

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ КНР



С.Е. Иконников



Цзэчэнь Мао

В статье рассмотрены алгоритмы централизованного управления, применяемые на китайских железных дорогах, особенности их моделей с учетом действующих ограничений. Исследованы особенности структуры и результаты применения интеллектуальной системы управления движением поездов, построенной на основе централизованной автоматизированной диспетчерской системы.

Ключевые слова: управление движением поездов, система диспетчерского управления, уровни автоматизации

EDN: TFPABY

Железнодорожная система Китая, являющаяся крупной и сложной мировой сетью железнодорожного транспорта, в настоящее время переживает коренную трансформацию от «высокоскоростного роста» к «интеллектуальной модернизации». Согласно данным «Доклада о развитии железнодорожного транспорта Китая (2023)», национальная железная дорога в среднем обслуживает 10 500 пассажирских и 32 000 грузовых поездов в день, ежегодный пассажиропоток превышает 4 миллиарда человек, а грузооборот составляет 38 миллионов тонно-км, что в 8,2 раза больше, чем в США и в 5,7 раза больше, чем в Европейском союзе.

С учетом таких масштабов в традиционной модели управления железными дорогами возникает три основных противоречия:

1. Противоречие между ограниченностью ресурсов и взрывным ростом спроса на перевозки: интервал сле-

дования поездов на основных магистралях в часы «пик» приближается к физическому пределу (например, минимальный интервал на высокоскоростной железной дороге Пекин-Шанхай составляет 4 минуты).

2. Противоречие между экспоненциальным ростом сложности системы и надежностью ручного принятия решений: одному диспетчеру приходится обрабатывать более 2300 команд в день.

3. Противоречие между неоднородностью оборудования и согласованностью управления: вся железнодорожная сеть охватывает различные уровни оборудования для управления уровнями автоматизации от CTC-0 до CTC-4 (CTC - Chinese Train Control System).

Такие проблемы послужили толчком к революционным инновациям в интеллектуальной централизованной системе управления Китайской железной дороги.

Иконников Сергей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: автоматизированное и автоматическое управление в технических системах. Автор 93 научных работ.

Мао Цзэчэнь, аспирант кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: интеллектуальные транспортные системы. Автор трех научных работ.

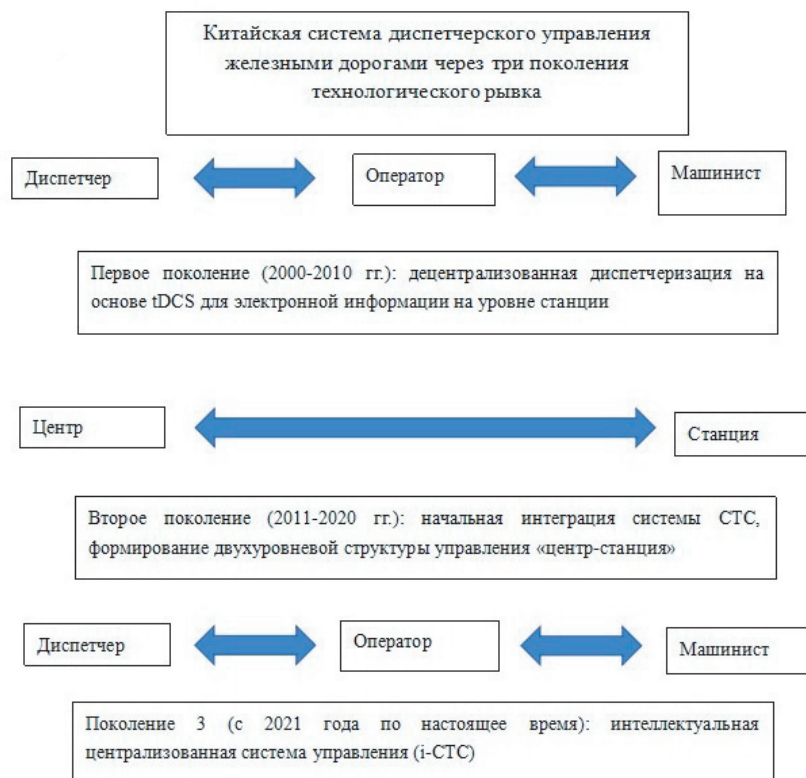


Рис. 1. Развитие систем диспетчерского управления железными дорогами в КНР

Как показано на рис. 1, китайская система диспетчерского управления железными дорогами прошла через три поколения технологического развития [1]:

- первое поколение (2000–2010 гг.): децентрализованное диспетчерское управление, реализующее информацию на уровне станции в электронном виде.

- второе поколение (2011–2020 гг.): предварительная интеграция системы CTC (Centralized Traffic Control) формирование двухуровневой структуры управления «центр-станция».

- третье поколение (2021 г. — по настоящее время): интеллектуальная централизованная система управления (i-CTC) глубоко интегрирует технологию искусственного интеллекта вещей AIoT (Artificial Intelligence of Things) и создает автономную систему принятия решений с синергией «центр—регион—станция».

Исследование по теме данной статьи посвящено главному прорыву в системах третьего поколения — алгоритмически определенной парадигме централизованного управления.

Методы управления движением поездов на железной дороге

Современная система управления движением охватывает 98% магистральных железных дорог Китая, ключевые показатели эффективности такой системы: минимальный интервал отслеживания, задержка команд планирования, способность прогнозировать конфликты, время реагирования на чрезвычайные ситуации; сравниваются по табл. 1 следующим образом.

Алгоритмы централизованного управления для железных дорог КНР

Алгоритмы пространственно-временного планирования основаны на положениях теории пространственно-временного разрешения конфликтов для следующего критерия эффективности принятия решений:

$$\min \sum_{i=1}^N \int_{t_0}^{t_f} \left[\alpha (v_i(t) - v_{ref})^2 + \beta \frac{\partial u_i(t)}{\partial t} \right] dt, \quad (1)$$

где $t \in [t_0, t_f]$ — t_0 — начальное время; t_f — заданное время;

Таблица 1

Ключевые показатели эффективности управления движением поездов

Показатель (Функция)	Традиционные методы (до 2010 года)	Интеллектуальная система управления (2023 год)
Минимальный интервал отслеживания	8 минут	3 минуты 45 секунд
Задержка команд планирования	120 секунд	0,8 секунды
Способность прогнозировать конфликты	Искусственное эмпирическое суждение	Предупреждение за 15 минут
Время реагирования на чрезвычайные ситуации	30 минут	2 минуты 15 секунд

$v_i(t)$ – переменные управления скоростью – обозначают скорость i -го поезда в момент времени t ;

$u_i(t)$ – входные переменные управления, обозначают величину i - ускорения поезда (тяговая/тормозная команда);

v_{ref} – заданная скорость (скорость по расписанию);

$\frac{\partial u_i(t)}{\partial t}$ – производная от управляющего воздействия;

ствия;

α, β – весовые коэффициенты;

α – коэффициент управления приоритетом пунктуальности (типовое значение 0,6);

β – коэффициент контроля потребления энергии (типовое значение 0,4);

N – число поездов на участке.

Указанный критерий функционирует с ограниченными условиями, включающими ограничения по расстоянию между поездами и ограничение по количеству поездов на линии.

Ограничения по расстоянию между поездами рассчитываются следующим образом:

$$\|\bar{p}_i(t) - \bar{p}_j(t)\| \geq D_{safe}(v_i, v_j), \quad (2)$$

где $\bar{p}_i(t)$ – координата «хвоста» впереди идущего поезда в реальном времени;

$\bar{p}_j(t)$ – координата «головы» сзади идущего поезда в реальном времени;

D_{safe} – динамическая дистанция безопасности, расчет которой производится на основе улучшенной модели безопасного расстояния, она должна быть больше или равна разности тормозных путей заднего и переднего транспортного средства с добавлением

величины динамического запаса и определяется такой зависимостью:

$$D_{safe} = \frac{v_n^2 - v_{n-1}^2}{2b_{\max}} + \lambda \sigma_v t_{predict} + S_{base}, \quad (3)$$

где v_n – скорость заднего вагона в реальном времени (n -й поезд);

v_{n-1} – скорость предыдущего поезда в реальном времени ($n-1$ -й поезд);

$t_{predict}$ – временное окно прогнозирования, т.е. диапазон времени, в течение которого система делает прогноз изменения скорости поезда на определенный период времени в будущем. Единица измерения – секунды (с);

$b_{\max}$ – максимальное замедление при торможении ($1,5 \text{ м/с}^2$);

σ_v – стандартное отклонение скорости (полученной нейронной сетью LSTM- Long Short-Term Memory);

λ – фактор риска (с динамической поправкой, диапазон 0,8 – 1,2);

S_{base} – базовый запас безопасности.

Ограничение по количеству поездов на линии определяется как:

$$\sum_{k=1}^M \phi_k(t) \leq \phi_{\max}, \quad (4)$$

где $\phi_k(t)$ – фактическая пропускная способность железнодорожной линии;

$\phi_{\max}$ – максимальная пропускная способность железнодорожной линии;

M – максимальное количество поездов, которые могут одновременно находиться на железнодорожной линии в один и тот же момент или период времени.

Результаты внедрения современных методов управления движением поездов на железных дорогах в КНР

В настоящее время интеллектуальная система управления движением, построенная на основе централизованной диспетчерской системы, достигла эффективного использования ресурсов пропускной способности железнодорожной сети и обеспечения гарантии безопасности перевозок благодаря трехуровневому механизму замкнутого цикла: «принятие решений на основе данных, алгоритмическая динамическая оптимизация и точное исполнение команд напольными устройствами и оборудованием».

Китайская система управления железнодорожным движением основана на совместной архитектуре «центр — регион — станция» в качестве ядра, образуя трехуровневый механизм связи (рис. 2).

Центральный уровень принятия решений (облако) развернут в диспетчерском и командном центре China Railway Group, он объединяет данные 18 железнодорожных бюро по всей стране и создает цифрового двойника всей дорожной сети. Этот уровень обрабатывает 107 ежедневных диспетчерских инструкций с помощью кластеров квантовых вычислений и дискретизирует 150 000 км пути на $1,2 \times 10^9$ виртуальных единиц с помощью пространственно-временной модели сетки для динамического ценообразования ресурсов и прогнозирования конфликтов. Типичные примеры показывают, что этот уровень может завершить реконфигурацию схемы движения поездов, например, для всей высокоскоростной железнодорожной линии Пекин-Шанхай в течение 5 секунд.

Пограничные вычислительные узлы регионального исполнительного уровня (Edge) установлены в каждом железнодорожном бюро и оснащены чипами

искусственного интеллекта Cambrian серии MLU для локализованного принятия решений в режиме реального времени. Синергия моделей между бюро достигается благодаря технологии национального обучения, например, железнодорожная группа Гуанчжоу и бюро Наньчан делятся опытом диспетчеризации проезда Юэ-Гань, что повышает пропускную способность зоны на величину свыше 20%. Задержка отклика пограничного уровня строго контролируется в пределах 500 мс для обеспечения своевременного устранения аварийных ситуаций.

На терминальном уровне обратной связи (бортовом/прирельсовом) интеллектуальный подвижной состав, оснащенный модулем связи 5G-R, в режиме реального времени загружает более 200 параметров, таких как позиционирование на уровне сантиметров (точность Beidou III ± 10 см) и потребление энергии тяги. Сеть волоконно-оптических датчиков со стороны пути отслеживает деформацию пути с плотностью 1 узел на 200 м (точность 0,01 мм), частота выборки данных 10 Гц. Данные за 2024 год показывают, что коэффициент полноты загрузки данных на терминальном уровне достигает 99,992 %.

Для преобразования алгоритмической схемы рекомендаций в трехмерную пространственно-временную карту была разработана визуальная система поддержки принятия решений (VDSS). Диспетчеры могут перетаскивать временную шкалу, чтобы просмотреть состояние дорожной сети в ближайшие 15 минут и вручную корректировать весовые коэффициенты, чтобы вернуть их в модель для оптимизации в замкнутом цикле. Практика Бюро Чэнду показала, что система VDSS повышает эффективность принятия решений в сложных сценариях на 58% и сокращает цикл обучения новых диспетчеров на 42%.

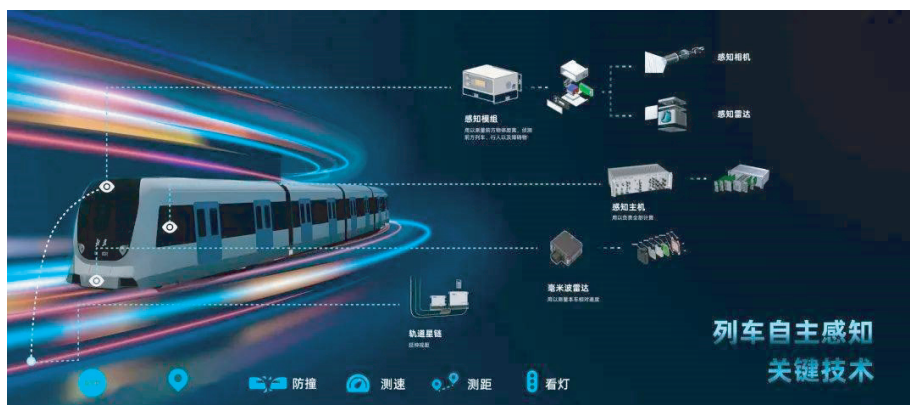


Рис. 2. Основные элементы управления движением поездов на железных дорогах в КНР

Заключение

Анализ показывает, что трехуровневая система управления железнодорожным движением обеспечивает реализацию большого объема перевозок на железнодорожном транспорте КНР.

Основой выбора решения при построении системы являлась выработка критерия качества управления, разработка имитационной модели линии, на которой апробировалось принятое решение.

Необходимыми дальнейшими решениями является совершенствование методов защиты информации в интеллектуальной системе управления. 

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания от 20.03.2025 № 103-00001-25-02.

Литература

1. Китайская национальная железнодорожная группа. Техническая спецификация системы управления движением поездов CTCS-3, 2022. - Текст : непосредственный.
2. Zhang et al. Hybrid MILP-MARL Framework for Railway Scheduling, IEEE T-ITS, 2023.
3. Liu, X. et al. Deep Reinforcement Learning for Emergency Handling in HSR, Transportation Research Part C, 2023.
4. White Paper on Intelligent Dispatch for Qinghai-Tibet Railway, 2021.
5. Wang et al. Оптимизация системы подвижных блоков с помощью NSGA-III, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024.
6. Китайская академия железнодорожных наук. Белая книга по технологии чипов искусственного интеллекта для железных дорог, 2023. - Текст : непосредственный.