

# Технологии мобильной связи

## для IoT стандарта 3GPP Rel. 13

Статья посвящена наиболее перспективным технологиям мобильной связи лицензируемого диапазона, предназначенным для использования в приложениях IoT, которые были стандартизованы в июле 2016 г. в документе 3GPP Rel. 13: EC-GSM-IoT, LTE-MTC и NB-IoT. Эти технологии дают возможность развертывать десятки тысяч мобильных устройств IoT в зоне действия одной базовой станции без ущерба для современных многофункциональных гаджетов, смартфонов и планшетов. Мобильные устройства, регламентированные 3GPP Rel. 13, отличаются простотой, расширенным радиусом действия и крайне низким энергопотреблением, позволяющим работать от одной батареи 5 Вт·ч в течение 10 лет.

Виктор Алексеев, к. ф.-м. н.  
Victor.alexeev@gmail.com

### Спецификации сотовой связи 3GPP для IoT

Наиболее перспективным направлением развития «Интернета вещей» (Internet of Things, IoT) представляется построение комбинированных сетей IoT, объединяющих персональные, локальные и глобальные сети. С этой точки зрения очень полезным является направление, позволяющее использовать существующие сети 3G/4G для обслуживания многочисленных устройств IoT.

Согласно прогнозам [1–3], к 2025 г. наибольший рост устройств мобильной связи для IoT будет наблюдаться в таких областях, как бытовое оборудование, промышленная автоматика, медицинское оборудование.

Учитывая огромный потенциал IoT, консорциум стандартов мобильной связи 3GPP и ведущие мировые производители проводят исследования, направленные на разработку новых технологий и возможности использования существующих сетей для IoT.

Мобильные устройства, работающие в сетях 2G/3G/4G/LTE, поддерживают широкий спектр различных сервисных функций, таких, например, как голосовая связь, передача данных на больших скоростях, потоковое видео, высококачественное аудио и др. Для большинства приложений IoT эти функции являются излишними.

К сетям WLAN, предназначенным для использования в проекте IoT, предъявляется ряд специальных требований. Одно из основных из них — это минимальная цена при минимально необходимой функциональности. Огромное количество различных датчиков в приложениях IoT должны выходить в эфир только периодически и только для того, чтобы отправить накопленную информацию. При этом очень важное значение имеет энергопотребление. В таких приложениях, как, напри-

мер, контроль перемещения грузов, различные брелоки, стикеры, транспондеры контроля доступа и другие аналогичные, необходимы модули с крайне низким энергопотреблением. Эти устройства, использующие автономное батарейное питание, должны обеспечивать работу без замены батареи в течение нескольких лет. В англоязычной литературе этот тип устройств получил название Low Power Wide Area (LPWA).

Работы по созданию единого стандарта для устройств IoT, работающих в сотовых сетях, были начаты около 10 лет назад. Впервые в документах 3GPP Release 8 были определены основные параметры связи между различными устройствами, оборудованием и механизмами (Machine Type Communication, MTC). В этом релизе описаны технологии LTE Cat. 1, LTE-MTC, LP-WAN и GSM-MTC.

В дальнейшем, в Rel. 10, Rel. 11, Rel. 12, были регламентированы средства защиты сетей от перегрузок при использовании тысяч подключенных устройств (SIMTC, NIMTC) и прописаны требования, предъявляемые к расширенным машинным интерфейсам (Machine Type Communications enhancements, MTCe), а также к устройствам IoT с минимально необходимыми функциями и низкой стоимостью (Low Cost LTE, LC-LTE).

В последнем документе Rel. 13, принятом в июле 2016 г., окончательно стандартизованы следующие технологии IoT LPWA для лицензируемых диапазонов: EC-GSM-IoT, eMTC, NB-IoT [3, 4].

Основные характеристики технологий EC-GSM-IoT, eMTC, NB-IoT приведены в таблице 1.

### Технология EC-GSM-IoT

Технология EC-GSM-IoT (Enhanced Coverage GSM for IoT) была предложена рабочей

Таблица 1. Сравнительные характеристики технологий EC-GSM-IoT, LTE-MTC, NB-IoT

| Наименование   | eMTC                                 | EC-GSM-IoT  | NB-IoT   |
|--|--------------------------------------|---|--|
| Частотный диапазон                                   | Основные рабочие полосы частот LTE   | Основная полоса частот GSM  | Основная и защитная полосы частот LTE, выделенные частоты (800/900/1800 МГц) |
| Уровень покрытия (в соответствии с TR 36.888/45.820) | 155,7 дБ                             | 164 дБ (33 дБм power class), 154 дБ, (23 дБм power class)               | 164 дБ для выделенной полосы   |
| Схема кодирования (передача «вниз», DL)              | OFDMA, 15 кГц, 16 QAM, 1 Rx          | TDMA/FDMA, GMSK, 8 PSK 1 Rx   | OFDMA, 15 кГц, TBCC, 1 Rx  |
| Схема кодирования (передача «вверх», UL)             | SC-FDMA, 15 кГц, 16 QAM              | TDMA/FDMA, GMSK 8 PSK   | Single tone, 15 кГц, 3,75 кГц, SC-FDMA, 15 кГц                               |
| Ширина полосы частот приемника ME                    | 1,08 МГц (1,4 МГц carrier bandwidth) | 200 кГц   | 180 кГц (200 кГц carrier bandwidth)  |
| Скорость передачи данных                             | 1 Мбит/с (DL/UL)                     | 250 кбит/с (DL), 250 кбит/с (UL multi-tone), 20 кбит/с (UL single tone) | Для DL и UL (4 временных слота): 70 кбит/с (GMSK) и 240 кбит/с (8PSK)        |
| Дуплексная передача                                  | FD и HD (type B), FDD и TDD          | HD, FDD   | HD (type B), FDD   |
| Энергосберегающий режим                              | PSM, ext. I-DRX, C-DRX               | PSM, ext. I-DRX   | PSM, ext. I-DRX, C-DRX   |
| Категория мобильного устройства                      | Cat. M1                              | Уточняется  | Cat. NB1   |
| Класс мощности                                       | 23 дБм, 20 дБм                       | 23 дБм, TBD   | 33 дБм, 23 дБм   |

группой GERAN в рамках проекта 3GPP-R13. Первоначальное название технологии было EC-EGPRS. В дальнейшем в технической документации стали использовать также термины EC-GSM-IoT и EC-GSM. В данной статье используется термин EC-GSM-IoT, принятый в релизе 3GPP Rel. 13 [4]. Эта технология позволяет устройствам IoT обмениваться небольшими пакетами данных по сети GPRS в расширенной зоне покрытия до 164 дБ.

Отличительными особенностями технологии EC-GSM-IoT являются:

- увеличенная на 20 дБ зона покрытия по сравнению со стандартным режимом 2G;
- работа в существующих сетях 2G в режиме GPRS;
- небольшие скорости передачи данных (до 250 кбит/с);
- расширенный режим энергосбережения (до 10 лет непрерывной работы от батареи 5 Вт·ч);
- большое количество обслуживаемых устройств в зоне действия базовой станции (до 10 000);
- минимальные цены на модули мобильных устройств (единицы евро при массовом производстве).

На физическом уровне EC-GSM-IoT работает с теми же самыми частотами, что и старые GSM-сети поколения 2G. Однако при этом используется новая схема кодировки TDMA/FDMA, GMSK, 8 PSK 1 Rx. Кроме того, введены новые логические каналы EC-BCCH, EC-PCH, EC-AGC, EC-RACH.

В стандарте EC-GSM-IoT используется метод Blind Physical Layer Repetitions, который позволяет многократно (до 28 раз) повторять передачу одного пакета без ответа приемника. Этот метод позволил увеличить радиус действия до 164 дБ, что на 20 дБ больше, чем в стандарте 2G. Кроме того, такой подход значительно улучшает надежность связи в условиях экранирования сигнала (подвалы, гаражи, городские застройки).

В базовом стандарте LTE Rel. 8 используется метод, позволяющий снизить энергопотребление мобильных устройств (МУ), который называется Discontinuous Reception (DRX). Принцип работы DRX заключается в том, что МУ принимает данные от базовой станции (БС) не постоянно, а только в определенные периоды. То есть в определенные моменты времени МУ отключает приемник и переходит в спящий режим. В базовом стандарте период

обязательных сигнальных сообщений, в течение которых устройство остается подключенным к сети, не передавая и не получая при этом никакой информации, составляет несколько секунд. В Rel. 13 используется расширенный интервал eDRX (Extended Discontinuous Reception), позволивший увеличить интервалы ожидания обязательных сигнальных сообщений до 52 минут.

Функция Relaxed Idle Mode (RIM) позволяет дополнительно экономить энергопотребление за счет упрощения процедуры сетевой сигнализации и отказа от поддержки жесткого контроля совместной работы с сетями WCDMA/LTE.

Энергосберегающий режим Power Efficient Operation (PEO), наряду с RIM и eDRX, позволяют эксплуатировать устройство IoT в сети EC-GSM с аккумулятором в автономном режиме без подзарядки в течение нескольких лет.

В таблице 2 приведены значения времени автономной работы устройства IoT с поддержкой EC-GSM от аккумулятора с потреблением 5 Вт·ч, в зависимости от величины размера пакета и интервала передачи сообщений [5]. При использовании коротких пакетов данных размерами до 200 байт один раз в день срок службы аккумуляторной батареи превысит 10 лет для всех зон покрытия — 144, 154 и 164 дБ. Однако, в случае более частых сообщений, например каждые два часа по 200 байт, автономная работа без подзарядки в зоне действия EC-EGPRS (164 дБ), срок службы батареи сократится до полутора лет [2].

Переход к технологии EC-GSM в сетях 2G может быть реализован путем полной замены программного обеспечения с незначительной модернизацией оборудования большинства существующих базовых станций.

Чтобы адаптировать существующее оборудование базовых станций 2G к EC-GSM, необходимо, как минимум, проделать следующие операции [6, 7]:

- модернизировать уровень РНУ в соответствии с новой схемой кодировки и новыми логическими уровнями;

- изменить уровень RLC/MAC внутри PCU таким образом, чтобы обслуживать специфические сообщения и процедуры на уровне EC-PDCH;
- адаптировать BTS и BSC для работы с eDRX.

Поскольку сети 3G/4G поддерживают работу 2G, то устройства EC-GSM-IoT смогут работать и в этих сетях (при отмеченных выше доработках).

Более подробно технические особенности стандарта EC-GSM-IoT описаны в [4, 8].

Развитием и поддержкой стандарта EC-GPRS занимается международная ассоциация EC-GSM-IoT Group, в состав которой в настоящее время входят такие известные мировые производители и операторы сотовой связи, как, например, Broadcom Corporation, Cisco Systems, Ericsson, Gemalto NV, Intel Corporation, KDDI Corporation, LG Electronics, MediaTek, Nokia, Oberthur Technologies, Ooredoo, Orange, Samsung Electronics, Saudi Telecom Company, Sierra Wireless, Telit Communications, VimpelCom [3, 9].

На выставке Mobile World Congress 2016 в Барселоне были продемонстрированы совместные разработки Ericsson и Nokia для EC-GSM-IoT. Большой интерес вызвали устройства для велосипедов, а также оборудование для полного комплексного обслуживания процесса изготовления вина. Многочисленные датчики, контролирующие содержание влаги, микроэлементов в почве и содержание сахара в плодах, позволяют не только поливать и вносить удобрения в автоматическом режиме, но также оптимальным образом планировать сроки сбора урожая.

Во Франции в 2016 г. закончилось тестирование оборудования для EC-GSM-IoT в диапазоне 900 МГц, проведенное совместно Ericsson, Orange Labs Networks и Intel.

В результате этих тестов было показано, что уже сегодня существующее оборудование позволяет увеличить в семь раз зону покрытия для приложений, которым не требуется высокая скорость передачи данных.

Таблица 2. Время автономной работы устройства IoT с поддержкой EC-GSM

| Размер пакета           | Время автономной работы устройства IoT, годы |                           |                           |
|-------------------------|--|---------------------------|---------------------------|
|                         | Покрытие GPRS, 144 дБ                        | Покрытие EC-EGPRS, 154 дБ | Покрытие EC-EGPRS, 164 дБ |
| Периодичность сообщений |  |                           |                           |
| 50 байт, 2 ч            | >10  | 6,0                       | 3,1                       |
| 200 байт, 2 ч           | >10  | 2,5                       | 1,2                       |
| 50 байт, 1 день         |  | >10                       |                           |
| 200 байт, 1 день        |  |                           |                           |

Оборудование MediaTek–Nokia для EC-GSM было продемонстрировано на выставке Espro (Finland, 2016). В основе этого решения использованы технологии производства чипов MediaTek и оборудование для БС Nokia Flexi Multiradio 10 base station.

Ожидается, что в массовую продажу чипы и модули EC-GSM-IoT поступят в 2017 г. Наряду с отмеченными выше техническими характеристиками производители обещают также крайне низкие цены на эти модули и чипы.

Возможно, в ближайшем будущем в России появятся сети с поддержкой EC-GSM-IoT. Крупнейший российский оператор сетей сотовой связи МТС подписал в июне 2016 г. контракт с фирмой Ericsson о поставке программного обеспечения с поддержкой EC-GSM-IoT. В рамках этого контракта предполагается протестировать технологию, которая обеспечит работу IoT-устройств на существующих в России сетях МТС.

## Технология eMTC

Аббревиатура eMTC означает LTE enhancements for Machine-Type Communications, то есть расширение стандарта LTE для коммуникации между различными механизмами и устройствами. В данной статье используется термин eMTC, принятый в базовой документации 3GPP [4]. Стандарт eMTC, по существу, является адаптацией высокоскоростных технологий LTE (Rel. 8–11) для использования в IoT-приложениях. В этом стандарте разработчики отказались от избыточной функциональности и быстродействия стандартов LTE Rel. 8–11. В технологии eMTC поддерживается только передача небольших пакетов данных (1000 бит) со скоростями до 1 Мбит/с в обоих направлениях.

В eMTC поддерживаются основные характеристики структуры LTE Rel. 8, такие, например, как: кодировки; распределение спектра частот; размещение поднесущих длительности кадра, подкадра, слота, символа; частота семплирования; количество символов в сабфрейме.

В стандарте eMTC используются такие же методы доступа, как и в LTE Rel. 8, а именно — OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) для направления «вниз» и SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) 16 QAM для направления «вверх». В существующей быстродействующей технологии LTE Rel. 8 стандартизированы полосы пропускания с шириной канала: 1,4; 3; 5; 10; 15; 20 МГц. Из этих значений полос пропускания в стандарте eMTC выбрано только одно зна-

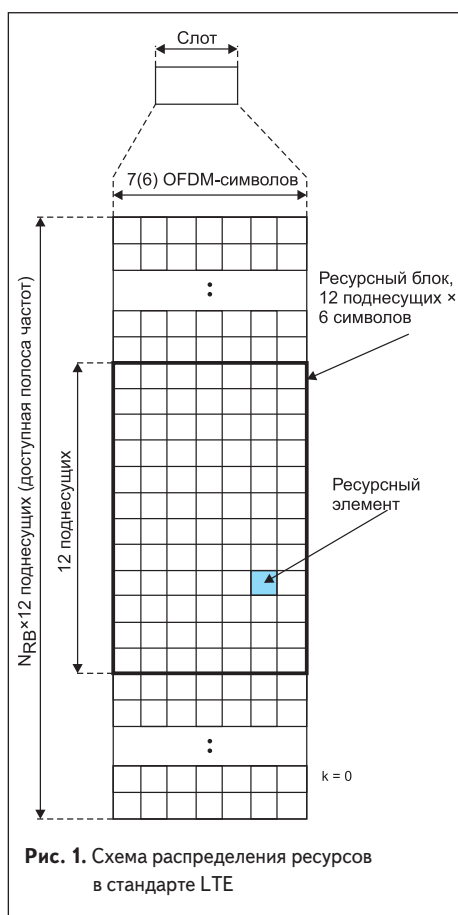


Рис. 1. Схема распределения ресурсов в стандарте LTE

чение ширины канала — 1,4 МГц. Остальные отмеченные полосы пропускания оставлены для устройств стандарта LTE Rel. 8.

В технологии OFDM применяется передача широкополосного сигнала, основанная на независимой модуляции узкополосных, расположенных с определенным шагом по частоте несущих. Каждый OFDM-символ содержит набор модулированных поднесущих. Во временной области OFDM-символ включает поле полезной информации и циклический префикс CP (Cyclic Prefix), дублирующий фрагмент конца предыдущего символа.

На рис. 1 схематически показан процесс распределения ресурсов трансляции пакетов данных в базовом стандарте LTE [5].

Для каждого мобильного устройства в LTE Rel. 8 выделяется определенный диапазон канальных ресурсов в частотно-временной области, которая получила название «ресурсная структура» (resource structure RS). Ячейка

RS, определяемая, как «ресурсный элемент» (resource element, RE), соответствует одной поднесущей в частотной области и одному OFDM-символу во временной. Ресурсные элементы образуют «физический ресурсный блок» (physical resource block, PRB), который занимает 12 поднесущих, или 6 OFDM-символов в стандартном варианте. При этом общая длительность слота составляла 0,5 мс. Одна поднесущая, умноженная на один символ, определяет ресурсный элемент RE. Количество ресурсных блоков PRB в ресурсной структуре определяется шириной полосы канала и может принимать значения от 6 до 110. Ресурсный блок PRB выделяется каждому мобильному устройству планировщиком БС в специальном сообщении управляющего канала.

На рис. 2 показана схема трансляции данных по технологии eMTC при работе в модернизированной сети LTE Rel. 8 [2].

Синхронизация работы БС с МУ осуществляется в стандарте LTE с помощью сигналов Primary Synchronization Signal (PSS) и Secondary Synchronization Signal (SSS). Синхронизация по TTI-слотам и OFDM-символам, а также вычисление физического идентификатора соты (Physical Layer Cell Identity, PCI) реализуется через PSS, который передается в 0 и 10 слотах каждого кадра.

Блок служебной информации MIB (Master Information Block), содержащий базовые параметры радиосети (ширина канала, конфигурация канала PICH, текущий номер кадра System Frame Number SFN), передается по физическому радиовещательному каналу PBCH (Physical Broadcast Channel).

Информация, характеризующая персональные данные конкретного МУ, передается в посылках SIB по физическому каналу PDSCCH (Physical Downlink Shared Channel), предназначенному для передачи «вниз» информации каналов DL-SCH и PCH.

Физический канал управления PDCCCH (Physical Downlink Control Channel) в стандарте LTE Rel. 8 определен для передачи «вниз» информации о назначении канального ресурса транспортных блоков PCH, DL-SCH, UL-SCH и HARQ информации, относящейся к каналу DL-SCH. В Rel. 11 дополнительно введен расширенный канал EPDCCCH, который определяет специфические особенности МУ. Разные МУ имеют разные EPDCCCH. Подробно все эти функции описаны в [10].

В стандарте eMTC сохранена базовая архитектура LTE Rel. 8 для полосы 1,4 МГц. Вместе с тем имеется и ряд различий. Так, например, на физическом уровне оставлены каналы EPDCCCH и PDSCCH. Каналы PCFICH и PICH стандарта LTE Rel. 8 в eMTC не используются.

Стандарт eMTC забирает только полосу 1,4 МГц (или 6 PRB) из всех возможных полос пропускания, отведенных для LTE Rel. 8. МУ IoT всегда настроены на центр 6 PRB в ожидании контрольной информации. Когда МУ получит сеанс связи с БС, ему будут выделены соответствующие физические ресурсные блоки (вплоть до 6 PRB) на любом участке внутри рабочего спектра. Это, например, означает, что МУ eMTC займет полосу шириной 1,4 МГц внутри полосы LTE Rel. 8 шириной 20 МГц.

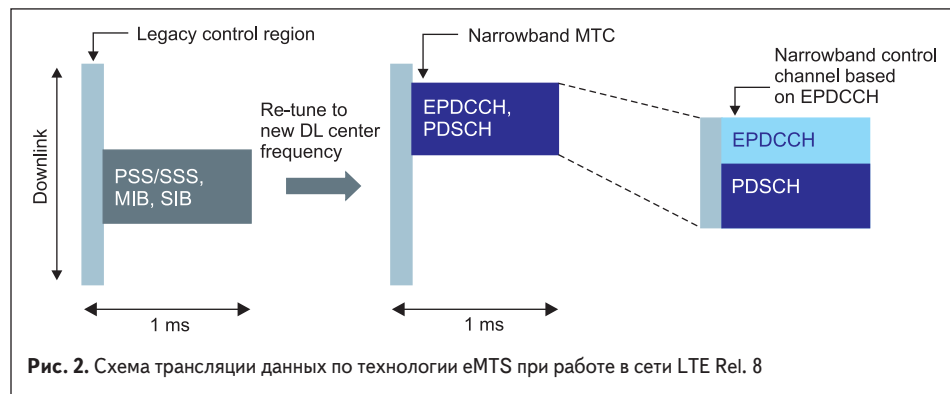


Рис. 2. Схема трансляции данных по технологии eMTC при работе в сети LTE Rel. 8

Специальные контрольные посылки и полезные данные мультиплексируются в частотном домене. При этом игнорируется контрольная информация базового стандарта LTE. Такой подход позволяет поддерживать работу MU IoT на частотах БС LTE при заданных параметрах мощности, чувствительности и алгоритмов передачи для конкретных типов МУ. Таким образом, при минимальных доработках оборудования БС можно реализовать одновременное обслуживание десятков тысяч МУ IoT и современных полнофункциональных смартфонов, гаджетов, ПК на сетях LTE, избегая при этом возможных коллизий между этими устройствами.

В технологии eMTC применяются отмеченные в предыдущем разделе механизмы eDRX и PSM, которые позволяют заметно снизить энергопотребление МУ по сравнению с устройствами LTE Rel. 8. Длительность времени автономной работы от одной батарейки типа AA можно приблизительно оценить, используя данные таблицы 2. Поскольку скорость передачи данных в eMTC значительно больше, чем в EC-GSM-IoT, то время передачи одного и того же объема данных в сетях eMTC будет меньше. Это означает, что при одинаковом классе мощности (23 дБм) время автономной работы МУ eMTC будет больше. Теоретически, максимальное время автономной работы МУ eMTC от батарейки 5 Вт·ч при передаче 200 бит данных один раз в день может достигнуть величины 36 лет. Реальные оценки несколько меньше.

Стандарт eMTC обеспечивает покрытие 155,7 дБ, что на 15 дБ больше по сравнению с LTE Rel. 8. Напомним, что в базовом стандарте LTE все требования к спектральной эффективности, пропускной способности и работе с МУ, прописанные в Rel. 8–11, должны выполняться при радиусе соты в 5 км. В стандарте eMTC увеличение радиуса действия реализуется с помощью отмеченных ранее механизмов, таких, например, как повышение пиковой мощности для полезных и информационных сообщений (Power Boosting, PB), многократное повторение сообщений (retransmission RT) и упрощение алгоритма передачи данных (Relaxing Performance Requirements, RPR).

В стандарте LTE Rel. 8 используется достаточно сложная процедура идентификации МУ, которая реализована непосредственно в сети радиодоступа (NAS, RRC, SRB, DRB, PDCP, RLC и т. д.).

Для простых МУ IoT многоступенчатая процедура идентификации стандарта LTE Rel. 8 не требуется. Поэтому в стандарте eMTC начальный этап связи существенно упрощен. Это позволяет увеличить количество МУ, обслуживаемых одной БС, до нескольких десятков тысяч.

Подробно требования, предъявляемые стандартом Rel. 13 к МУ и БС, изложены в многочисленных документах, посвященных конкретным функциям и параметрам [4].

Таким образом, использование существующих сетей LTE для МУ стандарта eMTC позволит в ближайшем будущем осуществить с минимальными затратами масштабное внедрение в жизнь многочисленных приложений IoT. МУ стандарта eMTC могут работать в существующих сетях 3G/4G при установке на БС нового

программного обеспечения, занимая всего один канал. Остальные полосы пропускания будут по-прежнему использоваться стандартным оборудованием LTE Rel. 8. Поэтому в существующих сетях 4G могут одновременно работать как высокоскоростные смартфоны и гаджеты с поддержкой LTE и LTE-A, так и медленные устройства мобильной связи IoT.

Для снижения стоимости простых МУ eMTC предполагается использовать полудуплексный режим передачи и одну антенну. Сравнивая функциональные возможности MU Rel. 8 и Rel. 13, можно сказать, что МУ стандарта eMTC примерно на 80% проще, чем МУ стандарта Rel. 8. Экспериментальные образцы чипов для eMTC содержат на одном кристалле радиочастотный блок с выходной мощностью 20 дБ и сигнальный процессор. Предполагается, что при массовом производстве цена чипа eMTC может быть снижена до единиц евро.

Ведущие мировые производители микросхем для беспроводной связи ведут разработки чипов, предназначенных специально для IoT. В качестве примера можно привести ведущего производителя комплектующих для WiMAX и LTE — французскую фирму Sequans Communications S. A.

В феврале 2016 г. Sequans Communications представила в Париже свой новый чип Monarch, который был разработан специально для устройств IoT LTE Cat. M1/NB1 [11]. Этот чип, содержащий на одном кристалле трансмиттер, процессор и блок питания, полностью удовлетворяет требованиям стандарта 3GPP Rel. 13, предъявляемым к устройствам Narrowband LTE Cat. M1/NB1 (M2).

Характерными особенностями чипа Monarch являются исключительно низкое энергопотребление (DPM) и программируемый радиочастотный блок, позволяющий использовать для работы стандартную полосу LTE 1,4 МГц (Cat. M1), а также полосу 200 кГц (Cat. M2). Чип поддерживает полудуплексные режимы FDD (HD-FDD) и полный дуплекс FDD, TDD. В зависимости от модели и выбора параметров чип Monarch может быть использован в устройствах LTE Cat M1 (скорости передачи 375 кбит/с — DL, 300 кбит/с — UL) или в устройствах LTE Cat. NB1 (скорости передачи 45 кбит/с — DL, 40 кбит/с — UL). Чип оснащен последователь-

ным интерфейсом с поддержкой расширенного режима энергосбережения.

Чип изготовлен в конструктиве FC- CSP package с габаритными размерами 6,5×8 мм. Как заявляют разработчики, устройства IoT на базе Monarch могут работать со стандартной батарейкой в течение 10–15 лет. Monarch сразу привлек к себе внимание производителей конечного оборудования. Так, например, Verizon и Gemalto собираются использовать этот чип в своих новых устройствах для IoT. На пресс-конференции в Париже вице-президент фирмы Device Technology at Verizon отметил, что Verizon первой в мире запустила коммерческую сеть устройств IoT LTE Cat. 1. Поэтому, используя опыт подобных работ, фирма делает все возможное для того, чтобы первой запустить также и сеть IoT LTE Cat. M1/M2.

В конце 2015 г. компания Qualcomm анонсировала новые разработки: чип MDM9207-1 с поддержкой LTE Cat. 1 и чип MDM9206, предназначенный для работы в сетях с поддержкой LTE Cat. M (eMTC NB-IoT) [12]. На выставке 3GSM World Congress Qualcomm в феврале 2016 г. представила опытные образцы чипа MDM9207-1, основные технические характеристики которого приведены в таблице 3. Предполагается, что в коммерческую продажу чип MDM9207-1 поступит в конце 2016 г.

Что касается чипа MDM9206, то про него Qualcomm говорит только то, что он будет полностью соответствовать стандарту 3GPP Rel. 13 и поступит в продажу в 2017 г. Другой информации об этом чипе на момент подготовки данной статьи в открытом доступе не было.

## Технология NB-IoT

Технология Narrow-Band IoT (NB-IoT) регламентирована наряду с отмеченными выше технологиями в стандарте 3GPP Rel. 13. Другое название, встречающееся в англоязычной литературе, — LTE Cat. NB1. Эта технология базируется на так называемом методе «узкополосной радиосвязи» (narrowband), который используется для передачи небольших пакетов данных с малыми скоростями (табл. 1). Скорости передачи в технологии NB-IoT составляют 70 кбит/с (GMSK) и 240 кбит/с (8PSK) для направлений UL и DL соответственно. Ширина полосы — 180 кГц.

Таблица 3. Основные технические характеристики чипа Qualcomm MDM9207-1

| Стандарты 3GPP                           | LTE Category M1, Single mode/multimode, LTE FDD, LTE TDD, DC-HSPA, GSM, TD-SCDMA |
|--|--|
| Процессор                                | ARM Cortex A7, 1,2 ГГц   |
| РЧ-блок                                  | Qualcomm RF360™ Front End Solution   |
| Технология                               | 28 нм  |
| Скорость передачи                        | 10 Мбит/с (DL), 5 Мбит/с (UL)  |
| Приемник                                 | Dual Rx/Single Rx  |
| Режим энергосбережения                   | Power Save Mode (PSM)  |
| Время автономной работы от одной батареи | 10 лет   |
| Программное обеспечение                  | Qualcomm Snapdragon X5 LTE Cat 1   |
| Безопасность                             | Встроенный программно-аппаратный блок безопасности                               |
| Аудио                                    | Поддержка Circuit Switched Fall Back (CSFB) и VoLTE                              |
| Операционная среда                       | Linux  |
| Системы позиционирования                 | Встроенный ГНСС с поддержкой GPS, Beidou, Glonass, Galileo                       |
| Стандарты IEEE 802                       | Поддержка Qualcomm VIVE™ Wi-Fi 1×1, 802.11ac Qualcomm MU/EFX, BT 4.1 BLE         |
| Антенна                                  | MU-MIMO  |

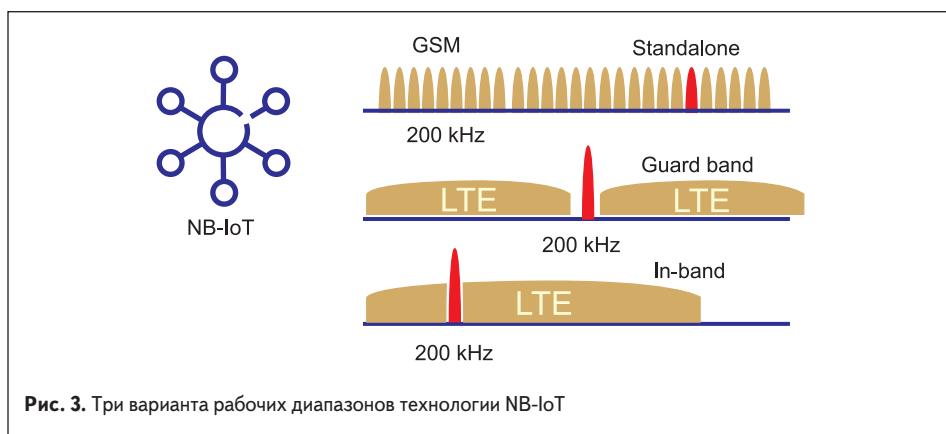


Рис. 3. Три варианта рабочих диапазонов технологии NB-IoT

Технология NB-IoT разработана специально для широкого круга устройств IoT, среди которых можно, например, назвать оборудование для приложений «умного дома», устройства для контроля перевозки грузов, персональные медицинские датчики непрерывного мониторинга, уличное освещение и другие аналогичные устройства.

Ниже перечислены основные характерные особенности МУ технологии NB-IoT:

- сокращенный размер транспортного блока для обоих направлений (DL/UL);
- упрощенный процесс гибридного автоматического запроса на повторную передачу данных (HARQ) для обоих направлений (DL/UL);
- поддержка только однопоточного режима передачи в обоих направлениях (DL/UL);
- только одна антенна в мобильном устройстве;
- отсутствие необходимости в турбокодекере при использовании канала ТВСС в режиме DL;
- отказ от контроля регистрации в сети при нормальном режиме работы (контроль оставлен только для Idle mode);
- маленькая скорость передачи;
- узкая полоса пропускания;
- возможность работы только в экономичном полудуплексном режиме (HD-FDD);
- класс мощности мобильного устройства 23 дБм;
- встроенный усилитель мощности;
- только последовательная обработка при приеме и передаче сообщений.

В стандарте 3GPP Rel. 13 рассмотрены три варианта частотных диапазонов для технологии NB-IoT (рис. 3):

- Stand Alone — использование несущей стандартной технологии GSM для полосы NB-IoT;
- Guard Band — в качестве рабочего диапазона используется защитный интервал стандартного варианта технологии LTE Rel. 8;
- In Band — рабочая полоса частот находится внутри разрешенного спектра стандартного варианта технологии LTE Rel. 8.

При первом включении МУ NB-IoT способны самостоятельно выбирать один из трех возможных сценариев работы [13], которые им предлагает БС. Аналогично тому, как это организовано в стандартных сетях LTE Rel. 8, МУ NB-IoT при регистрации в сети ищут опорную несущую в растре 100 кГц. При этом

опорная несущая может быть размещена только в определенных ресурсных блоках PRB.

В технологии NB-IoT необходима минимальная полоса пропускания 180 кГц, как для передачи данных от БС к МУ, так и в обратном направлении. Поэтому операторы существующих сетей 2G могут использовать одну несущую (200 кГц) для работы с устройствами NB-IoT в режиме Stand Alone. Наиболее просто этот режим можно реализовать на существующих сетях в диапазонах 700/800/900 МГц.

Если существующая сеть поддерживает 2G/3G/4G, то технология NB-IoT позволяет использовать все три полосы, показанные на рис. 3. В этом случае в сетях LTE для устройств IoT предполагается использовать диапазон 800 МГц.

Операторы сетей LTE могут реализовать поддержку NB-IoT внутри существующих сетей за счет выделения одного из ресурсных блоков (PRB) 180 кГц под нужды LTE Cat. NB1. Радиointерфейс NB-IoT оптимизирован для совместного использования с классическим LTE Rel. 8 таким образом, чтобы избежать любых возможных коллизий этих технологий внутри рабочей полосы устройств IoT.

При работе в режиме In Band технология NB-IoT использует основные базовые характеристики классического LTE Rel. 8 — такие, например, как методы доступа к среде OFDMA (DL) и SC-FDMA (UL), канальное кодирование, согласование скорости передачи, побитовое перемежение и др.

В нисходящем канале NB-IoT, базирующемся на методе OFDMA, используется такой же интервал между поднесущими, как и в классическом LTE Rel. 8, — 15 кГц. Так же, как в стандарте LTE Rel. 8, в технологии NB-IoT длительности кадров, подкадров и интервалов между фреймами составляют 0,5, 1, 10 мс соответственно. Кроме того, в этих технологиях формат слота, циклический префикс и количество OFDM-символов в слоте одинаковые. По существу, в технологии NB-IoT несущие в частотной области используют один физический ресурсный блок LTE PRB. Таким образом, двенадцать поднесущих, каждая по 15 кГц, в результате определяют полосу 180 кГц.

При передаче данных от МУ к БС в технологии NB-IoT поддерживаются два режима: Multi-tone transmission (MTT) и Single-tone transmission (STT). Режим MTT, основанный на методе Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SCFDMA), использует те же,

что и в классическом варианте LTE, параметры поднесущих (15 кГц/0,5 мс) и подкадра (1 мс). В немодулированном варианте режима STT в технологии NB-IoT применяются две частоты поднесущих. Одна из них — 15 кГц — совпадает с классическим вариантом LTE Rel. 8. В другом диапазоне, 3,75 кГц, используется интервал между слотами 2 мс, что является особенностью технологии NB-IoT. Ширина полосы в восходящем канале равна 180 кГц.

В технологии NB-IoT передача от БС к МУ реализуется с помощью трех физических каналов: узкополосного физического радиовещательного канала (Narrowband Physical Broadcast Channel, NPBCH), узкополосный физический контрольный канал передачи DL (Narrowband Physical Downlink Control Channel, NPDCCH) и узкополосного физического мультиплексного канала передачи DL (Narrowband Physical Downlink Shared Channel, NPDSCH).

МУ NB-IoT поддерживает в режиме приема работу следующих сигналов по физическим каналам:

- узкополосного сигнала первичной синхронизации (Narrowband Primary Synchronization Signal, NPSS);
- узкополосного сигнала вторичной синхронизации (Narrowband Secondary Synchronization Signal, NSSS);
- узкополосного опорного сигнала (Narrowband Reference Signal, NRS).

В отличие от стандартного LTE Rel. 8, в технологии NB-IoT работа физических каналов и транслируемые сигналы предварительно распределяются по времени.

Процесс многоканальной передачи от БС к МУ схематически показан на рис. 4 [14].

Сигнал NPSS передается в подкадре № 5 каждые 10 мс с использованием оставшихся 11 символов OFDM. Процесс регистрации и обработки сигнала NPSS представляет собой достаточно сложную процедуру, состоящую из нескольких последовательных этапов декодирования [14]. Сигнал NSSS транслируется с периодом в 20 мс в подкадре № 9 (11 PRB) ресурсных блоков. В общей сумме сигнал NSSS представляет собой 132 элемента, распределенных по кодированным временным промежуткам.

Информационные данные (МВ) передаются по каналу NPBCH в каждом фрейме в подкадре № 0, оставаясь неизменными в течение 640 мс интервала времени передачи (TTI).

По каналу NPDCCH транслируются инструкции совместного использования каналов для обоих направлений передачи (UL/DL).

Некоторые различия между LTE Rel. 8 и NB-IoT существуют и в структуре передачи данных от МУ к БС. Более подробно эти различия описаны, например, в [14, 15]

Важно подчеркнуть, что сети NB-IoT могут с небольшими затратами быть реализованы на базе существующих сетей LTE Rel. 8–11, без ущерба обслуживания пользователей сложных планшетов, гаджетов и смартфонов, которые полностью поддерживают все функции стандартов 3G/4G+.

Так же, как и в других технологиях стандарта 3GPP Rel. 13, в NB-IoT поддерживаются режимы энергосбережения и увеличенного радиуса дей-

| even number frame | subframe number |                  |                  |                  |                  |      |                  |                  |                  |      |
|-------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------|------------------|------------------|------------------|------|
|                   | 0               | 1                | 2                | 3                | 4                | 5    | 6                | 7                | 8                | 9    |
|                   | NPBCH           | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NPSS | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NSSS |

| odd number frame | subframe number |                  |                  |                  |                  |      |                  |                  |                  |                  |
|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                  | 0               | 1                | 2                | 3                | 4                | 5    | 6                | 7                | 8                | 9                |
|                  | NPBCH           | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NPSS | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH | NPDCCH or NPDSCH |

Рис. 4. Схема многоканальной передачи от базовой станции к мобильному устройству в технологии NB-IoT

ствия. Например, МУ NB-IoT с покрытием 164 дБ может работать 10 лет от одной батарейки, если оно передает 200 байт информации один раз в день [14].

Важной особенностью NB-IoT, на которую следует обратить внимание, является возможность поддержки множества устройств IoT при использовании только одного ресурсного блока (PRB) в обоих направлениях (DL/UL). Это достигается за счет того, что в технологии NB-IoT введена дополнительная поднесущая NPUSCH для режима UL, позволяющая существенным образом оптимизировать передачу данных в ресурсном блоке. Кроме того, эта технология позволяет использовать метод с несколькими несущими.

Разработкой технологии и устройств NB-IoT занимаются ведущие фирмы мира, которые объединены в международную ассоциацию GSMA NB-IoT Forum. В настоящее время в числе участников форума такие компании, как Ericsson, Huawei, Intel Corporation, LG Electronics, MediaTek, Nokia, Qualcomm, Sequans Communications, Sierra Wireless, Telit, u-blox, ZTE Corporation и др. [16].

Одним из наиболее активных разработчиков проекта NB-IoT является шведский концерн Ericsson. Тестовые испытания, которые провели Ericsson и Orange во Франции в Париже 16 февраля 2016 г., показали возможность использования существующих сетей LTE для развертывания их на основе эффективной NB-IoT в диапазоне 900 МГц. Совместно Ericsson и AT&T анонсировали запуск нового программного решения NB-IoT (Network Software-17A) на существующих сетях LTE. Этот проект должен быть реализован в четвертом квартале 2016 г. Как отмечается в пресс-релизах Ericsson, результаты продемонстрированных тестовых испытаний позволили заключить долгосрочные контракты между Ericsson и China Unicom о совместной разработке архитектуры IoT для китайского комплексного решения мобильной сотовой сети IoT с использованием диапазонов 900 и 1800 МГц в 2016–2017 гг.

На выставке MWC-2016 мировые лидеры производства комплектующих для беспроводной связи представили ряд новых разработок для NB-IoT, среди которых можно выделить чипы, разработанные Sequans Communications и Intel. Базовые характеристики нового чипа

Sequans Monarch приведены в предыдущем разделе.

Чип Intel XMM7115, разработанный специально для NB-IoT, содержит на одном кристалле транзмиттер, процессор и блок питания. Другая модель — XMM7315 — предназначена для работы как с устройствами eMTC, так и с устройствами NB-IoT. Технические характеристики этих моделей полностью соответствуют стандарту 3GPP Rel 13 (2016). Коммерческие поставки моделей XMM7115 и XMM7315 Intel планирует начать в 2017 г. [17].

В середине сентября 2016 г. китайская фирма Quectel Wireless Solutions анонсировала новый модуль BC95, предназначенный для работы в сетях NB-IoT и соответствующий требованиям Rel. 13 [17]. Модуль использует узкую полосу 200 кГц лицензируемого диапазона частот сотовой связи. Первый вариант модуля BC95 NB-IoT Quectel работает на частоте 900 МГц. Следующие модификации будут поддерживать также частоты 1800, 700, 850 и 800 МГц.

Отличительными особенностями модуля BC95 являются:

- крайне низкое энергопотребление;
- маленькие габаритные размеры;
- высокая чувствительность;
- небольшая скорость передачи данных;
- последовательный интерфейс;
- промышленный температурный диапазон;
- модернизированные протоколы Embedded Internet;
- возможность работы с eSIM;
- аппаратная совместимость с GSM/GPRS-модулем M95;
- наличие отладочных средств, опытных образцов и всесторонней технической поддержки.

Низкая потребляемая мощность (15 мВт), по словам изготовителя, может обеспечить непрерывную работу модуля от одной батареи в течение десяти лет. Простота протокола взаимодействия с БС позволяет задействовать десятки тысяч мобильных устройств с модулем BC95 в районе действия одной БС. Сеть

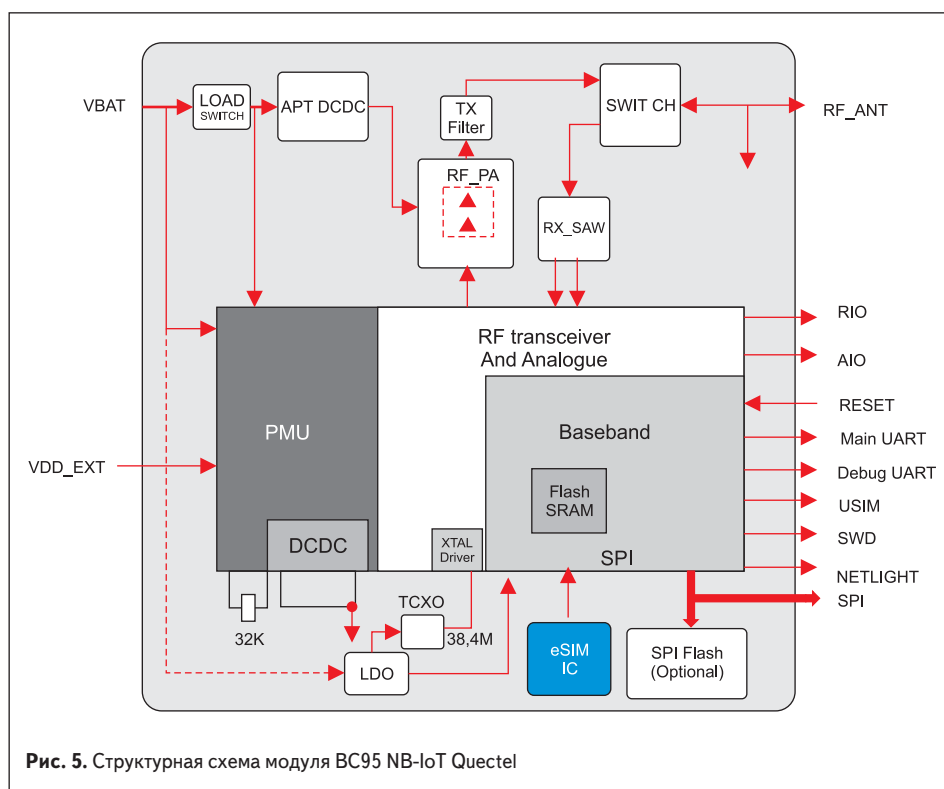


Рис. 5. Структурная схема модуля BC95 NB-IoT Quectel

Концерн Huawei играет огромную роль в развитии сетей нового поколения. Кроме разработок комплектующих и оборудования, этот китайский производитель сотрудничает с ведущими мировыми операторами сотовой связи. Так, например, Huawei совместно с Vodafone Group организовал международную лабораторию Open IoT Lab, целью которой является разработка и тестирование новых устройств стандарта NB-IoT. Эта открытая лаборатория, расположенная в Великобритании (г. Ньюбери), будет проводить всесторонние испытания устройств, изготовленных различными производителями. Любой разработчик может выставить свое оборудование на независимые испытания и сертификацию.



Рис. 6. Модуль BC95 конструктивно совместим с GSM/GPRS-модулями M95/M35



Рис. 7. В модуле BC95 поддерживается работа с eSIM

NB-IoT с такими мобильными устройствами может быть развернута на базе существующих станций стандарта 2G/3G.

Структурная схема модуля BC95 NB-IoT Quectel показана на рис. 5.

Модуль BC95 изготовлен на базе чипа Boudica, 3GPP-based NB-IoT Chipset, разработанного структурным подразделением Huawei. Базовый чип содержит на одном кристалле радиочастотный трансивер, аналоговый блок обработки, модуль сигнального процессора,

блок электропитания, интерфейс SPI и память (SRAM, FLASH).

Технические характеристики модуля BC95 NB-IoT Quectel приведены в таблице 4. Эта модель обладает улучшенной чувствительностью и не критична к колебаниям напряжения питания в диапазоне 3,0–4,2 В, что позволяет эксплуатировать модуль в течение нескольких лет при постепенной потере заряда батареи. В текущей версии модуля BC95 загрузка и отладка реализуются с помощью Serial Wire Debug

Таблица 4. Технические характеристики модуля BC95 NB-IoT Quectel

| Стандарт                        | NB-M2M (3GPP-TR-45.820), NB-IOT protocols                               |
|---------------------------------|---|
| Частотный диапазон              | В8, 900 МГц   |
| Скорость передачи               | От 100 бит/с до 100 кбит/с  |
| Выходная мощность, дБм          | 23  |
| Чувствительность, дБм           | -135  |
| Энергопотребление, мВт          | 15  |
| SIM/USIM                        | 1   |
| UART                            | 2   |
| Конструктив                     | LCC   |
| Количество выводов              | 94  |
| Напряжение питания, В           | 3,0–4,2 (типичное значение 3,8)   |
| Диапазон рабочих температур, °С | -40...+85   |
| Габаритные размеры, мм          | 19,9×23,6×2,2   |
| Интерфейс управления            | AT-команды в соответствии с 3GPP TR 45.820 + уникальные команды Quectel |
| Последовательный порт           | 2×UART  |
| Загрузка и отладка              | В текущей версии используется SWD                                       |
| Прикладные утилиты на SIM-карте | SIM Application Toolkit   |
| АЦП                             | 2   |
| Внешний перезапуск              | Вывод RESET   |
| Антенна                         | Радиочастотный вывод для внешней антенны                                |

(SWD). Этот простой и удобный интерфейс позволяет получать информацию через две информационные линии.

В модуле поддерживается интерфейс SAT (SIM Application Toolkit), который соответствует стандарту GSM 11.14. Этот интерфейс является прикладной утилитой, позволяющей модулю обрабатывать прикладные программы, записанные на SIM-карте. Модуль оснащен двумя АЦП. Для внешнего перезапуска имеется специальный вывод. Внешняя антенна подключается через радиочастотный разъем.

BC95 выполнен в стандартном конструктиве LCC в форм-факторе, позволяющем переходить от существующих стандартных GSM/GPRS-модулей (M95) к мобильным устройствам NB-IoT (рис. 6).

Следует обратить внимание на поддержку модулем BC95 работы с eSIM. Термин Machine-to-Machine UICC (eSIM), известный также, как M2M Form Factor (MFF), определяет абонентский идентификатор для простых мобильных устройств M2M, работающих на небольших скоростях с малыми объемами данных. Эти идентификаторы мобильного устройства устанавливаются на предприятии-изготовителе без возможности извлечения и замены (рис. 7).

Одна из основных функций eSIM позволяет осуществлять удаленное конфигурирование сети Remote Provisioning function. На карте eSIM записаны несколько профилей разных сетей. Мобильное устройство можно конфигурировать удаленно для подключения к нужной сетевой структуре. При этом другие профили не используются. Переключение между различными сетями реализуется с помощью внешнего управляющего модуля Subscription Manager.

В стандартных SIM-картах для идентификации абонента используется уникальный идентификационный ключ ICCID. В картах eUICC используется ключ eUICCID, позволяющий выбрать профиль конкретной сети для данного мобильного устройства. В стандарте GSMA определяются два типа профилей. Один — Provisioning Profile — загружается на предприятии-изготовителе и служит только для загрузки параметров используемых сетей. Другой — Operational Profile — позволяет подключиться к конкретной сети NB-IoT или к интернет-шлюзу.

Еще одна особенность модуля BC95 связана с Embedded Internet. Целесообразно напомнить, что протоколы, отвечающие за выбор маршрута, установление соединения и обеспечение целостности данных, такие, например, как стек протоколов TCP/IP, могут быть реализованы аппаратно или на программном уровне. Достаточно сложный программный метод создания стека протоколов требует использования развитой операционной системы, работающей под управлением центрального управляющего процессора, а также больших объемов памяти. Значительно проще и намного дешевле реализовать часть интернет-протоколов на аппаратном уровне. Этот способ получил название Embedded Internet. Для устройств NB-IoT не нужна реализация всего стека протоколов TCP/IP, обеспечивающего

полную функциональность современных высокоскоростных мультимедийных приложений. Поэтому в модуле BC95 используется модернизированный стек протоколов Embedded Internet, который позволяет с минимальными затратами обеспечить передачу небольших информационных пакетов через интернет-шлюзы.

Опытные образцы BC95 ожидаются в конце 2016 г. Массовое производство планируется начать в 2017 г.

В Китае новым сетям с поддержкой мобильных устройств стандарта Rel. 13 уделяется большое внимание. Ведущий оператор сотовой связи China Unicom при поддержке государства разворачивает в Шанхае сети NB-IoT. В начале мая 2016 г. China Unicom подписал с администрацией Шанхая договор под названием Internet+, в соответствии с которым будут развернуты крупномасштабные работы по внедрению сетей NB-IoT в различные городские структуры, такие, например, как уличное освещение, контроль расхода воды и электричества, информационные табло на остановках городского транспорта, парковки, библиотеки, медицинские службы и многое другое.

На конгрессе в Шанхае (2016 MWC Shanghai) было продемонстрировано оборудование для автомобильных парковок, в котором используются мобильные устройства с поддержкой NB-IoT, разработанные на основе решений Huawei. Этот комплект оборудования, включающий триста интеллектуальных датчиков на базе NB-IoT, терминалы, базовую станцию и программное обеспечение, позволяет с по-

мощью мобильного телефона найти свободное место на стоянке, проложить к нему маршрут и произвести оплату [19]. Новая система намного дешевле и эффективнее по сравнению с действующим стандартным парковочным оборудованием.

Как отмечается в пресс-релизах Ericsson, результаты продемонстрированных тестовых испытаний позволили заключить долгосрочные контракты между Ericsson и China Unicom о совместной разработке архитектуры IoT для китайского комплексного решения мобильной сотовой сети IoT с использованием диапазонов 900 и 1800 МГц в 2016–2017 гг.

В отмеченных выше приложениях новые модули BC95 NB-IoT Quectel, несомненно, будут пользоваться большим спросом.

В середине июля 2016 г. российский оператор «МегаФон» получил от ассоциации GSMA извещение о присвоении статуса Narrow Band IoT Forum Project Member. Таким образом, можно ожидать в ближайшем будущем развития сетей NB-IoT также и в России [20]. ■

## Литература

1. [www.ericsson.com/res/docs/2016/mobility-report/ericsson-mobility-report-feb-2016-interim.pdf](http://www.ericsson.com/res/docs/2016/mobility-report/ericsson-mobility-report-feb-2016-interim.pdf)
2. <http://resources.alcatel-lucent.com/asset/200178>
3. [www.rohde-schwarz.com/us/solutions/wireless-communications/lte/in-focus/emtc-and-nb-iot-pave-the-way-to-5g-iot\\_230416.html](http://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/wireless-communications/lte/in-focus/emtc-and-nb-iot-pave-the-way-to-5g-iot_230416.html)
4. [www.3gpp.org/images/PDF/R13\\_IOT\\_rev3.pdf](http://www.3gpp.org/images/PDF/R13_IOT_rev3.pdf)
5. [www.slideshare.net/Ericsson/iot-launch](http://www.slideshare.net/Ericsson/iot-launch)
6. [www.3gpp.org/ftp/workshop/2015-11-15\\_Taipei\\_summit\\_5G/Docs/2\\_5\\_2015\\_ITRI\\_3GPP\\_summit\\_GERANv05.pdf](http://www.3gpp.org/ftp/workshop/2015-11-15_Taipei_summit_5G/Docs/2_5_2015_ITRI_3GPP_summit_GERANv05.pdf)
7. [http://laforge.gnumonks.org/blog/20160723-ec\\_gsm\\_io/](http://laforge.gnumonks.org/blog/20160723-ec_gsm_io/)
8. [www.3gpp.org/ftp/Information/WORK\\_PLAN/Description\\_Releases/](http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/), [ftp://www.3gpp.org/workshop/2009-12-17\\_ITU-R\\_IMT-Adv\\_eval/docs/pdf/REV-090003-r1.pdf](http://www.3gpp.org/workshop/2009-12-17_ITU-R_IMT-Adv_eval/docs/pdf/REV-090003-r1.pdf)
9. [www.gsma.com/connectedliving/extended-coverage-gsm-internet-of-things-ec-gsm-iot/](http://www.gsma.com/connectedliving/extended-coverage-gsm-internet-of-things-ec-gsm-iot/)
10. <http://anisimoff.org/lte/channels.htm>
11. [www.sequans.com/products-solutions/streamlitel/monarch-lte-platform/](http://www.sequans.com/products-solutions/streamlitel/monarch-lte-platform/)
12. [www.qualcomm.com/news/releases/2015/10/26/qualcomm-announces-new-modem-solutions-designed-support-reliable-global](http://www.qualcomm.com/news/releases/2015/10/26/qualcomm-announces-new-modem-solutions-designed-support-reliable-global)
13. [www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp\\_5g-iot.pdf](http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp_5g-iot.pdf)
14. <https://arxiv.org/abs/1606.04171>
15. [www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.888/36888-c00.zip](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.888/36888-c00.zip)
16. [www.gsma.com/connectedliving/narrow-band-internet-of-things-nb-iot/](http://www.gsma.com/connectedliving/narrow-band-internet-of-things-nb-iot/), <https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-accelerates-path-to-5g/>
17. [www.quectel.com/news/detail.aspx?id=201](http://www.quectel.com/news/detail.aspx?id=201)
18. [www.huawei.com/en/news/2016/6/End-to-End%20NB-IoT-Solution](http://www.huawei.com/en/news/2016/6/End-to-End%20NB-IoT-Solution)
19. [www.huawei.com/en/news/2016/7/NB-IoT-based-Smart-Parking-Solution](http://www.huawei.com/en/news/2016/7/NB-IoT-based-Smart-Parking-Solution)
20. [www.vedomosti.ru/press\\_releases/2016/07/14/megafon-stal-polnopravnim-uchastnikom-mezhdunarodnogo-soobshchestva-po-razvitiyu-novogo-standarta-svyazi-nb-iot](http://www.vedomosti.ru/press_releases/2016/07/14/megafon-stal-polnopravnim-uchastnikom-mezhdunarodnogo-soobshchestva-po-razvitiyu-novogo-standarta-svyazi-nb-iot)