УДК 519.6

ШАБЛОН ПЕРЕДВИЖЕНИЯ УЗЛОВ DTN СЕТИ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕВИ

© 2015 А.Ю. Привалов, А.А. Царёв

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 30.07.2015

Предложена математическая модель мобильности узлов DTN сети. Длины перемещений отдельных узлов сети внутри локации, в данной модели, являются случайной величиной с распределением Леви. Между отдельными локациями узел перемещается случайно. Данная модель была реализована в среде имитационного моделирования OMNeT++. Представлены экспериментальные результаты моделирования перемещений узлов сети и сравнение их с реальными данными.
Ключевые слова: модель мобильности, распределение Леви, DTN, MANET, OMNeT++.

ВВЕДЕНИЕ

MANET — беспроводные децентрализованные самоорганизующиеся сети, состоящие из мобильных устройств. Каждое такое устройство может независимо передвигаться в любых направлениях, и, как следствие, часто разрывать и устанавливать соединения с соседями. DTN (Delay-Tolerant Networking) – подход к построению архитектур сетей, толерантных к задержкам и частым обрывам связи. Под задержками в DTN в данном контексте понимаются задержки, порождаемые транзитными узлами или ограничениями пропускной способности канала связи.

Самоорганизующиеся сети MANET (и DTN в частности) обладают следующими преимуществами над беспроводными сетями традиционной архитектуры: возможность передачи данных на большие расстояния без увеличения мощности передатчика; устойчивость к изменениям в инфраструктуре сети; возможность быстрой реконфигурации в условиях помех; простота и высокая скорость развертывания.

Однако, организация эффективной работы и получение указанных выше преимуществ требует решения множества проблем. В настоящее время можно выделить несколько классов таких проблем: обеспечение помехоустойчивости, обеспечение безопасности передаваемых данных, проблема общей пропускной способности сетей, проблема эффективности применяемых методов маршрутизации.

Узлы в мобильных сетях, по своей природе, взаимодействуют как мобильные устройства, полагаясь на ближайших соседей для поддержания сетевого соединения или для ретрансляции сообщений: для DTN сетей основной принцип – это «Store-Carry-Forward» («Сохранил-Перенёс-Передал»). Поэтому шаблон (характер) передвижений данных узлов сильно влияет на производительность мобильных сетевых протоколов. От данного шаблона передвижений зависит такая важная характеристика, как время взаимодействия узлов (время, которое проходит между двумя последовательными взаимодействиями одного объекта с любым другим). Так как беспроводные устройства часто переносятся людьми, то понимание шаблонов перемещения людей приведёт к более реалистичному моделированию сетей и к более точному моделированию производительности протоколов в таких сетях.

Широко используемые в настоящее время шаблоны (или модели) перемещений в исследованиях компьютерных сетей это: модели случайных перемещений (RWP) [1], модели случайных блужданий [2], в частности, модель броуновского движения или модель перемещений Маркова (BM) [3]. Эти модели достаточно просты как для теоретической трактовки, так и для моделирования в средах имитационного моделирования с возможностью масштабирования. Однако адекватность и корректность шаблонов подобного рода остаётся предметом исследований, и задача построения адекватных шаблонов мобильности является весьма важной и актуальной.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В предлагаемом нами шаблоне мобильности важную роль играет известная модель перемещений Леви [6], поэтому ниже приведём её математическое описание, а также использование её для описания мобильности людей.

Модель перемещений Левиотносится к моделям случайных перемещений, и описывает мобильность, которая обладает свойством супердиффузии: её среднее квадратичное отклонение пропорционально t^{γ}, для $\gamma > 1$, где t – время. Супердиффузия перемещений Леви моделирует наличие «тяжелого хвоста» у распределения вероятностей длины перемещений.

Привалов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики. E-mail: privalov1967@gmail.com
Царев Александр Александрович, аспирант кафедры прикладной математики. E-mail: al-xandr@yandex.ru

Перемещение определяется как самый длинный прямолинейный переход объекта из одного места в другое без изменения направления или паузы. Путь, сложенный из последовательных перемещений, будем называть трассой. Интуитивно понятно, что блуждания Леви состоят из множества коротких переходов и появления редких длинных.

Вместо распределения Леви, основанного на обычном распределении Парето, на практике используется усечённое распределение (TLW – Truncated Levy Walk), использующее усечённое распределение Парето для длины передвижений и интервала времени остановки, с целью моделирования шаблона перемещений на ограниченной области [4] и [5]. Блуждания Леви определяются как непрерывные во времени случайные перемещения с точками поворота в тех местах, где оканчивается очередное перемещение. Длины перемещений распределены по закону Леви и имеют следующие статистические особенности:

- среднее квадратичное отклонение (СКО) бесконечно;
- распределение длины прыжка подчиняется распределению с тяжёлым хвостом.

В данной модели перемещений предполагается, что некий объект совершает свои прыжки исходя из заданной функции плотности распределения. Данная функция в общем виде задаётся как функция двух переменных (по пространству и по времени):

$$\Phi\left(\vec{r},t\right)=\phi\left(t\,|\,\vec{r}\right)p\left(\vec{r}\right), \qquad (1)$$

где $p\left(\vec{r}\right)$ это плотность вероятности того, что будет сделан прыжок на длину вектора $\vec{r}$ в направлении вектора $\vec{r}$ и $\phi\left(t\,|\,\vec{r}\right)$ это условная плотность вероятности того, что на такие прыжки потребуется время t. Величины $\vec{r}$ и t в (1) определяют скорость прыжка. Когда $p\left(\vec{r}\right)$ является распределением с тяжёлым хвостом, то процесс с плотностью распределения $\Phi\left(\vec{r},t\right)$ представляет перемещения Леви [6].

Как показано в [4] средняя скорость перемещений людей не постоянна, а растёт с ростом длин перемещений, потому что длинные перемещения обычно возникают, когда участники используют транспорт. Чтобы отобразить эту тенденцию, модель в [6] использует следующую зависимость между длительностью прыжка и его длинной:

$$\Delta t_f = kl^{1-\rho}, \quad 0\le\rho\le 1, \qquad (2)$$

где k и ρ некие константы, l – длина перемещения, Δt_f – его длительность.

В начале каждого шага по генерации очередного перемещения объект выбирает направление Θ случайным образом из равномерного распределения угла на отрезке [0, 360], длину перемещения l и время паузы Δt_p после перемещения из соответствующих распределений $p\left(l\right)$ и $\psi\left(\Delta t_p\right)$, и время прыжка выбирается в соответствии с формулой (2). Само распределение Леви с нормирующим множителем c и экспонентой α в терминах преобразования Фурье имеет вид [4]:

$$f_X(x)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\exp\left(-itx-\left|ct\right|^{\alpha}\right)dt. \qquad (3)$$

Для $\alpha=1$ распределение (3) является распределением Коши, а при $\alpha=2$ оно является распределением Гаусса с параметром $\sigma=\sqrt{2}c$. Асимптотически, для $\alpha<2$ плотность в (3) можно аппроксимировать функцией $\frac{1}{\left|x\right|^{1+c}}$.

Для модели TLW распределения $p\left(l\right)$ и $\psi\left(\Delta t_p\right)$ являются распределениями Леви с коэффициентами c_α,α и c_β,β соответственно – это параметры моделирования. Для моделирования реальных трасс нужно определить эти параметры, они позволят сделать искусственные трассы близкими к реальным в статистическом смысле.

Трассы реальных перемещений записываются с помощью GPS датчиков, переносимых участниками эксперимента. Некоторые подобные данные доступны в [7]. Данные в этих трассах представляют собой набор записей вида «время – место положение». Как показано в [4], [5] и [8], обработка этих данных показывает, что модель перемещений Леви хорошо описывает перемещения людей только на небольшие расстояния.

Далее приведём принципы обработки реальных данных, и получение из них параметров, необходимых для моделирования.

Будем называть путевой точкой, согласно [8], круг радиусом R=5 м, в котором человек проводит более T=30 сек. Положение некоторой путевой точки — это положение центра круга. Путевые точки определяются из реальных трасс перемещений людей.

Определяются они следующим образом: просматриваются точки трасс в порядке их следования, и определяется, лежат ли последовательные точки в круге радиусом R с центром, координаты которого есть среднее от координат этих точек. Как только очередная точка не попадает в такой круг, определяется, в течение какого времени предыдущие точки туда попадали. Если это время больше, чем T, то констатируем наличие путевой точки, все точки, кроме последней, приписываем ей, записываем её параметры (координаты, время, в ней проведённое, и количество точек в ней), и начинаем работу алгоритма снова, с той последней точки исходной трассы, которая туда не вошла.

Если промежуток времени внутри круга ещё не достиг T, тогда удаляется из набора самая старая (самая первая из туда попавших) точка, и проверяется оставшийся набор на принадлежность новой потенциальнойпутевой точке, вместе с последней точкой (которая в старый круг не вошла). Если теперь всё в круге, то продолжается добавление новых точек в набор. Если нет – опять удаляется самая старая точка, и так до тех пор, пока все оставшиеся точки не попадут в новый круг (возможно, там останется только одна точка).

В результате такой «агрегирующей» обработки получается последовательный набор путевых точек, с целью более чёткого определения факта смены местоположения одного человека, т.е. все положения в указанном радиусе в течение указанного порога времени принимаются за одну точку, в которой он провёл некоторое время. Радиус и порог времени определяются, исходя из типичного поведения пользователей.

После этого определяются посещённые локации – прямоугольные кластеры, объединяющие близкие точки. Локации определяются как транзитивное замыкание точек, находящихся друг от друга на расстоянии не более 100 м. Данные локации очерчивают типичные области скопления пользователей.

Из реальных исходных трасс получаются численные оценки распределения вероятностей длин перемещений между путевыми точками в одной локации и времён остановки (пауз) в них. На основе этих распределений выбираются параметры c_α, α и c_β, β для распределения СВ по закону Леви (3) как для длин перемещений, так и для пауз соответственно. Эти параметры будут использоваться для моделирования перемещения пользователя внутри одной локации, ими подбирается близость смоделированных распределений к реальным.

Предлагаемый нами шаблон перемещений, организован следующим образом: движение объекта начинается в произвольной локации, и проходит там согласно модели перемещений Леви до тех пор, пока очередное перемещение не выведет объект за пределы локации. После этого выбирается следующая локация случайным образом (самым простым на данный момент способом с целью увеличения скорости моделирования), и объект перемещается туда. Внутри новой локации объект опять перемещается согласно модели Леви.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для экспериментальных исследований данного шаблона перемещений она была реализована модель в имитационной среде моделирования OMNeT++ [9] на базе фреймворка INET [10]. Для этого был реализован генератор псевдослучайных чисел с распределением Леви (3). Результаты моделирования представляют собой искусственно сгенерированные трассы человеческих перемещений, которые потом проходят такой же анализ, как и реальные трассы, для получения численных оценок распределения вероятностей длин перемещений и пауз. В данной работе представлены некоторые результаты экспериментов с трассами с территории кампусов университетов KAIST и NCSU [7]. Результаты моделирования можно видеть на рис. 1 и 2 в логарифмических осях с изображёнными графиками вида:

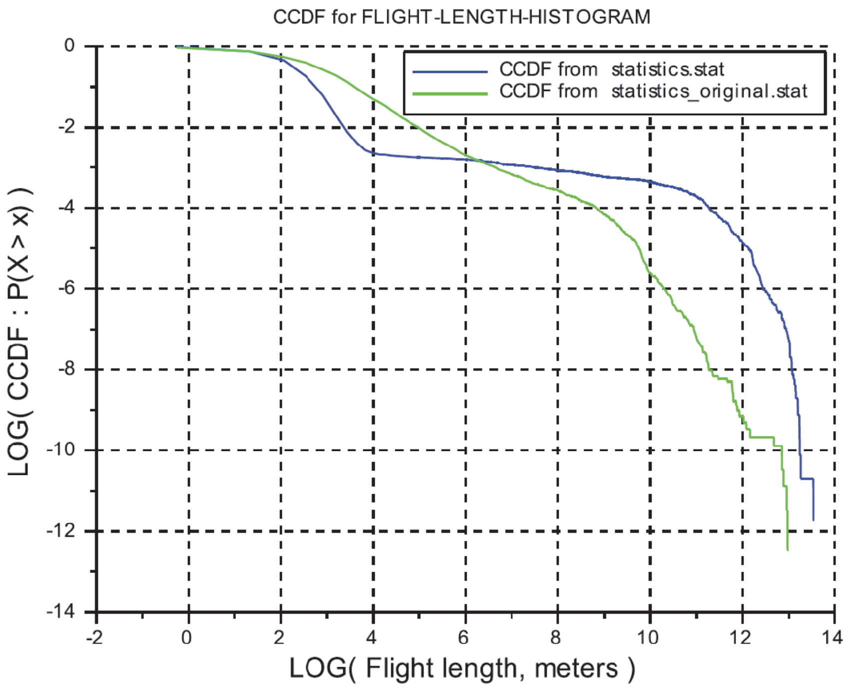

Рис. 1. Функции распределения вида (4) в логарифмических осях координат для реальных и смоделированных трасс на территории KAIST

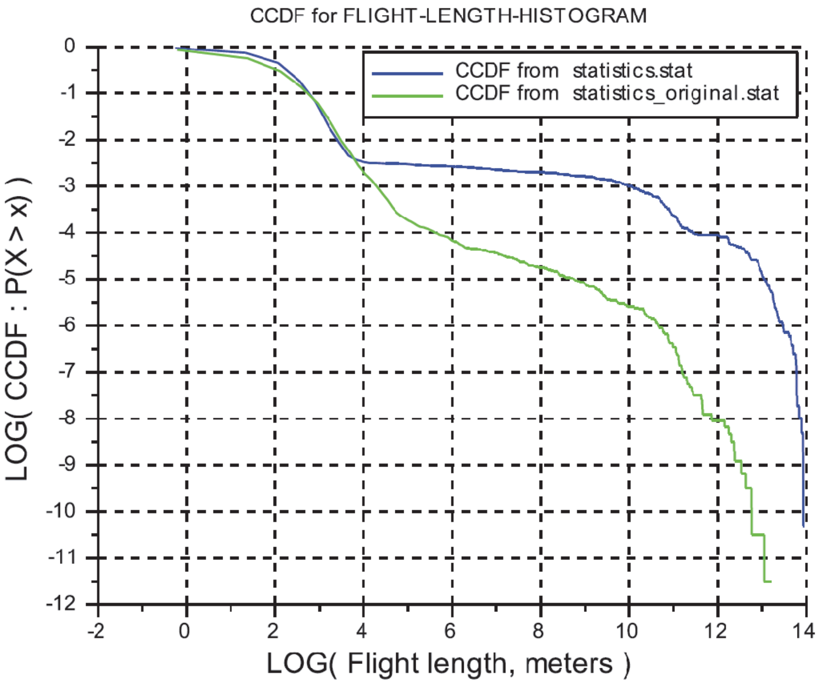

Рис. 2. Функции распределения вида (4) в логарифмических осях координат для реальных и смоделированных трасс на территории NCSU

$$\overline{F}(x) = P(X > x) = 1 - F(x). \quad (4)$$

Как видно на рис. 1 и 2, общая форма графиков довольно близка, что говорит об адекватности представленной модели, хотя на некоторых участках количественные различия весьма значительны. Начальные участки графиков (примерно до 16 метров – отметка 4 на логарифмической оси) соответствуют перемещениям внутри локации согласно модели Леви. Остальная часть графиков – в основном перемещения между локациями. В данный момент основные количественные различия наблюдаются именно там. В дальнейшей работе предполагается уменьшить эти различия путём перехода от случайного выбора следующей локации к более реалистичным моделям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена модель мобильности отдельных узлов сети – модель TLW с использованием информации о скоплениях людей на реальной местности (в виде посещённых локаций). Данная модель отличается простотой и выигрывает в скорости моделирования у модели из [5]. Далее планируется разработать алгоритм выбора очередной локации с использованием информации об истории передвижения людей, что позволит приблизить имитацию перемещений к реальной ситуации. На дальнейших этапах научного исследования данная модель будет использоваться для моделирования беспроводных сетей с динамически изменяющейся топологией, с целью проверки эффективности протоколов маршрутизации и исследование влияния статистических особенностей распределения с тяжёлым хвостом для перемещений на производительность мобильных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks / *C. Bettstetter, G. Resta, and P. Santi* // IEEE Trans. Mobile Comput. 2003. Vol. 2, № 3. P. 257- 269.
2. A survey of mobility models for ad hoc network research / *T. Camp, J. Boleng, and V. Davies* // Wireless Commun. Mobile Comput. 2002. Vol. 2, № 5. P. 483-502.
3. *Bettstetter C.* Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects // Mobile Comput. Commun. *Rev.* 2001. Vol. 5, № 3. P. 55- 66.
4. On the Levy-Walk Nature of Human Mobility / *I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, S. J. Kimand S. Chong* // IEEE/ACM Transactions On Networking. 2011. Vol. 19, № 3. P. 630- 643.
5. SLAW: Self-Similar Least-Action Human Walk / *K. Lee, S. Hong, S. J. Kim, I. Rhee and S. Chong* // IEEE/ACM Transactions On Networking. 2012. Vol. 20, № 2. P. 515-529.
6. Levy dynamics ofenhanced diffusion: Application to turbulence / *M. F. Shlesinger, G. M. Zaslavsky and J. Klafter* // ys. Rev. Lett.1987.Vol. 58. P. 1100-1103.
7. *Kotz D.* Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth // Dartmouth College. 2015. URL: http://www.crawdad.org/index.html (дата обращения 12.06.2015).
8. Lee, K.Demystifying Levy Walk Patterns in Human Walks / *K. Lee, S. Hong, S. J. Kim, I. Rheeand S. Chong* // In: *Technical Report*, CSC, NCSU. 2008. URL: http://

research.csc.ncsu.edu/netsrv/sites/default/files/Demystifying_Levy_Walk_Pattern.pdf (дата обращения 12.06.2015).
9. *Varga A.* OMNeT++ // OpenSim Ltd. 2015. URL: http://www.omnetpp.org (дата обращения 12.06.2015).
10. *Varga A.* INET Framework // OpenSim Ltd. 2015. URL: http://inet.omnetpp.org (дата обращения 12.06.2015).

MOBILITY MODEL OF DTN NODES BASED ON LEVY DISTRIBUTION

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Mathematical mobility model of DTN nodes is proposed. In the model is assumed, that a lengths of a single node hops inside one hot spot is random value with Levy distribution. Between hot spots the node moves randomly. The model was implemented in the Discrete Event Simulator OMNeT++. The experimental results of the simulation of nodes' movements and comparison with real data are presented.
Key words: mobility model, Levy distribution, DTN, MANET, OMNeT++.

Aleksander Privalov, Doctor of Technology Sciences, Professor, Head of Applied Mathematics Department at SSAU.
E-mail: privalov1967@gmail.com
Aleksander Tsarev, Postgraduate of Applied Mathematics Department at SSAU. E-mail: al-xandr@yandex.ru