УДК 656.11:351.811.12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕШЕХОДНОГО ПОТОКА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В РАМКАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Наумова Н.А., Кравченко В.С.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, e-mail: Nataly_Naumova@mail.ru

Оптимальная организация дорожного движения в режиме реального времени – актуальная проблема. С учетом современных технологий это возможно в рамках интеллектуальных транспортных систем. Поэтому важной и своевременной задачей является математическое моделирование транспортных и пешеходных потоков. Для того, чтобы учитывать движение пешеходов при организации движения в узловых точках сети в режиме реального времени, в работе использовано мезоскопическое моделирование. Направленное движение потока пешеходов к перекрестку описано как случайный процесс с помощью специального распределения Эрланга. Рассмотрены случаи моделирования потоков средней и высокой плотности, приведены соответствующие алгоритмы; разработаны компьютерные программы. Для определения характеристик пешеходного потока были доказаны утверждения, позволяющие определить число пешеходов, пересекающих данную точку пространства в течение заданного промежутка времени; среднюю суммарную задержку требований рассматриваемого потока за время, в течение которого запрещено движение в данном направлении, среднюю задержку одного пешехода в течение этого времени. Особенно актуально получение таких характеристик в режиме реального времени и с достаточной степенью точности, так как это дает возможность оперативно реагировать на изменяющуюся ситуацию. Разработаны соответствующие программы. Результаты представленной работы отвечают этим целям и могут быть использованы в интеллектуальных транспортных системах.

Ключевые слова: пешеходный поток, математическая модель, транспортный поток, закон распределения случайной величины, интеллектуальная транспортная система

REAL-TIME PEDESTRIAN FLOW CHARACTERIZATION WITHIN INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS

Naumova N.A., Kravchenko V.S.

Kuban State Technological University, Krasnodar, e-mail: Nataly_Naumova@mail.ru

The optimal organization of traffic in real time is an urgent problem at the present time. Taking into account modern technologies, this is possible within the framework of intelligent transport systems. Therefore, an important and timely task is the mathematical modeling of traffic and pedestrian flows. In order to take into account the movement of pedestrians when organizing traffic at the nodal points of the network in real time, mesoscopic modeling was used in the work. The directed movement of the flow of pedestrians towards the intersection is described as a random process using a special Erlang distribution. Cases of modeling medium and high density flows are considered, the corresponding algorithms are given; computer programs have been developed. To determine the characteristics of the pedestrian flow, statements were proved that allow one to determine the number of pedestrians crossing a given point in space during a given period of time; the average total delay of the requirements of the considered flow during the time during which movement in this direction is prohibited, the average delay of one pedestrian during this time. It is especially important to obtain such characteristics in real time and with a sufficient degree of accuracy, since this makes it possible to quickly respond to a changing situation. Appropriate programs have been developed. The results of the presented work meet these goals and can be used in intelligent transport systems.

Keywords: pedestrian flow, mathematical model, traffic flow, random variable distribution law, intelligent transport system

Оптимальная организация дорожного движения в режиме реального времени – актуальная проблема. С учетом современных технологий это возможно в рамках интеллектуальных транспортных систем. Поэтому важной и своевременной задачей является математическое моделирование транспортных и пешеходных потоков. Для оперативного реагирования на постоянно изменяющуюся ситуацию на улично-дорожной сети требуется минимизация времени между получением исходных данных задачи и параметров, являющихся результатом ее решения. С этой точки зрения наиболее подходящими являются математические модели, основанные на аналитическом решении поставленных задач.

Для моделей транспортных и пешеходных потоков существует аналогичная классификация. Их традиционно по степени детализации используемых параметров разделяют на макроскопические, мезоскопические и микроскопические [1–4]. Микроскопические модели основаны на учете движения каждого отдельного пешехода; мезоскопические учитывают поведение отдельных пешеходов, но с целью определения параметров всего потока или закона распределения потока; макроскопические определяют характеристики потока в целом без учета поведения отдельных участников движения. Для решения транспортных задач различного уровня (локальных или глобальных) требуются различные типы моделей потоков.

Целью данной работы является разработка метода определения характеристик пешеходного потока в режиме реального времени в рамках интеллектуальных транспортных систем.

Материалы и методы исследования

Для того, чтобы учитывать движение пешеходов при организации движения в узловых точках сети в режиме реального времени, удобно применять мезоскопическое моделирование. В данном случае необходимо оценивать задержки транспортных средств, вызванные необходимостью пропускать пешеходные потоки. Кроме того, при выборе оптимальной схемы организации движения на конкретном перекрестке следует также учитывать потери времени пешеходов [5]. В случае направленного движения пешеходов к переходу удобно применять модели, описывающие поток как случайный процесс с помощью случайных функций. При таком подходе возможно разработать аналитический аппарат для оценки средних потерь времени всех конфликтующих потоков (как транспортных, так и пешеходных) [6, 7] с помощью методов теории массового обслуживания и теории восстановления. В работе N. Bode [8] утверждается, что интервалы по времени между подряд идущими пешеходами имеют гамма-распределение, частным случаем которого является специальное распределение Эрланга.

В работах [8–10] обращается внимание на то, что значительное влияние на характеристики пешеходного потока оказывает их разделение на малые социальные группы. В данной работе с этой целью малые социальные группы будут определяться как отдельные кластеры. При моделировании пешеходного потока используется такой же подход, который применялся автором при разработке модели транспортных потоков TIMeR_Mod [11].

Под *событием* в модели понимается прибытие очередного объекта к фиксированной точке пространства. Интервалы по времени между отдельными событиями будем считать подчиненными двупараметрическому закону Эрланга. Под *объектом* понимается либо отдельный пешеход, либо кластер пешеходов – плотное скопление людей (как правило, знакомых, следующих в одинаковом направлении). В работе автора [12] был предложен один из возможных алгоритмов разбиения пешеходов на кластеры. Предлагалось формировать кластеры, проверяя выполнение условия $d_{ij} < d_{free}$, где d_{ij} – расстояние от точки с текущими координатами до центра кластера, d_{free} – максимально допустимое расстояние, определяющее границу между свободным движнием пешеходов и их движением в связанной группе.

Исходные данные для определения параметров пешеходного потока предполагается получать с камер видеонаблюдения. В настоящей работе метод автоматической работы с камерами видеонаблюдения не рссматривается, это является задачей отдельного исследования. Исходными данными являются декартовы координаты пешехода в фиксированный момент времени. Кроме этого необходимо фиксировать время пересечения последовательно движущимися объектами заданной точки пространства.

Для расчета исходящих параметров (характеристик пешеходного потока) будут применяться методы теории случайных функций, теории восстановления [13, 14].

Результаты исследования и их обсуждение

1. Моделирование пешеходного потока как потока кластеров

Для определения взаимного влияния пешеходных и транспортных потоков на перекрестках, необходимо однотипно моделировать их движение. В этом случае можно использовать методы определения средней очереди в потоке на перекрестке, средней задержки на перекрестке по направлениям, используя методы и аналитический аппарат, который был разработан автором для модели TIMeR_Mod [15].

Если рассматривать эту частную задачу, то координаты объектов – пешеходов можно брать одномерные, спроецированные на ось движения. То есть это точки в одномерном пространстве. Основной признак, по которому будем объединять объекты – расстояние между двумя точками. Кроме того, следует ввести ограничение на расстояние между соседними объектами.

Кластером в данном случае будем считать множество точек *S*, расстояние от каждой из которых хотя бы до одной точки этого множества S меньше некоторого заданного значения d_{free}.

Разработана *программа* в среде DELPHI, реализующая разбиение потока на кластеры.

Описание программы разбиения потока на кластеры

Функция DPOINT получает на вход координаты точек и выдаёт расстояние между ними.

Функция Counter получает на вход массив данных и количество точек. Если ни одна из точек не принадлежит ни одному из кластеров, то счётчик увеличивается на единицу.

Процедура MakeUpClaster получает на вход критическое расстояние между точками, начальную точку кластера, количество точек, номер кластера и исходный массив данных.

Проверяем расстояния от всех точек до начальной с помощью функции DPOINT; если расстояние не более чем d_{free}., то группируем эти точки в один кластер.

Основная программа начинается при нажатии кнопки Start.

Заполняем массив данных MainArr координатами объектов – пешеходов (MainArr – матрица размеров *3 × N).*

Формируем первый кластер:

– задаем начальную точку; проверяем, какие точки из MainArr находятся от исходной на расстоянии не более чем d_{free}. Если это условие выполнено, то мы группируем эти точки в один кластер. Это будет кластер № 1.

Формируем остальные кластеры:

– увеличиваем номер кластера на единицу;

– пока функция *Counter* > 0, находим точку из *MainArr*, не принадлежащую ни одному кластеру;

– формируем кластер, считая найденную точку начальной, с помощью процедуры *MakeUpClaster.*

В результате работы программы разбиение на кластеры задается *однозначно* с точностью до порядка нумерации кластеров. Действительно, пусть P_i – некоторая точка из кластера K^1, P_j – произвольная точка.

$$P_i \in K^1 \langle = \rangle \exists j \in N : P_j \in K^1, \left|P_i - P_j\right| \le d_{free}. \quad (1)$$

Предположим, что точка P_l принадлежит одновременно кластерам K_s и K_t и, следовательно:

$$\exists P_t \in K_t : \left|P_t - P_l\right| \le d_{free},$$

$$\exists P_s \in K_s : \left|P_s - P_l\right| \le d_{free}. \quad (2)$$

По алгоритму разбиения на кластеры получаем, что $P_t \in K_s; P_s \in K_t$.

Рассуждая аналогичным образом по поводу остальных точек кластеров K_s и K_t, получим, что все точки из $K_s \subset K_t$ и все точки из $K_t \subset K_s$. Таким образом, эти кластеры совпадают: $K_s = K_t$. То есть если точка принадлежит двум разным кластерам, то эти кластеры совпадают.

На рис. 1 представлен пример работы программы.

Замечание: если расстояние между большей частью объектов – пешеходов меньше контрольного расстояния d_{free}, то разбиение на кластеры нецелесообразно, так как грубо аппроксимирует поток. В этом случае будем рассматривать интервалы по времени не между центрами кластеров, а между отдельными пешеходами. Согласно исследованиям в теории пешеходных потоков в этом случае интервалы по времени в плотном пешеходном потоке подчинены нормальному распределению. При значении параметра $k \ge 5$ специального распределения Эрланга он близок к нормальному.

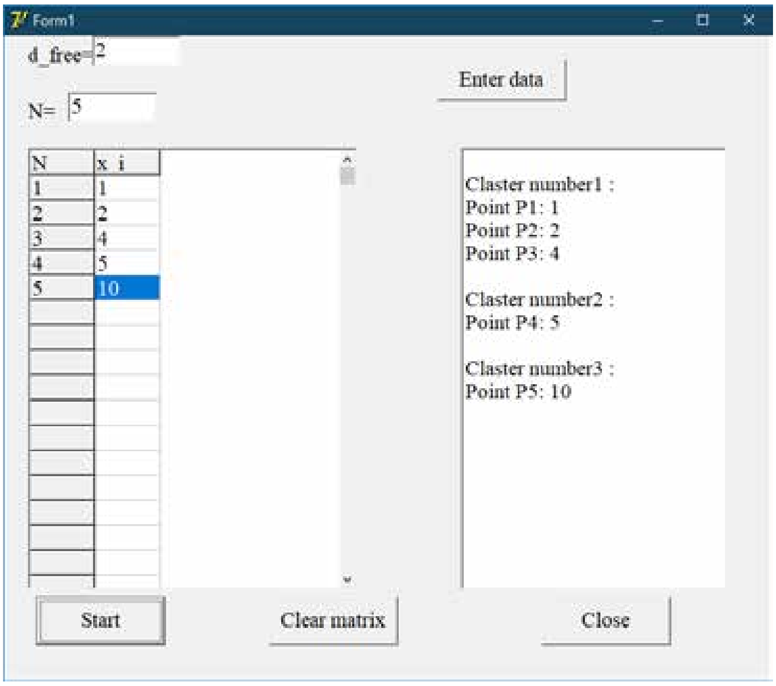

Рис. 1. Пример работы программы разбиения пешеходов на кластеры

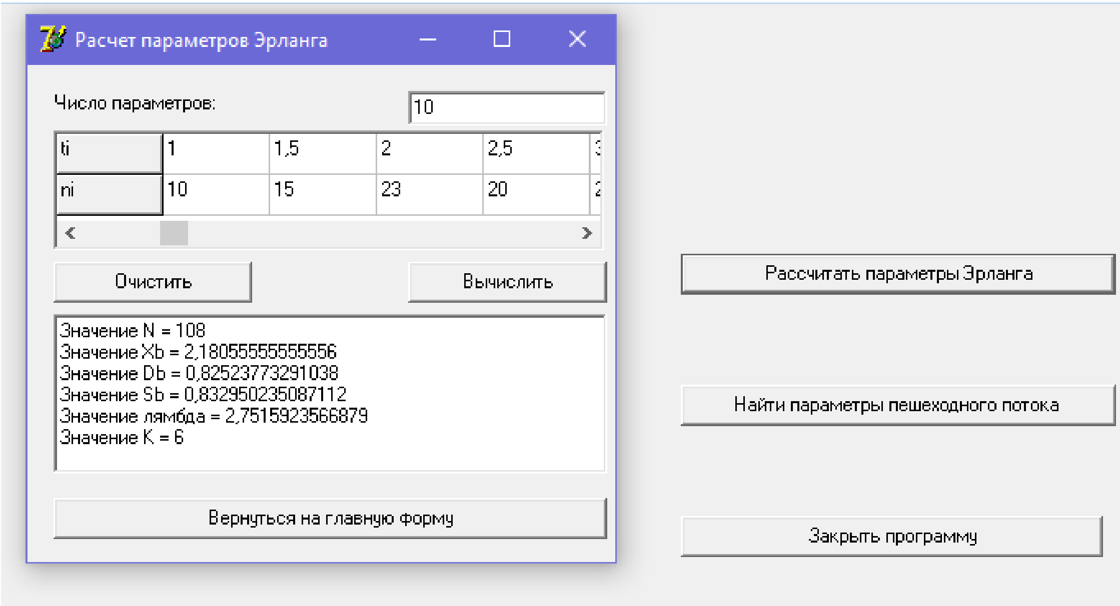

Рис. 2. Пример работы программы расчета параметров Эрланга

2. Определение параметров Эрланга для пешеходного потока

Для определения параметров распределения Эрланга, которым аппроксимируется пешеходный поток, необходимо получить соответствие между значением интервалов по времени между следующими друг за другом объектами в потоке и количеством таких интервалов. Уточним, что при разбиении потока на кластеры фиксируется прохождение центром кластера заданной точки пространства.

Тогда параметры распределения Эрланга определяются по формулам

$$\lambda^* = \frac{\bar{X}_B}{\hat{s}^2}, k^* = \frac{\bar{x}_B^2}{\hat{s}^2}, \quad (3)$$

где $\bar{x}_B$ – выборочная средняя случайной величины T (интервалов между следующими подряд пешеходами);

$\hat{s}^2$ – исправленная выборочная дисперсия случайной величины T.

В общем случае получаем нецелое k. Для того, чтобы получить параметры распределения Эрланга, в качестве k возьмём $k = [k^*] + 1$, а в качестве параметра λ следующее значение:

$$\lambda = \frac{k}{\bar{x}_B}.$$

Согласно проведенным экспериментам (видеосъемка потоков) при разбиении на кластеры пешеходного потока с низкой и средней интенсивностью движения значение параметра $k = 1$ или $k = 2$. При высокой интенсивности движения разбиение на кластеры нецелесообразно, пешеходный поток хорошо аппроксимировался законом Эрланга при значении параметра $k = 6$. Если разбиение на кластеры не проводилось, в потоках с низкой и средней интенсивностью параметр k принимал значения от одного до четырех. Адекватность гипотезы о виде распределения проверялась с помощью критериев Пирсона и Романовского. С целью расчета параметров распределения Эрланга написана программа (рис. 2) .

3. Применение математической модели для определения характеристик пешеходных потоков у перекрестков

В работе автора [11] приведен вывод аналитического аппарата для определения таких характеристик потока, как средняя длина очереди, средняя суммарная задержка в узловой точке, средняя задержка одного объекта в потоке при значениях параметра k от одного до четырех. Точный аналитический аппарат для определения характеристик пешеходных потоков у перекрестков с помощью теории восстановления [13] возможно получить также для $k = 6$. Ниже приведено соответствующее утверждение, доказанное авторами.

Теорема 1: пусть распределение интервалов по времени между событиями в потоке представляет собой специальный поток Эрланга с параметрами k и λ. Тогда число объектов, пересекающих данную точку пространства в течение промежутка времени $(0; t)$, для $k = 6$ может быть оценено по формуле

$$H(t)=\frac{\lambda}{6}t-\frac{5}{12}+\frac{1}{12}e^{-2\lambda t}+\frac{1}{6}e^{\lambda\left(-\frac{1}{2}\right)t}\cdot\left[\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\lambda t\right)+\sqrt{3}\sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\lambda t\right)\right]+$$
$$+\frac{1}{18}e^{\lambda\left(-\frac{3}{2}\right)t}\cdot\left[3\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\lambda t\right)+\sqrt{3}\sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\lambda t\right)\right].$$

При слиянии s пешеходных потоков Эрланга с параметрами k и λ_i , i = 1,2,…,s количество пешеходов, пересекающих данную точку пространства в течение промежутка времени (0; t), может быть оценено по формуле

$$H(t)=\sum_{i=1}^{s}H_i(t). \quad (4)$$

Авторами доказано, что такие характеристики, как средняя *суммарная* задержка требований и средняя задержка *одного* пешехода, могут быть рассчитаны так, как утверждается в Теореме 2.

Теорема 2: пусть распределение интервалов по времени между событиями в потоке представляет собой специальный поток Эрланга с параметрами k и λ. Тогда:

− средняя *суммарная* задержка требований рассматриваемого потока за время T_i секунд, в течение которого запрещено движение в данном направлении, может быть оценено по формуле

$$W(T_i,\lambda)=\int_0^{T_i}H(t)dt\ ;$$

− средняя задержка (в секундах) *одного* пешехода за время T_i секунд, в течение которого запрещено движение в данном направлении, может быть рассчитана по формуле

$$\omega_i(T_i)=\frac{W(T_i,\lambda)}{H(T_i)}.$$

Авторами разработаны соответствующие программные модули для расчета параметров пешеходного потока (рис. 3).

Заключение

Моделирование пешеходных потоков приобрело большую значимость в последнее время для таких отраслей, как организация дорожного движения, строительство зданий и сооружений. С помощью моделирования движения потоков пешеходов прогнозируют среднее время эвакуации, среднюю величину задержек объектов в тех или иных ситуациях, среднюю длину очереди при перекрытом движении. Особенно актуально получение таких характеристик в режиме реального времени и с достаточной степенью точности, так как это дает возможность оперативно реагировать на изменяющуюся ситуацию. Результаты представленной работы отвечают этим целям и могут быть использованы в интеллектуальных транспортных системах.

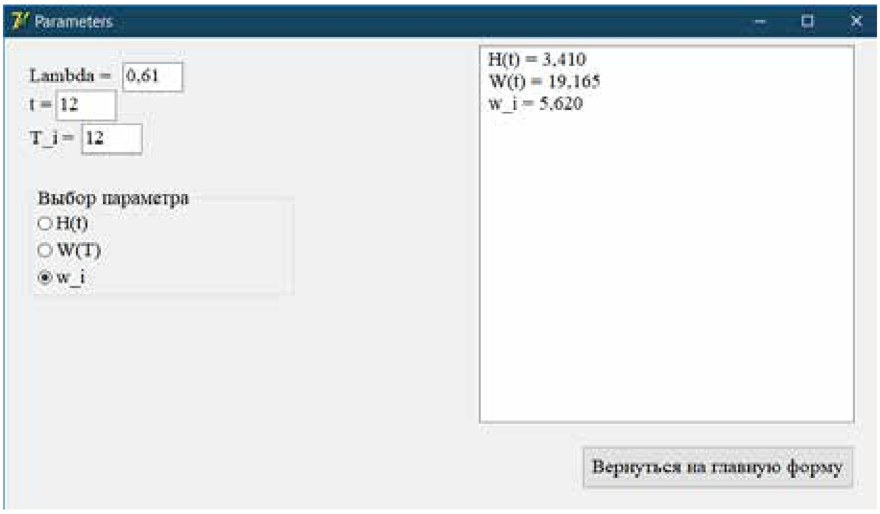

Рис. 3. Пример работы программы определения характеристик пешеходного потока

Список литературы

1. Burger M., Hittmeir S., Ranetbauer H., Wolfram M.-T. Lane formation by side-stepping. SIAM Journal on Mathematical Analysis. 2016. No. 48 (2). P. 981–1005.

2. Carrillo J.A., Martin S., Wolfram M.-T. An improved version of the Hughes model for pedestrian flow. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2016. No. 26 (04). P. 671–697.

3. Johansson F. Microscopic Modelling and Simulation of Pedestrian Traffic. Lincoping University Department of Scince and Technology. Lincoping, Sweden. 2013. P. 119.

4. Parry G.W. The Dynamics of Crowds. Master's thesis, Department of Mathematical Sciences, University of Bath. 2007. P. 1–73.

5. ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог (взамен Руководства по оценке пропускной способности автомобильных дорог) / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). М.: ФГУП «Инфоравтодор», 2012. 143 с.

6. Rahman K., Ghani N., Kamil A., Mustafa A., Chowdhury M.K. Modelling Pedestrian Travel Time and the Design of Facilities: A Queueing Approach. PLoS ONE. 2013. Vol. 8 (5). P. 1–36.

7. Martinez-Gil F. Modeling, Evaluation, and Scale on Artificial Pedestrians: A Literature Review. ACM Computing Surveys. 2018. Vol. 50. P. 1–35. DOI: 10.1145/3117808.

8. Bode N. The Effect of Social Groups and Gender on Pedestrian Behavior Immediately in Front of Bottlnecks. Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics. 2016. P. 92–99.

9. Alhajyaseen, Wael K.M., Nakamura H. Quality of pedestrian flow and crosswalk width at signalized intersections. 2010. Vol. 34 (1). P. 35–41.

10. Hu Y., un Zhang J., Song W. The difference between individuals and social groups in multidirectional movement. Proceedings from the 9th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED2018) Lund, Sweden. 2018. P. 334–341.

11. Наумова Н.А., Зырянов В.В., Наумов Р.А. Автоматизированное управление транспортными потоками средствами мезоскопического моделирования: монография. Краснодар: ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2018. 266 с.

12. Naumova N.A. Advanced optimization of road network: Pedestrian crossings with calling devices. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2020. No. 8 (1). P. 130–137.

13. Cox D.R. Renewal theory. London: Methuen, 1962. P. 150.

14. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие. 5-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2016. 448 с.

15. Наумова Н.А., Кирий К.А., Карачанская Т.А. Выбор оптимальных параметров светофорного регулирования в узловой точке, при справедливости гипотезы о распределении интервалов по времени, по обобщенному закону Эрланга // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=10505 (дата обращения: 30.08.2022).