

Модули с поддержкой NB-IoT и eMTC производства Quectel

Часть 1. Технологии Narrow-Band IoT и eMTC в контексте документов 3GPP Rel. 13/Rel. 14

В настоящее время наиболее бурно развивается технология Narrow-Band IoT (NB-IoT), предназначенная для обслуживания до 1 млн интеллектуальных датчиков на 1 кв. км. Ожидается, что в 2018–2021 годах продажи модулей с поддержкой данной технологии по сравнению с 2017-м вырастут соответственно в 2, 5, 10 и 14 раз.

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 LTE указанных версий. В технологии eMTC поддерживается только передача небольших пакетов данных (1000 бит) со скоростями до 1 Мбит/с в обоих направлениях.

Технологии NB-IoT и eMTC в основном регламентированы в стандарте 3GPP Rel. 13, окончательная редакция которого вышла в 2016 году. Модернизация отмеченных технологий была продолжена в рамках рабочих групп Rel. 14 и Rel. 15. В настоящей части статьи рассмотрены основные функции и параметры пользовательских устройств NB-IoT и eMTC, описанные в этих стандартах.

Виктор Алексеев, к. ф.-м. н.

Введение

В ближайшие годы множество самых различных датчиков в приложениях IoT должны будут выходить в эфир лишь периодически и только для того, чтобы отправить накопленную информацию о расходах воды, газа, электричества, температуре воздуха, влажности почвы, содержании вредных примесей и т. д. Такие интеллектуальные датчики должны обладать специфическими свойствами, из которых, прежде всего, необходимо отметить минимальное энергопотребление и стоимость. Эти устройства с автономным батарейным питанием должны обеспечивать работу без замены батареи в течение нескольких лет. В англоязычной литературе данный тип устройств, обеспечивающий малое энергопотребление и широкий территориальный охват, получил название LPWA — low power wide area. Технологии лицензируемых диапазонов IoT, предназначенные для устройств LPWA eC-GSM-IoT, eMTC и NB-IoT, в базовом варианте стандартизованы в документе 3GPP Release 13 (Rel. 13) [1].

В настоящее время наиболее интенсивно развиваются экосистемы NB-IoT. Во многом это связано с тем, что сети NB-IoT и eMTC могут быть реализованы внутри существующих стандартных сетей LTE-M, предназначенных для высокоскоростной передачи голоса, видео и больших объемов данных. Кроме того, в последнее время появилось много новых моделей чипов с поддержкой обеих технологий.

Популярность сетей NB-IoT постоянно растет во всем мире. 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, как следует из названия, базируется на так называемом методе узкополосной радиосвязи (narrowband), который используется для передачи небольших пакетов данных с малыми скоростями.

Далее перечислены основные характерные особенности простых мобильных устройств Cat NB1 с поддержкой технологии NB-IoT, которые коренным образом отличаются от стандартных бытовых смартфонов и планшетов и LTE:

- сокращенный размер транспортного блока для обоих направлений (DL и UL);
- упрощенный процесс гибридного автоматического запроса на повторную передачу данных (HARQ) для обоих направлений (DL и UL);
- поддержка только однопотокового режима передачи в обоих направлениях (DL и UL);
- одна антенна в базовом варианте мобильного устройства (как дополнительная опция допускается вторая антенна);
- нет необходимости в турбокодекере при использовании канала TBCC в режиме DL;
- отказ от контроля регистрации в сети при нормальном режиме работы (контроль оставлен только для Idle mode);

- небольшие скорости приема и передачи данных;
- узкая полоса пропускания;
- возможность работы только в экономичном полудуплексном режиме (HD-FDD);
- класс мощности мобильного устройства: 23 дБм (Rel. 13) и 14 дБм (Rel. 14);
- только последовательная обработка при приеме и передаче сообщений.

Аббревиатура eMTC означает «LTE enhancements for Machine-Type Communications», то есть расширение стандарта LTE для коммуникации между различными механизмами и устройствами.

Прообраз технологии eMTC впервые появился в 3GPP Release 8, где были представлены функции NIMTC и SIMTC. Далее в Rel. 12 были сформулированы требования по минимальной функциональности и цене мобильных устройств LTE-MTC. Окончательно стандарт eMTC сформировался в 3GPP Release 13 (July 2016).

В данной статье используется термин eMTC, принятый в базовой документации 3GPP [3, 4]. 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 те же методы доступа, что 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 быстроредействующей 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 значение ширины канала — 1,4 МГц. Остальные отмеченные полосы пропускания оставлены для устройств стандарта LTE Rel. 8.

Основные характеристики NB-IoT в редакции 3GPP Rel. 13

Минимально необходимые функции, которыми согласно 3GPP Rel. 13, Rel. 14 должны обладать устройства пользователя UE сетей NB-IoT, приведены в таблице 1 [3].

В документах 3GPP Release 13 (3GPP TS 36.101) определены частотные диапазоны для оборудования NB-IoT:

- Европа: B3 (1800), B8 (900); B20 (800 МГц);
- США: B3 (1800), B8 (900); B20 (800);
- Азия: B1 (2100), B3 (1800), B5 (850), B8 (900), B18 (850), B20 (800), B26 (850), B28 (700);
- Центральная Африка: B3 (1800); B8 (900);
- Западная и Северная Африка: B8 (900); B20 (800);
- Латинская Америка: B2 (1900), B3 (1800), B5 (850); B28 (700).

В стандарте 3GPP Rel. 13 рассмотрено три варианта рабочих диапазонов для технологии NB-IoT (рис. 1):

- Stand Alone — использование несущей стандартной технологии GSM для полосы NB-IoT;

Таблица 1. Минимально необходимые функции, которыми должны обладать устройства пользователя UE сетей NB-IoT (согласно 3GPP Rel. 13, Rel. 14)

Наименование функции	Описание
PSM configurations	Конфигурирование режима глубокого энергосбережения (Power Saving Mode – PSM)
eDRX configurations	Конфигурирование расширенного интервала работы без обязательных сигнальных сообщений (Extended Discontinuous Reception – eDRX)
Data Transport in Control Plane Clot EPS optimization	Использование программированного режима сотового «Интернета вещей» Clot и Evolved Packet System – EPS
PRB (Physical Resource Block) configurations	Конфигурируемый физический ресурсный блок (PRB)
Deployment mode	Программируемый выбор рабочего частотного диапазона
Paging	Пейджинговая связь
SCEF deployment plans	SCEF (Service Capabilities Exposure Function) с выбором интерфейса APIs (Application Programming Interface) из набора Rel. 13
SMS without combined attach for NB-IoT only UEs	Возможность управления UE через SMS внутри UDP
Cell Reselection	Возможность оператора сотовой сети предоставлять повторный выбор соты
Coverage Extension	Доступ к UE, находящимся вне зоны доступа радиосигнала
Class Power	Наличие устройств различного класса мощности
Rate Control	Контроль скорости обмена данными

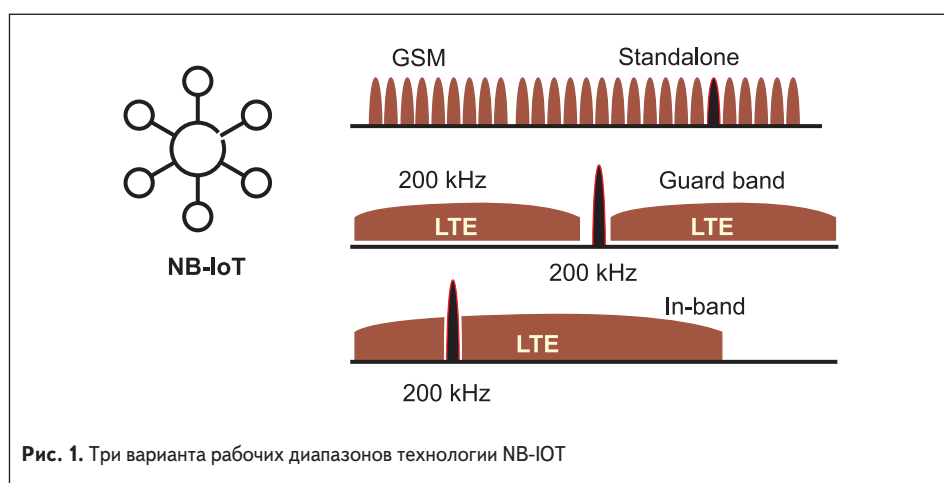


Рис. 1. Три варианта рабочих диапазонов технологии NB-IoT

- 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 мобильные устройства NB-IoT способны самостоятельно выбирать один из трех возможных сценариев работы (рис. 1), которые им предлагает базовая станция.

Основные технические характеристики устройств NB1 с поддержкой NB-IoT, стандартизированной в Rel. 13, приведены в таблице 2.

Скорости передачи для устройств класса NB1 составляют 70 кбит/с (GMSK) и 240 кбит/с (8PSK) для направлений

«вверх» и «вниз» соответственно. Ширина полосы — 180 кГц.

Согласно спецификации 3GPP Rel. 13 возможно два варианта (Network Attach) подключения к сети NB-IoT:

- традиционный способ, используемый во всех предыдущих релизах, предусматривающий процедуру Evolved Packet System (EPS) для подключения к сети пакетной передачи данных (Packet Data Network — PDN);
- новый способ, предложенный в Rel. 13, обеспечивает подключение к сети NB-IoT без использования PDN.

Второй вариант без PDN, который представляет возможность поддерживать со-товый «Интернет вещей» (Cellular Internet

Таблица 2. Основные характеристики устройств NB1 технологии NB-IoT (Rel. 13)

Категория мобильного устройства NB-IoT	Cat. NB1
Частотный диапазон	Основная и защитная полосы частот LTE, выделенные частоты 800, 900, 1800 МГц (Европа)
Уровень покрытия (в соответствии с TR 36.888/45.820)	164 дБ для выделенной полосы
Схема кодирования (передача вниз)	OFDMA, 15 кГц, TBCC, 1 Rx
Схема кодирования (передача вверх)	Single tone, 15 кГц; 3,75 кГц; SC-FDMA, 15 кГц
Ширина полосы частот приемника ME	180 кГц (200 кГц carrier bandwidth)
Скорость передачи данных Вниз (DL) и Вверх (UL)	Для DL и UL (4 временных слота): 70 кбит/с (GMSK) и 240 кбит/с (8PSK)
Дуплексная передача	HD (type B), FDD
Энергосберегающий режим	PSM, ext. I-DRX, C-DRX
Класс мощности	33, 23 дБм

of Things — CIoT), может быть полезен для случаев, когда большое количество пользовательских устройств (UE) в сети находятся в спящем режиме в течение длительного времени и редко передают данные по ней. Когда UE подключено к сети без помощи PDN, для любых передач доступна только услуга SMS и все приложения ограничиваются этой единственной возможностью. Короткие сообщения SMS могут также использоваться для инициирования соединения с подключением к услугам PDN.

Существуют различные способы подключения PDN через процедуру EPS:

- использование традиционного способа работы в сетях LTE, предусматривающего применение протоколов UDP и TCP IP на уровне управления совместно с CIoT EPS;
- применение UDP и TCP IP на уровне пользователя (User Plane);
- подключения без IP через контрольный и пользовательский уровни.

Использование CIoT EPS на уровне управления дает возможность оптимизации передачи данных за счет подключения MME, инкапсулированного в NAS (Non-Access-Stratum). В результате уменьшается количество сообщений на уровне управления, сокращается время передачи сообщений, что позволяет снизить энергопотребление.

В третьем варианте (non-IP communication over the Control Plane) операторы мобильной связи могут предложить два варианта: либо использовать PGW (Packet Gateway), либо применять SCEF (Service Capabilities Exposure Function). При этом сеть сама будет направлять сообщения для IWF (InterWorking Function) в домашней сети. Следует отметить, что функция SCEF предусматривает безопасное обнаружение услуг и возможностей, предоставляемых сетевыми интерфейсами 3GPP. Кроме того, SCEF обеспечивает доступ к сетевым ресурсам через однородные сетевые API, определенные в 3GPP TS 23.682.

В режиме In Band распределение ресурсов между LTE и NB-IoT не является фиксированным. Однако не все частоты, то есть ресурсные блоки несущих LTE, могут использоваться для связи между ячейками. Разрешенные ресурсные блоки PRB LTE, предназначенные для связи между устройствами NB1 в режиме In Band, приведены в таблице 3.

В режиме In Band связь по каналам NPSS, NSSS и NPBCH для устройств класса NB1 может быть реализована только в ресурсных блоках, перечисленных в таблице 3. Несущие, выделенные для получения этой информации, в документах Rel. 13 получили название anchor carrier. Наиболее близкий по смыслу перевод этого термина означает примерно «истинные или стандартизованные» частоты LTE. Соответственно термин pop anchor определяет

частоты, выходящие за пределы значений, приведенных в таблице 3. В документах Rel. 14 для LTE под этим термином понимаются частоты нелицензированного диапазона 5 ГГц. На обратной стороне контрольные сигналы PDCCH совместимы с несущими anchor. Такой подход позволяет устройствам NB1 безошибочно выделять свои синхронизирующие сигналы на фоне сигналов синхронизации стандартных сетей LTE, что исключает конфликтные ошибки работы сетей LTE и NB-IoT.

Аналогично тому, как это организовано в стандартных сетях LTE Rel. 8, при регистрации в сети мобильные устройства NB-IoT ищут anchor-несущую в растре 100 кГц.

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 несущая anchor может быть размещена только в определенных ресурсных блоках PRB (табл. 3).

В технологии NB-IoT необходима минимальная полоса пропускания 180 кГц, как для передачи данных от базовой станции к мобильному устройству, 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 и 900 МГц.

Если существующая сеть поддерживает 2G, 3G, 4G, то технология NB-IoT позволяет использовать все три полосы, показанные на рис. 1. В этом случае в сетях LTE для устройств IoT предусмотрен 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.

Радиоинтерфейс 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 («вниз») и SC-FDMA («вверх»), канальное кодирование, согласование скорости передачи, побитовое перемежение и другие.

Ниже приведены названия каналов и их сокращения, принятые в документах Rel. 13, которые именно в таком виде будут в дальнейшем использоваться в статье:

Направление «нисходящей линии связи»

- NPBCH physical broadcast channel — физический радиочастотный канал;
- NPDSCH physical downlink shared channel — физический канал общего пользования нисходящей линии связи;
- NPDCCH physical downlink control channel — физический контрольный канал нисходящей линии связи;
- NRS narrowband reference signal — узкополосный опорный сигнал;
- NPSS primary synchronization channels — канал первичной синхронизации;
- NSSS secondary synchronization channels — канал вторичной синхронизации.

Направление «восходящей линии связи»:

- NPUSCH narrowband physical uplink shared channel — узкополосный физический канал общего пользования восходящей линии связи;
- NPRACH narrowband physical random access channel — узкополосный физический канал случайного доступа;
- DMRS demodulation reference signal — опорные сигналы демодуляции.

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 сути, в технологии NB-IoT несущие в частотной области используют один физический ресурсный блок LTE PRB. Таким образом, 12 поднесущих, каждая по 15 кГц, в результате определяют полосу 180 кГц.

В технологии NB-IoT передача от базовой станции к мобильному устройству реализуется с помощью трех физических каналов: NPBCH, NPDCCH, NPDSCH, и двух узкополосных опорных сигналов (Narrowband Reference Signal — NRS): NPSS и NSSS.

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

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 [4].

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.

Таблица 3. Разрешенные ресурсные блоки PRB LTE, предназначенные для связи между устройствами NB1 в режиме In Band

LTE частотные ресурсы	3 МГц	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
LTE PRB, разрешенные для NB-IoT-устройств	2, 12	2, 7, 17, 22	4, 9, 14, 19, 30, 35, 40, 45	2, 7, 12, 17, 22, 27, 32, 42, 47, 52, 57, 62, 67, 72	4, 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95

По каналу NPBSCH передаются информационные данные (Master Information Block — MIB NB) в течение 640 мс интервала транзитного времени (transmission time interval — TTI). В этом интервале времени каждые 10 мс передается подкадр 0 (рис. 2). Таким образом, внутри NPBSCH TTI-интервала находятся 64 NPBSCH подкадра [5].

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

Для простых устройств NB1 в документации Rel. 13 прописан только один упрощенный процесс гибридного автоматического запроса на повторную передачу данных (HARQ), как в нисходящей, так и в восходящей линиях связи. Это позволяет увеличить время декодирования устройств NB1 в каналах NPDCCH и NPDSCH. Асинхронная адаптивная процедура HARQ обеспечивает гибкость маршрутизации. В качестве примера на рис. 3 показана структура посылок в каналах NPUSCH, NPDSCH, NPDCCH [6].

Команда маршрутизации передается через индикатор управления нисходящей линией (Downlink Control Indicator — DCI) по каналу NPDCCH, который может использовать уровни агрегации (AL1 или AL2). Если задействован уровень AL1, то два DCI мультиплексируются в одном подкадре. В случае AL2 один подкадр содержит только один DCI. В этом варианте предусмотрена уменьшенная скорость кодирования и улучшенное покрытие.

Для повышения качества и надежности связи используются повторные передачи, каждая из которых требует один дополнительный подкадр. При передаче данных по нисходящей линии в DCI указывается точное смещение между NPDCCH и ассоциированным NPDSCH. Для простых интеллектуальных датчиков NB-IoT не требуется большого вычислительного времени. Поэтому смещение по времени между концом передачи NPDCCH и началом соответствующей передачи NPDSCH составляет немного больше 4 мс. Канал NPDSCH, ответственный за трафик, конфигурируется с помощью символов OFDM. Максимальный размер транспортного блока (TBS), определенный Rel. 13, составляет 680 бит.

Мобильное устройство должно отправить подтверждение получения пакета HARQ с использованием формата NPUSCH 2 (acknowledgment A/N). Источники NPUSCH, несущие подтверждение HARQ, также указаны в DCI. Учитывая ограниченные вычислительные ресурсы в устройстве IoT, задержка по времени между окончанием NPDSCH и началом связанного подтверждения HARQ составляет не менее 12 мс. Это смещение больше, чем между NPDCCH и NPDSCH, поскольку транспортный блок, переносимый в NPDSCH, может иметь размер (TBS) до 680 бит, что намного больше размера DCI, составляющего всего 23 бит.

Задержка по времени между концом NPDCCH и началом соответствующего NPUSCH составляет не менее 8 мс. После завершения передачи NPUSCH мобильное устройство тестирует NPDCCH, чтобы определить, правильно ли была принята посылка NPUSCH от базовой станции или необходима повторная передача. Задержка между acknowledgment

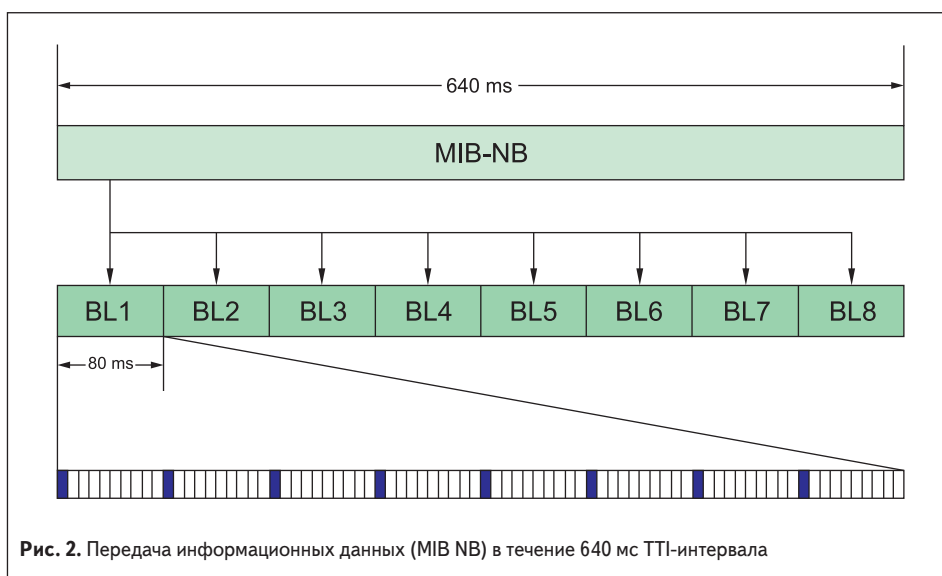


Рис. 2. Передача информационных данных (MIB NB) в течение 640 мс TTI-интервала

и следующим DCI составляет 3 мс. Длительность всего цикла меньше 26 мс, что соответствует скорости 26 кбит/с.

В режиме приема мобильное устройство NB-IoT NB1 поддерживает работу сигналов по физическим каналам NPSS, NPSS и NRS.

При передаче данных от мобильного устройства к базовой станции 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.

Некоторые различия между LTE Rel. 8 и NB-IoT существуют и в структуре передачи данных от мобильного устройства к базовой станции. Более подробно об этом написано, например, в [7].

В устройствах UE NB-IoT поддерживается режим Extended Discontinuous Reception

(eDRX) — расширенный интервал работы без обязательных сигнальных сообщений. Он позволяет снизить периодичность сообщений, оптимизировать интервалы приема и получения информации, организовать поддержку длительных периодов молчания, в течение которых устройство остается подключенным к сети, не передавая и не получая информацию (рис. 4). Максимальный период eDRX, определенный в Rel. 13, составляет 10485,76 с (175 мин). В соответствии с требованиями Rel. 13 устройства NB1 должны поддерживать функции конфигурирования режима eDRX, например взаимную настройку сети и модуля параметров пейджинга в момент регистрации или во время периодической процедуры Tracking Area Update (TAU) и Routing Area Update (RAU). Поскольку в режиме eDRX модули NB-IoT только слушают эфир, ток в этом случае составляет единицы миллиампер.

В соответствии с GPP Rel. 13 устройства NB1 должны поддерживать режим энергосбережения Power Saving Mode (PSM), обеспечивающий их автономную работу без замены батареи в течение нескольких лет.

В редакции Rel. 13 для реализации режима PSM в устройствах категории NB1 рекомендуется задействовать таймеры (T3324 и T3412). Время PSM определяется как разница между

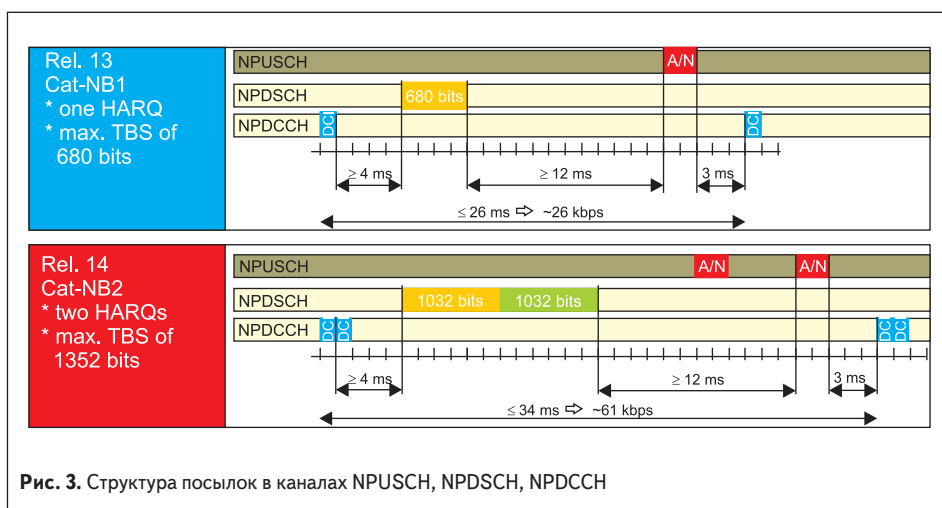
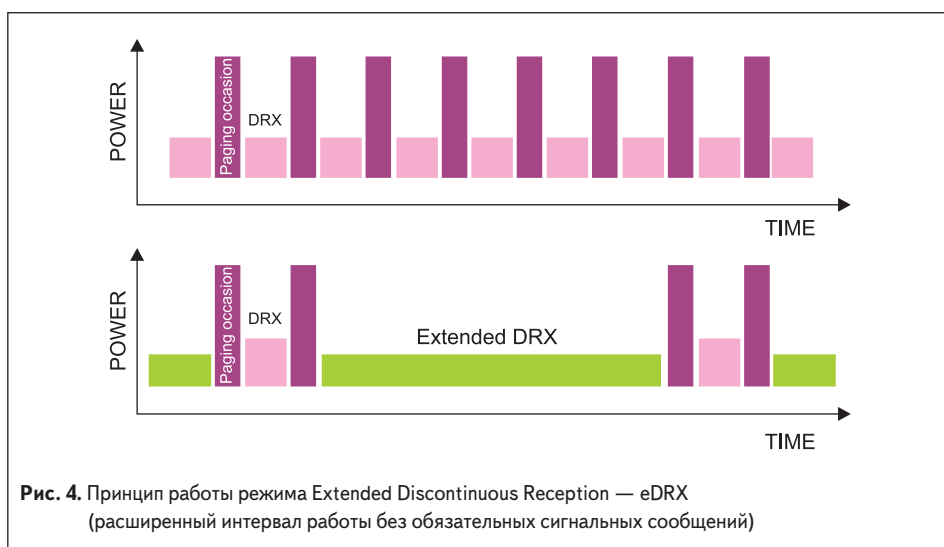


Рис. 3. Структура посылок в каналах NPUSCH, NPDSCH, NPDCCH



обоими таймерами. Эти значения передаются по сети, а само устройство остается зарегистрированным в сети. Иными словами, режим PSM характеризуется тем, что устройство NB1 само инициирует сеанс связи по расписанию. В качестве примера можно привести беспроводные системы контроля расхода воды, которые раз в день передают на центральный сервер показания интеллектуальных датчиков. Так, мобильное устройство NB-IoT с покрытием 164 дБ может работать 10 лет от одной батарейки, если оно передает 200 байт информации один раз в день [4]. В режиме PSM современные модули NB-IoT потребляют ток всего единицы микроампер.

В тот период, пока устройство находится в режиме PSM, оператор может использовать режим сохранения входящих пакетов или SMS для дальнейшей их пересылки на устройство после его пробуждения. Рекомендуется, чтобы оператор сети (mobile network operator — MNO) зарезервировал память по меньшей мере для сохранения последнего пакета в 100 байт, чтобы позволить клиенту отправлять простые сообщения на устройство, например, такие как обновление часов.

В документации Rel. 13 отмечено, что режим PSM может быть реализован как в комплексе с eDRX, так и отдельно от него. Для режимов eDRX и PSM предлагается также использовать таймеры TAU, Periodic TAU и IPX firewall.

Важной особенностью NB-IoT, на которую следует обратить внимание, является возможность поддержки множества IoT-устройств при использовании только одного ресурсного блока (PRB) в обоих направлениях (DL и UL). Это достигается за счет того, что в технологии NB-IoT введена дополнительная поднесущая NPUSCH для режима UL, позволяющая значительно оптимизировать передачу данных в ресурсном блоке. Кроме того, технология предусматривает применение метода с несколькими несущими. Поэтому, согласно Rel. 13, одна базовая станция может поддерживать до 52 500 мобильных устройств NB-IoT категории NB1.

Следует также отметить еще одно свойство устройств NB-IoT. Некоторые приложения IoT используют устройства, расположенные в местах, недоступных для радиосигналов:

в подземных гаражах и т. д. Для работы с такими UE предусмотрена функция расширенного охвата (Coverage Extension 3GPP).

Дополнения к требованиям 3GPP стандарта NB-IoT, внесенные в документах Release 14

Развитие и разработки новых стандартов для IoT продолжают в настоящее время в других рабочих группах 3GPP. В целом, работы по проекту Rel. 14 были завершены в июне 2017 года. В проекте 3GPP Release 14 основное внимание уделено следующему поколению полевых устройств NB2 технологии NB-IoT.

Стандарт 3GPP Release 14 содержит новые свойства и функции для устройств категории NB2 [8]:

- улучшенные скоростные параметры обмена данными;
- двойной запрос HARQ (гибридный автоматический запрос на повторную передачу данных);
- поддержка механизма позиционирования (UTDOA/OTDOA);
- новый механизм переключения в энергосберегающий режим;
- возможность использования устройств более низкого класса мощности;
- модернизированная несущая;
- многоадресная рассылка;
- поддержка TDD для мелких ячеек;
- новые частотные диапазоны.

В стандартах Release 14 введены новые дополнительные диапазоны частот: 11; 25; 31 и 70 МГц.

Для устройств NB-IoT CatNB2 увеличены скорости передачи: DL — 120 кбит/с и UL — 160 кбит/с.

В устройствах NB2 для пейджинговых сообщений и процедур случайного доступа (PRACH) могут быть задействованы до 15 поднесущих типа anchor/non-anchor. Это обеспечивает обслуживание до 1 млн устройств NB2 на территории площадью 1 кв. км.

Пейджинговые сообщения рассылаются конкретным UE в режиме RRC_IDLE mode, что позволяет использовать их в качестве команд выхода из состояний PSM и eDRX, а также для

инициализации процесса группового обновления прошивки.

Следует отметить введенный в Rel. 14 новый механизм переключения в режим PSM. Устройства NB2, кроме использования таймеров T3412 и T3324, рекомендованных в Rel. 13, имеют возможность переключения в режим глубокого сна с помощью механизма Release Assistance Indicator, позволяющего экономить время и энергоресурсы.

В Rel. 13 стандартизированы два класса мощности устройств NB1: 23 дБм (класс мощности 3) и 20 дБм (класс мощности 5). В 3GPP Release 14 добавлен еще один класс — 14 дБм (класс мощности 6).

Для устройств NB-IoT Cat NB2 в нормативах 3GPP Release 14 вводится новый механизм геолокации — Location services LCS, использующий технологию Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA), впервые регламентированную в Rel. 9 для сетей LTE. Схема принципа позиционирования в сетях NB-IoT показана на рис. 5.

При перемещении устройства NB2 в зоне действия сети NB-IoT это UE постоянно принимает сигнал от всех находящихся поблизости ячеек. Причем отслеживается временной интервал, который соответствует моментам получения устройством UE сигналов из двух разных ячеек. Если сигнал в ячейке 1 принимается в момент t1, а сигнал от ячейки 2 принимается в момент t2, то OTDOA определяется как $t_2 - t_1$ [9].

В документах Release 14 рассматриваются модернизированные опорные сигналы позиционирования (Positioning Reference Signals — PRS). Введение этих модернизированных сигналов помогает отслеживать движение на больших скоростях в условиях сильных помех. В Rel. 14 приняты новые алгоритмы вычисления координат объектов на основе OTDOA и PRS.

Для того чтобы обеспечить лучшее качество приема сигналов PRS от «ячейки со слабым сигналом», которая имеет тот же сдвиг частоты PRS, как и «ячейка с сильным сигналом», сигналы PRS в «сильной ячейке» при необходимости могут быть искусственно подавлены. Этот эффект в англоязычной литературе получил название PRS muting in LTE OTDOA. Поскольку в русскоязычной литературе нет устоявшегося названия данному эффекту, в дальнейшем в статье будет использован термин PRS muting. Битовая маска этой опции (LTE PRS muting



pattern) определена в Rel. 13 как 2; 4; 8; 16 бит для каждой ячейки.

Модернизированные устройства OTDOA Rel. 14 могут устанавливаться в различных быстродействующих промышленных системах реального времени, а также в системах управления беспилотными транспортными средствами. Кроме того, данные устройства найдут применение в качестве дополнения к спутниковым навигационным системам для зон, где пропадают или вообще отсутствуют сигналы GNSS.

Реализация системы позиционирования LCS NB-IoT была продемонстрирована в действии на прошедшем в 2018 году Mobile World Congress [10].

Из других нововведений Rel. 14 следует обратить внимание на две операции HARQ. Приведенные выше примеры структуры посылок в каналах NPUSCH, NPDSCH, NPDCCH (рис. 3) показывают, что для устройств NB1 (верхний рисунок) возможна только одна операция HARQ. В этом случае максимальный размер транспортного блока составляет 680 бит, причем длительность всей посылки равна 26 мс. В нижней части рис. 3 показаны те же параметры для устройств NB2 Rel. 14, для которых возможны две операции HARQ, а максимальный размер транспортного блока достигает 1352 бит. Длительность всей посылки для NB2 увеличена до 34 мс по сравнению с 26 мс в случае NB1. Максимальное количество битов транспортного блока, полученных за период TTI, составляет для NB1 и для NB2 соответственно 680 и 2536 [11].

В статье [12] отмечается, что, по всей видимости, в последнюю редакцию Rel. 14 войдут дополнения, связанные с новой методикой скремблирования сигналов NPUSCH, одобренной «3GPP RAN meeting #75, March 2017». В этих документах отмечается, что маски скремблирования, используемые в соседних ячейках, изменяются иначе, чем в сигналах NPUSCH. Поэтому необходимы дополнительные методы коррекции возникающих ошибок вследствие интерференции в соседних ячейках. В качестве таких методов можно рассматривать многократные повторные посылки и усовершенствованные методы скремблирования. Аналогичная ситуация наблюдается и в канале NPDSCH.

Основные характеристики eMTC в редакции 3GPP Rel. 13

Аббревиатура eMTC означает LTE enhancements for Machine-Type Communications, то есть расширение стандарта LTE для коммуникации между различными механизмами и устройствами.

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 в пределах 6–110. Ресурсный блок PRB выделяется каждому мобильному устройству планировщиком базовой станции в специальном сообщении управляющего канала.

На рис. 6 показана схема трансляции данных по технологии eMTC при работе в модернизированной сети LTE Rel. 8 [13].

В стандарте eMTC сохранена базовая архитектура LTE Rel. 8 для полосы 1,4 МГц. Вместе с тем имеется и ряд различий. Так, на физическом уровне оставлены каналы PDSCH (физический канал для передачи информации «вниз» с разделением пользователей) и EPDCCH — расширенный физический канал управления «вниз».

Каналы PCFICH и PHICH 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. Мобильные устройства IoT всегда настроены на центр 6 PRB в ожидании контрольной информации. Когда мобильное устройство получит сеанс связи с базовой станцией, ему будет выделены соответствующие физические ресурсные блоки (вплоть до 6 PRB) на любом участке внутри рабочего спектра. Это, например, означает, что мобильное устройство eMTC займет полосу шириной 1,4 МГц внутри полосы LTE Rel. 8 шириной 20 МГц.

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

В технологии eMTC применяются описанные выше механизмы eDRX и PSM, позволяющие заметно снизить энергопотребление мобильных устройств по сравнению с устройствами LTE Rel. 8. Мобильные устройства eMTC могут длительное время работать от небольших аккумуляторных батарей.

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 мобильными устройствами, про-

писанные в Rel. 8–11, должны выполняться при радиусе соты 5 км. В стандарте eMTC увеличение радиуса действия реализуется с помощью отмеченных ранее механизмов, таких 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).

Опорная сеть LTE, которую планируется использовать для eMTC, как правило, содержит шлюзы других операторов (PGW), а также узлы управления мобильностью MME. Это позволяет легко и гибко масштабировать сети IoT в самых различных конфигурациях.

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

Подробно требования, предъявляемые стандартом Rel. 13 к мобильным устройствам и базовым станциям, изложены в [1].

Дополнения к требованиям 3GPP стандарта eMTC, внесенные в документах Release 14

Ниже перечислены основные, наиболее значимые изменения, внесенные в стандартах 3GPP Release 14 для eMTC дополнительно к регламентам, зафиксированным в Rel. 13:

- новая категория мобильных устройств eMTC UE Cat M2;
- улучшенные параметры позиционирования;
- модернизированный режим передачи Multicast DL;
- улучшенные параметры мобильности;
- поддержка более высоких скоростей передачи данных;
- расширенные возможности функции VoLTE.

В Rel. 14 введена новая категория UE Cat M2, которая отличается от устройств UE Cat M1 (Rel. 13) прежде всего поддержкой более высоких скоростей передачи данных, использованием более широкой полосы пропускания, увеличенным объемом TBS и более сложным процессом HARQ. Новая категория UE Cat M2 может поддерживать максимальную полосу пропускания 5 МГц для нисходящей линии связи и восходящей линии

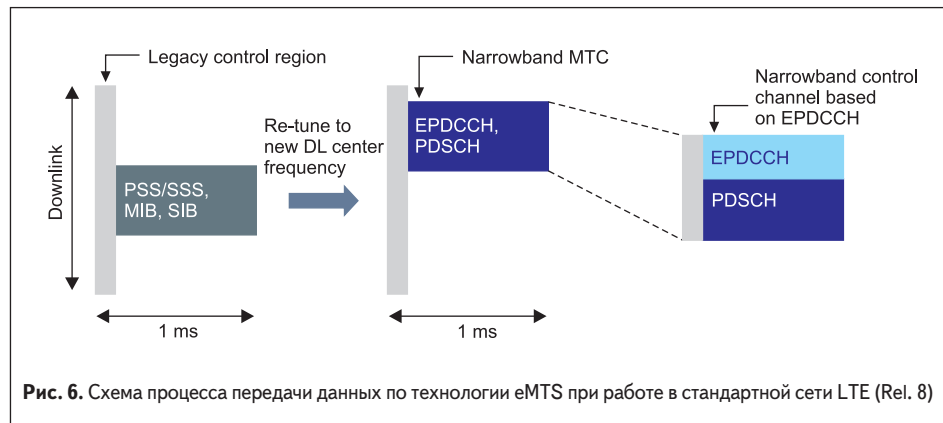


Рис. 6. Схема процесса передачи данных по технологии eMTC при работе в стандартной сети LTE (Rel. 8)

Таблица 4. Сравнительные характеристики мобильных устройств, стандартизованных в документах Rel. 13 и Rel. 14

	Cat M1 Rel. 13	Cat M1 Rel. 14	Cat M2 Rel. 14	Non-BL Rel. 14
Максимум DL, полоса пропускания	1,4 МГц	1,4 МГц	5 МГц	20 МГц
Максимум UL, полоса пропускания	1,4 МГц	1,4 МГц	5 МГц	5 МГц
Максимум DL, TBS	1000 бит	2984 бит	4008 бит	4008 бит
Максимум DL, скорость передачи	< 1 Мбит/с	≈ 1 Мбит/с	≈ 4 Мбит/с	≈ 27 Мбит/с
Максимум UL, TBS	1000 бит	2984 бит	6968 бит	6968 бит
Максимум UL, скорость передачи	< 1 Мбит/с	≈ 3 Мбит/с	≈ 7 Мбит/с	≈ 7 Мбит/с
Количество HARQ	8	8	10	10

связи. Максимальный размер транспортного блока TBS для Cat M2 в нисходящей линии связи составляет 4008 бит, а в восходящей линии связи — 6968 бит. Кроме того, он может также опционально поддерживать 10 процессов HARQ вместо 8 в случае Cat-M1. Новая категория UE имеет более сложную схемотехнику, чем UE Cat M1. Однако это не должно существенно увеличить стоимость мобильных устройств.

В Rel. 14 также добавлены некоторые новые свойства устройств Cat M1. В частности, увеличен размер TBS до 2984 бит, увеличены скорости передачи DL и UL, соответственно до 1 и 3 Мбит/с. Сравнительные характеристики мобильных устройств, стандартизованных в документах Rel. 13 и Rel. 14, приведены в таблице 4.

В таблице 4 также приведены данные для класса мобильных устройств, получивших название Non-Bandwidth Limited UE — Non-BL/CE UE. В документах 3GPP термин Non-BL/CE UE означает не ограниченное по полосе пропускания мобильное устройство, работающее в условиях расширенного покрытия (CE — coverage enhancement mode). Режим CE в сетях LTE позволяет расширить границы соты и улучшить прием сигнала в зданиях.

Базовые требования, предъявляемые к устройствам Non-BL/CE UE, определяются следующим образом:

- категории направлений передачи DL и UL отличны от категорий 0, M1, M2, NB1, NB2;
- поддержка работы в любой полосе частот LTE;
- полоса пропускания канала 1,4 МГц;
- пропускная способность при передаче информации не больше, чем 6 PRB (Physical Resource Blocks) в обоих направлениях DL и UL;
- при работе в режиме RRC_IDLE размещение в зоне, обнаруженной с использованием SIB1-BR или RRC_CONNECTED, сконфигурированных в режиме CE mode A/B.

Дополнительную информацию об устройствах Non-BL/CE UE можно найти в документах [14, 15].

Следует отметить, что мобильные устройства первого поколения LTE, регламентированные в Rel. 13 (Non-BL/CE), могут работать в режиме расширенного покрытия CE mode аналогично устройствам UE eMTC с ограничением пропускной способности до 1,4 МГц. Согласно Rel. 14 устройства Non-BL/CE могут использовать полосы до 20 МГц для нисходящей линии связи и до 5 МГц для восходящей линии связи.

Как и в случае NB-IoT, в Rel. 14 для eMTC используется технология Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA). При передаче в направлении «вниз» (DL) мобильное устройство измеряет время доставки опорного сигнала Time of Arrival (ToA) и сообщает серверу поддержки разницы во времени для полученных сигналов.

В Rel. 13 позиционирование мобильного устройства поддерживается с использованием измерения и ширины полосы сигналов PRS (Positioning Reference Signals), равной 6 PRB. В стандарте Rel. 14 модернизированная функция OTDOA позволяет существенно улучшить параметры позиционирования для промышленных приложений FeMTC (Further enhanced Machine — Type Communications).

Улучшение характеристик позиционирования OTDOA для FeMTC Rel. 14 достигается за счет модернизированной функции конфигурирования опорных сигналов позиционирования (Multiple PRS Configurations — MPRSC), которая позволяет использовать различные варианты в зависимости от частоты и полосы PRS.

Кроме того, применение скачкообразной перестройки частоты PRS и модернизированный алгоритм обработки разницы времен доставки опорных сигналов (Reference Signal Time Difference — RSTD) позволяют существенно повысить точность позиционирования.

В стандарте Rel. 13 одно мобильное устройство eMTC UE может быть сконфигурировано для одной трансляционной станции опорных сигналов. При этом одному набору параметров, определяющему опорные сигналы, соответствует только одна полоса PRS. В общем случае полоса PRS трансляционной станции совпадает с полосой конкретной LTE-сети. Однако в таком варианте для некоторых промышленных OTDOA систем FeMTC точность позиционирования может быть недостаточной из-за ограничений, накладываемых пропускной способностью LTE 1,4 МГц. Для таких приложений используется уплотненная конфигурация PRS и более узкая полоса пропускания PRS. При этом снижение частоты сигналов PRS для увеличенной полосы пропускания позволяет задействовать высвобождающиеся ресурсы для улучшения качества приема и обработки сигналов и повышения точности позиционирования.

В стандарте Rel. 14 допускаются различные возможные варианты конфигурации PRS для одной трансляционной станции.

В стандарте LTE Rel. 13 периодичность сигналов PRS задается с интервалами: 160; 320; 640 и 1280 мс. Поэтому один пакет сигналов PRS может иметь 1; 2; 4 или 6 подкадров PRS.

В документах Rel. 14 прописана конфигурация уплотнения сигналов PRS (Dense PRS Configuration — DPRSC), разработанная специально для приложений FeMTC.

Для этой цели вводится возможность передачи только сигналов PRS. Кроме прописанной в Rel. 13 цикличности посылки сигналов PRS с периодами 160; 320; 640; 1280 мс, в Rel. 14 добавлены периоды в интервале 1–159 мс. Соответственно возникают новые подкадры в диапазоне 1–160, которые не будут привязаны к основным периодам PRS.

В качестве другой новой опции, разработанной в рамках Rel. 14 для приложений FeMTC, можно отметить программируемую скачкообразную перестройку частоты (PRS Frequency Hopping — PRSFH). Перестраиваемая во время передачи сигналов PRS частота может оказаться в двух или четырех частотных диапазонах. Первая посылка PRS будет на частоте, расположенной в центре полосы пропускания LTE-сети. Отдельные посылки могут быть объединены в частотные группы по 2; 4; 8; 16; 32; 64 или 128 PRS-событий.

Структура PRS-посылки показана на рис. 7.

В стандарте eMTC так же, как и в стандарте NB-IoT, используется процедура подавления сигнала более сильной ячейки, работающей на одной частоте с ячейкой со слабым сигналом (PRS muting LTE OTDOA).

В документах Rel. 14 битовая маска для PRS muting расширена до 2; 4; 16; 32; 64; 128; 256; 512; 1024 бит (в Rel. 13 — 2; 4; 8; 16 бит).

По сравнению с традиционными одноканальными отчетами об измерении RSTD, определенными в Rel. 13, одно мобильное устройство FeMTC UE может отправлять параметры RSTD по разным каналам (рис. 8).

Помимо этого, в LTE Rel. 14 определен новый регламент отчета RSTD с высоким разрешением.

Одной из интересных и важных новых функций, введенных в Rel. 14, является расши-

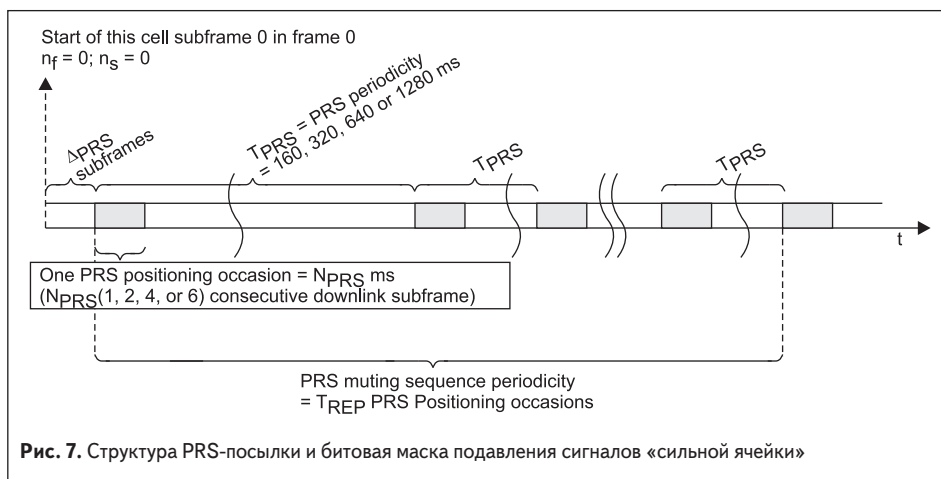


Рис. 7. Структура PRS-посылки и битовая маска подавления сигналов «сильной ячейки»

ренная поддержка многоадресной нисходящей линии связи (DL), разработанная специально для приложений IoT и использующая меньше сетевых ресурсов для таких операций, как массовые обновления прошивки, групповая доставка сообщений и т. д. Для того чтобы свести к минимуму изменения базовой спецификации, поддержка многоадресной рассылки для eMTC реализована с использованием функции LTE Single Cell Point-to-Multipoint (SC-PTM), которая использует два логических канала: Single Cell Multicast Control Channel (SC-MCCH) и Single Cell Multicast Transport Channel (SC-MTCH).

Логический канал SC-MCCH, содержащий информацию о конфигурации SC-PTM, также предназначен для передачи специальных сообщений Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS).

На физическом уровне логические каналы SC-MCCH и SC-MTCH реализуются через PDSCH, который, в свою очередь, поддерживается с помощью PDCCH. Немаловажным является тот факт, что эти каналы могут быть использованы для повторных сообщений тем мобильным устройствам, которые находятся в слабой зоне охвата базовой станции.

Кроме перечисленных выше функций и опций, также можно отметить улучшение характеристик мобильных устройств в плане VoLTE, которые стали возможными за счет уменьшения времени задержки, снижения сложности связи с мобильным устройством при голосовом вызове и повышении эффективности использования спектра.

Заключение

Согласно прогнозам [16], в 2025 году в мире будет эксплуатироваться более 1 млрд устройств LPWA. При этом около половины из них будут приходиться на долю NB-IoT.

За последние годы существенно увеличилось количество абонентов сетей NB-IoT, а также количество фирм, выпускающих чипы и модули для этих сетей.

Среди последних разработок чипов можно отметить Sequans Communications, которая анонсировала свой новый чип LTE Cat NB1/NB2, удовлетворяющий требованиям 3GPP Release 13, 14. Чип, получивший название Monarch N, с очень высокой степенью интеграции, позволяет организовать законченный модуль с размерами всего 10×10 мм [17].

В 2018 году новая фирма из Британской Колумбии (Vancouver, British Columbia) Riot Micro выпустила свой первый чип для NB-IoT — RM1000, который, по словам разработчиков, в настоящее время является наиболее экономичным из предлагаемых на рынке изделий подобного класса [18].

Крупнейшая международная корпорация Qorvo (Nasdaq:QRVO), лидер в разработке и производстве радиочастотных чипов, в том числе для ISM, IEEE 802.15.4 и ZigBee, создала RF-чип, предназначенный для NB-IoT [19].

Крупнейший оператор мобильной связи концерн China Mobile в своем докладе на MWC-2018 сообщил, что в ближайшем будущем сети NB-IoT планируется организовать в 346 городах КНР. В этом грандиозном проекте предполага-

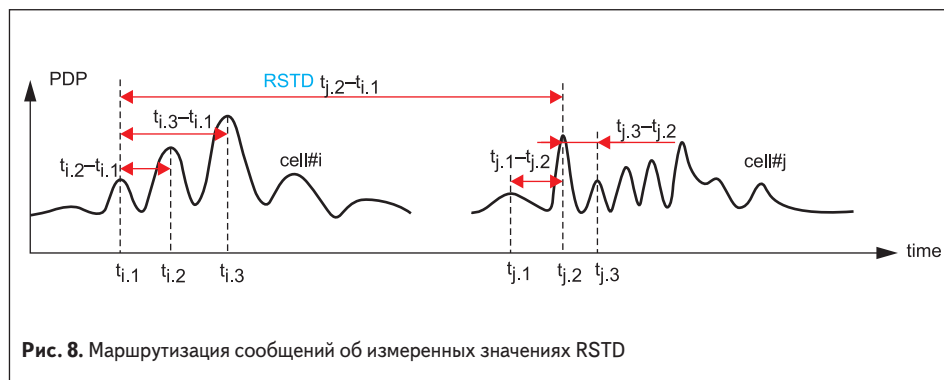


Рис. 8. Маршрутизация сообщений об измеренных значениях RSTD

ется применение оборудования, разработанного на базе чипов Huawei, Mediatek, Qualcomm, RDA, ZTE.

Один из ведущих китайских производителей микросхем, Goodix, объявил, что будет продавать чипы NB-IoT, используя изделия CommSolid GmbH. Образцы такой продукции были продемонстрированы на MWC в Барселоне.

В настоящее время более 30 фирм в различных регионах мира выпускают модули с поддержкой LPWA. Среди ведущих производителей модулей NB-IoT и LTE-M можно отметить, в частности, Huawei, Sierra Wireless, Gemalto, Multitech, Quectel, SimCom, Telit, u-blox, ZTE, LinkLabs. На уровне хорошо известных тяжеловесов, занимающих первые места на этом рынке в течение многих лет, следует назвать относительно молодую китайскую фирму Quectel Wireless Solutions, основанную в 2009 году. Фирма Quectel является одной из первых, кто вывел на мировой рынок модули NB-IoT. На сегодня компания выпустила свыше 1 млн модулей NB-IoT.

Успех Quectel на международном рынке в немалой степени обусловлен тем, что в своих разработках фирма использует новейшие модели чипов производства таких мировых лидеров, как Qualcomm, Intel, MediaTek, RF Micro Devices, Inc.

В последние годы фирма стремительно продвигается на европейском и китайском рынках. В настоящее время региональные отделения Quectel существуют в Италии, Франции, Дании, России, Польше, Израиле, США, Лагунской Америке, Бразилии, Австралии, Сингапуре, Южной Корее, Индии [20].

В конце прошлого года Quectel Wireless Solutions сертифицировала и выпустила в коммерческую продажу на мировом рынке модуль BC95, который был разработан специально для «Интернета вещей» (IoT). Этот модуль, действующий по технологии NB-IoT (Cat NB1 LTE, Release 13 3GPP), с успехом используется в Китае в системах беспроводного контроля расхода электричества, воды, газа. Так, NB-IoT-сети применяются уже больше года в городе Фучжоу для систем беспроводного контроля расхода воды. Кроме того, на базе модуля Quectel BC95 разработан один из вариантов оборудования для сети NB-IoT, предусмотренной в системе учета и контроля ресурсов ЖКХ в наукограде Иннополис, расположенном в 35 км от Казани. В настоящее время Quectel постоянно развивает линейку модулей NB-IoT. В качестве примера

можно привести новые модели BC95-G, BC66, BC68, BG96.

Более подробно модули с поддержкой NB-IoT производства Quectel будут рассмотрены во второй части статьи.

Дополнительную информацию о NB-IoT-продукции фирмы Quectel можно найти на сайте официального дистрибьютора Quectel в России фирмы «КАПРОН» [21]. ■

Литература

1. www.3gpp.org/DynaReport/36300-CRs.htm
2. www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1332811
3. www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/CLP.28v1.0.pdf
4. www.etsi.org/deliver/etsi_ts/145000_145099/145001/13.04.00_60/ts_145001v130400p.pdf
5. www.ericsson.com/research-blog/robust-scrambling-nb-iot-broadcast-channels/
6. www.youtube.com/watch?v=ndgZuUtmkIU
7. www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.888/36888-c00.zip
8. www.ieeexplore.ieee.org/document/8120239/
9. www.qualcomm.com/media/documents/files/otdoa-positioning-in-3gpp-lte.pdf
10. www.rohde-schwarz.com/us/news-press/press-room/press-releases-detailpages/rohde-schwarz-and-commsolid-present-world-s-first-test-solution-for-3gpp-release-14-location-services-for-nb-iot-press-releases-detailpage_229356-533952.html
11. www.niviuk.free.fr/ue_category.php
12. www.ericsson.com/research-blog/robust-scrambling-nb-iot-broadcast-channels/
13. www.resources.alcatel-lucent.com/asset/200178
14. www.portal.3gpp.org/ngppapp/CreateTdoc.aspx?mode=view&contributionId=901950#
15. www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63v9_00/2_T63/ARIB-STD-T63/Rel8/36/A36306-870.pdf
16. www.iotbusinessnews.com/2018/03/14/20954-nb-iot-ignites-the-race-to-a-billion-lpwa-connected-devices-by-2025/
17. www.sequans.com/press-release/sequans-introduces-new-nb-iot-platform-monarch-n/
18. www.riotmicro.com/news/introducing-the-rm1000/
19. www.qorvo.com/newsroom/news/2017/simcom-selects-qorvo-rf-solution-for-lte-nb-iot-module
20. www.quectel.com/
21. www.satronel.ru/ru/product/Satron/BC95