

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ПЕРЕКРЕСТОК НА БАЗЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

Валуев А.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

valuev.online@gmail.com

Аннотация. Вводится способ компьютерного моделирования дорожного движения на регулируемом перекрестке городских автодорог как случайного процесса, основанный на использовании статистических зависимостей для временных интервалов между автомобилями. Рассматриваются способы получения таких зависимостей по данным мониторинга. Приводятся и анализируются примеры расчетов для T-образного перекрестка.

Ключевые слова: транспортный поток, светофорный цикл, схема пофазного разъезда, случайный процесс, имитационное моделирование.

Введение

Компьютерное представление транспортных потоков может использоваться в различных целях. Эти цели имеют определяющее значение для выбора формы модели и того корпуса эмпирических данных, которые необходимо получить и обработать для практического применения математической модели.

Рассматривается цель прогноза развития локальной транспортной обстановки в области перекрестка (а в перспективе — и на фрагменте дорожной сети с несколькими перекрестками) с учетом светофорного регулирования с определенными параметрами. Данная цель требует учета стохастического характера автотранспортного потока. В этом убеждают нас и собственные наблюдения, показывающие, что проезд перекрестка по определенному направлению даже на двух последовательных светофорных циклах может существенно отличаться не только количественно, но и в определенном смысле качественно. Такие различия могут проистекать из псевдослучайного характера поступления транспортных средств (ТС) на вход перекрестка, вызываемого несоответствием между продолжительностью светофорного цикла на перекрестке и на входной дороге — например, на пешеходном переходе. Но особо существенное значение имеют возможные задержки на тех точках пересечения или слияния дорожных полос, которые должны освободиться к моменту их достижения новыми последовательностями автомобилей (называемыми *кластерами* или *пачками*). И если, действительно, хвостовой автомобиль предыдущей последовательности ТС, начавшей движение на предшествующей фазе светофорного цикла, проехал такую точку к требуемому моменту, никакой задержки не происходит. Но если он задержался на самой этой точке, то до завершения ее проезда головной и последующие ТС новой цепочки вынуждены искривлять свой путь и тем самым снижать скорость. А если хвостовое ТС еще не достигло точки пересечения полос, движение нового кластера становится невозможным. Таким образом, малые изменения в проезде по одному маршруту могут приводить к значительным изменениям в проезде по другому маршруту, соединенному с первым маршрутом общей точкой пересечения полос.

Сформулированная цель требует рассмотрения вероятностных характеристик процесса движения, в первую очередь, не индивидуальных ТС, а целых кластеров – «порций» потока по направлению, формируемых на отдельных «порциях» времени, на которые делит интересующий период светофорного регулирования. Этими порциями времени служат светофорные циклы и их фазы. Вероятностные характеристики движения отдельных ТС представляют интерес как исходный материал для получения характеристик для целых пачек. При этом они устанавливаются в привязке к тому месту, которое занимает ТС в пачке. В частности, важнейший показатель движения ТС в потоке через перекресток — временной промежуток между моментами прохождения определенного рубежа на маршруте – зависит от порядкового номера ТС в пачке.

Проезд конкретного перекрестка в городской дорожной сети (ГДС) как регулярный массовый процесс определяется, в первую очередь, двумя факторами – составом потока, то есть относительной частотой разных типов ТС, и структурой и геометрией перекрестка. При стационарном (в отношении средних характеристик) входящем потоке для фрагмента ГДС процесс его проезда может быть принципиально представлен марковской цепью в надлежащих переменных. Такими переменными являются количества ТС на отдельных участках фрагмента ГДС, определяемые на последовательности выделенных моментов времени, которыми служат моменты переключения светофора. Однако размерность пространства состояний такой марковской цепи необозримо велико,

а сами они по отдельности реализуются с крайне малыми вероятностями. Однако практический интерес представляют не сами состояния, а интегральные характеристики движения потока через фрагмент ГДС — средние значения задержек при проезде каждого перекрестка по определенному направлению, а также их дисперсии.

1. Известные подходы к вероятностному моделированию прохождения транспортного потока через перекрестки

Моделирование дорожного движения на перекрестках в целом не получило широкого распространения, что демонстрирует монография [1], в которой данная тема совершенно не раскрыта. Макроскопические подходы, получившие в целом большое распространение, не пригодны для этой цели, поскольку не представляют транспортный процесс как случайный.

Модели трафика в форме случайных потоков [2–4], являются феноменологическими и не могут непосредственно учитывать влияние изменений в организации дорожного движения и значения параметров светофорного регулирования. Транспортный процесс представлен моментами немногих характерных событий, чего в определенных целях (прогноза) могло бы быть достаточно, но не для перекрестков сложной структуры, содержащими разветвляющиеся трассы. В основательной монографии [2] рассматриваются многочисленные типовые структуры перекрестков, которые, отнюдь не исчерпывают реального их разнообразия [5]. При этом не рассматривается ряд факторов, определяющих вероятностную природу транспортного потока, среди них состав потока.

Модели клеточных автоматов [6–8] приближенно отображают геометрию участка ГДС, но также не могут адекватно учесть разнотипность ТС в потоке. Наряду с традиционными моделями типа Нагеля-Шрекенберга с достаточно грубой дискретизацией дорожного пространства и крайне упрощенным представлением динамики, сводящейся к перемещениям транспортных средств за один такт модельного на одну-три клетки (или к отсутствию перемещения), позднее были введены и другие. В интерпретации С.Л. Кленова и др. [8] единственной сохранившейся чертой клеточных автоматов является дискретизация времени и пространства, которая может быть достаточно мелкой. По существу, такая модель ближе к моделям в форме динамических систем; однако она не применялась для представления потока через перекресток.

Среди моделей трафика в форме динамических систем мы видим множество работ по однополосным и многополосным дорогам, но не по проезду перекрестка, исключая модели, разработанные в нашей собственной лаборатории ИМАШ РАН [9]. В отношении формы модели как гибридной динамической системы с переключениями на многообразиях (событийно-переключаемого процесса — СПП) с нами принципиально на одних позициях стоит В.М. Ерёмин [10], но при этом точной формулировки каких-либо микроскопических моделей его работы не содержат. Выдвинутый нами общий подход к моделированию дорожного движения в такой форме [11], первоначально использовался только в детерминированном варианте [12]. Затем в модель был введен вероятностный элемент, отражающий случайный состав транспортного потока [13].

Другая форма вероятностной модели трафика без явного представления динамики отдельных ТС предложена в [14]. Настоящая работа развивает именно последний подход.

2. Элементы микроскопической и мезоскопической вероятностной модели трафика на перекрестке

Мезоуровень воспроизведения транспортного потока через перекресток предполагает отражение его динамики в дискретном времени, связанном с процессом движения через перекресток потока как единого целого. Это дискретное представление процесса во временном аспекте означает привязку состояний к характерным моментам, к которым относятся моменты переключения светофоров. Эти моменты делят временную ось на этапы, динамика процесса характеризуется изменениями за целые этапы.

Состояние потока на определенный момент времени есть, в интегральном представлении, количество ТС на каждом участке. На микроуровне рассматриваются некоторые характеристики каждого ТС, составляющего поток, в первую очередь те, которые могут быть выявлены наиболее простым образом при мониторинге трафика и могут служить для более точного предсказания поведения потока в целом путем уменьшения неопределенности в ожидаемом поведении отдельных ТС. К ним относится, в частности, длина, которая служит признаком принадлежности транспортного средства к определенной категории (легковой или грузовой автомобиль или микроавтобус).

Рассматриваемые участки выделяются, исходя из поставленной цели. Дорога между стоп-линиями двух последовательных светофоров делится на участок, непосредственно примыкающий к выходной стоп-линии и вмещающий стоячую очередь в течение красной фазы, и остальную часть. Применительно к маршрутам на перекрестке выделяются точки пересечения или слияния полос (маршрутов), которые при существующей организации дорожного движения являются постоянно (только точки слияния) или временно активными как конфликтные точки. Эти конфликтные точки и определяются как границы участков.

Динамика потока определяется переходом отдельных транспортных средств с одного участка на другой. На мезоуровне оно может быть представлено вероятностями, с которыми определенное количество транспортных средств (при условии, что такое количество имелось на участке) переходит на соседний за определенный интервал времени (возможные продолжительности временного интервала дискретизируются). Или обратных величин — вероятностного распределения $p_j(T|N)$ времени, за которое через входную стоп-линию на j -й трассе проходит N транспортных средств. Однако более удобным оказалось использование таких зависимостей не как первичных, а как выведенных из других, более элементарных, формулируемых в терминах временного интервала между пересечением определенного рубежа двух ТС, следующих друг за другом по дорожной полосе. Таким образом, модель мезоуровня конструируется из моделей микроуровня.

3. Входящий транспортный поток по отдельным направлениям

Формирование транспортного потока, поступающего на вход перекрестка по определенной входной дороге (чаще всего — по дороге, соединяющей два перекрестка), определяется целым рядом возможных обстоятельств. Условия его формирования приводят к определенной структуре потока — сплошного или в виде последовательности «пачек» транспортных средств (кластеров), разделяемых промежутками без автомобилей или с низкоинтенсивным движением. Иначе говоря, поток может быть квазистационарным или квазициклическим. Квазистационарный поток характеризуется интенсивностью, в среднем постоянной или медленно изменяющейся. Квазициклический поток состоит из сменяющихся кластеров, характеристики которых циклически повторяются. Квазистационарность имеет место для отдельных кластеров — «порций» потока. Можно выделить следующие случаи.

- Магистральный поток по междугородней или межрайонной магистрали, пересекающей боковые дороги без значительного перераспределения транспорта между ними (которое сопровождается лишь непродолжительными локальными изменениями характера потока). Ближайший светофор на достаточном расстоянии от текущего.
- Поток на бессветофорном съезде с бессветофорной магистрали, не имеющей пересечения с рассматриваемой входной дорогой. Временные промежутки между последовательными ТС являются нерегулярными, имеют большую изменчивость.
- Поток после светофора на ближайшем к перекрестку пешеходном переходе. Кластеры после его прохождения либо расплываются, либо, наоборот, успевают слиться с предыдущими (в случае достаточно плотного и, стало быть, медленного потока). Каждый кластер полностью или частично образуется из стоячей очереди, поэтому временные промежутки между последовательными ТС являются регулярными (в вероятностном представлении).
- Поток на выходе предыдущего перекрестка при отсутствии светофоров между перекрестками. Кластеры образуются на тех фазах, на которых происходит выезд на рассматриваемую дорогу. Если выходная дорога является основным направлением для предшествующего перекрестка на некоторой фазе, то этот кластер имеет те же черты, что и для случая проезда стоп-линии на регулируемом пешеходном переходе.

В свободном потоке также возможно случайное образование кластеров, вызываемое сближением более быстрых автомобилей с более медленными при ограниченной возможности обгона. Однако такие кластеры, в отличие от ранее рассмотренных, являются небольшими и недолговечными, за исключением случая плотного потока. Но в последнем случае вслед за формированием «широких движущихся кластеров» [15] быстро наступает стадия образования сплошного связанного потока.

Дорога с нерегулируемыми боковыми въездами и выездами или с парковкой на крайних правых полосах (у тротуара, в карманах) демонстрирует эффект встраивания в поток сбоку и выхода из потока вбок, что меняет локальную плотность с соответствующим влиянием на структуру потока — как правило, незначительным.

Формальное представление квазистационарного транспортного потока — в целом или в пределах отдельных кластеров — может быть охарактеризовано параметризованным статистическим распределением временных промежутков между проездом определенного места двумя последовательными ТС. Параметром такого распределения является интенсивность потока. Такое распределение, бесспорно, зависит также от состава потока. Если в каком-то месте (и в какое-то время) в потоке преобладают большегрузные автомобили, временные промежутки будут больше при любой интенсивности потока; впрочем, в этом случае высокая интенсивность в единицах «количество ТС в час» недостижима. Если, наоборот, проезд грузового транспорта запрещен или ограничен по грузоподъемности, промежутки будут меньше.

Естественно предположить, что требуемое параметризованное статистическое распределение вполне определяется долями выделенных типов ТС в составе потока. Но систематический мониторинг даже в широких пространственных масштабах едва ли позволяет получить необходимую информацию для значительного набора возможных распределений типов ТС в потоке. С другой стороны, принципиальная регулярность трафика как массового явления на основных дорогах ГДС позволяет предположить, что состав потока на определенной дороге мало меняется во времени. Если же он меняется, то в связи с применением для разного времени суток разных ограничений на допустимые типы ТС и, соответственно, может считаться постоянным в пределах временных промежутков, на которых эти ограничения не меняются.

При увеличении или уменьшении интенсивности входного потока закономерно изменяется средний временной промежуток между поступлениями на вход ТС, следующих друг за другом на входной дороге. При генерации последовательности может учитываться образование кластеров во входном потоке.

4. Транспортный поток по отдельным направлениям проезда перекрестка

Транспортный поток на отдельных маршрутах проезда перекрестка проще, чем на входной дороге, т.к. весь кластер или его начальная часть образуются из стоячей очереди, а следующие за ним автомобили присоединяются к нему или, при низкой интенсивности потока, следуют за ними практически независимо друг от друга, как в свободном потоке.

Наибольшее значение для моделирования потока через перекресток имеет время проезда стоп-линии. Должны фиксироваться временной промежуток между включением зеленого света и проездом стоп-линии первым ТС на маршруте, а также временные промежутки между моментами пересечения стоп-линии последовательными ТС.

В практическом руководстве [16] специально выделяются характеристики проезда перекрестка первыми четырьмя ТС на маршруте и всеми последующими. Последние, в общем, ведут себя однотипно. Следует подчеркнуть, что маршруты на самом перекрестке короткие, их длина исчисляется несколькими десятками метров, а поэтому возможности как-то изменить свое поведение в зависимости от окружающей обстановки для водителей минимальные.

В отличие от потока на дороге на некотором отдалении от перекрестков, интервалы между моментами проезда стоп-линии или иной выделенной точки последовательными ТС зависят от их порядкового номера в кластере. По крайней мере, это справедливо для начальных ТС.

На характеристики проезда перекрестка по отдельному маршруту влияет, в первую очередь, геометрия маршрута. При высокой кривизне пути возможности набора скорости сильно ограничены, исходя из условий безопасности — предотвращения заноса, т.е. выхода за границы дорожной полосы. Для разветвляющихся полос их проезд замедляется, если одна из ветвей обладает высокой кривизной, характерной для поворотов.

Для воспроизведения возможных реализаций процесса проезда перекрестка, в совокупности соответствующих его вероятностным характеристикам, удобнее брать за основу временные интервалы между пересечениями стоп-линии последовательными ТС, а для головных ТС кластера — интервалы между переключением светофора и пересечением стоп-линии. Такие интервалы, особенно для начальных ТС, рассматриваются по отдельности для разных порядковых номеров. Результаты, полученные для рассматриваемого маршрута проезда Серпуховской площади, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Статистическое распределение интервалов между моментами пересечения стоп-линии последовательными ТС в кластере (Серпуховская площадь)

Интервал	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	$i \dots i + 1,$ $i \geq 4$
1	0,111	0,000	0,000	0,000	0,111	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022
2	0,111	0,444	0,333	0,333	0,222	0,444	0,286	0,250	0,500	0,333
3	0,222	0,222	0,556	0,333	0,556	0,556	0,429	0,750	0,250	0,467
4	0,444	0,111	0,111	0,333	0,111	0,000	0,143	0,000	0,250	0,133
5	0,000	0,222	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022
6	0,111	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
В среднем	3,44	3,11	2,78	3,00	2,67	2,56	2,43	2,75	2,75	2,73

Следует подчеркнуть, что вывод об однотипности распределений $q(\Delta t|N)$ временных интервалов Δt между последовательными ТС при порядковом номере лидера $N \geq 5$, хотя не может быть подтвержден в силу ограниченного количества наблюдений, но явно не противоречит полученным данным, говорящим, что никакой выраженной тенденции его изменения с ростом N . Поэтому данное предположение может быть взято за основу. С учетом этой правдоподобной гипотезы связь между вероятностными распределениями при последовательных N определяется формулой

$$p(T|N + 1) = \sum_{\Delta t=1}^{\Delta t_{max}} p(T - \Delta t|N) \times q(\Delta t|N), \quad (1)$$

где следует полагать $q(\Delta t|N) = q(\Delta t|5)$, $N \geq 5$.

5. Современные возможности автоматического получения данных наблюдения и их обработки для установления требуемых статистических зависимостей

Эмпирическая информация, на которой основываются данные и зависимости, требуемые согласно предлагаемому подходу, весьма элементарна и может быть получена в небольших объемах даже в ручном режиме, как описано в [16]. Но, разумеется, в современных условиях в течение ряда лет подобная информация регистрируется, обрабатывается, передается и накапливается с помощью технических и программных средств [17–20]. Собственно, ее основным элементом является фиксация моментов пересечения заданных рубежей передними и задними бамперами всех транспортных средств, движущихся по полосам рассматриваемых дорог. Ее получение в настоящее время может выполняться несколькими способами: 1) с помощью индуктивных датчиков, размещенных под дорожным полотном, 2) при помощи радаров и 3) путем обработки непрерывной видеозаписи транспортного потока. В последнем случае в каждом кадре выявляется фоновая часть и изображение движущегося автомобиля при его наличии, что позволяет определить текущее положение последнего. Такая информация также позволяет определить длину каждого зафиксированного ТС, а с ее помощью — и его скорость. Последняя определяется по времени, за которое автомобиль проезжает расстояние, равное длине своего корпуса. Следует заметить, что при видеозаписи за одну секунду порождается несколько десятков кадров (24 или 30), что обеспечивает точность установления времени и скорости, достаточную для достижения требуемых целей.

6. Вычислительные эксперименты и анализ их результатов

Представленные здесь результаты вычислительных экспериментов относились к проезду Т-образного перекрестка с трехфазным светофорным циклом. Схемы проезда на отдельных фазах представлены на рис. 1–3.

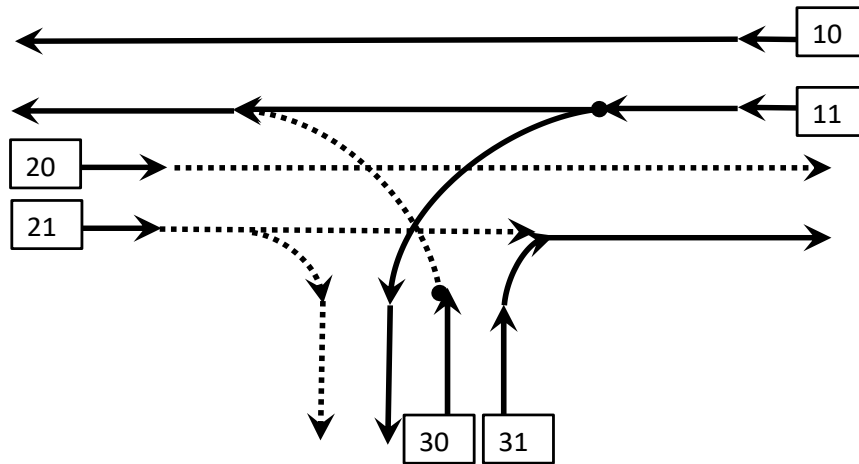


Рис. 1. Фаза 1

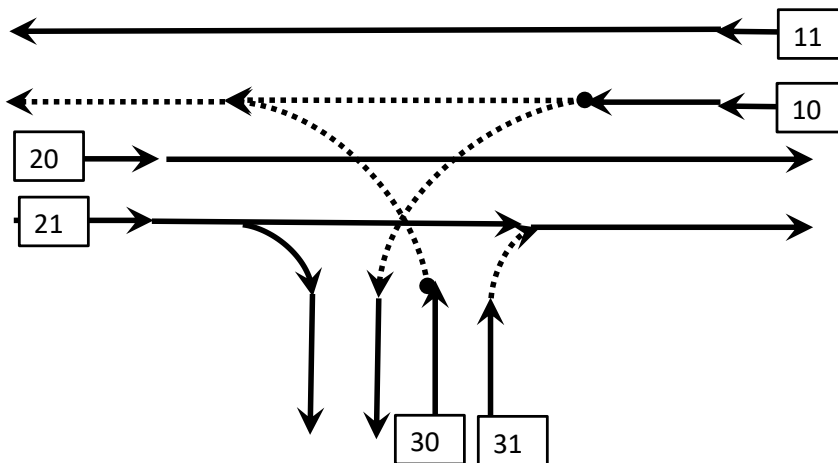


Рис. 2. Фаза 2

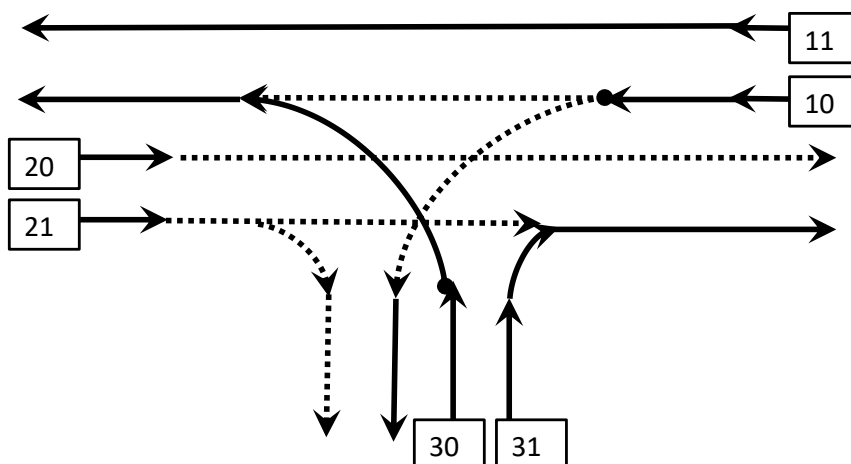


Рис. 3. Фаза 3

Были определены следующие условия для входного потока — светофоры на пешеходных переходах на дорогах, ведущих к перекрестку слева и справа, с продолжительностью светофорных циклов, равных половине продолжительности цикла на самом перекрестке, равной 60 с. Стохастический характер входящего потока приводит к колебаниям количества ТС, поступающих на

входы перекрестка. Данные о входящем потоке, сгруппированные по пять циклов на перекрестке, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Количество ТС, пришедших на входы перекрестка за группы светофорных циклов

Номера циклов	Входы														
	10										11	20	21	30	31
	Реализации														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	1	1	1	1
1–5	41	32	27	39	25	37	39	28	30	30	58	35	20	32	39
6–10	28	29	29	40	31	30	34	36	32	31	60	43	23	31	36
11–15	32	28	33	30	29	33	27	37	32	25	54	40	21	26	39
16–20	33	33	34	36	39	24	33	27	38	33	44	41	21	23	37
20–25	33	31	31	39	35	32	31	28	41	29	53	40	19	36	37
25–30	34	34	38	30	33	34	39	51	30	34	52	35	19	34	40

Рассматривались по два варианта размера начальных очередей (таблица 3) и продолжительности фаз (таблица 4).

Таблица 3. Начальные очереди (по вариантам)

Вход	Длина очереди, ТС	
	Вариант 1	Вариант 2
10	5	10
11	5	20
20	5	25
21	5	25
30	5	10
31	5	5

Таблица 4. Продолжительность фаз светофорного цикла (по вариантам)

Номер фазы	Длительность фазы, вариант 1	Длительность фазы, вариант 2
1	20.0	15.0
2	20.0	25.0
3	20.0	20.0

Для обоих вариантов продолжительности фаз моделировалось движение через перекресток при разных вариантах длин начальных очередей. Таблицы 5 и 6 показывают, что влияние начальных очередей на общие показатели движения и задержки в целом незначительны, хотя для маршрутов от входа 10 они наблюдаются. Напротив, влияние продолжительности фаз значительно в том случае, если входящий поток по некоторому направлению приближается к исчерпанию пропускной способности по нему при недостаточной доле зеленой фазы в светофорном цикле. Несмотря на то, что в данном случае рассматривалась ситуация, когда в целом пропускной способности перекрестка достаточно для пропуска входящего потока по всем направлениям, колебания задержек велики и в неблагоприятном случае доходили до 390 с, т.е. продолжительности 6,5 светофорных циклов.

В случае более напряженного движения при неадекватных продолжительностях фаз очереди на некоторых входах имеют тенденцию к росту, но и индивидуальные случайные отклонения и в благоприятную, и в неблагоприятную сторону весьма значительны. Нужно подчеркнуть, что моделирование проезда перекрестка осуществлялось с использованием статистических зависимостей, полученных из видеофиксации этого процесса, так что можно надеяться, что сделанные выводы в приемлемой степени отражают реальность.

Таблица 5. Показатели задержки при проезде перекрестка для первого варианта продолжительности фаз

Вход	Вариант очереди	Реализация	Длина очереди, ТС			Проехало ТС, ср.	Задержка, с		
			сред.	макс.	мин.		сред.	макс.	мин.
10	1	1-10	6,09	19	1	6,45	33,74	129	4,3
10	1	1	5.57	11	2	6.67	30.35	84.26	10.96
10	1	2	5.30	10	2	6.23	29.22	80.06	5.72
10	1	3	5.43	10	2	6.20	29.68	74.90	11.25
10	1	4	9.07	15	2	7.10	57.03	114.1	15.74
10	1	5	5.87	11	1	6.37	31.05	65.26	8.60
10	1	6	5.07	10	2	6.23	26.87	67.03	4.30
10	1	7	6.33	11	3	6.63	33.59	60.60	12.75
10	1	8	6.80	19	2	6.27	39.24	129.0	8.60
10	1	9	6.67	15	2	6.73	36.18	109.2	7.75
10	1	10	4.33	7	2	6.03	20.53	42.47	9.23
10	2	1-10	2,45	11	0	3,36	11,70	133,2	0
10	2	1	2,42	10	0	3,42	12,14	81,60	0,00
10	2	10	2,25	10	0	3,10	11,91	133,2	0,00
11	1	1-10	0,10	5	0	3,41	0,54	21,5	0
11	2	1-10	0,19	20	0	1,78	1,09	139,1	0
20	2	1-10	2,61	23	0	4,21	11,92	157	0
20	2	1	2,70	21	0	4,18	12,04	140,7	0,00
21	1	1-10	2,25	5	1	4,39	14,96	61,37	5
21	2	1-10	1,34	18	0	2,32	9,55	144,9	0
21	2	1	1,15	12	0	2,22	8,23	110,3	0,00
30	1	1-10	4,29	14	1	5,99	24,00	85,25	1,2
30	1	1	5,50	11	1	6,03	33,91	79,60	6,15
30	2	1-10	1,85	10	0	3,10	9,78	119,1	0
30	2	1	1,97	10	0	3,12	9,59	80,70	0,00
30	2	2	1,85	10	0	3,15	9,32	58,87	0,00
31	1	1-10	1,68	8	0	3,87	6,81	48,08	0
31	1	1	1,85	5	0	3,87	7,64	48,08	0,00
31	2	1-10	0,64	6	0	1,94	2,78	40,8	0

Таблица 6. Средние показатели задержки при проезде перекрестка для второго варианта продолжительности фаз

Вход	Вариант очереди	Длина очереди			Проехало ТС, ср.	Задержка		
		ср.	макс.	мин.		ср.	макс.	мин.
10	1	21.14	40.80	4.20	5.33	202.0	390.3	25.45
10	2	3.00	10.40	0.00	3.35	17.33	104.5	0.00
11	1	0.08	5.00	0.00	3.41	0.47	18.96	0.00
11	2	0.22	19.40	0.00	1.78	1.27	112.2	0.00
20	1	4.12	6.70	1.50	7.90	11.41	21.17	4.84
20	2	2.45	20.20	0.00	4.21	8.13	127.9	0.00
21	1	2.20	5.00	1.00	4.39	10.84	31.50	4.89
21	2	1.29	12.50	0.00	2.32	7.17	107.8	0.00
30	1	4.10	8.40	1.40	6.01	22.03	49.01	5.90
30	2	1.86	10.00	0.00	3.10	9.95	85.38	0.00
31	1	2.26	6.60	0.00	3.87	10.58	43.09	0.00
31	2	0.79	6.00	0.00	1.94	3.77	38.79	0.00

7. Заключение

Предложено статистическое представление неопределенности движения транспортных потоков на перекрестках для решения задач прогнозирования развития текущей дорожной обстановки в области регулируемого перекрестков дорожной сети, а в перспективе — и на фрагменте ГДС с несколькими перекрестками. Такой прогноз может служить средством выбора управления дорожным движением на локальном уровне.

Предложены способы установления вероятностных зависимостей на основе обработки данных наблюдения за трафиком и их использования в качестве элемента методов имитационного моделирования динамики дорожного движения. Важно, что при этом главную роль играют вероятностные зависимости между движениями последовательных ТС — лидера и преследователя. Ввиду их элементарности можно ожидать, что они обладают высокой степенью универсальности, различаясь в основном в зависимости от формы и кривизны дорожной полосы. Возможности получения требуемой для этого актуальной информации путем мониторинга транспортных потоков быстро возрастают,

Выдвинутый подход проиллюстрирован проведением вычислительных экспериментов и их обработки для сравнительно простых случаев отсутствия явного взаимодействия между кластерами, проходящими по взаимосвязанным маршрутам. Распространение его на более сложные случаи является задачей последующих исследований.

Литература

1. *Treiber M., Kesting A.* Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. – xiii+504 p.
2. *Живоглядов В.Г.* Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростов н/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. – 1082 с.
3. *Babicheva T.S.* The use of queuing theory at research and optimization of traffic on the signal-controlled road intersections // *Procedia Computer Science.* – 2015. – Vol. 55. – P. 469–478.
4. *Афанасьева Л.Г., Булинская Е.В.* Математические модели транспортных систем, основанные на теории очередей // *Труды МФТИ.* – 2010. – Т. 2. № 4 (8). – С. 6–21.
5. АвтоАтлас Москвы с дорожными знаками средний. Вып. 13. – М.: ООО «АГТ Геоцентр», 2013. – 104 с.
6. *Danilevičius A., Bogdevičius M.* Investigation of traffic light switching period affect for traffic flow dynamic processes using discrete model of traffic flow // *Procedia Engineering.* – 2017. – Vol. 187. – P. 198–205.
7. *Derai S., Ghoul R.H.* Control isolated intersections with hybrid petri nets and hybrid automaton // *EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica.* – 2017. – Vol. 65, No. 3. – P. 112–116.
8. *Kerner B.S., Klenov S.L., Wolf D.E.* Cellular automata approach to three-phase traffic theory // *Journal of Physics A: Mathematical and General.* – 2002. – Vol. 35, № 47. – P. 9971–10013.
9. *Калинин И.Н., Глухарев К.К.* Исследование интегральных характеристик перекрестков при помощи микроскопических моделей транспортных потоков // *Компьютерные исследования и моделирование.* – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 523–534.
10. *Ерёмин В.М.* Концептуальная модель функционирования системы ВАДС как основа компьютерной имитации // *САПР и ГИС автомобильных дорог.* – 2014. – № 1 (2). – С. 90–93.
11. *Валуев А.М.* Моделирование транспортных процессов в формализме гибридных систем // XII Всероссийское Сопещение по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16–19 июня 2014 г.: Труды [Электронный ресурс]. – С. 5033–5043.
12. *Валуев А.М., Соловьев А.А.* Моделирование зависимостей, характеризующих динамику автотранспортных потоков // *Информатизация и связь.* 2018. – № 2. – С. 106–113.
13. *Валуев А.М.* Вероятностное моделирование прохождения транспортных потоков через регулируемый перекресток с разветвляющимися трассами // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): труды Четырнадцатой международной конференции, 27–29 сентября 2021 г., Москва / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна; – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 388–396.*
14. Биомеханика систем «человек–машина–среда»: Отчет о НИР за 2021 г. по теме 7-13 (FFGU-2021-0006) промежуточный. Книга 2 / *Соловьев В.О., Соловьев А.А., Валуев А.М., Кельнер М.С., Ковалев Н.С., Коровкин Ю.В., Минаев А.Я., Саяпин С.Н., Сергеев А.М., Статников И.Н.* – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благодравова РАН, 2021. – 106 с. Номер государственной регистрации: 222022100406-9.
15. *Кленов С.Л.* Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке — новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий // *Труды МФТИ.* – 2010. – Т. 2, № 4(8). – С. 75–89.
16. *MnDOT Traffic Signal Timing and Coordination Manual.* – Minnesota Department of Transportation, 2017. – Pp. 2–11.
17. *Makovetskaya-Abramova O., Lazarev Y., Gravit M., Silla S., Shakhova M.* Multiplicative method for creating the traffic monitoring base in a megapolis // *E3S Web of Conferences.* – 2020. – Vol. 164. – Art. No. 03023.

18. *Чебыкин И.А., Семенов С.С.* Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2020. – № 4. – С. 52–60.
19. *Kazmi S.Q., Singh M.K., Pal S.* Traffic Monitoring System in Smart Cities Using Image Processing // Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability, Springer, Singapore, 2021. – P. 397–405.
20. Технология индуктивного петлевого детектора транспорта. – М.: Спецдорпроект, 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spetsdor.ru/cases/tekhnologiya-induktivnogo-petlevogo-detektora-transporta/> (дата обращения: 8.09.2023).