

УДК 004.02

Классификация моделей формализации транспортного потока в условиях города

Борисова Н.Е., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»*

Научный руководитель: Рудаков И. В., к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
irudakov@bmstu.ru*

В настоящее время в связи с ростом количества транспортных средств в городах необходимо принять ряд мер по оптимизации дорожного движения. Одной из таких мер является создание оптимальной схемы организации движения, учитывающей характерные особенности улично-дорожной сети и поведения ее пользователей. Именно создание схем для улучшения движения является одной из основных целей моделирования транспортных потоков.

Традиционно выделяют два типа математических моделей транспортного потока: прогнозные и имитационные [1].

Если известны характеристики транспортной сети, ее геометрия и потокообразующие объекты, то можно с достаточно высокой точностью определить, какими будут транспортные потоки и загруженность данной сети. В частности, можно определить ряд усредненных характеристик движения: объемы межрайонных перемещений, интенсивность потока, количество автомобилей и пассажиров на различных участках пути и тому подобное. Эту задачу решают прогнозные модели.

В отличие от прогнозных моделей, имитационные ставят своей целью более детальное рассмотрение транспортного потока, включая его изменение во времени. При этом входными данными являются усредненные характеристики, такие, как средняя скорость, средний объем передвижений, распределение по путям и другие.

Транспортные потоки складываются в общем случае из отдельных передвижений различными видами транспорта и пеших передвижений. Для построения математической модели необходимо формальное определение следующих факторов:

1) потокообразующие факторы (места проживания, работы, культурно-бытового обслуживания и др.)

2) характеристики транспортной сети (количество и качество дорог и улиц, маршруты общественного транспорта и др.)

3) поведенческие факторы (мобильность населения, предпочтения при выборе маршрутов и способов передвижения и др.)

Основа такого описания – это транспортный граф, узлами которого являются перекрестки и станции внеуличного транспорта, а дугами – сегменты улиц и линии внеуличного транспорта. Отдельной составляющей является граф общественного транспорта, строящийся аналогично предыдущему. Узлы графа общественного транспорта (остановочные пункты) связаны с узлами основного транспортного графа специальными дугами-посадками и дугами-высадками.

Для описания потокообразующих объектов необходимо разделить город на некоторое количество районов прибытия и отправления (ПО). Каждый такой район включается в граф как некий узел, соединенный с остальными узлами специальными дугами-связями. Общий объем передвижения между районами ПО называется межрайонной корреспонденцией. Основой для математического моделирования поведенческих факторов пользователей улично-дорожной сети (УДС) являются критерии, на основе которых пользователь оценивает альтернативные маршруты и способы передвижения. Эти критерии принято называть обобщенной ценой пути. Обобщенная цена пути вычисляется как взвешенная сумма слагаемых, выражающих влияние различных факторов на оценку пути, например: время передвижения, денежные затраты, дополнительные задержки на некоторых элементах транспортной сети. Путь между двумя точками сети, имеющий наименьшую обобщенную цену среди всех возможных, часто называют кратчайшим путем.

В задаче моделирования транспортных потоков в сети крупного города традиционно выделяют четыре основных этапа [1]:

- 1) генерация передвижений (Trip generation) – оценка объемов прибытия и отправления в каждом районе;
- 2) модальное расщепление (Modal split) – расщепление по способам передвижений;
- 3) расчет матриц корреспонденций (Trip distribution);
- 4) расчет загрузки сети (Trip assignment) – распределение корреспонденций по транспортной сети.

1. Прогнозные модели.

1.1 Расчет матрицы межрайонных корреспонденций.

Одной из основных математических моделей для оценки межрайонных корреспонденций является гравитационная модель. Применительно к транспортной системе в качестве тел выступают пункты, порождающие или поглощающие потоки, за массу тела принимается суммарный объем въезжающего или выезжающего потока, физическое расстояние заменяют на любые другие затраты, связанные с передвижением.

Однако эта система обладает существенным недостатком. При увеличении объемов, например, в два раза, модель приведет к увеличению корреспонденции в четыре раза, что совершенно нелогично. Поэтому вместо классической гравитационной модели на практике используют ее модификацию: к основному условию добавляют дополнительные, например, балансовые ограничения на въезд и выезд. Кроме того, квадрат расстояния (затрат) заменяют на функцию тяготения, характеризующую предпочтения людей при выборе пары источник-сток для передвижения.

Одним из недостатков классической гравитационной модели является то, что объем корреспонденции связывается только с парой районов, взятых отдельно от других. Хотя другие районы, в свою очередь, могут оказывать значительное влияние на их характеристики. Эта идея реализована в моделях конкурирующих центров. Их обычно рассматривают как обобщения гравитационной модели, включающей в себя дополнительные факторы, такие, как, например, индекс посещения района.

Использование концепции энтропии в моделировании было предложено Вильносом. Задача энтропийной модели заключается в вероятностном описании поведения пользователей транспортной сети, которые случайным образом распределяются по некоторому набору возможных состояний. Такое распределение приводит к определенному макроскопическому состоянию системы. Состояние, которое реализуется в реальности, есть состояние с наибольшим статистическим весом (его также часто называют наиболее вероятным состоянием).

Еще одним важным классом моделей являются модели Стауффера и их модификации (модели промежуточных возможностей). Эти модели исходят из предположения, что объемы корреспонденций определяются количеством и емкостью альтернативных центров прибытия на пути, то есть количеством альтернативных возможностей посещения.

Основное отличие гравитационных моделей от моделей промежуточных возможностей состоит в том, что гравитационные рассматривают в основном транспортную доступность районов, считая их изолированными от остальных, в то время

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

как модели промежуточных возможностей основываются на взаимном расположении и влиянии районов друг на друга и не учитывают явно фактор их доступности.

1.2 Статические и динамические модели.

Модели загрузки транспортной сети могут быть также разбиты на два больших класса по следующим признакам: статические и динамические. Модель относят к классу статических, если для ее реализации необходимые параметры берутся за определенный промежуток времени и усредняются. Предполагается, что если некая доля X_i корреспонденций использует тот или иной маршрут движения, то она вносит вклад X_i в загрузку каждого элемента маршрута на протяжении всего времени моделирования.

Однако такое предположение справедливо, только если среднее время всех маршрутов не превышает времени τ , за которое изменения самой корреспонденции перестанут быть пренебрежимо малыми. В случае же, если динамика изменения корреспонденции достаточно высока, и сами маршруты достаточно длинные, следует учитывать, что все участники загружают избранные маршруты в разное время. Модели, работающие в режиме «реального времени», относят к классу динамических [1].

Одним из наиболее простых способов распределения корреспонденции по сети является наложение каждой из корреспонденций на единственный оптимальный маршрут, соединяющий два района. Однако этот способ является весьма чувствительным к различным характеристикам дуг транспортного графа. В связи с этим было предложено несколько методик распределения. Тем не менее, эти методики не учитывают двух важных факторов, влияющих на выбор оптимального маршрута:

- 1) Выбор, сделанный одними участниками движения, косвенно влияет на выбор других участников.
- 2) Конкретное продолжение пути пользователем общественного транспорта зависит от посадки на тот или иной маршрут в процессе движения.

1.3 Модели равновесного распределения потоков.

Модели равновесного распределения потоков являются наиболее эффективными моделями, учитывающими взаимное влияние пользователей сети друг на друга. Эти прогнозные модели, в свою очередь, подразделяются еще на несколько видов.

1.3.1 Статические.

В статической модели равновесного распределения предполагается, что все пользователи выбирают маршрут с наименьшей обобщенной ценой пути [1]. В результате этих выборов складывается интенсивность движения на всех элементах сети. В свою очередь, интенсивность влияет на индивидуальный выбор оптимального пути каждым из

участников. Предполагается, что в результате устанавливается равновесное распределение потока, обладающее следующим свойством: при равновесном распределении ни один участник не может изменить свой маршрут так, чтобы уменьшить цену своего индивидуального пути.

Данная модель работает по следующему алгоритму: сначала формируется начальное распределение u^0 : все корреспонденции распределяются по кратчайшим путям в незагруженной сети. Далее в итеративном режиме выполняются такие шаги:

- 1) цены всех элементов пересчитываются в зависимости от полученного на данной итерации распределения u^k .
- 2) В соответствии с полученными ценами рассчитываются кратчайшие расстояния между центрами въезда-выезда.
- 3) Рассчитываются потоки u_l^k , которые получаются в результате наложения корреспонденций на кратчайшие пути.
- 4) Рассчитывается новое распределение потоков.

Критерием остановки работы алгоритма является достаточное приближение очередного рассчитанного распределения к равновесному.

1.3.2 Модели многопользовательского равновесия.

Данное расширение модели равновесного распределения позволяет рассчитать распределение потоков для системы с несколькими классами пользователей. Пользователей относят к разным классам, если обобщенная цена одних и тех же элементов сети для них различна. Предполагается, что для каждого класса уже вычислена своя матрица корреспонденций. При этом распределение пользователей одного класса является зависимым от распределения пользователей другого класса.

1.3.3 Переменный спрос на поток.

Модели равновесного распределения с переменным спросом на поток позволяют в рамках единого алгоритма вычислить как само распределение, так и корреспонденции.

На практике эта модель не является эффективной. Она работает только с одним вариантом загрузки сети, и поэтому объемы корреспонденции представляются однородными величинами. В реальности же загрузка не является константой, она меняется в зависимости от ряда параметров (например, времени суток или времени года), что, в свою очередь, влияет на формирование корреспонденций, которые также весьма неоднородны по составу.

1.3.4 Стохастические.

Рассмотренные ранее модели имеют в своей основе предположение, что пользователи имеют точное представление обо всей сети и принимают точные решения о

выборе своих маршрутов. Однако на самом деле в поведении пользователей всегда присутствует элемент случайности. Для учета таких случайностей была предложена модель стохастического равновесного распределения [2]. Основная ее идея состоит в том, что для каждого пользователя различают фактическую и предполагаемую и цены пути. Условие стохастического равновесия формулируется следующим образом: ни один из участников движения не предполагает, что может уменьшить свою индивидуальную цену поездки при изменении маршрута.

1.3.5 Динамические.

В последние годы большое развитие получили динамические модели равновесного распределения [2]. Дополнительным параметром для таких моделей выступает время, что достаточно сильно усложняет решение задачи. Чтобы отслеживать время передвижения по той или иной дуге графа, необходимо детальное уточнение характеристик движения «внутри» дуги, то есть необходимо применение некоторых имитационных моделей. С учетом итеративности алгоритмов, использующихся в них, применение даже сравнительно несложных моделей приводит к тому, что вычислительные ресурсы чрезвычайно возрастают.

1.4 Модель оптимальных стратегий.

Модель, рассчитывающую загрузку транспортной сети, основываясь на стратегиях поведения пользователей общественного транспорта, называют моделью оптимальных стратегий. Если пользователь УДС может достаточно точно рассчитать оптимальный для себя путь, то пользователь общественного транспорта во многом зависит от случайных обстоятельств. Он может лишь предполагать стратегию своего поведения и приблизительный маршрут, который может быть скорректирован в ходе движения.

Стандартная модель оптимальных стратегий исходит из двух условий:

- 1) На этапе выбора стратегии фиксируется некоторый набор возможных продолжений пути для каждого узла, в котором может оказаться пассажир в процессе движения.
- 2) Оказываясь в очередном узле, пользователь выберет то продолжение, которое первое предоставит ему возможность обслуживания.

Естественно, все пути реализуются с разными вероятностями, так как прибытие и отправление транспорта, в общем случае, рассматривается, как случайное. Таким образом, модель оптимальных стратегий является стохастической.

2. Имитационные модели.

Имитационные модели ставят своей задачей математическое описание поведения пользователей транспортной сети и оценку тех или иных характеристик и параметров движения [2]. Большинство этих моделей может быть разделено на три больших класса:

- 1) Макроскопические
- 2) Кинетические
- 3) Микроскопические

2.1 Макроскопические.

Модели, относящиеся к макроскопическим, описывают транспортный поток как «единое целое», в терминах усредненных характеристик (плотность потока, средняя скорость и др.). Поток машин в данном случае уподобляется потоку жидкости, поэтому макроскопические модели также называют гидродинамическими.

2.1.1 LWR-модель.

Первой моделью, использующей такую гидродинамическую аналогию, была модель Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR-модель). В ней предполагается, что:

- 1) Существует взаимно-однозначная связь между скоростью и плотностью потока: предполагается, что средняя скорость является убывающей функцией плотности.
- 2) Выполняется закон сохранения массы (количества автомобилей на дороге) .

Хотя первоначальная LWR-модель представляется достаточно упрощенной, именно простота реализации дает возможность использовать эту модель в качестве вспомогательного инструмента при моделировании загрузки больших транспортных сетей. Тем не менее, у этой модели есть весьма существенный недостаток: первое условие предполагает, что средняя скорость движения в любой момент времени соответствует равновесному значению при данной плотности потока. В связи с этим, модель некорректно отображает ситуацию в неравновесных состояниях.

Моделью Танака называют такую LWR-модель, в которой зависимость $V(\rho)$ определяется из условия:

$$\rho(V) = \frac{1}{L + c_1 V + c_2 V^2} \quad (20).$$

Знаменатель в этом случае выражает среднее (безопасное) расстояние между автомобилями при заданной скорости движения V , где

L – средняя длина транспортного средства;

c_1 – время, характеризующее реакцию водителей;

c_2 – коэффициент пропорциональности тормозному пути.

2.1.2 Модель Уизема.

Позднее Уиземом был предложен учет «дальнозоркости» водителей. Модель (получившая, соответственно, название модели Уизема) использовала в качестве дополнительного условия предположение, что водители снижают скорость при возрастании плотности потока и увеличивают ее, когда плотность снижается.

2.1.3 Модель Пэйна.

Следующим важным шагом стала модель Пэйна. Ее можно понимать как своеобразный закон сохранения, в котором уже не предполагается, что скорость зависит от плотности, и для нее записывается уравнение.

Рассмотренные макроскопические модели не лишены ряда качественных недостатков. Например, в определенных случаях они могут предсказывать плотность, превосходящую максимально допустимую, или даже отрицательные значения скоростей.

2.2 Кинетические.

В отличие от гидродинамических моделей, кинетические основаны на описании динамики фазовой плотности потока, то есть плотность распределения автомобилей рассчитывается как по координате, так и по индивидуальной скорости. Зная, как фазовая плотность меняется со временем, можно рассчитать макроскопические характеристики движения, например среднюю скорость и плотность потока.

В кинетических моделях рассматриваются изменения скоростей автомобилей за счет процессов взаимодействия и релаксации. Под взаимодействием в данном случае понимается следующее: если более быстрый автомобиль догоняет более медленный впереди идущий, то он должен либо сбросить скорость, либо совершить обгон. Взаимодействие рассматривается «в точке», то есть размерами автомобилей и расстоянием между ними пренебрегают.

Эмпирические данные показывают, что в свободно движущемся потоке устанавливается естественное распределение автомобилей по «желаемым» скоростям. «Желаемой» является та скорость, с которой бы автомобиль двигался в отсутствие помех и взаимодействий. Естественное стремление всех водителей двигаться с «желаемой» скоростью приводит к коллективному эффекту релаксации фактического распределения скоростей к «желаемому» распределению [2].

Одним из наиболее серьезных недостатков данной модели является гипотеза об «автомобильном хаосе». Согласно ей, в моменты между взаимодействиями автомобилей отсутствует связь между их скоростями. Очевидно, что в действительности это неверно: если обгон невозможен, автомобиль вынужден сбавить скорость до скорости впереди идущего автомобиля и следовать за ним. В такой ситуации скорость следующего автомобиля является зависимой.

Другим аспектом является принцип коллективной релаксации: он неадекватно описывает поведение транспортного потока, если он является неоднородным.

Кроме того, в реальной жизни размеры автомобилей и расстояние взаимодействия не являются пренебрежимо малыми и вносят существенный вклад в ситуацию на дорогах.

2.3 Микроскопические.

Микроскопические модели явно описывают движение каждого автомобиля в потоке. Такой подход позволяет достичь гораздо более точных результатов в моделировании по сравнению с макроскопическим подходом усреднения [3]. Тем не менее, микроскопическое моделирование на практике требует очень больших вычислительных ресурсов.

2.3.1 Модель следования за лидером.

Все автомобили потока нумеруются от 1 до n в соответствии с их порядком на дороге. Модель исходит из предположения, что ускорение n -го автомобиля зависит от его положения на дороге, то есть от соседних автомобилей – их скорости, ускорения, размеров и др. При этом основное влияние оказывает непосредственно идущий перед ним автомобиль $n-1$. Такой автомобиль называют лидирующим, а соответствующий класс моделей - моделями следования за лидером [3]. Одним из первых возникло предположение, что каждый водитель адаптирует свою скорость к скорости лидирующего автомобиля. Однако данная простая модель не учитывает такие свойства потока, как, например, возникновение волн заторов или неустойчивость.

В одной из модификаций было предложено ввести в задержку аргумента, которая бы характеризовала скорость реакции водителей на изменение скорости лидирующего автомобиля.

Одним из явных недостатков модели следования за лидером является то, что она неправильно описывает поведение единственного автомобиля на дороге. Согласно данной модели, в отсутствие лидера ускорение автомобиля будет равно нулю, что, конечно, может быть верным в частных случаях, хотя довольно естественно предположить, что водитель постарается увеличить (или уменьшить) свою скорость до желаемой.

2.3.2 Модель оптимальной скорости.

Модели оптимальной скорости исходят из предположения, что для каждого автомобиля существует своя «безопасная» скорость движения, которая, тем не менее, тоже зависит от скорости лидера [3]. Однако адаптация уже происходит не к скорости лидера, а к оптимальной скорости. Влияние лидера косвенно выражено через зависимость оптимальной скорости от дистанции до лидера .

Классическая модель оптимальной скорости также не лишена недостатков. Например, она является крайне чувствительной к конкретному выбору функциональной зависимости оптимальной скорости от дистанции, а так же к выбору времени адаптации: при больших значениях в модели начинают происходить столкновения автомобилей, а при слишком малых возникают нереалистично большие ускорения.

2.3.3 Модель «разумного водителя».

Для того чтобы учесть описанные выше и некоторые другие недостатки, была предложена модель «разумного водителя» (Intelligent Driver Model – IDM) [3]. Различные эксперименты показали, что данная модель устойчива к вариациям параметров и отображает достаточно реалистичную картину поведения водителей и свойств транспортного потока.

В IDM предполагается, что ускорение является непрерывной функцией «чистой» дистанции до лидера и скорости относительно лидера. Параметры модели могут быть выбраны индивидуально для каждого пользователя, что позволяет учитывать специфические характеристики водителей и транспортных средств.

2.3.4 Клеточные автоматы.

Одной из наиболее эффективных микромоделей является модель клеточных автоматов (КА) [3]. В таких моделях время, скорость и координата автомобиля представляются дискретными переменными. Дорога при этом разбивается на отдельные «ячейки», каждая из которых в любой момент времени либо свободна, либо занята одним транспортным средством. На каждом шаге состояние всех ячеек одновременно обновляется в соответствии со следующими правилами:

- 1) Ускорение. Если $v_n < v_{\max}$, то скорость n -го автомобиля увеличивается на единицу, если $v_n = v_{\max}$, то скорость не меняется. (Отображение общей тенденции водителей двигаться с максимально допустимой скоростью).
- 2) Торможение. Если дистанция до лидирующего автомобиля $d_n < v_n$, то скорость n -го автомобиля уменьшается до $d_n - 1$. (Гарантия отсутствия столкновений с впереди идущим автомобилем).
- 3) Случайные возмущения. Если $v_n > 0$, то скорость n -го автомобиля может быть уменьшена на единицу с вероятностью p . Скорость не изменяется, если $v_n = 0$. (Учет случайных различий в поведении водителей).
- 4) Движение. Каждый автомобиль продвигается вперед на количество ячеек, соответствующее его новой скорости после выполнения первых трех шагов.

Вышеизложенная модель является «минимальной», то есть описывает только самые основные и важные аспекты процесса движения. Для моделирования же более сложных ситуаций на дороге необходимо сформулировать дополнительные правила.

Модель КА является весьма неустойчивой при высоких плотностях потока, главным образом в развитии неустойчивости играет роль стохастичность процесса. Этот факт является серьезным недостатком модели по сравнению с макромоделями или же моделями типа «следования за лидером».

Вывод.

Существует ряд теоретических трудностей, не позволяющих создать единую модель, совмещающую в себе прогнозное и имитационное моделирование. Это связано с тем, что в основе этих моделей лежат разные начальные условия: имитационные работают с усредненными характеристиками потока и рассматривают каждый автомобиль в отдельности, в то время как прогнозные берут за основу характеристики сети и ее геометрию. Таким образом, невозможно определенно сказать, какой тип моделей (и тем более, какая конкретно модель) является наиболее оптимальным вариантом для решения задач. Из приведенной классификации видно, что если необходимо рассчитать корреспонденцию или спрогнозировать поток на данном участке дороги, используют модели из класса прогнозных, в основном, реализующие алгоритмы равновесного распределения. Для анализа же параметров движения, задержек и пропускных способностей УДС используют имитационные модели. Таким образом, данная классификация позволяет в зависимости от конкретной цели выбрать модель, которая бы удовлетворяла наибольшему количеству установленных требований.

Список литературы

1. Kerner B. S. Introduction to modern traffic flow theory and control. The long road to three – phase traffic theory. Springer, 2009.
2. Traffic flow theory: A state-of-the-art report. editors N. H. Garther, C.J. Messer, A. K. Rathi. Washington DC: transportation Research Board, 2001.
3. Treiber M., Hennecke A., Helbing d. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations // Phys. Rev. E. 2000. V. 62. P. 1805-1824.