

Анализ эффективности технологий передачи данных для Интернета вещей NB-IoT и LTE-M

В. Г. Дроздова¹, Р. В. Ахпашев

Интернет вещей (IoT) – это актуальнейшее направление развития мобильных телекоммуникаций, большой шаг на пути к сетям 5-го поколения New Radio. Концепция IoT подразумевает возможность выхода в Интернет таких устройств, как сенсоры и датчики для периодической отправки результатов измерений различных параметров. В настоящее время передача данных Интернета вещей реализуется поверх существующих сетей 4-го поколения LTE в двух формах: Narrow Band IoT и LTE-M. В рамках данной статьи авторами был выполнен сравнительный анализ данных технологий, с помощью имитационного моделирования были получены характеристики, наглядно демонстрирующие скорости передачи данных и эффективность каждой из них.

Ключевые слова: LTE, NB-IoT, LTE-M, Интернет вещей, имитационное моделирование.

1. Введение

Интернет вещей (IoT, Internet of things) – это новая концепция мобильных телекоммуникаций [1], подразумевающая объединение в единую сеть Интернет не только компьютеров и смартфонов, но и таких устройств, как датчики, камеры, сенсоры и пр., собирающих определенную информацию и отправляющих ее для дальнейшей обработки на серверы различных приложений. IoT имеет множество областей применения:

- IOsL (Internet of smart living) – предоставляет возможность удаленного включения и выключения электроприборов для избегания несчастных случаев и сохранения энергии (например, система «Умный дом»);
- IOsC (Internet of smart cities) – мониторинг состояния и управление городской инфраструктурой (например, использование датчиков света для включения фонарей; датчики наполненности мусорных баков – для вызова специальных служб и пр.);
- IOsI (Internet of smart industry) – отслеживание состояния промышленного оборудования, обнаружение утечки газа или других токсичных веществ в химической и горнодобывающей промышленности;
- IOsA (Internet of smart agriculture) – отслеживание местоположения животных на пастбищах, климат-контроль при выращивании агрокультур и многое другое;
- IOsH (Internet of smart health) – мониторинг состояния пациентов в больницах и в домах престарелых.

Это далеко не полный перечень вариантов использования технологий Интернета вещей, стимулирующих операторов мобильной связи развивать сетевую инфраструктуру для активного внедрения совершенно нового типа трафика.

В настоящее время существует несколько технологий IoT для нелицензируемого спектра, таких как SigFox и LoRa. Однако их использование подразумевает построение абсолютно новой сети, что влечет затраты на соответствующее оборудование. В лицензируемых же частотных спектрах 3GPP (3rd Generation Partnership Project – Партнерский проект 3-го положе-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00464.

ния мобильной связи) предлагает три способа организации мобильного IoT: 1) EC-GSM-IoT (Extended coverage Global System of Mobile IoT – GSM IoT с расширенным покрытием) – данная технология подразумевает реализацию Интернета вещей поверх существующей сети 2-го поколения GSM [2]; 2) LTE-M (Long Term Evolution for Machine-Type Communications – LTE, адаптированный для машинного типа коммуникаций) – это технология LTE, адаптированная прежде всего с точки зрения энергоэффективности для работы с устройствами Интернета вещей, способными сохранять заряд батареи до 10 лет, подразумевающая выделение отдельного частотного диапазона шириной 1.4 МГц [3]; 3) NB-IoT (Narrow Band IoT – узкополосный IoT) – также является технологией, базирующейся на LTE, но, в отличие от LTE-M, интегрирующейся в ту же полосу частот, что и обычные мобильные абоненты, занимая всего 180 кГц спектра [4]. Важным достоинством методов NB-IoT, LTE-M и EC-GSM-IoT является то, что для их внедрения операторам не требуется закупать новое оборудование, достаточно лишь программным способом обновить сеть в уже рабочих частотных диапазонах.

В рамках данной статьи будет выполнен сравнительный анализ эффективности технологий NB-IoT и LTE-M как наиболее востребованных на рынке мобильных телекоммуникаций.

В настоящее время существует несколько работ, где авторами рассматриваются различные аспекты эффективности внедрения технологий мобильного IoT [5–11]. Рассмотрим основные результаты, полученные в упомянутых выше исследованиях.

В работе [5] выполнено исследование вероятности радиопокрытия для LTE-M и NB-IoT с помощью анализаторов спектра (драйв-тесты), была оценена продолжительность жизни аккумуляторов устройств Интернета вещей, показано, что увеличение вероятности радиопокрытия влечет за собой уменьшение числа активных пользователей. Авторами [6] была оценена эффективность использования различных частотных диапазонов для упомянутых выше технологий IoT.

Статья [7] посвящена изучению механизмов повышения эффективности использования технологии радиодоступа NB-IoT. Авторы работы [8] сосредоточились на изучении вопросов развертывания NB-IoT в защитных полосах частот LTE, выполнили анализ взаимной интерференции между технологией IoT и классическим LTE.

Авторы [9] всесторонне изучают технологию LTE-M и оценивают ее с точки зрения эволюции по направлению к сетям 5-го поколения (5G). Работа [10] посвящена вопросам случайного доступа в LTE-M для инициализации взаимодействия с сетью, которые, безусловно, актуальны, так как число одновременно подключаемых устройств в сетях IoT может достигать нескольких тысяч. Авторы анализируют пропускную способность, вероятность успешного подключения к сети, а также время задержки на установление соединения.

В [11] предпринята попытка разработать эффективный механизм динамического управления радиоресурсами в сетях LTE-M для того, чтобы максимизировать использование доступной полосы частот и уменьшить время задержки на передачу данных.

Это далеко не полный перечень работ, посвященных изучению эффективности различных аспектов технологий NB-IoT и LTE-M. В рамках данной работы авторами была разработана имитационная модель, позволяющая оценить скорость передачи данных протоколов NB-IoT и LTE-M для различных входных параметров.

2. Описание технологий мобильного Интернета вещей

Рассмотрим ключевые особенности технологий мобильного Интернета вещей, важные для оценки их эффективности и разработки имитационной модели.

2.1. NB-IoT

Устройства, поддерживающие NB-IoT (3GPP Category NB1, Rel.13), функционируют в полудуплексном режиме с частотным разделением восходящего UL (Uplink) и нисходящего DL (Downlink) каналов. В DL IoT-абонентам выделяется полоса 180 кГц (один ресурсный блок – RB), разбитая на 12 поднесущих с шагом 15 кГц. В UL аналогичная полоса может быть разделена на 12 или 48 поднесущих (3.75 кГц – разнос между поднесущими в последнем случае). 3GPP определяет 3 режима работы NB-IoT: 1) внутри полосы частот LTE (inband); 2) отдельная полоса частот, независимо от LTE (standalone); 3) внутри защитной полосы частот LTE (Guard band). Стоит отметить, что минимальная порция частотного ресурса, выделяемая пользователям LTE, называется группой ресурсных блоков, размер которой зависит от ширины полосы частот. В табл. 1 приведены стандартные размеры таких «порций».

Таблица 1. Размеры групп RB для различных значений ширины полосы частот

Ширина полосы частот, МГц	1.4	3	5	10	15	20
Общее число ресурсных блоков RB	6	15	25	50	75	100
Размер группы ресурсных блоков, RB	1	2	2	3	4	4

На рис. 1 показано распределение частотно-временных ресурсов NB-IoT между различными служебными и трафиковыми каналами, а также опорными сигналами и сигналами синхронизации в нисходящем канале DL.

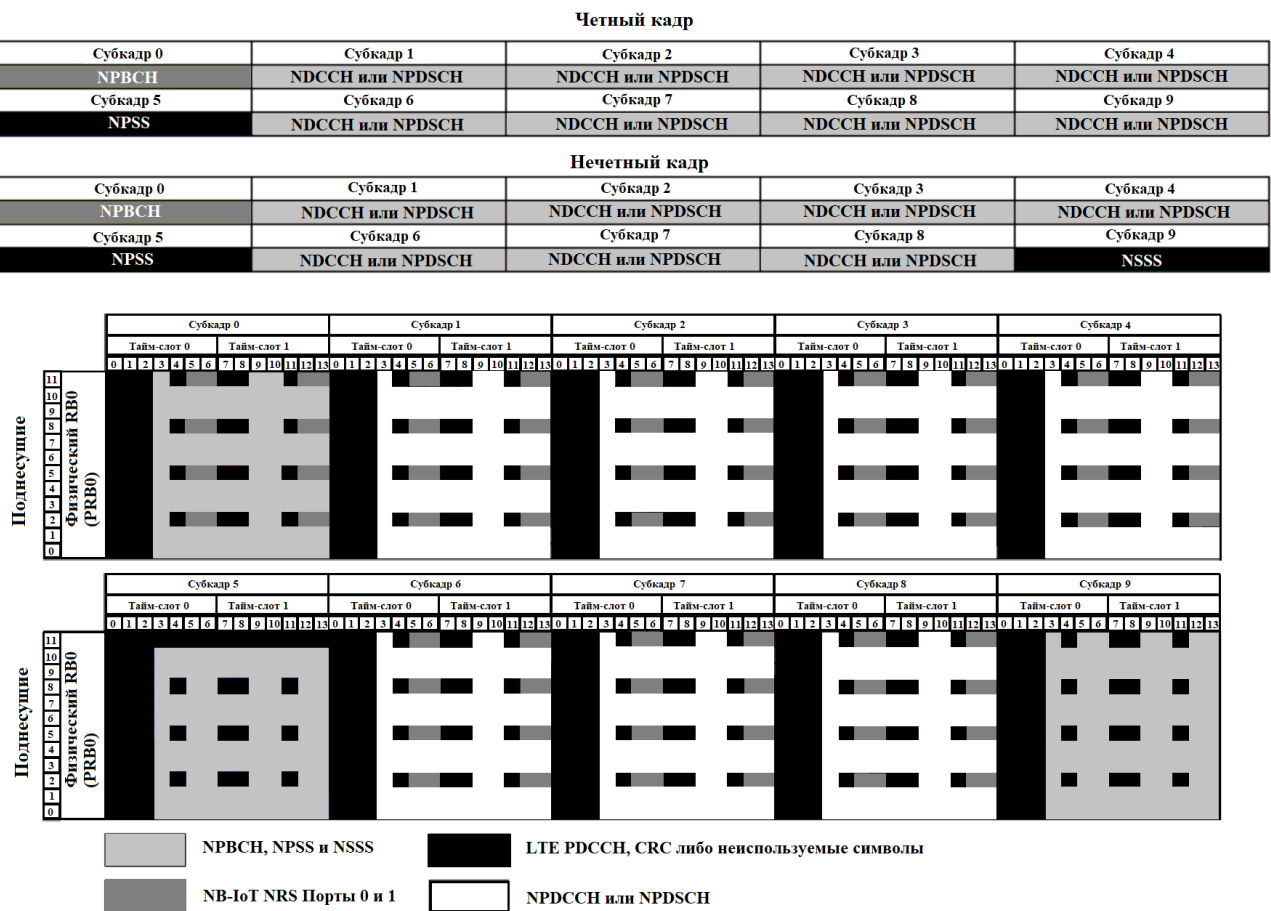


Рис. 1. Физические каналы и сигналы канала DL NB-IoT

NB-IoT вводит новые физические каналы и сигналы, несколько отличные от каналов LTE. Данные от и для абонентских терминалов передаются в каналах NPUSCH (Narrowband Physical Uplink Shared Channel) и NPDSCH (Narrowband Physical Downlink Channel). Функция динамического распределения ресурсов каналов UL и DL передает соответствующие команды в канале управления NPDCCH (Narrowband Physical DL Control Channel), занимая от 6 до 12 поднесущих в течение всего субкадра (1 мс). 6 поднесущих канала управления NPDCCH называются элементом канала управления NCCE (Narrowband Control Channel Element) и могут выделяться терминалам либо по 1, либо по 2 (2-й уровень агрегирования NCCE).

При оценке пропускной способности важно понимать, что первые три OFDM-символа (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) каждого субкадра NB-IoT не содержат данных Интернета вещей, а отдаются под передачу информации канала управления PDCCH LTE-сети, что существенно снижает скорость, достижимую IoT-терминалами. Кроме того, в DL не используются символы, предназначенные для передачи опорных сигналов LTE (LTE CRS – LTE Cell-specific Reference Symbols) – это 8 символов каждую 1 мс. В нисходящем канале допустимо использование лишь QPSK-модуляции (Quadrature Phase Shift Keying).

К дополнительным затратам ресурса на управление можно отнести ресурсы, выделяемые на передачу сигналов синхронизации NPSS (Narrowband Primary Synchronization Signals) – 11 символов за 10 мс; NSSS (Narrowband Secondary Synchronization Signals) – 11 символов за 20 мс; опорных сигналов NRS (Narrowband Reference Signals) – 16 символов каждую 1 мс при поддержке MIMO_{2x2} (Multiple Input Multiple Output) или 8 символов каждую 1 мс без MIMO; широковещательного канала системной информации NPBSCH (Narrowband Physical Broadcast Channel) – полностью занимает 80 мс каждые 640 мс, а также данные выделенных каналов управления и дополнительной системной информации, которые передаются вместе с данными IoT-устройств в канале NPDSCH и занимают до 25 % частотно-временного ресурса.

Для передачи данных по восходящему каналу в NB-IoT поддерживается однотоновая (single-tone) модуляция $\pi/4$ -QPSK и $\pi/2$ -BPSK (Binary Phase Shift Keying), а также опционально многотоновая QPSK (multi-tone).

2.2. LTE-M

LTE-M – это упрощенное название от LTE-MTC LPWA (Low Power Wide Area – сети для устройств с малой мощностью и большим радиусом) [3]. Эта технология, базирующаяся на инфраструктуре сети LTE, рассчитана на маломощные, простые в реализации IoT-устройства (Cat M1) и обеспечивает больший радиус покрытия, чем классическая LTE-сеть. Увеличение радиуса действия как в LTE-M, так и в NB-IoT достигается путем так называемого «бустинга» мощности (Power boosting) – мощность с неиспользуемых поднесущих перераспределяется в пользу активных поднесущих, а также благодаря дополнительным повторам при передаче транспортных блоков (стандартом предусмотрено до 2048 повторов пакета). Достижимый радиус – 15 км, но при этом даже устройства, находящиеся в крайне плохих радиоусловиях, например, на многоуровневых подземных парковках, смогут передавать и принимать свои данные (Deep indoor).

Максимальная теоретически достижимая скорость в LTE-M – это 1 Мбит/с, что значительно выше, чем в NB-IoT (170 кбит/с), и позволяет расширить область применения технологии (например, возможно использование ее для передачи трафика с камер видеонаблюдения). Режим дуплексирования приема и передачи – полудуплексный. Стандартом также вводятся новые физические каналы в нисходящем канале – канал управления MPDCCH, канал для передачи данных и сигнальных сообщений RRC и NAS протоколов MPDSCH, а также канал широковещательной системной информации MPBSCH; в восходящем – канал случайного доступа MPRACH, канал управления MPUCCH, канал данных и сигнальных сообщений протоколов 3-го уровня MPUSCH.

Для разработки имитационной модели радиointерфеса LTE-M важно понимать алгоритм обмена сообщениями при выделении частотно-временного ресурса (рис. 2).

Прежде всего (шаг 1) IoT-пользователь должен получить системные параметры, касающиеся начального доступа в сети (например, PCI – физический идентификатор соты, правило частотных перескоков и пр.), и передаваемую в 1-м системном блоке SIB1 (System Information Block) в канале MPDSCH. Затем (шаг 2) абоненты считывают SIB2 для получения информации о параметрах физических каналов, в частности, канала MPRACH (например, prach-FreqOffset – определяет позицию блоков канала случайного доступа по частоте; rootSeqIndex и prachCS – параметры для генерации преамбулы случайного доступа).

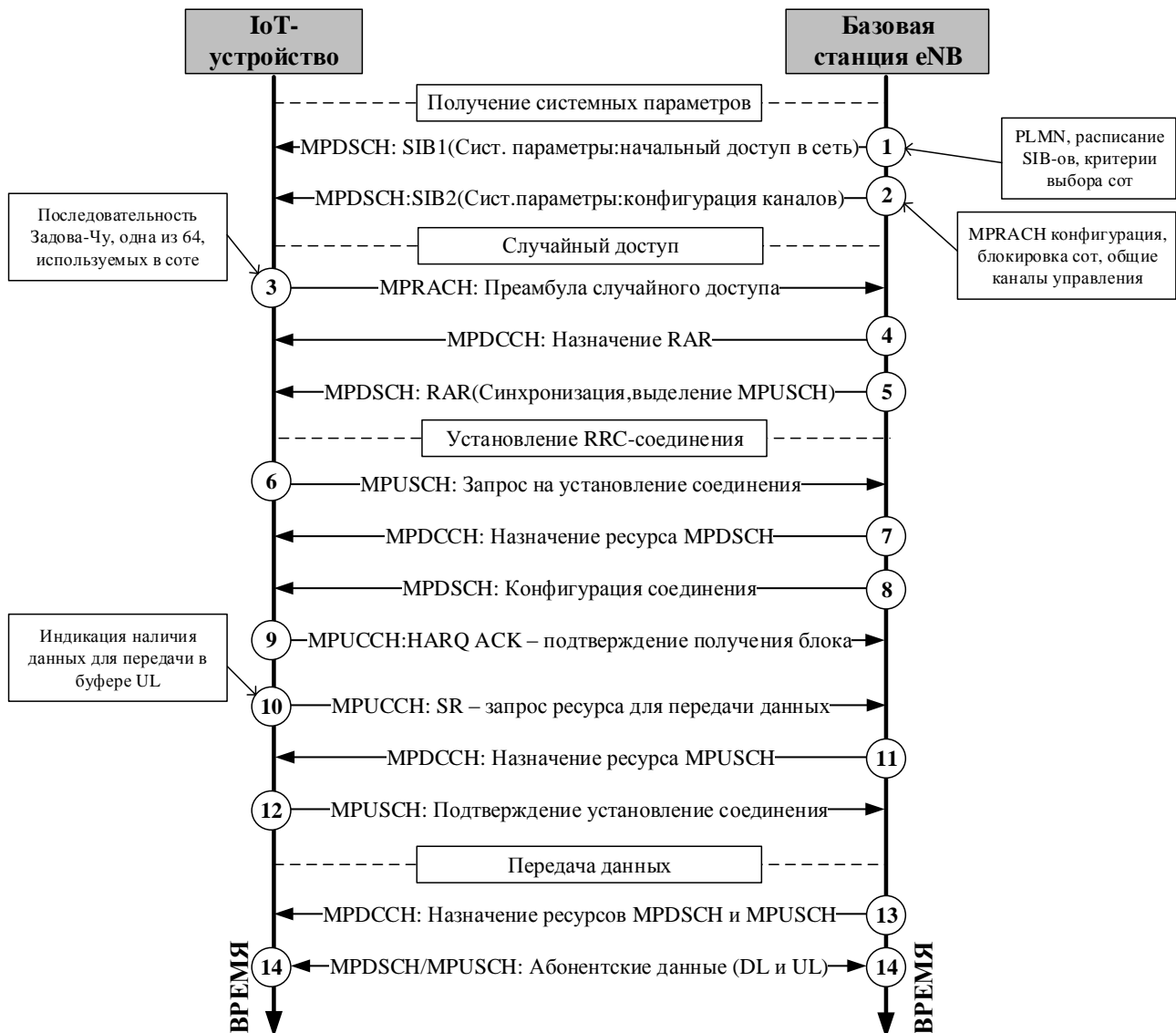


Рис. 2. Алгоритм установления соединения и передачи данных в UL и DL для LTE-M

Декодировав информацию SIB2, абонент может найти канал случайного доступа MPRACH и отправить преамбулу, уведомляя базовую станцию eNodeB о том, что имеются данные для отправки или скачивания (шаг 3). Преамбулой случайного доступа называется последовательность Задова-Чу, обладающая свойствами нулевой авто- и взаимной корреляции, а также постоянной амплитудой. В отличие от классического LTE, пользователь посылает преамбулу не один раз, а numRepetitionPreambleAttempt раз (параметр SIB2), что увели-

чивает время задержки на установление соединения и снижает пропускную способность сети.

Ответ на преамбулу случайного доступа содержится в сообщении RAR (Random Access Response) – шаг 5. Но для того, чтобы его «найти», CatM1-устройство считывает информацию канала управления MPDCCH (шаг 4), где функция распределения радиоресурсов уровня управления множественным доступом к среде MAC (Medium Access Control) отправляет уведомления о назначении пользователям ресурсов каналов MPDCCH и MPUSCH. На 5-м шаге абонент получает RAR, содержащий следующую информацию: идентификатор полученной преамбулы, выделение ресурсных блоков в восходящем канале MPUSCH с определенной модуляцией, кодированием и числом повторных передач, а также информацию для синхронизации восходящего канала TA (Timing Advanced).

В выделенном канале MPUSCH абонент отправляет запрос на установление соединения вместе со своим идентификатором для последующей авторизации (шаг 6), затем снова декодирует MPDCCH (шаг 7), чтобы получить информацию о том, в каком субкадре eNodeB ответит на запрос, отправленный на 6-м шаге (шаг 8). Отправив этот ответ, сеть уведомила пользователя о том, что ресурсы для него активированы и абонент может отправлять и принимать данные (шаг 14). С этого момента абонент отправляет подтверждения об успешности получения транспортных блоков (шаг 9) с помощью механизма HARQ (Hybrid Automated Repeat Request), а также запросы на выделение каналов SR (Scheduling Request) – шаг 10. Для того, чтобы завершить это сигнальное взаимодействие, IoT-устройство должно направить сообщение «RRC Connection Complete» (шаг 12), предварительно получив ресурсы канала MPUSCH в канале MPDCCH (шаг 11). Каждый пакет пользователя в восходящем UL и нисходящем DL канале назначается каналом управления MPDCCH (шаг 13).

3. Имитационное моделирование и численные исследования

В данном разделе представлены зависимости пропускной способности технологий LTE-M и NB-IoT от числа пользовательских терминалов при различных параметрах протокола доступа MAC, полученные с помощью имитационного моделирования в программной среде Mathcad. В табл. 2 приведены входные данные для имитационной модели.

Таблица 2. Входные параметры для моделирования пропускной способности радиоинтерфейса NB-IoT и LTE-M

Параметр		Значение
Трафиковая модель		3GPP IoT [12, Annex E]
UL (восходящий канал)	Размер пакета	20–200 бит (распределение Парето)
	Интенсивность поступления пакетов	40 % – 1 раз в день; 40 % – один раз в 2 часа; 15 % – один раз в час; 5 % – один раз в 30 мин. Сред. значение – 0.47 пакетов в час
DL (нисходящий канал)	Размер пакета	20 бит
	Интенсивность поступления пакетов	40 % – 1 раз в день; 40 % – один раз в 2 часа; 15 % – один раз в час; 5 % – один раз в 30 мин. Сред. значение – 0.47 пакетов в час
Ширина полосы частот на каждой несущей, BW		10 МГц
Режим работы NB-IoT		Inband
Емкость буфера L2 для IoT		4000 байт

Число повторных передач транспортного блока в рамках механизма HARQ, n_{HARQ}	1, 2, 3, 4
Процентное количество ССЕ, выделенных для назначения восходящего канала, N_{CCE}	50 %
SINR (Отношение уровня сигнала к уровню шума и интерференции)	15 дБ
MCS (Схема модуляции и кодирования)	QPSK 2/3
Задержка процессора DSP (Digital Signaling Processor) на обработку сообщений	3 мс

В результате имитационного моделирования были получены характеристики скоростей передачи данных, представленные на рис. 3 и 4.

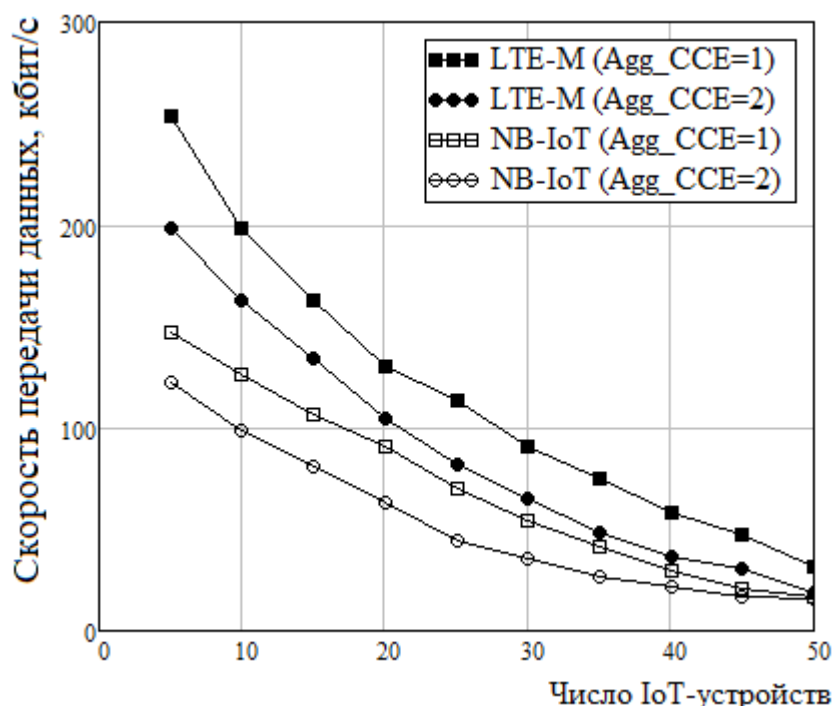


Рис. 3. Скорость передачи данных в сетях NB-IoT и LTE-M для уровней агрегирования ССЕ 1 и 2 в зависимости от числа абонентов (число повторных передач транспортного блока 2)

На рис. 3 представлены зависимости скорости передачи данных для сетей LTE-M и NB-IoT от числа устройств Интернета вещей и варьирующихся значений уровня агрегации элементов канала управления ССЕ, равных 1 и 2 (обеспечение помехозащищенности каналов NPDCCH и MPDCCH), с двумя повторными передачами каждого транспортного блока. Очевидна существенная деградация характеристик при увеличении числа активных устройств, связанная с нехваткой частотно-временных ресурсов, особенно заметная в технологии NB-IoT по причине изначально меньшей полосы по сравнению с LTE-M. Увеличение числа уровней агрегации ССЕ также оказывает существенный эффект на снижение скорости передачи данных, требуя дополнительных ресурсных блоков PRB на передачу данных канала PDCCH.

Влияние числа повторных передач транспортных блоков (number of repetitions), реализуемых в технологиях Интернета вещей независимо от того, в каких радиоусловиях находятся устройства, и являющихся важнейшей функцией IoT для обеспечения большого радиуса действия, демонстрируется на рис. 4а (NB-IoT) и 4б (LTE-M). На рис. 4б показаны зависимости скорости передачи данных для IoT-технологий от числа устройств при фиксированном зна-

чении уровня агрегации, равном единице, и меняющемся от 1 до 4 числе повторных передач транспортных блоков. Из графиков очевидны явное уменьшение скорости передачи данных при увеличении числа повторных передач и заметно более высокие значения пропускной способности LTE-M по сравнению с NB-IoT.

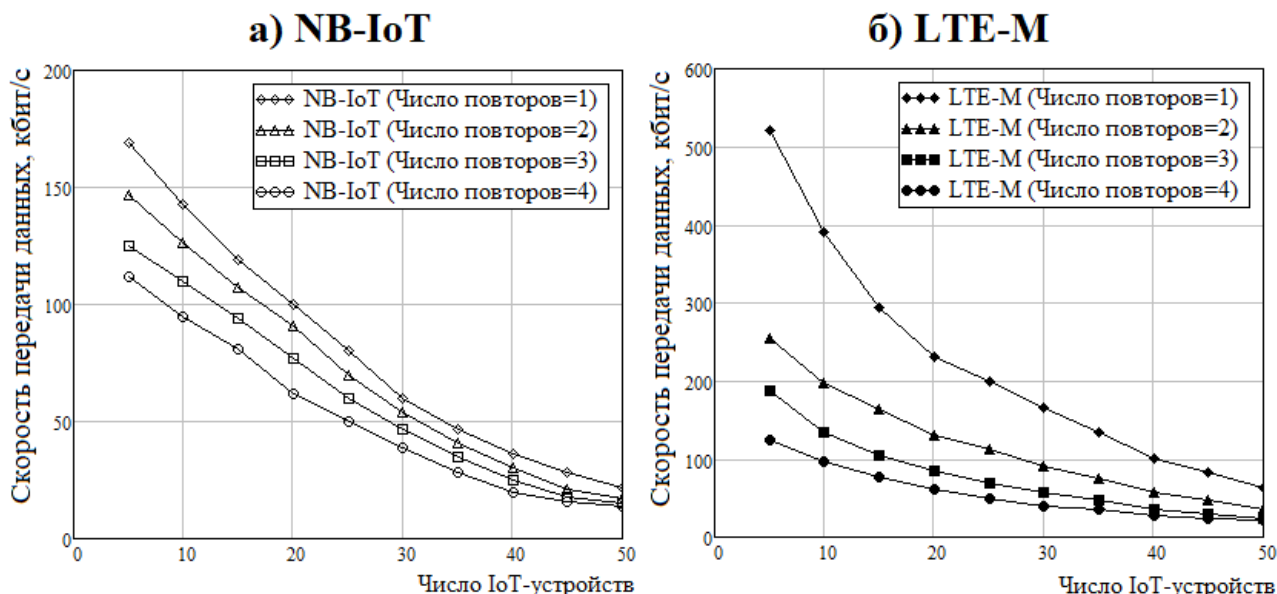


Рис. 4. Скорость передачи данных в сетях NB-IoT (а) и LTE-M (б) для 1-го уровня агрегирования ССЕ в зависимости от числа абонентов и варьируемого числа повторных передач транспортных блоков

4. Заключение

Интернет вещей – это ключевое направление развития современного Интернета, обуславливающее появление большого количества научно-исследовательских работ, посвященных данной тематике. В настоящей статье описаны результаты имитационного моделирования в программной среде Mathcad радиоинтерфейса NB-IoT и LTE-M. С помощью разработанной авторами модели были получены зависимости скорости передачи данных в нисходящем канале от числа IoT-устройств для таких параметров протокола управления доступом к среде MAC, как уровень агрегирования элементов канала управления и число повторных передач транспортных блоков данных, наглядно демонстрирующие деградацию характеристик при увеличении числа одновременно подключенных активных устройств, увеличении числа уровней агрегирования ССЕ и числа повторных передач транспортных блоков.

Литература

1. Patel P. K., Patel S. M. Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges // International Journal of Engineering Science and Computing. 2016. V. 6, Iss. 5. P. 6122–6131.
2. 3GPP Low Power Wide Area Technologies, GSMA White Paper, <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf> (спецификации).
3. 3GPP TS 23.682: Architecture enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications (спецификации).
4. 3GPP TR 36.802 V13.0.0: 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); NB-IOT; Technical Report for BS and UE radio transmission and reception. P. 59.

5. Lauridsen M., Kovacs I. Z., Mogensen P., Sorensen M., Holst S. Coverage and Capacity Analysis of LTE-M and NB-IoT in a Rural Area // 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Canada. P. 1–6.
6. Yang W., Wang M., Zhang J., Zou J., Hua M., Xia T., You X. Narrowband Wireless Access for Low-Power Massive Internet of Things: A Bandwidth Perspective // IEEE Wireless Communications. 2017. V. 24, Iss. 3. P. 138–145.
7. Hoglund A., Lin X., Liberg O., Behravan A., Yavuz E. A., Zee M. V. D., Sui Y., Tirronen T., Ratilainen T., Eriksson D. Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IoT // IEEE Network. 2017. V. 31, Iss. 6. P. 0890–8044.
8. Ratasuk R., Tan J., Mangalvedhe N., Ng M. H., Ghosh A. Analysis of NB-IoT Deployment in LTE Guard-Band // 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC-Spring). P. 1–10.
9. Ratasuk R., Mangalvedhe N., Bhatoolaul D., Ghosh A. LTE-M Evolution Towards 5G Massive MTC // 2017 IEEE GlobeCom Workshops (GC Wkshps). P. 1–6.
10. Zhao Y., Yang H., Liu K., Huang L., Shi M., Zhang M. A random-access algorithm based on statistics waiting in LTE-M system // 2017 12th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE). P. 214–218.
11. Dawaliby S., Bradai A., Pousset Y. Scheduling optimization for M2M communications in LTE-M // 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). P. 216–218.
12. TR45.820: Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT), Release 13 (спецификации).

*Статья поступила в редакцию 12.09.2018;
переработанный вариант – 22.09.2018.*

Дроздова Вера Геннадьевна

к.т.н., доцент кафедры телекоммуникационных сетей и вычислительных средств СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: drozdova_vera@mail.ru.

Ахпашев Руслан Владимирович

фспирант кафедры телекоммуникационных сетей и вычислительных средств СибГУТИ, e-mail: fzybotsogood@gmail.com.

The study of the Internet of Things data transmission NB-IoT and LTE-M technologies

V. Drozdova, R. Akhpashev

The Internet of Things is one of the most urgent mobile telecommunications developments and a big step to the 5th Generation New Radio networks (5G NR). The IoT concept implies the possibility of the Internet access for such devices as sensors, actuators and other measuring devices intended for periodic sending the results of different parameters measurements. Currently the Internet of Things data transmission is realized over the existing 4th generation mobile networks (LTE) in two different forms: Narrow Band IoT and LTE-M. In this paper the authors present the comparative analysis of these technologies and the characteristics which visually demonstrate the efficiency of each one which were derived by the help of simulation.

Keywords: LTE, NB-IoT, LTE-M, Internet of things, simulation.