

# 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

## 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 $j$
$V(\{S_t, \delta\})$	функция суммарных доходов/вознаграждений для $K$ агентов

# Основные определения и обозначения

## Для $k$ -го агента

- $S^k$  определяются классом вычетов по модулю

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

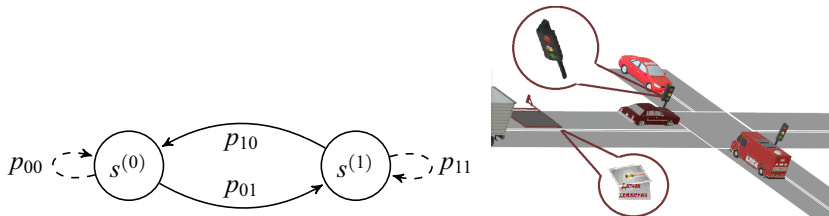
где  $s^{(i)}$  интерпретируется как «активная фаза  $i$ »;

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

## В момент времени $t$

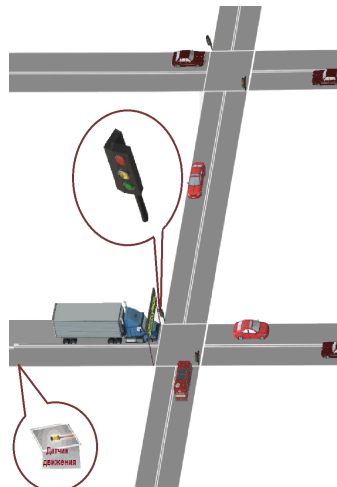
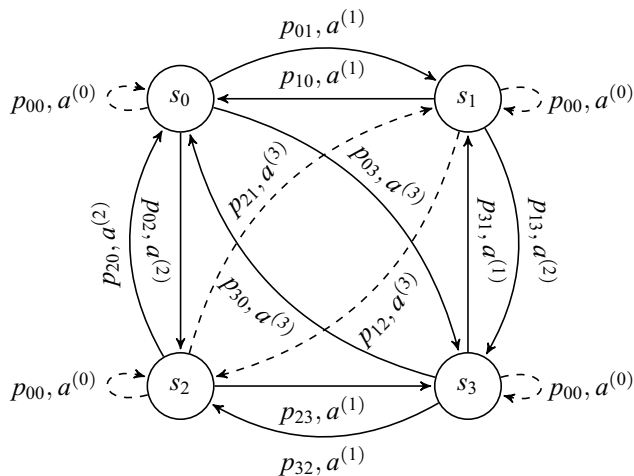
- $\mathbf{s}_t = \{s_t^1, s_t^2, \dots, s_t^K\} \in \mathcal{S} = S^1 \times S^2 \times \dots \times S^K$ ;
- $\mathbf{a}_t = \{a_t^1, a_t^2, \dots, a_t^K\} \in \mathcal{A} = A^1 \times A^2 \times \dots \times A^K$ ;
- $\mathbf{a}^{kj} \in A^k \times A^j$  и  $\mathbf{s}^{kj} \in S^k \times S^j$ ;
- $V(\{\mathbf{s}_t, \delta\}) = \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t)$ , 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  $\delta = \{\mathbf{a}_t, 0 \leq t < \infty\}$ , которое доставляет максимум функции суммарных вознаграждений для  $K$  агентов

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

где  $0 \leq \gamma \leq 1$  — 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  $t$ :

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

где

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



# Решение задачи MARL для двух светофоров

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

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

$$\begin{aligned} Q_t^k(\mathbf{s}_t, a_t^k) &= \sum_{a_j \in A^j} p(a_t^k; \mathbf{a}_t^{kj}) \left( \sum_{\mathbf{s}_{t+1} \in \mathcal{S}} p(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t^{kj}; \mathbf{s}_{t+1}) \left( r(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t^{kj}; \mathbf{s}_{t+1}) + \gamma \max_{\mathbf{a}' \in \mathcal{A}} Q_{t-1}(\mathbf{s}_{t+1}, \mathbf{a}') \right) \right) = \\ &= \sum_{\mathbf{s}_{t+1} \in \mathcal{S}} \sum_{a_j \in A^j} p(\mathbf{s}_t, a_t^k; \mathbf{s}_{t+1}) \left( r(\mathbf{s}_t, \mathbf{a}_t^{kj}; \mathbf{s}_{t+1}) + \gamma \max_{\mathbf{a}' \in \mathcal{A}} Q_{t-1}(\mathbf{s}_{t+1}, \mathbf{a}') \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Оптимальное решение для агента  $k$  на шаге  $t$

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

# 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

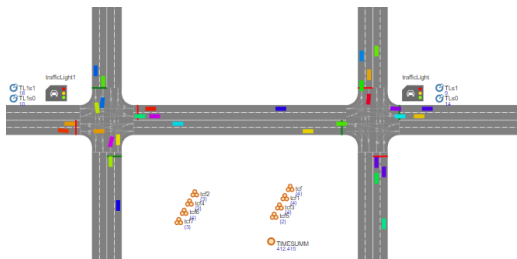
Оптимальное управление для фиксированного агента  $k$  будем искать как решение задачи MARL в виде:

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

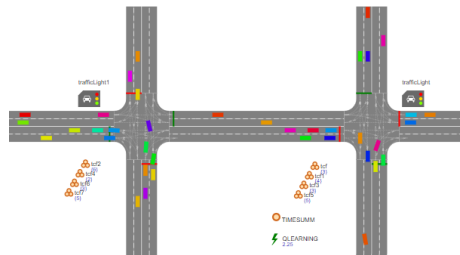
El-Tantawy S., Abdulhai B. and Abdelgawad H., Multiagent Reinforcement Learning for Integrated Network of Adaptive Traffic Signal Controllers (MARLIN-ATSC) // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 14, no. 3. 2013. — P. 1140-1150.

# 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

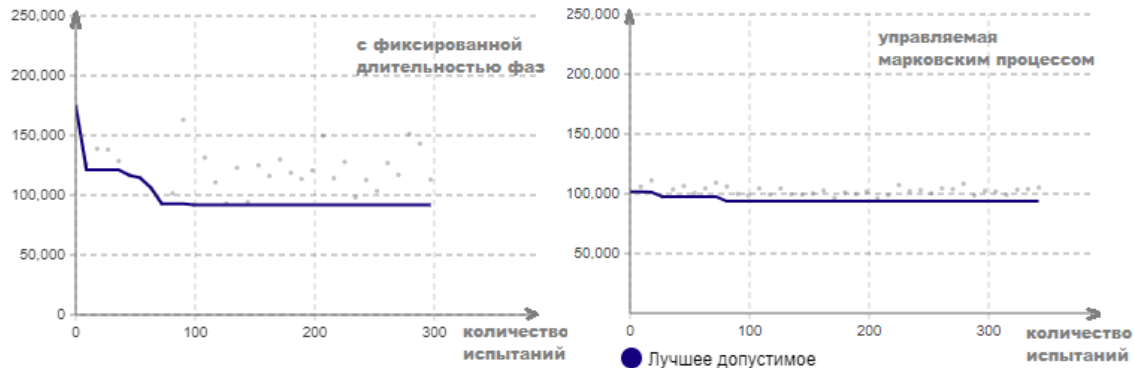
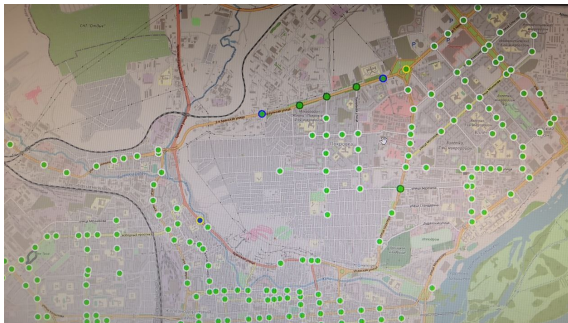


Рисунок 5: Сравнение задержки *TIMESUMM*

- 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 светофоров участка дороги.
- Проведены вычислительные эксперименты в системе имитационного моделирования Anylogic для одного и двух светофоров.



**Рисунок 6:** Карта перекрестков, предоставленная УДиБ г. Красноярск








**Рисунок 7:** Модель перекрестка проспект Свободный – ул. Годенко

## В следующем семестре планируется:

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



-  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.