

Иерархический полимодельный комплекс комбинированного планирования функционирования транспортно-логистических систем

А. С. Гниденко¹, В. А. Зеленцов², А. Ю. Кулаков³

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)

¹deoliveira@mail.ru, ²v.a.zelentsov@gmail.com, ³russ69@bk.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача комбинированного планирования функционирования (движения и погрузки/разгрузки) группы железнодорожных составов, входящих в единую логистическую сеть. Проведен анализ основных аспектов, описан предлагаемый подход к решению задачи с использованием полимодельного комплекса, описывающего процессы группового планирования действий организационно-технических объектов на примере железнодорожных составов. Предлагаемая методика базируется на использовании комбинированных методов (метод Флойда, метод локальных сечений Болтянского В.Г., метод ветвей и границ) для решения указанной нестационарной задачи теории расписаний большой размерности.

Ключевые слова: комплексное планирование; сложный технический объект; согласование моделей; транспортно-логистическая сеть; имитационные системы; комбинированные методы планирования

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу теории расписаний, заключающуюся в групповом планировании движения железнодорожных составов, доставляющих универсальные грузы на станции. В задаче присутствуют естественные ограничения, связанные с невозможностью нахождения двух и более составов на одном участке железнодорожной сети. И на любой из станций в каждый момент времени разгрузку может осуществлять только один состав. На рис. 1 представлен пример транспортно-логистической сети, содержащей 3 железнодорожных состава, каждый из которых потенциально может доставить груз в одну из трех станций.

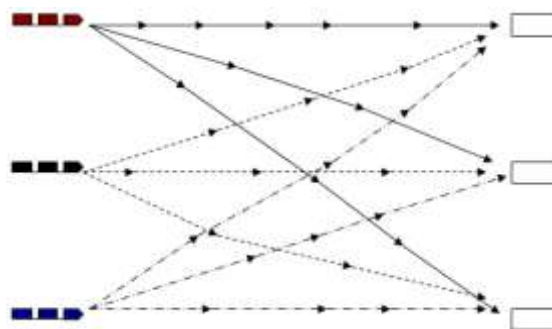


Рис. 1. Пример транспортно-логистической сети

Пусть основным показателем качества группового планирования является суммарный штраф за нарушение директивных сроков доставки груза. Решаемая задача состоит в минимизации данного показателя. Далее в статье будут введены дополнительные показатели качества планирования, учитывающие энергоэффективность прохождения маршрутов до выбранной станции для каждого из железнодорожных составов (ЖС).

II. ИМИТАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИЙ СТЕНД

В качестве средства позиционирования на железнодорожной сети и станциях предполагается использовать систему радиочастотной идентификации RFID. Данная распределенная система обеспечивает дистанционное считывание информации о движении поездов и состоянии соответствующих грузов, с использованием установленных на них пассивных, полуактивных либо активных меток [6]. Каждая из таких меток включает уникальный идентификационный код, которые считываются RFID ридерами. Ридер с определенной периодичностью излучает радиосигналы, которые переизлучаются метками, оказавшимися в его электромагнитном поле. Передача идентификационных кодов меток, попавших в поле, позволяют в зависимости от типов меток и считывателей определить положение состава с точностью до нескольких метров.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), грантов РФФИ (№№ 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214, 17-29-07073-офи-м, 18-07-01272, 18-08-01505), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, в рамках бюджетной темы №№0073-2018-0003, Международного проекта ERASMUS+, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP.

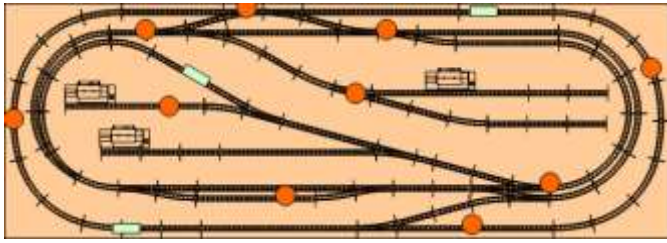


Рис. 2. Модель транспортно-железнодорожной логистической сети

— условное обозначение поезда;

— условное обозначение ридера.

В СПИИРАН в период с 2014 года по настоящее время проводятся работы по созданию имитационно-моделирующего стенда (см. рис. 2), на котором осуществлялась проверка решения рассматриваемой транспортно-логистической задачи. Моделируемая железнодорожная сеть была разбита на участки, на концах каждого из которых на заданных расстояния были установлены RFID-ридеры, позволяющие определять положение каждого из объектов группового планирования и его скорость в каждый момент времени. Разработка и использование данного стенда вызвана необходимостью проведения, во-первых, калибровки моделей движения ЖС, и, во-вторых, проверки реализуемости составленных планов применения ЖС для динамически изменяющейся внешней обстановки в рамках тех или иных сценариев.

III. СОСТАВ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ПОЛИМОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Для решения рассматриваемой задачи планирования применения ЖС используется оригинальный иерархический полимодельный комплекс (ИПК). На его нижнем уровне моделируется и планируется движение отдельного ЖС к заданной станции, с учетом пространственных, и технических ограничений. При решении данной подзадачи используется динамическая модель движения и алгоритм, позволяющий соблюсти ограничения и обеспечить минимум показателям заданного времени хода и минимум расхода электроэнергии на тягу для конкретных участков, входящих потенциально в маршрут движения каждого ЖС. Для это используется следующая модель по координате s (точка пространственного положения поезда):

$$\frac{dv}{ds} = \frac{1}{v} [u_f f(v) - u_r r(v) - u_b b(v) - w(v) - g(s)] \quad (1)$$

$$\frac{du}{ds} = \frac{1}{t_{sw} v} \quad (2)$$

$$\frac{dt}{ds} = \frac{1}{v} \quad (3)$$

где u_f, u_r, u_b – коэффициенты тяги рекуперативного и механического торможения, учитывающие текущее положение контроллера тяги, $w(v)$ – учитывает собственное сопротивление движению, $g(s)$ – уклон железнодорожного полотна. Количественные, а также массоразмерные характеристики состава с учетом перевозимого груза, коэффициенты сил для составляющих управления, а также коэффициенты сопротивления подлежат калибровке для обеспечения достоверности модели и соответствия построенного плана модели конкретного поезда. Приведенная динамическая модель является частью модельно-алгоритмического обеспечения, решающего задачу планирования движения одного состава до станции, выбранной при решении соответствующих задач планирования на верхних уровнях ИПК. Результатом работы алгоритма на данном этапе является оптимальная траектория, доставляющая максимум показателям энергоэффективности и позволяющая рассчитать время прохождения маршрута с учетом характеристик ЖС и участков сети.

На следующем этапе комплексного планирования рассматривается статическая модель движения группы железнодорожных составов. При этом прохождение каждого участка пути, ограниченного двумя ридерами, рассматривается как выполнение технологической операции χ составом A_i . Начальному местоположению поезда A_i , который планируется для перемещения в сторону станции B_j , будет соответствовать операция

$x_{i\chi}^{(j)}$ (условное обозначение операции движения поезда A_i к станции B_j по пути, состоящем из участков χ).

Далее при помощи стандартного алгоритма Флойда находятся кратчайшие расстояния от начального местоположения поезда A_i до каждой станции B_j в отдельности [3]. Рассчитанные (сгенерированные) планы перемещения каждого ЖС являются входными данными для координационного планирования, на третьем уровне ИПК.

В контексте группового планирования рассматривается математическая модель комплекса операций $D^{(i)}$, соответствующая прохождению каждого из участков пути тем или иным составом. Для этого введем неотрицательную величину $x_i = \sum_{\chi=1}^{S_j} x_{i\chi}^{(j)}, \forall j$,

которую будем называть состоянием данной операции перемещения состава. Ее изменение во времени описывается

$$\dot{x}_i = \sum_{j=1}^3 \sum_{\chi=1}^{S_j} \omega_{i\chi}^{(j)}(t) u_{i\chi}^{(j)}, \quad (4)$$

где $\omega_{i\chi}^{(j)}(t)$ – нормированные интенсивности выполнения операций, получаемые на более ранних этапах расчета, $u_{i\chi}^{(j)} \in \{0,1\}$ – управляющее воздействие 1 или 0, в зависимости от того, следует ли состав по указанному участку или нет. Наряду с (4) введем дифференциальные уравнения

$$\dot{y}_i^{(j)} = \sum_{\chi=1}^{S_j} u_{i\chi}^{(j)}, \quad (5)$$

с помощью которых можно оценить общее время движения A_i -го ЖС к B_j -й станции, а также выполнения на ней соответствующих логистических операций.

В соответствии с содержательной постановкой задачи в каждый момент времени каждый ЖС может перемещаться на одну из станций, а на любой из станций может находиться только один ЖС. Тогда управляющие воздействия должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n u_{i\chi}^{(j)}(t) &\leq 1 \quad \forall i, \forall \chi; \quad \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 u_{i\chi}^{(j)} \leq 1 \quad \forall \chi; \\ \sum_{i=1}^n u_{i\chi}^{(j)}(t) &\leq 1 \quad \forall j, \forall \chi; \quad u_{i\chi}^{(j)} \in \{0, 1\} \quad \forall i \quad \forall \chi \quad \forall j. \end{aligned} \quad (6)$$

Ограничения вида

$$u_{i\chi}^{(j)} \left(a_{i(\chi-1)}^{(j)} - x_{i(\chi-1)}^{(j)} \right) = 0, \quad \forall t, \quad (7)$$

определяют очередность следования по участкам до станций, входящих в возможные маршруты состава A_i .

Анализ ограничений (7) показывает, что $u_{i\chi}^{(j)}(t) = 1$ может быть только в том случае, когда все операции, непосредственно предшествующие $D_{\chi}^{(i)}$, выполнены до

конца, то есть $\left(a_{i(\chi-1)}^{(j)} - z_{i(\chi-1)}^{(j)} \right) = 0, \quad \forall t$.

Показателями качества решения логистической задачи можно выбрать следующие функционалы:

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} d\tau = t_f - t_0 \quad (8)$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left[(a_i^{(j)} - \sum_{\chi=1}^{S_j} z_{i\chi}^{(j)})^2 (z_{i\chi}^{(j)})^2 + \sum_{\chi=1}^3 \left[z_{i\chi}^{(j)} g_{i\chi}^{(j)} + \frac{(a_{i\chi}^{(j)})^2}{2} - h_{i\chi}^{(j)} \right] (z_{i\chi}^{(j)})^2 \right] \quad (9)$$

$$J_3 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int_{t_0}^{t_f} \eta_{iS_j}^{(j)}(\tau) u_{iS_j}^{(j)}(\tau) d\tau \quad (10)$$

где J_1 количественно оценивает общее время, затрачиваемое на реализацию скоординированного плана движения поездов, J_2 – позволяет количественно оценить потери от неполного выполнения комплекса работ по доставке грузов, J_3 определяет суммарный штраф за нарушение директивных сроков доставки, где $\eta_{ij}(\tau)$ – возрастающие функции времени, определяемые исходя из известных начальных или конечных директивных сроков логистических операций.

Таким образом, задача оптимального планирования перемещения и разгрузки ЖС сводится к поиску допустимого программного управления динамической системой (4)–(5), обеспечивающего выполнение соответствующих краевых условий, а также удовлетворяющего заданным ограничениям (6)–(7) и доставляющего показателям качества (8)–(10) экстремальные значения. Решение данной задачи совместного планирования позволяет выделить динамический приоритет операции прохождения участка между двумя ридерами тем или иным составом. Динамический приоритет позволяет также учесть как необходимость прохождения всех предшествующих участков, так и неразрывность конкретной логистической операции. Кроме того, в этом случае обеспечивается равномерность распределения ресурсов (железнодорожных путей) в рамках составленного сетевого графика движения ЖС.

На заключительном этапе решения задачи построенный план группового движения проверяется робастность и устойчивость составленных комплексных планов группового движения ЖС, а также проводится (при необходимости) коррекция данных планов на основе результатов имитационного моделирования процессов их реализации. По результатам итеративного перепланирования удастся увеличить робастность рассчитанного расписания, ввести в комплексный план соответствующую функциональную избыточность (резерв), позволяющий компенсировать влияние возможных (на этапе реализации) случайных факторов и, тем самым, снизить вероятность нарушения директивных сроков доставки грузов на станции назначения [5].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к решению нестационарной задачи теории расписаний обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными решениями такого класса задач. Разработанный оригинальный ИМК позволяет декомпозировать решение исходной задачи планирования на 4 основные этапы. В рамках предлагаемой динамической декомпозиции исходной задачи теории расписаний существенно сокращается размерность задач планирования, решаемых в каждый момент времени. Комбинированное планирование позволяет учесть как различные типы ограничений, накладываемых на движение составов, так и влияние возмущений, нарушающих робастность и устойчивость построенных планов. К настоящему времени на созданном имитационно-моделирующем стенде проводятся предварительные эксперименты по калибровке моделей движения ЖС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В. и др. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В. Емельянова. И.: Машиностроение, 1988.
- [2] Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления, 2001. № 1. С.5-22; № 2. С.5-21.
- [3] Кадыева Л.М., Левин С.Е., Окренг Я.Н. Комбинированный алгоритм линейной оптимизации с поиском максимального потока на графе // Молодой ученый. 2016. №19. С. 8-14.
- [4] Имитационное моделирование производственных систем / А.А. Вавилов, Д.Х. Имаев, В.И. Плескунин и др. М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983.
- [5] Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. //Сборник научных трудов VIII-й Международной научно-технической конференции (Коломна, 18-20 мая, 2015). В 2-х томах. Т2. М.: Физматлит, 2015. 388 с.
- [6] Калинин В.Н, Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами //Теория и системы управления. 1995. №1.
- [7] Краснощёков П.С., Морозов В.В., Федоров В.В. Декомпозиция в задачах проектирования // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1979. №2. С.7–18.
- [8] Краснощёков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. М.: Фазис, 2000. 400 с.
- [9] Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10-ти т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1988, т.3. Эффективность технических систем /Под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова.
- [10] Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
- [11] Павловский Ю.А. Имитационные модели и системы. М.: Фазис, 2000. 132 с.
- [12] Савин Г.И. Системное моделирование сложных процессов. М.: Фазис, 2000.
- [13] Шеннон Р. Имитационное моделирование – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
- [14] <http://www.simulation.su>
- [15] <http://litsam.ru>