

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОТОКОЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ NB-IOT-УСТРОЙСТВ

А.В. Колесников

avkolesnikov@bmstu.ru

М.А. Басараб

basarab@bmstu.ru

П.Г. Ключарев

pgk@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Признанным стандартом глобальных сетей устройств ограниченной мощности LPWAN (Low Power Wide Area Network) является технология NB-IoT. Каждый день по всему миру внедряются новые решения на основе технологий интернета вещей (Internet of Things) в самые разнообразные сферы жизни — это системы мониторинга окружающей среды, обнаружения вторжений, все виды транспорта, автоматические парковки, трекеры, решения в области ЖКХ и др. Поскольку большинство устройств питаются от встроенного источника, разработчикам приложений важно создавать программное обеспечение так, чтобы минимизировать энергопотребление и передачу данных, поскольку, как ожидается, IoT-устройство будет работать до 10 лет без замены батареи. Для решения этой задачи в стандарте уже предусмотрены соответствующие технологии и протоколы, задача разработчика состоит в том, чтобы правильно их реализовать. Приведены результаты измерения энергопотребления NB-IoT-устройства при работе с различными протоколами, уровнями сигнала и объемом передаваемых данных в реальной сети мобильного оператора. На основании проведенных экспериментальных исследований сделан вывод о нецелесообразности использования протоколов TCP и UDP в NB-IoT-сетях

Ключевые слова

Узкополосный интернет вещей, NB-IoT-сеть, энергопотребление, протоколы передачи данных

Поступила 22.02.2024

Принята 20.03.2024

© Автор(ы), 2024

Введение. Технология NB-IoT (Narrowband-Internet of Things) — это технология связи в сетях мобильных операторов с поддержкой IoT-устройств (интернет вещей). В настоящее время в мире развернуто более 115 LTE-M-сетей (LTE Machine Type Communications) и 137 NB-IoT-сетей [1].

Первая версия технологии NB-IoT описана в 2016 г. в 13-м релизе 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [2], где сделан упор на улучшение покрытия внутри помещений, поддержку большого числа устройств с низкими чувствительностью к пропускной способности, стоимостью устройств и энергопотреблением, а также на оптимизированную сетевую архитектуру [3] (табл. 1).

Таблица 1

Обобщенные характеристики технологии NB-IoT

Требование	Реализация
Низкая стоимость устройств	Обеспечивает 15%-ное снижение необходимого функционала модема по сравнению с устройствами Cat-1 8-го релиза
Большое число устройств	Поддерживает до 55 000 устройств на одной базовой станции
Низкая скорость передачи	3GPP устанавливает скорость передачи 0,5...200 Кбит/с (входящего трафика) и 0,3...180 Кбит/с (исходящего трафика)
Расширенное покрытие	MCL (максимальное переходное затухание) до 164 дБ
Высокая задержка передачи	Задержка до 10 с восходящего трафика
Низкое энергопотребление	До 10 лет работы от батареи при емкости 5 Вт · ч и передаче 200 Б в день восходящего трафика и 20 Б нисходящего трафика при MCL 164 дБ

Этапы развития технологии NB-IoT. Впервые технология NB-IoT введена в 13-м релизе 3GPP как дополнительный режим радиопередачи для поддержки IoT-устройств, последующие релизы, вплоть до 17-го, дополняют и расширяют технологию NB-IoT [2].

В 14-м релизе добавлена поддержка E-CID (Enhanced Cell Identity) и OTDOA (Observed Time Difference of Arrival) методов позиционирования устройства и обеспечения мобильности, новый класс устройств подключения SC-PTM (Single Cell Point-to-Multipoint) с пониженной до 14 дБм мощностью исходящего сигнала для широкоэмитерных служб, пропускные способности нисходящего и восходящего трафиков увеличены до 144 и до 142,5 Кбит/с, также добавлен новый класс устройств Cat-NB2 с повышенным TBS (Transport Block Size) [4].

В 15-м релизе введена поддержка TDD (Time Division Duplex) и EDT (Early Data Transmission), большая спектральная эффективность

передачи, механизм пробуждения устройства и доступ к сети по требованию для увеличения энергоэффективности, поддержка NPRACH (Narrowband Physical Random Access) и сот малого диаметра [5].

В 16-м релизе увеличены эффективность передачи нисходящего трафика и энергоэффективность устройств путем сокращения мониторинга нисходящей линии связи и уменьшения числа сигналов, на основе функций, приведенных в более ранних релизах [6].

В 17-м релизе добавлена поддержка 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Ранее были доступны только поддержки QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) и BPSK (Binary Phase-Shift Keying), что увеличило пиковую скорость передачи данных, сократило время восстановления соединения RRC (Radio Resource Control) до другой соты, определило специальную сигнализацию для измерений соседней соты и соответствующий запуск измерений перед потерей сигнала, а также поддержку выбора несущей NB-IoT в зависимости от уровня покрытия и ее конкретных конфигураций [7].

Ключевые разработки технологии NB-IoT для 12–17-го релизов 3GPP приведены в табл. 2.

В настоящее время готовится к выпуску 18-й релиз, в котором планируется ввести механизмы повышения мобильности UE и непрерывности обслуживания, особенно в NTN, где необходимо учитывать движение спутников и переменные задержки сигнала. Улучшение этой версии заключается в разработке сложных алгоритмов передачи обслуживания (handover) и повторном выборе ячейки. Эти алгоритмы разработаны так, чтобы быстро реагировать на изменения положения спутников, гарантируя, что пользовательские устройства могут быстро переключаться между ячейками без перерыва в обслуживании. По мере перемещения спутников зоны покрытия сот, которые они поддерживают, также смещаются.

Механизмы энергосбережения IoT-устройств. Одним из ключевых аспектов решений в области IoT-устройств является их способность работать от аккумулятора до 10 лет, что связано с возможностью монтажа таких устройств в отдаленных или труднодоступных местах.

Устройство IoT может находиться в двух режимах — ожидания и приема/передачи, при этом для каждого состояния существуют свои подходы к снижению энергопотребления [8].

Снижение энергопотребления в режиме ожидания:

- длительные промежутки времени между обновлениями зоны отслеживания TAU (Tracking Area Update);
- расширенный режим прерывистого приема eDRX (Extended DRX);
- энергосберегающий режим PSM.

Таблица 2

Развитие технологии NB-IoT

Направление	Номер релиза 3GPP					
	12	13	14	15	16	17
Снижение энергопотребления	Энергосберегающий режим PSM (Power Saving Mode), до 413 дней	Расширенный режим DRX (Discontinuous Receiving), до 175 мин	RAI (Release Assistance Indication) в сервере приложений	WUS в режиме ожидания	WUS для группы устройств	-
Энергоэффективность, снижение задержки и повышение эффективности передачи	-	Оптимизированная EPS- архитектура для C-IoT/M-IoT	-	EDT для входящего трафика	EDT для исходящего трафика, PUR	Поддержка 16-QAM
Эффективность использования радиоканала	-	Cat-NB1: FDD 1 HARQ, 1000 бит TBS, устройство с пониженной мощностью передачи: класс 5 (23 дБм); класс 3 (20 дБм)	Cat-NB2: FDD 2 HARQs, 2536 бит TBS, устройство с пониженной мощностью передачи: класс 6 (14 дБм)	Поддержка TDD и малых сот	Интеграция с 5G NR. Планирование передачи для нескольких транспортных блоков	Выбор несущей в зависимости от уровня сигнала. Снижение времени установления RRC
Расширенное покрытие	-	CE-уровни 0/1/2	-	Расширенный диапазон NPRACH	-	NTN

Снижение энергопотребления в режиме приема/передачи:

- режим прерывистой передачи cDRX (Connected DRX);
- индикатор высвобождения ресурсов RAI.

На энергопотребление IoT-устройств значительное влияние оказывает выходная мощность сигнала, 14-й релиз 3GPP вводит класс устройств с выходной мощностью сигнала 14 дБм.

Стек протоколов для связи также оказывает влияние на потребление энергии устройством. Протокол в конечном итоге определяет не только объем передаваемой служебной информации, но и промежуток времени, в течение которого устройство остается в подключенном состоянии, а также продолжительность режимов eDRX и PSM.

Протоколы могут использовать стандартный стек TCP/UDP/IP с подтверждениями доставки, шифрованием и без таковых, что оказывает значительное влияние на соотношение служебной информации и полезной нагрузки, также на энергоэффективность устройства. Устройствам NB-IoT доступен протокол NIDD передачи данных, при котором в цепочку доставки данных включен SCEF (Service Capability Exposure Function), что значительно сокращает объем передаваемых служебных данных.

Обновления зоны отслеживания TAU. Мобильные устройства должны регулярно передавать TAU-сообщения для того, чтобы сеть хранила релевантные данные о местоположении устройства. Если IoT-устройству не удастся отправить TAU-сообщение до истечения соответствующего таймера, то сеть считает, что устройство больше недоступно и отменяет его регистрацию. Если же устройство успевает отправить TAU-сообщение в установленный срок, то регистрационные данные считаются актуальными и в дальнейшем не потребуется проведения процедуры перерегистрации. Таймер TAU вводится в 9-м релизе 3GPP как T3412. Таймер T3412 предлагается IoT-устройством при регистрации в сети, при этом сеть может принять или отклонить предложенное значение.

В отличие от технологий связи предыдущих поколений, таких как 2G и 3G, технология NB-IoT вводит расширенный таймер TAU T3412ext. В соответствии с таймером TS24.301 14-го релиза 3GPP максимальное значение таймера TAU T3412ext составляет 413 дней.

Таким образом, расширенный таймер TAU позволяет устройству дольше находиться в спящем режиме, если нет необходимости в отправке TAU-сообщения, что положительно сказывается на энергопотреблении устройства.

Расширенный режим прерывистого приема eDRX. Для того чтобы сеть могла передать данные устройству, находящемуся в режиме ожидания

(idle mode), необходимо провести процедуру оповещения (пэйджинга). Для постоянного активного состояния приемника реализуются режимы DRX и eDRX, при которых устройство ожидает приема данных в определенные промежутки времени, что увеличивает время передачи, но снижает уровень энергопотребления.

Режим прерывистого приема DRX введен в 13-м релизе 3GPP. Во время процедуры подключения к сети или TAU устройство согласует с сетью промежутки времени, в течение которых оно будет готово принимать данные. Это позволяет не держать приемник все время во включенном состоянии и таким образом понижать энергопотребление. Циклы режимов DRX начинаются с фиксированных временных окон, называемых окнами пейджинга PTW (Paging Time Window), в течение этого времени устройство ожидает приема данных, после чего переходит в режим ожидания, в течение которого прием данных невозможен. Релиз 3GPP TS 23.682 устанавливает продолжительность расширенного режима прерывистого приема eDRX в диапазоне от 20,48 до 10 485,76 с.

Энергосберегающий режим PSM. Для повышения энергосбережения возможно полностью отключить модуль связи IoT-устройства, в таком случае после включения понадобится выполнить энергозатратную процедуру перерегистрации в сети. Если процедуру перерегистрации необходимо проводить достаточно часто, то эффективнее не полностью отключать радиомодуль между сеансами связи, а переводить устройство в энергосберегающий режим 12-го релиза 3GPP.

Для того чтобы перейти в режим PSM, устройство должно оповестить об этом сеть, сообщив желаемую продолжительность режима, при этом сеть может отвергнуть предложенное значение и предложить свое. После установления PSM-таймера устройство остается активным в течение 11 160 с (таймер активности PSM — T3324) и переходит в энергосберегающий режим, в течение которого сеть сохраняет данные регистрации устройства и при возобновлении передачи не потребуется проведение процедуры перерегистрации. Максимальный промежуток времени нахождения устройства в режиме PSM (таймер T4312) до 413 дней задает 14-й релиз 3GPP.

Режим прерывистой передачи cDRX. Рассмотренные режимы DRX и eDRX позволяют снизить энергопотребление устройства в режиме ожидания, т. е. при отсутствии активной передачи данных. Режим cDRX позволяет снизить энергопотребление устройства непосредственно во время передачи данных или сразу после ее завершения.

Если режим cDRX не поддерживается, то устройство вынуждено постоянно мониторить физический канал управления нисходящей линией (PDCCH) в каждом подкадре, чтобы проверить наличие доступных нисходящих данных. Чтобы снизить энергопотребление релиз 3GPP вводит прерывистый мониторинг PDCCH (Physical Downlink Control Channel) канала, таким образом, устройство вводит короткие промежутки времени, в течение которых данные не принимаются. Длительность интервалов устанавливается так, чтобы незначительно снизить качество связи и при этом повысить энергоэффективность устройства. Режим cDRX устанавливается сетью на этапе запроса RRC-соединения и не контролируется устройством.

Индикатор высвобождения ресурсов RAI. Индикатор RAI определяется 14-м релизом 3GPP и позволяет устройству досрочно завершить RRC-соединение. Индикатор RAI включается в последнее сообщение от устройства, чтобы сообщить сети, что больше данных для передачи не ожидается и соединение можно закрыть, иначе устройству пришлось бы ждать истечения соответствующего таймера, в течение которого подключение должно оставаться активным, обычно 20...30 с. После использования индикатора RAI устройство может сразу же перейти в режим ожидания после передачи данных.

Приведенные механизмы обеспечения энергоэффективности позволяют построить теоретический профиль энергопотребления NB-IoT-устройства (рис. 1).

Сравнение протоколов передачи данных. Различное соотношение служебной информации и полезной нагрузки, отказоустойчивость, алгоритмы повторной передачи, поддержание подключения в активном состоянии без непосредственной передачи данных — все эти факторы влияют на процесс передачи данных и, как следствие, на энергопотребление устройства.

В качестве транспортного протокола IP-стека приложения IoT поддерживают протоколы TCP и UDP, влияние которых на энергопотребление существенно отличается в пользу UDP (табл. 3). Это связано с тем, что протокол TCP обеспечивает повышенную надежность передачи, контроль доставки сообщений и другие функции [9].

Это в свою очередь отражается на отношении объема передаваемых служебных данных к полезной нагрузке. Протокол TCP содержит 10 обязательных полей общей длиной в 20 Б, при этом опционально дополнительное поле данных в заголовке может достигать 40 Б. Протокол UDP состоит из четырех обязательных полей и достигает длины в 8 Б [9].

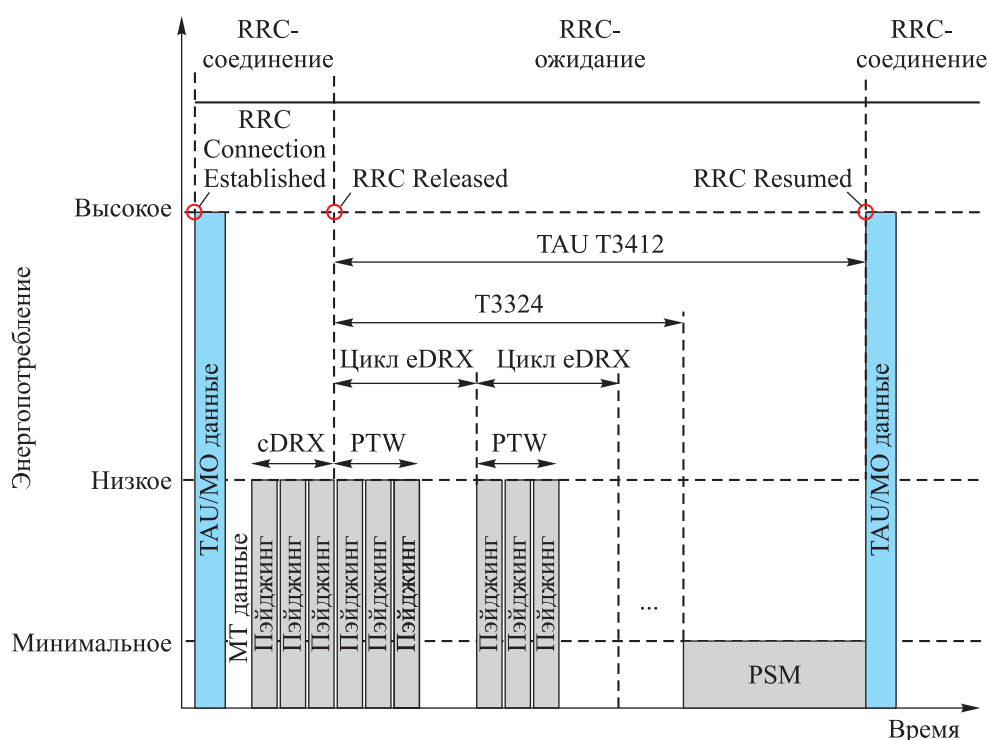


Рис. 1. Профиль энергопотребления NB-IoT-устройства

Протокол TLS обеспечивает безопасную передачу данных между двумя узлами сети [10–12] и является преемником протокола SSL. Часто встречающаяся технология SSL/TLS предоставляет приложениям сервис по шифрованию, аутентификации и целостности данных. В стеке протоколов соединение SSL/TLS работает поверх TCP, что позволяет высокоуровневым протоколам работать без изменений [13].

Таблица 3

Сравнение протоколов UDP и TCP

Функция	UDP	TCP
Установка соединения, надежная передача, упорядоченная доставка	Нет	Да
Неупорядоченная доставка	Да	Нет
Контроль потока, управление потоком, уведомление о перегрузке	Нет	Да
Выборочное подтверждение	Нет	Опционально

Функция	UDP	TCP
Сохранение границ сообщения	Да	Нет
Обнаружение пути наименьшего MTU, сегментация блоков данных приложения, сборка блоков данных приложения, поддержка полуоткрытых соединений, проверка достижимости	Нет	Да

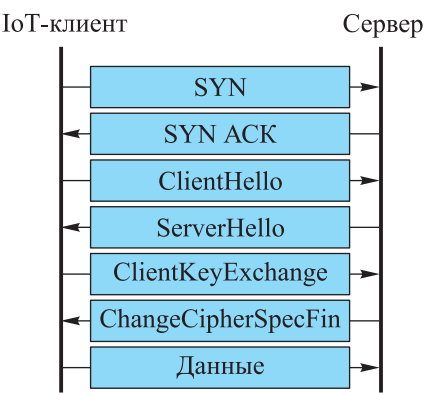


Рис. 2. Установление SSL/TLS-соединения

Для настройки криптографически безопасного канала узлы соединения должны согласовать методы шифрования и ключи в процессе SSL/TLS-соединения (рис. 2). При этом используется криптография с открытым ключом, которая позволяет узлам установить общий секретный ключ шифрования без каких-либо предварительных сведений друг о друге. В дальнейшем SSL/TLS-соединение добавляет к каждому сообщению MAC-код, обеспечивая целостность информации и защиту от ее подмены [14].

Соединение SSL/TLS повсеместно используется в традиционных сетях передачи данных, однако практически не подходит для NB-IoT-сетей и устройств из-за длительной процедуры установления соединения, в течение которой устройство должно находиться в активном режиме, а также из-за необходимости передачи сертификатов, что накладывает дополнительные требования к уровню сигнала в точке расположения устройства.

При использовании TCP/IP-стека в приложении IoT уровень приложений чаще всего реализуется протоколами CoAP (Constrained Application Protocol) и MQTT (Message Queue Telemetry Transport) [15].

Протокол CoAP состоит из подмножеств функциональных возможностей протокола HTTP, разработанных с учетом требований к низкой мощности устройства и строгих требований к энергопотреблению [16]. В отличие от текстового протокола HTTP, CoAP — это бинарный протокол, работающий поверх UDP, что снижает объем служебных данных и повышает гибкость применения в различных моделях связи. Протокол

CoAP поддерживает подтверждение доставки, а также шифрование данных средствами DTLS [17].

Брокер MQTT работает поверх протокола TCP, реализует модель передачи издатель–подписчик, в которой издателем выступает источник данных, например датчик, подписчиком — устройство-потребитель данных, а за процесс установления подписки отвечает MQTT-брокер, т. е. сервер, организующий весь процесс передачи данных [18]. Брокер MQTT поддерживает шифрование данных средствами TLS поверх протокола TCP. Сравнительные данные протоколов MQTT и CoAP приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные данные протоколов MQTT и CoAP

Параметр	MQTT	CoAP
Транспортный протокол	TCP	UDP
Безопасность	TLS/SSL	DTLS
Модель обмена данными	Издатель/Подписчик	Запрос/Ответ
Надежность передачи	QoS ₀ , QoS ₁ , QoS ₂	Confirmable/Non-Confirmable

Устройства технологии NB-IoT поддерживают передачу данных без использования IP-стека в режиме NIDD (Non-IP Data Delivery) с помощью туннелей SCEF или PtP SGi [19, 20] (рис. 3).



Рис. 3. Передача данных с использованием туннеля SCEF в архитектуре сети

Трафик NIDD передается в виде необработанных шестнадцатеричных данных. Таким образом, для передачи одного байта полезной нагрузки средствами TCP с учетом процедуры установления и закрытия соединения понадобится 432 Б служебной информации (рис. 4).

Для передачи одного байта полезной нагрузки средствами UDP понадобится гораздо меньше служебной информации, а именно 28 Б (рис. 5).

Трафик NIDD позволяет сразу передавать полезную нагрузку без необходимости использования служебных заголовков, характерных для IP. Таким образом, по сравнению с трафиками протоколов TCP и UDP на один

байт полезных данных трафику NIDD понадобится на 432 и 28 Б меньше, что непосредственно повлияет на время передачи данных и, следовательно, на энергопотребление устройства.

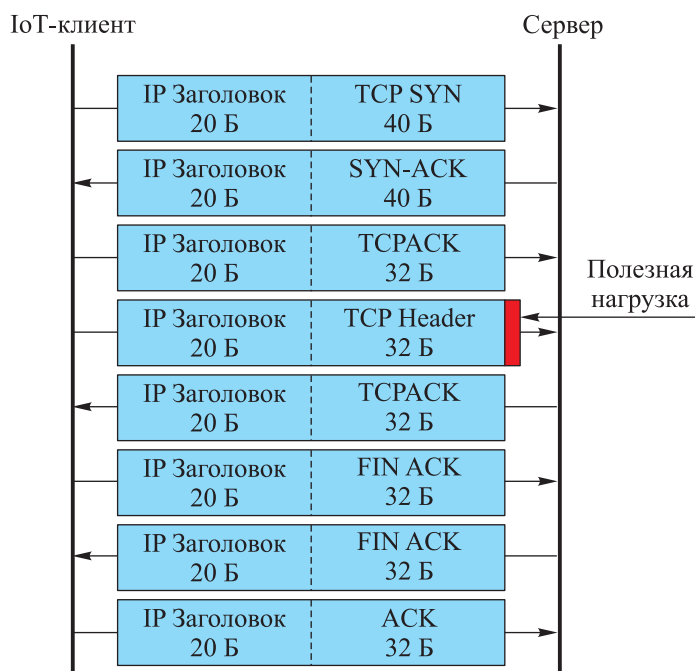


Рис. 4. Передача данных и размеры заголовков пакетов в TCP/IP



Рис. 5. Размер заголовков пакета в UDP/IP

Экспериментальная оценка энергопотребления. Множество производителей предоставляют комплекты разработчика решений NB-IoT. В качестве тестового устройства используется отладочный комплект для разработки прототипов энергоэффективных IoT-устройств и сервисов от МТС (рис. 6): основная плата с микроконтроллером STM32L152RE и LTE-M/NB-IoT-модуль U-blox SARA-R410M-02B, класс мощности 23 дБм, поддерживающий стеки IPv4/IPv6, eDRX, PSM, TCP/UDP.

Для снятия показаний энергопотребления использовался многоканальный пробник мощности R&S RT-ZVC с источником питания R&S NGM202. Передача данных осуществлялась в реальной мобильной сети оператора с развернутой поддержкой NB-IoT.

В эксперименте оценивался уровень энергопотребления IoT-устройства при передаче данных по протоколам TCP, UDP, TLS и NIDD. После

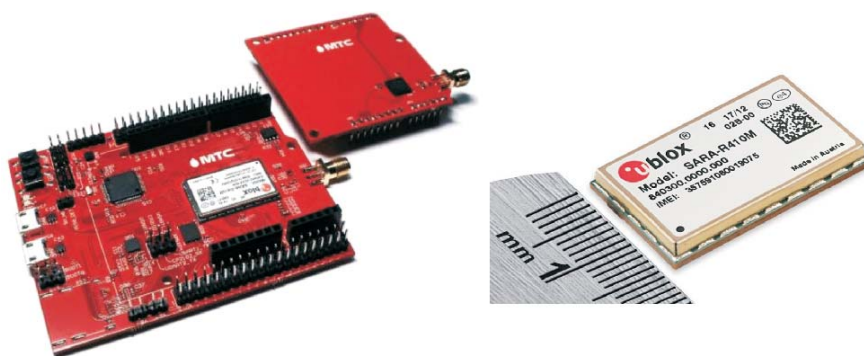


Рис. 6. Отладочный комплект для разработки прототипов энергоэффективных IoT-устройства и сервисов от МТС

включения устройства происходит процедура регистрации в сети, которая длится в среднем 9,3 с на среднем уровне потребляемого тока 0,17 мА (рис. 7, а). Длительность цикла DRX тестового устройства равна наиболее распространенному на практике значению 1,28 с (рис. 7, б).

Для начала передачи данных средствами в протоколе TCP необходимо открыть сокет, в среднем эта процедура занимает 4,3 с и значительно влияет на энергопотребление устройства. Открытие сокета (рис. 7, в) накладывается на цикл DRX. Закрытие сокета незначительно сказывается на профиле энергопотребления, однако сама процедура занимает до 3 с, в течение которых устройство не переходит в режим PSM, что негативно сказывается на общей энергоэффективности приложения. В протоколе UDP передача тоже основана на сокетах, в процедуре открытия нет необходимости и передачу можно осуществлять сразу после инициализации стека протоколов.

Энергопотребление тестового устройства можно разбить на уровни, на которых в среднем может определяться потребляемый ток — это уровень отправки данных, приема входящих данных, уровень ожидания (Idle) и режим PSM (рис. 7, г, табл. 5).

Таблица 5

Уровни потребляемого тока на различных режимах работы

Режим работы устройства	Средний потребляемый ток, мА
Отправка данных	126
Прием данных	110
Ожидание (Idle)	71
Энергосберегающий режим PSM	54

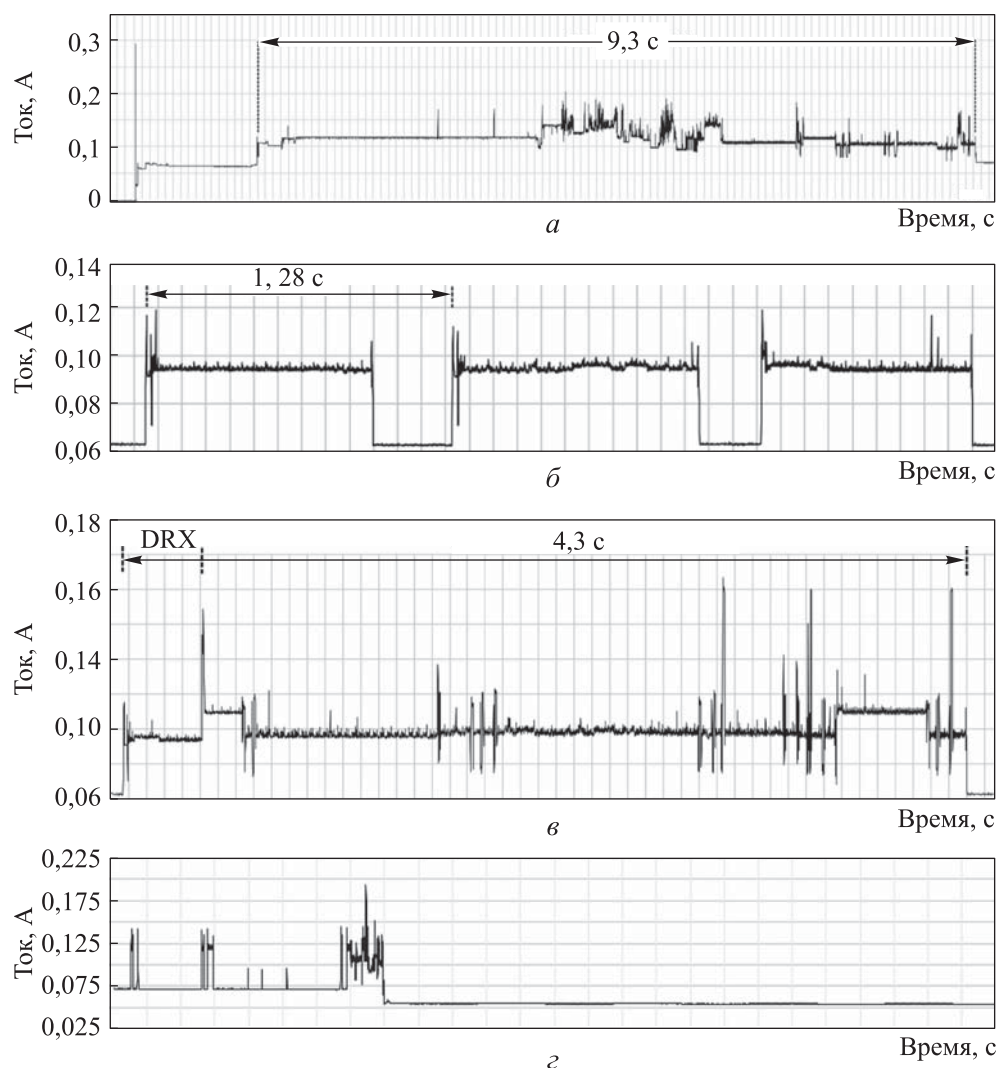


Рис. 7. Временные диаграммы потребляемого тока при регистрации устройства в сети (а), цикле DRX в подключенном состоянии (б), при открытии сокета в протоколе TCP (в) и переходе устройства в режим PSM (г)

Используемый в приложении стек протоколов влияет только на промежуток времени, в течение которого устройство находится в режиме приема и отправки данных, чем меньше времени устройство занято передачей данных, тем быстрее оно сможет перейти в режим PSM и тем дольше проработает без замены элемента питания.

Для сравнения различных протоколов проведена передача 100 пакетов данных по протоколам TCP и UDP общей длиной 5000 Б и 100 сообщений по протоколу NIDD такой же общей длины (рис. 8). Для каждой

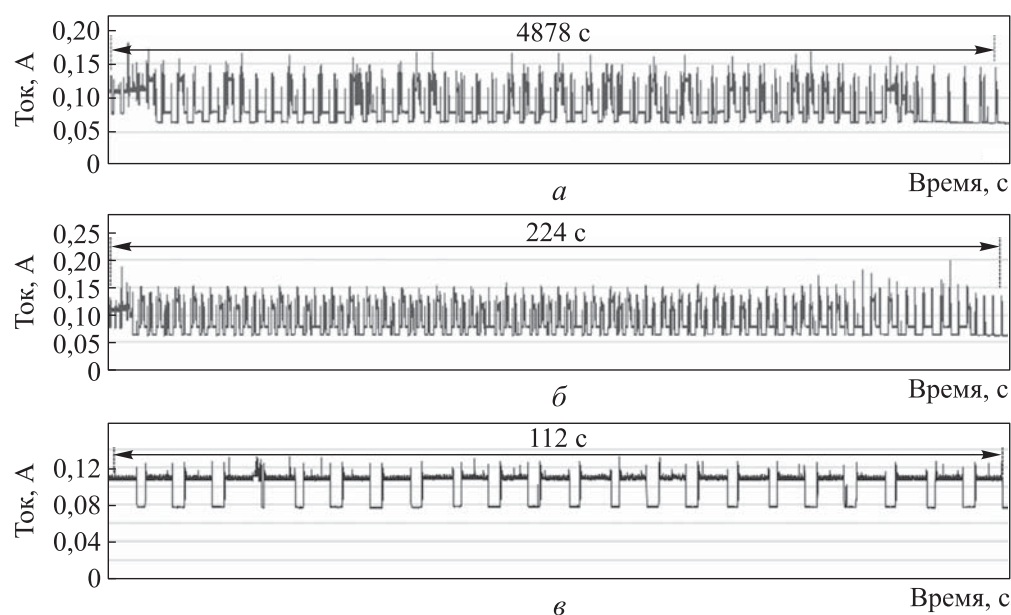


Рис. 8. Временные диаграммы потребляемого тока при передаче всех данных по протоколам TCP (а), UDP (б) и NIDD (в)

передачи пакетов инициализируется новый сокет, так имитируется ситуация независимых друг от друга отправок данных.

В случае протокола TLS для каждого пакета также иницируется процедура установления безопасного соединения. Учтена также минимально необходимая для успешной передачи данных задержка между сеансами передачи, чтобы уровень радиодоступа позволил передавать полезную нагрузку и корректно отработали протоколы передачи данных (табл. 6).

Таблица 6

**Среднее энергопотребление устройства
при использовании различных протоколов**

Протокол	Общее время, с		Средняя потребляемая мощность, мВт
	передачи	ожидания	
TLS	26 141	1300	293,76
TCP	4878	2489	258,45
UDP	224	200	270,14
NIDD	112	100	278,39

Среднее энергопотребление у протокола NIDD выше, это связано с минимальным временем ожидания передачи и доставки данных

и минимальным временем, в течение которого устройство находится в режиме активной передачи данных. Отмечена значительная разность энергопотребления между протоколами TLS и NIDD (рис. 9).

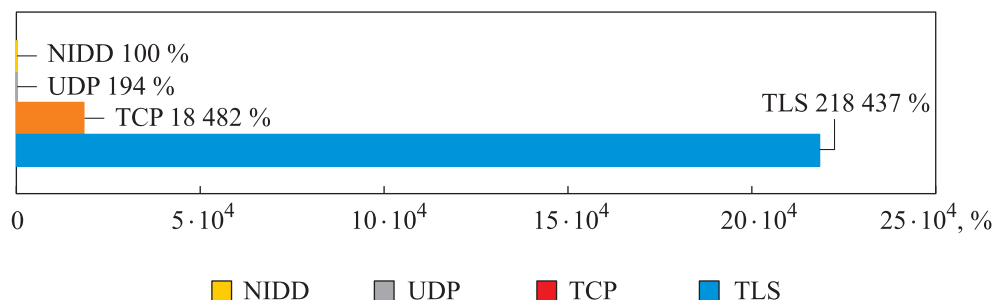


Рис. 9. Энергопотребление устройства при использовании протоколов TCP, UDP, TLS относительно NIDD

При выборе протокола в пользовательских приложениях необходимо учитывать, что такой важный механизм энергосбережения, как индикатор высвобождения ресурсов RAI может быть полноценно задействован только для протоколов NIDD и UDP, поскольку сокет в протоколе TCP явно должен быть закрыт после передачи данных.

Заключение. Энергоэффективность — это важная характеристика, влияющая на стоимость внедрения и обслуживания решений IoT-устройства (интернета вещей). Для обеспечения энергоэффективности в NB-IoT-сетях предусмотрен ряд механизмов, рекомендуемых разработчикам программного обеспечения и устройств. Помимо предусмотренных механизмов энергосбережения на конечное время работы устройства без замены элемента питания сильно влияет выбор протокола передачи данных. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при использовании протокола NIDD в типовых сценариях удастся достичь существенного уменьшения энергопотребления устройством по сравнению с использованием протоколов UDP (до 2 раз) и TCP (до 185 раз). Это позволяет утверждать, что использование протоколов UDP и, особенно TCP, в исследуемых сценариях нецелесообразно.

Благодарности

Авторы выражают благодарность телеком-лаборатории ПАО «МТС» за предоставление необходимых ресурсов и экспертной поддержки для проведения исследовательской работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Goudos S.K., Dallas P.I., Chatziefthymiou S., et al. A survey of IoT key enabling and future technologies: 5G, mobile IoT, semantic web and applications. *Wireless Pers. Commun.*, 2017, vol. 97, no. 2, pp. 1645–1675.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4647-8>
- [2] Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low power wide area networks: an overview. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 855–873.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
- [3] Sharan S., Sharan R., Yiqiao W., et al. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 14–21.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>
- [4] Mekki K., Bajic E., Chaxel F., et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 1–7.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>
- [5] Popli S., Jha R.K., Jain S. A survey on energy efficient narrowband internet of things (NB-IoT): architecture, application and challenges. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 16739–16776. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2881533>
- [6] Ayoub W., Samhat A.E., Nouvel F., et al. Internet of mobile things: overview of LoRaWAN, DASH7 and NB-IoT in LPWANs standards and supported mobility. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 1561–1581.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2877382>
- [7] Routray S.K. Narrowband Internet of Things. *Encyclopedia of Information Science and Technology*, 2021, p. 11. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3479-3.ch063>
- [8] Routray S.K. Deployment of Narrowband IoT. *Research Anthology on Developing and Optimizing 5G Networks and the Impact on Society*, 2021, p. 17
DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7708-0.ch036>
- [9] Wang S., Zhang X., Zhang Y., et al. A survey on mobile edge networks: convergence of computing, caching and communications. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 6757–6779.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2685434>
- [10] Singh R., Tripathi P., Singh R. A survey on TCP (transmission control protocol) and UDP (user datagram protocol) over AODV routing protocol. *Int. J. Res.*, 2014, vol. 1, no. 7, pp. 26–33.
- [11] Riaz S., Sajid A., Kanwal M. Performance analysis of SSL/TLS. *IJISSET*, 2014, vol. 1, no. 6, pp. 524–531.
- [12] Tariq M.A., Khan M., Raza Khan M.T. Enhancements and challenges in CoAP — a survey. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 21, art. 6391. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20216391>
- [13] Soni D., Makwana A. A survey on MQTT: a protocol of internet of things (IoT). *ICTPACT*, 2017, vol. 20, pp. 173–177.

- [14] Aloï G., Caliciuri G., Fortino G., et al. Enabling IoT interoperability through opportunistic smartphone-based mobile gateways. *J. Netw. Comput. Appl.*, 2017, vol. 81, pp. 74–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.10.013>
- [15] Guo H., Zhang Q., Xiao S., et al. Exploiting multiple antennas for cognitive ambient backscatter communication. *IEEE Internet Things J.*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 765–775. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2856633>
- [16] Darsena D., Gelli G., Verde F. Modeling and performance analysis of wireless networks with ambient backscatter devices. *IEEE Trans. Commun.*, 2017, vol. 65, no. 4, pp. 1797–1814. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2654448>
- [17] Zaidi A.A., Baldemair R., Moles-Cases V., et al. OFDM numerology design for 5G new radio to support IoT, eMBB and MBSFN. *IEEE Commun. Standards Mag.*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2018.1700021>
- [18] Zou J., Xu C. Frequency offset tolerant synchronization signal design in NB-IoT. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 11, art. 4077. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18114077>
- [19] Hwang J.-K., Li C.-F., Ma C. Efficient detection and synchronization of superimposed NB-IoT NPRACH preambles. *IEEE Internet Things J.*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 1173–1182. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2867876>
- [20] Liu S., Xiao L., Han Z., et al. Eliminating NB-IoT interference to LTE system: a sparse machine learning-based approach. *IEEE Internet Things J.*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 6919–6932. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2912850>

Колесников Александр Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Басараб Михаил Алексеевич — д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Ключарев Петр Георгиевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Колесников А.В., Басараб М.А., Ключарев П.Г. Анализ влияния протоколов передачи данных на энергопотребление NB-IoT-устройств. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 4 (149), с. 56–75.

EDN: WHJCKD

ANALYSIS OF THE DATA TRANSFER PROTOCOLS IMPACT ON THE NB-IOT DEVICE POWER CONSUMPTION

A.V. Kolesnikov

avkolesnikov@bmstu.ru

M.A. Basarab

basarab@bmstu.ru

P.G. Klyucharev

pgk@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

NB-IoT (Narrowband Internet of Things) is a recognized standard for global networks of the LPWAN (Low Power Wide Area Network) devices. Every day, new solutions based on the Internet of Things technologies are being implemented around the world in a variety of areas of life including environment monitoring systems, intrusion detection systems, all transport industries, automatic parking, trackers, housing and communal services solutions, portable devices, etc. Since most devices are powered by a built-in power source, it is extremely important for the application developers to produce software in such a way as to minimize power consumption and data transfer, since it is expected that the IoT devices would be operating without battery replacement for up to 10 years. To solve this problem, the standard already provides for the corresponding technologies and protocols, and the developer task is to implement them correctly. The paper provides results of measuring the NB-IoT device power consumption when working with various protocols, signal levels and transmitted data volumes in a real mobile operator network. The conducted experimental studies bring about a conclusion on inappropriateness of using the TCP and UDP protocols in the NB-IoT networks

Keywords

Narrowband Internet of Things, NB-IoT network, power consumption, data transfer protocols

Received 22.02.2024

Accepted 20.03.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Goudos S.K., Dallas P.I., Chatziefthymiou S., et al. A survey of IoT key enabling and future technologies: 5G, mobile IoT, semantic web and applications. *Wireless Pers. Commun.*, 2017, vol. 97, no. 2, pp. 1645–1675.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4647-8>
- [2] Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low power wide area networks: an overview. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 855–873.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>

- [3] Sharan S., Sharan R., Yiqiao W., et al. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 14–21.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>
- [4] Mekki K., Bajic E., Chaxel F., et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 1–7.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>
- [5] Popli S., Jha R.K., Jain S. A survey on energy efficient narrowband internet of things (NB-IoT): architecture, application and challenges. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 16739–16776. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2881533>
- [6] Ayoub W., Samhat A.E., Nouvel F., et al. Internet of mobile things: overview of LoRaWAN, DASH7 and NB-IoT in LPWANs standards and supported mobility. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 1561–1581.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2877382>
- [7] Routray S.K. Narrowband Internet of Things. *Encyclopedia of Information Science and Technology*, 2021, p. 11. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3479-3.ch063>
- [8] Routray S.K. Deployment of Narrowband IoT. *Research Anthology on Developing and Optimizing 5G Networks and the Impact on Society*, 2021, p. 17.
DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7708-0.ch036>
- [9] Wang S., Zhang X., Zhang Y., et al. A survey on mobile edge networks: convergence of computing, caching and communications. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 6757–6779.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2685434>
- [10] Singh R., Tripathi P., Singh R. A survey on TCP (transmission control protocol) and UDP (user datagram protocol) over AODV routing protocol. *Int. J. Res.*, 2014, vol. 1, no. 7, pp. 26–33.
- [11] Riaz S., Sajid A., Kanwal M. Performance analysis of SSL/TLS. *IJISSET*, 2014, vol. 1, no. 6, pp. 524–531.
- [12] Tariq M.A., Khan M., Raza Khan M.T. Enhancements and challenges in CoAP — a survey. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 21, art. 6391. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20216391>
- [13] Soni D., Makwana A. A survey on MQTT: a protocol of internet of things (IoT). *ICTPACT*, 2017, vol. 20, pp. 173–177.
- [14] Aloï G., Caliciuri G., Fortino G., et al. Enabling IoT interoperability through opportunistic smartphone-based mobile gateways. *J. Netw. Comput. Appl.*, 2017, vol. 81, pp. 74–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.10.013>
- [15] Guo H., Zhang Q., Xiao S., et al. Exploiting multiple antennas for cognitive ambient backscatter communication. *IEEE Internet Things J.*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 765–775.
DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2856633>
- [16] Darsena D., Gelli G., Verde F. Modeling and performance analysis of wireless networks with ambient backscatter devices. *IEEE Trans. Commun.*, 2017, vol. 65, no. 4, pp. 1797–1814. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2654448>

- [17] Zaidi A.A., Baldemair R., Moles-Cases V., et al. OFDM numerology design for 5G new radio to support Iot, Embb and MBSFN. *IEEE Commun. Standards Mag.*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2018.1700021>
- [18] Zou J., Xu C. Frequency offset tolerant synchronization signal design in NB-Iot. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 11, art. 4077. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18114077>
- [19] Hwang J.-K., Li C.-F., Ma C. Efficient detection and synchronization of superimposed NB-Iot NPRACH preambles. *IEEE Internet Things J.*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 1173–1182. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2867876>
- [20] Liu S., Xiao L., Han Z., et al. Eliminating NB-IoT interference to LTE system: a sparse machine learning-based approach. *IEEE Internet Things J.*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 6919–6932. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2912850>

Kolesnikov A.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Basarab M.A. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Klyucharev P.G. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kolesnikov A.V., Basarab M.A., Klyucharev P.G. Analysis of the data transfer protocols impact on the NB-IoT device power consumption. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 4 (149), pp. 56–75 (in Russ.). EDN: WHJCKD