

УДК 004.021:656.11:51-7

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕШЕХОДНОГО ПЕРЕХОДА С ВЫЗЫВНЫМ УСТРОЙСТВОМ

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

Оценка потерь времени на регулируемых пешеходных переходах является актуальной темой исследования в настоящее время. Важной задачей является разработка модели движения транспорта и пешеходов на регулируемом переходе, дающая результат приемлемой точности при минимально возможном количестве исходных данных, которые могут быть получены автоматизированно в режиме реального времени. При мезоскопическом моделировании поток автотранспорта на каждой из полос представлен как поток Пальма, интервалы по времени между которыми подчиняются обобщенному закону Эрланга. Направленное движение пешеходов к переходу с вызывным устройством представлено как случайный поток кластеров. Для разделения пешеходов на кластеры использовалась иерархическая агломеративная процедура. Основным признаком для объединения объектов в кластеры – расстояние между соседними пешеходами и расстояние до центра кластера. Разработан алгоритм формирования кластеров пешеходного потока в определенный момент времени. Разработан метод и алгоритм обработки данных с видеодетектора для получения параметров распределения пешеходного потока. Приведен алгоритм обработки данных видеосъемки автотранспортных потоков для получения параметров распределения обобщенного закона Эрланга, характеризующего транспортные потоки на отдельных полосах движения.

Ключевые слова: транспортные потоки, пешеходное движение, математическая модель, статистическая обработка данных, переход с вызывным устройством

THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE INITIAL DATA FOR MODELING A PEDESTRIAN CROSSING WITH CALLING DEVICE

Naumova N.A.*Kuban State Technological University, Krasnodar, e-mail: Nataly_Naumova@mail.ru*

Estimation of the time lost to regulated pedestrian crossings of obvious dark studies at present. An important condition is the development of models of traffic and pedestrians with adjustable transition, the result of which is acceptable accuracy with the minimum possible amount of source data that can be obtained automatically in real time. In mesoscopic modeling, the flow of vehicles on each of the lanes is presented as the Palm flow, the time intervals between which are subject to the generalized Erlang law. The directional movement of pedestrians to the transition with a calling device is presented as an occasional flow of clusters. A hierarchical agglomerative procedure was used to divide pedestrians into clusters. The main feature for combining objects into clusters is the distance between adjacent pedestrians and the distance to the center of the cluster. An algorithm for forming pedestrian flow clusters at a specific point in time has been developed. A method and algorithm for processing data from a video detector for obtaining parameters for the distribution of a pedestrian flow have been developed. An algorithm for processing the data of the filming of traffic flows to obtain the distribution parameters of the generalized Erlang law, which characterizes traffic flows in individual lanes, is presented.

Keywords: traffic flows, pedestrian movement, mathematical model, statistical data processing, pedestrian crossing with calling device

Оценка потерь времени на регулируемых пешеходных переходах является актуальной темой исследования в настоящее время. В силу увеличения интенсивности как транспортных, так и пешеходных потоков в городах количество регулируемых пересечений увеличивается и их влияние на суммарные затраты на передвижение транспорта и пешеходов также растет [1]. Как правило, среднее время на пересечение пешеходного перехода по различным методикам их вычисления складывается из времени ожидания возможности продолжить движение и времени, необходимого для непосредственного пересечения перехода. Методы расчета зависят от выбранного метода моделирования потоков транспорта

и пешехода, а также от целей, для которых в дальнейшем будет применен данный аналитический инструмент.

Моделирование транспортных потоков развивается с середины прошлого столетия. Разработано большое количество моделей, разнообразных по степени детализации данных. В последнее время их классифицируют на макроскопические, мезоскопические и микроскопические. Пешеходным потокам внимание стали уделять значительно позже. Однако сейчас потребность в его моделировании существует в различных отраслях экономической и социальной политики. Прогнозирование поведения людей требуется при проведении массовых мероприятий, при строительстве зданий и со-

оружений для составления плана эвакуации людей в случае чрезвычайных ситуаций, при проектировании транспортной сети города, края или области для оптимизации перевозки пассажиров и грузов. В разных случаях требуется разная степень детализации и точности модели. Поэтому разработаны и продолжают разрабатываться модели пешеходных потоков, отвечающие тем или иным требованиям.

Актуальной задачей является разработка модели движения транспорта и пешеходов на регулируемом переходе, дающая результат приемлемой точности при минимально возможном количестве исходных данных, которые могут быть получены автоматизированно в режиме реального времени.

Цель работы: разработка метода сбора и обработки исходных данных для мезоскопической модели движения транспорта и пешеходов на регулируемом переходе, разработанной автором.

Материалы и методы исследования

Существующие модели пешеходных потоков можно ранжировать на макромоделли, мезомодели и микромоделли [2–4]. В случае направленного движения пешеходов к переходу удобно применять модели, описывающие поток как случайный процесс с помощью случайных функций. Такую степень детализации данных можно отнести к мезоскопической.

В модели TIMeR_Mod, разработанной автором [5], автотранспортный поток описывается как поток Пальма, интервалы по времени между которыми подчиняются обобщенному закону Эрланга. Это достаточно универсальное многопараметрическое статистическое распределение, которое при соответствующем подборе параметров позволяет описать потоки различной плотности. Однако полностью скопировать предположения, выдвинутые при моделировании транспортного потока, на поток пешеходный не представляется возможным.

Для получения исходных данных модели пешеходного перехода с вызывным устройством необходимо по результатам видеосъемки вычислить параметры пешеходного потока и транспортных потоков на каждой из полос для движения, прибывающих к переходу. С этой целью будем использовать методы статистического анализа, кластерный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Описание модели движения пешеходного потока

Рассмотрим вызывное устройство, расположенное вблизи такого «источника» пешеходного потока, как остановка общественного транспорта, кинотеатр, учебное заведение и т.п. В этом случае потоки пешеходов состоят из кластеров, движущихся в данном направлении (рис. 1). Каждый кластер характеризуется тем, что достаточно

одного нажатия кнопки вызывного устройства, чтобы все успели пересечь дорогу.

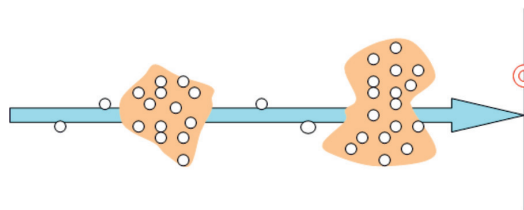


Рис. 1. Поток пешеходов к переходу с вызывным устройством

Поэтому целесообразно рассматривать такой поток не как поток отдельных пешеходов, а как поток кластеров. Считая поток распределенным по показательному закону, его интенсивность обозначим через $\lambda_{op} = \frac{1}{T_{op}}$, где T_{op} – средний интервал (в секундах) по времени между подряд идущими событиями (в нашем случае, между следующими друг за другом кластерами).

Кластерный анализ данных для моделирования пешеходного движения

Основная задача кластерного анализа – разбить множество объектов на классы, однородность которых определяется по некоторым заданным признакам. Это многомерный статистический метод, который позволяет работать с данными значительного объема и учитывать одновременно несколько n признаков, характеризующих объекты [6]. Объекты представляют как точки в n -мерном пространстве, а однородность определяют по расстоянию между этими точками. Расстояние в общем случае можно вводить разными способами, главное, правильно подобрать масштаб по каждой из осей. С этой целью нормируют данные. В качестве расстояния можно выбрать, например, линейное, евклидово, квадрат евклидова расстояния, обобщенное степенное расстояние Минковского, расстояние Чебышева, Манхэттенское расстояние. Методы разбиения на кластеры классифицируют как иерархические и неиерархические.

Основные этапы кластерного анализа следующие: формулировка проблемы; выбор способа измерения расстояния; выбор места кластеризации; принятие решения о количестве кластеров; интерпретация и профилирование кластеров; оценка достоверности кластеризации [7].

Для разделения пешеходов на кластеры будем использовать иерархическую агло-

меративную процедуру, последовательно объединяя пешеходов в отдельные группы. Основной признак, по которому будем объединять объекты – расстояние между соседними пешеходами и расстояние до центра кластера. Кроме того, введем ограничение $D_{\max}$ на диаметр кластера и D_{free} на расстояние между соседними объектами. Константу $D_{\max}$ определяют при калибровке модели к конкретному переходу. Она определяется из условия гарантированного перехода через дорогу всех объектов в кластере за один цикл при известных параметрах: средней скорости отдельного пешехода и ширине проезжей части. Константа D_{free} определяет движение пешехода вне кластера.

Возможны два подхода к автоматизированному сбору данных. В первом случае в данный момент времени снимаются показания с видеодетектора о месторасположении объектов и фиксируются их декартовы координаты на плоскости Oxy : (x_i, y_i) . Тогда расстояние между двумя объектами d_{ij} находим как обычное Евклидово расстояние:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (1)$$

Объекты объединяются в один кластер, если расстояние от объекта до центра кластера не превышает $D_{\max}/2$, и внутри круга радиусом D_{free} находится хотя бы один объект формируемого кластера. При добавлении нового объекта в кластер пересчитывается диаметр и центр кластера. Диаметр d_c – это расстояние между двумя наиболее удаленными объектами, а центр – координаты середины диаметра.

Во втором случае для каждого момента времени снимается только координата x_i , отражающая проекцию объекта на ось направления движения. Тогда расстояние d_{ij} между двумя объектами равно

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2} = |x_i - x_j|. \quad (2)$$

Диаметр в данном случае равен наибольшему расстоянию между проекциями объектов на ось направления движения (рис. 2).

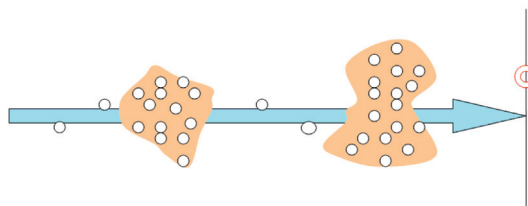


Рис. 2. Диаметр кластеров при моделировании пешеходного потока

При моделировании движения на подходах к пешеходному переходу задействуется для снятия показаний небольшой участок, который можно аппроксимировать прямой линией. В противном случае, если направление движения представляет собой кривую линию и аппроксимация ее прямой нерациональна, тогда в качестве координат берут проекции точек на кривую. Расстояние d_{ij} рассчитывается как длина дуги кривой, на которую проецируются точки.

В условиях данной модели второй случай формирования кластеров предпочтительнее. Исходя из поведения пешеходов, важна их удаленность от перехода вдоль направления движения. Пешеходы, выстроившиеся в «узкий», но «широкий» кластер, начинают движение по переходу одновременно.

Алгоритм обработки данных для пешеходного потока

Плотность распределения показательного закона распределения случайной величины имеет вид

$$f(t) = \lambda_{0p} \cdot e^{-\lambda_{0p}t}. \quad (3)$$

Он является однопараметрическим и применим для потоков с небольшой интенсивностью [8]. При разбиении пешеходного потока на кластеры мы можем им воспользоваться. Для получения значения параметра λ_{0p} показательного закона требуется по экспериментальным данным определить средний интервал по времени между подряд идущими событиями T_{0p} . Тогда $\lambda_{0p} = \frac{1}{T_{0p}}$.

При организации эксперимента необходимо получить следующие измерения: интервалы по времени Δt_i между последовательными прибытиями центров кластеров пешеходного потока к данной точке пространства на подходах к пешеходному переходу. Тогда выборочное среднее:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n}, \quad (4)$$

где n – количество измерений, а $T_{0p} \approx \bar{t}$.

Алгоритм обработки данных для пешеходного потока:

1) в момент времени $s = t_1$ фиксируем координаты x_i проекций точек (пешеходов) на ось направления движения;

2) проводим разбиение на кластеры (рис. 3):
2.1) располагаем точки по возрастанию координат x_i ;

2.2) вычисляем расстояние от точки $x^* = x_N$ с наибольшей координатой до соседней;

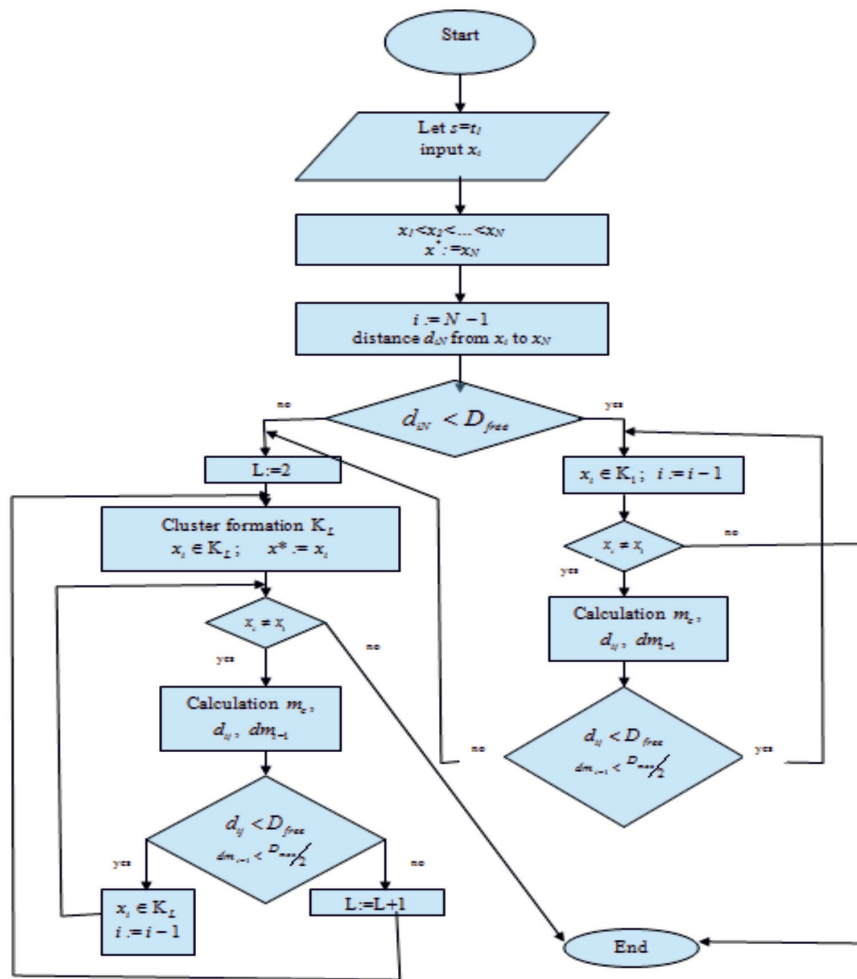


Рис. 3. Алгоритм формирования кластеров пешеходного потока в определенный момент времени

2.3) если расстояние $d_{ij} < D_{free}$, объединяем точки в один кластер;

2.4) находим центр кластера m_c как середину отрезка между точками;

2.5) находим расстояние d_{ij} от последней включенной в кластер точки x_i до следующей по убыванию x_{i-1} и расстояние dm_{i-1} от точки x_{i-1} до центра кластера m_c ;

2.6) если оба условия $d_{ij} < D_{free}$ и $dm_{i-1} < D_{max}/2$ выполнены, включаем точку x_{i-1} в текущий кластер;

2.7) находим центр кластера как середину отрезка между x_{i-1} и x^* : $m_c = \frac{x^* + x_{i-1}}{2}$;

2.8) если хотя бы одно из условий пункта 2.6 текущего алгоритма не выполнено, включаем точку x_{i-1} в новый кластер и считаем для нового кластера $x^* = x_{i-1}$;

2.9) повторяем пункты 2.5–2.8 до тех пор, пока все данные для момента времени $s = 1$ не будут разбиты на кластеры;

3) фиксируем координату центра первого кластера на оси направления движения $X_{control}$;

4) фиксируем момент времени $s = t_2$, когда центр второго кластера достигает точки $X_{control}$;

5) вычисляем $\Delta t_1 = t_2 - t_1$;

6) повторяем пункты 2–5 для момента времени $s = t_2$ необходимое количество n раз;

7) вычисляем $\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n}$.

Получение и обработка данных для автотранспортного потока

Определение параметров распределения Эрланга для автотранспортного потока подробно описано, например, в работе автора [5]. Для их расчета необходимо получить экспериментальные данные о величине интервалов по времени между подряд идущими транспортными средствами в потоке, фиксируя их прибытие к данной точке доро-

ги. Распределение Эрланга является многопараметрическим. Для получения оценки этих параметров по данным эксперимента рассчитываются $\bar{x}_B$ – выборочная средняя случайной величины T – интервалов между следующими подряд по одной полосе автомобилями; $\bar{x}_B^2$ – выборочная средняя случайной величины T^2 ; σ_B^2 – выборочная дисперсия случайной величины T .

В первую очередь вычисляется значение $k^* = \frac{\bar{x}_B^2}{\hat{s}^2}$ и находится ближайшее целое число, большее k^* :

$$k = [k^*] + 1. \quad (5)$$

Экспериментально доказано, что начение параметра k не превышает четырех.

Считая, что $\lambda_i = x \cdot \lambda_{i-1}$, $i \geq 1$, остальные значения параметров распределения были рассчитаны с помощью метода моментов.

При $k = 1$ получем показательный закон, для которого $\lambda_0 = \frac{1}{\bar{x}_B}$.

При $k = 2$:

$$\lambda_0 = \frac{2}{\bar{x}_B + \sqrt{2(\sigma_B^2 - (\bar{x}_B)^2)}},$$

$$x = \frac{\sqrt{k^*} + \sqrt{2 - k^*}}{\sqrt{k^*} - \sqrt{2 - k^*}}. \quad (6)$$

При $k = 3$:

$$x = \frac{(k^* + 1) \pm \sqrt{(-k^* + 3) \cdot (3k^* - 1)}}{2 \cdot (k^* - 1)},$$

$$\lambda_0 = \frac{x^2 + x + 1}{x^2} \cdot \frac{1}{\bar{x}_B}. \quad (7)$$

При $k = 4$:

$$y = \frac{(\sigma_B)^2 + \sqrt{((\bar{x}_B)^2 - (\sigma_B)^2)^2 + (\bar{x}_B)^4}}{(\bar{x}_B)^2 - (\sigma_B)^2},$$

$$x = \frac{y \pm \sqrt{y^2 - 4}}{2}, \quad \lambda_0 = \frac{(x^2 + 1)(x + 1)}{x^3} \cdot \frac{1}{\bar{x}_B}. \quad (8)$$

Замечание: если $k^* = \frac{\bar{x}_B^2}{\hat{s}^2}$ – целое число, то для всех $k \in \{2, 3, 4\}$ получим значение $x = 1$, а следовательно, все λ_i совпадают. В этом случае получим специальное распределение Эрланга или, иначе, «распределение Эрланга». Тогда параметры распределения находятся по следующим формулам:

$$\lambda^* = \frac{\bar{x}_B}{\hat{s}^2}, \quad k^* = \frac{\bar{x}_B^2}{\hat{s}^2}. \quad (9)$$

Заключение

Разработанная автором модель движения автомобильного транспорта и пешеходов через регулируемое пересечение требует исходных данных, которые возможно снимать и обновлять автоматизированно с помощью видеодетекторов. Развитие компьютерных и информационных технологий делает возможным обновление этих данных в режиме онлайн. Этот факт позволяет использовать разработанную мезоскопическую модель в Интеллектуальных транспортных системах для прогнозирования изменения задержек пешеходов и автотранспорта с течением времени.

Список литературы

1. Куликов А.В., Фирсова С.Ю., Горина В.В. Совершенствование пассажирских перевозок в центральной части города Волгограда // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. 2015. Т. 10. № 4 (162). С. 78–83.
2. M. Di Francesco, Marcovich P.A., Pietschmann J.F., Wolfram M.T. On the Hughes' model for pedestrian flow: The one-demansional case. J. Differential Equations. 2011. V. 250 (3). P. 1334–1362.
3. Jiang Y., Zhang P. Modelling and simulation of pedestrian flow throw hydrodynamic. Procedia Engineering. 2012. V. 31. P. 1039–1044.
4. Johansson F. Microscopic Modelling and Simulation of Pedestrian Traffic. Lincoping University Department of Scince and Technology. Lincoping, Sweden, 2013. P. 119.
5. Наумова Н.А. Теоретические основы и методы автоматизированного управления транспортными потоками средствами мезоскопического моделирования: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.10. Краснодар, 2015. 331 с.
6. Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Кластерный анализ // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ.; Под. ред. И.С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
7. Наследов А.Д. IBM SPSS 20 Statistics и AMOS: профессиональный статистический анализ данных. Практическое руководство. СПб.: Питер, 2013. С. 416.
8. Данович Л.М., Наумова Н.А., Булатникова И.Н., Карачанская Т.А., Коренева О.В., Бочарова-Лескина А.Л., Чубырь Н.О., Егоров Ю.В., Стягун Д.И. Методы математического моделирования технических и технологических процессов: учеб. пособие. Краснодар: Кубанский гос. техн. ун-т, 2018. 236 с.