

Белоусов А.А., Скобелев П.О., Степанов М.Е., ООО «НПК «Разумные решения», г. Самара
Ефремов Г.А., ОАО «НИИАС», г. Москва
Курбатов Е.В., ООО «ПрограмПарк» г. Москва

Особенности мультиагентного планирования движения поездов на однопутных участках в реальном времени на примере Невельского участка и Байкало-Амурской магистрали

1. Введение

Известно, что строительство ЖД инфраструктуры длится с начала 19 века, и её текущее состояние оставляет всё меньше вариантов экстенсивного и толкает к продолжению интенсивного развития: применение энергосберегающих технологий и режимов движения, совершенствование обслуживания инфраструктуры и, главным образом, оптимизация графиков движения поездов.

Современные интеллектуальные системы поддержки принятия согласованных решений в реальном времени в сложных и крупномасштабных системах должны поддерживать существующие эффективные и использовать новые методы и средства автоматизации управленческой деятельности, позволяющие учитывать все многообразие факторов, критериев, правил, взаимодействий. Должен обеспечиваться высокий уровень достоверности и качества решений, а также производительности в реальном времени.

В данной работе представлена система, основанная на мультиагентных технологиях, которая решает сложную задачу адаптивного управления движением поездов в реальном времени. В настоящее время разработанная система проходит опытную эксплуатацию на Невельском участке Октябрьской железной дороги и на Восточно-Сибирской железной дороге. В промышленной эксплуатации система находится на полигонах Октябрьской железной дороги.

2. Мультиагентный подход к адаптивному управлению железнодорожным движением

2.1. Постановка задачи

Задача адаптивного управления железнодорожным движением в реальном времени [1] заключается в построении детального плана движения поездов с целью приведения их к минимальным отклонениям от нормативного расписания с учетом разнородных ограничений и требований по непрерывно поступающим событиям (поломка поезда, занятость путей, ремонтные работы, скоростные ограничения движения и пр.).

К входным данным задачи относятся:

- инфраструктура железнодорожной сети с детализацией до блок-участков (БУ) – станции, стрелки, блок-участки (БУ);

- нормативные графики движения;
- требования на проведение ремонтных работ на путях (окна);
- обновления текущей ситуации на полигоне по продвижению поездов и состояний БУ (сигналы занятости или информация о недоступности блок-участков).

Решением такой задачи будет являться план по возврату опаздывающих под воздействием непредвиденных событий поездов в нормативный график движения, а также список мер диспетчерского регулирования для разрешения конфликтных ситуаций и исполнения полученного плана.

Большая размерность решаемой задачи характеризует ее как крупномасштабную. Например, Невельский полигон Октябрьской ЖД (475 км включает 47 станций) и участок Байкало-Амурской магистрали (1805 км включает 105 станций).

К основным ограничениям системы относятся требования безопасности движения, нормативные требования построения маршрутов движения, приоритеты поездов, диспетчерские правила и пр.

Применение тех или иных требований зависит от текущей ситуации, т.е. имеется ситуационность в принятии решений.

Для решения задачи адаптивного управления железнодорожным движением в реальном времени, была разработана система на основе мультиагентных технологий и методов. Мультиагентный подход позволил адекватно учесть все множество разнородных критериев, ограничений и требований к управлению поездками, в том числе и плохо формализуемых. Архитектура мультиагентной системы открыта и позволяет вводить новые условия и критерии, а также менять старые и управлять ими динамически, благодаря применению специально созданной онтологии (базы знаний).

2.2. Архитектура мультиагентной системы

Архитектура разработанной системы строится на принципах сетцентризма, при котором каждая подсистема (слой) выполняет свою индивидуальную задачу, а итоговое решение получается путем согласования индивидуальных решений [2].

Данное разделение построения расписаний поездов на слои позволяет избежать комбинаторного взрыва вариантов, сделать процесс планирования более устойчивым к возмущениям за счет сокращения размерности задачи на более высоких уровнях и поэтапного учета всех возможных ограничений в соответствии со степенью важности и влияния на остальные уровни [7].

Планирование движения поездов происходит на двух уровнях:

на первом уровне планирования по заданному расписанию поездов рассчитываются их траектории движения, т.е. перегоны и пути станции по которым должны проехать поезда, включая блок-участки стоянок и маневровое движение на станциях для бесконфликтного выполнения заданного расписания;

на втором уровне планирования происходит адаптивное изменение существующего расписания поездов при отклонении поездов от эталонного расписания или при возникновении непредвиденных ситуаций (например, незапланированное окно ремонтных работ, ложная занятость и т.д.). Т.е. определяются времена прибытия и отправления поездов со станции, времена занятия и освобождения блок-участков траектории.

Первый уровень планирования представлен траекторным планировщиком, второй уровень – временным планировщиком. Общий метод поиска решения и роль планировщиков в нем показаны на рисунке 1.

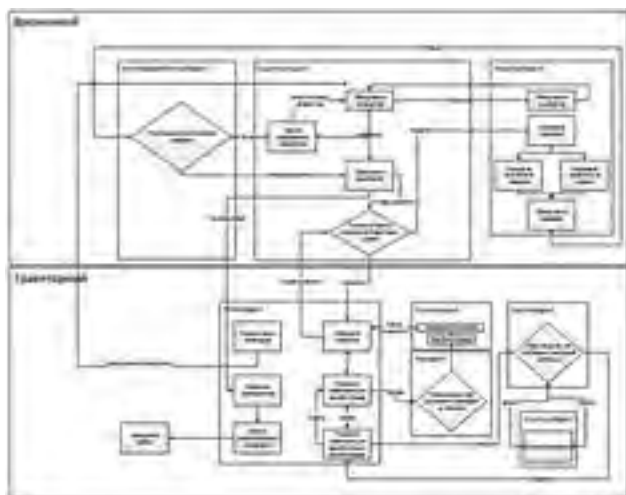


Рис. 1. Взаимодействие основных подсистем планирования, представленное диаграммой Event-driven Process Chain

Данная диаграмма описывает взаимодействие систем на высоком уровне абстракции. Блоки диаграммы в свою очередь могут являться подсистемами со сложной внутренней структурой.

Решение поставленной задачи базируется на методе сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном времени [4]. Так,

если на траекторном уровне агенты поездов, интервалов и станций совместно определяют где и как будет проходить поезд, то на временном уровне агент поезда порождает подзадачи (операции) на проследование по перегону или стоянку на станции в определенном временном интервале.

Агент каждой такой подзадачи ищет для себя размещение на соответствующем ресурсе, пытаясь занять наиболее выгодное для себя место через переговоры с другими агентами подзадач. Агенты поездов с большим приоритетом ведут себя активнее при поиске лучшего размещения (имеют больше энергии для выталкивания других заявок с ресурсов).

Для исключения закликиваний в ходе согласований и поиска решений, варианты представляются в виде ациклического ориентированного графа. Это исключает формирование переходов, формирующих циклы.

На уровне работы траекторного планировщика итогом работы является выбор траектории проследования поезда по маршруту, с детализацией до блок-участков [4, 5]. У временного планировщика результатом является план со временами стоянок и проследования по станциям и перегонам полигона.

3. Программная реализация

3.1. Реализационные характеристики

Рассмотрим реализационные характеристики подробнее на примере Невельского полигона и участка Байкало-Амурской магистрали. Длина Невельского полигона составляет около 475-километровому пути (около 387 км длины которого является однопутным). За сутки на нём активны в среднем 150 поездов различных назначений (высокоскоростные, грузовые, хозяйственные и др.).

У рассматриваемого участка Байкало-Амурской магистрали протяжённость пути составляет около 1805 км, из которых около 1036 км – «однопутка». В течение суток на рассматриваемом участке Байкало-Амурской магистрали активны около 160 поездов различных видов.

Значимые для планирования характеристики рассматриваемых полигонов представлены в таблице 1.

Учитывая, что в планировщике каждый поезд представлен своим агентом, и каждому поезду требуется в среднем около 45 операций (операции движения по перегону, стоянки на станции или следования по станции и др.), получаем только для поездов не менее 6750 агентов виртуального мира (для одного полигона). Кроме них в сцене мира присутствуют ещё агенты станций, блок-участков, маршрутов, ремонтных работ и занятости. Разделение этого большого количества агентов на слои и объединение в отдельные изолированные рои агентов, активные в определенные момен-

Таблица 1. Значимые характеристики полигонов

Полигон	Количество станций	Количество объектов инфраструктуры	Среднее время загрузки и подготовки инфраструктуры, с
Невельский полигон Октябрьской ЖД	47	5597	13,6
Участок Байкало-Амурской магистрали	105	22397	29,5

Таблица 2. Временные характеристики планирования в зависимости от числа задач

Полигон	Число дополнительных подходов	Среднее время пересчета (с)	Среднее время пересчета с добавлением 10 окон (с)
Невельский полигон Октябрьской ЖД	5	9,68	9,39
	10	9,41	10,76
	15	11,07	11,50
	20	12,36	10,88
	25	12,55	12,72
Участок Байкало-Амурской магистрали	5	22,50	23,21
	10	28,19	30,58
	15	34,75	42,16
	20	38,97	42,17
	25	48,20	46,40

ты времени, позволяет повысить общую производительность системы [2].

Для получения реализационных характеристик по каждому показателю было определено среднее значение на основании результатов 20 опытов для двух указанных выше полигонов. Учитывается решение не отдельного уровня планировщика, а совокупное.

В таблице 2 представлено изменение временных характеристик планирования в зависимости от числа планируемых подходов на полигонах. В рамках эксперимента, для увеличения точности первоначальный расчёт оставался одним, а оценки изменений производились на пересчётах. Из таблицы видно, что при сравнимом количестве поездов на полигонах (150 поездов для Невельского полигона и 160 поездов на участке Байкало-Амурской магистрали) время пересчёта различается в диапазоне от 2,3 до 3,9 раза, что связано со значительной разницей в объёме инфраструктуры, которую обрабатывает планировщик. Однако можно заметить близкую к линейной зависимость между количеством элементов инфраструктуры и временем пересчёта маршрутов поездов на каждом полигоне.

Время пересчёта на каждом полигоне проходит в среднем быстрее на 15–40% от первоначального времени расчёта. Это связано с тем, что при пересчёте, расписания поездов не пересчитываются заново, а адаптивно корректируются в соответствии с поступающими событиями.

Результаты расчёта подтвердили ранее полученные результаты вычислительных экспериментов для полигонов с многопутным движением [2].

Данный результат для полигонов с преобладающим однопутным движением получен впервые. Рост слож-

ности решения для диспетчера не всегда ведёт к увеличению времени на его нахождение адаптивным планировщиком (характерно для однопутных участков), а разница между скоростью получения результатов между диспетчером и мультиагентной системой огромна.

3.2. Показатели внедрения

К ожидаемым результатам от внедренной системы адаптивного управления движением поездов относятся: уменьшение затрат времени и ручного труда на прокладку поездов без жесткого расписания, уменьшение общего времени реакции на непредвиденное событие, автоматическая корректировка графика движения поезда при возникновении нештатной ситуации/конфликта с учетом всех норм и ограничений, возможность анализа прогнозного графика и показателей движения. Отсутствие необходимости держать все в голове или рисовать график на бумаге повышает качество работы оперативного поездного диспетчера, а также минимизирует количество нарушений в движении поездов за счет учета всех заданных ограничений и требований.

Прокладка нескольких поездов диспетчерским расписанием с разных направлений на однопутных участках требует не только правильно рассчитывать все нормативы для разгона и замедления поездов при остановке на стоянки, все занятости путей на станции, все длины свободных стоянок, а также учесть правила скрещивания поездов, в том числе с возможностями двухпутных вставок (разъезды) и без них. Дополнительная сложность прокладки маршрутов на однопутных участках заключается в том, что даже минимальное изменение приводит к необходимости полностью перестроить график, так как отсутствуют возможности использова-

ния второго пути для поездов обоих направлений (альтернативного пути нет). Все эти обстоятельства, как и увеличенные длины однопутных перегонов восточной части России (например, за Уралом средняя длина однопутного перегона больше на 40%, чем в европейской части России), усугубляются с появлением технологических работ на перегонах. Кроме этого, расписание не остается статичным и из-за внешних событий и может стать невыполнимым за считанные секунды. Например, занятость пути нужной длины на станции в связи с поломкой делает невозможным стоянку, запланированную министерским графиком у поезда, который уже начал движение по маршруту. Ему срочно нужно менять свое расписание: переносить данную стоянку на другую станцию. Учитывая, что отклонения от нормативного графика портят статистику диспетчера, такая ситуация вызывает повышенное внимание диспетчера и может отодвинуть задачу качественной прокладки поездов диспетчерским расписанием на второй план.

В свою очередь, планировщик, несмотря на многообразие событий, возмущений, условий и ограничений справляется с задачей прокладки поездов, в том числе и диспетчерским расписанием, за секунды и выдает диспетчеру готовое решение, удовлетворяющее всем ограничениям и требованиям, с минимальными отклонениями от нормативных графиков их движения и минимальным необходимым количеством стоянок (повышение энергоэффективности).

Так как рост эффективности и производительности диспетчеров связаны с переложением большей части механических функций по учёту огромного количества нормативов и стандартов на адаптивный планировщик, диспетчеру остаётся больше времени на контроль и корректировку слабо формализуемых требований, что не только снижает затраты времени на прежний объём работы, но и повышает качество решения и самооценку исполнителя (увеличение доли высокоинтеллектуального труда).

4. Заключение

Предлагаемая мультиагентная система адаптивного управления железнодорожным движением в реальном времени [2] разрабатывалась в рамках создания Единой интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ) НИИАС ОАО «РЖД» [6].

Среди дальнейших направлений развития разработанной системы управления поездами можно выделить следующие: объяснение получаемых решений, визуализация пространства решений, демонстрация логики принятия решений диспетчеру; интерактивное взаимодействие с диспетчером для доводки качества плана, моделирование развития ситуации, обучение;

оценка качества решения по гибкому набору критериев и общему уровню «удовлетворенности» ресурсов; увеличение производительности за счет распараллеливания асинхронных процессов планирования.

Указанные разработки помогут улучшить качество решений и повысить эффективность работы для конечных пользователей, повысить экономическую эффективность.

Литература

1. A.A. Belousov, A.A. Goryachev, P.O. Skobelev, M.E. Stepanov A multi-agent method for adaptive real-time train scheduling with conflict limitations // In: Proceedings of Complex Systems 2015, New Forest, UK, 12-14 May 2015 – P 253-266.
2. Белоусов А.А., Скобелев П.О., Ефремов Г.А., Степанов М.Е., Горячев А.А., Шабунин А.Б. Мультиагентный подход к решению сложной задачи построения расписания в крупномасштабной системе управления железнодорожным движением // «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2014)»: Сборник научных трудов / под общ. ред. С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна; Ин-т проблем управления им. В.А.Трапезникова Рос. акад. наук. – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 252-263. – ISBN 978-5-91450-161-4.
3. Виттих В.А., Скобелев П.О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном времени // Автотметрия. – 2009. – №2. – с. 78-87.
4. Abbink, E.J.W., Mobach, D.G.A., Fioole, P.J., Kroon, L.G., van der Heijden, E.H.T., Wijngaards, N.J.E., Actor-Agent Application for Train Driver Rescheduling // In: Proceedings of AAMAS, Budapest, Hungary, 2009. – P 513-520.
5. П.О. Скобелев, А.А. Белоусов, С.О. Лисицын, А.В. Царев. Разработка интеллектуальной системы управления грузовыми перевозками для полигона «Восточный» // Труды XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» Самара, 25-28 июня 2013г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – С. 391-396. – ISBN 978-5-93424-662-5.
6. А.Б. Шабунин, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.В. Царев. Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО «РЖД» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №1. – С. 23-29.
7. Белоусов А.А., Скобелев П.О., Ефремов Г.А., Степанов М.Е., Горячев А.А., Шабунин А.Б. Мультиагентный подход к решению сложной задачи построения расписаний в крупномасштабной системе управления железнодорожным движением // «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2014)»: Сборник научных трудов / под общ. ред. С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна; Ин-т проблем управления им. В.А.Трапезникова Рос. акад. наук. – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 252-263. – ISBN 978-5-91450-161-4.