

# On the Analysis of Interference Characteristics of Device-to-Device Communications in Wireless Networks

Konstantin E. Samouilov<sup>‡§</sup>, Yuliya V. Gaidamaka<sup>‡§</sup>

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

<sup>§</sup> Institute of Informatics Problems  
Federal Research Center "Computer Science and Control"  
of Russian Academy of Sciences  
44-2 Vavilova St., Moscow 119333, Russia

Email: samuylov\_ke@rudn.university, gaydamaka\_yuv@rudn.university

The distinctive features of fifth generation (5G) mobile networks are the support of technologies for Internet of Things (IoT) network connectivity and direct device-to-device (D2D) communications, including support for wireless connections during the mobility of devices. The key indicators of the effectiveness of the 5G network are energy efficiency, reliability, and network capacity. The quality of service provisioning in the 5G network is determined by the quality of data transmission on the radio channel between the mobile subscribers, one of the important factors of which is the interference created by the subscribers transmitting data over the same or neighboring radio frequencies. In the paper, an analytical review devoted to the methods of interference analysis in wireless networks with D2D technology both for the case of fixed interacting subscribers and for the case of moving subscribers was conducted. The performance metric of interference characterization is the signal-to-interference ratio (SIR) that relates the level of the useful signal to the level of the background interference, i.e. the SIR ratio is the proportion between the received modulated carrier power and the received co-channel cross-talk power from other transmitters than the useful signal. The analysis of SIR for fixed transmitters and receivers is based on stochastic geometry methods that allow for a given location of interacting devices or for a given distance distribution between the devices and the density of the devices within the coverage area to estimate the SIR at an arbitrary receiver. The methods can be used by the radio resource allocation scheduler to assess the possibility of establishing a new transmitter-receiver connection and to assign a radio frequency for it by taking into account the known properties of already established connections of the associated pairs over the coverage area. In case of moving devices, the value of SIR is variable due to a change in inter-device distances. The goal of the paper is to propose an approach to the analysis of interference characteristics when the trajectories of mobile devices are given by certain kinetic equations. One of the SIR characteristics in this case is the distribution of time interval of connection unavailability caused by the drop of SIR below a predetermined threshold. Also, a research problem for the case of moving devices is to develop a recommendation on the choice of the movement model from the known random walk models for further interference characterization.

The reported study was funded by the Russian Science Foundation according to the research project No. 16-11-10227. Also the publication was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (the Agreement No 02.A03.21.0008).

**Key words and phrases:** heterogeneous wireless network, device-to-device communications, performance measures, signal-to-interference ratio, SIR.

## К анализу характеристик интерференции взаимодействующих устройств в сетях беспроводной связи

К. Е. Самуйлов<sup>†§</sup>, Ю. В. Гайдамака<sup>†§</sup>

<sup>†</sup> *Российский университет дружбы народов  
ул. Миклушко-Маклая, д. 6, Москва, 117198, Россия*

<sup>§</sup> *Институт проблем информатики ФИЦ ИУ РАН  
Вавилова, д.44, кор.2, Москва, 119333, Россия*

Email: samuylov\_ke@rudn.university, gaydamaka\_yuv@rudn.university

Отличительными особенностями сетей мобильной связи пятого поколения (5G) являются поддержка технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT) и прямого взаимодействия устройств (device-to-device communications, D2D), включая организацию соединений в процессе перемещения беспроводных устройств на местности. Ключевыми показателями эффективности сети 5G являются энергоэффективность, надежность и пропускная способность сети. Качество предоставления услуг в сети 5G определяется качеством передачи данных по радиоканалу между мобильными абонентами, одним из важных показателей которого является интерференция, создаваемая абонентами, передающими данные на одной и той же или близких радиочастотах. В статье проведен аналитический обзор методов исследования интерференции в беспроводных сетях с технологией D2D как для случая фиксированных взаимодействующих абонентов, так и для случая движущихся абонентов. Метрикой характеристик качества передачи данных в радиоканале является отношение сигнал/интерференция (signal-to-interference ratio, SIR), которое связывает уровень полезного сигнала на приемнике с уровнем фоновых помех, и является отношением между мощностью сигнала, принимаемого от ассоциированного передатчика, и суммарной мощностью сигналов от интерферирующих передатчиков, работающих на той же радиочастоте. Анализ SIR для случая фиксированных передатчиков и приемников основан на методах стохастической геометрии, которые позволяют оценить эту характеристику для заданного расположения взаимодействующих устройств или для заданного распределения расстояний между устройствами и плотности устройств в пределах зоны покрытия. Эти методы могут использоваться планировщиком распределения радиоресурсов для оценки возможности установления нового соединения «передатчик–приемник» и присвоения ему радиочастоты с учетом уже установленных соединений для ассоциированных пар устройств в зоне обслуживания. В случае движущихся устройств значение SIR становится переменным из-за изменения расстояний между устройствами. Цель работы — предложить подход к анализу характеристик интерференции, когда траектории мобильных устройств задаются некоторыми кинетическими уравнениями. Одной из характеристик SIR в этом случае является распределение временного интервала недоступности соединения, вызванной падением SIR ниже заданного порогового значения. Кроме того, в работе для случая движущихся устройств предложены рекомендации по выбору модели движения из известных моделей случайного блуждания для дальнейшего исследования характеристик интерференции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФН в рамках научного проекта № 16-11-10227. Также публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 02.А03.21.0008).

**Ключевые слова:** гетерогенная беспроводная сеть, прямое взаимодействие устройств, показатели эффективности.

### 1. Введение

Особенностью современного этапа развития систем связи является долгосрочная эволюция (Long Term Evolution, LTE) технологий и архитектур беспроводных мобильных телекоммуникаций [1], разрабатываемых Комитетом

стандартизации мобильных сетей последующих поколений (Third Generation Partnerships project, 3GPP), объединяющим семь занимающихся разработкой стандартов телекоммуникационных организаций (Association of Radio Industries and Businesses, ARIB, Alliance for Telecommunications Industry Solutions, ATIS, China Communications Standards Association, CCSA, European Telecommunications Standards Institute, ETSI, Telecommunications Standards Development Society, India, TSDSI, Telecommunications Technology Association of Korea, TTA, Telecommunication Technology Committee, Japan, TTC) [2]. Сегодня развернуты сети 4G, а на рубеже 2020-х годов будут приняты стандарты сетей 5G, отличительными чертами которых являются возможности поддержки беспроводных технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT) и прямого взаимодействия устройств (device-to-device communications, D2D), включая организацию соединений в процессе перемещения беспроводных устройств на местности [3]. Уже начаты исследования и разработки беспроводных технологий IoT с новыми классами устройств как неподвижных, например, сенсоры, применяемые в логистике, измерительные приборы для «умных зданий», датчики для «умного сельского хозяйства», так и движущихся, например, носимые устройства, включая «умные очки», фитнес-браслеты, медицинские сенсоры удаленного контроля самочувствия, и датчики для управления дорожным движением и безопасностью транспорта. В новых условиях предоставление современных высококачественных услуг связи практически невозможно без высокоразвитой и надежной гетерогенной мультисервисной сети, что предопределяет на ближайшую и долгосрочную перспективу задачи по анализу и расчету ее показателей эффективности — энергоэффективности, надежности, пропускной способности, которые в свою очередь, являются функционалами как от показателей качества обслуживания сети (Quality of Service, QoS), так и от показателей качества восприятия услуг пользователем (Quality of Experience, QoE) [4–7]. Для технологий 5G планируется увеличение пропускной способности сети до скоростей более 10 Гбит/с при одновременном подключении до 100 миллионов устройств на 1 квадратный километр и гарантированном предоставлении каждой услуге определённой ёмкости ресурса. При этом, например, для тактильного интернета (Tactile Internet), обеспечивающего возможность повсеместного непрерывного доступа и управления удаленными объектами и устройствами, такими как автомобили, подключенные к сети и передвигающиеся без водителя, промышленные роботы и инструменты дистанционной хирургии, задержка будет составлять менее 1 мс.

## 2. Методы исследования интерференции для случая неподвижных устройств

Одной из новых технологий, которые появляются в сетях 5G, стала технология D2D — передача информации напрямую между устройствами без участия сетевой инфраструктуры. Применение технологии прямого взаимодействия устройств позволяет расширять зону покрытия за счет оборудования абонентов с помощью построения децентрализованной одноранговой сети. Более корректно называть сеть, которую образуют пользовательские устройства, частично децентрализованной, поскольку на этапе, предворяющем передаче данных между одноранговыми устройствами, необходимо участие планировщика распределения радио ресурсов в беспроводной сети, который находится на базовой станции или на контролирующем узле. Эффективному использованию спектра частот в сетях 5G способствует применение новых технологий — от пространственного мультиплексирования

нескольких лучей при применении антенн Massive MIMO, которые будут формировать острые диаграммы направленности, и совместного использования спектра на разных уровнях различными технологиями доступа (spectrum sharing), до применения принципа повторного использования частотного диапазона (frequency reuse), который позволяет контролировать интерференцию, возникающую при передаче данных от нескольких соединений «передатчик-приемник» на одной и той же или близких радиочастотах [8–10]. Интерференция относится к показателям функционирования сети (Network Performance, NP), которые влияют на показатели качества обслуживания сети QoS — скорость передачи данных в радиоканале и спектральную эффективность соединения, соты и сети в целом. Качество передачи данных для т.н. «ассоциированной пары», т.е. пары связанных напрямую взаимодействующих устройств, может быть оценено с помощью отношения сигнал/интерференция (signal-to-interference ratio, SIR) в радиоканале между передатчиком и приемником, которое для приемника характеризует разницу между сигналом от ассоциированного передатчика и суммарным сигналом от интерферирующих передатчиков, работающих на той же радиочастоте. При этом мощность оцениваемого на приемнике полученного сигнала, как от ассоциированного, так и от интерферирующего передатчика, зависит от базовой мощности передатчика, среды распространения сигнала и расстояния между приемником и передатчиком.

В литературе отношение сигнал/интерференция исследуется с помощью аналитических и имитационных моделей. Как правило, при таком моделировании базовые мощности передатчиков и экспонента затухания, характеризующая среду распространения сигнала, выбираются постоянными, а предметом исследования является зависимость величины SIR от расстояния между приемником и передатчиками. Для случая неподвижных взаимодействующих устройств используется аппарат стохастической геометрии [11, 12], для движущихся устройств – кинетические уравнения движения и анализ временных рядов [13–15]. Исследования интерференции для неподвижных устройств ведутся научными коллективами ИПИ ФИЦ ИУ РАН и РУДН с 2014 г. В работах [16–21] предложены аналитические методы оценки интерференции для неподвижных устройств как для двух [16, 17], так и для нескольких [18–21] ассоциированных пар; также последний метод обобщен на случай неоднородной среды распространения радиосигнала, например, вследствие наличия экранов в виде перегородок или стен зданий [21]. Предложенные методы позволяют для заданного расположения взаимодействующих устройств — фиксированного или определяемого распределением расстояний между устройствами и плотностью размещения устройств в зоне покрытия сети — оценить отношение SIR на произвольном приемнике. Такие методы предназначены для использования планировщиком распределения радио ресурсов, который в момент поступления запроса на установление нового соединения «передатчик–приемник» должен принять решение о возможности организации такого соединения и назначить для него радиочастоту с учетом известной картины расположения уже установленных соединений ассоциированных пар в зоне покрытия сети.

### 3. Постановка задачи для случая движущихся устройств

Задача анализа интерференции для случая движущихся взаимодействующих устройств является новой, и авторам неизвестны публикации с результатами анализа характеристик интерференции для этого случая перемещающихся мобильных абонентов. При перемещении абонентов изменяется расстояние между приемником и передатчиком как в ассоциированной паре, на приемнике которой производится оценка значения SIR, так и между рассматриваемым приемником и движущимися

интерферирующими передатчиками других ассоциированных пар. При этом и расстояния, и зависящая от них характеристика интерференции, являются функцией от времени и траекторий движения взаимодействующих устройств. Для анализа поведения системы в этом случае можно использовать предложенный в [13–15] метод исследования нестационарных случайных процессов, использующий кинетические уравнения относительно выборочной функции распределения случайной величины. Подход позволяет моделировать траектории движения взаимодействующих устройств методом Монте-Карло согласно некоторому кинетическому уравнению, а затем анализировать эволюцию интересующего функционала над траекториями — расстояния, мощности сигнала в паре «передатчик–приемник», отношения SIR и т.д.

При анализе зависимости значения SIR от времени интерес представляет исследование чередующихся периодов доступности и недоступности соединения для некоторой ассоциированной пары. Период доступности начинается с момента, когда по запросу на установление соединения планировщик распределения радио ресурсов назначает радио частоту для передачи данных между запрашивающими соединением передатчиком и приемником ассоциированной пары. При выборе радио частоты планировщик учитывает как текущую информацию об уже установленных соединениях других ассоциированных пар в зоне покрытия сети, так и требования к новому соединению, зависящие от услуги, которая будет предоставляться устанавливаемое соединение передатчику и приемнику. Требования к метрикам соединения в ассоциированной паре при предоставлении той или иной услуги заданы требованиями качества восприятия QoE и качества предоставления услуги QoS, нормированные в международных стандартах. Качество предоставления услуги может определяться скоростью передачи, вероятностями потери и ошибочной передачи пакетов данных в канале, задержкой передачи, допустимостью прерывания соединения с последующим восстановлением, а также ограничениями на длительности таких периодов отсутствия соединения в ассоциированной паре. В установленном соединении текущий уровень SIR определяет максимально возможную скорость передачи данных в канале. При падении значения SIR ниже уровня, соответствующего предоставляемой по радиоканалу услуге, беспроводное соединение между передатчиком и приемником в ассоциированной паре перестает удовлетворять требованиям к качеству QoS этой услуги, соединение прерывается, и начинается период недоступности соединения. Допустимая длительность периода недоступности нормирована для различных услуг. Если до истечения максимальной длительности периода недоступности соединения значение SIR в канале на назначенной радиочастоте не превысило соответствующий порог, планировщик принимает решение о назначении другой радиочастоты для продолжения предоставления услуги в ассоциированной паре. Заметим, что качество соединения между устройствами ассоциированной пары на некоторой радиочастоте может удовлетворять требованиям к качеству одной услуги, но быть недостаточным для предоставления другой услуги. Это видно на примере беспроводной сети образованной мобильными устройствами, к которым относятся планшет, коммуникатор, для услуги онлайн-игр (real-time gaming) и услуги потокового видео (real-time steaming video). Несмотря на то, что обе услуги предоставляются в режиме реального времени и относятся к услугам с гарантированной скоростью передачи (guaranteed bit rate, GBR), на уровне показателей функционирования сети NP требования к качеству различаются. Для услуги онлайн-игр стандартами определены ограничения на задержку передачи пакета не более 50 мс, а для услуги потокового видео — не более 300 мс, при этом вторая услуга имеет гораздо более жесткие требования к вероятности потери пакета. С точки зрения пользователя (абонента беспроводной сети) для услуги онлайн-игры длительность периодов недоступности беспроводного соединения должна быть существенно ниже, чем при просмотре видео в режиме

реального времени. Таким образом, актуальной является задача разработки метода исследования длительности периодов доступности и недоступности соединения на заданной для ассоциированной пары радиочастоте. Такой метод позволит для заданного набора услуг при заданных плотности мобильных устройств и модели движения абонентов оценивать пропускную способность сети с точки зрения максимального числа установленных соединений в зоне покрытия, а также вероятности отказа в установлении соединения для предоставления запрашиваемой услуги между передатчиком и приемником ассоциированной пары.

Ещё одной интересной задачей является выбор модели движения для описания перемещения абонентов. В первую очередь для анализа интерференции следует рассмотреть известные модели движения, такие как броуновское движение, диффузионный процесс, модель случайных блужданий Пирсона-Релея (Random Direction Model, RDM), а впоследствии — более сложные для анализа процессы, например, блуждание Леви (Levy flight). С помощью броуновского движения может быть описано хаотичное перемещение участников на площади или стадионе во время массовых мероприятий, с помощью диффузионных процессов — передвижение покупателей по торговому центру или же пассажиров в аэропорту, на вокзале. Выбранная модель определяет соответствующее кинетическое уравнение для моделирования траекторий движения мобильных абонентов.

#### 4. Выводы

Разработка метода исследования, позволяющего анализировать качество передачи данных по радиоканалу ассоциированной пары устройств с учетом перемещения взаимодействующих устройств в зоне покрытия сети, является актуальной задачей. Отдельной задачей является выработка рекомендаций по выбору модели движения для описания перемещения абонентов в типичных сценариях, характерных для применения технологии прямого взаимодействия между устройствами.

Авторы благодарят С. Д. Андреева за полезные замечания при подготовке обзора.

#### Литература

1. 3GPP LTE Release 10 & beyond (LTE-Advanced). December 2009.
2. Комитет стандартизации мобильных сетей последующих поколений, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [Эл. ресурс], Режим доступа: <http://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>, свободный (дата обращения 15.03.2017).
3. Рекомендация Y.2060 МСЭ-Т. Rec. Y.2060: Overview of the Internet of things (06/12) [Эл. ресурс]. Режим доступа <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I>, свободный (дата обращения 15.03.2017).
4. Рекомендация МСЭ-Т I.350. Rec. I.350: General aspects of quality of service and network performance in digital networks, including ISDN (11/88) [Эл. ресурс]. Режим доступа <https://www.itu.int/rec/T-REC-I.350-198811-S>, свободный (дата обращения 15.03.2017).
5. Рекомендация МСЭ-Т Y.1541. Rec. Y.1541: Network performance objectives for IP-based services (12/2011) [Эл. ресурс]. Режим доступа <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541>, свободный (дата обращения 15.03.2017).
6. Дополнение 8 к Рекомендациям МСЭ-Т серии E.800. E-800 series Suppl. 8 (11/2009) [Эл. ресурс]. Режим доступа <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=10680>, свободный (дата обращения 15.03.2017).
7. T. Janevski. NGN Architectures, Protocols and Services, Wiley, UK, 2014. 366 p.

8. Z. Gong, M. Haenggi, Interference and Outage in Mobile Random Networks: Expectation, Distribution, and Correlation, *IEEE Trans. Mobile Computing* (2014), Vol. 13, pp. 337–349.
9. V. Petrov et al. Interference analysis of EHF/THF communications systems with blocking and directional antennas, 2016 *IEEE Global Comm. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 1–7.
10. Г. Отт, *Методы подавления шумов и помех в электронных системах*. М.: Мир, 1979. 318 с.
11. F. Baccelli, B. Blaszczyszyn, *Stochastic Geometry and Wireless Networks* (2010), Vol. 3, no. 3–4, pp. 249–449; Vol. 4, no. 1–2, pp. 1–312.
12. M. Haenggi, *Stochastic Geometry for Wireless Networks*, Cambridge University Press, 2012, 298 p.
13. Ю. Н. Орлов, С. Л. Федоров, Генерация нестационарных траекторий временно-го ряда на основе уравнения Фоккера–Планка, *Труды МФТИ*, 2016. Т. 8, № 2, С. 126–133.
14. Ю. Н. Орлов, *Кинетические методы исследования нестационарных временных рядов*. М.: МФТИ, 2014. 276 с.
15. Yu. N. Orlov, S. L. Fedorov, A. K. Samouylov, Yu. V. Gaidamaka, D. A. Molchanov, Simulation of devices mobility to estimate wireless channel quality metrics in 5G networks, *AIP Conference Proceedings: 12th Int. Conf. of Numerical Analysis and Applied Mathematics ICNAAM-2016*, September 19–25, 2016, Rhodes, Greece. USA, AIP Publishing. In print.
16. Ю. В. Гайдамака, А. К. Самуйлов, *Метод расчета характеристик интерференции двух взаимодействующих устройств в беспроводной гетерогенной сети, Информатика и ее применения* (2015), Т. 9. Вып. 1, С. 9–14.
17. A. Samuylov, Yu. Gaidamaka, D. Moltchanov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, Random Triangle: A Baseline Model for Interference Analysis in Heterogeneous Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2015), Vol. 65, Issue 8, pp. 6778–6782.
18. A. Samuylov, A. Ometov, V. Begishev, R. Kovalchukov, D. Moltchanov, Yu. Gaidamaka, K. Samouylov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, Analytical Performance Estimation of Network-Assisted D2D Communications in Urban Scenarios with Rectangular Cells, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 12 Nov. 2015, pp. 1–14.
19. Sh. Etezov, Yu. Gaidamaka, K. Samuylov, D. Moltchanov, A. Samuylov, S. Andreev, E. Koucheryavy, On Distribution of SIR in Dense D2D Deployments, 22nd European Wireless conference (EW'2016), May 18–20, 2016, Oulu, Finland, pp. 333–337.
20. P. Abaev, Yu. Gaidamaka, K. Samouylov, S. Shorgin, Tractable distance distribution approximations for hardcore processes, V. M. Vishnevskiy et al. (Eds.): *DCCN 2016, CCIS 678*, pp. 98–109, 2016.
21. Ю. В. Гайдамака, С. Д. Андреев, Э. С. Сопин, К. Е. Самуйлов, С. Я. Шоргин, Анализ характеристик интерференции в модели взаимодействия устройств с учетом среды распространения сигнала, *Информатика и ее применения* (2016), Т. 10, вып. 4, С. 2–10.
22. В. И. Тихонов, В. И. Хименко, *Выбросы траекторий случайных процессов*, 1987, 304 с.