

# Сравнение характеристик протоколов маршрутизации в беспроводных DTN сетях для гибридной модели подвижности узлов

А.А. Царёв<sup>а</sup>, А.Ю. Привалов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

## Аннотация

Для гибридной модели подвижности узлов в DTN сети представлены результаты имитационного моделирования популярных протоколов маршрутизации в DTN беспроводных сетях. Исследовалась вероятность доставки сообщения и среднее время доставки сообщения. Имитационная модель реализована в системе имитационного моделирования OMNeT++. В результате имитационных экспериментов установлено, что характер перемещения узлов, который имеет периодическую повторяемость, имеет влияние на эффективность протоколов маршрутизации, использующих различные принципы определения маршрута.

**Ключевые слова:** беспроводная DTN сеть; протокол маршрутизации; модель человеческой подвижности; имитационное моделирование; система имитационного моделирования OMNeT++

## 1. Введение

Ввиду большой сложности моделирования работы мобильных беспроводных сетей вообще, и т.н. мобильных беспроводных сетей, терпимых к задержкам (delay-tolerated networks или DTN) в частности, имитационное моделирование играет ведущую роль в исследовании работы таких сетей, в том числе характеристик протоколов маршрутизации. Очевидно, что модель подвижности, используемой при имитации таких сетей, весьма сильно влияет на получаемые характеристики, и потому должна как можно ближе отражать черты реальной мобильности узлов сети.

В результате исследований реальной мобильности, привлекавших большое внимание научного сообщества в последнее десятилетие, был выявлен целый ряд своеобразных черт реальной человеческой мобильности, которые необходимо отразить в адекватной модели. Среди них т.н. кластеризация трасс реальной мобильности, распределение вероятностей расстояний перемещений, близкое к распределению Леви, и т.н. персистентность (т.е. примерное постоянство) ежедневных маршрутов одного отдельного человека, если рассматривается работа системы на протяжении нескольких дней (см, например, [1-4]).

В [9, 14] авторами данного доклада была предложена т.н. гибридная модель человеческой подвижности, которая объединяет в себе все важные черты человеческой мобильности, перечисленные выше. Она является развитием моделей, предложенных в [7,8], но более эффективна при имитационном моделировании, и в ней более последовательно проведён учёт персистентности индивидуальных маршрутов, в том числе с помощью введения специальной характеристики – *коэффициента персистентности  $p$* .

В данной работе с помощью этой модели подвижности, реализованной в системе имитационного моделирования OMNeT++, исследуются характеристики нескольких популярных протоколов маршрутизации в DTN сетях, а именно протокол LET (last encounter time – «по последнему времени встречи»), протокол MFV (most frequent visible – «наиболее часто видимый») и протокол PROPHET (Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity) [15]. Для этих протоколов определяются такие характеристики, как вероятность доставки сообщения  $Pr(delivery)$  и среднее время доставки сообщения  $TTL$  для различных параметров сети, и определяется, какой из этих протоколов является наиболее эффективным в соответствующей ситуации.

## 2. Краткое описание гибридной модели мобильности

Подробное описание данной модели приведено в [9, 14], поэтому здесь мы кратко напомним основные её черты, более подробно остановившись на тех аспектах, которые ранее были рассмотрены мало.

Движение одного отдельного узла (т.е. человека) рассматривается, как прямолинейные перемещения между т.н. путевыми точками, где делаются остановки на случайное время. Длины этих перемещений и времена остановок являются случайными величинами, с распределениями, близкими к распределениям Леви. Кроме этого, путевые точки группируются в кластеры, которые также называются «горячими точками» (hot spots), так как в реальности соответствуют тем местам (будем называть их локациями), где люди проводят значительное время в течение своей дневной активности (например, здания, где работают). При этом, для учёта персистентности вводится так называемый коэффициент персистентности, который равен доле кластеров, которые сохраняются в маршрутах одного узла в разные дни. Так как моделирование мобильности на периоде в несколько дней в предыдущих работах рассматривалось мало, здесь мы рассмотрим его подробнее.

Для большей адекватности модели, как локации, так и длительности дневных индивидуальных маршрутов берутся из реальных данных, доступных в [13]. В частности, в данном докладе используется так называемый набор трасс KAIST, который содержит данные об однодневных перемещениях нескольких десятков студентов Корейского института передовых технологий (Korea Advanced Institute of Science and Technology) по территории учебного кампуса.

В записях реальных трасс перемещения занимают в среднем 12 часов, минимальная трасса занимает 4.2 часа, максимальная – 23.3 часа. Так как длительность маршрутов разная, в модель введена возможность принудительного окончания трассы, которое случается через определённый заранее постоянный отрезок времени – *модельный день*. В модели длительность модельного дня  $d$  можно менять, в зависимости от характера перемещений узлов на конкретной территории. В данной статье представлены результаты моделирования при выборе длительности модельного дня равного среднему значению от длительностей маршрутов всех узлов из реальных трасс.

Из-за того, что разные маршруты занимают разное время, каждый пользователь, завершивший свой маршрут (в том числе и принудительно), возвращается в *домашнюю локацию* – локацию из которой начинал движение. Если маршрут пользователя оказался длиннее, чем модельный день, то в конце модельного дня пользователь должен идти домой, изменив, таким образом, маршрут. После возвращения в домашнюю локацию, до начала следующего модельного дня пользователь «засыпает», т.е. перестаёт быть источником сообщений в сети.

Перед началом нового дня маршруты меняются в соответствии с *коэффициентом персистентности*  $p$  – это доля заменяемых посещений во всём маршруте. Коэффициент  $p$  введён для возможности изменения маршрута во время всего моделирования от дня ко дню, чтобы имитировать возможность смены маршрута пользователем в реальности.

Каждая локация в реальном маршруте может посещаться пользователем несколько раз. Число таких возможных посещений назовём *кратностью* локации. При формировании нового маршрута все посещения всех локаций суммируются и часть суммы этих посещений из маршрута исключается (эта часть определяется коэффициентом  $p$ ). Далее подсчитывается количество путевых точек в исключённых локациях, чтобы их потом добавить. После удаления посещений в маршрут добавляются локации случайным образом из набора всех локаций, за исключением оставшихся в маршруте после удаления. Добавление локаций может быть с повторениями, чтобы воспроизвести кратность локаций. Путевые точки в новые локациях добавляются исходя из подсчитанной ранее суммы исключённых путевых точек, с целью сохранения общего количества путевых точек в новом маршруте таким же, как и до изменения. Данная логика генерации нового маршрута направлена на то, чтобы его длительность была близка к длительности предыдущего маршрута.

Но также помимо приближение новых генерируемых маршрутов к предыдущим маршрутам (или к первому) нужно приблизить первый модельный маршрут к реальному маршруту по длительности. Для этой цели менялись параметры генератора пауз между прыжками. Длительность пауз между прыжками в гибридной модели распределена по закону Леви [9, 14] с параметрами  $s$  и  $\alpha$ . Для изменения длительности пауз подбирался параметр масштабирования  $s$  таким образом, чтобы среднее квадратическое отклонение вектора длительностей маршрутов первого дня реальных трасс от вектора длительностей маршрутов первого дня смоделированных трасс было минимальным.

### 3. Протоколы маршрутизации

Протоколы маршрутизации сообщений, рассматриваемые в данном докладе, относятся к наиболее простым и основаны на использовании нескольких простых эвристик. Для их описания введём несколько определений. *Непосредственными соседями* или просто *соседями* будем называть те узлы, которые имеют активное сетевое соединение с текущим узлом в данный момент времени (т.е. находятся в радиусе действия устройства связи). Процесс маршрутизации пакета заключается в том, что нужно определить какому из соседей в данный момент времени выгоднее всего передать этот пакет, чтобы он в дальнейшем с наибольшей вероятностью достиг целевого узла, если непосредственное соединение с целевым узлом в данный момент времени отсутствует.

Прежде всего, во всех протоколах DTN сетей используется протокол передачи пакета *в один прыжок* – если у узла  $i$  есть пакет, адресованный узлу  $j$ , то проверяется наличие непосредственного соединения с узлом  $j$  и пакет передаётся ему, если соединение есть. Если же в числе непосредственных соседей нет целевого узла, но есть сосед, который одновременно и сосед целевого узла, то пакет посылаётся этому соседу (если таких несколько – то любому из них) – это протокол передачи пакета *в два прыжка*, которая тоже всегда используется.

Если с помощью данных простейших эвристик не получилось найти целевой узел или подходящий транзитный узел, тогда и начинается один из указанных протоколов (например, [10]):

- протокол Last Encountered Time (LET);
- протокол More Frequently Visible (MFV);
- предлагаемый протокол LET-MFV с порогом переключения (*гибридный протокол*);
- протокол PROPHEET [15].

Протокол LET посылает пакет от узла  $i$  тому непосредственному соседу, который позже всех (включая сравнение с текущим узлом  $i$ ) «видел» целевой узел  $j$  (то есть, имел активное сетевое соединение с этим узлом). Если таких узлов несколько, то пакет посылаётся случайному из них. Если никто из соседей ещё не «видел» целевой узел, то пакет никому не передаётся. Образно говоря, в процессе маршрутизации пакет «стремится догнать» свой целевой узел.

Протокол MFV работает с использованием истории о частоте встреч узлов между собой. От узла  $i$  пакет посылаётся тому транзитному узлу  $k$ , который чаще видит целевой узел  $j$ . Мера частоты встреч между узлами определяется как отношение общей суммарной длительности сетевого соединения ко всему времени моделирования. Суммарная длительность считается по ширине скользящего «окна» по дням моделирования. Ширина этого скользящего «окна» (в модельных днях) является параметром модели.

Для того, чтобы протокол MFV смогла работать нужно, чтобы сначала накопилась история о частоте встреч между узлами. Для этого в модели реализован этап загрузки, при котором сбор статистики для целевых показателей отключён.

Длительность данного этапа равна ширине скользящего «окна», т.е. как только пройдёт нужное количество дней, равное ширине окна, начинается сбор статистики.

Также реализован гибридный протокол из LET и MFV (LET-MFV). Он заключается в использовании LET только до некоторого временного порога, после которого начинает работать протокол MFV. Решение о выборе наилучшего транзитного узла сначала пытается найти протокол LET. Если все соседние узлы для текущего «видели» целевой узел позже, чем установленный порог, то протокол переключается на протокол MFV. Такая логика должна сделать ситуацию по маршрутизации оптимистичнее, так как таким образом имитируется учёт устаревания информации о том, когда узлы «видели» друг друга, после чего начинается работа по собранной статистике о частоте встреч – работа MFV.

Наконец, реализован упрощённый вариант протокола PROPNET. Вместо того, чтобы делать без разборочную репликацию пакетов на узлах сети в процессе распространения пакетов, как делают простые протоколы, основанные на репликации, PROPNET реализует «вероятностную маршрутизацию» [15].

#### 4. Экспериментальные результаты

Для сравнения результатов моделирования на основе гибридной модели, она была реализована в среде имитационного моделирования OMNeT++ [11] с помощью фреймворка INET [12] (подробнее описано в работе [9, 14]). Цель экспериментов – исследовать поведение протоколов LET, MFV, LET-MFV и PROPNET в зависимости от количества узлов  $N$  и коэффициента персистентности трасс  $p$  посредством сравнения целевых показателей протоколов маршрутизации: распределение вероятностей задержки доставки пакетов или распределение времени жизни пакетов –  $CCDF(TTL)$  и среднее время жизни  $TTL$  и вероятность доставки  $Pr(delivery)$ .

В работе представлены результаты моделирования протоколов для набора данных с территории Корейского института передовых технологий (KAIST) из коллекции [13]. Трассы собирались одинаковым образом: некоторое количество добровольцев (студенты университета) в течение дня носили в кармане GPS приёмники, которые записывали своё положение каждые 30 секунд. Эти данные использовались для нахождения реальных путевых точек, кластеров путевых точек и других параметров для гибридной модели.

Длительность модельного дня была зафиксирована  $d = 12$  модельных часов. Число узлов  $N$  менялось в экспериментах: 12, 23, 46. Для работы алгоритма MFV ширина «окна» в течение которого собирается информация о встречах равна 5 модельным дням. Длительность порога, необходимого для «загрузки» информации о встречах прежде, чем алгоритм начнёт работать, тоже равна 5 модельным дням. Параметры генератора пауз равны  $c = 18$  и  $\alpha = 0.5$ . Параметры генератора длины перемещений такие же как в работе [9, 14]. Радиус передатчиков узлов равен 100 метрам.

Эксперименты проводились при коэффициенте персистентности  $p = 0.5$  и  $p = 0.9$ . Количество узлов  $N$  в экспериментах было равным 46, 23, 12. Длительность модельного дня  $d$  была равна 12 модельным часам – данное значение модельного дня взято на основании выборочного среднего значения длительностей всех реальных маршрутов с данной территории. На рис. 1, 2 и 3 изображены функции распределений времени жизни пакетов  $CCDF(TTL)$  для протоколов для разного количества узлов  $N$  при коэффициенте персистентности  $p = 0.5$ . На рис. 4, 5 и 6 изображены функции  $CCDF(TTL)$  для разного количества узлов  $N$  при коэффициенте персистентности  $p = 0.9$ . Оценка среднего времени жизни пакета  $TTL$  представлена в таблице 1, а оценка вероятности доставки пакета  $Pr(delivery)$  для всех запусков модели представлены в таблице 2.

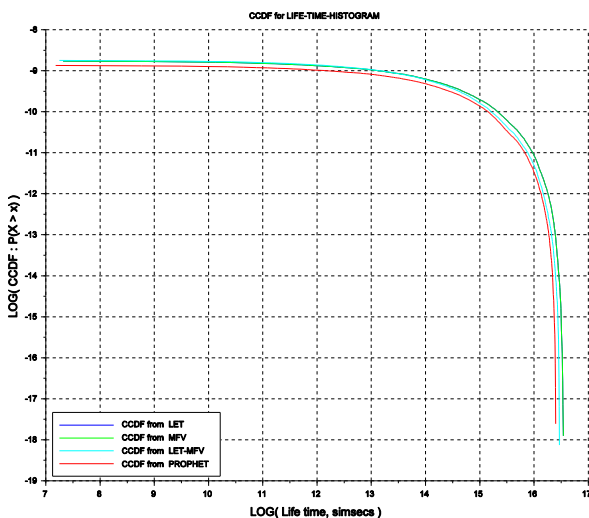


Рис. 1. Сравнение распределений  $CCDF(TTL)$  при  $N = 12$  и  $p = 0.5$ .

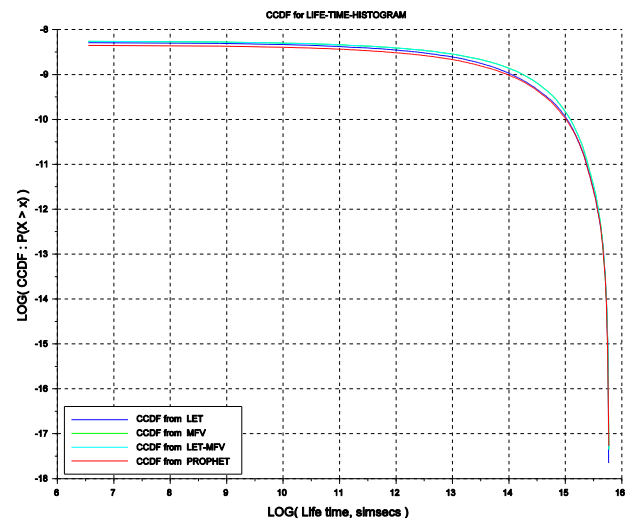


Рис. 2. Сравнение распределений  $CCDF(TTL)$  при  $N = 23$  и  $p = 0.5$ .

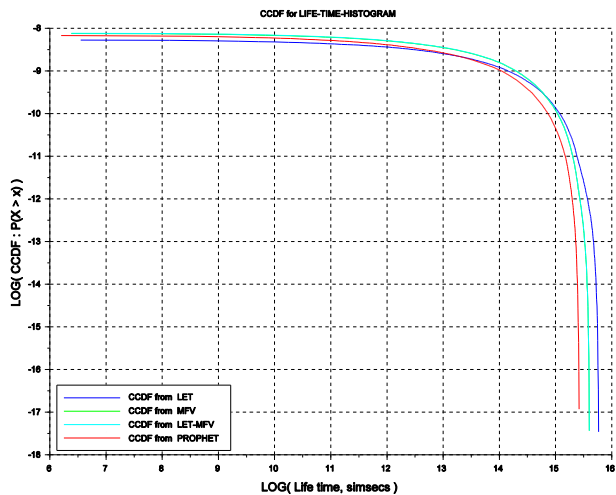


Рис. 3. Сравнение распределений  $CCDF(TTL)$  при  $N = 46$  и  $p = 0.5$ .

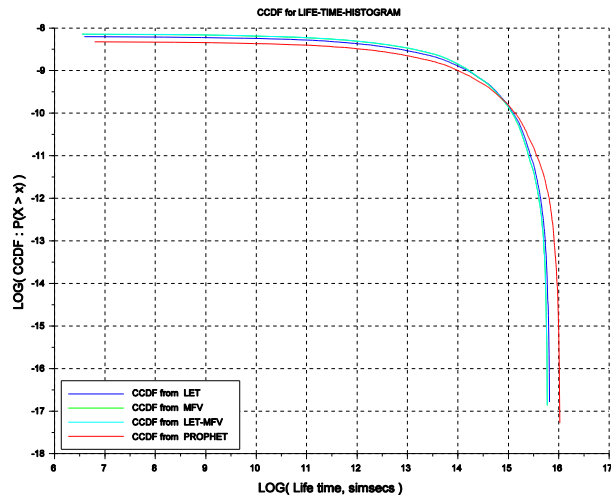


Рис. 4. Сравнение распределений  $CCDF(TTL)$  при  $N = 12$  и  $p = 0.9$ .

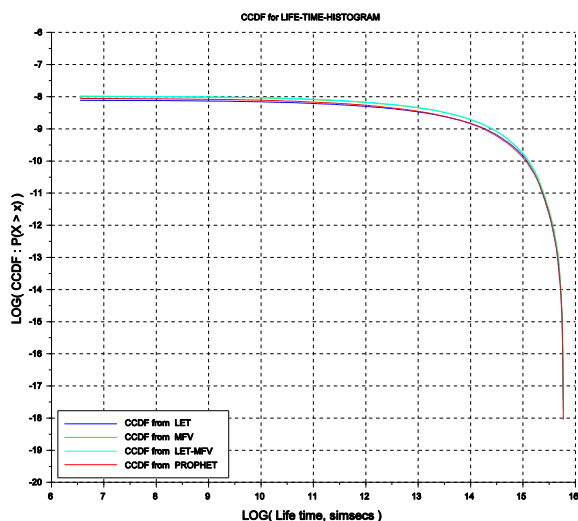


Рис. 5. Сравнение распределений  $CCDF(TTL)$  при  $N = 23$  и  $p = 0.9$ .

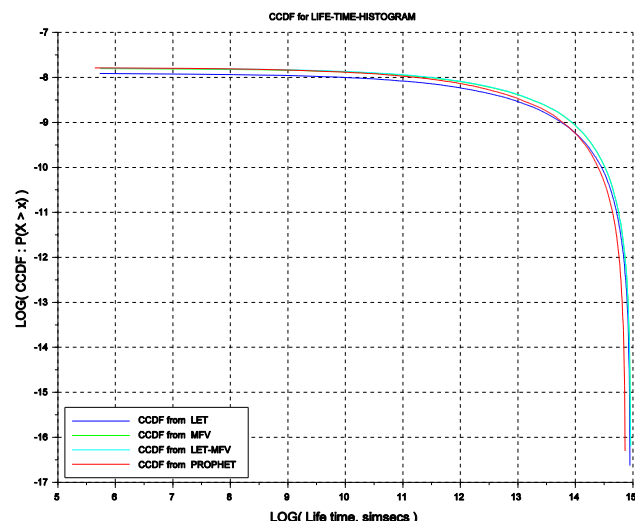


Рис. 6. Сравнение распределений  $CCDF(TTL)$  при  $N = 46$  и  $p = 0.9$ .

Таблица 1. Оценка среднего времени жизни пакета  $\overline{TTL}$  в модельных секундах

Количество узлов ( $N$ )	$p = 0.5$				$p = 0.9$			
	LET	MFV	LET-MFV	PROPHET	LET	MFV	LET-MFV	PROPHET
46	52060.2	49784.8	<u>49575.9</u>	56642.8	45952.1	43695.7	<u>43022.3</u>	43560.5
23	52522.1	50324.6	<u>50176.4</u>	55306.7	43013.1	35147.3	<u>34871.2</u>	37608.1
12	63177.9	63177.9	<u>62928.5</u>	80434.9	45022.8	42577.7	<u>42405.2</u>	46661.0

Таблица 2. Оценка вероятности доставки пакета  $Pr(delivery)$

Количество узлов ( $N$ )	$p = 0.5$				$p = 0.9$			
	LET	MFV	LET-MFV	PROPHET	LET	MFV	LET-MFV	PROPHET
46	0.6786	<u>0.6939</u>	0.6938	0.6695	0.7945	0.8006	0.8026	0.7742
23	0.6390	<u>0.7375</u>	0.7361	0.6963	<u>0.8072</u>	0.7909	0.7923	0.7575
12	<u>0.6951</u>	<u>0.6951</u>	0.6935	0.8023	<u>0.7387</u>	0.7009	0.7011	0.7077

## 5. Заключение

Представлены результаты имитационного моделирования популярных протоколов маршрутизации в DTN сетях и реализованные в сети с гибридной моделью подвижности узлов. Исследована вероятность доставки сообщения и среднее время доставки сообщения. В результате проведённых экспериментов установлено, что при малой средней плотности узлов и среднем коэффициенте персистентности MFV протокол превосходит по вероятности доставки сообщения остальные рассматриваемые протоколы. При большой плотности узлов и при большом коэффициенте персистентности маршрута преимущество имеет протокол LET по вероятности доставки, но наилучшим по среднему времени доставки при всех рассмотренных значениях параметров мобильности узлов является гибридный протокол LET-MFV.

По вероятности доставки, но наилучшим по среднему времени доставки при всех рассмотренных значениях параметров мобильности узлов является гибридный протокол LET-MFV. Протокол PROPNET имеет хуже характеристики, по сравнению с другими, но стоит отметить, что он реализован схематично (например, без реализации репликации), с использованием рекомендуемых параметров в [15], и его применение к предложенной нами гибридной модели мобильности и сравнение с представленными алгоритмами маршрутизации – поле деятельности для дальнейших исследований.

## Литература

- [1] Brockmann, D. The scaling laws of human travel / D. Brockmann, L. Hufnagel, T. Geisel // *Nature*. – 2006. – Vol. 439 (Jan). – P. 462-465.
- [2] Gonzalez, M.C. Understanding individual human mobility patterns / M.C. Gonzalez, C.A. Hidalgo, A.L. Barabasi // *Nature*. – 2008. – Vol. 453 (Jun.). – P. 779-782.
- [3] Rhee, I. On the Levy walk nature of human mobility / I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, S. Chong // *Proc. IEEE INFOCOM*, Phoenix, AZ, (Apr.). – 2008. – P. 924-932.
- [4] Rhee, I. On the Levy-walk nature of human mobility / I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, S.J. Kim, S. Chong. // *IEEE/ACM Trans. on Networking*. – 2011. – Vol. 19(3). – P. 630-643.
- [5] Lim, S. Clustered mobility model for scale-free wireless networks / S. Lim, C. Yu, C.R. Das // *Proc. IEEE LCN 2006 Tampa, FL*, (Nov.). – 2006. – P. 231-238.
- [6] Ghosh, J. Sociological orbit aware location approximation and routing (solar) in MANET / J. Ghosh, S.J. Philip, C. Qiao // *Ad hoc Netw.* – 2007. – Vol. 5. – P. 189-209.
- [7] Lee, K. SLAW: Self-Similar Least-Action Human Walk / K. Lee, S. Hong, S.J. Kim, I. Rhee, S. Chong // *IEEE/ACM Trans. on Networking*. – 2012. – Vol. 20(2). – P. 515-529.
- [8] Lee, K. Demystifying Levy Walk Patterns in Human Walks / K. Lee, S. Hong, S.J. Kim, I. Rhee, S. Chong. // *Technical Report in CSC, NCSU*. [Electronic resource]. – 2008. – Access mode: [https://www.csc.ncsu.edu/research/tech/reports.php/Demystifying\\_Levy\\_Walk\\_Patterns.pdf](https://www.csc.ncsu.edu/research/tech/reports.php/Demystifying_Levy_Walk_Patterns.pdf) (28.01.2017).
- [9] Privalov, A.Yu. Hybrid Model of Human Mobility for DTN Network Simulation / A.Yu. Privalov, A.A. Tsarev // *In Proceedings of 30th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS2016)*, Regensburg university of applied sciences, Regensburg, Germany. – 2016. – P. 419-424.
- [10] Dubois-Ferriere, H. Age matters: Efficient route discovery in mobile ad hoc networks using encounter ages / H. Dubois-Ferriere, M. Grossglauser, M. Vetterli // *In Proc. ACM MobiHoc*, Annapolis, MD. (Jun.). – 2003. – P. 257-266.
- [11] Varga, A. The OMNeT++ discrete event simulation system / Varga András // *Proceedings of the European simulation multiconference (ESM'2001)*. – 2001. – Vol. 9. No. S.185.sn.
- [12] Till, S. An extension of the OMNeT++ INET framework for simulating real-time ethernet with high accuracy / S. Till, H. D. Kenfack, F. Korf, Th. C. Schmidt // *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, ICST. Brussel. Belgium*. – 2011. – P. 375-382.
- [13] Kotz, D. Community Resource for Archiving Wireless Data at Dartmouth. Dartmouth College [Electronic resource]. – 2015. – Access mode: <http://www.crowdad.org/index.html> (28.01.2017).
- [14] Tsarev, A. A. Hybrid Model of Human Mobility for DTN Network Simulation in Comparison with SLAW-type Model / A.A. Tsarev, A.Yu. Privalov // *In Proceedings of 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP16)*, 20-23 July 2016 in Prague, Czech Republic. [Electronic resource]. – 2016. – Access mode: <http://www.csndsp16.com/csndsp16.zip> (28.01.2017).
- [15] Lindgren, A. Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks / A. Lindgren, A. Doria, E. Davies, S. Grasic // [Electronic resource]. – 2012. – Access mode: <https://tools.ietf.org/html/rfc6693> (дата обращения 28.01.2017).