

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 004.738:629.33

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).108-118

ГРНТИ 47.49.31+73.31.85

Специальность ВАК 2.2.15

Научная статья

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЦЕНАРИЕВ ВОЗМОЖНОГО СТОЛКНОВЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Калигин Н. Н., Увайсов С. У., Черноверская В. В.

Российский технологический университет МИРЭА (Москва, Россия)

Аннотация В работе представлены результаты исследования по безопасной интеграции беспилотных автомобилей в транспортную инфраструктуру и обеспечению их рационального поведения на дороге. Дана классификация и разработаны математические модели участков дорог, которые могут использоваться в системе управления беспилотными транспортными средствами. Показаны преимущества внедрения технологии V2X, основанной на стандартах подвижной радиосвязи и позволяющей беспилотным автомобилям напрямую осуществлять обмен информацией друг с другом о запланированных манёврах. Это позволяет в режиме реального времени формировать зоны опасности (коллизии), где в результате манёвра может произойти столкновение с другим транспортным средством. Представлена математическая модель линейного участка дороги, а также модели перекрестков и варианты их эквивалентности. В рамках модели описано потенциальное пространство для манёвра автомобиля. Формализованы зоны опасности, расчёт параметров которых осуществляется по результатам обмена информацией между беспилотными автомобилями.

Ключевые слова: беспилотный автомобиль, телекоммуникационные системы, зоны опасности, модель дорожной инфраструктуры, V2X

Для цитирования: Калигин Н. Н., Увайсов С. У., Черноверская В. В. Математические модели сценариев возможного столкновения беспилотных автомобилей // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 108-118. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).108-118

Research Article

MATHEMATICAL MODELS OF SCENARIOS OF A POSSIBLE COLLISION OF SELF-DRIVING CARS

Kaligin N. N., Uvaysov S. U., Chernoverskaya V. V.

Russian Technological University of MIREA (Moscow, Russia)

Abstract The paper proposes mathematical models that can be used by self-driving cars equipped with V2X systems to form danger zones. That is, areas where a collision with another vehicle can occur as a result of a maneuver. A classification of possible sections of the road and their reducibility to those considered within the framework of the proposed models has been carried out. A mathematical model of a linear section of the road is presented, as well as mathematical models of intersections and variants of their equivalence. The model describes the potential maneuvering space for the car. Danger zones have been formalized, the calculation of which is based on the results of the exchange of information about intentions between self-driving cars over wireless networks built on V2X technology.

Keywords: self-driving car, telecommunication systems, danger zones, road infrastructure model, V2X

For citation: Kaligin N. N., Uvaysov S. U., Chernoverskaya V. V. Mathematical models of scenarios of a possible collision of self-driving cars // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 108-118. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).108-118

Введение

Транспортная ситуация на дорогах постоянно усложняется. Структура интеллектуальной транспортной системы (ИТС) дополняется распределёнными телекоммуникационными системами [1], которые, несмотря на вычислительную мощь, распределённую структуру и эффективные алгоритмы работы [2], сталкиваются с новыми и новыми вызовами. Одним из таких вызовов является появление на дорогах беспилотных автомобилей [3], которые становятся равноправными участниками движения и начинают интегрироваться в ИТС [4]. Для беспилотного транспортного средства весьма важным является своевременное получение информации от других участников дорожного движения и её обработка с целью недопущения аварийных ситуаций. Для решения этой задачи в автотранспортном средстве используется технология V2X [5]. Основной задачей этой технологии является обеспечение прямой передачи данных между беспилотными автомобилями. Для этого разрабатываются формализованные модели, с помощью которых осуществляется коммуникация.

Постановка задачи

Интеграция беспилотных автомобилей в транспортную инфраструктуру является сложной, многоаспектной задачей, решение которой на начальном этапе обеспечит безопасность для всех участников дорожного движения, а в долгосрочной перспективе позволит расширить сферы применения беспилотного транспорта и эффективность его использования в хозяйственной деятельности страны. На концептуальном уровне необходимо проработать механизмы такой интеграции и возможность использования для этого существующих и развивающихся технологий. Спектр применяемых для этого инструментов включает моделирование объектов и процессов, проведение вычислительных экспериментов, разработку эффективных алгоритмов управления. Функционирование беспилотных транспортных средств осуществляется в режиме реального времени, поэтому к системам управления ими предъявляются высокие требования по эксплуатационной надежности, которые невозможно обеспечить без организации устойчивой качественной связи беспилотных автомобилей.

В рамках представленного исследования была поставлена задача разработки математических моделей участков дорожной инфраструктуры, их интеграции в систему управления беспилотными транспортными средствами и оптимизации вычислительных процедур на основе фильтрации входных данных.

Фильтрация данных позволяет снизить нагрузку на бортовые вычислительные системы, поэтому для оценки необходимости использования тех или иных данных при анализе нужно выработать методику отбора таких данных. Входной информационный поток формируется на основе топологии дорожного графа, для которого создаётся расчетная математическая модель с целью определения коллизии (зоны опасности столкновения) беспилотных автомобилей.

Теоретические исследования

В общем случае зона риска, в которой присутствует опасность столкновения двух транспортных средств, определяется по базовой модели автомобиля в виде материальной точки. Такую модель легко транслировать в эфир, актуализируя данные в зависимости от местоположения. Согласно модели, автомобиль i имеет координату своего местоположения в пространстве V_i , а при движении также имеет направляющий вектор h_i .

Зона опасности C для двух автомобилей – это точка в пространстве, которая образуется в результате пересечения двух прямых. Прямые задаются координатами беспилотных автомобилей и их направляющими векторами. Если два беспилотных автомобиля могут оказаться одновременно в этой точке при сохранении текущих параметров движения, причём время, необходимое для преодоления оставшегося расстояния, меньше времени чувствительности системы, то зона опасности является активной (рисунок 1).

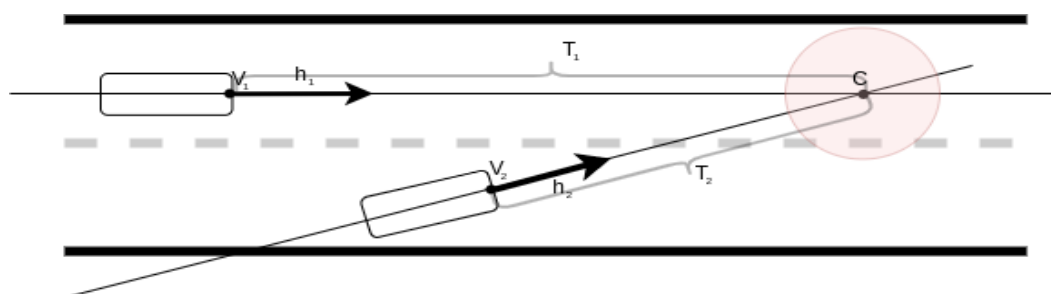


Рисунок 1. Зона опасности для двух транспортных средств

Далее рассмотрены три универсальные модели дорожной инфраструктуры.

1. Линейный участок дороги. В базовом случае движение автомобиля осуществляется по двусторонней дороге, с заданным числом полос в каждом направлении N и M (рисунок 2).

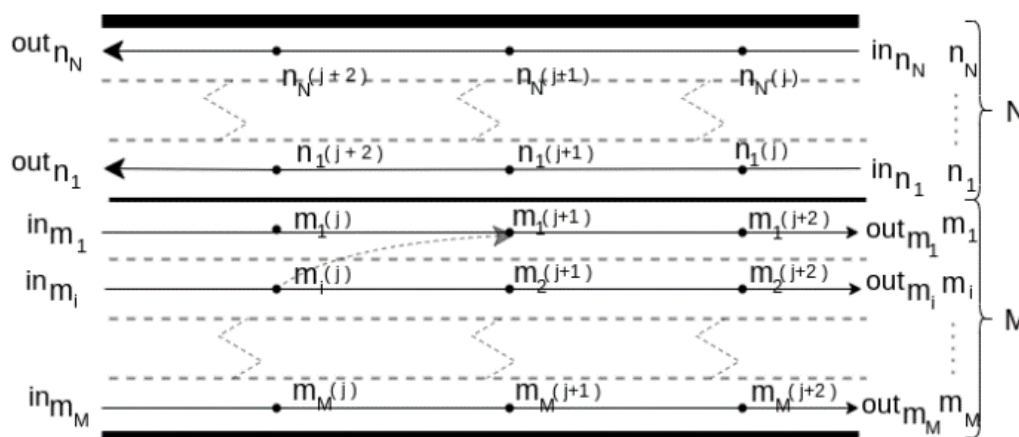


Рисунок 2. Модель линейного участка дороги

Данный участок дороги задаётся множеством полос. Полоса k при этом задана точкой входа на полосу in_k и точкой выхода из полосы out_k . Промежуточные

точки $k(j)$, с возрастающим от точки входа к точке выхода индексом j , своими координатами задают пространственное положение полосы. Радиус $r_{k(j)}$ используется для определения принадлежности автомобиля промежуточной точке.

На дороге беспилотный автомобиль может выполнять манёвры: менять полосу, направление и скорость. Индекс промежуточной точки полосы $k(j)$ увеличивается при движении беспилотного автомобиля по направлению движения. На прямолинейном участке дороги может меняться число полос. Это происходит при расширении или сужении дорожного полотна. В этом случае, точке выхода или входа будет соответствовать промежуточная точка соседней полосы.

При движении и маневрах координаты автомобилей меняются, поэтому зоны опасности пересчитываются. Возможное столкновение (или коллизия) происходит при одновременной принадлежности нескольких автомобилей одной точке. Данная ситуация может возникнуть при несоблюдении дистанции с впереди идущим автомобилем и при перестроениях.

Более сложными являются маневры автомобилей на перекрёстках. При пересечении перекрёстка чаще встречается ситуация, когда траектории движения автомобилей пересекаются.

2. Т-образный перекрёсток (рисунок 3). В случае такого перекрёстка происходит связь полос. На рисунке приведена схема Т-образного перекрёстка и возможные маневры транспортных средств на нём.

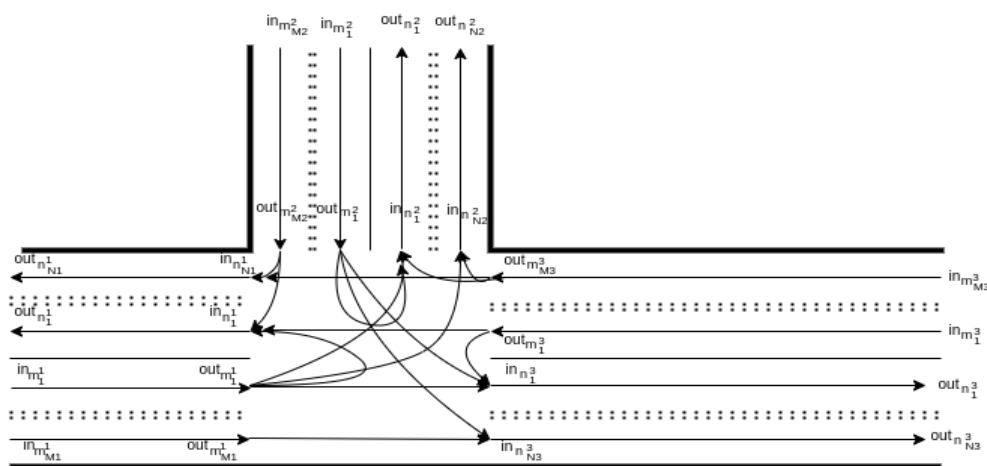


Рисунок 3. Модель Т-образного перекрёстка

Для полос k и l точки выхода из полосы out_k ставятся в соответствие точкам входа на полосу in_l . При пересечении перекрёстка точки out_k и in_l для полос k и l служат началом и концом траектории манёвра. Множество пересечений траекторий таких манёвров является конечным в силу конечности множеств полос каждой из примыкающих дорог. Данные пересечения характеризуются тем, что в них могут одновременно оказаться два автомобиля. Поэтому такие точки являются

потенциальными зонами опасности. При этом движение из одной полосы одной дороги в другую полосу другой дороги проходит по траектории манёвра.

Кроме этого, следует учитывать информацию о дорожных знаках и фазе светофора, которая ограничивает потенциальное число манёвров и должна учитываться на предварительном этапе фильтрации, а не на этапе формирования множества пересечений манёвров.

3. Перекрёсток двух дорог. Пути следования беспилотного автомобиля пролегают во множестве полос, образованном пересечением дорог перекрёстка, на котором происходят манёвры (рисунок 4).

Модель крестообразного перекрёстка подобна модели Т-образного перекрёстка. Сохраняется вышеописанная структура, с той лишь разницей, что увеличено число прилегающих к перекрёстку дорог. При увеличении числа дорог до пяти, такие участки разбиваются на множество фрагментов, как в рассмотренном ранее случае. При этом организация дорожного движения и построение дорожных развязок осуществляются на основе правил дорожного движения (ПДД).

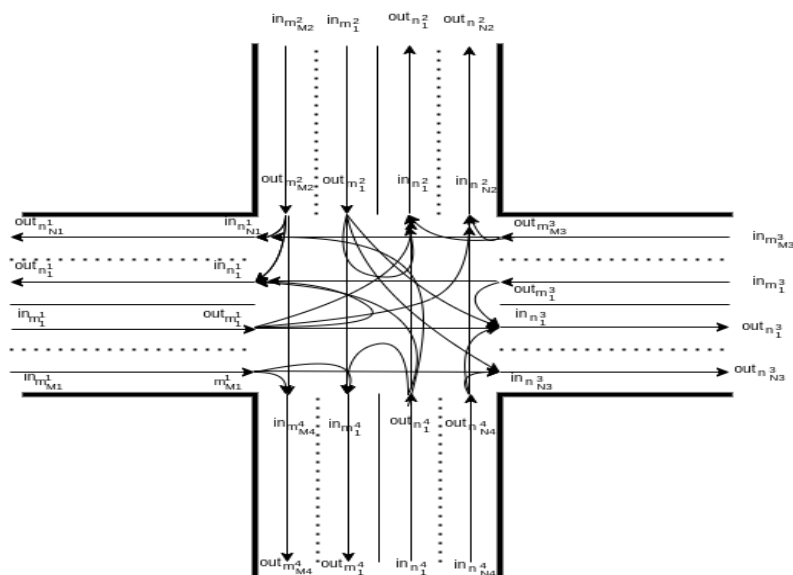


Рисунок 4. Модель крестообразного перекрёстка

Так, при количестве примыкающих дорог, равном пяти, такой перекрёсток эквивалентен объединению перекрёстков с пересечением двух дорог, или организованному круговому движению (рисунок 5).

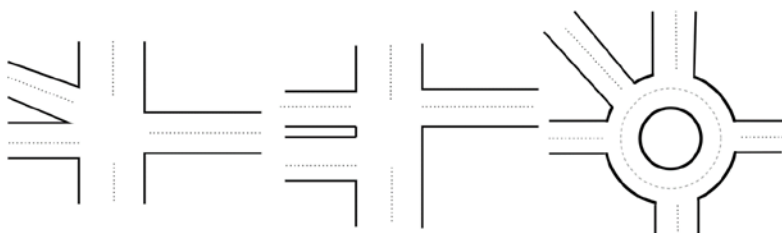


Рисунок 5. Эквивалентность перекрёстков с числом входящих дорог больше пяти

Пересечение двух дорог было рассмотрено ранее, а круговое движение эквивалентно множеству Т-образных перекрёстков (рисунок 6).

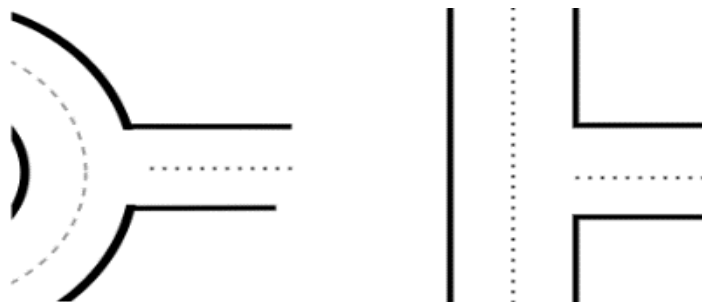


Рисунок 6. Эквивалентность кругового движения множеству Т-образных перекрёстков

Таким образом, маршрут следования автомобиля эквивалентен переходу его по графу, в котором рёбрами являются полосы движения, а вершинами являются перекрёстки и области сужения и расширения полос (рисунок 7).

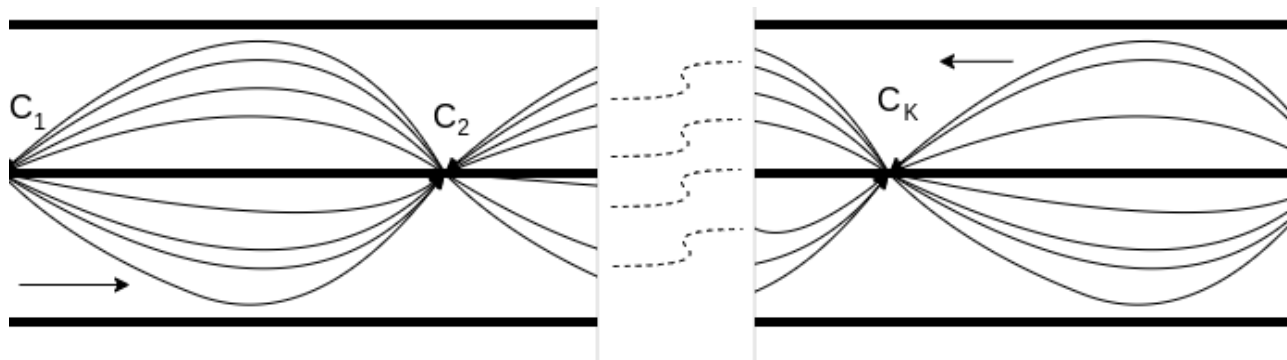


Рисунок 7. Пространство для манёвра автомобиля

Опасность при манёврах возникает в вершинах (рисунок 8) и при перестроении в рёбрах графа (рисунок 9). Таким образом, ситуации на сложных транспортных развязках можно свести к набору ранее рассмотренных случаев.

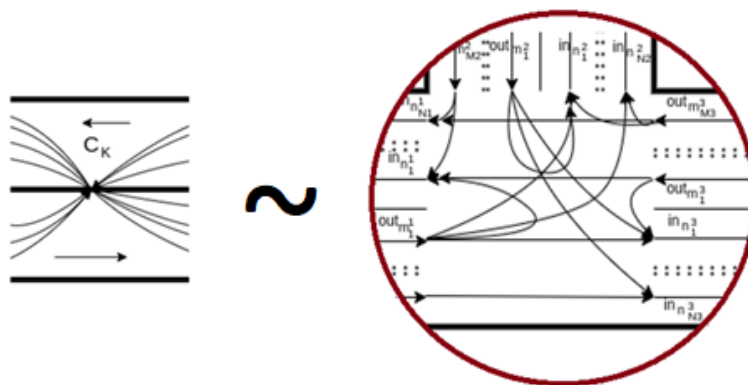


Рисунок 8. Манёвры в вершинах графа

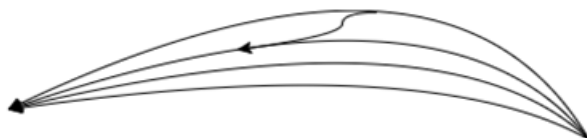


Рисунок 9. Маневры в ребрах графа

Когда к перекрёстку приближаются несколько автомобилей, то для них попарно проводится поиск зоны опасности. Данные о местоположении сторонних автомобилей и их направляющих векторах беспилотный автомобиль №1 получает от своих встроенных сенсоров, при этом он не владеет информацией о намерениях сторонних автомобилей, но знает о собственных намерениях (например, повернуть налево).

Первоначальную фильтрацию информации об автомобилях можно провести по принципу их принадлежности определенной зоне перекрёстка, считая, что он имеет координату центра C и радиус d (рисунок 10). Поскольку используется планарная модель, а система координат, в которой ориентируются беспилотные автомобили, предполагает передвижение по геоиду Земли, учитываются поправочные коэффициенты:

$$E_{lon} = E \cos(A_{lat}),$$

$$E = D/360 * 10^{-7}, \quad E_{lat} = M/180 * 10^{-7}$$

где D – длина экватора, M – длина меридиана.

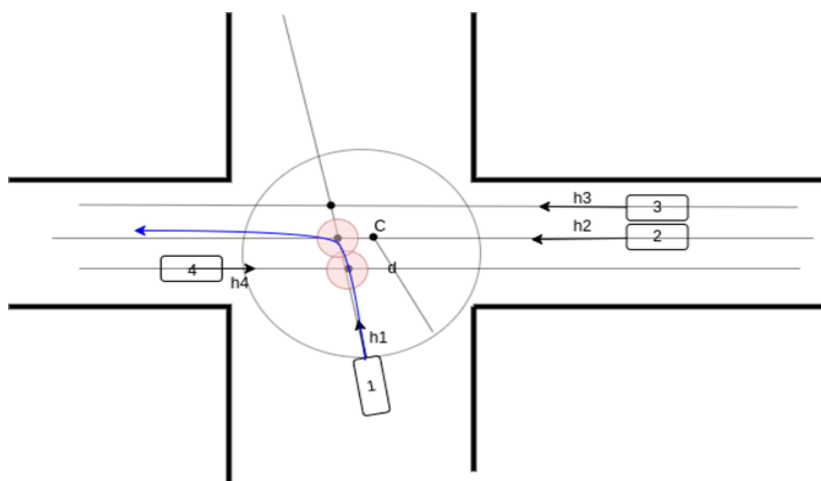


Рисунок 10. Поиск зоны опасности столкновения

Проверка того, попадает ли точка A в геозону с центром C и радиусом d , проводится по формуле:

$$(A_{lon} - C_{lon})^2(E_{lon})^2 + (A_{lat} - C_{lat})^2(E_{lat})^2 \leq d^2 \quad (1)$$

Местоположение автомобиля при его прямолинейном движении между промежуточными точками траектории, вычисляется по формулам:

$$F_{lat}^i(t) = \arcsin\left(\sin(A_{lat}^i) \cos(V_{it}/R) + \cos(A_{lat}^i) \sin(V_{it}/R) \cos(A_{heading}^i)\right) \quad (2)$$

$$F_{lon}^i(t) = A_{lon}^i + \operatorname{atan2}\left(\sin(A_{heading}^i) \sin(V_{it}/R) \cos(A_{lat}^i), \cos(V_{it}/R) - \sin(A_{lat}^i) \sin(F_{lat}^i(t))\right) \quad (3)$$

Расчет точки пересечения траекторий движения $X(X_{lat}, X_{lon})$, исходя из текущих позиций и направления движения автомобилей A и B с направляющими векторами $A_{heading}$ и $B_{heading}$ вычисляется по формулам:

$$X_{lat} = \frac{(B_{lon} - A_{lon})E_{lon} + \tan(A_{heading})A_{lat}E_{lat} - \tan(B_{heading})B_{lat}E_{lat}}{(\tan(A_{heading}) - \tan(B_{heading}))E_{lat}} \quad (4)$$

$$X_{lon} = (\tan(A_{heading})(X_{lat} - A_{lat})E_{lat} + A_{lon}E_{lon})/E_{lon} \quad (5)$$

Время прибытия автомобиля A , движущегося со скоростью A_{speed} в точку X , вычисляется по формуле:

$$A_{time} = \frac{\sqrt{(X_{lon} - A_{lon})^2(E_{lon})^2 + (X_{lat} - A_{lat})^2E_{lat}^2}}{A_{speed}} \quad (6)$$

Разница во времени прибытия двух автомобилей в точку пересечения вычисляется по формуле:

$$T_{diff} = |A_{time} - B_{time}| \quad (7)$$

Без знания топологии перекрестка и руководствуясь информацией, поступающей от сенсоров беспилотного автомобиля, в модели принимается допущение, что сторонние автомобили осуществляют прямолинейный проезд перекрестка. При этом собственные намерения провести манёвр известны. Таким образом, формируются три зоны опасности. Исходя из собственных намерений, беспилотный автомобиль может определить, что отсутствует пересечение с траекторией автомобиля № 3, но остаются две потенциально опасные зоны, которые необходимо учитывать.

В случае, когда информация передаётся между беспилотными автомобилями напрямую, посредством технологии V2X, то по окончании такого обмена, автомобиль № 1 знает не только о собственных намерениях повернуть налево, но и информацию о намерениях автомобиля № 2 совершить разворот, информацию о намерениях автомобиля № 3 повернуть направо и информацию о намерениях автомобиля № 4 повернуть налево (рисунок 11).

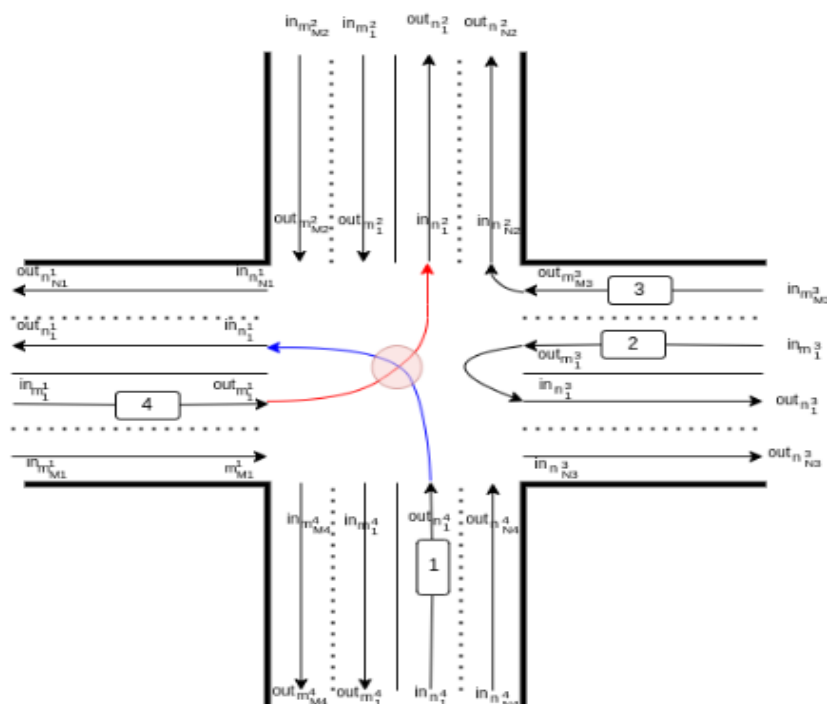


Рисунок 11. Поиск зоны опасности с применением методики

Формулы (1), (2), (3), (6) и (7) используются для вычисления зоны опасности так же, как и при отсутствии информации о намерениях. Вместо расчёта зоны опасности по формулам (4) и (5) беспилотные автомобили получают информацию о зонах опасности от элементов дорожной инфраструктуры (RSU, roadside unit). Для каждого перекрёстка такие данные будут индивидуальны, но вычислять их необходимо заранее.

Если известна информация о топологии перекрёстка и намерениях сторонних автомобилей, то, зная собственный манёвр, определяются манёвры, имеющие с ним пересечение. Далее на полосах, которые соответствуют активным манёврам, выделяют автомобили с наибольшим индексом j промежуточной точки полосы $k(j)$, и для них проводятся вышеуказанные вычисления.

В результате, исходная картина, для которой были сформированы три зоны опасности, преобразуется в ситуацию, где автомобили № 2 и № 3 не формируют зону опасности с автомобилем № 1, потому что намерения данных автомобилей – это разворот и поворот направо. А зона опасности для автомобиля № 4 оказалась смещена в пространстве его намерения совершить поворот налево.

Таким образом, зная топологию дорожной сети и информацию о намерениях, полученную беспилотным автомобилем от других транспортных средств по технологии V2X, можно осуществить фильтрацию входных данных для вычисления коллизии на перекрёстке, а также выполнить фильтрацию точек на линейных участках дорог, используя информацию от автомобилей со смежных полос.

Заключение

Результаты проведённого исследования показали возможность применения разработанных математических моделей на основе топологии дорожного графа при управлении беспилотными транспортными средствами. Предложенный подход фильтрации входных данных позволяет сократить время поиска коллизии (по сравнению с методом полного перебора) за счёт уменьшения числа пересечений траекторий беспилотных автомобилей. Разработанные модели в совокупности с технологией обмена данными V2X позволяют организовать эффективный поиск маневрового пространства и зон опасности столкновения для беспилотных автомобилей.

Список литературы

1. Калигин Н. Н., Увайсов С. У., Увайсова А. С., Увайсова С. С. Инфраструктурный обзор распределенной телекоммуникационной системы дорожного движения и её протоколов // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. 6(32). 87-95. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-6-87-95
2. Калигин Н. Н., Увайсов С. У., Увайсова А. С., Бушмелева К. И. Математические методы в телекоммуникационных системах транспортной инфраструктуры // Качество. Инновации. Образование. 2020. 3(167). 25-31. DOI: 10.31145/1999-513x-2020-3-25-31
3. Калигин Н. Н., Увайсов С. У., Увайсова А. С. Беспилотное транспортное средство в телекоммуникационной инфраструктуре города // Качество. Инновации. Образование. 2020. 4(168). 76-85. DOI: 10.31145/1999-513x-2020-4-76-85
4. Увайсов С. У., Черноверская В. В., Калигин Н. Н., Маркин А. А. Киберфизическая система управления движением беспилотных транспортных средств // Наукоемкие технологии. 2021. 22(4). 34-42. DOI: 10.18127/j19998465-202104-05
5. Jiang F. J., Al-Janabi M., Bolin T., Johansson K. H., Mårtensson J. SVEA: an experimental testbed for evaluating V2X use-cases // 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Macau, China, 2022. 3484-3489. DOI: 10.1109/ITSC55140.2022.9922544

References

1. Kaligin N. N., Uvaysov S. U., Uvaysova A. S., Uvaysova S. S. Infrastrukturnyy obzor raspredelennoy telekommunikatsionnoy sistemy dorozhnogo dvizheniya i yeyo protokolov [Infrastructural review of the distributed telecommunication system of road traffic and its protocols] // Russian Technological Journal. 2019. Vol. 7. 6(32). 87-95. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-6-87-95
2. Kaligin N. N., Uvaysov S. U., Uvaysova F. D., Bushmeleva K. I. Matematicheskiye metody v telekommunikatsionnykh sistemakh transportnoy infrastruktury [Mathematical methods in telecommunication systems of transport infrastructure] // Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye – Quality. Innovation. Education. 2020. 3(167). 25-31. DOI: 10.31145/1999-513x-2020-3-25-31
3. Kaligin N. N., Uvaysov S. U., Uvaysova A. S. Bespilotnoye transportnoye sredstvo v telekommunikatsionnoy infrastrukture goroda [Unmanned vehicle in the telecommunications infrastructure of the city] // Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye – Quality. Innovation. Education. 2020. 4(168). 76-85. DOI: 10.31145/1999-513x-2020-4-76-85

4. Uvaysov S. U., Chernoverskaya V. V., Kaligin N. N., Markin A. A. Kiberfizicheskaya sistema upravleniya dvizheniyem bespilotnykh transportnykh sredstv [Cyber-physical traffic control system for unmanned vehicles] // Journal Science Intensive Technologies. 2021. 22(4). 34-42. DOI: 10.18127/j19998465-202104-05

5. Jiang F. J., Al-Janabi M., Bolin T., Johansson K. H., Mårtensson J. SVEA: an experimental testbed for evaluating V2X use-cases // 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Macau, China, 2022. 3484-3489. DOI: 10.1109/ITSC55140.2022.9922544

Информация об авторах

Калигин Николай Николаевич – аспирант, Российский технологический университет МИРЭА (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7666-8339, nkaligin@yandex.ru

Увайсов Сайгид Увайсович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Российский технологический университет МИРЭА (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-1943-6819, uvaysov@yandex.ru

Черноверская Виктория Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Российский технологический университет МИРЭА (Москва, Россия), ORCID: 0009-0009-6311-7648, v_chernoverskaya@mail.ru