
УДК 621.39
DOI: 10.22363/2312-9735-2017-25-1-9-18

Метод оценки времени установления соединения по радиоканалу случайного доступа

Э. Р. Зарипова, А. Ардила Пинто

*Кафедра прикладной информатики и теории вероятностей
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198*

В настоящее время наблюдается стремительный рост числа устройств, обменивающихся между собой информацией в сети связи LTE (Long-Term Evolution), а также увеличение объёма передаваемых данных. Актуальной является задача уменьшения нагрузки, как сигнальной, так и пользовательской, которую обслуживают сети связи. Для этого разрабатывают и внедряют алгоритмы упрощённого взаимодействия между пользовательскими устройствами и сетью с целью минимизации затраченных ресурсов сети. В статье исследуется процедура установления соединения между устройством и базовой станцией LTE. Вопрос передачи малых данных, образуемых межмашинными соединениями (M2M, Machine-To-Machine), может быть решён с помощью использования радиоканала случайного доступа RACH (Random Access Channel) для установления соединения. Такое решение было предложено в техническом отчёте TR 37.868 консорциума 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Для процедуры установления соединения по радиоканалу случайного доступа необходимо оценить предварительные вероятностно-временные характеристики, такие как время установления соединения, вероятность успешного установления соединения, вероятность коллизии, статистика по числу преамбул при успешном установлении соединения. В данной статье приведены формулы для расчёта всех необходимых характеристик. Численные результаты показывают точность предложенной аналитической модели в виде Марковской цепи.

Ключевые слова: межмашинные соединения, канал случайного доступа (RACH), вероятность коллизий, математическая модель, среднее время установления соединения

1. Введение

Всевозможные технологические устройства, в том числе отвечающие за безопасность жизнедеятельности, работают в автономном режиме без участия человека и поддерживают передачу малых данных. Традиционные технологии беспроводной связи, в том числе сети 3GPP LTE, не позволяют установить эффективно M2M-соединения для большого числа одновременно взаимодействующих устройств. Сложность в обслуживании таких устройств базовыми станциями сети связи пятого поколения 5G заключается не только в большом количестве M2M-устройств, но и в необходимости частой передачи данных. Как и для всех новых технологий, анализ особенностей M2M-трафика требует предварительного анализа характеристик в зависимости от числа M2M-устройств. Одно из возможных решений этой проблемы основано на использовании процедуры случайного доступа [1–3].

M2M-устройства, такие как пожарные датчики, периодически отправляют малые объёмы данных при работе в нормальном режиме. Тем не менее, в случае возникновения чрезвычайной ситуации M2M-устройства генерируют трафик взрывного характера, который может привести к перегрузке. Передающиеся в большом объёме сообщения о нештатной ситуации создают коллапс на базовых станциях, откуда перегрузка перераспределяется на все близлежащие узлы сети связи. В случае сетевого коллапса возникают задержки доступа, которые значимы при аварийных и чрезвычайных ситуациях. Целью данной работы является аналитическая модель

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2016 г.
Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 15-07-03051, 16-07-00766.

процедуры установления соединения между оборудованием пользователя и базовой станцией. В соответствии с [2] опорная схема процедуры состоит из четырёх сообщений между пользовательским оборудованием (UE, User Equipment) и базовой станцией (BS, Base Station).

Разработчиками ведутся исследования, направленные на моделирование процедуры установления соединения по радиоканалу случайного доступа, например, найдены характеристики с помощью имитационного моделирования [4, 5], и через аналитические модели [6–8], обзор известных работ по данному вопросу представлен в [9]. В отличие от известных результатов, цель данного исследования заключается в получении решения в замкнутой форме, которое зависит от минимального числа параметров процедуры установления соединения и нетрудно для расчёта. Данная статья является продолжением работ [4, 6], где был предложен подход к аналитическому моделированию с использованием марковской цепи.

В техническом отчёте 3GPP [2] перечислены характеристики, рекомендуемые к исследованиям для M2M-соединений:

1. Вероятность коллизии, определяемая как отношение числа неудачных попыток, когда два или более M2M-устройства в один момент времени выбирают одну и ту же преамбулу, к общему числу возможных попыток установления соединения.
2. Вероятность успешного установления соединения, определяемая как вероятность успешного завершения соединения в пределах максимального числа разрешённых попыток отправки преамбул.
3. Статистика по количеству преамбул, необходимых для успешного установления соединения.
4. Статистика по времени установления соединения для процедуры установления соединения между первой попыткой отправки преамбулы до успешного соединения M2M-устройства с базовой станцией.

В текущей работе представлены все вероятностно-временные характеристики, предлагаемые к исследованию в TR 37.868. Статья организована следующим образом. В разделе 2 кратко описана процедура из четырёх сообщений по радиоканалу случайного доступа и основные упрощающие предположения. В разделе 3 представлены формулы для расчёта ключевых показателей в замкнутой форме. В разделе 4 представлены численные примеры вероятностно-временных характеристик и перечислены задачи дальнейших исследований.

2. Процедура установления соединения

Широко известна процедура установления соединения между пользователем и базовой станцией с использованием четырёх сообщений по радиоканалу случайного доступа [2, 4–9]. Процедура начинается с передачи преамбулы от оборудования пользователя к базовой станции (Msg1). После отправки преамбулы оборудование пользователя ожидает от базовой станции ответ в виде Msg2 (RAR, Random-Access Response). Если время ожидания Msg2 истекло и сообщение не получено, значит, произошла коллизия из-за наличия нескольких устройств, отправляющих одну и ту же преамбулу в один момент времени. В случае коллизии оборудование пользователя повторяет попытку передачи преамбулы после заранее заданного интервала ожидания. При превышении порога попыток передачи преамбулы процедура установления соединения по радиоканалу RACH признаётся неудачной. В случае успешной передачи преамбулы в виде Msg1 и получения ответа Msg2, оборудование пользователя и базовая станция обмениваются ещё одной парой сообщений Msg3 и Msg4. Сообщение HARQ (Hybrid Automatic Repeat request) в виде сообщения Msg3 передаётся по радиоканалу PUSCH (Physical Uplink Shared Channel). Ответное сообщение Msg4 является последним в процедуре установления соединения. Считается, что ответные сообщения Msg2 и Msg4 всегда гарантированно передаются. При

превышении порога попыток передачи сообщений Msg3/Msg4 [2] необходимо заново передавать преамбулу и последующие сообщения.

Введём ряд упрощающих предположений для процедуры установления соединения и построим математическую модель для этой процедуры в виде дискретной цепи Маркова в соответствии с [6]. Введём обозначения для интервалов времени, необходимых на отправку и обработку сообщений. Время установления соединения может быть рассчитано путём суммирования соответствующих временных интервалов, введённых ниже:

- Δ_1^1 — время ожидания для синхронизации до передачи Msg1;
- Δ_1^2 — время передачи Msg1;
- Δ_1^3 — время обработки Msg1 на базовой станции;
- Δ_1^4 — время ожидания ответа Msg2;
- $\Delta_1 := \Delta_1^1 + \Delta_1^2 + \Delta_1^3 + \Delta_1^4$ — время от начала процедуры до отправки сообщения Msg3 или повторной передачи преамбулы;
- Δ_2 — время ожидания для повторной передачи Msg1;
- Δ_3 — временной интервал после успешной передачи Msg1 и Msg2 до отправки сообщения HARQ (Msg3);
- Δ_4 — время для передачи сообщения Msg3, ожидания ответного сообщения Msg4 и обработки успешно полученного Msg4.

Введённые обозначения показаны на диаграмме последовательностей сообщений для случая успешного установления соединения без коллизий на рис. 1 и для случая с коллизиями на рис. 2.

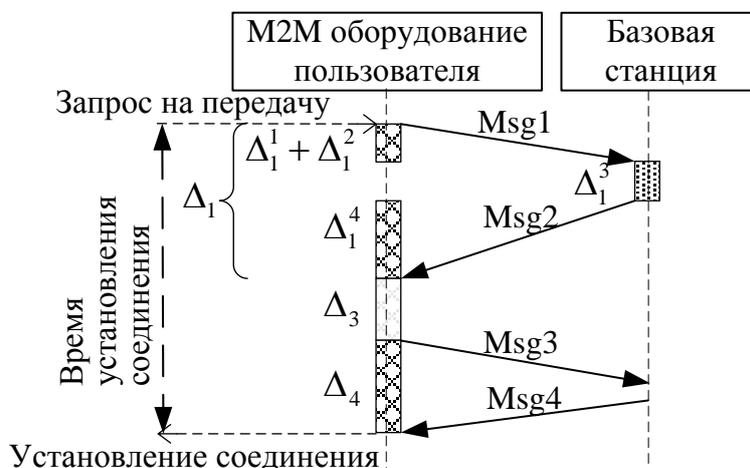


Рис. 1. Диаграмма последовательности сообщений без коллизий

При успешном соединении время установления равно сумме временных интервалов. При возникновении коллизии или при превышении порога на число попыток передачи сообщений Msg3 необходимы повторные попытки отправки преамбулы, что увеличивает время установления соединения. В настоящее время даны рекомендации для ограничения повторных передач для Msg1 и для Msg3 числами $N = 9$ и $M = 4$ [2] соответственно. Обозначим через p и g вероятность коллизий сообщений Msg1 и Msg2.

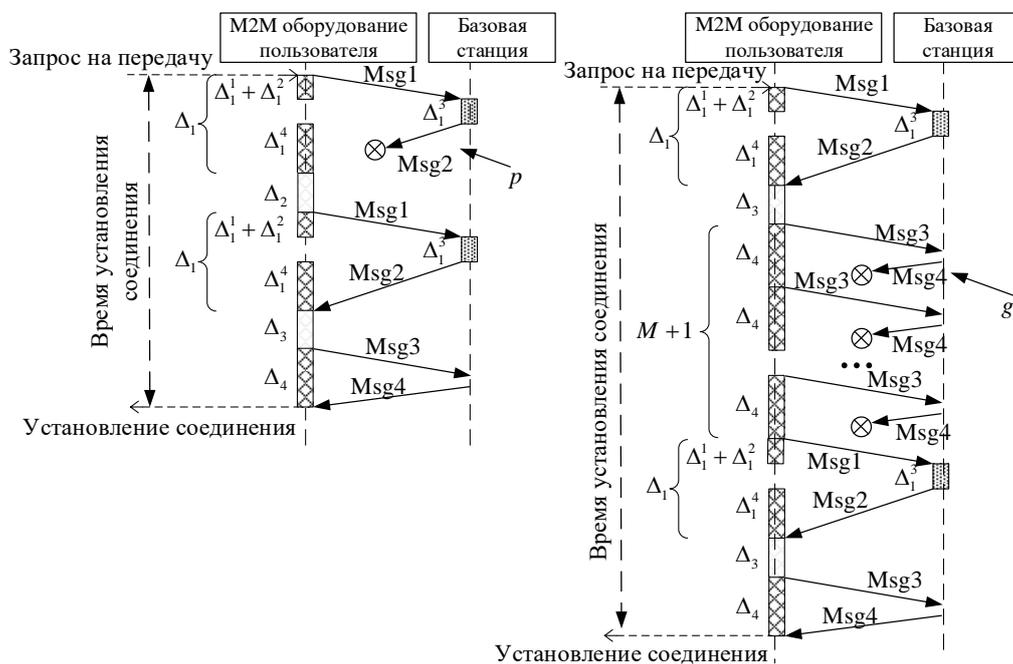


Рис. 2. Диаграммы последовательностей сообщений с коллизиями: (а) коллизии преамбулы, (б) превышение порога на число попыток при отправке сообщений Msg3

3. Математическая модель процедуры установления соединения

Опишем цепь Маркова $\{\xi_i, i = 0, \dots, (N + 1)(M + 1) + 1\}$ с дискретным временем и пространством состояний

$$X = \{(n, m, k), n = 0, \dots, N, m = 0, \dots, M, k = 0, \dots, n\} \cup \{\omega, v\},$$

с начальным состоянием $(0, 0, 0)$, двумя поглощающими состояниями ω и v . Начальное состояние представляет начало процедуры, после которой будет следовать первая попытка передачи преамбулы, поглощающее состояние ω , которое означает успешное установление соединения, и поглощающее состояние v , означающее отказ в установлении соединения. Другие состояния обозначены (n, m, k) , где n — число ретрансляций Msg1, m — число ретрансляций Msg3 после последнего успешно переданного сообщения Msg1, и k — число успешно переданных сообщений Msg1, после которого все $M + 1$ последующие передачи сообщений Msg3 не были переданы в результате коллизий. На рис. 3 изображён один из возможных путей от состояния $(0, 0, 0)$ до состояния (n, m, k) при успешном установлении соединения.

Отметим, что время установления соединения в процедуре установления соединения по радиоканалу случайного доступа определяется как интервал времени от момента попытки первой передачи преамбулы до момента окончания обработки успешно полученного Msg4. В статье не различаются два разных пути, имеющие одинаковое время установления соединения в одном и том же состоянии (n, m, k) , после которого соединение будет установлено.

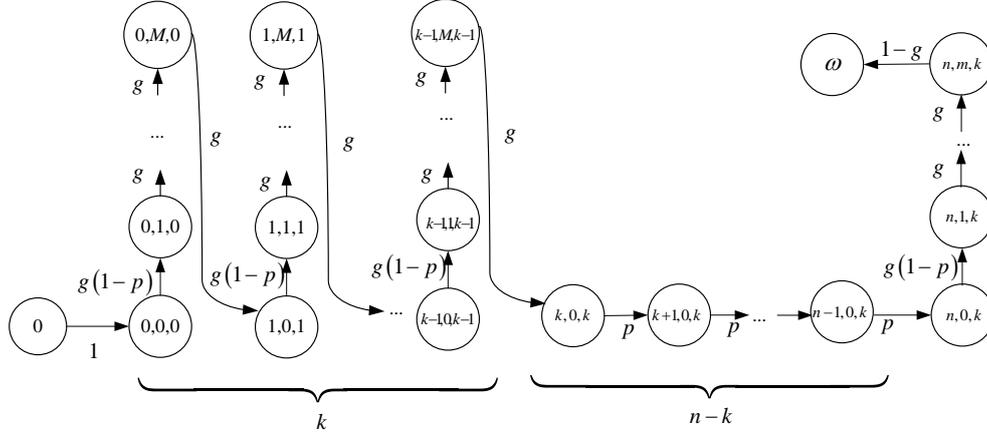


Рис. 3. Пример успешной процедуры с повторными передачами Msg1 и Msg3

В этих предположениях вероятность $P(n, m, k)$ попадания в состояние (n, m, k) из состояния $(0, 0, 0)$ в цепи Маркова $\{\xi_i\}$ определяется по формуле

$$P(n, m, k) = p^{n-k} C_n^k ((1-p)g^{M+1})^k (1-p)g^m, \quad (n, m, k) \in X. \quad (1)$$

Первый множитель p^{n-k} означает $n - k$ коллизий Msg1, множитель $((1-p)g^{M+1})^k$ — k успешных передач Msg1, после каждой из которых следует $M+1$ неуспешных передач сообщений Msg3, множитель $(1-p)g^m$ соответствует последней успешной передаче Msg1 с m ретрансляциями Msg3, биномиальный коэффициент C_n^k отражает число возможных путей, соответствующих такой процедуре.

Вероятность успешного установления соединения и вероятность отказа представлены формулами (2) и (3):

$$P(\omega) = \sum_{(n,m,k) \in X} P(n, m, k) \cdot (1-g) = 1 - (p + (1-p)g^{M+1})^{N+1}, \quad (2)$$

$$P(v) = 1 - P(\omega) = (p + (1-p)g^{M+1})^{N+1}. \quad (3)$$

Время $D(n, m, k)$ установления соединения из состояния (n, m, k) соответствует сумме временных интервалов, участвующих в процедуре и может быть описано формулой (4):

$$\begin{aligned} D(n, m, k) &= (n-k)(\Delta_1 + \Delta_2) + k(\Delta_1 + \Delta_3 + M\Delta_4) + \Delta_1 + \Delta_3 + (m+1)\Delta_4 = \\ &= (\Delta_1 + \Delta_2) \cdot n + \Delta_4 \cdot m + (\Delta_3 + M\Delta_4 - \Delta_2) \cdot k + \Delta_1 + \Delta_3 + \Delta_4. \end{aligned} \quad (4)$$

Обозначим через $Q(n, m, k)$ вероятность того, что процедура установления соединения будет завершена сразу после состояния (n, m, k) . Из определения вероятности $Q(n, m, k)$ получим формулу (5):

$$Q(n, m, k) = \frac{P(n, m, k) \cdot (1-g)}{P(\omega)}. \quad (5)$$

Среднее время установления соединения D определяется по формуле

$$D = \sum_{(n,m,k) \in X} Q(n, m, k) D(n, m, k), \quad (6)$$

среднее время установления соединения может быть вычислено в явном виде по формуле (7):

$$\begin{aligned} D = & (\Delta_1 + \Delta_3 + \Delta_4) + \Delta_4 \cdot \frac{g - (M+1)g^{M+1} + Mg^{M+2}}{(1-g)(1-g^{M+1})} + \\ & + (\Delta_1 + \Delta_2) \cdot \frac{\beta(1 - (N+1)\beta^N + N\beta^{N+1})}{(1-p)(1-g^{M+1})(1-\beta^{N+1})} + \\ & + (\Delta_3 + M\Delta_4 - \Delta_2) \cdot \frac{g^{M+1}(1 - (N+1)\beta^N + N\beta^{N+1})}{(1-g^{M+1})(1-\beta^{N+1})}, \quad (7) \end{aligned}$$

где $\beta = p + g^{M+1}(1-p)$ — суммарная вероятность ретрансляции преамбулы.

Функция распределения (ФР) времени установления соединения представлена формулой (8),

$$F_d(x) = \sum_{(n,m,k) \in X} \frac{P(n, m, k) \cdot (1-g) \cdot u(x - D(n, m, k))}{P(\omega)}, \quad (8)$$

где $u(x)$ — функция Хевисайда.

Вероятность P_l , ФР $F_l(y)$ и преобразование Лапласа–Стилтьеса (ПЛС) $\alpha(s)$ того, что для установления соединения будет необходимо l преамбул, представлены формулами (9), (10) и (11):

$$P_l = \sum_{\substack{n=l-1 \\ (n,m,k) \in X}} \frac{P(n, m, k) \cdot (1-g)}{P(\omega)} = \frac{(1-p)(1-g^{M+1})\beta^{l-1}}{1-\beta^{N+1}}, \quad l = \overline{1, N+1}, \quad (9)$$

$$F_l(y) = \sum_{1 \leq l \leq \lfloor y \rfloor} P_l = \frac{1 - \beta^{\lfloor y \rfloor}}{1 - \beta^{N+1}}, \quad (10)$$

$$\alpha(s) = \sum_{1 \leq l \leq N+1} P_l e^{-ls} = \frac{1 - \beta}{1 - \beta^{N+1}} \cdot \frac{1 - (\beta e^{-s})^{N+1}}{e^s - \beta}. \quad (11)$$

Для статистических данных можно использовать среднее число преамбул A , необходимых для успешного установления соединения (12) и δ -квантиль любого уровня $F_l(y_\delta) = \delta$ (13).

$$A = -\alpha'(s)|_{s=0} = \frac{1 - (N+2)\beta^{N+1} + (N+1)\beta^{N+2}}{(1-\beta^{N+1})(1-\beta)}, \quad (12)$$

$$y_\alpha = \log_\beta(1 - \alpha + \alpha \cdot \beta^{N+1}). \quad (13)$$

Отметим, что для вероятности коллизий p при отправке преамбулы предлагаются различные решения. Например, в [2] предложена формула (14), а в [8] формула (15). Формула (15) не учитывает попытки доступа, которые в тот момент времени

не нуждались в установлении соединения.

$$p = 1 - e^{-\gamma/L}, \quad (14)$$

$$p = 1 - e^{-\gamma/L} - \frac{\gamma}{L}e^{-\gamma/L}, \quad (15)$$

где γ — реальная интенсивность попыток доступа, а L — общее число возможных попыток доступа в секунду.

В текущей работе проведено сравнение (14) и (15) и использовалась для численного эксперимента формула (14), предложенная в [2].

4. Численный эксперимент

Для анализа вероятностно-временных характеристик рассмотрим одну соту сети LTE, поддерживающую обслуживание M2M-устройств, для данных, перечисленных в табл. 1 [2, 4–6, 9].

Таблица 1

Исходные параметры

Параметры	Обозначение	Значение
Количество возможных попыток доступа (индекс конфигурации физического канала случайного доступа б)	L	200
Максимальное число ретрансляций преамбул (Msg1)	N	9
Максимальное число ретрансляций сообщений HARQ (Msg3)	M	4
Число преамбул в слоте для передачи Msg1	N_{pr}	54
Вероятность коллизии преамбулы (Msg1)	p	[0; 1]
Вероятность коллизии HARQ (Msg3)	g	0,02; 0,5; 0,8; 0,95
Время от начала процедуры до отправки сообщения Msg 3 или повторной передачи преамбулы	Δ_1	10,5 мс
Время отклика (Backoff window)	Δ_2	20 мс
Временной интервал после успешной передачи Msg2 до отправки Msg3	Δ_3	5 мс
Временной интервал для отправки Msg3, ожидания и обработки Msg4	Δ_4	6 мс

Для эксперимента выбрана следующая схема генерируемого M2M-трафика: M2M-устройства генерируют запросы базовой станции равномерно, 90% M2M-устройств, находящихся в соте нуждаются в корректировке местоположения с периодичностью 10 с.

На рис. 4 и 5 показана зависимость вероятности успешного соединения и среднего времени установления соединения от вероятности коллизии и числа M2M-устройств в сети и различных вероятностях повторной передачи HARQ g .

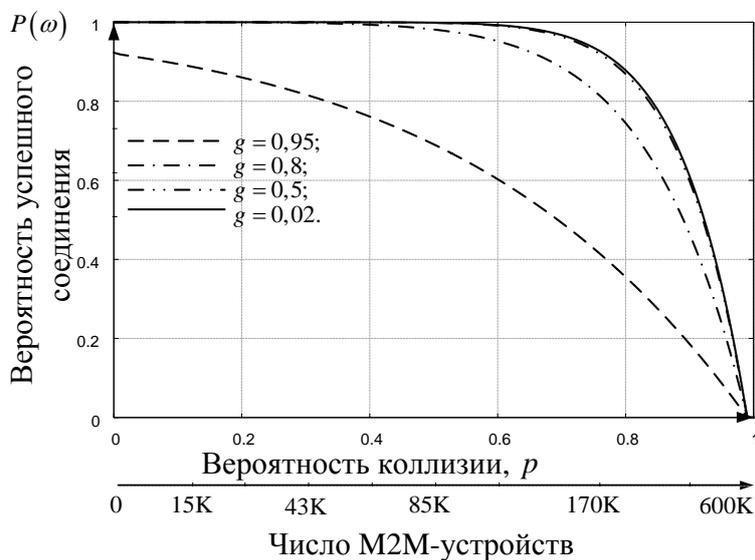


Рис. 4. Вероятность успешного установления соединения

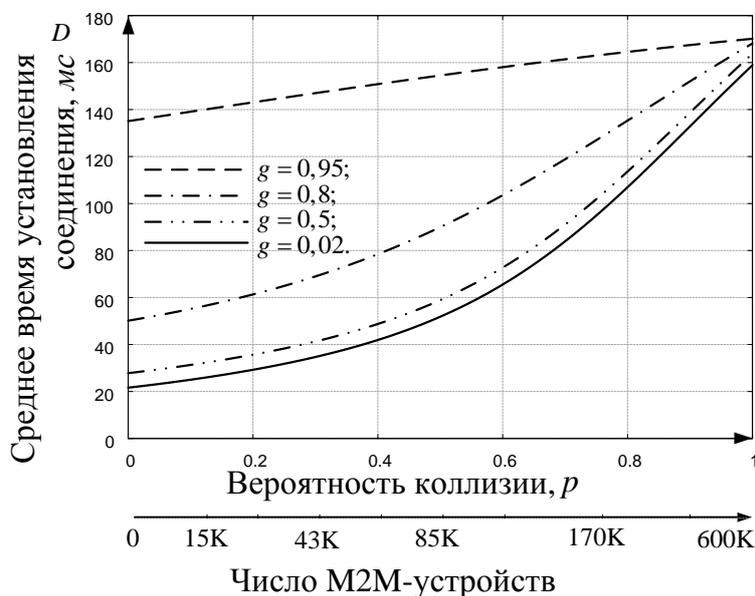


Рис. 5. Среднее время установления соединения

Графики показывают, что при $g \leq 0,5$ даже при вероятности коллизий $p = 0,6$ вероятность успешного доступа близка к 1. Среднее время установления соединения

зависит от изменения вероятности коллизии p и g и может достигать 170 мс из-за значительного количества повторных передач преамбулы и HARQ-сообщений.

5. Заключение

Полученные в данной статье результаты в части вероятности успешного установления соединения могут быть применены, например, в службах управления парком такси при аэропортах. Среднее время при установлении соединения крайне важно в области мониторинга землетрясений, поскольку даже десятки миллисекунд имеют значение при реагировании экстренными службами. Все перечисленные в [2] характеристики для сетей LTE выражены в явном виде и могут быть использованы для предварительного анализа.

Интересной задачей для дальнейших исследований является построение на основе данной математической модели процедуры установления соединений с использованием схемы I-RA (Improved Random Access) с D2D-RA-устройствами (Device-to-Device), агрегирующими информацию для передачи на базовую станцию от всех близлежащих M2M-устройств. Другой задачей является применение процедуры запрета классов вызовов ACB (Access Class Baring) на основе процедуры установления соединения по радиоканалу случайного доступа, исследованной в данной работе.

Литература

1. 3GPP LTE Release 10 & beyond (LTE-Advanced), MTC Enhancements.
2. Study on RAN Improvements for Machine-type Communications. Release 11. — TR 37.868. — 2011.
3. Study on enhancements to Machine-Type Communications and other mobile data applications; RAN Aspects. Release 12. — TR 37.869. — 2013.
4. Modelling a Random Access Channel with Collisions for M2M Traffic in LTE Networks / V. Borodakiy, K. Samouylov, Yu. Gaidamaka, P. Abaev, I. Buturlin, Sh. Ete-zov // NEW2AN/ruSMART / Ed. by S. Balandin et al. — Springer, Heidelberg. LNCS 8638, 2014. — Pp. 301–310.
5. Analyzing the Overload of 3GPP LTE System by Diverse Classes of Connected-Mode MTC Devices / O. Dementev, O. Galinina, M. Gerasimenko, T. Tirronen, J. Torsner, S. Andreev, Y. Koucheryavy // IEEE World Forum on Internet of Things. — 2014. — Pp. 309–312.
6. Baseline Analytical Model for Machine-type Communications over 3GPP RACH in LTE-advanced Networks / K. Samouylov, Yu. Gaidamaka, I. Gudkova, E. Zaripova, S. Shorgin // ISCIS 2016: Communications in Computer and Information Science. — Vol. 659. — Springer, 2016. — Pp. 203–213.
7. Wei C.-H., Bianchi G., Cheng R.-G. Modelling and Analysis of Random Access Channels with Bursty Arrivals in OFDMA Wireless Networks // IEEE Trans. on Wireless Communication. — 2015. — No 14. — Pp. 1940–1953.
8. RACH Collision Probability for Machine-Type Communications / R.-G. Cheng, C.-H. Wei, S.-L. Tsao, F.-C. Ren. — 2012. — Pp. 1–5.
9. Virtual Code Resource Allocation for Energy-Aware MTC Access over 5G Systems / M. Condoluci, G. Araniti, M. Dohler, A. Iera, A. Molinaro // Ad Hoc Networks. — 2016. — Vol. 43. — Pp. 3–15.

UDC 621.39

DOI: 10.22363/2312-9735-2017-25-1-9-18

Performance and Modeling of Session Setup Procedure Using Random Access Channel

E. R. Zaripova, A. Ardila Pinto

*Department of Applied Probability and Informatics
RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia)
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russia, 117198*

We observe nowadays increasing the number of devices using Internet for data transmission in LTE network. Researchers offer their algorithms and methods for base station load reduction. Our approach allows minimizing network resources using Random Access Channel for session setup procedure. We obtain all performance measures for this procedure between user equipment and LTE base station. Procedure includes four messages: preamble transmission on the physical random access channel (Msg1), random access response of existing RACH procedure (Msg2), connection request, a.k.a. Hybrid automatic repeat request on the physical uplink shared channel (Msg3) and connection resolution (Msg4). This approach is used for small data transmission. If two or more devices select the same preamble, then collision occurs, and it is necessary to retransmit another preamble. Similarly, Msg3 may be blocked due to lack of resources. Our analytical model includes the dependence on collision probability. This solution has been proposed by 3GPP technical report 37.868. We obtain such performance measures as collision probability, dependent upon the number of attempts and the overall number of attempts in the period; access success probability; statistics of number of preamble transmissions; statistics of access delay. Numerical experiment demonstrate the accuracy of the proposed analytical model in the form of Markov chains.

Key words and phrases: LTE-advanced, machine-type communications, random access channel, Markov chain, access success probability, average access delay

References

1. 3GPP LTE Release 10 & beyond (LTE-Advanced), MTC Enhancements.
2. Study on RAN Improvements for Machine-type Communications. Release 11., TR 37.868 (Sept 2011).
3. Study on enhancements to Machine-Type Communications and other mobile data applications; RAN Aspects. Release 12., TR 37.869 (Sept 2013).
4. V. Borodakiy, K. Samouylov, Yu. Gaidamaka, P. Abaev, I. Buturlin, Sh. Etezzov, Modelling a Random Access Channel with Collisions for M2M Traffic in LTE Networks, Springer, Heidelberg. LNCS 8638, 2014, pp. 301–310.
5. O. Dementev, O. Galinina, M. Gerasimenko, T. Tirronen, J. Torsner, S. Andreev, Y. Koucheryavy, Analyzing the Overload of 3GPP LTE System by Diverse Classes of Connected-Mode MTC Devices, in: IEEE World Forum on Internet of Things, 2014, pp. 309–312.
6. K. Samouylov, Yu. Gaidamaka, I. Gudkova, E. Zaripova, S. Shorgin, Baseline Analytical Model for Machine-type Communications over 3GPP RACH in LTE-advanced Networks, in: ISCIS 2016: Communications in Computer and Information Science, Vol. 659, Springer, 2016, pp. 203–213.
7. C.-H. Wei, G. Bianchi, R.-G. Cheng, Modelling and Analysis of Random Access Channels with Bursty Arrivals in OFDMA Wireless Networks, IEEE Trans. on Wireless Communication (14) (2015) 1940–1953.
8. R.-G. Cheng, C.-H. Wei, S.-L. Tsao, F.-C. Ren, RACH Collision Probability for Machine-Type Communications (2012) 1–5.
9. M. Condoluci, G. Araniti, M. Dohler, A. Iera, A. Molinaro, Virtual Code Resource Allocation for Energy-Aware MTC Access over 5G Systems, Ad Hoc Networks 43 (2016) 3–15.