

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СЛУЧАЙНОГО БЛУЖДЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УСТРОЙСТВ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ\*

К. Е. Самуйлов<sup>1</sup>, Ю. В. Гайдамака<sup>2</sup>, С. Я. Шоргин<sup>3</sup>

**Аннотация:** Выполнен обзор моделей случайного блуждания объектов, применяемых при моделировании передвижения приемопередающих устройств пользователей беспроводной сети пятого поколения (5G). Рассмотрены модели мобильности, характерные для имитационного моделирования поведения пользователей беспроводной самоорганизующейся сети. Обсуждаются особенности различных моделей индивидуального движения объектов, а также моделей движения групп объектов с точки зрения применения к анализу интерференции в беспроводных сетях. Цель статьи — предложить ряд моделей мобильности для принятия обоснованного решения при выборе модели случайного блуждания для анализа качества предоставления услуг в беспроводных сетях. В качестве иллюстрации применения разработанного авторами комплекса аналитических и имитационных моделей проведен анализ отношения сигнал/интерференция, определяющего качество предоставления услуг в сетях пятого поколения, для сценария случайного блуждания мобильных абонентов в торгово-развлекательном центре при использовании модели случайного блуждания с остановками Random Waypoint.

**Ключевые слова:** модель случайного блуждания; модель мобильности; отношение сигнал/интерференция; отношение сигнал/шум

**DOI:** 10.14357/19922264180401

### 1 Введение

В беспроводных сетях 5G интерференция служит одним из существенных источников помех, влияющим на показатели качества функционирования сети, к которым относятся пиковые скорости передачи данных между устройствами, задержка начала передачи данных, отношение сигнал/интерференция (signal to interference ratio, SIR), энергосбережение, эффективность использования частотного спектра и др. [1]. При анализе интерференции следует учитывать особенности современных беспроводных сетей, которые при использовании в них технологии прямого взаимодействия оконечных устройств (device-to-device, D2D) образуют самоорганизующиеся сети (mobile ad hoc network, MANET) с перемещающимися в зоне покрытия узлами. Относительно небольшие расстояния между подвижными узлами, соответствующими приемопередающим устройствам, делают необходимым при анализе интерференции между соседними источниками сигнала в таких сетях учитывать траектории

перемещения узлов, которые фактически определяют динамику показателя SIR в радиоканале между приемником и передатчиком.

В работах [2, 3] перемещение беспроводных устройств моделировалось с помощью кинетического уравнения Фоккера–Планка [4], регулирование параметров (снос, диффузия) которого позволяет исследовать различные типы движения большого числа объектов, не строя индивидуальную траекторию перемещения каждого объекта.

Однако такой подход не применим при анализе интерференции в задачах, где необходимо принимать во внимание особенности предоставления услуг передачи данных в сети, например учитывать препятствия в зоне перемещения устройств, наличие нескольких сред распространения сигнала и другие ограничения. Для решения таких задач необходимо детальное моделирование траектории движения каждого беспроводного устройства с помощью аналитических [5–7] и имитационных [8, 9] моделей.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 16-11-10227).

<sup>1</sup> Российский университет дружбы народов; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, samouylov\_ke@rudn.university

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, gaidamaka\_yuv@rudn.university

<sup>3</sup> Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sssorgin@ipiran.ru

В статье проведен обзор моделей мобильности объектов, применяемых при моделировании перемещения устройств в беспроводных самоорганизующихся сетях. В разд. 2 обсуждаются особенности различных моделей индивидуального движения объектов, а также моделей движения групп объектов с точки зрения применения к анализу интерференции в беспроводных сетях. В качестве иллюстрации в разд. 3 на примере прикладной задачи анализа движения мобильных абонентов в торгово-развлекательном центре с помощью разработанного авторами комплекса аналитических и имитационных моделей на наборе исходных данных, близких к реальным, проведен расчет показателя SIR, определяющего качество предоставления услуг в сетях пятого поколения.

## 2 Модели случайного блуждания

В настоящее время для имитационного моделирования передвижения беспроводных устройств в сетях MANET традиционно используются как модели мобильности объектов, основанные на сборе и анализе статистики движения абонентов в реальных беспроводных сетях (traces), так и синтетические (synthetic) модели [8–10]. Первые построены на основе обработки данных от большого числа узлов сети, собранных в течение длительного периода наблюдения, поэтому обеспечивают достоверное моделирование, однако их применение возможно лишь для анализа уже существующих сетей. Поскольку сети 5G в полной мере еще не реализованы, востребованными оказались синтетические модели, с помощью которых можно реалистично воспроизводить поведение абонентов беспроводной сети, регулируя правила изменения скорости и направления движения мобильных узлов. Например, мобильные узлы не должны иметь прямую траекторию движения и постоянную скорость в течение всего времени моделирования, потому что в реальных сетях движение абонентов имеет более сложный характер. Как правило, для моделирования движения абонентов беспроводной сети используются как модели мобильности, описывающие независимое друг от друга движение абонентов беспроводной сети, модели так называемой «индивидуальной» мобильности (entity mobility models), так и модели «групповой» мобильности (group mobility models), в которых, например, движение группы основано на траектории логического центра [9–11].

Примерами моделей индивидуальной мобильности, используемых для описания перемещения независимых объектов, являются модель RW (Random Walk), для которой в каждой точке направ-

ление и скорость движения разыгрываются случайным образом (рис. 1, а), и ее расширение — модель RWP (Random WayPoint), в которой предусмотрено время остановки в каждой точке перед продолжением движения (рис. 1, б).

Модели RW и RWP чаще других используются для моделирования движения мобильных устройств в самоорганизующейся беспроводной сети. Особенностью обеих моделей является отсутствие «памяти» — текущие значения параметров модели (направление, скорость, длительность остановки) не зависят от значений этих параметров на прошлом шаге, что приводит к генерации траекторий с внезапными остановками и резкими поворотами. При небольших значениях скорости в модели RW движение объектов становится броуновским; следовательно, эту модель можно рекомендовать для анализа интерференции в статической сети.

Интересным развитием модели RWP является ее вероятностная версия, в которой следующая позиция мобильного узла определяется в соответствии с заданными вероятностями. Недостатком модели RWP является замеченная особенность — при достаточно длительном периоде работы имитационной модели плотность объектов, в начале моделирования распределенных равномерно, по краям области моделирования становится заметно ниже, чем в центре. Поскольку расстояние до передатчика является ключевым фактором, оказывающим влияние на мощность фиксируемого на приемнике сигнала, бесосновательное увеличение числа ближайших интерферирующих передатчиков при оценке показателя SIR исказит вывод о качестве соединения в моделируемой сети. Однако при моделировании некоторых сценариев поведения пользователей, например осмотра музея в соответствии с предлагаемой схемой знакомства с экспозицией, модель случайного блуждания RWP за счет своей гибкости создает реалистичные траектории движения объектов. Кроме того, описанный эффект скопления объектов в центре области моделирования практически исчезает для случая долгих остановок даже при высоких значениях параметра скорости [10].

Указанного для модели RWP недостатка лишены модель RD (Random Direction), для которой направление и скорость движения меняются при достижении объектом границы области моделирования (рис. 1, в), а также модель движения Гаусса–Маркова (Gauss–Markov, GM), которая позволяет получить плавную траекторию движения объекта (рис. 1, г). В [10] описан метод, который для модели GM принудительно меняет направление движения объекта при приближении к границе области моделирования, что позволяет избежать нежелатель-



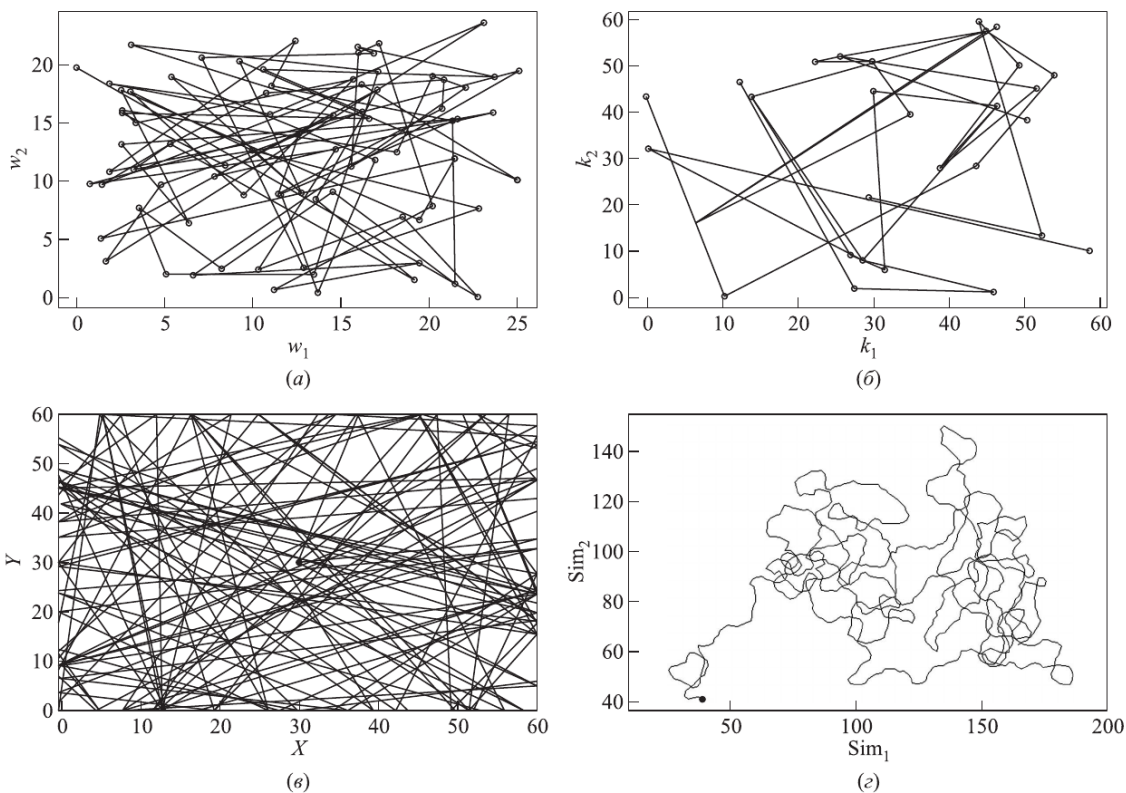


Рис. 1 Примеры траекторий перемещения объекта при случайном блуждании: (а) модель RW; (б) модель RWP; (в) модель RD; (г) модель GM

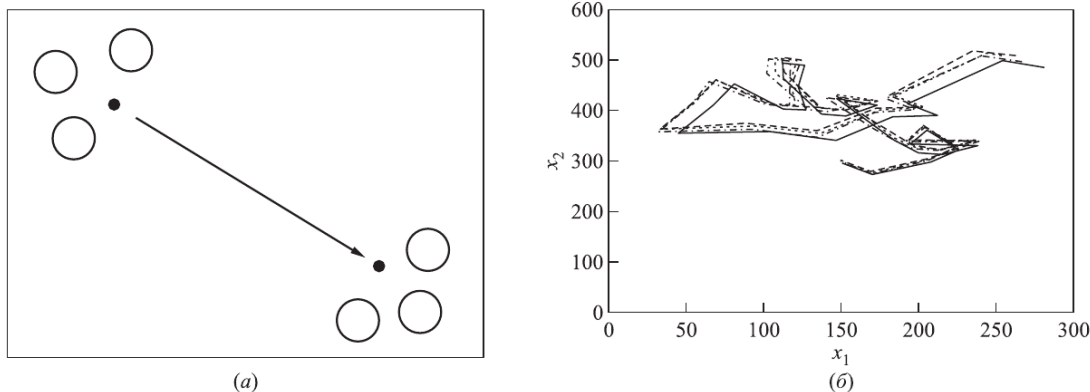
ных эффектов «прилипания» объекта к краю области.

Характерная для всех упомянутых выше моделей проблема «краевого эффекта» при приближении объекта к границе области отсутствует в модели Boundless Simulation Area (BSA), область моделирования которой представляет собою тор. В этой модели текущие значения направления и скорости движения зависят от значений этих параметров на прошлом шаге, что создает реалистичную траекторию движения объекта. Однако при моделировании беспроводной сети с помощью модели BSA не избежать искажения динамики показателя SIR, поскольку движущееся по поверхности тора беспроводное устройство регулярно становится соседом какого-либо неподвижного беспроводного устройства.

Еще одной моделью индивидуальной мобильности является так называемое «вероятностное блуждание по сетке» (Probabilistic Grid, PG) — модель в дискретном времени, согласно которой на каждом временном такте объект делает шаг единичной длины, а выбор одного из четырех направлений задается вероятностной матрицей [10]. Благодаря

простоте реализации эта модель также широко применяется при моделировании движения, однако задание вероятностной матрицы для конкретного сценария поведения пользователей представляет определенную трудность.

К моделям групповой мобильности [10, 11] относятся модель ECRM (Exponential Correlated Random Mobility), основанная на экспоненциальной зависимости скорости движения объектов; модель CM (Column Mobility), в которой моделируется движение объектов, выстроенных в линию; модель перемещения кочевников NCM (Nomadic Community Mobility); модель преследования (Pursue Mobility), в которой группа следует за лидером, передвигающимся по заданной траектории, а также наиболее общая модель групповой мобильности с опорной точкой RPGM (Reference Point Group Mobility), в которой предусмотрено случайное движение группы с одновременным случайным перемещением каждого отдельного объекта внутри группы (рис. 2). Недостатком модели ECRM, которая позволяет описать практически все виды групповой мобильности, является существенная сложность подбора параметров модели.



**Рис. 2** Пример траекторий для модели групповой мобильности с опорной точкой RPGM для трех объектов: (а) перемещение опорной точки; (б) траектории перемещения объектов

Перечисленные модели движения традиционно используются при исследовании производительности различных сетевых протоколов, применяемых в самоорганизующихся беспроводных сетях, при этом сравнение проводится по таким показателям, как переданные полезная и служебная нагрузка, джиттер, межконцевая задержка, затраты на маршрутизацию [11]. При выборе модели мобильности с целью исследования интерференции важно учитывать сценарий поведения пользователей. Наиболее универсальными моделями индивидуальной мобильности являются модель Random Waypoint и модель Гаусса–Маркова, настройка параметров которых позволяет гибко подстроиться под большинство сценариев. Для воспроизведения перемещения группы пользователей беспроводной сети рекомендуется использовать модель групповой мобильности с опорной точкой Reference Point Group Mobility, которая при соответствующих значениях параметров позволяет реализовать модели Column, Nomadic Community и Pursue.

### 3 Пример анализа интерференции при случайном блуждании

Одной из основных характеристик качества канала в беспроводных сетях связи служит отношение уровня сигнала к уровню интерференции и шума (ОСШ, *англ.* Signal to Interference and Noise Ratio, SINR), которое определяется отношением мощности принимаемого сигнала от соответствующего передатчика к суммарной мощности шума и принимаемого сигнала от интерферирующих передатчиков [12]. При этом мощности фиксиру-

емого на приемнике сигнала как от целевого, так и от каждого из интерферирующих передатчиков определяются с соответствием с классической моделью распространения сигнала, а именно: прямо пропорционально базовой мощности сигнала передатчика и обратно пропорционально расстоянию между передатчиком и приемником в некоторой постоянной степени, зависящей от среды распространения сигнала. Как и в [12, 13], для оценки отношения SIR далее используется формула

$$SIR = \frac{r_0^{-\gamma_0}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-\gamma_n}},$$

где  $r_0$  — расстояние между приемником и передатчиком в исследуемой целевой паре;  $d_n$  — расстояние между приемником целевой пары и передатчиком  $n$ -й интерферирующей пары;  $\gamma$  — коэффициент распространения сигнала, характеризующий среду передачи (от 2 в условиях прямой видимости до 6 в худшем случае, при котором возможна связь). Расчет проведен в предположении о равных излучаемых мощностях и коэффициентах усиления приемной и передающей антенн для всех устройств. Для моделирования препятствий для прохождения сигнала использовались различные значения коэффициентов распространения сигнала  $\gamma_n$ ,  $n = 0, 1, \dots, N$  [13].

На рис. 3 для одной из моделей индивидуальной мобильности, модели случайного блуждания RWP, приведена кривая, показывающая изменение показателя SIR в течение 500 с. Для наглядности выбран случай блуждания по сетке четырех мобильных устройств — целевой пары приемник-передатчик и двух интерферирующих передатчиков, работающих на близких частотах.

Моделировалось целенаправленное движение, когда пользователи, носители мобильных

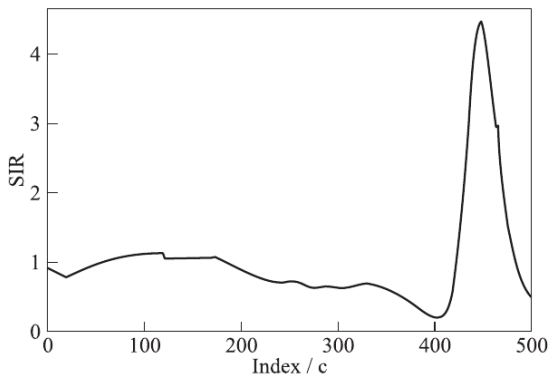


Рис. 3 Динамика SIR

устройств, перемещались по кратчайшему пути между заранее выбранными точками своих маршрутов с постоянной скоростью 1 м/с независимо друг от друга в квадрате  $500 \times 500$  м. Такой сценарий характерен, например, для последовательного посещения магазинов торгово-развлекательного центра по заранее намеченному маршруту. Траектории устройств показаны на рис. 4, где перемещение целевого приемника, на котором оценивалось отношение сигнал/интерференция, показано сплошной линией, перемещение передатчиков — пунктирными линиями, при этом целевому передатчику соответствует траектория с самым длинным размером штриха.

На рис. 4 точки, отмеченные крестиками на соответствующих траекториях, позволяют судить о взаимном расположении устройств. Для наглядности целевые передатчик и приемник соединены показывающим направление передачи в радиоканале вектором, модуль которого равен расстоянию

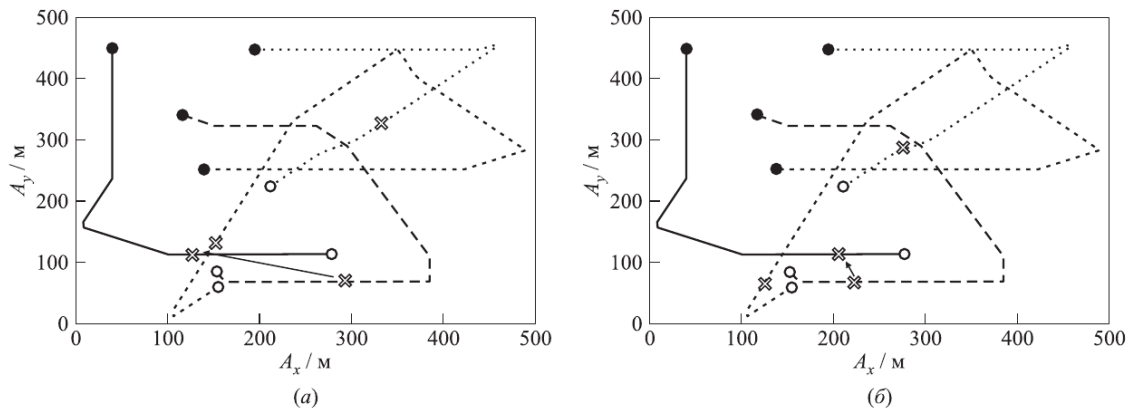


Рис. 4 Траектории и взаимное расположение устройств: (а) минимальное значение SIR (402-я секунда); (б) максимальное значение SIR (449-я секунда)

в целевой паре. так, на рис. 4, а, который соответствует 402-й секунде моделирования, один из интерферирующих передатчиков расположен значительно ближе к приемнику, чем целевой передатчик, а на рис. 4, б отражена обратная ситуация, когда на 449-й секунде расстояние в целевой паре становится минимальным. Соответствующие локальные экстремумы показателя SIR в указанные моменты отражены на рис. 3.

Предложенный метод расчета SIR, основанный на моделировании траекторий движения устройств, позволяет оценивать качество предоставления услуг в сети при заданных для каждой услуги требованиях к минимальному допустимому значению этого показателя.

## 4 Заключение

Проведенный в работе обзор моделей случайного блуждания, традиционно применяемых для моделирования перемещения мобильных узлов в беспроводных самоорганизующихся сетях, позволяет при выборе модели для проведения эксперимента учесть особенности каждой модели, существенные с точки зрения сценария поведения пользователей. Универсальной модели мобильности, способной воспроизвести поведение пользователя при любом сценарии, не существует, поэтому анализ интерференции рекомендуется проводить, применяя несколько моделей движения объектов. Также задачей дальнейших исследований может стать разработка новой комбинированной модели мобильности для воспроизведения перемещения пользователей беспроводной самоорганизующейся сети, сочетающей подход модели Gauss–Markov на границе области моделирования и принцип перемещения объектов



Авторы выражают благодарность магистрам кафедры прикладной информатики и теории вероятностей РУДН А. Жданкову и О. Крупко за подготовку иллюстраций к статье по разработанному комплексу аналитических и имитационных моделей.

## Литература

1. Andrews J. G., Buzzi S., Choi W., Hanly S. V., Lozano A., Soong A. C., Zhang J. C. What will 5G be? // IEEE J. Sel. Area. Comm., 2014. Vol. 32. No. 6. P. 1065–1082. doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
2. Orlov Yu. N., Fedorov S. L., Samuylov A. K., Gaidamaka Yu. V., Molchanov D. A. Simulation of devices mobility to estimate wireless channel quality metrics in 5G networks // AIP Conf. Proc., 2017. Vol. 1863. P. 090005-1–090005-3. doi: 10.1063/1.4992270.
3. Гайдамака Ю. В., Орлов Ю. Н., Молчанов Д. А., Самуйлов А. К. Моделирование отношения сигнал/интерференция в мобильной сети со случайным блужданием взаимодействующих устройств // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 2. С. 50–58. doi: 10.14357/19922264170206.
4. Risken H., Frank T. The Fokker–Planck equation: Methods of solution and applications. — Springer ser. in synergetics. — Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. Vol. 18. 486 p. doi: 10.1007/978-3-642-61544-3.
5. Тoffоли Т., Марголюс Н. Машины клеточных автоматов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. 283 с. (Toffoli T.,
6. Orlov Yu. N., Andrews J. G. Кашман шетинг. Theory and practice using MATLAB. — 2nd ed. — John Wiley & Sons, Inc., 2001. 410 p.
7. Семушин И. В., Цыганов А. В., Цыганова Ю. В., Голубков А. В., Винокуров С. Д. Моделирование и оценивание траектории движущегося объекта // Вестник ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование, 2017. Т. 10. № 3. С. 108–119. doi: 10.14529/mmp170309.
8. The VINT Project (Virtual InterNetwork Testbed). The Network Simulator — ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
9. Wolfram Demonstrations Project. Constrained Random Walk. <http://demonstrations.wolfram.com>.
10. Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research // Wirel. Commun. Mob. Com., 2002. No. 2. P. 483–502. doi: 10.1002/wcm.72.
11. Talwar G., Narang H., Pandey K., Singhal P. Analysis of different mobility models for ad hoc on-demand distance vector routing protocol and dynamic source routing protocol. — Lecture notes in electrical engineering ser. — New York, NY, USA: Springer, 2013. Vol. 131. P. 579–588. doi: 10.1007/978-1-4614-6154-8\_57.
12. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. 318 с. (Ott G. Noise reduction techniques in electronic systems. — New York, NY, USA: Wiley, 1976. 312 p.)
13. Гайдамака Ю. В., Андреев С. Д., Соин Э. С., Самуйлов К. Е., Шоргин С. Я. Анализ характеристик интерференции в модели взаимодействия устройств с учетом среды распространения сигнала // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 4. С. 2–10. doi: 10.14357/19922264160401.

Поступила в редакцию 11.09.18

---

## MODELING MOVEMENT OF DEVICES IN A WIRELESS NETWORK BY RANDOM WALK MODELS

K. E. Samouylov<sup>1,2</sup>, Yu. V. Gaidamaka<sup>1,2</sup>, and S. Ya. Shorgin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation

<sup>2</sup>Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

**Abstract:** The authors overview mobility models which are applicable for simulation of movement of users' devices in a fifth generation (5G) wireless network. Mobility patterns that are typical for simulating the behavior of users of a wireless ad hoc network are considered. The features of the models are discussed, both for individual motion of objects and for motion of groups of objects, from the point of view of appliance to the analysis of interference in wireless networks. The purpose of the paper is to propose a number of mobility models for making an informed decision when choosing a model for evaluating the quality of service in 5G wireless networks. The authors present

