



УДК 004.75

## МУЛЬТИАГЕНТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЕЗДА ПЕРЕКРЕСТКА ДОРОГ БЕСПИЛОТНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ

И.А. Зикратов<sup>a</sup>, И.И. Вискнин<sup>a</sup>, Т.В. Зикратова<sup>b</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>b</sup> Военный институт (Военно-морской политехнический) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Пушкин, 197045, Российская ФедерацияАдрес для переписки: [wixnin@cit.ifmo.ru](mailto:wixnin@cit.ifmo.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 26.05.16, принята к печати 30.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-839-849

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Зикратов И.А., Вискнин И.И., Зикратова Т.В. Мультиагентное планирование проезда перекрестка дорог беспилотными транспортными средствами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 839–849. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-839-849

### Аннотация

Предложена система управления движением беспилотных транспортных средств – агентов на перекрестке дорог. В отличие от известных решений, которые основаны на использовании полуавтономных систем управления, имеющих в составе центральный процессор, предложенный алгоритм базируется на принципах децентрализованного мультиагентного управления. Оптимальный план проезда перекрестка вырабатывается совместно всеми агентами, входящими в динамическую коллаборацию беспилотных транспортных средств при помощи методов оптимизации. В процессе обмена информацией о себе и окружающей среде агенты определяют такую последовательность проезда перекрестка всеми транспортными средствами, которая является оптимальной для заданного критерия. Проведенные эксперименты показывают, что этот протокол может значительно уменьшить задержку трафика по сравнению с традиционными системами управления дорожным движением. Эффективность предложенного алгоритма возрастает с увеличением плотности дорожного трафика. Отсутствие в составе системы управления критически важного объекта – центрального процессора – существенно снижает эффективность возможных сбоев и хакерских атак на систему управления перекрестком.

### Ключевые слова

мультиагентная система, автономные транспортные средства, киберфизическая система, дорожное движение, плотность движения, управление пересечением перекрестка

## MULTIAGENT PLANNING OF INTERSECTION PASSAGE BY AUTONOMOUS VEHICLES

I. A. Zikratov<sup>a</sup>, I.I. Viksnin<sup>a</sup>, T.V. Zikratova<sup>b</sup><sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>b</sup> N.G. Kuznetsov Naval Academy, Pushkin, 197045, Russian FederationCorresponding author: [wixnin@cit.ifmo.ru](mailto:wixnin@cit.ifmo.ru)

### Article info

Received 26.05.16, accepted 30.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-839-849

Article in Russian

**For citation:** Zikratov I.A., Viksnin I.I., Zikratova T.V. Multiagent planning of intersection passage by autonomous vehicles. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 839–849. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-839-849

### Abstract

We propose a traffic management system for autonomous vehicles that are agents at the intersection. In contrast to the known solutions based on the usage of semiautonomous control systems in assembly with the control unit, this algorithm is based on the principles of decentralized multiagent control. The best travel plan for intersection passage is produced by means of optimization methods jointly by all agents belonging to a dynamic collaboration of autonomous vehicles. The order of road intersection optimal for a given criterion is determined by the agents in the process of information exchange about themselves and environment. Our experiments show that this protocol can reduce significantly the traffic density as compared to the

traditional systems of traffic management. Moreover, the effectiveness of the proposed algorithm increases with increasing density of road traffic. In addition, the absence of the critical object, that is the control unit, in the control system, reduces significantly the effectiveness of possible failures and hacker attacks on the intersection control system.

#### Keywords

multiagent system, autonomous vehicles, cyber-physical system, road traffic, traffic density, intersection management

### Введение

Интенсивное развитие технологий управления робототизированными транспортными средствами убедительно доказывает, что внедрение автомобильных робототехнических комплексов является одной из основных тенденций автомобилестроения. Это подтверждается активным участием в разработке устройств и алгоритмов управления автомобилем без участия человека практически всех ведущих зарубежных автомобилестроителей, многих отечественных, а также ряда научных коллективов и компаний, разрабатывающих интеллектуальные системы управления киберфизическими системами. Необходимо отметить, что существующие в настоящее время технические устройства автоматизации управления автомобилем рассматриваются как некие помощники водителю-человеку в тех или иных дорожных условиях при решении отдельных задач управления. К их числу можно отнести разнообразные парктроники и помощники парковки, круиз-контроль и автопилоты, комплексы экстренного торможения перед препятствием и т.д. Однако в последние годы все больше внимания уделяется разработке алгоритмов управления автомобилем для более отдаленной перспективы, когда человек будет полностью исключен из процесса управления беспилотным транспортным средством (БТС) [1].

В этой связи появляются алгоритмы управления беспилотными автомобилями, предназначенные для решения комплекса взаимосвязанных задач [2–5]. К ним относятся алгоритмы, обеспечивающие плавное движение автомобиля, выбор корректной траектории движения [6], предотвращение столкновения с препятствиями [7] и другими участниками дорожного движения [8], алгоритмы безопасного и быстрого разворота, проезда перекрестка дорог [9–13], и многие другие.

Разработчики таких алгоритмов преследуют две взаимосвязанные цели:

- повышение эффективности перевозок;
- обеспечение безопасности на дорогах.

Первая цель достигается за счет использования современных алгоритмов оптимального управления при сетевом взаимодействии БТС. Вопросы безопасности решаются путем исключения влияния на процесс управления человеческого фактора и оснащения беспилотников и (или) дорожной инфраструктуры комплексом устройств зондирования, позволяющих в режиме реального времени эффективно наблюдать за дорожной обстановкой в различных дорожных условиях и временах суток.

В настоящей работе представлен алгоритм, позволяющий решать одну из типовых задач, стоящих перед БТС – нахождение оптимального плана безопасного проезда перекрестка.

Перед описанием алгоритма в работе рассматриваются возможные подходы к решению задач оптимизации в коллективных робототехнических системах. Вводятся ограничения и допущения задачи. После описания алгоритма в работе представлены результаты экспериментов, показывающих эффективность разработанного алгоритма прохождения перекрестка дорог.

### Подходы к организации систем группового управления роботами

Будем рассматривать группу БТС, приближающихся к перекрестку и (или) находящихся на нем, как мультиагентную робототехническую систему (МРТС), характеризующуюся следующими факторами:

- непредсказуемой динамикой внешней среды;
- неполнотой и противоречивостью знаний роботов (агентов) о состоянии как внешней среды, так и других участников дорожного движения;
- разнообразием вариантов путей достижения цели, структур коллектива, распределения ролей;
- сложностью обеспечения надежной коммуникации, распределенностью МРТС в пространстве.

Задача управления рассматриваемой МРТС состоит в выработке стратегии, согласно которой система управления МРТС сгенерирует план проезда перекрестка каждым беспилотником.

В групповой робототехнике известны два принципиально различных подхода для реализации управления группами роботов – с централизованным и децентрализованным, коллективным по своей сути, управлением (рис. 1).

Централизованная модель управления включает центральное устройство управления (ЦУУ) и каналы связи со всеми  $N$  роботами группы  $\mathfrak{R}$  [14]. При этом, как показано на рис. 1, а, каждый робот группы  $O_i \in O(i=1, N)$  должен постоянно передавать в ЦУУ информацию о своем текущем состоянии  $R_i$  и текущем состоянии окружающего его участка среды  $E_i$ , т.е. информацию о вектор-функции  $S_i = \{R_i, E_i\}$ . На основе этой информации ЦУУ решает для всех роботов группы задачу формирования действий  $A_i(i=1, N)$ , направленных на оптимальное достижение групповой цели в текущей ситуации. Эти дейст-

вия  $A_i$  по линиям связи поступают к роботам, которые обеспечивают выполнение этих действий. После этого цикл работы системы повторяется заново с учетом новой информации о состоянии роботов и среды и т.д. – до достижения групповой цели.

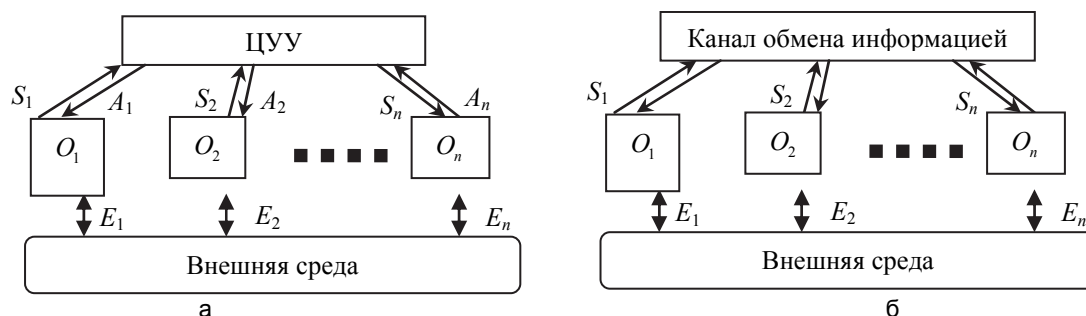


Рис. 1. Централизованная (а) и децентрализованная (б) модели управления мультиагентной робототехнической системой

В децентрализованной модели управления (рис. 1, б) процессорное устройство робота-агента  $O_i$  связано с процессорными устройствами других роботов каналами обмена информацией, по которым передается информация о текущих состояниях  $S_i$  остальных роботов и выбираемых ими на каждом цикле выполнения итерационной процедуры действиях  $A_i^{(k+1)}$ , ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ). Кроме того, процессорное устройство получает информацию о состоянии  $S_i^0$  своего робота и окружающей среды  $E_i^0$ . На основании всей полученной информации вычислительный блок  $i$ -го робота вычисляет значение приращения целевого функционала  $\Delta Y$  для всех возможных допустимых действий в текущей ситуации и в качестве нового действия  $A_i^{(k+1)}$  выбирает то, для которого значение  $\Delta Y$  максимально.

В работах [9, 10] предложены разновидности алгоритма проезда перекрестка БТС с использованием централизованной стратегии управления. Идея заключается в том, что каждым перекрестком должен управлять автономный интеллектуальный агент (центральное устройство управления), регулирующий режим движения каждого автомобиля индивидуально, а не светофор, запрещающий или разрешающий движение всего потока. Суть алгоритма заключается в следующем. Беспилотник  $O_i$ , приближаясь к перекрестку, устанавливает связь с ЦУУ перекрестка, передает ему сообщение  $S_i$ . ЦУУ моделирует ситуацию с учетом заявок других автомобилей и «встраивает»  $O_i$  в план проезда перекрестка с учетом ранее поступивших заявок от других агентов и состояния окружающей среды.

К существенным недостаткам такого подхода можно отнести:

1. при централизованной стратегии группового управления время принятия решения возрастает экспоненциально от числа  $N$  объектов в группе [14];
2. безопасность проезда перекрестка в существенной степени зависит от надежности ЦУУ и канала связи с агентами, что вынуждает принимать меры по резервированию этих критически важных объектов.

Децентрализованная стратегия управления в значительной мере лишена этих недостатков, что делает привлекательной разработку алгоритма решения задачи с использованием межагентного общения и принятия решения.

### Постановка задачи мультиагентного планирования пересечения перекрестка и основная идея решения

Целью управления является перевод системы роботизированных БТС из некоторого начального состояния в заданное конечное состояние так, чтобы некий функционал  $Y$  достигал экстремального значения с учетом принятых ограничений. Сформулируем целевую функцию  $Y$  и систему ограничений задачи оптимального управления из следующих соображений.

Будем рассматривать систему «группа БТС – перекресток дорог» и процессы в ней как дискретные, т.е. ограничившись их значениями в фиксированные моменты времени  $t_k, t_k + 1, t_k + 2, \dots$ . В каждый момент времени  $t_k + f$  каждый беспилотник может занимать (двигаться или стоять) один или несколько элементарных участков местности (ЭУМ). Тогда при наличии  $N$  автомобилей в группе, намеривающихся проехать перекресток, в какие-то моменты времени возможна ситуация, когда на один и тот же ЭУМ могут претендовать несколько БТС (рис. 2).

На рис. 2 представлено пересечение двух дорог. Участок местности условно разделен на ЭУМ (на рисунке от 1 до 72). К перекрестку приближаются три автомобиля. В момент времени  $t_k$  автомобиль А, который намерен пересечь перекресток прямо, находится на ЭУМ № 28, автомобиль В, совершающий

поворот налево, находится на ЭУМ № 42, и двигающийся прямо автомобиль С – на ЭУМ № 39. В соответствии с описанной выше децентрализованной моделью управления МРТС каждый приближающийся к перекрестку автомобиль после процедуры идентификации обменивается информацией о своем текущем состоянии  $S_i$  и выбранных в данный момент времени действиях  $A_i$ .

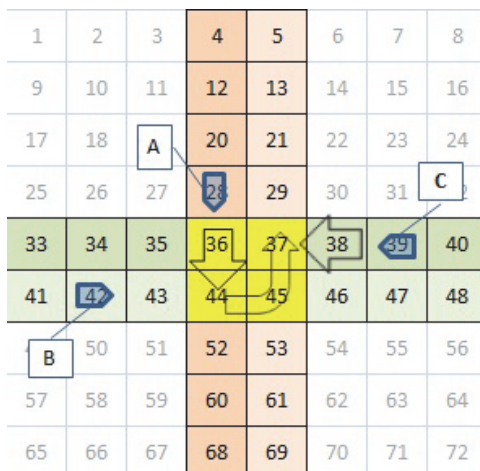


Рис. 2. Перекресток дорог с расположенными беспилотными транспортными средствами А, В и С и направления их движения

Свой план движения  $i$ -й автомобиль на некоторую видимую перспективу, определяемую моментами времени  $t_k, \dots, t_k + f$ , передает остальным членам коллектива в виде протокола:

	$t_k$	$t_k + 1$	...	$t_k + f - 2$	$t_k + f - 1$	$t_k + f$
F	№ ЭУМ	№ ЭУМ	№ ЭУМ	№ ЭУМ	№ ЭУМ	№ ЭУМ

Здесь F – идентификационный номер автомобиля, № ЭУМ – номер элементарного участка, на котором автомобиль «планирует» находиться в момент времени  $t_k + f$ . После обмена сообщениями в ячейках памяти каждого БТС содержится информация о планируемых действиях каждого участника группы, представленная в табл. 1.

	$t_k$	$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$
A	28	36	<b>44</b>	52	60	68
B	42	43	<b>44</b>	45	37	29
C	39	38	37	36	35	34

Таблица 1. Исходный план проезда перекрестка и конфликт в ЭУМ № 44 в момент  $t_k + 2$

Анализ табл. 1 показывает, что для нашего примера в момент времени  $t_k + 2$  имеется конфликт – в этот момент времени на ЭУМ № 44 существует два претендента – автомобили А и В, что является предпосылкой для столкновения этих БТС. Очевидно, что для избегания столкновения автомобилей возможен выбор одного из нескольких вариантов очередности проезда. Так как участниками конфликта являются беспилотники А и В, то возможны два варианта.

Вариант 1. Дорогу уступает автомобиль В. Для этого он делает остановку в ЭУМ № 43 (рис. 3, а). Соответствующий план проезда будет выглядеть следующим образом (табл. 2).

	$t_k$	$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$
A	28	36	44	52	60	68
B	42	43	43	44	45	37
C	39	38	37	36	35	34

Таблица 2. План проезда перекрестка по варианту 1

Вариант 2. Дорогу уступает автомобиль А. Для этого он делает остановку в ЭУМ № 36 (рис. 3, б). План проезда для этого варианта представлен в табл. 3.

Очевидно, что, для того чтобы избежать столкновения, выбор варианта должен осуществляться процессорными устройствами всех автомобилей по одним, заранее заданным решающим правилам. Каж-

дый из автомобилей должен выбрать один и тот же вариант проезда и им руководствоваться на заданном промежутка времени, при условии, если дорожная обстановка будет оставаться неизменной.

	$t_k$	$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$
A	28	36	36	44	52	60
B	42	43	44	45	37	29
C	39	38	37	36	35	34

Таблица 3. План проезда перекрестка по варианту 2

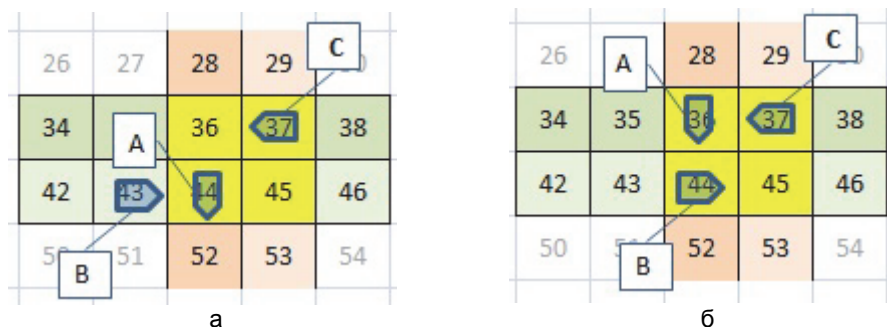


Рис. 3. Расположение автомобилей на проезжей части перекрестка для вариантов 1 (а) и 2 (б)

При выборе варианта очередности проезда потребуем обеспечить максимальную пропускную способность перекрестка для транспортных средств. На практике повышение пропускной способности приводит к уменьшению интервала между автомобилями. Это можно трактовать таким образом, что за некоторый промежуток времени  $T$  перекресток должны проехать как можно большее количество БТС, при условии, что в любой произвольный момент времени  $(t_0 + k) \in T$  ни на один ЭУМ не будут претендовать более двух БТС. Тогда пропускная способность участка дороги будет тем выше, чем больше будет следующее отношение:

$$Y = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M n_{lji}}{M}, \tag{1}$$

где  $N$  – количество БТС, проезжающих перекресток;  $L$  – количество ЭУМ на перекрестке;  $M$  – количество дискрет времени, за который проехали перекресток  $N$  БТС,

$$n_{lji} = \begin{cases} 1, & \text{если } j - \text{БТС находится в } i - \text{й момент времени на } l\text{-м ЭУМ, и } n_{lji-1} \neq n_{lji} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В числителе осуществляется подсчет ЭУМ перекрестка, по которым проезжают автомобили, в знаменателе – время (количество дискрет времени), которое на это затрачено всеми автомобилями группы.

Таким образом, согласно критерию (1), чем больше заданное количество автомобилей проехало перекресток за меньшее время, тем выше эффективность рассматриваемого варианта проезда. Если условие  $n_{lji-1} \neq n_{lji}$  не выполняется, то это означает, что  $j$ -й автомобиль остановился на  $l$ -м ЭУМ, что заведомо ухудшает вариант проезда, так как ЭУМ остается занятым.

Сравним варианты 1 и 2 по критерию (1).

Вариант 1. Автомобиль А проехал два ЭУМ (36 и 44), автомобиль В – три (44, 45 и 37), автомобиль С – два (37 и 36). В общей сложности три автомобиля проехали семь ЭУМ, на все затрачено пять дискрет времени  $(t_k + 1, \dots, t_k + 5)$ .

Вариант 2. Автомобили проехали то же количество ЭУМ, но затратили на это четыре дискрета времени  $(t_k + 1, \dots, t_k + 4)$ . Тогда согласно (1) функционал для варианта 1  $Y^1 = \frac{7}{5} = 1,4$ , для второго вариан-

та  $Y^2 = \frac{7}{4} = 1,75$ .

Таким образом, при использовании критерия (1) очередность проезда перекрестка будет выбрана процессорными устройствами БТС согласно варианту 2.

### Проблемы разных скоростей движения

Рассмотрим работу алгоритма в случае, когда беспилотные транспортные средства двигаются с разными скоростями.

Вводимые ограничения и допущения.

1. Пусть БТС могут двигаться с одной из трех фиксированных скоростей. Первая скорость – БТС за одну дискрету времени проезжает один ЭУМ. Вторая скорость – БТС за одну дискрету времени проезжает два ЭУМ, и третья скорость – когда БТС проезжает три ЭУМ за одну дискрету времени.
2. Независимо от скорости движения при выполнении поворота БТС плавно снижает скорость, и проходит поворот на первой скорости (рис. 4).

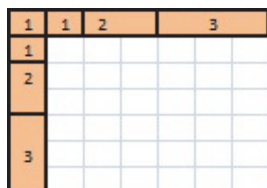


Рис. 4. Схема выполнения поворота при движении беспилотного транспортного средства со скоростью «три элементарных участка местности в дискрету времени»

3. Тормозной путь находится в квадратичной зависимости от скорости движения. Так, если при скорости автомобиля в один ЭУМ в дискрету времени тормозной путь будем считать равным один ЭУМ, то тормозной путь для второй скорости будет составлять 4 ЭУМ, а для третьей скорости – 9 ЭУМ.

Пусть к перекрестку последовательно приближаются автомобили А (скорость 1, поворачивает налево), В (скорость 2, поворачивает налево) и С (скорость 3, движется прямо) (рис. 5).

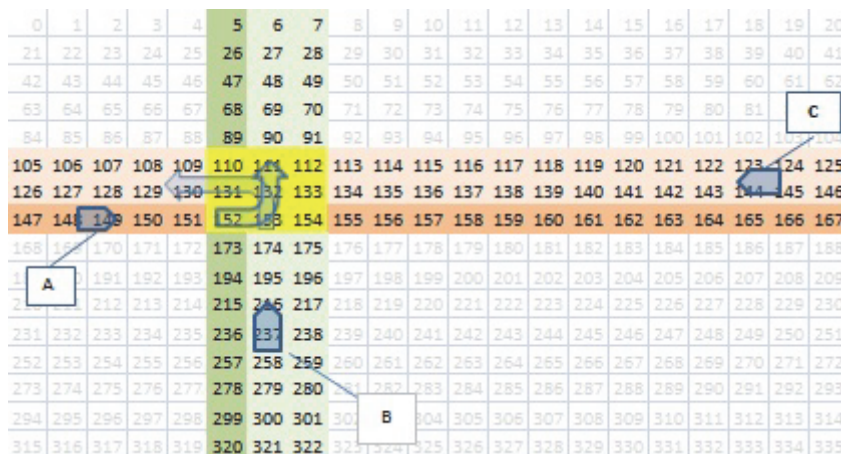


Рис. 5. Перекресток дорог с расположенными беспилотными транспортными средствами А, В и С и направления их движения

В момент времени  $t_k + 1$  автомобили А и В, в процессе авторизации обмениваются планами проезда перекрестка (табл. 4). Сравнение планов показывает, что в случае их реализации в моменты времени  $t_k + 5$  и  $t_k + 6$  имеются конфликты в ЭУМ 153 и 132 соответственно. Возможные варианты разрешения конфликта, которые осуществляются без экстренного торможения (ЭУМ 150 для автомобиля А, и ЭУМ 279, 258, 237 и 246 для автомобиля В) представлены в табл. 5–7. Как видно из представленных вариантов, показатель  $Y_1$  для варианта 1 будет равен  $Y_1 = 1,75$ , а для вариантов 2 и 3 соответственно  $Y_2 = Y_3 = 1,4$ . Таким образом, из трех рассмотренных вариантов БТС выбирают вариант 1, с максимальным показателем  $Y_{\max} = Y_1 = 1,75$ .

$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$	$t_k + 6$	$t_k + 7$	$t_k + 8$	$t_k + 9$	$t_k + 10$	$t_k + 11$
149	150	151	152	153	132	11	90	69	49	28
321	279	237	195	153	132	131	130	128	126	
300	258	216	174				129	127	125	

Таблица 4. Планы проезда перекрестка автомобилей А и В

$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$	$t_k + 6$	$t_k + 7$	$t_k + 8$	$t_k + 9$	$t_k + 10$	$t_k + 11$
149	150	151	151	152	153	132	11	90	69	49
321	279	237	195	153	132	131	130	128	126	
300	258	216	174				129	127	125	

Таблица 5. Вариант 1. Автомобиль А снижает скорость и дожидается проезда автомобиля В, находясь в ЭУМ № 151

$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$	$t_k + 6$	$t_k + 7$	$t_k + 8$	$t_k + 9$	$t_k + 10$	$t_k + 11$
149	150	151	152	153	153	132	11	90	69	49
321	279	237	195	153	132	131	130	128	126	
300	258	216	174				129	127	125	

Таблица 6. Вариант 2. Автомобиль А снижает скорость и дожидается проезда автомобиля В, находясь в ЭУМ № 152

$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$	$t_k + 6$	$t_k + 7$	$t_k + 8$	$t_k + 9$	$t_k + 10$	$t_k + 11$
149	150	151	152	153	132	11	90	69	49	28
321	279	237	195	174	153	132	130	128	126 125	
300	258	216				131	129	127		

Таблица 7. Вариант 3. Автомобиль В снижает скорость и дожидается проезда автомобиля А, находясь в ЭУМ № 174

Пусть в момент времени  $t_k + 3$  к перекрестку приближается автомобиль С, двигающийся со скоростью 3. В процессе авторизации автомобилей выясняется, что в момент времени  $t_k + 7$  имеется конфликт между БТС А, В и С в ЭУМ 131 и 132 (табл. 8). Рассмотрим существующие варианты устранения конфликта при условии остановки без экстренного торможения (табл. 9).

$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$	$t_k + 6$	$t_k + 7$	$t_k + 8$	$t_k + 9$	$t_k + 10$	$t_k + 11$
149	150	151	151	152	153	132	11	90	69	49
321	279	237 216	195 174	153	132	131	130 129	128	126 125	
300	258							127		
		146 145	143 142	140 139	137 136	134 133	131 130	128		
		144	141	138	135	132	129	127		

Таблица 8. Планы проезда автомобилями А, В и С

$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$	$t_k + 6$	$t_k + 7$	$t_k + 8$	$t_k + 9$	$t_k + 10$	$t_k + 11$
149	150	151	151	152	153	132	11	90	69	49
321	279	237 216	195 174	153	153	153	132	131	129 128	127
300	258							130		
		146 145	143 142	140 139	137 136	134 133	131 130	128		
		144	141	138	135	132	129	127		

Таблица 9. Вариант 1. Автомобили А и В снижают скорость, пропуская автомобиль С

$t_k + 1$	$t_k + 2$	$t_k + 3$	$t_k + 4$	$t_k + 5$	$t_k + 6$	$t_k + 7$	$t_k + 8$	$t_k + 9$	$t_k + 10$	$t_k + 11$
149	150	151	151	152	153	132	11	90	69	49
321	279	237 216	195 174	153	132	131	130	128 127	126 125	
300	258						129			
		146 145	143 142	140 139	137 136	134 133	132	131 130	129 128	
		144	141	138	135			127		

Таблица 10. Вариант 2. Автомобиль С снижает скорость, пропуская автомобили А и В в ЭУМ № 133

Для рассматриваемых вариантов показатель  $Y_1 = 1,5$ , и  $Y_2 = 2,5$ . Таким образом БТС выбирают вариант проезда в очередности А и В, затем С согласно плану, представленному в табл. 10.

#### Аспекты, требующие дополнительного обсуждения

Из представленного алгоритма следует, что чем раньше БТС, приближающиеся к перекрестку, входят в контакт с другими участниками дорожного движения, тем большим временем они располагают для коллаборативного поиска безопасного решения. С другой стороны, в этом случае существенно возрастает количество возможных вариантов проезда. Так, например, возвращаясь к рис. 5, если бы автомобиль С начал процедуру авторизации в момент времени  $t_k + 3$ , находясь на большем удалении от перекрестка, все участники коллаборации вынуждены были бы тратить вычислительные ресурсы и время на анализ вариантов, при которых автомобиль С притормаживал в ЭУМ №: 134, 135, 136 и т.д. Все эти варианты согласно критерию (1) являются равнозначными. Очевидно, увеличение размерности допустимых вариантов маневра (использование не только торможения, но и ускорения БТС, а также смена полосы движения) может привести к возрастанию числа возможных бесконфликтных способов проезда перекрестка.

Для устранения этого противоречия целесообразно ограничить количество рассматриваемых вариантов, зафиксировав зоны торможения, ускорения и перестроения на определенной дальности от начала перекрестка. Кроме того, возможно введение дополнительной системы приоритетов, способствующей выбору варианта проезда при одинаковых значениях показателя  $Y$ . Такими приоритетами могут быть известные правила «правой руки», пропуск БТС экстренных служб и т.д.

### Описание эксперимента

Для анализа работоспособности алгоритма разработан симулятор, позволяющий имитировать движение автомобилей. Создание подобной модели подразумевает разработку двух основных составляющих: модели транспортного средства (и алгоритма определения движения) и модели поля проведения эксперимента.

Модель поля проведения эксперимента подразумевает создание некоторого поля, состоящего из ЭУМ. Стоит отметить, что не все ЭУМ будут использоваться в процессе моделирования, так как будут являться переносом некоторого окружения дорог в имитационную модель. Отсюда можно сделать вывод, что основной интерес для эксперимента представляют ЭУМ, относящиеся непосредственно к проезжей части. Разработанная модель дорог удовлетворяет следующим требованиям:

- проезжая часть состоит из ЭУМ, нумерация которых задана и известна всем участникам дорожного движения;
- начало дороги должно находиться на одной из границ моделируемого поля, в то время как окончание дороги должно находиться на противоположной стороне поля. Подобное допущение подразумевает наличие только прямых дорог, координаты которых совпадают с координатами участков, расположенных в одной ряду (колонке);
- каждая дорога должна относиться либо к вертикальному, либо к горизонтальному типу. Вертикальный тип дороги означает, что начало дороги находится на верхней или нижней границе поля, а горизонтальный тип подразумевает нахождение начальной координаты дорожного полотна на одной из боковых границ.

Каждое моделируемое поле представляет собой набор характеристик:  $\{c, r, R\}$ , где  $c$  – количество столбцов, на которые можно разделить поле,  $r$  – количество рядов,  $R$  – набор дорог.  $R = \{R_1, \dots, R_n\}$ , где  $R_i$  – дорога, характеризующаяся следующей совокупностью параметров:  $\{t, d, E\}$ , где  $t$  – тип дороги (вертикальный или горизонтальный),  $d$  – направление движения (встречное или попутное),  $E$  – набор ЭУМ, задающих полотно проезжей части. Общий вид моделируемого поля представлен на рис. 6.

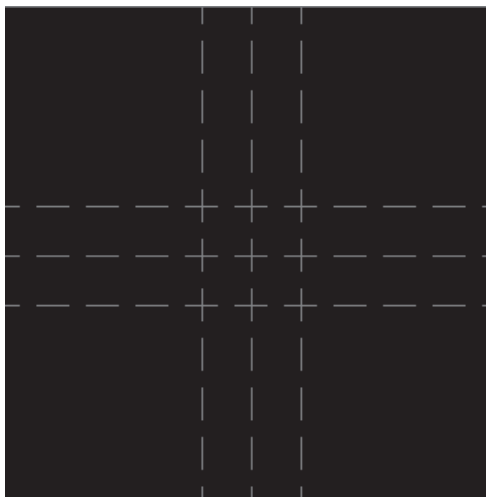


Рис. 6. Модель поля

Подобный способ моделирования позволяет не только проверить работоспособность текущего алгоритма, но и предоставит возможность быстро адаптировать симулятор для проведения экспериментов в случае, если алгоритм был изменен.

Реализация модели автомобиля в общем случае представляется комплексной задачей, так как необходимо учитывать физические характеристики транспортного средства (ТС). Однако для апробации представленного алгоритма использована упрощенная версия, способная отражать лишь базовые характеристики, необходимые для работы. К таким характеристикам можно отнести:

$E$  – набор ЭУМ, основанный на начальной и конечной позиции ТС и существующем дорожном полотне;

$s$  – начальная (максимальная) скорость движения автомобиля;



$c$  – поворотная точка, если конечная точка движения находится на другой дороге. Может быть пустой;

$ST$  – набор «шагов» прохождения автомобилем пути. Данный набор заполняется на основе  $E$ ,  $s$  и  $c$ .  $ST_i$  состоит из следующих параметров: набор ЭУМ, пройденных за этот шаг ( $E_i$ ) и скорость движения на текущем шаге ( $s_i$ ).

В ходе проведения экспериментов использованы следующие ограничения и допущения:

- модель поля пространственно ограничена;
- автомобили могут двигаться в любом направлении в пределах проезжей части, согласно направлению дорог;
- количество автомобилей, одновременно находящихся на наблюдаемом поле, может быть любым, но не больше пропускной способности текущего участка.

Описанный выше симулятор позволяет полностью реализовать разработанный алгоритм и проверить его работоспособность. Например, на рис. 7 представлено движение трех автомобилей по дорогам с использованием описанного алгоритма.

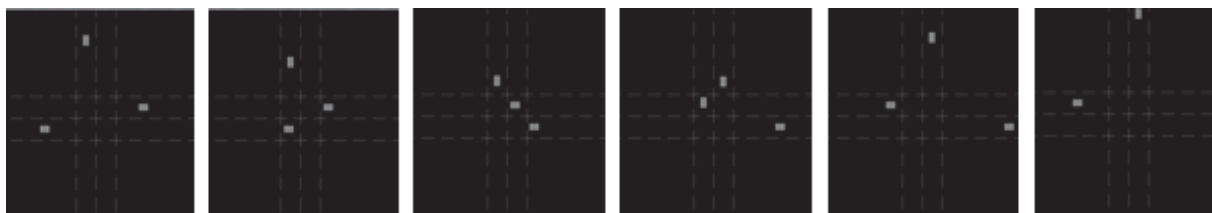


Рис. 7. Этапы движения автомобилей

Для проведения сравнительного анализа классического и предлагаемого способа регулирования дорожного движения был подготовлен симулятор, основанный на светофорном регулировании дорожного движения. Его особенностями являются:

- наличие светофора на перекрестке;
- расчет  $ST$  в таком же порядке, как и в базовой версии симулятора, но на каждом шаге проверяется сигнал светофора.

Показателем сравнения качества работы алгоритмов выбрана средняя скорость движения машин, проехавших перекресток:

$$V_{\text{ср}} = \frac{MN}{S},$$

где  $N$  – количество машин, стремящихся проехать перекресток;  $M$  – длина пути ТС;  $S$  – количество шагов, потребовавшихся БТС для преодоления перекрестка. Если ЭУМ занят и БТС не может выехать на перекресток,  $N$  увеличивается на единицу, а БТС попадает в список автомобилей с приоритетом для выезда на перекресток.

### Результаты эксперимента

Было проведено три группы экспериментов на одинаковом поле размерностью  $10 \times 10$  ЭУМ. Для более четкого представления о производительности созданного алгоритма было решено ограничиться 4 полосами движения: две вертикальные (встречная и попутная) и две горизонтальные (встречная и попутная).

Группы экспериментов различаются вероятностью появления новых ТС на наблюдаемом поле:  $P = 1,0$  (появляется хотя бы один новый автомобиль),  $P = 0,5$  и  $P = 0,2$ . Количество появляющихся автомобилей определяется случайным образом.

Количество запусков каждой группы экспериментов для каждого алгоритма принято равным 1000 для получения значения  $V_{\text{ср}}$ , стремящегося к объективному. Длительность каждого эксперимента – 1000 шагов. На рис. 8 представлены результаты эксперимента.

Как видно из представленных данных, разработанный алгоритм помогает повысить пропускную способность перекрестка. Стоит отметить, что средняя скорость движения при увеличении плотности потока снижается в обоих случаях, но при использовании разработанного алгоритма данный показатель снижается на 15% меньше. Кроме того, очевидным представляется трехкратное увеличение средней скорости движения БТС при вероятности появления автомобиля на проезжей части, равной 1.

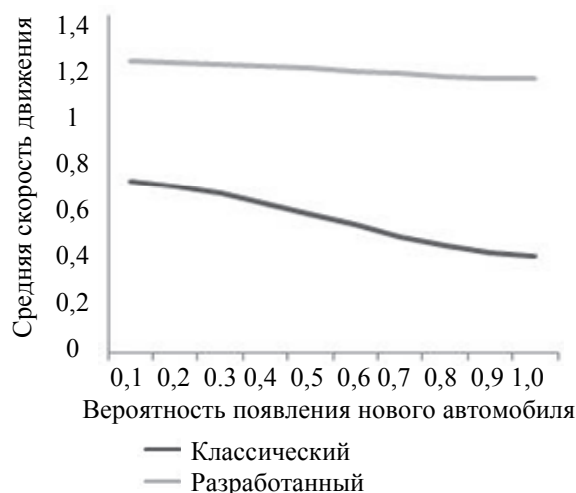


Рис. 8. Зависимость средней скорости движения от вероятности появления автомобиля

### Заключение

Таким образом, использование мультиагентных систем управления киберфизическими системами в области организации дорожного движения позволяет повысить среднюю скорость движения на загруженных перекрестках дорог, что приводит к увеличению пропускной способности дорожной сети при соблюдении требований безопасности.

Отсутствие в составе системы управления центрального процессора способствует повышению защищенности системы управления от случайных сбоев и хакерских атак [15]. В качестве одного из возможных способов защиты системы можно рассматривать механизмы репутации и доверия [16], работоспособность которых подтверждена в рамках абстрактной мультиагентной системы [17].

### Литература

- Milanes V., Llorca D., Vinagre B., Gonzalez C., Sotelo M. Clavile: evolution of an autonomous car // Proc. 13<sup>th</sup> Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Funchal, Portugal, 2010. P. 1129–1134.
- Varaiya P. Smart cars on smart roads: problems of control // IEEE Transactions on Automatic Control. 1993. V. 38. N 2. P. 195–207.
- Bazzan A.L.C. A distributed approach for coordination of traffic signal agents // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2005. V. 10. N 1. P. 131–164. doi: 10.1007/s10458-004-6975-9
- Beeson P., O'Quin J., Gillan B. et. al. Multiagent interactions in urban driving // Journal of Physical Agents. 2008. V. 2. N 1. P. 15–29. doi: 10.14198/JoPha.2008.2.1.03
- Halle S., Chaib-draa B. A collaborative driving system based on multiagent modelling and simulations // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2005. V. 13. N 4. P. 320–345. doi: 10.1016/j.trc.2005.07.004
- Carlino D., Boyles S.D., Stone P. Auction-based autonomous intersection management // Proc. 16<sup>th</sup> Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). Hague, Netherlands, 2013. P. 529–534. doi: 10.1109/ITSC.2013.6728285
- Wuthishuwong C., Traechtler A. Vehicle to infrastructure based safe trajectory planning for Autonomous Intersection Management // Proc. 13<sup>th</sup> Int. Conf. on ITS Telecommunications (ITST). Tampere, Finland, 2013. P. 175–180. doi: 10.1109/ITST.2013.6685541
- Vahidi A., Eskandarian A. Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2003. V. 4. N 3. P. 143–153. doi: 10.1109/TITS.2003.821292
- Ho C., Reed N., Spence C. Multisensory in-car warning signals for collision avoidance // Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society. 2007. V. 49. N 6. P. 1107–1114. doi: 10.1518/001872007X249965
- Au T., Zhang S., Stone P. Autonomous intersection management for semi-autonomous vehicles / In: Handbook of Transportation. Taylor & Francis, 2015. P. 88–104.

### References

- Milanes V., Llorca D., Vinagre B., Gonzalez C., Sotelo M. Clavile: evolution of an autonomous car. Proc. 13<sup>th</sup> Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, ITSC. Funchal, Portugal, 2010, pp. 1129–1134.
- Varaiya P. Smart cars on smart roads: problems of control. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, vol. 38, no. 2, pp. 195–207.
- Bazzan A.L.C. A distributed approach for coordination of traffic signal agents. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2005, vol. 10, no. 1, pp. 131–164. doi: 10.1007/s10458-004-6975-9
- Beeson P., O'Quin J., Gillan B. et. al. Multiagent interactions in urban driving. Journal of Physical Agents, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 15–29. doi: 10.14198/JoPha.2008.2.1.03
- Halle S., Chaib-draa B. A collaborative driving system based on multiagent modelling and simulations. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2005, vol. 13, no. 4, pp. 320–345. doi: 10.1016/j.trc.2005.07.004
- Carlino D., Boyles S.D., Stone P. Auction-based autonomous intersection management. Proc. 16<sup>th</sup> Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2013. Hague, Netherlands, 2013, pp. 529–534. doi: 10.1109/ITSC.2013.6728285
- Wuthishuwong C., Traechtler A. Vehicle to infrastructure based safe trajectory planning for Autonomous Intersection Management. Proc. 13<sup>th</sup> Int. Conf. on ITS Telecommunications, ITST. Tampere, Finland, 2013, pp. 175–180. doi: 10.1109/ITST.2013.6685541
- Vahidi A., Eskandarian A. Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2003, vol. 4, no. 3, pp. 143–153. doi: 10.1109/TITS.2003.821292
- Ho C., Reed N., Spence C. Multisensory in-car warning signals for collision avoidance. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2007, vol. 49, no. 6, pp. 1107–1114. doi: 10.1518/001872007X249965
- Au T., Zhang S., Stone P. Autonomous intersection management for semi-autonomous vehicles. In: Handbook of

11. Dresner K., Stone P. A multiagent approach to autonomous intersection management // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2008. V. 31. P. 591–656.
12. Wu J., Abbas-Turki A., El Moudni A. Cooperative driving: an ant colony system for autonomous intersection management // *Applied Intelligence*. 2012. V. 37. N 2. P. 207–222. doi: 10.1007/s10489-011-0322-z
13. Zohdy I.H., Kamalanathsharma R.K., Rakha H. Intersection management for autonomous vehicles using iCACC // *Proc. 15<sup>th</sup> Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Anchorage, USA, 2012. P. 1109–1114. doi: 10.1109/ITSC.2012.6338827
14. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с.
15. Зикратов И.А., Гуртов А.В., Зикратова Т.В., Козлова Е.В. Совершенствование Police Office Model для обеспечения безопасности роевых робототехнических систем // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 5. С. 99–109.
16. Зикратов И.А., Зикратова Т.В., Лебедев И.С. Доверительная модель информационной безопасности мультиагентных робототехнических систем с децентрализованным управлением // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 2(90). С. 47–52.
17. Viksnin I.I., Iureva R.A., Komarov I.I., Drannik A.L. Assessment of stability of algorithms based on trust and reputation model // *Proc. 18<sup>th</sup> Conference FRUCT-ISPIT*. St. Petersburg, Russia, 2016. P. 364–369. doi: 10.1109/FRUCT-ISPIT.2016.7561551
11. Dresner K., Stone P. A multiagent approach to autonomous intersection management. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2008, vol. 31, pp. 591–656.
12. Wu J., Abbas-Turki A., El Moudni A. Cooperative driving: an ant colony system for autonomous intersection management. *Applied Intelligence*, 2012, vol. 37, no. 2, pp. 207–222. doi: 10.1007/s10489-011-0322-z
13. Zohdy I. H., Kamalanathsharma R. K., Rakha H. Intersection management for autonomous vehicles using iCACC. *Proc. 15<sup>th</sup> Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, ITSC*. Anchorage, USA, 2012, pp. 1109–1114. doi: 10.1109/ITSC.2012.6338827
14. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. *Modeli i Algoritmy Kollektivnogo Upravleniya v Gruppakh Robotov* [Models and Algorithms of the Collective Control of Robots Group]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 280 p.
15. Zikratov I.A., Gurtov A.V., Zikratova T.V., Kozlova E.V. Police Office Model improvement for security of swarm robotic systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 5, pp. 99–109.
16. Zikratov I.A., Zikratova T.V., Lebedev I.S. Trust model for information security of multi-agent robotic systems with a decentralized management. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 2, pp. 47–52.
17. Viksnin I.I., Iureva R.A., Komarov I.I., Drannik A.L. Assessment of stability of algorithms based on trust and reputation model. *Proc. 18<sup>th</sup> Conference FRUCT-ISPIT*. St. Petersburg, Russia, 2016, pp. 364–369. doi: 10.1109/FRUCT-ISPIT.2016.7561551

#### Авторы

**Зикратов Игорь Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, igzikratov@yandex.ru

**Вискнин Илья Игоревич** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, wixnin@cit.ifmo.ru

**Зикратова Татьяна Викторовна** – преподаватель, Военный институт (Военно-морской политехнический) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Пушкин, 197045, Российская Федерация, ztv64@mail.ru

#### Authors

**Igor A. Zikratov** – D.Sc., Professor, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, igzikratov@yandex.ru

**Ilya I. Viksnin** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, wixnin@cit.ifmo.ru

**Tatiana V. Zikratova** – lecturer, N.G. Kuznetsov Naval Academy, Pushkin, 197045, Russian Federation, ztv64@mail.ru