

УДК 519.217

# МОДЕЛЬ РАЗГРУЗКИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ ПОДВИЖНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

**Д.В. Козырев**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

и

*Российский университет дружбы народов*  
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

E-mail: [kozyrevdv@gmail.com](mailto:kozyrevdv@gmail.com)

**В.В. Рыков**

*Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина*  
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., д. 65

E-mail: [vladimir\\_rykov@mail.ru](mailto:vladimir_rykov@mail.ru)

**С.Я. Шоргин**

*Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН*

Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова., 44-2

E-mail: [sshorgin@ipiran.ru](mailto:sshorgin@ipiran.ru)

**Ключевые слова:** системы беспроводной передачи данных, разгрузка сети связи, прямые соединения, D2D, модель системы массового обслуживания, БПЛА.

**Аннотация:** В настоящее время количество взаимосвязанных устройств экосистемы Интернета вещей растет стремительными темпами, что влечет за собой увеличение плотности базовых станций сотовой связи. Эта тенденция отрицательно влияет на энергоэффективность связи, поскольку каждый новый инфраструктурный узел требует затрат значительного количества энергии. На данный момент уже существуют многочисленные средства для разгрузки дефицитного частотного спектра, что позволяет использовать более энергоэффективные технологии радиосвязи малого радиуса действия для распространения пользовательского контента, такие как движущиеся ретрансляционные станции и прямые соединения устройств при поддержке инфраструктуры сети. В настоящей работе мы представляем новую математическую модель для анализа влияния разгрузки сети на вероятностные характеристики, связанные с качеством обслуживания, что тем самым способствует снижению энергозатрат при развертывании инфраструктуры сети.

# 1. Введение и мотивация

Неконтролируемый рост числа взаимосвязанных устройств Интернета вещей (Internet of Things – IoT) и экспоненциальный рост числа вновь развертываемых базовых станций (БС) [1] оказывают неблагоприятное влияние на существующие беспроводные сети [2], на стоимость энергии, парниковый эффект, а также оказывают глобальное влияние на климат в целом [3].

Одним из способов контроля за увеличением числа создаваемых новых БС является эффективное использование существующей сетевой инфраструктуры [4]. Другим потенциальным способом реализации энергоэффективных коммуникаций является возможность прямого соединения между устройствами (связь типа device-to-device - D2D) [5]. Этот метод позволяет снизить энергопотребление, улучшить ёмкость и пропускную способность сети, используя, например, нелицензированный радиочастотный спектр, контролируемый оператором [6]. Еще один способ улучшения качества связи основан на использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Исторически БПЛА уже продемонстрировали свою практическую применимость для мониторинга погоды, обнаружения лесных пожаров, управления движением и т.д. [7–9]. В последнее время возник интерес к использованию так называемых воздушных (летающих) точек доступа (aerial access points – AAP), установленных на беспилотниках, которые могут использоваться для обеспечения возможности подключения по требованию в случае неизбежной перегрузки сети. Кроме того, недавняя тенденция, активно захватывающая рынок, — это широкое распространение носимых устройств небольшого размера и ограниченного энергопотребления, что обосновывает естественный шаг к использованию одного из устройств в качестве шлюза для доставки сгенерированных носимыми устройствами данных в облако [10].

В свете вышесказанного, выбор тематики исследования настоящей работы обусловлен практической необходимостью и возрастающим интересом к исследованию проблемы снижения нагрузки и энергопотребления сетей связи.

В настоящей работе мы оцениваем архитектуру систем передачи данных пятого (5G) и последующих поколений, в которых мобильный пользователь оснащен множеством носимых устройств, которые непрерывно обмениваются данными с окружающими узлами, а также с облаком через шлюзовую узел. В нашем сценарии для достижения конечной цели максимальной разгрузки существующей сотовой сети вместе со связью D2D дополнительно используется AAP. Предполагается, что AAP обеспечивает управляющие связи для D2D-соединенных пользователей, расположенных в интересующей нас перегруженной области, высвобождая в некоторой степени ограниченный радиочастотный спектр. В работе предлагается новая математическая модель для оценки вероятностных характеристик предлагаемой архитектуры системы.

## 2. Модель системы

### 2.1. Модель размещения участников соединения

Для рассматриваемого сценария предлагается следующая модель. Рассмотрим городскую площадь, на которой проводится некоторое массовое мероприятие (см. рис.1). В интересующей области имеется ряд разнородных пользовательских устройств, выступающих в качестве шлюзов для ближайших к ним носимых устройств, и ча-

стично связанных за счет сетевого покрытия воздушной точки доступа (ААР), которая обеспечивает поддержку в разгрузке связи посредством управления прямыми соединениями D2D. Новые мобильные пользовательские устройства могут поступать в рассматриваемую область сети (ячейку) в соответствии с некоторым случайным процессом и покидать его через определенное случайное время в силу мобильности пользователей. Все объекты внутри ячейки могут распространять интересующий их контент, используя каналы D2D-соединений.

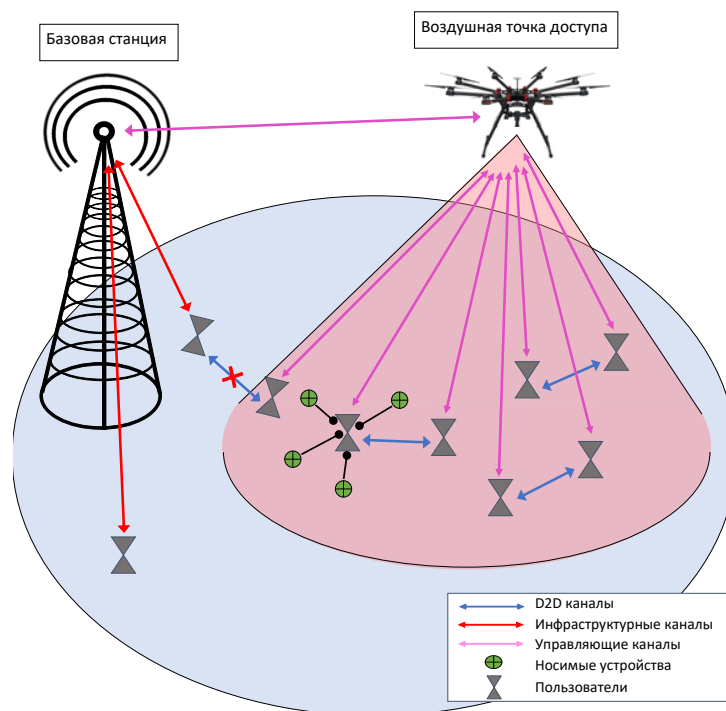


Рис. 1. Совместное функционирование инфраструктурной и воздушной ячеек сети связи, обслуживающих D2D соединения

Поскольку покрытие ААР в интересующей области ограничено, беспроводное соединение за пределами этой зоны доступно только через обычные инфраструктурные линии связи (через БС). Основная цель при проектировании сети в рассматриваемом сценарии состоит в том, чтобы разгрузить как можно больше сеансов связи за счет прямых соединений, что обеспечивает более энергоэффективное распространение контента. Следует отметить, что пропускная способность D2D с точки зрения качества обслуживания [11] ограничена из-за ограниченного количества каналов связи в одном сегменте сети.

Основное внимание в настоящей статье уделяется следующим показателям эффективности: *недоступность соединения*, т.е. вероятность возникновения ситуации, когда одно из пользовательских устройств намеревается соединиться с другим устройством по каналу D2D, но это второе устройство уже занято, или когда определенное пользовательское устройство пытается связаться с другим устройством за пределами ячейки, но больше нет доступных ссылок D2D; *вероятность потери соединения*, т.е. когда один из пользователей покидает покрытие ААР, все еще имея активное соединение с другим пользователем внутри той же ячейки.

## 2.2. Формализация модели

Для описания процесса обслуживания ААР, предлагается модель системы массового обслуживания (СМО), схема которой приведена на рис. 2. Предполагается, что в системе существует  $l$  сессий, и имеется определенный внешний поток нетерпеливых гетерогенных сессий, которые поступают извне в соответствии с пуассоновским процессом. При этом, обычные (внутренние) пользователи могут подключаться напрямую через D2D-соединения, тогда как внешние пользователи могут использовать как инфраструктурные соединения (через БС), так и подключения D2D.

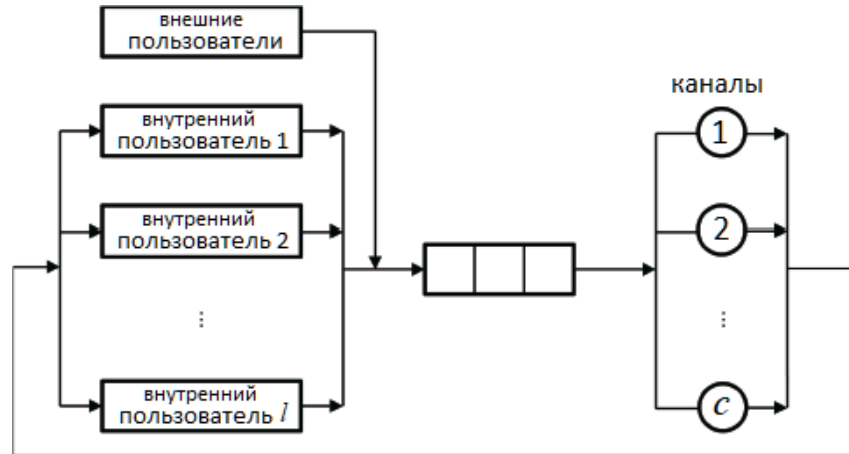


Рис. 2. Схема предлагаемой СМО

Предполагается также, что поступления пользователей, обслуживаемых воздушной точкой доступа, описываются маркированным точечным процессом

$$(1) \quad Z = \{Z_n = (\xi_n, M_n), n = 1, 2, \dots\},$$

где  $\xi_n$  — время поступления  $n$ -го пользователя и  $M_n$  — тип пользователя,  $M_n = i \in \{1, 2, \dots, l\}$ . Длительности обслуживания пользователей  $i$ -го типа, т.е. длительность активной сессии, инициированной пользователем  $i$ , есть случайные величины  $B_i$  с функцией распределения:

$$(2) \quad B_i(t) = \mathbf{P}\{B_i \leq t\} \quad (i = 1, 2, \dots, l).$$

Каждая «внешняя» сессия требует ровно один обслуживающий прибор. Длительность пребывания  $i$ -го пользователя в зоне возможного установления D2D-соединений является случайной величиной  $G_i$  с функцией распределения

$$(3) \quad G_i(t) = \mathbf{P}\{G_i \leq t\} \quad (i, j = 1, 2, \dots, l).$$

Сеанс связи прерывается во время обслуживания пользователя, если соответствующее пользовательское оборудование покидает ячейку до завершения этого сеанса. Сеанс связи прибывающего пользователя теряется, если на момент его прибытия нет свободных обслуживающих приборов (каналов связи). Наконец, сеанс связи может быть потерян, если расстояние между общающимися пользователями превышает определенное значение. Для представленной модели были найдены показатели производительности, характеризующие надежность системы связи, такие как вероятность потери сеанса, недоступность системы и надежность соединения.

### 3. Заключение

В современных беспроводных сетях имеется множество технологических возможностей для разгрузки дорогостоящего радиочастотного спектра, что позволяет использовать более эффективные радиотехнологии ближнего радиуса действия для распространения пользовательского контента. В настоящей работе была предложена новая математическая модель, позволяющая оценить влияние разгрузки сети на вероятностные характеристики, связанные с качеством обслуживания. Мы продемонстрировали, что разработанная модель может использоваться, когда воздушная точка доступа осуществляет управление соединениями D2D на основе нагрузки каналов связи и системы. Были вычислены QoS характеристики системы, позволяющие анализировать недоступность соединения и вероятность потери соединения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов № 17-07-00142, 19-07-00919.

### Список литературы

1. Gao C., Sheng X., Tang J., Zhang W., Zou S., Guizani M. Joint mode selection, channel allocation and power assignment for green device-to-device communications // Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC). Sydney, NSW. 2014. P. 178-183.
2. Shakir M.Z., Qaraqe K.A., Tabassum H., Alouini M.-S., Serpedin E., Imran M. Green heterogeneous small-cell networks: Toward reducing the CO<sub>2</sub> emissions of mobile communications industry using uplink power adaptation // IEEE Communications Magazine. 2013. Vol. 51, No. 6. P. 52-61, 2013.
3. Lee B. Energy Efficiency Gain of Cellular Base Stations with Large-Scale Antenna Systems for Green Information and Communication Technology // Sustainability. 2017. Vol. 9, No. 7. P. 1123.
4. Zhou T., Jiang N., Qin D., Liu Z., Li C. Joint Cell Selection and Activation for Green Communications in Ultra-Dense Heterogeneous Networks // Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). 2017. P. 32-37.
5. An J., Yang K., Wu J., Ye N., Guo S., Liao Z. Achieving Sustainable Ultra-Dense Heterogeneous Networks for 5G // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, No. 12. P. 84-90.
6. Andreev S., Hosek J., Olsson T. et al. A unifying perspective on proximity-based cellular-assisted mobile social networking // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54, No. 4. P. 108-116.
7. Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs) // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2015. Vol. 81, No. 4. P. 281-329.
8. Perelomov V.N., Myrova L.O., Aminev D.A., Kozyrev D.V. Efficiency Enhancement of Tethered High Altitude Communication Platforms Based on Their Hardware-Software Unification // Vishnevskiy V., Kozyrev D. (Eds.) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2018. Communications in Computer and Information Science. Volume 919. Springer. P. 184-200, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-99447-5\_16
9. Aminev D.A., Kozyrev D.V., Zhurkov A.P., Romanov A.Y., Romanova I.I. Method of automated control of distributed radio direction finding system // 11th International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines". Dynamics 2017 Proceedings. Omsk, Russia, 2017. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239426
10. Aloï G., Caliciuri G., Fortino G. et al. Enabling IoT interoperability through opportunistic smartphone-based mobile gateways // Journal of Network and Computer Applications. 2017. Vol. 81. P. 74-84.
11. Semenova O.V., Bui D.T. Method of generating functions for performance characteristic analysis of the polling systems with adaptive polling and gated service // Communications in Computer and Information Science. 2018. Vol. 912. P. 348-359.