

Лебедева Ольга Анатольевна,
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: kravhome@mail.ru

ОЦЕНКА ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА ПУТЕМ АНАЛИЗА ДАННЫХ С ОБОРУДОВАНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Lebedeva O.A.

ASSESSMENT OF TRANSPORT DEMAND BY ANALYSIS OF DATA FROM TRAFFIC IDENTIFICATION EQUIPMENT

Аннотация. В исследовании прослеживается четкая и систематическая основа для оценки матрицы – комбинированный подход с использованием новых технологий, таких как GPS и Bluetooth, позволяющих осуществлять поиск траектории. Предлагаемый подход дал достоверные результаты на небольших сетях, оценивая согласованные значения транспортного потока, как по объемам матрицы корреспонденций, так и по срокам.

Ключевые слова: матрица, анализ транспортных потоков, граф.

Abstract. The study traces a clear and systematic basis for matrix evaluation – a combined approach using new technologies such as GPS and Bluetooth to enable trajectory search. The structure gave encouraging results on small networks, evaluating the agreed values of the traffic flow, both in terms of the volume of the correspondence matrix, and in terms of timing.

Keywords: matrix, traffic flow analysis, graph.

Масштабная урбанизация подвергает городскую инфраструктуру постоянно растущему давлению. В семидесятые годы города могли удовлетворять растущий спрос за счет строительства инфраструктуры, такие решения больше невозможны – городское пространство занято иными объектами и затраты на строительство очень велики. Таким образом, оптимизация существующей городской инфраструктуры стала актуальной задачей, которую необходимо решать с четкой оценкой спроса.

Оценка спроса на транспортные потоки привлекает большое внимание на протяжении множества лет. Целью многих исследований является оценка матриц корреспонденций (OD), которые количественно определяют потребность в транспортных потоках между зонами [1, 2]. Оценка такой матрицы требует данных для калибровки процедур оценки. Традиционно опросы использовались для прямой выборки матриц, но они трудоемки, необъективны, а их достоверность ограничена во времени [3]. Следовательно, были разработаны методы, основанные на данных, собранных непосредственно на улично-дорожной сети. Использование таких данных приводит к тому, что задача оценки матрицы OD становится двухуровневой: оценка матрицы OD; ее присвоение сети.

Задача состоит в том, чтобы рассчитать транспортные потоки на улично-дорожной сети, которые согласуются с матрицей и сравнить с собранными данными. Счетчики транспортных потоков широко используются в качестве источника данных для оценки матриц. В городах устанавливают магнитные петли на улично-дорожных покрытиях, которые могут обнаруживать прохождение мас-

сивных металлических объектов и преобразовывать зарегистрированные электромагнитные всплески в количество транспортных средств [4-6].

Рассматривая дорожную сеть как граф $G = (V, L)$, где множество N_V – вершин V состоит из пересечений дорог (начальный или конечный пункт), а множество N_L – направленных ребер L есть множество прямых путей между перекрестками в V , соответствующая матрица OD имеет размер $T(N_V)^2$. Магнитные петли на звеньях $l \in L$, производят N_L – меры, представленные вектором \tilde{q} . Общую задачу оценки OD матрицы (T) можно представить в виде следующей обратной зависимости [4]:

$$(\hat{T}, \hat{q}) \in \text{Argmin}\{\gamma_1 D_1(\tilde{T}, T) + \gamma_2 D_2(\tilde{q}, q)\} \quad (1)$$

$$s. t. q = F(T) \quad (2)$$

где D_1, D_2 – функции расстояния; γ_1, γ_2 – веса, представляющие относительное доверие к априорному знанию матрицы OD, \tilde{T} , и наблюдаемому количеству транспортных потоков \tilde{q} , соответственно; F – функция назначения, связывает потоки OD с звеном улично-дорожной сети для сравнения с подсчетами транспортных потоков.

Такая общая постановка задачи легко объясняет обширную работу в области выбора D_1, D_2 и F для априорной матрицы OD \tilde{T} .

Отметим, что традиционные подходы сформулированы как выражение (1). Примеры измерения расстояний представлены в таблице 1 [7].

Таблица 1

Пример расстояний, используемых в задаче (1)

| № п/п | Название метода | Измерение расстояния |
|-------|----------------------------|--|
| 1 | Максимизация энтропии | $D_1(T, \tilde{T}) = \sum_{ij} T_{ij} (\log T_{ij} - 1)$ |
| 2 | Минимизация информации | $D_1(T, \tilde{T}) = -\log \frac{\prod_{ij} \left(\frac{\tilde{T}_{ij}}{\sum_{ij} \tilde{T}_{ij}}\right)}{\prod_{ij} T_{ij}!}$ |
| 3 | Максимальное правдоподобие | $D_1(T, \tilde{T}) = \sum_{ij} (n_{ij} T_{ij} - T_{ij} \log T_{ij})$ |
| 4 | Наименьших квадратов | $k \in [1, 2] D_k(x, \tilde{x}) = \frac{1}{2} \ \tilde{x} - x\ ^2$ |

В продолжении комбинированных подходов рассмотрим использование новых технологий для непосредственной оценки матрицы OD. Сбор данных о траектории стал возможен благодаря новым технологиям, таким как GPS, Bluetooth.

Реальная матрица OD оценивается с помощью обратной задачи размерности $N_V \times N_V \times N_L$, основанной на подсчетах транспортного потока \tilde{q} и наборе восстановленных траекторий. Присущая задаче размерность остается иден-

точной традиционным подходам: несмотря на то, что T имеет размер $(N_V)^2$, решение (1) фактически является обратной задачей размера $(N_V)^2 \times N_L$.

Цель статьи – предоставить четкую и систематическую основу для оценки матрицы. Данные с географической привязкой (подсчет транспортных потоков) необходимо сопоставить с характеристиками улично-дорожной сети (траектория или кратчайший путь). Таким образом, улично-дорожная сеть является дополнительным слоем. Для этого обычно выбирают географическую информационную систему (ГИС), в которой каждая дорога представлена геометрическим объектом (ломаной линией, связанной последовательностью прямых отрезков). Это представление удобно тем, что сеть дорог легко интерпретируется как граф $G = (V, L)$.

В графическом представлении подсчет транспортных потоков измеряет: количество транспортных средств, использующих дорогу, то есть объемы на соответствующих путях; данные Bluetooth, полученные от оборудования, установленного на основных перекрестках. Результаты могут быть интерпретированы как выборки объема в соответствующих узлах.

Атрибуты ГИС используются для фильтрации второстепенных дорог (жилая территория, пешеходные и велосипедные дорожки, выделенная полоса движения). В связи с этим следует отметить, что исследование дорожного движения в основном происходит на главных дорогах, где и происходит сбор данных.

Для остальных сегментов дороги извлекается список уникальных координат, обозначаемый V , интерпретируемый как набор узлов графа. Набор из сегментов дороги, обозначается L , характеризуя каждый сегмент дороги индексами исходного и конечного узлов и длины. В результате конечное количество звеньев может быть больше, чем начальное количество сегментов дороги.

С точки зрения транспортного потока точное описание геометрии дороги между двумя перекрестками не требуется. Только длина является важной характеристикой. Удаление узлов, не отслеживаемых и не являющихся пересечениями, упростит большую часть анализа графа, уменьшит размер задачи без изменения информации о потоке.

Для удаления таких узлов рассмотрим специальный алгоритм: обозначим через $G^* = (V^*, L^*)$ исходный граф. Каждый элемент в V^* имеет размер $N_V \times 2$ (узел – две координаты) и каждый элемент в L^* имеет размер $N_L \times 3$ (для ребра: индекс начального и конечного узла и его длина). Определим S (размер $N_S \times 2$ для координат) и r , размер N_S с каждой дальностью обнаружения r_s , которая зависит от расположения оборудования. Наконец, $\{\mu_r^{v^*}\}$ – это отображение пространства S в пространство узлов V с параметрами r такое, что $\{\mu_r^{v^*}\}(s)$ – множество вершин в V^* в пределах r_s оборудования $s \in S$.

Упрощенный граф $G = (V, L)$ инициализируется как копия графа $G^* = (V^*, L^*)$. Определим размер $|L^*|$ – переменной для отслеживания пути, инициа-

лизированной нулевыми значениями. Значение «-1» присваивается, когда ребро больше не появляется в результирующем графе. Если ребро было объединено с другим звеном, его значение устанавливается равным индексу в L^* .

Когда в алгоритме изменяется какое-либо значение, на предыдущей итерации происходит следующее:

1. Для каждой вершины $v \in V \setminus \{\mu_r^{v^*}\}(s) \in S$:

1.1. Если узел соединен только с одним звеном или двумя звеньями с одним другим узлом, то эти звенья помечаются для удаления.

1.2. Если узел лежит на дороге с односторонним движением, то есть имеет один входящий и один выходящий поток, то инцидентный путь становится конкатенацией обеих путей, а выходящий поток помечается для удаления.

1.3. Если узел находится на дороге с двусторонним движением, то есть два варианта пути, совместно используемых с другим узлом, то оба инцидентных пути объединяются с соответствующими исходящими потоками, и существующие пути помечаются для удаления (соответствующим индексом).

1.4. Если узел находится вдоль дороги с односторонним движением и является тупиком для другого направления, тогда он рассматривается как в случаях 1.1 и 1.2.

2. Для каждого звена $l \in L$:

2.1. Если его пункт отправления идентичен пункту назначения, то он помечается для удаления.

2.2. Если звено имеет, то же место отправления и место назначения, что и другой маршрут, сохраняется более короткий вариант, а другой помечается для удаления. Как только алгоритм достигает сходимости, устаревшие узлы, не входящие в L , удаляются из V . Далее, L и V присваиваются новые индексы.

Процесс игнорирует узлы в $\{\mu_r^{v^*}\}(s) \in S$, поскольку сохраняется неизменная дорожная инфраструктура вокруг Bluetooth-детекторов, где наблюдается движение. Массив позволяет отслеживать изменения в графе и, следовательно, в реальной инфраструктуре. Этот процесс позволяет адаптировать другую информацию ГИС к новому упрощенному графу.

Метод извлечения траекторий из данных в реальных и смоделированных исследованиях состоит в удалении данных от дублированных (для разных транспортных средств, одновременно движущихся по сети) или сдвоенных геоинформационных меток. Затем набор данных делится на последовательности, представляющие уникальные поездки. Анализ данных, позволит предложить гипотезу о способе передвижения пользователя. Затем для каждой оставшейся последовательности, относящейся к транспортному потоку, алгоритм перебирает каждый узел в пределах диапазона сканирования каждого детектора, вычисляя единственный кратчайший путь, который мог бы создать наблюдаемую схему обнаружения, принимая во внимание возможное перекрытие областей обнаружения. Этот алгоритм достигает точности 80% на реальных данных.

Результатом алгоритма является восстановление ездов, каждая из которых состоит из путей в L , используемых транспортным средством, оснащенным Bluetooth. Эти траектории можно непосредственно интерпретировать как матрицу Bluetooth размером $N_s \times N_s \times N_L$, где каждая траектория добавляет +1 к элементам B_{ij}^l для каждого звена l , используемого в траектории, где i и j – соответственно первый и последний детектор определенной последовательности.

Некоторые допущения, заложенные в основе теоретического алгоритма, не находят воплощения в реальных задачах и требуют модификации. Во-первых, подсчет транспортных потоков в реальной сети, отслеживается только на подмножестве, а не на каждой отдельной дороге. Допущение возможно заменить, сравнивая наблюдаемые и расчетные количества только для этого подмножества. Во-вторых, предположение, что каждый перекресток контролируется детекторами Bluetooth, может быть неверным и зависит от уровня детализации, выбранного для представления сети. Определяем матрицу, представляющую потоки между детекторами Bluetooth, размера $S \times S \times L$. Таким образом, обозначим граф $G = (V, L)$, представляющий улично-дорожную сеть, расширенную вариантами объезда и информацией с детекторов Bluetooth. Детекторы Bluetooth в этом исследовании становятся точками отправления и назначения (можно адаптировать к другому набору пунктов отправления/назначения: центроиды, зоны). Такой выбор точек отправления/назначения определяется как информация о переходных процессах.

Рассматриваемый метод заключается в решении задачи (3), адаптированной к случаю матрицы [7].

$$\hat{Q} \in \text{Arg min}\{\gamma TCfTC(Q) + \gamma pfp(Q) + \gamma CfC(Q) + \gamma KfK(Q) + \gamma TVfTV(Q)\} \quad (3)$$

где f – выпуклые функции, моделирующие свойства, которым должны удовлетворять оценки (объем транспортных потоков в fTC ; траектории Bluetooth в fP ; функции расстояния в C). Остальные функции ограничивают набор решений (γ – положительные веса).

Методология протестирована в смоделированной среде. Исследование показало, что предлагаемая методика улучшает стандартные решения: средне-квадратичную ошибку (RMSE на 28%), давая более точную оценку общего числа пользователей в сети. Методика дала обнадеживающие результаты, оценивая согласованные значения транспортного потока, как по объемам матрицы корреспонденций, так и по срокам. Результаты были получены на небольших сетях почти исключительно используя кратчайший путь, даже с программным обеспечением для моделирования.

В исследовании прослеживается четкая и систематическая основа для оценки матрицы – комбинированный подход с использованием новых технологий, таких как GPS и Bluetooth, позволяющих осуществлять поиск траектории.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лебедева, О. А.** Расчет основных характеристик маршрута на основе межстаночной матрицы / О. А. Лебедева // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 9 (68). С. 145-148.
2. **Лебедева, О. А.** Моделирование грузовых матриц корреспонденций гравитационным и энтропийным методами / О. А. Лебедева, Д. В. Антонов // Вестник ИрГТУ. — 2015. — № 5 (100). — С. 118–122. — ISSN 1814–3520.
3. **Лебедева, О. А.** Развитие городских грузовых систем с учетом концепции городского планирования / О. А. Лебедева, М. Н. Крипак // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 244-247.
4. **Полтавская, Ю. О.** Оценка условий движения транспортных потоков с применением геоинформационных технологий / Ю. О. Полтавская, М. Н. Крипак, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 155-161.
5. **Полтавская, Ю. О.** Применение геоинформационных систем для обеспечения устойчивого развития транспортной системы города / Ю. О. Полтавская // В сборнике: Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине. Сборник научных трудов VI Международной научной конференции. Под редакцией О. Г. Берестневой, В. В. Спицына, А. И. Труфанов, Т. А. Гладковой. 2019. С. 164-167.
6. **Лебедева, О. А.** Применение интеллектуальных транспортных систем в области управления грузовыми перевозками / О. А. Лебедева // В сборнике: Развитие теории и практики автомобильных перевозок, транспортной логистики. сборник научных трудов кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» в рамках Международной научно-практической конференции. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ). 2016. С. 102-107.
7. **Michau, G.** Combining traffic counts and Bluetooth data for link-origin-destination matrix estimation in large urban networks: The Brisbane case study / G. Michau, N. Pustelnik, P. Borgnat, P. Abry, A. Bhaskar, E. Chung. – DOI 10.48550/arXiv.1907.07495. – Текст электронный // URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.07495>(дата обращения: 21.04. 2022).