Отчет по научно-исследовательской работе на тему: «MARL ДЛЯ СЕТИ СВЕТОФОРОВ»

Т. И. Тисленко

ФГАОУ ВО «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт математики и фундаментальной информатики
Кафедра высшей и прикладной математики

Научный руководитель — к.ф.-м.н., доцент Д.В. Семенова

Красноярск, 2021

Актуальность

Проблема

оптимизации планов координации светофорных объектов в условиях городской сети.

Рисунок 1: Пробки в Красноярске

Цели и задачи

Цель работы

Разработка и исследование математической модели мультиагентной системы для задачи координации светофорных объектов в транспортной сети мегаполиса.

Задачи

1. Построить математическую модель MARL для сети двухфазных светофоров.
2. Разработать алгоритм решения задачи MARL.
3. Провести вычислительные эксперименты для одного и двух светофоров.

Основные определения и обозначения

Таблица 1: Основные обозначения

K	число агентов
k	номер агента
S^k	пространство состояний для k-го агента
A^k	множество решений для k-го агента
$\mathbf{s}_t$	совокупное состояние среды в момент времени t
$\mathbf{a}_t$	совокупное управление в момент времени t
$r(s_t, a_t; s_{t+1})$	время, подсчитанное для машин двигающихся на фазе s_{t+1}
$N(k)$	множество соседних с k агентов
$\mathbf{s}^{kj}$	совместные состояния агентов k и j
$\mathbf{a}^{kj}$	совместные действия агентов k и j
$V\Big(\{S_t, \delta\}\Big)$	функция суммарных доходов/вознаграждений для K агентов

Основные определения и обозначения

Для k-го агента

- S^k определяются классом вычетов по модулю

$$S^k = n^{(k)}\mathbb{Z} = \left\{ s^{(0)} = 0, s^{(1)} = 1, \ldots, s^{\left(n^{(k)}-1\right)} = n^{(k)} - 1 \right\}, \quad n^{(k)} = |S^k|,$$

  где $s^{(i)}$ интерпретируется как «активна фаза i»;
- A^k определяется характеристикой кольца $n^{(k)}\mathbb{Z}$, т.е. не превышает ее, $A^k = \left\{ a^{(0)} = 0, a^{(1)} = 1, \ldots, a^{(n^{(k)}-1)} = n^{(k)} - 1 \right\}$, где $a^{(j)}$ интерпретируется как «сменить фазу j раз».

В момент времени t

- $\mathbf{s}_t = \{s_t^1, s_t^2, \ldots, s_t^K\} \in \mathcal{S} = S^1 \times S^2 \times \ldots \times S^K$;
- $\mathbf{a}_t = \{a_t^1, a_t^2, \ldots, a_t^K\} \in \mathcal{A} = A^1 \times A^2 \times \ldots \times A^K$;
- $\mathbf{a}^{kj} \in A^k \times A^j$ и $\mathbf{s}^{kj} \in S^k \times S^j$;
- $V\left(\{\mathbf{s}_t, \delta\}\right) = \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t)$, где $0 \leq \gamma \leq 1$ — коэффициент переоценки, $\{\mathbf{s}_t\}$ — реализация случайного процесса при выбранной стратегии $\delta = \{\mathbf{a}_t, 0 \leq t < \infty\}$.

Постановка задачи MARL

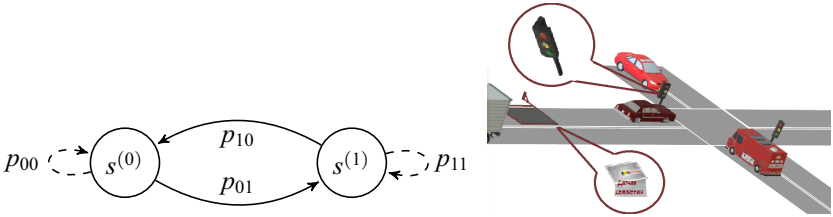


Рисунок 2: Стохастический граф управляемого процесса смены фаз для двухфазного светофора и его визуальная интерпретация. Пунктиром обозначено действие $a^{(0)}$, а сплошной — $a^{(1)}$

Постановка задачи

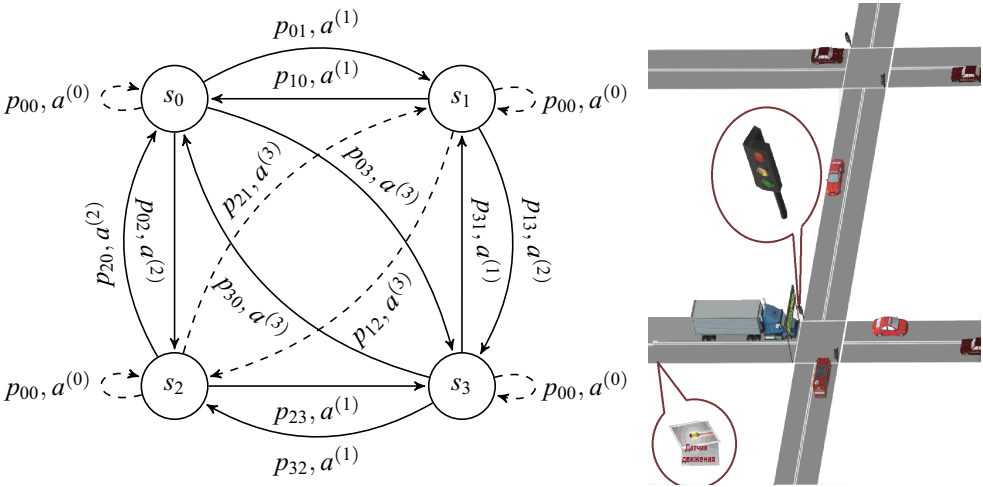


Рисунок 3: Стохастический граф сети из двух двухфазных светофоров

Задача MARL для сети светофоров

Постановка задачи MARL для сети светофоров

Требуется найти такое управление $\delta = \{\mathbf{a}_t, 0 \le t < \infty\}$, которое доставляет максимум функции суммарных вознаграждений для K агентов

$$V\Big(\{\mathbf{s}_t, \delta\}\Big) = \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t) \to \max,$$

где $0 \le \gamma \le 1$ — коэффициент переоценки, $\{\mathbf{s}_t\}$ — реализация случайного процесса.

Решение ищется методом динамического программирования на основе принципа оптимальности Беллмана. Функцию суммарных вознаграждений при оптимальном управлении на шаге t:

$$V^*(\{\mathbf{s}_{t'}\}_{t'=0}^{t'=t}) = \max_{\mathbf{a}\in\mathcal{A}} Q_t(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}), \tag{1}$$

где

$$Q_t(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}) = \sum_{\mathbf{s}_{t+1}\in\mathcal{S}} p(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}; \mathbf{s}_{t+1})\Big(r(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}; \mathbf{s}_{t+1}) + \gamma \max_{\mathbf{a}'\in\mathcal{A}} Q_{t-1}(\mathbf{s}_{t+1}, \mathbf{a}')\Big). \tag{2}$$

Решение задачи MARL для двух светофоров

- Множество соседних агентов $N(k) = \{j\}$, $k \neq j$, $k,j = 0,1$.
- Функция обучения агента k

$$Q_t^k(\mathbf{s}_t, a_t^k) = \sum_{a_j \in A^j} \underbrace{p(a_t^k; \mathbf{a}_t^{kj}) Q_t(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t^{kj})}_{Q_t^{kj}(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t^{kj})} = \sum_{a^j \in A^j} Q_t^{kj}(\mathbf{s}, \mathbf{a}_t^{kj}). \tag{3}$$

$$Q_t^k(\mathbf{s}_t, a_t^k) = \sum_{a_j \in A^j} p(a_t^k; \mathbf{a}_t^{kj}) \left(\sum_{\mathbf{s}_{t+1} \in \mathcal{S}} p(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t^{kj}; \mathbf{s}_{t+1}) \Big(r(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t^{kj}; \mathbf{s}_{t+1}) + \gamma \max_{\mathbf{a}' \in \mathcal{A}} Q_{t-1}(\mathbf{s}_{t+1}, \mathbf{a}') \Big) \right) =$$

$$= \sum_{\mathbf{s}_{t+1} \in \mathcal{S}} \sum_{a_j \in A^j} p(\mathbf{s}_t, a_t^k; \mathbf{s}_{t+1}) \Big(r(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t^{kj}; \mathbf{s}_{t+1}) + \gamma \max_{\mathbf{a}' \in \mathcal{A}} Q_{t-1}(\mathbf{s}_{t+1}, \mathbf{a}') \Big). \tag{4}$$

Оптимальное решение для агента k на шаге t

$$a_t^k = \arg\max_{a^k \in A^k} \sum_{a^j \in A^j} Q_t^{kj}(\mathbf{s}, \mathbf{a}^{kj}). \tag{5}$$

Решение задачи MARL для сети светофоров

Имея алгоритм решения задачи для двух светофоров, можно получить решение для любого их количества в сети.

Алгоритм MARLIN: основная идея

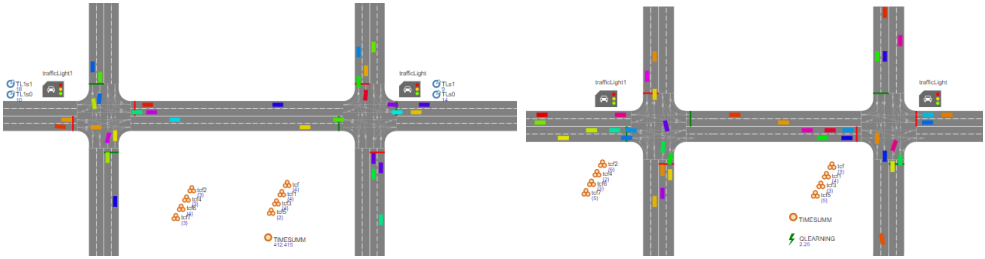
Оптимальное управление для фиксированного агента k будем искать как решение задачи MARL в виде:

$$a_t^k = \arg\max_{a^k \in A^k} \sum_{j \in N(k)} \sum_{a^j \in A^j} Q_t^{kj}(\mathbf{s}, \mathbf{a}^{kj}) p(\mathbf{s}' | (\mathbf{s}, \mathbf{a}^{kj})) \quad (6)$$

El-Tantawy S., Abdulhai B. and Abdelgawad H., Multiagent Reinforcement Learning for Integrated Network of Adaptive Traffic Signal Controllers (MARLIN-ATSC) // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 14, no. 3. 2013. — P. 1140-1150.

Вычислительные эксперименты

Вычислительные эксперименты проводились в системе имитационного моделирования Anylogic. Алгоритмы реализованы на языке программирования Java 8. Построены модели перекрестка с фиксированной длительностью фаз (рис. 4а) и управляемого марковским процессом (рис. 4б).



а) б)

Рисунок 4: а) модель перекрестка с фиксированной длительностью фаз, б) модель перекрестка управляемого марковским процессом

Основные результаты работы

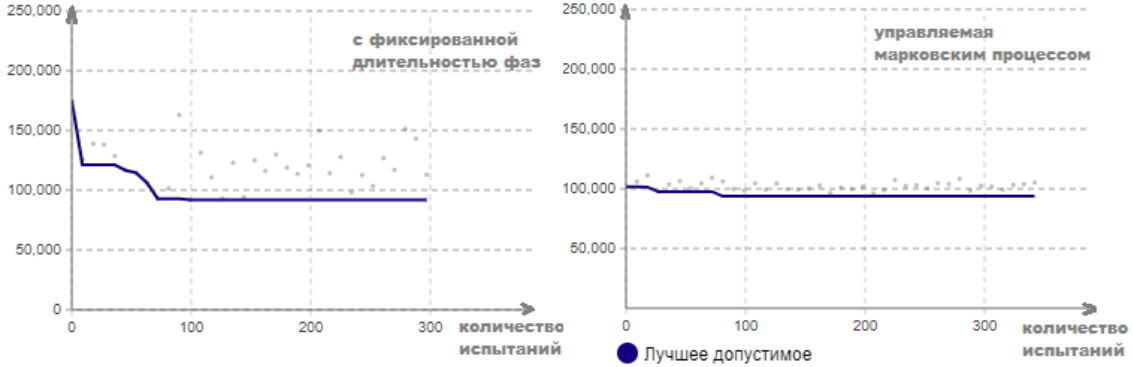


Рисунок 5: Сравнение задержки *TIMESUMM*

Основные результаты

- Построена математическая модель процесса выбора фазы для сети светофоров, отличающаяся учетом текущего расположения светофоров и их загрузки и позволяющая сформулировать оптимизационные задачи, целью которых является минимизация задержки трафика автомобилей.
- Разработана структура мультиагентной системы — сети сфетофоров участка дороги.
- Проведены вычислительные эксперименты в системе имитационного моделирования Anylogic для одного и двух сфетофоров.

Аппробация работы

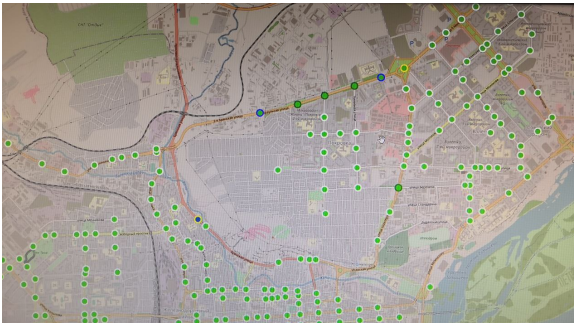


Рисунок 6: Карта перекрестков, предоставленная УДиБ г. Красноярска

Аппробация работы

Рисунок 7: Модель перекрестка проспект Свободный – ул. Годенко

Планы

В следующем семестре планируется:

- проверить эффективность модели на реальных объектах,
- разработать инструменты обучения модели, требующие меньших вычислительных ресурсов.

Основная литература

- El-Tantawy S., Abdulhai B. and Abdelgawad H., Multiagent Reinforcement Learning for Integrated Network of Adaptive Traffic Signal Controllers (MARLIN-ATSC) // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 14, no. 3. 2013. — P. 1140-1150.
- Лекции по случайным процессам: учебное пособие / А. В. Гасников, Э. А. Горбунов, С. А. Гуз и др.; под ред. А. В. Гасникова. – «Москва»: МФТИ, 2019. — 285 с.
- Марковские процессы принятия решений. / Майн Х., Осаки С. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977. — 176 с.
- Sandholm T.W. Contract Types for Satisficing Task Allocation: I Theoretical Results // AAAI Spring Symposium Series: Satisficing Models. 1998. — P. 68-75.
- Управляемые марковские процессы с конечными пространствами состояний и управлений, Теория вероятностей и ее примен, Том 11. /В. В. Рыков. 1966. — 343-351 с.