	794	2'846	1'843
Время решения для Direct	20s	1h34m	55s
Время решения для ColGen	22s	7m53s	8m59s
Время решения для ColGenEF	3m55s	>2h	43s

Увеличение горизонта планирования

1'025 станций, до 6'800 заказов, 11 типов вагонов, 12'651 вагонов,
и 8'232 источников.

≈ 300 тысяч вершин и 10 миллионов дуг.



Горизонт	Direct	ColGenEF
80	5m24s	1m52s
90	7m05s	1m47s
100	9m42s	2m19s
110	13m38s	3m11s
120	17m19s	3m57s
130	25m52s	5m03s
140	35m08s	5m25s
150	44m58s	7m02s
160	57m11s	8m19s
170	1h13m58s	10m53s
180	1h26m46s	12m16s

Задачи формирования железнодорожных составов и расписания их движения

Параметры заказов

- ▶ N – множество заказов-вагонов;
- ▶ O_j – заказ с порядковым номером j , элемент множества N ;
- ▶ w_j – вес (ценность) заказа O_j ;
- ▶ K_j – тип заказа O_j ;
- ▶ r_j – момент поступления заказа O_j , на станцию отправления;
- ▶ d_j – директивный срок O_j .

Задачи формирования железнодорожных составов и расписания их движения

Параметры поездов

- ▶ $k(m, i)$ – количество вагонов типа m в составе i ;
- ▶ $p_i(t)$ – время движения поезда i между станциями;
- ▶ α – время, разделяющее отправку двух последовательных поездов;
- ▶ U – множество интервалов допустимой отправки.

Задачи формирования железнодорожных составов и расписания их движения

Расписание

- ▶ π – расписание;
- ▶ $T_i(\pi)$ – множество заказов-вагонов, перевозимых поездом с порядковым номером i ;
- ▶ $R_i(\pi)$ – момент отправления поезда с порядковым номером i ;
- ▶ $\varphi_j(t)$ – семейство монотонно неубывающих функций, $j = 1, \dots, n$.

Целевая функция:

$$\min_{\pi \in \Pi} \max_{j=1, n} \varphi_j(C_j(\pi)).$$

Задача с фиксированными моментами отправления и прибытия

Свойства

- ▶ моменты отправления и прибытия поездов известны;
- ▶ известно количество и тип вагонов, перевозимых каждым из поездов;
- ▶ требуется распределить n заказов по q поездам.

Задача с нефиксированными моментами отправления и прибытия

Свойства

- ▶ моменты отправления и прибытия не известны;
- ▶ известно количество и тип вагонов, перевозимых каждым из поездов;
- ▶ дано множество из V временных интервалов в которые поезд может быть отправлен;
- ▶ известна функция времени нахождения поезда i в пути $p_i(t)$;
- ▶ требуется распределить n заказов по q поездам и найти моменты отправления R_j .

Задачи формирования железнодорожных составов и расписания их движения

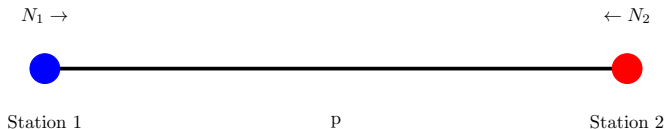
Используемый метод

Метод "наполнения множеств эвристические алгоритмы

Полученные результаты

1. Для задачи с фиксированными моментами отправления для двух станций: **полиномиальный алгоритм** трудоёмкостью от $O(qn^2 \log n)$, где n — количество заказов, q — количество поездов.
2. Для задачи с нефиксированными моментами отправления для двух станций: **полиномиальный алгоритм** решения бикритериальной задачи трудоёмкостью $O(n^2 \max\{n \log n, q \log v\})$, где n — количество заказов, q — количество поездов, v — количество интервалов в которые возможно отправление поездов.
3. Для задачи с нефиксированными моментами отправления для нескольких станций: **эвристические алгоритмы** различной трудоёмкости для различных критериев и точности нахождения решения.

Задачи движения поездов между двумя станциями, соединенными однопутной железной дорогой



Исходные данные

- ▶ На станции 1 находятся n_1 поездов и n_2 поездов на станции 2.
- ▶ p – время прохождения поездами пути между станциями.
- ▶ β – минимальное время между моментами отправления двух поездов с одной станции.
- ▶ d_i^s – директивный срок поезда i со станции s , $i \in \{1, 2, \dots, n_s\}$, $s \in \{1, 2\}$.

Задачи движения поездов между двумя станциями, соединенными однопутной железной дорогой

Используемый метод

Динамическое программирование

Полученные результаты

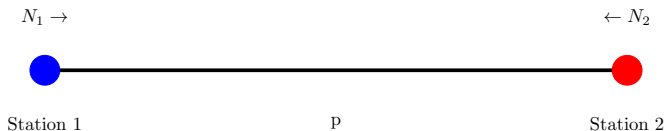
1. Для одинаковых скоростей:

полиномиальные алгоритмы сложностью от $O(n^2)$ до $O(n^5 \log n)$ в зависимости от целевых функций, где n — количество поездов на станциях.

2. Для разных скоростей:

полиномиальные алгоритмы сложностью от $O(n^{2(\alpha^2+\alpha)})$ до $O(n^{5(\alpha^2+\alpha)} \log n)$ в зависимости от целевых функций, где n — количество поездов на станциях, α — количество различных скоростей.

Задача движения поездов по однопутной железной дороге при наличии временных интервалов доступности



Исходные данные

- ▶ На станции 1 находятся n_1 поездов и n_2 поездов на станции 2, все поезда поступили в начальный момент, $r = 0$.
- ▶ p – время прохождения поездами пути между станциями.
- ▶ β – минимальное время между моментами отправления двух поездов с одной станции.
- ▶ d_i^s – директивный срок поезда i со станции s , $i \in \{1, 2, \dots, n_s\}$, $s \in \{1, 2\}$.
- ▶ $U = \{[u_1, v_1], [u_2, v_2], \dots, [u_q, v_q]\}$ – множество допустимых моментов движения.

Задача движения поездов по однопутной железной дороге при наличии временных интервалов доступности

Используемый метод

Динамическое программирование

Полученные результаты

Полиномиальные алгоритмы сложности от $O(n^2 \log q \log qn^3)$ до $O(qn^4)$ где q — количество интервалов доступности, n — количество поездов.

Задача планирования движения поездов по однопутной железной дороге с разъездом



Исходные данные

- ▶ На станции 1 находятся n_1 поездов и n_2 поездов на станции 2, все поезда поступили в начальный момент, т.е. $t = 0$.
- ▶ Ну пути **один** разъезд, вмещающий **один** поезд.
- ▶ Время прохождения отрезков пути слева и справа от разъезда – p_1 и p_2 . Без потери общности установим условие $p_1 \geq p_2$.
- ▶ β – минимальное время между отправлением двух поездов с одной станции.

Целевая функция

Время завершения всех перевозок (англ. «makespan»)

$$C_{max} = \max_{i=1, n_s, s \in \{1, 2\}} \{C_i^s\}, \text{ где } C_i^s \text{ – время прибытия поезда } i \text{ со станции } s.$$

Задача планирования движения поездов по однопутной железной дороге с разъездом

Используемые методы

Задача решалась аналитически. Было выделено множество расписаний, при которых выполняются установленные в модели требования, и множество с необходимыми свойствами оптимального расписания. Показано, что любое расписание из данного множества является последовательностью сегментов четырех типов. Для получения решения определяется оптимальная структура и порядок сегментов в этой последовательности.

Результаты

Точный алгоритм решения трудоемкостью $O(1)$ операций.

Предложения по практическому применению полученных результатов

- ▶ Решение проблем однопутных дорог, узких мест.
- ▶ Построение расписания в случае закрытия участков дорог на ремонт.
- ▶ Автоматизированное управление парком грузовых вагонов.
- ▶ Формирование составов на сортировочных станциях.

Предложения по практическому применению полученных результатов

Цель: доказать наличие необходимой экспертизы у лаборатории.

Проблема: нет доступа до реальных данных.

- ▶ Выделить одну из уже решенных задач;
- ▶ получить доступ до реальных данных;
- ▶ изменить алгоритм, согласно требованиям практической задачи;
- ▶ получить результат на данных заказчика.

Международное сотрудничество

- ▶ INRIA (Prof. F. Vanderbeg, R. Sadykov), Bordeaux, France
- ▶ CNRS institute for information science and technology (Prof. Ph. Baptiste), France
- ▶ Center for Operations Research and Econometrics, Belgium
- ▶ Ecole des Mines de Nantes (Prof. A. Dolgui), France.
- ▶ Universiteit Utrecht (Prof. J.A. Hoogeveen), the Netherlands.
- ▶ University of Greenwich (Prof. V.A. Strusevich), London, United Kingdom.
- ▶ University of Siegen (Prof. Erwin Pesch), Germany.
- ▶ University of Technology (Prof. Ya. Zinder), Sydney.
- ▶ Institute of Mathematical Optimization of the Otto-von-Guericke University (Prof. F. Werner), Magdeburg.
- ▶ United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (Prof. M. Y. Kovalyov), Minsk, Belarus.

Журнал Автоматика и Телемеханика, издаваемый в ИПУ РАН,
готовит специальный выпуск по задачам железнодорожного
планирования.

1. Sadykov R., Lazarev A., Shiryaev V., Stratonnikov A., Solving a Freight Railcar Flow Problem Arising in Russia // Open Access Series in Informatics, 2013, p. 55–67.
2. E.R. Gafarov, A. Dolgui, A.A.Lazarev. Two-Station Single-Track Railway Scheduling Problem With Trains of Equal Speed // Computers and Industrial Engineering, 2015. № 85. С. 260-267.
3. Тарасов И.А., Лазарев А.А. Составление оптимального расписания движения поездов между двумя станциями, соединенными однопутной железной дорогой с разъездом. // Управление Большими Системам. Выпуск 58. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 244–284.
4. Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Кварацхелия А.Г., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи управления транспортными системами. М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. — 160 с.
5. Лазарев А.А., Мусатова Е.Г. Целочисленные постановки задачи формирования железнодорожных составов и расписания их движения // Управление большими системами. Выпуск 38. М.: ИПУ РАН, 2012. С.161–169.

Спасибо за внимание!

д.ф.-м.н., проф. Лазарев А.А.

e-mail: jobmath@mail.ru

Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН
Национальный исследовательский университет Высшая школа
экономики

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Московский государственный физико-технический университет

