

УДК: 656.11

## Перекресток в умном городе

А. А. Куржанский<sup>1,а</sup>, А. Б. Куржанский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Калифорнийский университет Беркли,  
Беркли, Калифорния, 94720, США

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

E-mail: <sup>а</sup> akurzhan@berkeley.edu

*Получено 28.02.2018, после доработки — 30.05.2018.*

*Принято к публикации 30.05.2018.*

Надежность автоматизированных систем управления (АСУ) и безопасность автономных автомобилей основываются на предположении, что если система компьютерного зрения, установленная на автомобиле, способна идентифицировать объекты в поле видимости и АСУ способна достоверно оценить намерение и предсказать поведение каждого из этих объектов, то автомобиль может спокойно управляться без водителя. Однако как быть с объектами, которые не видны?

В данной статье мы рассматриваем задачу из двух частей: (1) статической (о потенциальных слепых зонах) и (2) динамической реального времени (об идентификации объектов в слепых зонах и информировании участников дорожного движения о таких объектах). Эта задача рассматривается в контексте городских перекрестков.

Ключевые слова: автономные автомобили, подключенные автомобили, подключенные перекрестки, слепые зоны, I2V, DSRC

UDC: 656.11

## Intersection in a smart city

A. A. Kurzanskiy<sup>1,a</sup>, A. B. Kurzanski<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of California, Berkeley,  
Berkeley CA 94720, USA

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University,  
119992, Moscow, Leninskiye Gory, Lomonosov Moscow State University

E-mail: <sup>a</sup> akurzhan@berkeley.edu

*Received 28.02.2018, after completion — 30.05.2018.*

*Accepted for publication 30.05.2018.*

Intersections present a very demanding environment for all the parties involved. Challenges arise from complex vehicle trajectories; occasional absence of lane markings to guide vehicles; split phases that prevent determining who has the right of way; invisible vehicle approaches; illegal movements; simultaneous interactions among pedestrians, bicycles and vehicles. Unsurprisingly, most demonstrations of AVs are on freeways; but the full potential of automated vehicles — personalized transit, driverless taxis, delivery vehicles — can only be realized when AVs can sense the intersection environment to efficiently and safely maneuver through intersections.

AVs are equipped with an array of on-board sensors to interpret and suitably engage with their surroundings. Advanced algorithms utilize data streams from such sensors to support the movement of autonomous vehicles through a wide range of traffic and climatic conditions. However, there exist situations, in which additional information about the upcoming traffic environment would be beneficial to better inform the vehicles' in-built tracking and navigation algorithms. A potential source for such information is from in-pavement sensors at an intersection that can be used to differentiate between motorized and non-motorized modes and track road user movements and interactions. This type of information, in addition to signal phasing, can be provided to the AV as it approaches an intersection, and incorporated into an improved prior for the probabilistic algorithms used to classify and track movement in the AV's field of vision.

This paper is concerned with the situation in which there are objects that are not visible to the AV. The driving context is that of an intersection, and the lack of visibility is due to other vehicles that obstruct the AV's view, leading to the creation of blind zones. Such obstruction is commonplace in intersections.

Our objective is:

- 1) inform a vehicle crossing the intersection about its potential blind zones;
- 2) inform the vehicle about the presence of agents (other vehicles, bicyclists or pedestrians) in those blind zones.

Keywords: autonomous driving, connected vehicles, connected intersections, blind zones, I2V, DSRC

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 347–358 (Russian).

## 1. Введение

Статистика Госавтоинспекции за последние три года показывает снижение количества ДТП на улицах российских городов [Госавтоинспекция...]. Соответствующие данные по Казани и Москве приведены на рис. 1. Тем не менее цифры остаются высокими. Так, например, в 2017 году в Москве было зарегистрировано 8036, а в Казани 1842 ДТП, в которых пострадали соответственно 9595 и 2135 человек. В Москве в результате ДТП ежегодно гибнет более 400 участников дорожного движения (ДД). Это сравнимо с Нью-Йорком, где ежегодно около 4000 человек получают серьезные травмы и более 300 гибнут в ДТП на городских улицах. Большая часть крупных ДТП в городах происходит на перекрестках. Перекрестки являются наиболее аварийными элементами дорожной сети из-за сложности геометрии, частого отсутствия четкой разметки, высокой интенсивности пересекающихся и/или сливающихся потоков транспорта и пешеходов, а также разнородности участников ДД. Основные причины ДТП на перекрестках — это агрессивное вождение при старте и поворотах, превышение скорости в попытках успеть на зеленый, «слепые» зоны, откуда неожиданно появляется пешеход, велосипедист или машина, и проезд на красный свет.



Рис. 1. Статистика ДТП и пострадавших в них по городам Москва и Казань за 2015–2017 годы [Госавтоинспекция...]

Для сокращения количества и тяжести ДТП в 2014 году в Нью-Йорке стартовала программа Vision Zero [New York Vision Zero...]. Она основывается на базовом принципе недопустимости («нулевой терпимости») смертей и тяжелых травм в результате ДТП. Придуманная и впервые внедренная в Швеции в 1997 году, эта программа была признана удачной и получила распространение в Нидерландах, Британии, Канаде и США. Ее главным элементом являются меры ограничительного характера: уменьшение интенсивности автомобильного потока за счет сокращения транспортных рядов, создание выделенных велосипедных дорожек (опять-таки за счет существующих транспортных рядов), расширение тротуаров и создание островков безопасности для пешеходов посередине улиц, десинхронизация светофоров с целью недопущения зеленой волны, дающей машинам возможность разогнаться, а также крупные денежные штрафы для всех участников ДД, включая пешеходов и велосипедистов. В ряде случаев эти ограничения улучшают безопасность ДД, но почти всегда они ослабляют эффективность транспортной сети.

В это же время бурное развитие имеет тема автоматизации транспорта, подключенных и автономных автомобилей (ПА и АА). Ожидается, что результат подобной автоматизации будет не меньше, чем был в свое время результат замены гужевого транспорта автомобильным. Неудивительно, что большинство успешных демонстраций АА до сих пор имело место на автострадах, где в основном требуется лишь держаться своего ряда и следовать за впереди едущим автомобилем. Наиболее же трудным и вместе с тем наиболее важным этапом автоматизации должен стать запуск АА на городских улицах, в присутствии всех традиционных участников ДД, где главным элементом является перекресток. При этом пассажиры АА не должны себя чувствовать так, будто их везет школьник, впервые севший за руль. Успешное внедрение АА требует от его системы управления безопасности и эффективности вождения. Однако, как сви-

детельствуют ДТП с участием АА [Ziegler, 2016; Morris, 2017; Cassidy, 2017; Bachner, 2018], на сегодняшний день безопасность АА намного ниже, чем у обычных автомобилей.

Если обобщить концепцию «нулевой терпимости» к ДТП с жертвами и усилия по автоматизации транспорта с целью повышения его скорости и надежности, возникает вопрос: как увеличить эффективность городских перекрестков, то есть пропускную способность, умножив при этом безопасность участников ДД?

## 2. Авария на перекрестке

24 марта 2017 года на перекрестке улиц McClintock Drive и Don Carlos Avenue в городе Темпи, штат Аризона, в США произошло столкновение автомобилей Honda CR-V и Volvo XC90 [Muio, 2017]. Следуя с юга по McClintock и совершая незащищенный зеленой стрелкой левый поворот в восточном направлении на Don Carlos, Honda ударила Volvo, двигавшуюся в третьем ряду по McClintock с севера на юг. Столкновение произошло в момент, когда зеленый свет, дававший право движения в обоих направлениях по McClintock, переключался на желтый. Honda хотела успеть повернуть до переключения света. Volvo, принадлежавшая компании Uber, двигалась в автономном режиме со скоростью 60 км/ч (при ограничении 65 км/ч), имея цель проскочить перекресток до переключения света. В результате столкновения Volvo была отброшена в сторону, ударила боком о столб, развернулась на 180 градусов, ударила две машины, медленно следовавшие друг за другом в соседнем ряду, и перевернулась на бок.

Согласно полицейскому протоколу женщина за рулем Honda не видела ехавшую в третьем ряду Volvo, так как этот ряд был загорожен стоявшими в первых двух рядах машинами. Надеясь, что в третьем ряду никого нет, она приняла ошибочное, как оказалось, решение: завершить левый поворот. С другой стороны, проверка лог-файлов системы компьютерного зрения, установленной на Volvo, выявила, что и эта система не видела совершавшую левый поворот Honda. Рис. 2 иллюстрирует ситуацию, приведшую к столкновению, которая была смоделирована в симуляторе PreScan [PreScan Simulator...]<sup>1</sup>.



Рис. 2. Реконструкция аварии с участием АА компании Uber в симуляторе PreScan

Если бы не препятствия в виде автомобилей, стоявших в первом и втором рядах, то Honda и Volvo видели бы друг друга и Honda должна была пропустить Volvo согласно ПДД. Со своей стороны Volvo, даже не видя Honda, ехала не нарушая правил — на зеленый свет, не превышая скорости. Поэтому формально виновницей ДТП была справедливо признана Honda. Значит ли это, что автоматическая система управления (АСУ) на Volvo сработала безупречно? С точки зрения полиции и компании, страхующей Uber, — да. Но с точки зрения пассажиров Volvo и тех

<sup>1</sup> Подобные аварийные ситуации возникают очень часто на перекрестках во всем мире. Мы заостряем внимание на данном конкретном ДТП потому, что его участником стал АА и оно подробно освещалось в прессе.

автомобилей, которые ударила Volvo после столкновения со столбом, однозначно нет. Опытный водитель с толикой здравого смысла, находясь за рулем Volvo, мог бы избежать аварии.

В данном случае АСУ совершила две ошибки: (1) ошибку детектирования — не увидев опасности в виде поворачивающей Honda, и (2) ошибку в принятии решения — формально не нарушая ограничения скорости, Volvo тем не менее двигалась слишком быстро для описанной ситуации.

### 3. Постановка задачи

Надежность АСУ и безопасность АА основываются на предположении, что если система компьютерного зрения, установленная на автомобиле, способна идентифицировать объекты в поле видимости и АСУ способна достоверно оценить намерение и предсказать поведение каждого из этих объектов, то автомобиль может спокойно управляться без водителя [Shalev-Shwartz et al., 2018]. В апреле 2017 года глава корпорации Tesla Motors Илон Маск заявил: «...Решая задачу компьютерного зрения, вы сразу решаете задачу автономного вождения; если же нет компьютерного зрения, то нет и автономного вождения... С помощью одних только видеокамер вы можете приобрести сверхчеловеческие возможности» [Interview of Elon Musk...] (см. 14 минуту интервью). И тут возникает вопрос: а как быть с объектами, которые не видны?

Описанная выше авария на перекрестке дает представление о том, какую опасность представляют объекты, не видимые до и в момент принятия решения. На большинстве перекрестков могут быть помехи для видимости. В основном это остановившийся в ожидании своего зеленого света транспорт, общественный транспорт на остановке рядом с перекрестком, или автомобили коммунальных служб.

Итак, мы формулируем задачу:

- 1) информировать автомобиль, следующий через перекресток, о его потенциальных слепых зонах, то есть зонах, объекты в которых могут быть не видны автомобилю из-за каких-либо препятствий;
- 2) информировать наш автомобиль о присутствии, а также, по возможности, о местоположении и динамике объектов в его потенциальных слепых зонах.

Решая первую часть задачи, мы поощряем более осторожное управление автомобилем и тем самым повышаем безопасность перекрестка. Решение второй части задачи способствует более быстрому движению автомобиля через перекресток в условиях, когда это позволяет обстановка, увеличивая тем самым пропускную способность. Поясним это на примере ситуации, предшествовавшей столкновению АА Volvo компании Uber с машиной Honda.

Допустим, Volvo проинформирована о слепой зоне впереди, то есть о том, что в любой момент кто-то, следующий в противоположном направлении, может повернуть налево, пересекая траекторию Volvo. В результате Volvo должна снижать скорость до тех пор, пока слепая зона не станет видимой, и тогда, в зависимости от наличия объектов в этой зоне и их предполагаемых намерений, а также от сигнала светофора, принять решение: ускориться или остановиться. В нашей ситуации присутствует поворачивающая налево Honda, поэтому Volvo, которая сможет увидеть ее лишь достигнув перекрестка, остановится и уже не успеет пересечь его, так как сигнал светофора переключится на желтый. Если бы машины Honda не было, то Volvo, в отсутствие дополнительной информации, вела бы себя точно так же и остановилась бы перед перекрестком, не успев пересечь его на зеленый свет. Однако если бы Volvo знала, что перекресток свободен, то могла бы уверенно следовать вперед, не снижая скорости, и успеть пересечь перекресток до переключения сигнала светофора.

Решить первую часть задачи можно, зная лишь геометрию перекрестка и имея информацию о разрешенных маневрах (например, какие допускаются левые/правые повороты и развороты, наличие велосипедных дорожек, пешеходных переходов и т. п.). Для решения второй части задачи необходима установка детекторов транспорта и пешеходов в потенциальных слепых зонах.

#### 4. Концептуальный подход к решению задачи

Рассмотрим траектории объектов (автомобилей, трамваев, велосипедистов, пешеходов и т. д.), пересекающих перекресток. Траектории подобных объектов с приблизительно одинаковыми началами и приблизительно одинаковыми концами образуют пучки. Каждому пучку траекторий можно поставить в соответствие **маневр**. Маневр может быть геометрически описан как непрерывная кривая линия, имеющая направление и ширину. Например, представим себе правый поворот с юга на восток, который на перекрестке совершает автотранспорт. Траектории машин, поворачивающих из крайнего правого ряда улицы, идущей с юга на север, в крайний правый ряд улицы, идущей с запада на восток, образуют маневр. Разные водители совершают этот поворот немного по-разному в силу личных привычек и особенностей своего автотранспорта. Необходимо, чтобы геометрическое описание включало все эти траектории. Поэтому кривая маневра имеет ширину. Если же правый поворот с юга на восток происходит из крайнего правого ряда во второй справа ряд улицы, идущей с запада на восток, то это уже будет **другой** маневр.

Иногда разные маневры могут геометрически частично или полностью совпадать, но оставаться независимыми. Например, один из автомобильных рядов может быть совмещен с трамвайным путем. В этом случае мы отдельно рассматриваем автомобильный и трамвайный маневры. Другой пример — это велосипедисты, которые в отсутствие выделенной велосипедной дорожки вынуждены использовать один из автомобильных рядов. Автомобильный и велосипедный маневры тоже рассматриваются отдельно. Пешеходы имеют свои маневры, геометрия которых чаще всего совпадает с пешеходными переходами: каждому пешеходному переходу соответствуют два маневра, направленных в противоположные стороны.

Пересечение любых двух маневров образует **зону конфликта (ЗК)**. Зона конфликта — это место, где возможно столкновение или наезд на велосипедиста или пешехода. Перед каждой зоной конфликта автомобиль (тот, кто им управляет) должен принять решение: остановиться, держать прежнюю скорость или ускориться. Делается это на основе сигнала светофора и наблюдаемой на перекрестке обстановки: красный свет требует безусловной остановки, а если свет зеленый, то надо убедиться, что движение вперед возможно (маневр не заблокирован) и безопасно.

Чтобы сократить количество ЗК, требующих анализа, мы должны выяснить, какие маневры совместимы. Для этого можно использовать схему, приведенную на рис. 3 и используемую для установления фаз светофора в стандарте NEMA [Federal Highway Administration...]. Здесь в левой части рисунка направления движения поставлены в соответствие фазам светофора. Согласно диаграмме в правой части рисунка, одновременно зелеными могут быть одна фаза из первого и одна фаза из второго цикла, при этом обе должны находиться в одной группе, левой или правой. Данная схема не является универсальной: она не описывает движения пешеходов или трамваев; более того, она не допускает незащищенного левого поворота, какой был разрешен в случае аварии с Honda и Volvo. Однако мы приводим здесь эту схему в качестве примера отфильтровки несовместимых маневров.

Рис. 4 иллюстрирует шаги, необходимые для отбора ЗК, требующих анализа, то есть **активных ЗК**. На первом шаге мы вычисляем все возможные на данном перекрестке маневры. Для этого шага необходимо знать геометрию перекрестка и иметь данные о том, какое там разрешено движение. Для большого числа перекрестков эту информацию можно извлечь из OpenStreetMap [OpenStreetMap...]. Второй шаг состоит в переборе комбинаций совместимых маневров. Для перекрестка на рис. 4 мы использовали представленную выше диаграмму NEMA, и вторая часть рисунка показывает маневры, допустимые при комбинации зеленых фаз 2 и 6. Третий шаг — это попарное пересечение совместимых маневров. Пересечения пересекающихся маневров дают нам ЗК. На четвертом шаге мы смотрим, какие ЗК требуют внимания для каждого маневра. Здесь надо оговориться, что в США, откуда взят этот пример, как правило, разрешен правый поворот на красный свет с условием, что поворачивающий направо на красный уступает дорогу всем, кто движется в том же направлении, но на свой зеленый свет.



Так, если автомобиль поворачивает на красный с юга на восток, а в это время зеленый сигнал светофора разрешает движение с запада на восток, то движение «запад–восток» имеет приоритет над «юг–восток». На четвертой части рисунка мы можем увидеть, что маневр правого поворота с юга на восток на красный свет имеет три ЗК: первые две — от пересечения с пешеходными маневрами с запада на восток и обратно и третья — с автомобильным маневром «запад–восток».

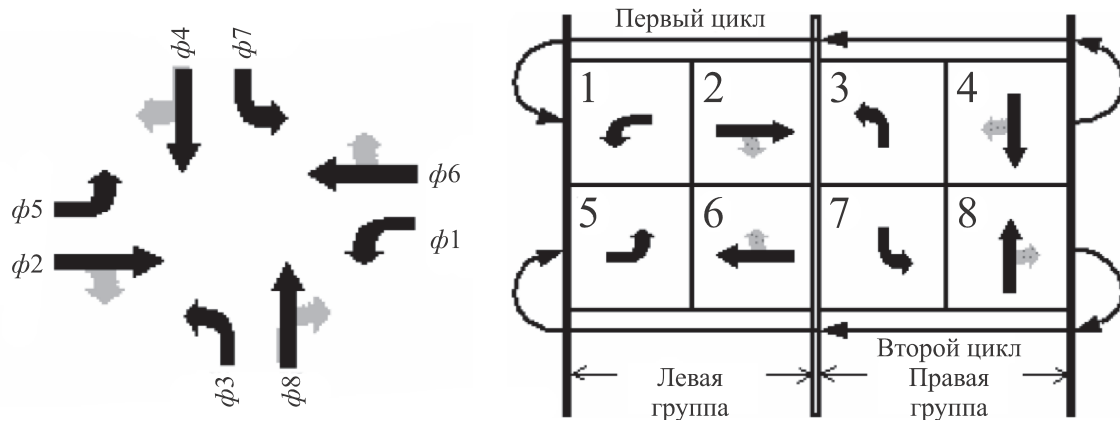


Рис. 3. Диаграмма возможных направлений движения автотранспорта на перекрестке и их совместимости

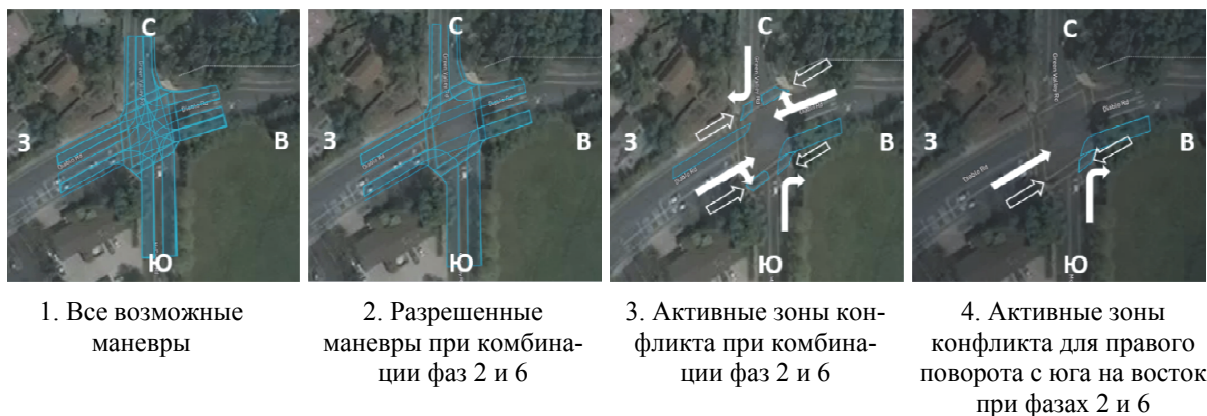


Рис. 4. Идентификация активных зон конфликта. Буквы С, В, Ю, З обозначают стороны горизонта. Закрашенные стрелки обозначают маневры автотранспорта, а незакрашенные — маневры пешеходов

Теперь вернемся к ДТП с участием Honda и AA Volvo и проанализируем маневры, в которых находились оба участника столкновения, и вычислим **потенциальные слепые зоны** для этих двух маневров относительно друг друга. Рис. 5 поможет проиллюстрировать наш анализ.

Обозначим маневр левого поворота с юга на запад как M0, а маневры прямого движения с севера на юг в первом, втором и третьем рядах соответственно как M1, M2 и M3. Маневр M0 имеет пять зон конфликта — ЗК1, ЗК2, ЗК3 с M1, M2, M3 и ЗК4, ЗК5 с пешеходными маневрами (рис. 5, а). Рассмотрим маневры M0 и M3 с зоной конфликта ЗК3, где произошло ДТП. В каждой точке маневра M0, ведущей к зоне конфликта<sup>2</sup>, учитывая направление движения, мы можем построить сектор обзора с заданными углом и радиусом (рис. 5, б)<sup>3</sup>. Нас интересует пе-

<sup>2</sup> На практике мы хотим исследовать секторы обзора, построенные не в каждой точке маневра, а только в точках принятия решения.

<sup>3</sup> Угол можно взять в пределах от 60 до 360 градусов, а радиус — в пределах от 100 до 250 метров.

ресечение сектора обзора с частью маневра М3, ведущей к ЗК3. Соединяем каждую точку дискретного разбиения этого пересечения<sup>4</sup> с центром сектора отрезком<sup>5</sup>, и если данный отрезок пересекает какой-либо из **других** маневров, кроме М0 и М3, в частях, ведущих к его зонам конфликта (в нашем примере другие маневры — это М1 и М2 в тех их частях, которые находятся перед ЗК1 и ЗК2)<sup>6</sup>, то мы считаем, что эта точка находится в слепой зоне (рис. 5, в).



Рис. 5. Вычисление потенциальных слепых зон. Буквы С, В, Ю, З обозначают стороны горизонта

Тот же анализ можно повторить зеркально со стороны маневра М3 в отношении маневра М0. В этом случае мы строим сектор обзора из **точки невозврата** в М3 по отношению к ЗК3, после которой автомобиль, двигаясь с максимально разрешенной скоростью, не успевает остановиться перед ЗК3 (рис. 5, г).

Произведя описанный анализ всех пар совместимых маневров, мы получаем: (1) геометрическое описание всех потенциальных слепых зон; (2) для каждой потенциальной слепой зоны — список маневров, которые эту слепую зону создают (в нашем примере это М1 и М2). Таким образом, решена первая часть поставленной задачи.

Решать вторую часть задачи необходимо в реальном времени, для этого нужны детекторы транспорта, велосипедистов и пешеходов. Геометрия слепых зон указывает нам, где следует установить детекторы. На рис. 6, в контексте нашего примера с незащищенным левым поворотом, эти места обозначены как **зоны для детектирования**. Существует много видов детекторов: индуктивные петли, магнитные датчики, радары, ультразвуковые радары, микрорадары,



Рис. 6. Зоны для детектирования и пример позиционирования магнитных датчиков

<sup>4</sup> Шаг разбиения можно взять 1 метр.

<sup>5</sup> Эти отрезки обозначены пунктирными линиями на рис. 5, в.

<sup>6</sup> Мы рассматриваем лишь части других маневров (в нашем случае — М1 и М2), которые находятся **перед** любыми из их зон конфликта, поскольку считаем, что наиболее серьезные помехи видимости создаются статическими объектами, например остановившимися машинами или автобусами. Помимо этого, можно исследовать, пересекают ли наши отрезки остановки общественного транспорта, строения, находящиеся вблизи перекрестка, или зоны ремонтно-строительных работ, если информация о таких объектах есть в наличии.



лидары, видеокамеры и т. д. Выбор детекторов определяется набором приложений, для которых эти детекторы предназначены, и выделенным бюджетом. В одних приложениях надо пересчитывать проезжающие автомобили, в других — важно мерять скорость проезжающего транспорта, в третьих — нужно идентифицировать тип проезжающего транспорта.

Для нашего приложения необходимо обнаруживать присутствие объектов в зонах для детектирования. С этой задачей могут справиться магнитные датчики, фиксирующие проезжающий автотранспорт, и микрорадары для распознавания присутствия пешеходов.

Перед совершением левого поворота надо убедиться, что пешеходный переход пуст. Данные о присутствии пешеходов на переходе поступают с микрорадаров. Затем, если нет опасности со стороны видимого автотранспорта, а также **нет присутствия невидимых автомобилей**, можно делать левый поворот. Присутствие автомобилей в маневрах М1, М2 и М3 определяется балансом прихода через подъездные детекторы и ухода через детекторы стоп-линии. Конечно, в реальной жизни автомобиль, проследовавший через подъездной детектор, может сменить ряд. И чем дальше от перекрестка будет находиться подъездной детектор, тем больше появляется возможностей для такой смены рядов. Однако слишком близко к перекрестку подъездные детекторы ставить тоже нельзя, ибо тогда теряется смысл оповещения об активности в слепой зоне: это оповещение приходит слишком поздно. Позиция подъездных детекторов должна быть не ближе к перекрестку, чем точка невозврата — последняя точка, в которой автомобиль, едущий с максимально разрешенной скоростью, успевает затормозить перед ЗК.

Если рассматривать движение в маневре М3 относительно М0, то здесь существует два типа присутствия: (1) на подъезде к перекрестку — между подъездным детектором и детектором стоп-линии; (2) на самом перекрестке — между детектором стоп-линии и выездным детектором. Когда мы находимся в маневре М3, то первый тип присутствия опасен для нас, только если мы достаточно далеко от перекрестка: двигаясь с максимально допустимой скоростью, мы не успеваем пересечь перекресток прежде, чем автомобиль в М0 достигнет детектора стоп-линии. Второй тип присутствия опасен всегда, так как автомобили, уже находящиеся на перекрестке, могут решиться на поворот в любой момент.

В ситуации, предшествовавшей столкновению машины Honda с AA Volvo, «умный» перекресток мог бы выдать в эфир сообщение о присутствии автомобилей в М0, М1, М2 и в М3 вместе с информацией о том, что до конца зеленого сигнала светофора на этих направлениях осталось столько-то секунд. Дальше все бы зависело от того, какой из двух автомобилей является **подключенным**, то есть способным принять и понять сообщение, посланное «умным» перекрестком. Если оба автомобиля не подключены, то «умный» перекресток не поможет им избежать столкновения. Если подключена одна Honda, то она будет ждать на перекрестке, пока не увидит Volvo, которая либо пересечет перекресток на скорости, либо остановится на стоп-линии в ожидании нового светофорного цикла, тогда Honda сможет завершить левый поворот. Если подключена одна Volvo, то в неведении относительно намерений поворачивающего налево автомобиля она затормозит с целью успеть остановиться перед ЗКЗ и, так как зеленый свет заканчивается, фактически остановится на стоп-линии, пропуская машину Honda. Наконец, если подключены оба автомобиля, то Honda будет ждать, а Volvo будет тормозить до тех пор, пока оба автомобиля не увидят друг друга. Тогда, согласно ПДД, в том случае, если Volvo не остановится на стоп-линии, а будет следовать дальше<sup>7</sup>, Honda уступит ей дорогу.

## 5. Подключенные перекрестки

«Умный» перекресток с вышеописанными функциями оповещения подключенных участников ДД должен быть соответственно оборудован вычислительными и коммуникационными средствами. Диаграмма на рис. 7 дает пример конфигурации оборудования «умного» перекрестка. «Умным» перекресток делают детекторы и компьютер с элементами беспроводной связи.

<sup>7</sup> Например, если зеленый свет для обоих маневров будет более продолжительным.

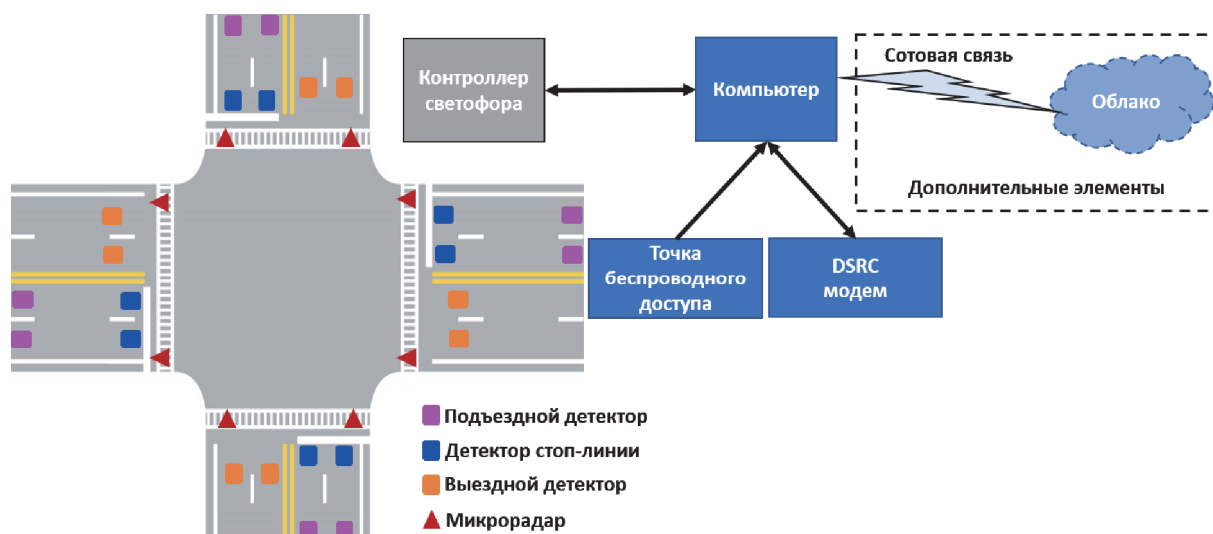


Рис. 7. Оборудование перекрестка

Компьютер собирает данные детекторов по WiFi через точку беспроводного доступа, обрабатывает эти данные, сочетая их с информацией о фазах светофора, поступающей из контроллера светофора, и формирует сообщения о состоянии перекрестка, которые передает в эфир для подключенных автомобилей через **выделенную связь малой дальности** (Dedicated Short-Range Communication — **DSRC**). DSRC служит также для передачи сообщений от автомобилей перекрестку: например, запрос на внеочередной зеленый свет от машин срочных служб — пожарных, скорой помощи и т. п. Дополнительно компьютер может передавать собираемые данные и историю посланных DSRC-сообщений по сотовой связи в облако для архивирования и дальнейшего изучения. Сотовая связь также позволяет подсоединиться к компьютеру с терминалов удаленного доступа.

Выделенная связь малой дальности DSRC была разработана для коммуникации подключенных автомобилей между собой (vehicle-to-vehicle — **V2V**) и с «умной» дорожной инфраструктурой (vehicle-to-infrastructure — **V2I**, infrastructure-to-vehicle — **I2V**). Для DSRC-сообщений в США был создан стандарт SAE J2735 [SAE J2735 Standard...]<sup>8</sup>. В настоящий момент этот стандарт содержит 16 типов сообщений. Для нашей задачи нужны три типа.

1. **MAP** описывает геометрию перекрестка. Она включает описание подъездных и выездных рядов; типов транспорта, разрешенного в каждом из рядов; соединенность въездных и выездных рядов (откуда куда разрешено двигаться); пешеходных переходов и т. п. MAP мог бы использоваться также для передачи информации о потенциальных слепых зонах.
2. **Signal Phase and Timing (SPaT)** информирует о текущем состоянии перекрестка, которое содержит данные о фазах светофора и их ожидаемой продолжительности, соответствии этих фаз маневрам, а также о наличии и размерах очередей в подъездных рядах.
3. **Intersection Collision Avoidance (ICA)** предупреждает об опасности столкновения. Этот тип сообщений был разработан для V2V-коммуникаций: если, например, подключенный автомобиль проезжает на красный, то он посылает в эфир сообщение ICA, оповещающее участников ДД об опасности. Мы предлагаем эту функцию передать «умному» перекрестку. Если детекторы сообщают о пересечении стоп-линии в маневре, находящемся в желтой или красной фазе светофора, то компьютер «умного» перекрестка шлет в эфир сообщение ICA с указанием направления, откуда исходит опасность.

<sup>8</sup> В ЕС, Китае и Японии разрабатываются аналоги данного стандарта с учетом региональной транспортной специфики.

## 6. Актуальные исследовательские вопросы

Мы рассмотрели задачу в двух частях: (1) статической (о потенциальных слепых зонах) и (2) динамической реального времени (об идентификации объектов в слепых зонах). Решение первой части задачи для каждого конкретного перекрестка само по себе уже представляет ценность. Во-первых, оно позволяет отделить простые перекрестки, не требующие специального оборудования, от сложных, которые нуждаются в дополнительном анализе; во-вторых, оно делает возможным такой анализ, сформулированный ниже в виде списка актуальных исследовательских вопросов. Ответы на эти вопросы имеют важное практическое значение.

1. Для данной интенсивности движения на перекрестке какова вероятность того, что каждая из потенциальных слепых зон на деле окажется слепой? Ответив на этот вопрос, мы сможем вычислить, в какое время суток перекресток наиболее опасен и откуда исходит опасность.
2. Данные о времени и длительности опасных периодов в сочетании с геометрией активных слепых зон позволят сгруппировать перекрестки по классам риска. Такая классификация определит приоритет перекрестков, требующих модернизации и дополнительного оборудования.
3. При ограниченном муниципальном бюджете актуален вопрос минимальной разумной конфигурации детекторного оборудования и оптимального размещения сенсоров для перекрестка, требующего модернизации. Например, на отдельных перекрестках в качестве сенсора достаточно установить зеркало, в которое будет видно слепую зону.
4. Компании, разрабатывающие программное обеспечение для автономного вождения, в настоящее время делают упор на использовании нейронных сетей и **обучении с учителем**. Проблема этого подхода в том, что данных с реальных дорог слишком мало для обучения. В своем отчете [Waymo Safety Report...] компания Waymo сообщает, что с начала проекта Google по автономному вождению они наездили **3.5 миллиона миль** по реальным дорогам в США. Это капля в море, учитывая, что за тот же период водители в США проехали **18 триллионов миль**. Чтобы покрыть недостаток данных, Waymo, как сообщается в том же отчете, использует симуляции дорожных ситуаций, проигрывая в симуляторе тысячи сценариев, в которых варьируются динамические параметры участников ДД. Насколько эти сценарии являются реалистичными и исчерпывающими, сказать невозможно, так как сама методология их генерирования секретна. Таким образом, актуальной является задача генерирования сценариев реальной опасности на дорогах. На перекрестках опасность исходит главным образом от слепых зон и от нарушителей.
5. Имея классификацию перекрестков по риску (см. пункт 2), для каждого класса перекрестков можно решать задачу синтеза устойчивого управления, учитывая неопределенность, происходящую от слепых зон. Верификацию получаемых стратегий управления можно делать с помощью сценариев опасных ситуаций (см. пункт 4).
6. Каждый класс перекрестков (см. пункт 2) может быть смоделирован в симуляторе типа PreScan [PreScan Simulator...]. Такая симуляция нужна, во-первых, для разработки и тестирования автоматического управления (см. пункт 5), а во-вторых, для вычисления производительности перекрестка с точки зрения пропускной способности и безопасности участников ДД при различных конфигурациях детекторов. Симуляции могут включать также моделирование беспроводных коммуникаций с помехами и задержками [Communication network simulator NS-3...]. Это позволит оценить, насколько «умный» перекресток может быть полезен для подключенных участников ДД и каков процент участников ДД должен быть подключен, чтобы от «умного» перекрестка была польза. Ответив на эти вопросы, стоит приступить к решению второй, динамической части нашей задачи.

Вопросы, связанные со второй, динамической частью задачи, включают (1) быструю и правильную интерпретацию сигналов детекторов «умным» перекрестком для формирования

DSRC-сообщений и (2) фильтрование и недвусмысленная интерпретация отфильтрованных DSRC-сообщений подключенным автомобилем, который должен игнорировать информацию, не относящуюся к нему.

Очень важен круг вопросов о кибербезопасности «умных» перекрестков.

1. Как оперативно распознать неисправности детектирования?
2. Какие ошибки детектирования угрожают безопасности перекрестка?
3. Какие кибератаки на вычислительную инфраструктуру могут привести к жертвам среди участников ДД?

## Список литературы (References)

- Госавтоинспекция. Показатели состояния безопасности дорожного движения. — URL: <http://stat.gibdd.ru>  
General Administration for Traffic Safety. Traffic Safety Performance Measures. — URL: <http://stat.gibdd.ru> (in Russian).
- Bachner M.* Mobileye autonomous vehicle runs red light in Jerusalem // The Ties of Israel. — May 22, 2018. — URL: <https://www.timesofisrael.com/mobileye-autonomous-vehicle-runs-red-light-in-jerusalem>
- Cassidy M.* Tesla ‘Autopilot’ Car Hits Phoenix Police Motorcycle // USA Today. — March 28, 2017. — URL: <https://www.usatoday.com/story/tech/nation-now/2017/03/28/tesla-autopilot-car-hits-police-motorcycle/99719978>
- Communication network simulator NS-3. — URL: <https://www.nsnam.org>
- Federal Highway Administration. Traffic Signal Timing Manual. — URL: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024>
- Interview of Elon Musk by TED’s Head Curator Chris Anderson. — URL: <https://blog.ted.com/what-will-the-future-look-like-elon-musk-speaks-at-ted2017>
- Morris D. Z.* Uber’s Self-Driving Systems, not Human Drivers, Missed at Six Red Lights in San Francisco // Fortune Magazine. — February 26, 2017. — URL: <http://fortune.com/2017/02/26/uber-self-driving-car-red-lights>
- Muoio D.* Police: The Self-Driving Uber in the Arizona Crash Was Hit Crossing an Intersection on Yellow // Business Insider. — March 30, 2017. — URL: <http://www.businessinsider.com/uber-self-driving-car-crash-arizona-police-report-2017-3>
- New York Vision Zero. — URL: <http://www1.nyc.gov/site/visionzero/index.page>
- OpenStreetMap. — URL: <http://www.openstreetmap.org>
- PreScan Simulator. — URL: <https://tass.plm.automation.siemens.com/prescan>
- SAE J2735 Standard. — URL: <https://www.sae.org/standardsdev/dsrc>
- Shalev-Shwartz S., Shammah S., Shashua A.* On a Formal Model of Safe and Scalable Self-Driving Cars // Mobileye. — 2018. — URL: <https://arxiv.org/abs/1708.06374>
- Waymo Safety Report. On the Road to Fully Self-Driving. — URL: <https://waymo.com/safetyreport>
- Ziegler C.* A Google Self-Driving Car Caused a Crash for the First Time // The Verge. — February 29, 2016. — URL: <https://www.theverge.com/2016/2/29/11134344/google-self-driving-car-crash-report>