

Технология широкополосного радиодоступа LTE-M1 для приложений IoT. Часть 2.



ribakov_dmitry, 2 июня 2018г.

Тема работы:

Технология широкополосного радиодоступа LTE-M1 для приложений IoT

Часть 2.

Выполнил магистрант группы 719м

Рыбаков Д.А.

Список аббревиатур и условных сокращение

3GPP (Generation Partnership Project) — консорциум, разрабатывающий спецификации для мобильной телефонии.

DCI – (Downlink Control Information) – форматы контрольной информации по нисходящему каналу связи.

eNB – базовая станция.

LTE-BL/CE или LTE-M1 или eMTC- технология систем связи широкополосного радиодоступа 4 – ого поколения, базовая рабочая версия которого была представлена в Rel.13.

M2M – «машинный вид связи».

PRB (Physical Resource Blok) – физический ресурсный блок

UE – мобильные устройства.

1. LTE-BL / CE (LTE-M1) – Обнаружение передатчика LTE-M1 базовой станцией

Планирование LTE-M1 становится сложнее, чем в унаследованном LTE, поскольку eNB должен принимать во внимание повторяющуюся передачу, полудуплекс и т.д. Планирование частотной области так же является сложным процессом. Как только мы установили Narrowband индекс в начале соединения, все сообщения будут использовать тот же Narrowband индекс во всей передаче и приеме. В некотором смысле это выглядит сложнее, чем распределение ресурсов во временной области.

Рассмотрим основные этапы установления соединения, представленные на рисунке 1.

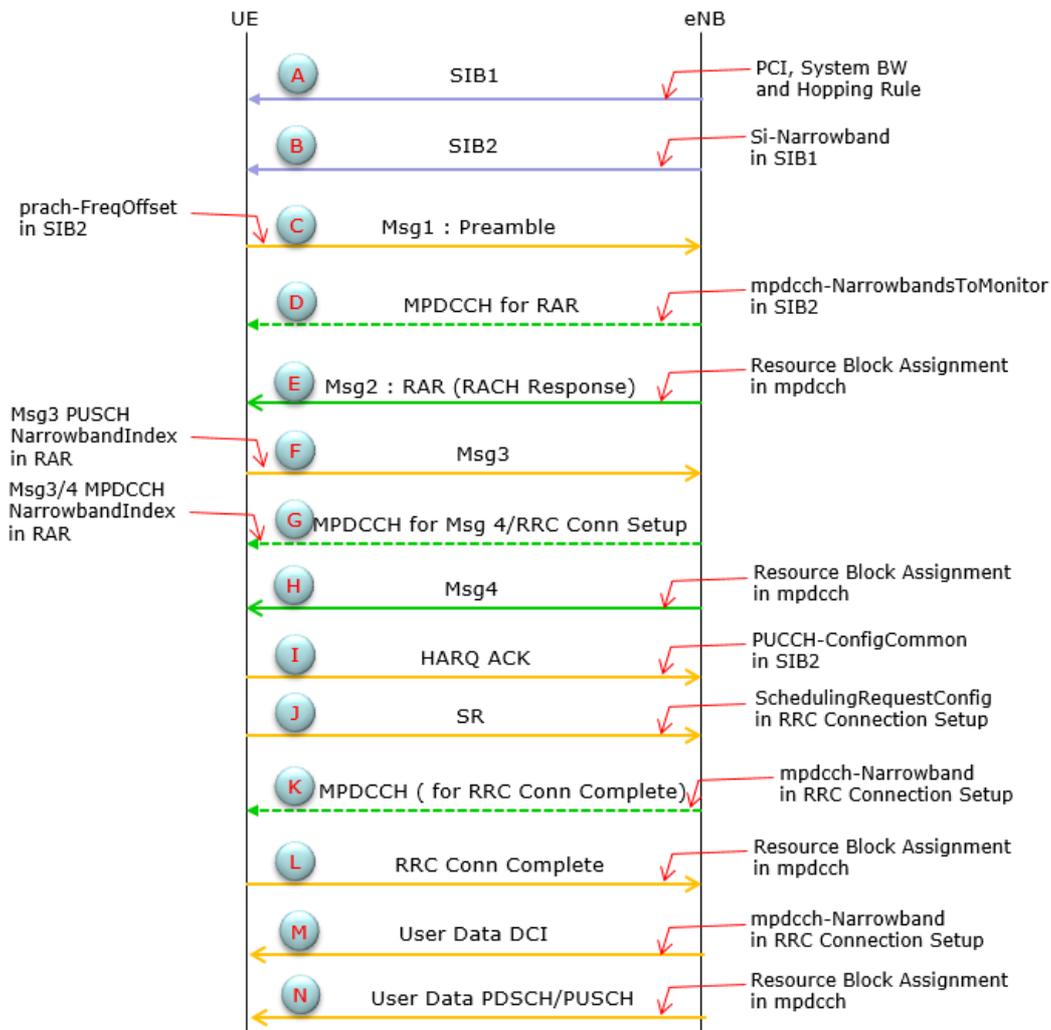


Рисунок 1 – Установление соединения eNB с UE

Рассмотрим основное назначение каждого из состояний установления соединения:

A- приём основных параметров для взаимодействия физического уровня;

B- приём параметры, необходимые для базовых конфигураций RACH, передаются по SIB2;

C- расшифровка SIB2, перестройка параметров, расчёт мощности и отправка преамбулы;

D- приём и декодирование MPDCCH с DCI, который требуется для декодирования сообщения RAR;

E- ответ на преамбулу PRACH (БС получила преамбулу PRACH с этим идентификатором (RAPID)), получение информация о распределении ресурсов для Msg3;

F- UE отправляет Msg3 (Запрос на соединение RRC). Прежде чем UE отправит это сообщение, и Network пытается получить это сообщение, они оба должны знать следующую информацию: В какой узкой полосе будет передаваться сообщение, будет ли оно передаваться в повторении, сколько раз, какой MCS и TBS используется для этого сообщения (эти данные расшифровываются из RAR);

G- UE запускает мониторинг (пытается обнаружить) MPDCCH, который необходим для приема Msg4 PDSCH (то есть PDSCH, несущий Msg4). Чтобы UE правильно декодировал этот канал, он должен знать следующие параметры:

какая узкополосная связь используется для переноса MPDCCH, из какого символа OFDMA назначается MPDCCH, сколько пар PRB используется для переноса этого MPDCCH;

H- Когда UE декодирует MPDCCH для декодирования Msg4, он декодирует Msg4 (MAC CE для разрешения конфликтов) и завершает процесс RACH, если нет проблемы с CR. Обычно это сообщение настройки соединения CR и RRC передается в одном PDU MAC;

I- запрос на повторную передачу;

J- передача идентификатора случайного доступа, временный идентификатор используется в рамках процедуры разрешения коллизий при множественном доступе, когда постоянный еще не доступен. После отправки начального сообщения третьего уровня (RRC Connection Request), мобильная станция использует этот идентификатор, чтобы обнаружить ответ. Значение временного идентификатора передается в ответном сообщении на преамбулу случайного доступа (Random Access Response). После того, как разрешение коллизии и процедура множественного доступа удачно завершены, временный становится постоянным идентификатором.

K- приём сигнальной информации по каналу MPDCCH, что означает факт успешного установления соединения;

L- отправка «вверх» сообщения о том, что процедура установления соединения прошла успешно;

M- при приеме DCI (Downlink Control Information) мобильная станция проверяет прикрепленные CRC биты. И если эти биты закремблированы с помощью P-CRNTI, то этот DCI предназначен для данной мобильной станции и содержит информацию о том, где ей в канале PDSCH передаются данные;

N- приём информации "вниз" с разделением пользователей о PCH, DL-SCH, UL-SCH и HARQ информации, относящейся к каналу DL-SCH.

Далее рассмотрим более подробно основные процессы установления соединения.

2. LTE-BL/CE (LTE-M1) - RACH Process

В технологии LTE-BL/CE процедуру установления соединения UE начинают с процесса RACH, чтобы получить первоначальный доступ к сети.

Основная цель процесса RACH - добиться синхронизации восходящей линии связи и получить грант для первоначального присоединения

Общая последовательность протоколов процесса состоит из четырех сообщений, то есть Msg 1, Msg2, Msg3 и Msg 4 (рисунок 2).

Основная информация о процедуре RACH сообщается UE через SIB2.

Преамбула RACH (Msg1) и MPDCCH для RAR (Msg2) могут передаваться в повторении. Эти шаблоны повторения различаются в зависимости от уровня CE

Процесс RACH для устройства LTE-M1 модифицируется из старого LTE-процесса следующим образом.

Доступный набор ресурсов PRACH связан с каждым улучшенным уровнем покрытия

Преамбулы, которые содержатся в группах преамбулы произвольного доступа для каждого расширенного уровня охвата, вычисляются по параметрам в сообщении SIB2. Физический уровень передать преамбулу с количеством повторений, необходимых для передачи преамбулы, соответствующей выбранной группе преамбул (т. е. параметр из SIB2) с использованием выбранного PRACH, соответствующего выбранному расширенному уровню покрытия, соответствующему RA-RNTI, индексу преамбулы или для индекса поднесущей NB-IoT и PREAMBLE_RECEIVED_TARGET_POWER.

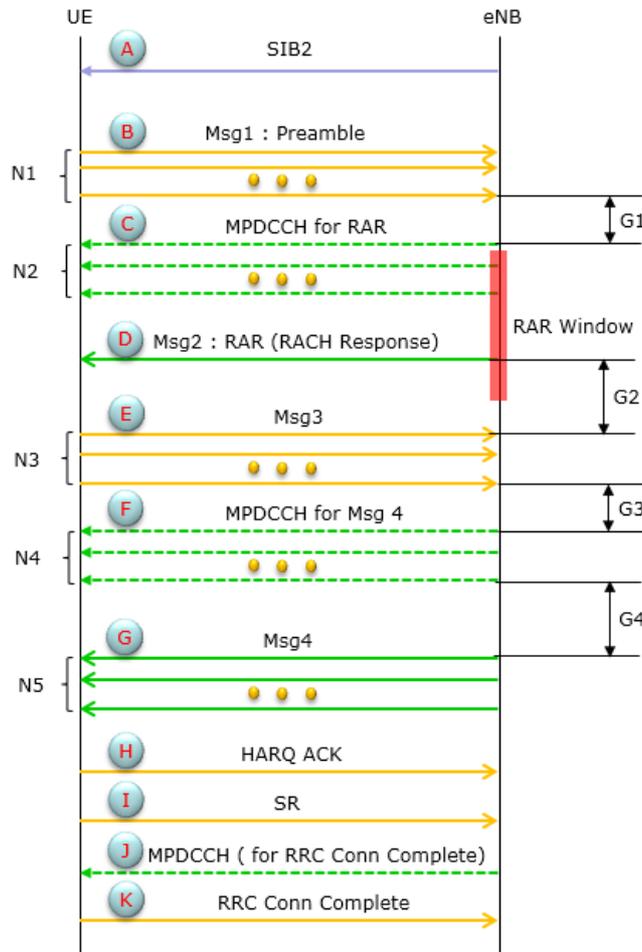


Рисунок 2 – Обмен сообщений между UE и eNB
в процессе установления соединения

Системная информация организована с помощью системных информационных блоков (System Information Block, **SIB**), каждый из которых содержит набор функциональных параметров. Определены следующие типы SIB:

Блок главной информации (Master Information Block, MIB). Данный блок содержит ограниченное количество наиболее часто передаваемых параметров, знание которых необходимо для начального доступа к сети (например, полоса рабочих частот, номер кадра и т.д.).

Блок системной информации 1-го типа (System Information Block Type 1, SIB1). Данный блок содержит параметры, необходимые для процедуры выбора ячейки (cell selection), а также информацию о времени передачи остальных SIB.

Блок системной информации 2-го типа (System Information Block Type 2, SIB2). Этот блок включает в себя информацию об общих и разделяемых каналах.

Ниже приведена полная последовательность протоколов процесса RACH MTC (BL / CE) для начального доступа (начальная регистрация). Этот процесс очень похож на процесс RACH в Legacy LTE. Единственная выдающаяся разница заключается в том, что в процессе MTC RACH больше стрелок, чем в традиционном LTE. Кратные стрелки на каждом шаге указывают на повторную передачу. Максимальное количество таких «стрелок» можно свести в таблицу 1.

Таблица 1 - Максимальное возможное число повторений передачи в технологии LTE-M1

Канал LTE-M1	MODE A, число повторений передачи	MODE B, число повторений передачи
PSS/SSS	1	1
PBCH	1	5
MPDCCH	16	256

PDSCH	32	2048
PUSCH	32	2048
PUCCH	8	32
PRACH	32	128

В процессе установления соединения участники радиосети «отвечают» на следующие вопросы:

- 1) Требуется ли для этого этапа повторная передача?
- 2) Если для этого требуется повторение, сколько раз он должен повторять?
- 3) Как UE / eNB может определить, следует ли повторять это или нет и сколько раз?
- 4) Через какой узкополосный (узкополосный указатель) это сообщение должно быть передано?
- 5) Как UE / eNB может определить, какой узкополосный доступ следует использовать?
- 6) Должно ли это сообщение передаваться с фиксированной частотой? или в частоте прыжков?
- 7) Как UE / eNB может определить, следует ли передавать его на фиксированной частоте? или в частоте прыжков?
- 8) Каким должен быть промежуток времени между каждым шагом?

Шаг (A): SIB2

Параметры, необходимые для базовых конфигураций для RACH, передаются по SIB2. При этом необходимо убедиться, что сообщение заполнено действительными (состоящими из нескольких параметров) параметрами PRACH SIB2 и UE (DUT) и успешно декодировалось SIB2 и параметры в SIB2 корректны. Даже когда UE успешно декодирует SIB2, существует некоторая возможность, когда UE не воспримет некоторые параметры. В этом случае UE не будет отправлять преамбулу PRACH.

Шаг (B): Передача Msg1 (Преамбула)

Прежде чем UE отправит Msg1 (преамбулу RACH), он должен определить, какой ресурс RACH (время, частота и идентификатор преамбулы). Большая часть информации о ресурсах уведомляется UE через SIB2, и часть информации (например, уровень CE) определяется UE на основе измерения мощности ячейки (RSRP). Следующим является список информации, которую UE определяет из сообщения сигнализации более высокого уровня (SIB2).

Конфигурация PRACH сигнализируется на основе таблицы параметров из спецификации. Параметры сигнализации для конфигурации PRACH находятся в SIB2.

Указывается начальное положение частоты преамбулы (prach-FreqOffset). Единица местоположения частоты указана в блоке PRB.

PRACH может передаваться в режиме скачкообразной перестройки частоты, если настроены следующие параметры. Все они находятся в SIB2: PRACH-HoppingConfig и PRACH-HoppingOffset.

Есть много случаев, когда параметр сигнализации более высокого уровня (SIB2 в этом случае) напрямую не сопоставляется с конфигурацией нижнего уровня, и во многих случаях более высокая спецификация уровня и спецификация нижнего уровня используют другую терминологию.

Шаг (C): MPDCCH для ответа RACH

Некоторое время (3 подкадра) после того, как PRACH preamble транслируется, UE начинает пытаться декодировать MPDCCH с DCI, который требуется для декодирования сообщения RAR. Это означает, что когда eNB получил преамбулу RACH, eNB отправил MPDCCH, несущий DCI для PDSCH, несущего RAR. Что касается этого MPDCCH, решаются следующие вопросы:

В какой узкой полосе будет передаваться RAR?

Предоставляет ли MPDCCH для RAR повторение? или передается только один раз?

Сколько раз ?

Как настроено повторение?

Когда должен передаваться первый MPDCCH и как он настроен?

Узкополосная связь для RAR MPDCCH (то есть MPDCCH для декодирования PDSCH, несущего RAR) определяется параметром SIB2 `mpdcch-NarrowbandsToMonitor`.

Этот MPDCCH передается в повторении.

Количество повторений настраивается `mpdcch-NumRepetition-RA-r13` в SIB2.

Параметр SIB2 для этого MPDCCH прост. Он определяется `mpdcch-NumRepetition-RA-r13`, но этот единственный параметр связан с несколькими другими параметрами нижнего уровня, а с точки зрения спецификации 3GPP задействована довольно сложная процедура и скрытые таблицы.

Шаг (D): ответ RACH (RAR)

Как и в устаревшем LTE, RAR несет две критические данные следующим образом:

- Ответ на преамбулу PRACH (он говорит: «Да, я получил преамбулу PRACH с этим идентификатором (RAPID)»)
- Информация о распределении ресурсов для Msg3.

Вторая часть (то есть информация о распределении ресурсов для Msg3) состоит из следующей информации, представленной на рисунке 3. Как вы видите, в зависимости от режима SE структура битового поля меняется.

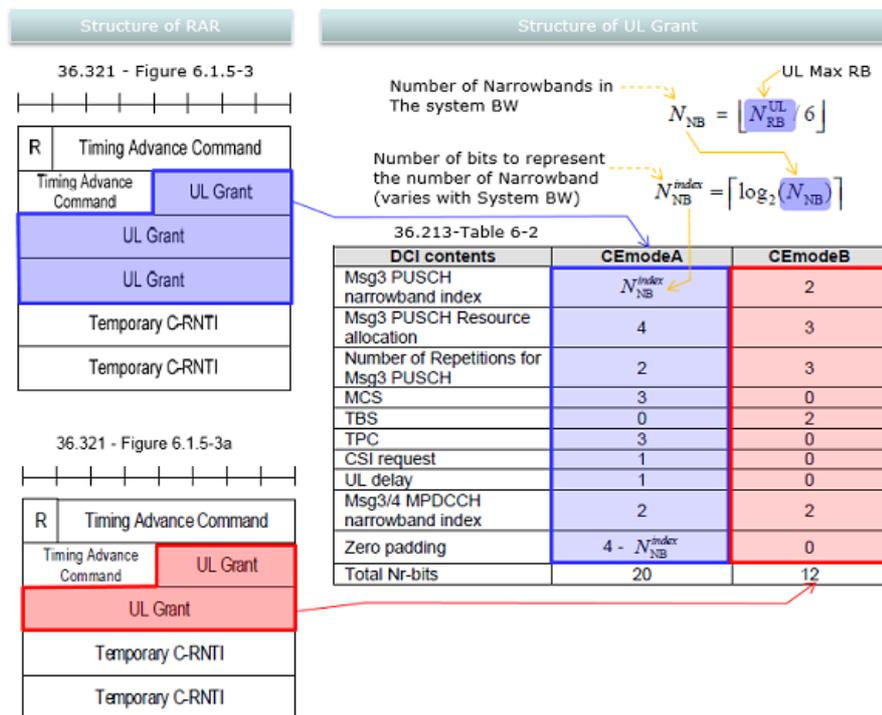


Рисунок 3 – Структура информации в сообщении Msg3

Шаг (E): Msg 3

Как только UE завершит Шаг (D), то есть декодирует содержимое RAR, UE отправит Msg3 (Запрос на соединение RRC). Прежде чем UE отправит это сообщение, и Network пытается получить это сообщение, они оба должны знать следующую информацию.

В какой узкой полосе будет передаваться сообщение?

Будет ли оно передаваться в повторении? Сколько раз ?

Какой MCS, TBS используется для этого сообщения?

Ответ прост в следующем.

Ответы на все перечисленные выше вопросы заключаются в содержании RAR.

Шаг (F): MDPDCCH для Msg 4

Как только UE передает Msg3 (запрос соединения RRC), UE запускает мониторинг (пытается обнаружить) MPDCCH, который необходим для приема Msg4 PDSCH (то есть PDSCH, несущий Msg4). Чтобы UE правильно декодировал этот канал, он должен знать следующие параметры.

Какая узкополосная связь используется для переноса MPDCCH?

Из какого символа OFDMA назначается MPDCCH (asseded)?

Сколько пар PRB используется для переноса этого MPDCCH?

Ответ на эти вопросы исходит из RAR и SIB2 следующим образом.

Какая узкополосная связь используется для переноса MPDCCH? ==> Это происходит из узкополосного индекса Msg3 / 4 MPDCCH в RAR

Из какого символа OFDMA назначается MPDCCH (asseded)? ==> Это происходит от prach-ConfigCommon-v1310.mpdccch-startSF-CSS-RA-r13.fdd-r13 в SIB2

Сколько пар PRB используется для переноса этого MPDCCH?

Шаг (G): Msg 4

Когда UE декодирует MPDCCH для декодирования Msg4, он декодирует Msg4 (MAC CE для разрешения конфликтов) и завершает процесс RACH, если нет проблемы с CR. Обычно это сообщение настройки соединения CR и RRC передается в одном PDU MAC.

3. LTE-BL/CE (LTE-M1) - HARQ

Механизм HARQ для нисходящей линии LTE M1 похож на старый механизм LTE (за исключением повторяющейся передачи), но немного отличается от старого LTE, как описано ниже.

Операция HARQ для нисходящей линии связи

Процесс HARQ для нисходящей линии похож на традиционный LTE, за исключением того, что каждая передача будет повторяться в LTE-M1. Грубая последовательность HARQ будет следующей.

i) UE <- NW: MPDCCH (DCI для PDCCH) в повторении

ii) UE <- NW: PDSCH в повторении

iii) UE -> NW: HARQ ACK / NACK

Примечание: Шаг i) и ii) происходит не в том же подкадре. (Это отличается от старого LTE).

Как раскрыто в спецификации 3GPP для LTE-M1, для NB-IoT UE или BL UE или UE в расширенном покрытии параметр DL_REPETITION_NUMBER обеспечивает количество повторений, передаваемых в комплекте. Для каждого пакета DL_REPETITION_NUMBER устанавливается значение, предоставляемое нижними уровнями. Внутри пакета после первичной (повторной) передачи следуют повторные передачи DL_REPETITION_NUMBER-1 HARQ. Обратная связь HARQ передается для пакета, и после последнего повторения пучка принимается назначение нисходящей линии связи, соответствующее новой передаче, или повторная передача пакета. Повторная передача пучка также является комплектом.

Операция HARQ для Uplink

Процесс HARQ для нисходящей линии связи M1 аналогичен предыдущему LTE, за исключением того, что каждая передача будет повторяться (рисунок 4). Однако процесс HARQ для Uplink в M1 отличается от старого LTE. Самое важное отличие заключается в том, что eNB не отправляет HARQ ACK / NACK для PUSCH (это понятно, потому что в LTE M1 нет PHICH).

Затем вы можете спросить, как eNB может обрабатывать случай, когда прием PUSCH терпит неудачу? Грубая последовательность вопросов, которую решает HARQ будет следующей.

- i) UE <- NW: MPDCCH (DCI для PUSCH) с грантом UL в повторении
- ii) UE -> NW: PUSCH в повторении
- iii) происходит одно из следующих случаев:

случай 1: NW успешно декодирован PUSCH, он останавливается и завершает процесс приема PUSCH (нет передачи ACK).

case 2: NW не удалось декодировать PUSCH. он отправляет MPDCCH (DCI для PUSCH) для повторной передачи PUSCH

Если UE не получает MPDCCH для повторной передачи PUSCH, UE предполагает, что PUSCH правильно принят NW. PHICH (физический канал для передачи HARQ ACK/NACK в ответ при передаче информации "вверх") не существует для отправки ACK / NACK для PUSCH в LTE M1.

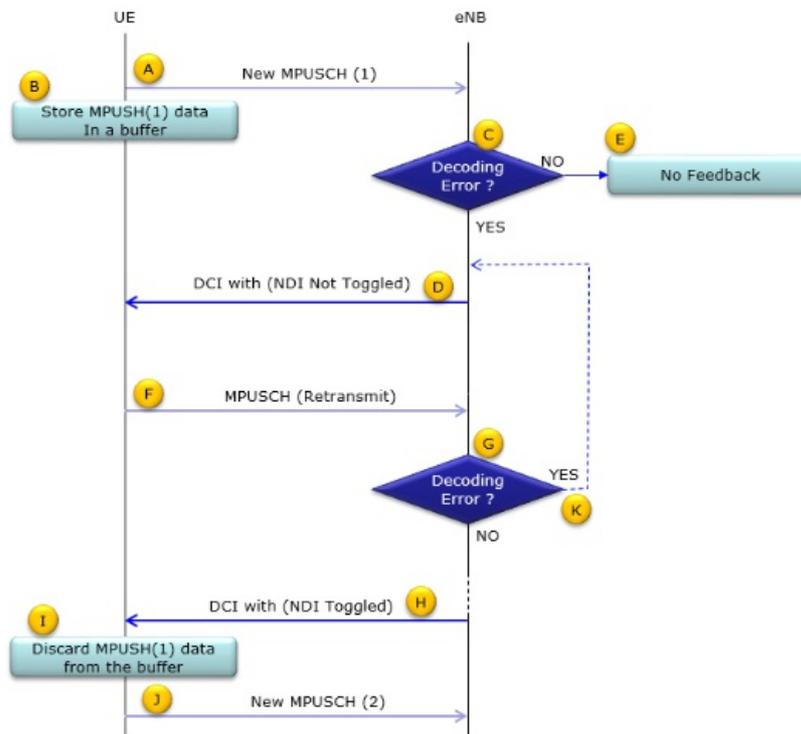


Рисунок 4 – Процедура HARQ в сетях LTE-M1

Операция HARQ Uplink является асинхронной для NB-IoT UE, BL UE или UE в расширенном покрытии, за исключением повторений внутри пакета.

Операция объединения основывается на объекте HARQ для вызова одного и того же процесса HARQ для каждой передачи, которая является частью одного и того же пакета. Внутри пакета ретрансляции HARQ неадаптивны и запускаются без ожидания обратной связи от предыдущих передач в соответствии с UL_REPETITION_NUMBER. Грант восходящей линии связи, соответствующий новой передаче или повторной передаче пакета, принимается только после последнего повторения пакета. Повторная передача пучка также является комплектом.

Для работы режима B одна и та же версия избыточности используется несколько раз перед циклическим переключением на следующую версию избыточности.

Таймер HARQ RTT соответствует $7 + N$, где N - используемый коэффициент повторения PUSCH, где подсчитываются только действительные (настроенные) подкадры UL, сконфигурированные верхними уровнями. В случае TDD таймер HARQ RTT соответствует $3 + k + N$, где k - интервал между последним повторением передачи по нисходящей линии связи и первым повторением передачи связанной обратной связи HARQ, а N является используемым коэффициентом повторения PUSCH, где только действительные подкадры UL подсчитываются.

Определение RV: PDSCH для SystemInformationBlockType1-BR

SystemInformationBlockType1-BR повторно передается, и в каждой повторной передаче используется другая RV (версия избыточности). RV для каждой повторной передачи варьируется в зависимости от параметра повторной передачи SystemInformationBlockType1-BR, как описано ниже:

$RV = \text{потолок}(3/2 * k) \bmod 4$ // k определяется в зависимости от количества повторений

Случай 1: количество повторений для PDSCH, несущих SystemInformationBlockType1-BR, равно 4

$k = \text{пол}(\text{SFN} / 2) \bmod 4$

Случай 2: количество повторений для PDSCH, несущих SystemInformationBlockType1-BR, равно 8

$k = \text{SFN} \bmod 4$

Случай 3: количество повторений для PDSCH, несущих SystemInformationBlockType1-BR, равно 16

$k = (\text{SFN} * 10 + i) \bmod 4$, где i = номер подкадра в SFN

Заключение

Уже в ближайшем будущем все устройства, которые позволяют извлекать выгоду из использования интернета, будут подключены через различные сети доступа и каждый человек, каждая отрасль получат возможность полностью реализовать потенциал такой взаимосвязи устройств и «вещей». По прогнозам, к 2021 г. в мире будет насчитываться около 28 млрд подключенных устройств, из них более 15 млрд – это устройства «машина-машина» (Machine-to-Machine, M2M) и устройства интернета вещей (Internet of Things, IoT). Большая доля IoT/M2M-приложений ориентирована на доступ в интернет посредством технологий малого радиуса действия, таких, например, как Wi-Fi и Bluetooth, в то время как значительная их часть – на глобальные сети, к которым относятся сети мобильной сотовой связи. Одним из новых вызовов для мобильных операторов может стать потребность в массовом внедрении и соединении в сети устройств, относящихся к классу IoT и M2M, с плотностью размещения от 300 тыс. устройств в соте и до 1 млн устройств на 1 кв.км. Чтобы реализовать эту задачу, предлагается развивать технологические возможности сетей LTE Advanced с узкополосной передачей данных для интернета вещей (NarrowBand Internet of Things, NB-IoT) – как конкурентные технологии по отношению к технологиям LoRa и LPWAN. Рабочие группы Партнерского проекта 3GPP в 2015 г. завершили исследование по оптимизации технологии LTE, нацеленное на создание решений, сопоставимых по стоимости с M2M-устройствами GSM (2G) на основе стандартов LTE Advanced.

Основные отличительные черты исследуемой технологии можно представить в виде следующих выводов:

- более высокая по сравнению с технологией 2G (GSM) скорость передачи данных;
- улучшенная против 2G (GSM) средняя эффективность использования спектра для передачи трафика с низкой скоростью от устройств МТС;
- обеспечение такой же, как у 2G (GSM), площади покрытия для предоставления услуг;
- хорошая совместимость с частотными диапазонами существующих сетей LTE;
- работа на одних несущих частотах абонентского оборудования с низкой стоимостью для межмашинных коммуникаций и существующего абонентского оборудования LTE;
- повторное использование существующей архитектуры сети LTE;
- возможность оптимизации технологии для обоих режимов – FDD и TDD;
- использование существующего оборудования базовых станций (БС) LTE;
- поддержка ограниченной мобильности и низкого энергопотребления при низкой стоимости.

Как было показано Партнерский проект 3GPP стандартизирует следующие три отдельные технологии для частотных диапазонов с лицензированным использованием спектра: LTE-M, EC-GSM, Clean Slate Cellular IoT (или NB-IoT). Как было доказано в водной части работы, наиболее эффективным с точки зрения производительности является именно технология LTE Cat.M1 (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение технологий IoT 3GPP

Характеристики	LTE-M (1,4 МГц)	NB-IoT (200 кГц)	EC-GSM (200 кГц)
Улучшенное покрытие, в том числе внутри зданий	156 дБ MCL* (улучшение +15 дБ)	164 дБ MCL* (улучшение +20 дБ)	164 дБ MCL* (улучшение +20 дБ)
Радиус действия (прямая видимость), км	< 11	< 15	< 15
Емкость при массовом применении	> 52 тыс., абонентский терминал (AT)/сота/180 кГц		
Скорость передачи данных	< 1 Мбит/с	< 200 кбит/с	< 70 кбит/с
Срок автономной работы	> 10 лет		
Цена IoT модуля	5,0\$ (2016)/3,3\$ (2020)	4,0\$ (2016)/2-3\$ (2020)	5,5\$ (2016)/2,9\$ (2020)
Сценарий использования спектра	В полосе лицензируемых частот 3GPP (In-band)	Три сценария (In-band, Stand alone, Guard-band)	В полосе рефарминга лицензируемых частот 3GPP (Stand alone)
Необходимость обновления сети	Бюджет определена	Да (HW/SW)	Да (HW/SW)

* MCL – Minimal Coupling Loss (минимальные потери при затухании)

Технологии IoT LTE идут по пути уменьшения энергопотребления и, соответственно, уменьшения стоимости конечных продуктов. Существующие технологии LTE Cat 1 с пропускной способностью до 10 Мбит / с значительно менее сложна и менее энергоемкой, чем технологии Cat 3 или 4 со скоростью 100 Мбит / с и 150 Мбит / с. Но тенденции интернета вещей вынудили разработчиков выпустить ещё более новый стандарт с минимальным уровнем потребления.

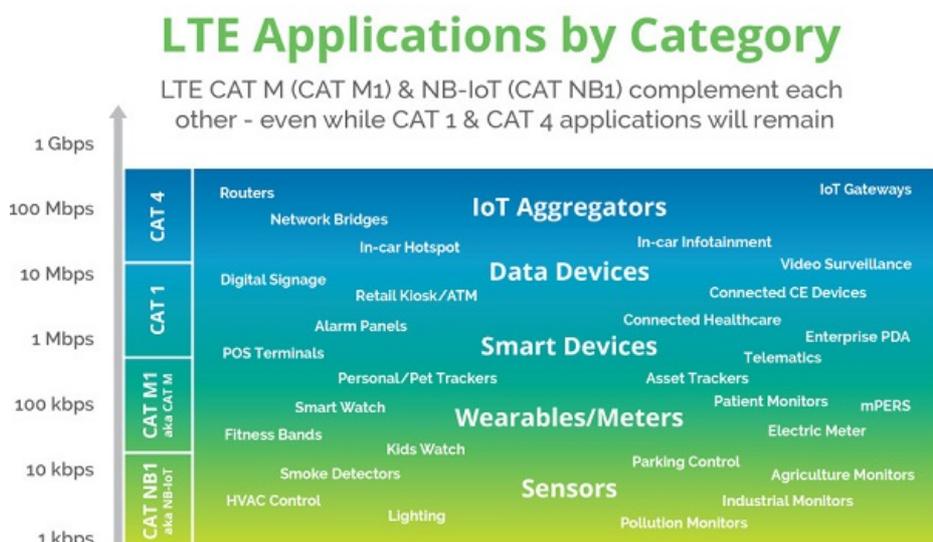


Рисунок 5 – Отличие применений технологий IoT

Предполагается, что именно технология Cat M1 и Cat NB1 займут основную долю рынка IoT для систем связи LTE. Когда технологии Cat M1 и NB1 будут полностью развернуты, LTE для IoT будет распространяться на многочисленные приложения с очень низкой пропускной способности и очень низким энергопотреблением. Например, промышленные датчики, устройства для отслеживания активности или носимые носители, которые периодически пробуждаются, чтобы обеспечить только очень небольшое количество данные, а затем снова заснуть. Основной фокус, выделяющий технологию LTE Cat.M1 и определяющий ее рыночную нишу – это высокая пропускная способность (до 1 Мбит/с в каждом направлении от абонента и к абоненту). Технология призвана обеспечить снижение стоимости конечного IoT устройства за счет отказа от функциональности LTE, которая востребована и широко применяется в сетях мобильного широкополосного доступа (МШПД), но становится избыточной при массовом подключении IoT устройств. eMTC имеет высокую степень готовности сетевой инфраструктуры и может быть развернута на существующих сетях LTE путем обновления ПО. Более того, сети МШПД и IoT могут сосуществовать и динамически перераспределять используемые ресурсы (частотный спектр, вычислительную мощность базовой станции и др.) в зависимости от типа и количества подключенных устройств и создаваемого ими трафика. Считается, что именно за версией LTE Cat M1 будущее развитие мира интернета вещей.

Список используемых источников

1. LTE Quick Reference [Электронный ресурс]. Режим доступа:http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_BL_CE.html#Fundamental_Features_LTE_M1, - свободный.
2. IoT: LTE-BL/CE(CAT-M1) [Электронный ресурс]. Режим доступа:<http://riverheltenotes.blogspot.com/2016/> , - свободный.
3. Организация каналов в LTE [Электронный ресурс]. Режим доступа:<http://anisimoff.org/lte/channels.html> , - свободный.
4. Обзор технологий Cellular Network [Электронный ресурс]. Режима доступа:<https://itechinfo.ru/content/%D0%BE%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B9-cellular-network#emtc> , - свободный.
5. Эволюция к NB-IoT и LTE-M [Электронный ресурс]. Режим доступа:<https://golos.io/ru--telekom/@abloud/evolyuciya-k-nb-iot-i-lte-m-avgust-2017> , - свободный.
6. Narrowband IoT [Электронный ресурс]. Режим доступа:https://en.wikipedia.org/wiki/Narrowband_IoT , -свободный.
7. LTE Cat-M1. [Электронный ресурс, видео вебинар]. Режим доступа:<https://www.youtube.com/watch?v=XsL0Q3Hf1Y> , -свободный.
8. Сетевые технологии Интернета вещей [Электронный ресурс]. Режим доступа:https://habr.com/company/ericsson_ru/blog/301494/ , -свободный.
9. Перспективы внедрения технологии узкополосной передачи данных NB-IoT в сетях [Электронный ресурс]. Режим доступа:<http://niitc.ru/upload/medialibrary/f6f/f6fc0533294b19bd88d5b5e8898c738a.pdf> , - свободный.

