

О ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ТРАНСПОРТА В СЕТИ ГОРОДСКИХ ДОРОГ

Е.А. Софронова

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
Россия, 119333, Москва, Вавилова ул., 44, корп. 2
E-mail: sofronova_ea@mail.ru

Ключевые слова: модель транспортного потока, синтез управления, символьная регрессия.

Аннотация: Предложена постановка задачи синтеза управления транспортными потоками. Управление транспортными потоками осуществляется за счет выбора длительностей рабочих фаз светофоров в зависимости от состояния объекта. Объектом управления является транспортный поток. Состоянием объекта является числовая оценка величины потока на каждом участке дороги в каждый момент времени. Информация о количественных характеристиках потока поступает с детекторов дорожной инфраструктуры. Задача состоит в том, чтобы найти функцию управления светофорами, которая зависит от состояния транспортного потока. Задача рассматривается как задача поиска математического выражения функции. Для решения задачи синтеза управления предложено использовать современные численные методы символьной регрессии.

1. Введение

Управление потоками транспорта в сети городских дорог осуществляется с помощью переключения фаз светофоров определенной длительности. Сеть дорог разделена на участки, каждый из которых характеризуется максимальной вместимостью транспортных средств (ТС) и числовой оценкой текущего состояния, выраженной в количестве ТС усредненного размера. Современные города оснащены дорожной инфраструктурой, обеспечивающей возможность получения оценок состояния сети в любой момент времени. К основным типам фиксирующих устройств дорожной инфраструктуры относятся радиолокационные детекторы, петлевые детекторы, видеокамеры. Использование совокупности детекторов позволяет получать различные необходимые характеристики транспортных потоков как на перекрестках, так и на соединяющих их дорогах.

В работе предлагается решать задачу управления транспортными потоками как задачу синтеза, в которой необходимо найти управление как функцию вектора пространства состояний. Решение задачи синтеза обеспечит возможность учитывать непредусмотренные заранее изменения транспортного потока. Например, при аварии или изменении погодных условий происходит резкое изменение состояния объекта. При этом полученная функция управления обеспечит получение оптимального решения без дополнительных вычислений, в то время как программное управление, получаемое при решении задачи оптимального управления [1, 2], может быть рассчитано только для ограниченных и заранее предусмотренных изменений потока.

2. Постановка задачи

Рассмотрим задачу синтеза управления транспортными потоками в сети городских дорог. В задаче задана универсальная рекуррентная математическая модель управления транспортными потоками в сети городских дорог, построенная на основе теории управляемых сетей [3, 4]

$$(1) \quad \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{A}(\mathbf{u}(k))) + \boldsymbol{\delta}(k), \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{u} \in U \subseteq \mathbb{R}^m.$$

Значениями компонент вектора состояния $\mathbf{x}(k) = [x_1(k) \dots x_L(k)]^T$ являются числовые оценки транспортного потока в единицах ТС усредненного размера на всех участках дорог L рассматриваемой сети. Время дискретизировано на такты управления $k, k = \overline{1, K}, K$ – заданное количество тактов управления. Изменение транспортного потока за один такт управления происходит в соответствии с некоторой функцией $\mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{A}(\mathbf{u}(k)))$, зависящей от вектора состояния и матрицы конфигураций $\mathbf{A}(\mathbf{u}(k))$. Матрица конфигураций представляет собой матрицу смежности графа сети дорог с маневрами, которые разрешены управлением на текущем такте. Кроме этого, на каждом такте управления происходит приращение входного потока $\boldsymbol{\delta}(k) = [\delta_1(k) \dots \delta_L(k)]^T$.

Управлением являются рабочие фазы светофоров на всех регулируемых перекрестках M в сети, $\mathbf{u}(k) = [u_1(k) \dots u_M(k)]^T$. Длительности рабочих фаз ограничены.

Последовательность переключения фаз определена

$$(2) \quad S_i = (0, 1, \dots, u_i^+), i = \overline{1, M}.$$

Задана область начальных состояний

$$(3) \quad X \subseteq \mathbb{R}^n.$$

На каждом участке дороги установлено минимальное и максимальное допустимые значения количества ТС.

Необходимо найти функцию управления как функцию от вектора состояния

$$(4) \quad \mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \in U,$$

которая обеспечивает минимальное значение заданного критерия качества

$$(5) \quad J = \sum_{k=1}^K f_0(\mathbf{x}(k), \mathbf{A}(\mathbf{u}(k))) = \sum_{k=1}^K f_0(\mathbf{x}(k), \mathbf{A}(\mathbf{h}(\mathbf{x}(k)))) \rightarrow \min.$$

3. Методы решения

Задача синтеза системы управления как функции от состояния для одного начального состояния была сформулирована в [5]. Для решения задачи синтеза был разработан метод динамического программирования, применение которого приводит к получению множества значений вектора управления в зависимости от значений вектора состояний. Наиболее эффективно метод динамического программирования используется для дискретных значений вектора состояний. При множестве начальных состояний и большом количестве значений вектора состояний результатом метода динамического программирования является большое количество данных, что было названо «проклятием размерности». Полученное решение чувствительно к начальному состоянию. Для других начальных состояний полученное управление не будет оптимальным и потребуются решить задачу синтеза заново.

Для решения задачи синтеза было предложено уравнение Беллмана, из которого можно построить функцию управления от состояния. В известных примерах уравнение Беллмана имеет стандартную квадратичную форму и в общем случае не существует подхода для его нахождения.

Кроме этого, при синтезе осуществляется поиск функции от многих переменных, а не от одной переменной по времени как в задаче оптимального управления, что с вычислительной точки зрения является более сложным.

Задача синтеза системы управления для всего пространства состояний как общая задача синтеза была сформулирована в работе [6]. В качестве метода решения был использован принцип максимума Л.С. Понтрягина, который не позволяет находить многомерные функции управления, но может быть использован для несложных моделей объектов управления невысокой размерности. Результатом решения общей задачи синтеза является функция управления, подставляя которую в правые части модели объекта, можно получить частное решение, которое из любого начального состояния обеспечивает оптимальное значение критерия качества за заданное время.

В настоящей работе предложено решать задачу синтеза управления потоками транспорта численно [7] в виде многомерной функции управления. Размерность функции управления определяется размерностью вектора управления. Количество аргументов определяется размерностью вектора состояния. В качестве метода решения предложено использовать машинное обучение управления методом символьной регрессии, которые позволяют искать математические выражения в закодированном виде с помощью специального генетического алгоритма, специально разработанного таким образом, чтобы после основных операций эволюции получать корректные коды функций математических выражений.

4. Заключение

Предложено решать задачу правления транспортными потоками как задачу синтеза управления. Сформулирована постановка задачи синтеза управления транспортными потоками. В качестве метода решения предложено использовать машинное обучение управления методом символьной регрессии, которые позволяют получать математическое выражение функции управления. Одну из важнейших ролей при решении задачи синтеза играет модель объекта управления. Вопрос валидации использованной модели реальному процессу движения транспортных потоков в статье не представлен, хотя он подразумевается.

Список литературы

1. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 392 с.
2. Софронова Е.А. К задаче оптимального управления транспортными потоками // В сборнике: XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023). Материалы мультikonференции. В 4 т. Волгоград, 2023. С. 185-187.
3. Дивеев А.И. Теория управляемых сетей и ее приложения. М.: ВЦ РАН, 2007. 160 с.
4. Софронова Е.А. Универсальная рекуррентная модель управления транспортными потоками в классе микроскопических моделей // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 4. С. 3-29.
5. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 460 с.
6. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления / 2-е изд. М.: Наука, 1969. 408 с.
7. Дивеев А.И. Численные методы решения задачи синтеза управления. М.: РУДН, 2019. 192 с.