

Модель формирования межрайонных корреспонденций в транспортных системах крупных городов

В.П. ФЕДОРОВ, канд. физ.-мат. наук, Экономико-математический институт РАН, зав. лабораторией,

Н.В. БУЛЫЧЕВА, Экономико-математический институт РАН, с.н.с.,

О.М. ПАХОМОВА, Центр градостроительного моделирования «Перспектива», главный специалист,

Л.А. ЛОСИН, ЗАО «Петербургский НИПИГрад», главный инженер

Для планирования и управления городской транспортной системой необходима информация о корреспонденциях и потоках на транспортной сети. Эта информация, как правило, рассчитывается с помощью методов, в основе которых лежат гипотезы о закономерностях формирования корреспонденций и потоков, базирующиеся на моделях массового поведения.

Это формирование носит достаточно стихийный характер, на него можно влиять, изменяя параметры и структуру транспортной системы, но нельзя непосредственно управлять им. Отсюда следует, что модели городских транспортных систем должны включать в себя модели массового принятия решений. Складывающиеся в транспортной сети потоки отображают массовое поведение участников движения, принимающих решение о выборе маршрута и средств передвижения. Индивидуальный выбор решения присущ и таким процессам, как смена места работы, обмен жилой площади и др., которые во многом формируют структуру корреспонденций.

Традиционным «инструментом» для моделирования межрайонных корреспонденций является «энтропийный» подход, согласно которому структура случайного размещения, возникающего в процессе массового поведения, является решением задачи максимизации энтропии размещения при наличии сдерживающих ограничений. Как показано в [1-3], полученное в результате размещение можно интерпретировать как наиболее вероятное среди всех размещений, приемлемых с точки зрения сдерживающих ограничений и предпочтений (попытка более детальной интерпретации этого утверждения сделана в приложении). Это особенно

удобно в тех случаях, когда имеется достаточно «жесткая» система ограничений, при которой допустимые размещения достаточно близки к реальным, но не удастся выбрать «ведущий» критерий.

Наиболее традиционным является моделирование работы городской транспортной системы при трудовых передвижениях. Территория города разбивается на систему N транспортных районов, для каждого из которых определяются численность самодеятельного населения a_i (то есть тех, кто пользуется общественным или личным транспортом для совершения трудовых поездок) и количество мест приложения труда b_j . Затем формируется множество $\{x_{ij}\}$ межрайонных пассажирских корреспонденций, определяющих объемы и структуру нагрузки на транспортную сеть. На следующем этапе строятся потоки, реализующие полученные корреспонденции на транспортной сети. При моделировании корреспонденций предполагается, что каждый житель города, проживающий в некотором районе i , выбирая для себя место работы, предпочитает район j с вероятностью p_{ij} , величина которой зависит от затрат времени t_{ij} на передвижение из района i в район j и монотонно убывает с ростом этих затрат. Кроме того, возможность реализации такого предположения дополнительно стеснена ограничениями на число мест приложения труда b_j в каждом районе. Хотя традиционным

показателем затрат при межрайонных корреспонденциях являются затраты времени на передвижение, в настоящее время не менее существенную роль играют и денежные затраты. Схема моделирования корреспонденций, основанная на «энтропийном» подходе, позволяет учитывать в модели влияние подобных затрат аналогично учету затрат времени.

Бурный рост уровня автомобилизации, наблюдаемый в последние годы, привел к тому, что существенная часть корреспонденций в настоящее время реализуется на индивидуальном легковом транспорте. Таким образом, для каждой пары районов можно говорить о двух величинах затрат времени на корреспонденцию t_{ij}^1 при передвижении на общественном транспорте и t_{ij}^2 при использовании легкового индивидуального транспорта. В этом случае житель города выбирает не только район прибытия, но и вид передвижения, на индивидуальном или на общественном транспорте [4]. Такой подход к моделированию корреспонденций приводит к решению задачи выпуклого программирования следующего вида:

максимизировать

$$\sum_{i,j,k} x_{ij}^k \ln(p_{ij}^k / x_{ij}^k) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_j x_{ij}^k = a_i^k, \quad i = 1, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, L$$

$$\sum_{i,k} x_{ij}^k = b_j, \quad j = 1, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (2)$$

$$x_{ij}^k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, L.$$

Решением задачи являются матрицы межрайонных корреспонденций $\{x_{ij}^k\}$.

* Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-06-0146-а).

Для определения величин p_{ij}^k используется монотонно убывающая функция $p(t)$, в качестве которой обычно принимают функцию вида $\exp(-\gamma * t)$, где в качестве аргумента выступают затраты времени на межрайонные передвижения t_{ij}^k , а параметр γ определяет, насколько быстро падает привлекательность рабочих мест с увеличением затрат времени на их достижение.

В результате решения задачи (1)–(2) множество корреспонденций «расслаивается» на L отдельных матриц корреспонденций (в нашем случае $L=2$), каждая для своего вида передвижения. Поскольку выбор индивидуального вида транспорта предполагает наличие автомобиля, общий объем таких передвижений ограничен и зависит от уровня автомобилизации. Именно поэтому ограничения на объемы отправок разделены по видам передвижения k . Возможна более простая постановка задачи, в которой объемы отправок в районах не разделены по видам передвижения, а ограничения на объемы передвижений различного вида вводятся по городу в целом. В этом случае ограничения будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum_{jk} x_{ij}^k &= A_i, \quad i = 1, \dots, N, \\ \sum_{ik} x_{ij}^k &= b_j, \quad j = 1, \dots, N, \\ \sum_{ij} x_{ij}^k &= A_k, \quad k = 1, 2, \dots, L, \\ x_{ij}^k &\geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, L. \end{aligned} \quad (3)$$

В частности, для определения величин A^k можно использовать коэффициент автомобилизации или другие статистические данные об использовании автомобильного транспорта при трудовых передвижениях.

В предложенной выше постановке задачи предполагается, что система мест приложения труда является однородной. Это означает, что все рабочие места однотипны и взаимозаменяемы. Такое допущение может привести к искажениям в структуре корреспонденций, которые выражаются в снижении дальности корреспонденций и завышении на предприятиях доли «местных» (т.е. проживающих недалеко от места работы) трудящихся. В частности, таким искажениям подвержены корреспонденции, связанные с крупными предприятиями и пригородными зонами. Для разных отраслей характерны не только особенности территориального размещения мест приложения труда и времени осуществления корреспонденций, но и различия в уровнях автомобилизации, в отношении к

затратам на передвижения у жителей, занятых в этих отраслях.

На самом деле для каждого жителя города взаимозаменяемыми являются рабочие места только той отрасли m , в которой он занят, следовательно, возможность его выбора ограничена не общим количеством рабочих мест в районе b_j , а только количеством рабочих мест района в соответствующей отрасли b_j^m . Соответственно, и в районе отправления i этот выбор осуществляют только a_i^m жителей, которые заняты в отрасли m . В результате сформулированная выше задача распадается на R отдельных подзадач такого же вида (R — число отраслей), где все переменные снабжены дополнительным индексом отрасли m . При этом множество всех корреспонденций «расслаивается» на $R * L$ отдельных матриц корреспонденций, каждая для своей отрасли и вида передвижения [5].

При этом появляется возможность более точного моделирования потоков. Дело в том, что при расчете потоков производится переход от суточных объемов корреспонденций к расчетному (обычно часовому) периоду. Поскольку время начала рабочего дня в различных отраслях существенно отличается, вклад различных отраслей в потокораспределение расчетного часа оказывается разным, что можно учесть, выбирая для каждой отрасли свой коэффициент перехода от суток к расчетному часу. При этом нужно отметить, что такое «расслоение» не требует новых модельных средств, и возможность его применения определяется наличием соответствующей информации по отраслям занятости.

Таким образом, для учета отраслевой структуры рабочих мест для каждого транспортного района должен быть задан набор значений численности рабочих мест по отраслям. Основным источником такого рода информации является статистика отраслевой занятости населения, которая дает представление об отраслевой структуре рабочих мест на уровне города в целом, возможно даже на уровне административных районов, но, к сожалению, не на уровне транспортных районов, по которым осуществляется сбор исходной информации для моделирования.

Неуклонный рост объемов корреспонденций, совершаемых на индивидуальном легковом транспорте, сопровождается обострением проблемы парковки автомобилей, особенно в центральных зонах крупных городов. Для этих зон характерна плотная застройка и недоста-

ток свободного пространства для парковки. В то же время, места приложения труда в этих зонах относятся к отраслям занятости с высоким уровнем автомобилизации. Значительная часть таких мест принадлежит к системам обслуживания, генерирующим «притяжение» к ним с деловыми и культурно-бытовыми целями, которое также часто осуществляется на индивидуальном транспорте. Кроме того, не нужно забывать о том, что и у жителей этих территорий также имеются автомобили.

Из сказанного выше следует вывод о необходимости учета при моделировании корреспонденций ограниченных возможностей районов по размещению прибывающих автомобилей. Самым простым способом такого учета является добавление в расчетную модель неравенств, ограничивающих суммарный объем автомобильных прибытий в район некоторым максимальным для данного района значением. Недостаток такого способа состоит в том, что влияние ограничения на результат расчета включается только при достижении указанного максимума. В реальности это влияние начинается гораздо раньше и сначала проявляется в виде случайно возникающих осложнений при парковке, затем с ростом объема прибытий эти осложнения возникают все чаще и, наконец, становятся систематическими. Более естественным в этой ситуации представляется способ учета указанного обстоятельства, основанный на включении в состав затрат времени на межрайонные автомобильные передвижения дополнительных затрат, связанных с парковкой автомобиля. В соответствии с вышесказанным, величина этих затрат должна зависеть от соотношения объема автомобильных прибытий в район и его возможностей «принять» такой объем и увеличиваться по мере нарастания объема прибытий.

Как было сказано выше, «расслоение» множества корреспонденций на пассажирские и автомобильные происходит в результате выбора жителями города соответствующего типа передвижения. В основе этого выбора лежит сопоставление затрат при совершении поездок на общественном и на индивидуальном транспорте. С возрастанием для какого-либо района прибытия дополнительных затрат, связанных с использованием автомобильного транспорта, его преимущество перед массовым транспортом снижается и, как следствие, снижается количество жителей, выбирающих для прибытия в данный район этот вид транспорта. Но именно

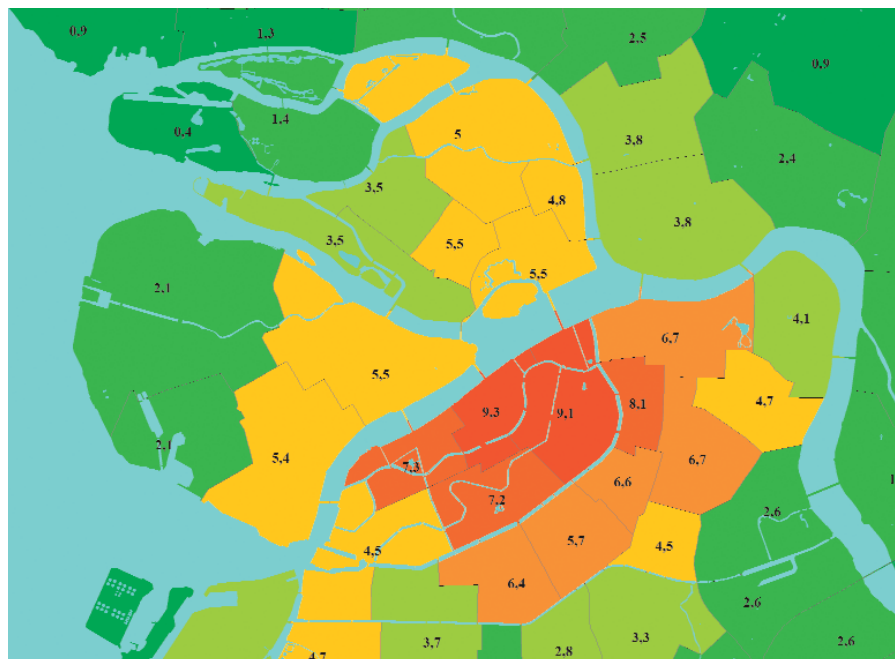


Рис. 1. Распределение дополнительных затрат времени по транспортным районам.

результатом этого совместного выбора являются те объемы автомобильных прибытий, которые определяют величину дополнительных затрат в районах. Результатом расчета при таком моделировании корреспонденций является ситуация равновесия, то есть в районах прибытия для автомобильного транспорта возникают такие дополнительные затраты, при которых в ходе «расслоения» корреспонденций формируются объемы прибытий на автомобилях, порождающие именно эти величины дополнительных затрат.

Такой подход к моделированию корреспонденций приводит к тому, что для получения матриц нужно использовать итеративный алгоритм построения указанного равновесия, в котором на каждом шаге решается задача (1), (2) (или (1), (3)) и для полученных объемов прибытия производится определение дополнительных затрат для каждого транспортного района. Основная сложность построения такого решения связана с организацией механизма формирования таких затрат. Во многом это определяется наличием той или иной информации о возможностях размещения прибывающих автомобилей на территории района.

Для экспериментального апробирования предлагаемого подхода к моделированию корреспонденций авторами была использована достаточно простая схема такого механизма, основанная на весьма общей информации о районах. Из площади каждого транспортного района вычиталась суммарная площадь водоемов, зеленых насаждений, застройки и часть площади улично-дорожной сети.

Оставшаяся территория района s_i рассматривалась как потенциально возможная для размещения автомобилей. Считалось, что для размещения одного автомобиля требуется в среднем некоторая нормативная площадь s_a . Таким образом, для каждого района i можно вычислить своего рода «коэффициент заполнения» k_i его территории автомобилями

$$k_i = (b_i^2 * s_a / K_{\text{нап}}) / s_i$$

где b_i^2 — объем прибытий на индивидуальном транспорте для района i , полученный на очередной итерации построения равновесия, а $K_{\text{нап}}$ — коэффициент среднего наполнения автомобиля (для большей точности можно попытаться учесть прибывающих автомобилей учесть автомобили проживающего в районе населения). Далее, в зависимости от величины этого коэффициента, определялись дополнительные затраты времени на парковку автомобиля при прибытии в этот район $T_i = k_i * 50$ мин. При проведении экспериментальных расчетов оказалось, что для транспортных районов Санкт-Петербурга максимальное значение k_i достигается, что естественно, в центральных районах и составляет около 0,2, при среднем значении по городу около 0,03. Выше на рис. 1 приведена карта распределения дополнительных затрат времени, получившихся в результате расчета. Наибольшая величина этих затрат в центральных районах составила около 10 мин.

На рис. 2 приведены результаты двух вариантов расчета корреспонденций. Первый вариант — без учета дополни-

тельных затрат времени, второй — с учетом этих затрат. Результаты представлены в виде столбчатых диаграмм, соответствующих объемам прибытий в районы на легковом транспорте (красный цвет — первый вариант, зеленый — второй).

Приложение

Пусть численность самодеятельного населения, проживающего и работающего в N транспортных районах города, равна M и имеется столько же мест приложения труда. Представим себе, что каждому работнику присвоен индивидуальный номер i ($i=1, \dots, M$) и номер района t_i , в котором он проживает; аналогичным образом пронумеруем индексами j и t_j места приложения труда. Любое распределение работников по местам приложения труда будем называть «реализацией» трудоустройства. Каждая пара (i, j) в реализации означает, что работник i , живущий в районе t_i , работает на месте j в районе t_j и имеет место соответствующая межрайонная корреспонденция. В результате каждая реализация «сворачивается» в матрицу корреспонденций, причем ограничения на объемы прибытий и отправок выполняются автоматически. При этом нужно отметить, что разные реализации могут порождать одну и ту же матрицу корреспонденций. Действительно, если, например, два жителя, живущие в одном районе, поменяются местами работы, на межрайонных корреспонденциях это никак не отразится.

Таким образом, «под» каждой матрицей корреспонденций «лежит» множество реализаций, которые «сворачиваются» именно в эту матрицу. Суть «энтропийного» подхода состоит в отыскании матрицы, у которой множество реализаций имеет наибольшую суммарную вероятностную меру. Если предполагать, что все реализации равноценны и равновероятны, то это значит, что такая матрица обладает наибольшим количеством реализаций.

В реальности не все реализации равновероятны. Если мы вводим в модель некоторые ограничения, например, на величину средних затрат времени или стоимость передвижения, часть реализаций, для которых эти ограничения не выполняются, становятся недопустимыми (невероятными). Кроме того, при наличии вероятностных предпочтений, связанных с затратами времени или денег, при выборе корреспонденций допустимые реализации перестают быть равноценными и вероятностная мера будет распределяться между ними не поровну. Те из них, которые в большей сте-



Рис. 2. Объемы прибытий на автомобильном транспорте.

пени «отвечают» предпочтениям, будут обладать большей вероятностной мерой, чем те, которые хуже согласуются с предпочтениями. Универсальность «энтропийного» подхода состоит в том, что будет найдена матрица, у которой при высказанных ограничениях и предпочтениях суммарная вероятностная мера реализаций максимальна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Питтель Б.Г. Случайное размещение с ограничениями и принцип взвешенной энтропии. ДАН СССР, 1972, т. 207, №6, с. 1281–1283.
2. Брэгман Л.М., Романовский И.В. Разверстка и оптимизация в задачах распределения // Исследование операций и статистическое моделирование. Л., 1976, вып. 3, с. 137–162.
3. Математические методы в управлении городскими транспортными системами. Л., Наука, 1979, 152 с.
4. Федоров В.П., Пахомова О.М., Лосин Л.А., Бульчева Н.В. Комплексное моделирование потоков общественного и индивидуального

транспорта // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния. Материалы 11-й Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2005, с. 29–33.

5. Федоров В.П., Пахомова О.М., Бульчева Н.В. Учет неоднородности системы мест приложения труда при моделировании пассажирских и автомобильных потоков (на примере Санкт-Петербурга) // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. 4 сборник трудов Санкт-Петербургского экономико-математического института. 2005, с. 156–167.



ОПТРОН разрабатывает и серийно производит

ПЕРЕПРОГРАММИРУЕМЫЕ УКАЗАТЕЛИ МАРШРУТА НА БАЗЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Предназначены для визуального информирования и звукового оповещения пассажиров различных видов городского общественного транспорта о номере маршрута следования, названиях начальных, текущих, последующих и конечных остановочных пунктов.

Основными преимуществами данных указателей являются хорошая распознаваемость информации о маршруте транспортного средства в любое время суток, возможность ее быстрого изменения с помощью пульта в кабине водителя, высокая надежность и экономичность, доступная система перепрограммирования.





ОАО «Оптрон»
 105318, г. Москва, Щербаковская ул., дом 53
 Тел.: +7(495)365-95-34 mkn@optron.ru