

Эффективные алгоритмы решения задач железнодорожного планирования

д.ф.-м.н. А.А.Лазарев, к.ф.-м.н. Е.Р.Гафаров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова Российской академии наук, 119991 Москва, ул. Профсоюзная, д.65,

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Высшая школа экономики (Национальный исследовательский университет),

Московский физико-технический институт (Государственный университет),

lazarev@ipu.ru, axel73@mail.ru

Аннотация: В работе представлены эффективные алгоритмы решения задач железнодорожного планирования, разработанные в лаборатории № 68 «Теории расписаний и дискретной оптимизации» ИПУ РАН. Представленные алгоритмы могут быть реализованы в виде комплекса программ для ЭВМ (в однопроцессорной и многопроцессорной реализации) и использоваться в деятельности ОАО «РЖД» и его смежников:

- для составления оптимальных расписаний и маршрутов движения составов;
- оптимального распределения вагонов по составам;
- составления оптимального календарного плана строительства и/или ремонта железнодорожной инфраструктуры;
- а также для решения многих других задач комбинаторной оптимизации.

Полученные алгоритмы были протестированы на реальных примерах (свыше 15 тысяч вагон-заказов).

Введение

В российской практике железнодорожных грузовых перевозок, деятельность по формированию грузовых поездов и деятельность по управлению парком грузовых вагонов осуществляются разными компаниями. Первая относится к ОАО «РЖД», а вторая к компаниям-операторам грузовых перевозок. Поэтому общая задача оптимизации грузовых перевозок разбивается на две подзадачи. Операторы принимают заказы на перевозку грузов и назначают на их исполнение имеющиеся в их распоряжении вагоны. Каждый вагон получает маршрут, состоящий из цепочки перегонов между станциями. Получив сводную информацию о движении грузовых вагонов, ОАО «РЖД» формирует грузовые составы, определяет маршруты и расписание их движения.

Другие оптимизационные задачи, решаемые в ОАО «РЖД», связаны, в частности с диспетчеризацией движения составов по однопутным участкам, с составлением календарных планов выполнения строительно-ремонтных работ, формированием поездных бригад и т.д.

Рассмотренные в данной статье задачи и структурные подразделения ОАО «РЖД», где они решаются, представлены в следующей сводной таблице.

| Задача оптимизации | Структурное подразделение ОАО «РЖД» | Соответствующая основная задача подразделения | Соответствующая функция |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Составление маршрута и расписания движения грузовых вагонов</p> <p><i>Цель: выполнить максимальный объем заказов на перевозку грузов существующим парком вагонов в срок</i></p> | <p>Дирекция управления движением (центральная или региональная)</p> | <p>Оптимизация технологии управления вагонными парками в условиях реализации Целевой модели рынка грузовых перевозок</p> | <p>Централизованное диспетчерское управление перевозочным процессом</p> |
| <p>Составление маршрута и расписания движения локомотивов</p> <p><i>Цель: выполнить максимальный объем перевозок составов существующим парком локомотивов в срок</i></p> | <p>Дирекция управления движением (центральная или региональная)</p> | <ul style="list-style-type: none"> Оптимизация использования пропускной и перерабатывающей способности инфраструктуры, технических средств и прогрессивных технологий в целях снижения себестоимости перевозок, обеспечения их эффективности; | <p>Централизованное диспетчерское управление перевозочным процессом</p> |
| <p>Составление календарного плана строительных работ</p> <p><i>Цель: минимизировать время выполнения работ с учетом ограничений на ресурсы</i></p> | <p>Департамент капитального строительства</p> | | <p>Обеспечение проектирования, капитального строительства, реконструкции и ремонта объектов и систем инфраструктуры</p> |
| <p>Составление календарного плана ремонтных работ</p> <p><i>Цель: минимизировать время выполнения работ с учетом ограничений на ресурсы</i></p> | <p>Департамент капитального строительства, Дирекция инфраструктуры</p> | | <p>--“--</p> |

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>ресурсы</i> | | | |
| <p>Составление графика предоставления "окон" для проведения строительно-ремонтных работ</p> <p><i>Цель: минимизировать время выполнения работ с учетом ограничений на ресурсы</i></p> | <p>Дирекция управления движением (центральная или региональная)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Оптимизация использования пропускной и перерабатывающей способности инфраструктуры, технических средств и прогрессивных технологий в целях снижения себестоимости перевозок, обеспечения их эффективности | <p>Организация разработки и выполнение графика предоставления "окон" для проведения строительно-ремонтных работ</p> |
| <p>Составление расписания движения составов по однопутной железной дороге</p> <p><i>Цель: минимизировать время прохождения участка всеми поездами, минимизировать запаздывание</i></p> | --“-- | --“-- | <p>Организация оптимального использования пропускной и перерабатывающей способности инфраструктуры</p> |
| <p>Разработка плана формирования грузовых составов</p> <p><i>Цель: выполнить все предполагаемые заказы на перевозку грузов в директивный срок</i></p> | --“-- | | <ul style="list-style-type: none"> • Разработка и организация выполнения нормативного графика движения и плана формирования поездов |

Данная статья разделена на главы следующим образом. В первой главе представлена задача составления маршрута и расписания движения грузовых вагонов, которая также может быть интерпретирована, как задача составления маршрута и расписания движения локомотивов. Задача разработки плана формирования грузовых составов рассматривается во второй главе.

Задача составления календарного плана строительных и/или ремонтных работ на инфраструктуре ОАО «РЖД» представлена в третьей главе. В четвертой главе приводится задача составления расписания движения составов по однопутной железной дороге, возникающая, в частности, в случае ремонта одного из путей.

Для каждой задачи приводятся ее сокращенная постановка, полученные авторами результаты, направления дальнейших исследований и способ использования данных результатов для повышения эффективности ОАО «РЖД» в целом.

Глава 1. Задача составления маршрута и расписания движения грузовых вагонов

В данной главе рассматривается оптимизационная задача оператора грузовых перевозок. Из поступивших заказов на перевозку грузов между станциями необходимо выбрать наиболее прибыльные заказы, которые могут быть выполнены в течение некоторого горизонта планирования. Требуется распределить выбранные заказы между имеющимися вагонами разных типов. Для каждого вагона необходимо его движения таким образом, чтобы назначенные на него заказы были выполнены вовремя.

Постановка задачи

Дано множество станций, соединенных железнодорожными путями и множество заказов на перевозку, которые должны быть выполнены в течение некоторого горизонта планирования. В заказе указаны: тип груза, станции отправления и назначения, цена выполнения заказа (цена услуги). Известны времена поступления заказов, директивные сроки их перевозки и время, необходимое на перевозку вагонов между станциями. Для перевозки какого-либо груза нужно использовать вагоны, подходящие по типу. В начальный момент планирования известно, сколько пустых вагонов каждого типа находится на каждой станции.

Каждый заказ можно принять либо отклонить. Принятые заказы можно выполнять полностью либо частично. В заказе указывается, минимальное число вагонов, которое необходимо перевезти для частичного выполнения заказа.

Прибылью компании является разница между ценой выполненных заказов и расходов, связанных с перевозкой вагонов между станциями (в том числе, пустых), стоянкой вагонов, штрафами за невыполнение заказов вовремя. Стоимость перевозки пустых вагонов зависит от последнего груза, перевезенного в них. Доход, полученный за выполнение одного заказа, не зависит от выполнения других заказов. Время и стоимость перевозки одного вагона (с грузом или без) не зависит от количества вагонов в составе. Вместимость вагонов одного типа – одинаковая.

Необходимо определить, какие заказы принимать к исполнению, а какие отклонить. Определить маршруты движения вагонов, последовательность перевозки вагоном заказов, место и время стоянки каждого вагона. При этом необходимо максимизировать прибыль компании.

Ранее полученные результаты

Задача может быть сформулирована, как задача нахождения потока максимальной суммарной стоимости в ориентированном (пространственно-временном) графе без циклов с некоторыми дополнительными ограничениями.

Так как размерность решаемых практических примеров задачи велика, предлагается следующий способ решения. На первом этапе решается более простая задача без ограничения на

целочисленность потока (на заказы могут назначаться части вагонов). На втором этапе допустимое целочисленное решение получается из дробного методом последовательного округления.

Нами был предложен алгоритм решения «дробной» задачи на первом этапе. Основной сложностью решения данной задачи является ее большой размер. Для успешного ее решения переменные задачи генерируются динамически. То есть на каждой итерации алгоритма число «активных» переменных очень мало по отношению к их общему числу, а значение «неактивных» переменных фиксировано к нулю.

Предложенный способ решения был протестирован на реальных примерах, предоставленных одним из операторов грузовых перевозок. Примеры содержат от 371 до 1'900 станций, от 1'684 до 7'424 транспортных заказов, от 11 до 17 типов вагонов, от 1'013 до 15'008 вагонов. Горизонт планирования -- от 35 до 180 дней. Пространственно-временной граф, составленный на основе заданных примеров, содержит до 300 тысяч вершин и 10 миллионов дуг. Эксперименты показали, что на абсолютном большинстве примеров предложенный алгоритм оказался существенно быстрее (до семи раз) алгоритма, используемого оператором на практике в данный момент.

Направления дальнейших исследований

1. Ускорение предложенного алгоритма решения за счет предварительной обработки (оптимизации) исходных данных основанной на их структуре.
2. Эффективный алгоритм преобразования «дробного» решения в допустимое целочисленное без существенной потери в прибыли.
3. Включение в задачу дополнительных ограничений, возникающих на практике.

Использование полученных результатов

Разработанный алгоритм может быть реализован в виде программного кода с последующим его использованием в автоматизированных системах управления операторов грузовых перевозок. Внедрение алгоритма позволит повысить оперативность и качество управления парком грузовых вагонов, повысив при этом прибыль как операторов грузовых перевозок, так и РЖД, как оператора грузовых поездов. Оптимизация загрузки грузовых вагонов повысит пропускную способность железнодорожных путей, и как следствие качество железнодорожных грузовых и пассажирских перевозок в России.

Глава 2. Разработка плана формирования грузовых поездов.

В данной главе рассматривается задача формирования грузовых поездов на основе данных о движении грузовых вагонов. Заметим, что план формирования грузовых поездов составляется на достаточно длительный период времени (обычно один год). В момент планирования полная информация о движении грузовых вагонов недоступна. Поэтому в качестве данных используется матрица среднесуточных вагонопотоков между каждой парой станций. Объемы вагонопотоков определяются на основе статистических данных, а также на основе прогноза.

Грузовые поезда формируются на сортировочных станциях, где происходит сцепка и расцепка вагонов. Особенностью железнодорожных перевозок является то, что грузовые вагоны обычно не следуют напрямую от станции отправления на станцию назначения в составе одного поезда. Во время пути их могут несколько раз отцеплять от одного состава и прицеплять в другой на промежуточных сортировочных станциях.

Постановка задачи

Сеть железных дорог включает некоторое количество сортировочных станций, между которыми осуществляется перевозка грузовых вагонов. Известны среднесуточные объемы вагонопотока между каждой парой станций. Вагонопоток всегда направляется по кратчайшему пути между двумя станциями. Для каждой сортировочной станции необходимо составить план формирования поездов, т.е.

- назначить каждый прибывший на данную станцию вагон на некоторый поезд;
- для каждого сформированного поезда определить станцию его назначения.

Число вагонов в каждом сформированном поезде должно находиться в определенном интервале. Каждый вагон должен быть доставлен в течение определенного времени, которое зависит от длины маршрута его следования. Время следования вагона зависит от его маршрута (который фиксирован) и суммарного времени его перецепок. Время перецепки вагона считается постоянной величиной и зависит только от станции перецепки.

Число сформированных на каждой станции поездов ее «производительностью». Необходимо составить план формирования грузовых поездов на каждой сортировочной станции, который минимизирует число сформированных поездов и число перецепок вагонов на пути их следования (вторая целевая функция).

Полученные ранее результаты

Разработана математическая модель данной задачи. Задача была сформулирована как задача о многопродуктовом потоке в пространственно-временном графе, в которой минимизируется число используемых дуг.

Были реализованы два подхода для решения данной математической модели. Первый подход состоит в использовании стандартного «решателя» (CPLEX) использующего методы целочисленного программирования. Вторым подходом является разработка специализированного алгоритма основанного на методе генерации колонок (Column Generation).

Два подхода были протестированы на тестовых примерах, содержащих до 57 сортировочных станций. Данные примеры максимально приближены к условиям российских железных дорог. Были использованы следующие параметры и ограничения: нормативное расстояние, преодолеваемое грузовым вагоном: 330 км. в сутки; вместимость поездов: 71 вагон; скорость поездов между станциями: от 30 до 70 км. в час; время перецепки вагона на сортировочной станции: от 12 до 22 часов, и т.д.

Результаты экспериментов показали, что на небольших примерах, где станции расположены на площади 500 1000 км., первый подход позволяет находить оптимальные решения за приемлемое

время (до 5 минут). На примерах реальной размерности (5'000 -- 10'000 км.) более быстрым является второй подход (основанный на методе генерации колонок).

Направления дальнейших исследований

1. Адаптировать математическую модель к реальным ограничениям и целям возникающим в российской практике. Для этого потребуется помощь инженеров РЖД,
2. Разработать эффективные алгоритмы решения адаптированной задачи.
3. Провести численные эксперименты на реальных примерах, предоставленных РЖД.

Использование полученных результатов

В случае положительных результатов численных экспериментов, разработанный алгоритм может быть реализован в виде программного кода с последующим его использованием в автоматизированных системах управления РЖД. Это позволит:

1. улучшить управление формированием грузовых поездов;
2. повысить качество обслуживания клиентов РЖД;
3. увеличить пропускную способность российских железных дорог;
4. определить приоритетные направления при дальнейшем развитии инфраструктуры железных дорог России.

Глава 3. Задача составления календарного плана ремонтных работ на инфраструктуре РЖД

Постановка задачи

Задан перечень ремонтных работ. Для каждой работ определены продолжительность, директивный срок исполнения, перечень необходимых ресурсов, место выполнения работы (дислокация). Заданы отношения предшествования между работами. Между местами проведения работ заданы расстояния (в часах, необходимых ремонтной бригаде для перемещения с места на место).

Заданы ограниченные ресурсы (ремонтные бригады), место их первоначальной дислокации, время доступности бригад.

Необходимо распределить работы между ремонтными бригадами с учетом требуемых для выполнения работ ресурсов, составить календарный план выполнения работ с учетом расстояний между дислокациями, продолжительностью и директивными сроками, составить маршрут движения для каждой ремонтной бригады между местами проведения работ.

Возможные целевые функции в данной задаче – минимизация нарушения директивных сроков, минимизация суммы времен окончания всех работ, минимизация количества запаздывающих работ и др.

Направления дальнейших исследований

1. Точный алгоритм решения.
2. Эффективный приближенный алгоритм с гарантированной погрешностью.

3. Эффективные приближенные алгоритмы решения частных случаев и обобщенной задачи.
4. Библиотека программного кода dll, в которой реализованы полученные алгоритмы.
5. Демонстрационный программный продукт, использующий библиотеку dll.

Использование полученных результатов

Полученная библиотека dll может быть использована в автоматизированных системах управления (АСУ) РЖД по управлению ремонтными работами.

Использование решений, полученных с помощью данных алгоритмов, позволит:

- сократить сроки выполнения ремонтных работ;
- увеличить пропускную способность железнодорожной сети;
- сократить запаздывание поездов;
- уменьшить вынужденные простои оборудования и ремонтных бригад.

Демонстрационный продукт может быть использован в период пилотного внедрения полученных алгоритмов для демонстрации преимуществ от их использования.

Глава 4. Задача составления расписания движения на однопутной железной дороге

Постановка задачи

Дана однопутная железная дорога между двумя станциями и множество поездов $N' = N'_1 \cup N'_2$, из n' поездов. Поезда из подмножества N'_1 следуют от станции 1 к станции 2, а поезда из подмножества N'_2 следуют в противоположном направлении. $|N'_1| = n'_1$ и $|N'_2| = n'_2$, $n'_1 + n'_2 = n'$. Путь разделен на Q сегментов $1, 2, \dots, Q$. Поезда из N'_1 проходят сегменты в порядке $1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow Q$, а поезда из N'_2 в порядке $Q \rightarrow Q-1 \rightarrow \dots \rightarrow 1$. Сегменты разделены семафорами, которые регулируют, может ли поезд проследовать по сегменту. На любом сегменте может быть одновременно не более 1 поезда. Если поезд j' из N'_1 на некотором сегменте пути, то ни один поезд i' из N'_2 не может двигаться в этот момент по пути (и наоборот). Для каждого сегмента q , $q=1, 2, \dots, Q$, задано время прохождения p_q , за которое любой поезд j' из N' преодолевает сегмент, т.е. поезда движутся с одинаковой скоростью. Пусть $S_j'(\pi)$ и $C_j'(\pi)$, где j' из N' , -- время начала и окончания движения поезда j' по участку при расписании π , т.е. $S_j'(\pi)$ -- время отправления поезда j' со станции отправления и $C_j'(\pi)$ -- время прибытия на станцию назначения. Тогда в допустимом расписании выполняется:

- $C_j' \geq S_j' + \sum_{q=1}^Q p_q$, для каждого j' из N' ;

- для любого поезда i' из N'_1 и любого поезда j' из N'_2 , выполняется $C_i' \leq S_j'$ или $C_j' \leq S_i'$

Дополнительно могут быть заданы: директивный срок $d_j' \geq 0$, вес (значимость) $w_j' \geq 0$, время готовности к отправлению $r_j' \geq 0$ (самое раннее возможное время отправления, т.е. $S_j' \geq r_j'$) для каждого поезда j' из N' . Если $C_j'(\pi) > d_j'$, то поезд j' запаздывает, и принимают $U_j'(\pi) = 1$, иначе $U_j'(\pi) = 0$. Пусть, $T_j'(\pi) = \max\{0, C_j'(\pi) - d_j'\}$ -- запаздывание поезда j' и $C_{\max}(\pi) = \max_{j' \in N'}\{C_j'(\pi)\}$ при расписании π .

Рассматриваемую задачу будем обозначать через STRSP2 [1]. В задаче с временами готовности к отправлению, где необходимо минимизировать C_{\max} , необходимо найти расписание π^* , при котором

Страх минимально. Эту задачу обозначим через $STRSP2|r_j|C_{max}$. Дополнительно мы рассматривали следующие задачи с разными ограничениями и целевыми функциями:

- минимизировать количество запаздывающих поездов $STRSP2|\sum U_j$;
- минимизировать взвешенное количество запаздывающих поездов $STRSP2|\sum w_j U_j$;
- минимизировать суммарное время прибытия $STRSP2|r_j|\sum C_j$, когда заданы времена готовности к отправлению;
- минимизировать суммарное взвешенное время прибытия $STRSP2|\sum w_j C_j$;
- минимизировать суммарное запаздывание $STRSP2|\sum T_j$.

Данная задача часто возникает в РЖД на двухпутных железных дорогах, когда один из путей становится недоступным, вследствие непредвиденных ситуаций (обрыв силового кабеля, повреждение путей и т.п.).

Полученные ранее результаты

Сведение $STRSP2$ к одноприборной задаче теории расписаний. Обозначим $p_{max} = \max_{q=1,2,\dots,Q}\{p_q\}$ и $P = \sum_{q=1}^Q p_q$. Пусть $p_k = p_{max}$.

В одноприборной задаче задано 2 подмножества N_1 и N_2 требований. Время обслуживания каждого требования равно p_{max} . Между требованиями из разных подмножеств заданы времена переналадки. Если для требования i из N_1 и требования j из N_2 , j обслуживается непосредственно после i , тогда время переналадки равно $\sum_{q=1}^{k-1} p_q$, иначе время переналадки равно $\sum_{q=k+1}^Q p_q$.

Сведение может быть выполнено за полиномиальное время. Обозначим эти одноприборные задачи через $1|setup-times, N_1, N_2, p_j=p, -|-$. Алгоритмы решения одноприборных задач могут быть использованы для соответствующих задач $STRSP2|-|-$.

Для задач $STRSP2|r_j|C_{max}$, $STRSP2|\sum U_j$, $STRSP2|r_j|\sum C_j$, $STRSP2|\sum w_j C_j$, $STRSP2|\sum T_j$ построены алгоритмы решения трудоемкости $O(n^6) - O(n^7 \log n)$ операций. Для задачи $STRSP2|\sum w_j U_j$ алгоритм трудоемкости $O(n^{15})$ операций. Трудоемкости алгоритмов приведены в табл. 2.

| Железнодорожная задача | Соответствующая задача для одного прибора | Сложность алгоритма |
|------------------------|------------------------------------------------|---------------------|
| $STRSP2 r_j C_{max}$ | $1 setup-times, N_1, N_2, p_j=p, r_j C_{max}$ | $O(n^7)$ |
| $STRSP2 r_j \sum C_j$ | $1 setup-times, N_1, N_2, p_j=p, r_j \sum C_j$ | $O(n^7)$ |
| $STRSP2 \sum w_j C_j$ | $1 setup-times, N_1, N_2, p_j=p \sum w_j C_j$ | $O(n^6)$ |
| $STRSP2 \sum T_j$ | $1 setup-times, N_1, N_2, p_j=p \sum T_j$ | $O(n^6)$ |
| $STRSP2 \sum U_j$ | $1 setup-times, N_1, N_2, p_j=p \sum U_j$ | $O(n^7 \log n)$ |
| $STRSP2 \sum w_j U_j$ | $1 setup-times, N_1, N_2, p_j=p \sum w_j U_j$ | $O(n^{15})$ |

Таблица 2. Трудоемкость алгоритмов

Направления дальнейших исследований

1. Точные алгоритмы решения частных случаев и обобщенной задачи.
2. Библиотека программного кода dll, в которой реализованы полученные алгоритмы.
3. Демонстрационный программный продукт, использующий библиотеку dll.

Использование полученных результатов

Полученная библиотека dll может быть использована в автоматизированных системах управления (АСУ) РЖД, используемых диспетчерскими службами.

Использование решений, полученных с помощью данных алгоритмов, позволит

- увеличить пропускную способность железнодорожной сети;
- сократить запаздывание поездов;
- увеличить привлекательность железнодорожного транспорта.

Демонстрационный продукт может быть использован в период пилотного внедрения полученных алгоритмов для демонстрации преимущества от их использования.

Список литературы

1. Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Гафаров Е.Р., Кварацхелия А.Г. Теория расписаний. Задачи железнодорожного планирования//Научное издание, М:ИПУ РАН, 2012, 92 с.
2. Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Гафаров Е.Р., Кварацхелия А.Г. Теория расписаний. Управление транспортными системами// Учебное пособие М:Издательство МГУ, 2012, 159 с.
3. R. Sadykov, A. A. Lazarev, V. Shiryaev, A. Stratonnikov. "Solving a Freight Railcar Flow Problem Arising in Russia", Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems ATMOS'2013, Sophia Antipolis, France, September 2013.