

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЙ УЗЛОВ DTN СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ ВЫБОРЕ ЛОКАЦИЙ ПОСЕЩЕНИЯ

А.Ю. Привалов, А.А. Царёв

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национально исследовательский университет)

Предложены три модификации математической модели мобильности узлов DTN сети на основе распределения Леви. Длины перемещений отдельных узлов сети внутри локации, в данных моделях, являются случайной величиной с распределением Леви. Между отдельными локациями узел перемещается случайно для первой модификации, с использованием принципа наименьшего действия во второй модификации и с использованием принципа наименьшего действия с ограниченным количеством посещений всех локаций в третьей модификации. Данные модели были реализованы в среде имитационного моделирования OMNeT++. Представлены экспериментальные результаты моделирования перемещений узлов сети и сравнение их с реальными данными.

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.

Для маршрутизации на сетевом уровне используются специальные протоколы, ориентированные на динамические сети: реактивные: ([AODV](#), [DSR](#) и др.) и проактивные ([OLSR](#) и др.). Предпочтение одному или другому виду протоколов может быть отдано только с учетом обстановки и скоростей движения абонентов. 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.

В данной работе проводится построение модификаций модели мобильности Truncated Levy Walk [4] и исследование эффективности моделирования перемещений каждой моделью.

Модель мобильности Леви

Для анализа производительности мобильных сетей, как говорилось выше, используются различные модели мобильности. В предлагаемом нами шаблоне мобильности важную роль играет известная модель перемещений Леви [7], поэтому ниже приведём её математическое описание, а также использование её для описания мобильности людей.

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*.

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 соответствующими усекающими факторами τ_1 и τ_2), с целью моделирования шаблона перемещений на ограниченной области [5, 6].

Само распределение Леви с нормирующим множителем c и экспонентой α в терминах преобразования Фурье имеет вид [5]:

$$f_x(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-itx - |ct|^\alpha) dt. \quad (1)$$

В данной модели перемещений предполагается, что некий объект совершает свои прыжки исходя из заданной функции распределения Леви для длины прыжков и для длительности паузы, следующей за прыжком, с коэффициентами c_α, α и c_β, β соответственно – это параметры моделирования. Для моделирования трасс нужно определить эти параметры, они позволят сделать искусственные трассы близкими к реальным в статистическом смысле.

Как показано в [5] средняя скорость перемещений людей не постоянна, а может быть выражена следующей зависимостью между длительностью прыжка и его длиной:

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

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

Модель Леви с посещенными локациями

Трассы реальных перемещений записываются с помощью GPS датчиков, переносимых участниками эксперимента. Некоторые подобные данные доступны в [8]. Данные в этих трассах представляют собой набор записей вида «время – место положение». Как показано в [5, 6] и [9], обработка этих данных показывает, что модель перемещений Леви хорошо описывает перемещения людей только на небольшие расстояния.

Будем называть *путевой точкой*, согласно [9], 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.

В результате «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 для длин перемещений между путевыми точками в одной локации и времён остановки (пауз) в них. На основе этих распределений определяются параметры c_α, α и c_β, β . Эти параметры будут использоваться для моделирования перемещения пользователя внутри одной локации.

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 алгоритм пытается повернуть точку назначения в противоположный по диагонали квадрант от текущего квадранта, в котором находится текущая точка (квадранты получаются от деления прямоугольной локации на 4 части прямыми, проходящими через центр локации). При этом повороте длина перемещения сохраняется,

чтобы не портить распределение вероятностей длины перемещений. Эта процедура проводится с целью сохранения текущей локации. Если же сохранить текущую локацию не получается, то выбирается следующая локация. Следующая локация, в данной модификации, выбирается случайным образом и каждая локация может быть выбрана только один раз.

Модель Леви с алгоритмом LATP

Данные перемещения полностью соответствуют предыдущим в части генерации очередных перемещений и пауз, но отличается в части выбора очередной локации.

Перемещения людей зависят от способа выбора следующей путевой точки. В данном выборе играет роль много факторов. Каждый человек имеет различные факторы, и персональные ситуации, поэтому почти невозможно получить алгоритм, учитывающий все эти факторы. В [9] показано, что выбор очередной локации сильно зависит от локации. Принцип наименьшего действия Мопертюи в данном случае может дать некоторое объяснение: люди стремятся совершать действия, требующие наименьших усилий. В связи с этим можно ввести алгоритм, отражающий данную тенденцию выбора следующей локации (из множества заранее известных), в зависимости от расстояния до неё. Данный алгоритм имеет название Least Action Trip Planning (LATP) – «планирование перемещений, требующих меньших усилий».

Опишем данный алгоритм. Находясь в текущей локации i из множества всех локаций V , вероятность выбора следующей локации с номером j вычисляется по формуле:

$$P_j = \frac{1/d_{ij}^a}{\sum_{k \in \{V-V'\}} 1/d_{ik}^a}, \quad (3)$$

где d_{ij} – евклидово расстояние от локации i до j , параметр a – фиксированная вещественная величина со значениями в диапазоне $[0; +\infty]$, и V' – набор локаций из V , которые уже посещены.

Модель Леви с алгоритмом LATP с множественным посещением локаций

Данная модификация почти полностью соответствует предыдущей модели, за исключением возможности выбирать ранее посещённые локации. Экспериментальный анализ трасс [8] перемещений людей показал, что люди также возвращаются в ранее посещённые локации, что не учитывалось в модели [9]. В связи с этим из записей трасс получается количество посещений всех ранее определённых локаций и проводится моделирование с учётом этой информации. Перед моделированием все трассы анализируются и составляется гистограмма частоты посещения каждой локации.

Моделирование

Для экспериментальных исследований данного шаблона перемещений она была реализована модель в имитационной среде моделирования OMNeT++ на базе фреймворка INET. Для этого был реализован генератор псевдослучайных чисел с распределением Леви (1). 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 [8].

Параметры моделирования следующие: $c_\alpha = 0,5$ и $\alpha = 1,5$ для длины прыжка, $c_\beta = 0,1$ и $\beta = 0,5$ для длительности паузы. Длительность модельного времени равна 2 дням (или 172800 модельным секундам). Площадь моделирования одинакова с площадью из исходных трасс.

Результаты имитации модели Леви с посещёнными локациями (а также в работе [4] представлены результаты без попытки сохранить локацию поворотом точки назначения) можно видеть на рисунке 1 в логарифмических осях с изображёнными графиками вида:

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

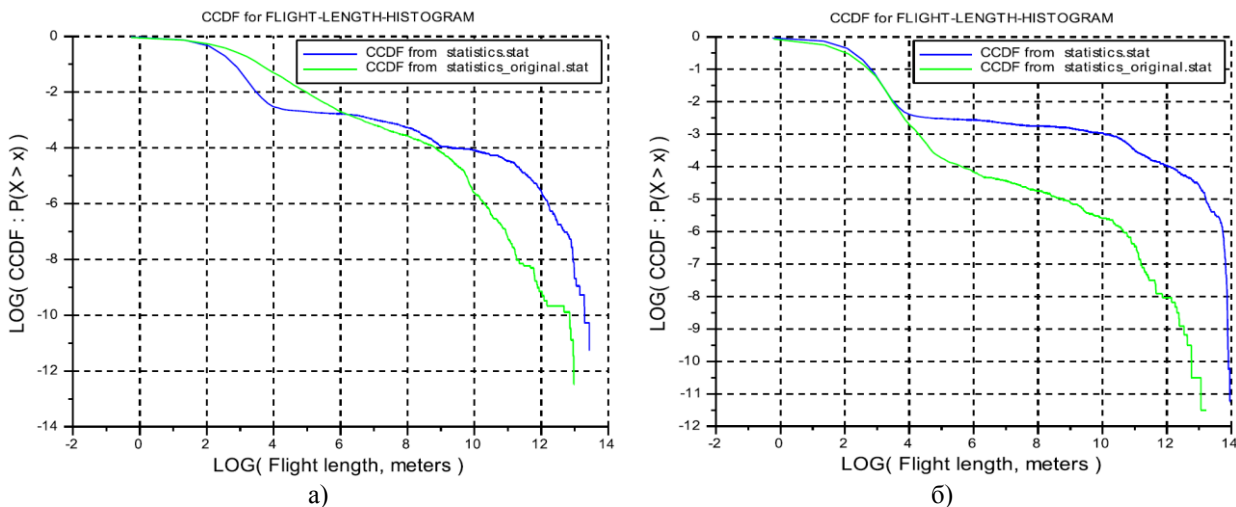


Рисунок 1 – Функции распределения вида (4) в логарифмических осях координат для реальных и смоделированных трасс на территории KAIST (а) и на территории NCSU (б)

Как видно на рисунке 1, 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.

Результаты имитации модели Леви с алгоритмом LATP можно видеть на рисунке 2 в логарифмических осях с изображёнными графиками вида (4).

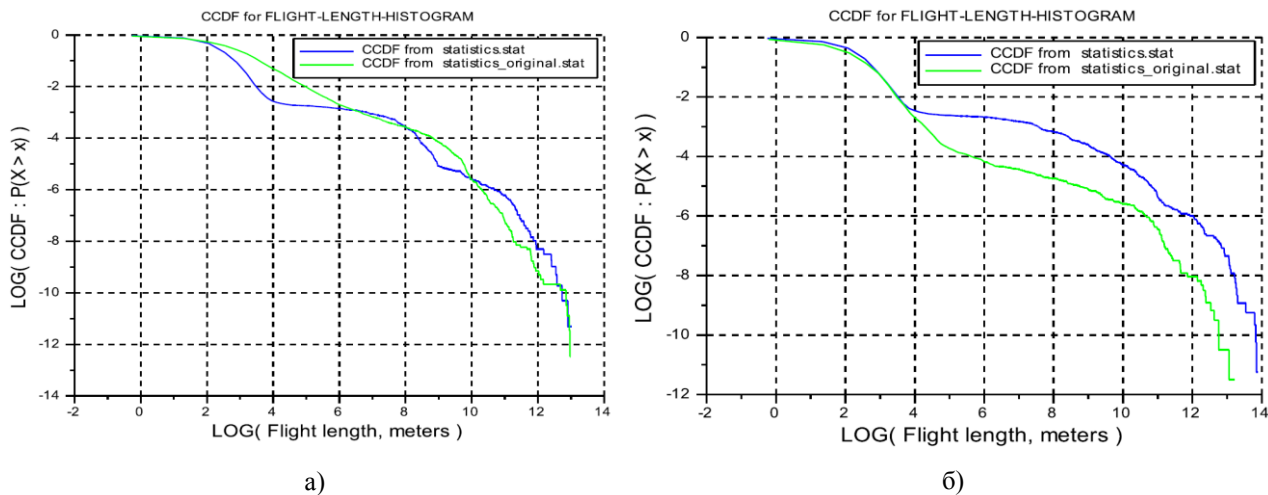


Рисунок 2 – Функции распределения вида (4) в логарифмических осях координат для реальных и смоделированных трасс на территории KAIST (а) и на территории NCSU (б)

Как видно на рисунке 2, общая форма графиков стала гораздо ближе, чем для соответствующих графиков на рисунке 1, что говорит о том, что модификация модели точнее имитирует статистические особенности. Однако различия всё ещё остаются. Как можно видеть улучшилась та часть графика, которая соответствует переходам между локациями, что свидетельствует об адекватной работе алгоритма LATP.

Результаты имитации модели Леви с алгоритмом LATP с множественным посещением локаций можно видеть на рисунке 3.

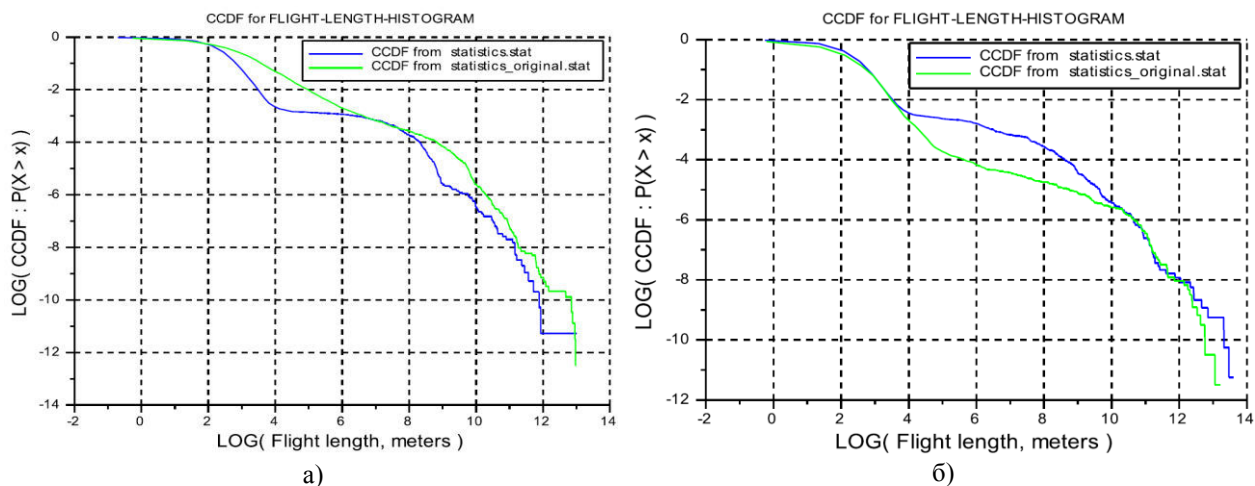


Рисунок 3 – Функции распределения вида (4) в логарифмических осях координат для реальных и смоделированных трасс на территории KAIST (а) и на территории NCSU (б)

Как видно на рисунке 3, форма хвоста графиков (значение ординат после абсциссы, равной 4) от модели приблизилась к форме соответствующих графиков от реальных трасс, по сравнению с предыдущими модификациями модели, что свидетельствует о большей адекватности последней.

Заключение

Построены 3 модификации модели мобильности узлов сети: модель TLW с использованием информации о скоплениях людей на реальной местности в виде посещённых локаций, та же модель с алгоритмом LATP выбора очередной локации, а также модель с алгоритмом LATP с множественным посещением локаций. Проведён сравнительный анализ результатов моделирования с реальными перемещениями.

Они отличаются простотой реализации и должны выигрывать во времени моделирования у других популярных моделей (например, [6]). Далее планируется разработать алгоритм выбора очередной локации с использованием информации об истории передвижения людей, что позволит приблизить имитацию перемещений к реальной ситуации, а также планируется провести сравнительный анализ разработанных модификаций с существующими [6] на предмет скорости моделирования.

Литература

1. Bettstetter C., Resta G. and Santi P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. Mobile Comput.* Vol. 2. No. 3. 2003. pp. 257–269.
2. Camp T., Boleng J. and Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Commun. Mobile Comput.* Vol. 2. No. 5. 2002. pp. 483–502.
3. Bettstetter C. Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects. *Mobile Comput. Commun. Rev.* Vol. 5 No. 3. 2001. pp. 55–66.
4. Привалов А.Ю., Царёв А.А. Шаблон передвижения узлов DTN сети на основе распределения Леви / Перспективные информационные технологии (ПИТ 2015), Том 2: труды Международной научно-технической конференции / под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН. 2015. С. 30 – 34.
5. Rhee I., Shin M., Hong S., Lee K., Kim S. J. and Chong S. On the Levy-Walk Nature of Human Mobility. *IEEE/ACM Transactions On Networking.* Vol. 19. No. 3. 2011. pp. 630–643.
6. Lee K., Hong S., Kim S. J., Rhee I. and Chong S. SLAW: Self-Similar Least-Action Human Walk. *IEEE/ACM Transactions on Networking.* Vol. 20. No. 2. 2012. pp. 515–529.
7. Shlesinger M. F., Zaslavsky G. M. and Klafter J. Levy dynamics of enhanced diffusion: Application to turbulence. *ys. Rev. Lett.* Vol. 58. 1987. pp. 1100–1103.
8. Kotz, D. Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth // Dartmouth College. 2015. URL: <http://www.crowdad.org/index.html>.
9. Lee, K. Demystifying Levy Walk Patterns in Human Walks / K. Lee, S. Hong, S. J. Kim, I. Rhee and S. Chong // In: *Technical Report, CSC, NCSU.* 2008. URL: http://research.csc.ncsu.edu/netrv/sites/default/files/Demystifying_Levy_Walk_Patterns.pdf