

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ NB-IoT

А.Е. Рыжков¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
Адрес для переписки: arujkov@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.396.9

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Рыжков А.Е. Развитие технологии NB-IoT // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 94–101.

Аннотация: Рассмотрены характеристики физического уровня технологии NB-IoT на основе релизов 13–15 спецификаций стандарта LTE, включая сигналы синхронизации и преамбулу запроса на доступ к сети. Представлены форматы транспортных блоков, обсуждаются особенности передачи трафика вниз и вверх. Дана оценка пропускной способности каналов передачи трафика NB-IoT.

Ключевые слова: NB-IoT, физический уровень, передача трафика, транспортный блок, пропускная способность.

Введение

Технология узкополосного беспроводного интернета вещей (NB-IoT, от англ. Narrowband Internet of Things) введена в Rel.13, 14 спецификаций стандарта LTE (E-UTRA). В сравнении с ранее предложенной в LTE технологией интернета вещей LTE-M с полосой радиоканала 1,4 МГц полоса канала в NB-IoT составляет 180 (200) кГц, что соответствует полосе, занимаемой одним ресурсным блоком в широкополосных сетях LTE. Полоса в 200 кГц совпадает с полосой радиоканала стандарта GSM.

Появление этой технологии открывает новые возможности для реализации узкополосного беспроводного доступа в сетях IoT с выходом на всемирную пакетную сеть LTE. Первые обзоры по технологии NB-IoT появились в конце 2016 г. [1, 2]. С выходом новых версий спецификаций LTE возрастает число диапазонов для развертывания сетей NB-IoT, введена новая категория абонентского оборудования NB2, рассчитанная на передачу и прием пакетов увеличенного объема.

Хотя в основу физического уровня стандарта NB-IoT положены базовые принципы широкополосного стандарта LTE (технологии OFDM при передаче вниз и SC-FDMA при передаче вверх с сохранением многих параметров радиоинтерфейса), в NB-IoT изменены временные и спектральные характеристики. Особенно это относится к каналам передачи вверх, где наряду с «классической» сеткой поднесущих в 15 кГц используют сетку с расстоянием между поднесущими в 3,75 кГц. Принципиальные изменения произошли в механизме передачи транспортных блоков. Передача одного пакета вниз может растягиваться на не-

сколько субкадров, а в направлении вверх вообще введена новая характеристика канального ресурса – ресурсная единица (RE), временные характеристики которой зависят от числа выделенных абоненту поднесущих частот. Частичное использование канального ресурса при передаче вверх позволяет одновременно обслуживать в этом направлении несколько устройств.

Поэтому представляется важным рассмотреть определяющие функционирование сети NB-IoT характеристики физического уровня в динамике их развития. Следующей задачей является оценка пропускной способности каналов NB-IoT. При написании статьи были использованы материалы спецификаций LTE Rel.14, 15, опубликованные в декабре 2016 – ноябре 2017 гг.

Основные характеристики физического уровня технологии NB-IoT

Устройства NB-IoT работают в полосе 180 (200) кГц, что потребовало изменений на физическом уровне в сравнении с классическими сетями LTE с шириной полосы 1,4–20 МГц. Прежде всего, это относится к передаче синхронизирующих сигналов, каналу передачи системной информации, запросам на доступ к сети, поскольку эти сигналы и каналы в LTE занимают полосу в 1,4 МГц.

Возможны следующие варианты реализации сетей NB-IoT (рисунок 1):

- работа внутри выделенной оператору LTE рабочей полосы;
- работа внутри защитного интервала между выделенными полосами рабочих частот;

- одиночный режим работы в стандартном частотном канале 200 кГц;
- внутри диапазона частот сети GSM.

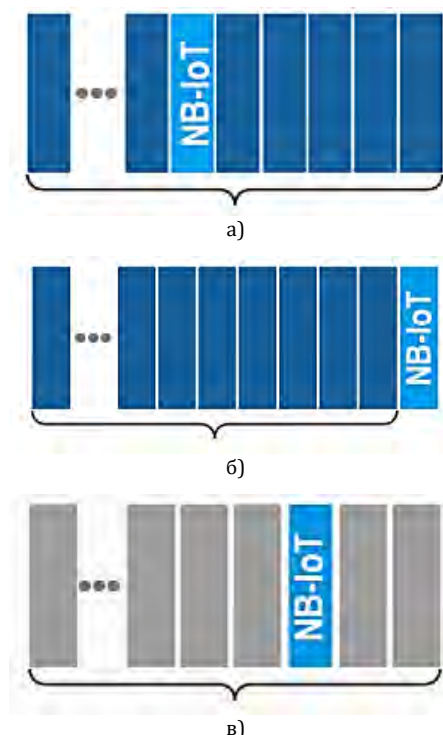


Рис. 1. Выделение каналов для NB-IoT (режим работы / несущие):
а) внутри полосы / LTE;
б) внутри защитного интервала / LTE;
в) одиночный / GSM

Предусмотрены 2 варианта передачи трафика в сетях NB-IoT (рисунок 2). В стандартном варианте сообщения трафика формируют в виде Интернет-дейтаграмм и его передают в пользовательской плоскости через шлюзы S-GW и PDN-GW. В другом варианте трафик следует как псевдо-сигнальные сообщения через MME и шлюз SCEF (Service Capability Exposure Function), специально введенный для обмена небольшой по объему информацией без «излишеств» формата Интернет-пакетов.

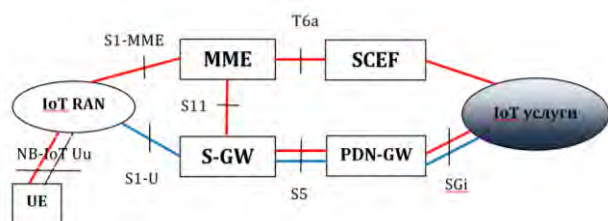


Рис. 2. Варианты передачи трафика в NB-IoT

Диапазоны частот для NB-IoT в соответствии с [3] приведены в таблице 1. Черным цветом в таблице 1 помечены диапазоны, специфицированные в Rel.13, синим – добавленные в Rel.14, и красным – в Rel.15.

Передача трафика идет в режиме полудуплекса. Терминал UE, находящийся в активном состоянии, либо принимает трафик, либо его передает.

При передаче вниз на физическом уровне NB-IoT определены каналы синхронизации NPSS: первичный и вторичный, а также каналы:

- передачи данных NPDSCH (от англ. Narrowband Physical Downlink Shared Channel);
- управления NPDCCH (от англ. Narrowband Physical Downlink Control Channel);
- передачи системной информации NPBCH (от англ. Narrowband Physical Broadcast Channel).

ТАБЛИЦА 1. Диапазоны частот для NB-IoT

Номер диапазона	Частоты передачи вверх (↑) UE → eNB (МГц)	Частоты передачи вниз (↓) eNB → UE (МГц)
	F _{↑мин} – F _{↑макс}	F _{↓мин} – F _{↓макс}
1	1920 – 1980	2110 – 2170
2	1850 – 1910	1930 – 1990
3	1710 – 1785	1805 – 1880
4	1710 – 1755	2110 – 2155
5	824 – 849	869 – 894
8	880 – 915	925 – 960
11	1427,9 – 1447,9	1475,9 – 1495,9
12	699 – 716	729 – 746
13	777 – 787	746 – 756
14	788 – 798	758 – 768
17	704 – 716	734 – 746
18	815 – 830	860 – 875
19	830 – 845	875 – 890
20	832 – 862	791 – 821
21	1447,9 – 1462,9	1495,9 – 1510,9
25	1850 – 1915	1930 – 1995
26	814 – 849	859 – 894
28	703 – 748	758 – 803
31	452,5 – 457,5	462,5 – 467,5
66	1710 – 1780	2110 – 2200
70	1695 – 1710	1995 – 2020
71	663 – 698	617 – 652
72	451 – 456	461 – 466
74	1427 – 1470	1475 – 1518

Структура кадра вниз LTE сохраняется. Кадр длительностью 10 мс состоит из 10 субкадров по 1 мс (два слота по 0,5 мс). Канальный ресурс выделяют на ресурсный блок (РБ), где в полосе 180 кГц передача идет на 12 поднесущих с разномом между частотами 15 кГц. Во временной области в каждом слоте передают 7 OFDM-символов (14 в субкадре) Распределение каналов показано на рисунке 3.

Каждый кадр начинается передачей канала NPBCH, который занимает нулевой субкадр. В каждом 5-м субкадре передают сигнал NPSS, а в последнем субкадре каждого четного кадра сигнал NSSS. В оставшихся свободных субкадрах размещают каналы NPDSCH или NPDCCH.

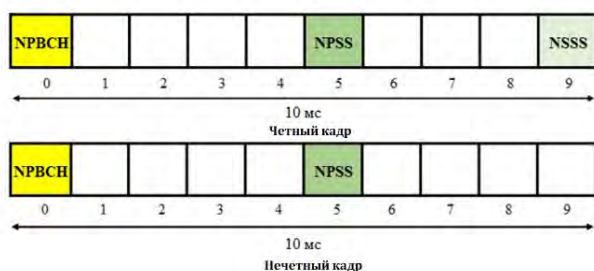
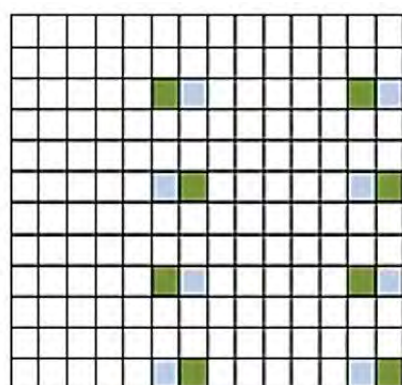


Рис. 3. Выделение канального ресурса для NB-IoT

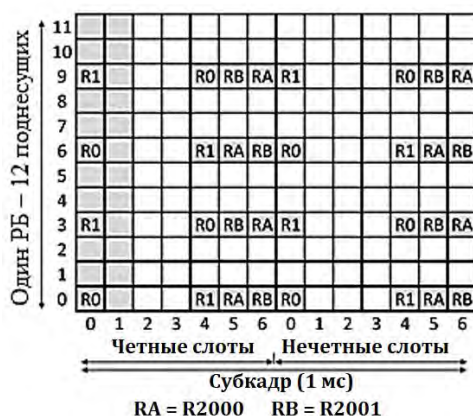
Базовая станция в сетях NB-IoT может работать с одной или двумя антеннами (антенные порты R2000 и R2001). Через эти порты передают специальные для NB-IoT опорные сигналы (рисунок 4а). Если канальный ресурс для NB-IoT выделен в полосе действующей сети LTE, то в РБ передают также опорные сигналы широкополосной сети R0, R1, а при размещении символов канала NPDSCH резервируют 1–3 OFDM-символа слева для передачи канала управления PDCCCH широкополосной сети (2 OFDM-символа на рисунке 4б).



Субкадр

■ R2000 ■ R2001

а)



б)

Рис. 4. Структуры РБ при передаче трафика вниз в NB-IoT

И первичный NPSS, и вторичный NSSS синхронизирующие сигналы построены на основе ZC-последовательностей. ZC-последовательности ши-

роко используют в стандарте LTE [4]. Исследование корреляционных свойств сигналов на основе ZC-последовательностей в широкополосном (классическом) варианте стандарта LTE произведено в [5, 6]; корреляционные характеристики сигналов NPSS и NSSS оценены в [7].

Позиционирование сигнала NPSS в субкадре показано на рисунке 5. Он занимает площадь, ограниченную OFDM-символами $l = 3-13$ и поднесущими $n = 0-10$, всего 121 ресурсный элемент. Три OFDM-символа слева остаются пустыми, что позволяет размещать в них канал PDCCCH при выделении канального ресурса для NB-IoT внутри рабочей полосы широкополосного канала LTE. Черным цветом на рисунке 5 показаны опорные сигналы широкополосной LTE. В этих ресурсных элементах символы сигнала NPSS «выкалывают».

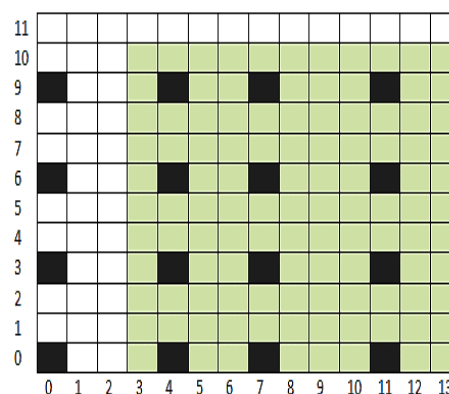


Рис. 5. Структура субкадра с каналом NPSS

Сигнал NSSS размещают аналогичным образом, разница в том, что он занимает поле с $l = 3-13$ и поднесущими $n = 0-11$ (132 ресурсных элемента).

Сигнал NPSS генерируют в виде ZC-последовательности длиной в 11 символов с корневым индексом $u = 5$:

$$d_l(n) = S(l) \cdot e^{-j\frac{\pi u n(n+1)}{11}}, \quad n = 0, 1, \dots, 10. \quad (1)$$

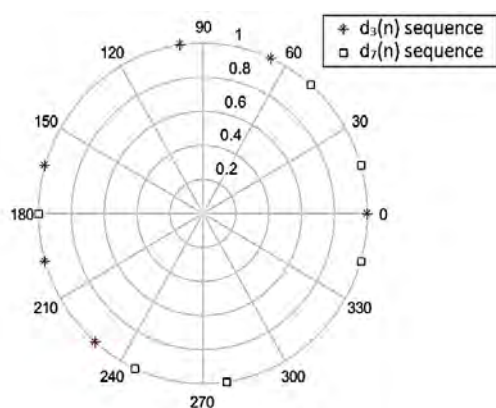
Эту последовательность повторяют 11 раз в OFDM-символах $l = 3-13$ с коэффициентами $S(l)$, приведенными в таблице 2 [8].

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты $S(l)$

l	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$S(l)$	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1

Расположение отсчетов сигналов $d_3(n)$ и $d_7(n)$ с коэффициентами $S(l)$ равными +1 и -1 показано на рисунке 6.

Прием сигнала NPSS позволяет UE определить границы кадра. В отличие от сигнала PSS в LTE сигнал NPSS не содержит информации об идентификаторе соты N_{ID}^{cell} . Эту информацию UE получает из сигнала NSSS.

Рис. 6. $d_3(n)$ -последовательности сигнала NPSS

В качестве сигнала NSSS используют ЗС-последовательность $d(n)$, формируемую по следующему закону:

$$d(n) = b_q(m) e^{-j2\pi\theta_f n} e^{-j\frac{\pi u'(n'+1)}{131}}, \quad (2)$$

где:

$$n = 0, 1, \dots, 131;$$

$$n' = n \bmod 131;$$

$$m = n \bmod 128;$$

$$u = N_{ID}^{cell} \bmod 126 + 3;$$

$$q = \left\lfloor \frac{N_{ID}^{cell}}{126} \right\rfloor.$$

Как и в широкополосных сетях LTE, в NB-IoT определены 504 идентификатора соты N_{ID}^{cell} . При этом, если соединения NB-IoT организованы внутри широкополосного канала LTE, то N_{ID}^{cell} обеих сетей могут совпадать, а могут и различаться.

В качестве коэффициентов $b_q(m)$ используют двоичные взаимноортогональные последовательности длиной в 128 бит, представленные в таблице 3 [8].

ТАБЛИЦА 3. Определение значений $b_q(m)$

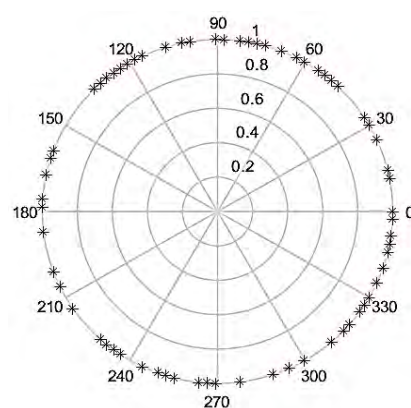
q	$b_q(0), \dots, b_q(127)$
0	[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ... 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]
1	[1 -1 -1 1 -1 1 1 -1 -1 1 ... 1 -1 -1 1 -1 1 1 -1]
2	[1 -1 -1 1 -1 1 1 -1 -1 1 ... -1 -1 1 1 -1 1 -1 1]
3	[1 -1 -1 1 -1 1 1 -1 -1 1 ... 1 -1 -1 1 -1 1 1 -1]

Циклический сдвиг θ_f определяется номером передаваемого кадра n_f по формуле:

$$\theta_f = \frac{33}{132} (n_f/2) \bmod 4.$$

Пример смоделированной последовательности $d(n)$ при $N_{ID}^{cell} = 0$ ($q = 0, u = 3$) приведен на рисунке 7.

Рассмотрим передачу данных по каналу NPDSCH. В [8, 9] специфицированы возможные варианты передач транспортных блоков вниз.

Рис. 7. $d(n)$ -последовательность сигнала NSSS

Максимальный размер транспортного блока определяется категорией мобильного терминала. К настоящему моменту специфицировано 2 категории терминалов для NB-IoT: NB1 и NB2. Их характеристики приведены в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4. Характеристики терминалов NB-IoT

Категория	NB1	NB2
Релиз	Rel.13	Rel.14
Максимальный размер транспортного блока вниз, бит	680	2536
Максимальный размер транспортного блока вверх, бит	1000	2536
Максимальный размер буфера на уровне L2, байт	4000	8000

При передаче вниз в канале NPDSCH используют модуляцию 4-ФМ. При этом в отличие от широкополосных сетей LTE, где транспортный блок размещают в одном субкадре, в NB-IoT его передача может растягиваться на несколько последовательных субкадров, от 1 до 10.

В таблице 5 представлены размеры транспортных блоков в битах при передаче вниз в зависимости от модуляционно-кодирующих схем I_{MCS} и числа занимаемых при передаче субкадров N_{SF} . В таблице 5 цветом выделены форматы транспортных блоков, реализуемые при использовании терминалов категории NB1.

Передача трафика вниз может идти как с подтверждением, так и без подтверждения принятых блоков. Для обеспечения необходимой надёжности возможна повторная передача информационных блоков. Предусмотрено 15 вариантов повторов передачи блока по каналу NPDSCH: 2, 4, 8, ... 2048 раз.

Более серьезные нововведения в NB-IoT относятся к организации физических каналов вверх. В полосе 180 кГц используют 2 варианта формирования ресурсной сетки поднесущих. В первом, как и в широкополосных сетях LTE, временной слот длительностью 0,5 мс содержит 12 поднесущих с разнесом по частоте $\Delta F = 15$ кГц и 7 ресурсных элементов (РЭ) на каждой поднесущей. Во втором варианте в полосе 180 кГц размещают 48 поднесущих с сеткой частот $\Delta F = 3,75$ кГц и с 7 РЭ ($l = 0 \dots 6$) на

одной поднесущей (рисунок 8). Длительность слота составляет 2 мс. В обоих вариантах при передаче вверх используют технологию SC-FDMA.

ТАБЛИЦА 5. Форматы передач трафика вниз

I _{MSC}	N _{SF}							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0	16	32	56	88	120	152	208	256
1	24	56	88	144	176	208	256	344
2	32	72	144	176	208	256	328	424
3	40	104	176	208	256	328	440	568
4	56	120	208	256	328	408	552	680
5	72	144	224	328	424	504	680	872
6	88	176	256	392	504	600	808	1032
7	104	224	328	472	584	680	968	1224
8	120	256	392	536	680	808	1096	1352
9	136	296	456	616	776	936	1256	1544
10	144	328	504	680	872	1032	1384	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1608	2024
12	208	440	680	904	1128	1352	1800	2280
13	224	488	744	1128	1256	1544	2024	2536

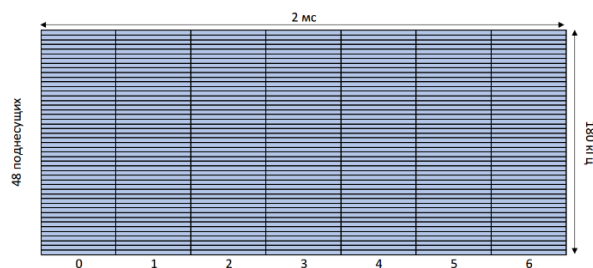


Рис. 8. Структура слота с 48 поднесущими

При передаче вверх на физическом уровне NB-IoT определены каналы:

- передачи данных NPUSCH (от англ. Narrowband Physical Uplink Shared Channel);
- доступа к сети NPRACH (от англ. Narrowband Physical Random Access Channel).

По каналу NPRACH UE посылает преамбулу запроса на доступ к сети. Трафик вверх передают по каналу NPUSCH. В отличие от передачи вниз при передаче вверх можно использовать часть поднесущих частот радиоканала. При этом специфицировано 2 формата передачи вверх: *формат 1* и *формат 2* (таблица 6). Формат 2 используют только для передачи управляющей информации. РЕ формируют на одной поднесущей длиной в 4 слота. При $\Delta F = 3,75$ кГц длительность РЕ составляет 8 мс, а в первых трёх РЕ каждого слота размещают опорные сигналы демодуляции ($l = 0, 1, 2$ на рисунке 8). При $\Delta F = 15$ кГц передача РЕ занимает 2 мс, под опорные сигналы демодуляции занимают 2, 3 и 4 РЕ каждого слота. В каналах NPUSCH в формате 2 применяют модуляцию 2-ФМ.

ТАБЛИЦА 6. Варианты формирования ресурсных единиц

Форматы передачи NPUSCH	Ширина поднесущей, кГц	Число поднесущих	Число слотов в РЕ	Длительность РЕ, мс
Формат 1	3,75	1	16	32
		1	16	8
		3	8	4
		6	4	2
		12	2	1
Формат 2	3,75	1	4	8
	15	1	4	2

При передаче в формате 1 в случае $\Delta F = 3,75$ кГц РЕ составляет одна поднесущая и 16 слотов со временем передачи 32 мс. Опорный сигнал демодуляции размещают в РЕ $l = 4$ на рисунке 8. При передаче используют модуляцию $(\pi/2)2$ -ФМ.

При работе с сеткой $\Delta F = 15$ кГц в таблице 6 специфицированы 4 варианта формирования РЕ. Фактически это означает, что при использовании последних трех вариантов передают одно и то же число символов, растягивая передачу во времени. При выборе РЕ с одной поднесущей число символов в РЕ снижается вдвое. Во всех вариантах РЕ расположение опорных сигналов демодуляции в слотах соответствует принятому в широкополосных сетях LTE ($l = 3$).

Модуляция при использовании РЕ из одной поднесущей может быть $(\pi/2)2$ -ФМ или $(\pi/4)4$ -ФМ. Во всех других вариантах при работе с $\Delta F = 15$ кГц модуляция 4-ФМ.

Модуляционно-кодирующие схемы при передаче вверх такие же, как и при передаче вниз, но максимальный объем транспортного блока увеличен до 1000 бит для станций NB1 и составляет 2536 бит для станций NB2 (таблица 7).

ТАБЛИЦА 7. Форматы передач трафика вверх

I _{MSC}	N _{RU}							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0	16	32	56	88	120	152	208	256
1	24	56	88	144	176	208	256	344
2	32	72	144	176	208	256	328	424
3	40	104	176	208	256	328	440	568
4	56	120	208	256	328	408	552	680
5	72	144	224	328	424	504	680	872
6	88	176	256	392	504	600	808	1000
7	104	224	328	472	584	712	1000	1224
8	120	256	392	536	680	808	1096	1384
9	136	296	456	616	776	936	1256	1544
10	144	328	504	680	872	1000	1384	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1608	2024
12	208	440	680	1000	1128	1352	1800	2280
13	224	488	744	1128	1256	1544	2024	2536

Передача одного транспортного блока может занимать от одного до 10 РЕ. Варианты транспортных блоков в таблице 7 для терминалов NB1 выделены цветом. Максимальная скорость передачи данных вверх соответствует максимальной скорости при передаче вниз. Для повышения надежности связи предусмотрена повторная передача блоков, где число повторов может составлять от 2 до 128.

Сравнивая таблицы 5 и 7, легко заметить, что они заполнены одинаковыми числами. Однако между этими таблицами существует принципиальная разница. Если в таблице 5 в строках время передачи транспортного блока вниз определяется в 1 мс субкадрах, то в таблице 7 в строках время указано в РЕ, длительность которых зависит от выделенного числа поднесущих вверх.

Для сетей NB-IoT разработана совершенно новая преамбула запроса на доступ к сети, передаваемая по каналу NRACH. Преамбула построена в виде конструкции, состоящей из 4 *символьных групп*, формируемых на разных поднесущих в сетке из 48 поднесущих. При этом 48 частот разбиты на 4 подгруппы с номерами поднесущих {0–11}, {12–23}, {24–35} и {36–47} соответственно. Все символьные группы в одном цикле преамбулы передают на разных поднесущих, но *только в пределах одной подгруппы*.

На рисунке 9 показаны 3 цикла повторно передаваемой преамбулы, где каждая символьная группа представлена синим прямоугольником. Сама символьная группа состоит из 5 символов сетки из 48 поднесущих (длительность символа 266,66 мкс) и циклического префикса длиной 66,7 или 266,7 мкс. Следовательно, передача одной символьной группы составляет 1,4 или 1,6 мс, а одного цикла преамбулы – 5,6 или 6,4 мс. В зависимости от уровня покрытия сота может дать указание UE повторно передавать 2, 4, 8, 16, 32, 64 или 128 циклов преамбулы.

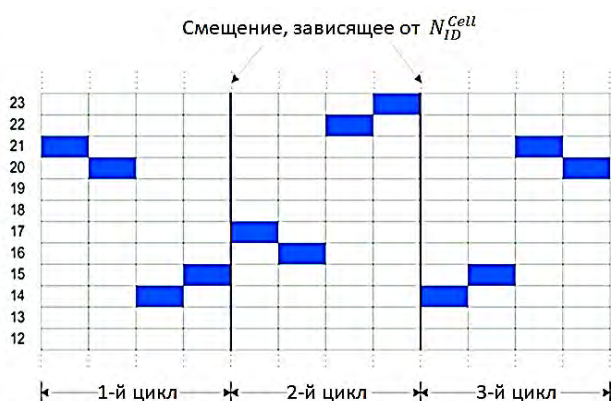


Рис. 9. Структура преамбулы в сети NB-IoT в подгруппе {12–23}

Алгоритм выбора подгруппы поднесущих для формирования преамбулы и поднесущих в подгруппе приведен в [8, subclause 10.1.6]. Его можно

пояснить следующим образом. Выбор подгруппы поднесущих производит UE на основе информации, полученной от eNB. Поднесущую для передачи первой символьной группы n_{SF1} в первом цикле передачи внутри подгруппы UE выбирает случайно; на рисунке 9 $n_{SC1} = 21$. Далее в каждом цикле преамбулы следуют жесткие правила смены поднесущих частот. Номер поднесущей для передачи второй символьной группы $n_{SC2} = n_{SC1} \pm 1$. Знак «+» используют в том случае, если n_{SC1} был четным и знак «–», если n_{SC1} был нечетным. Номер поднесущей для передачи третьей символьной группы $n_{SC3} = n_{SC2} \pm 6$. Знак «+» используют, если n_{SC2} находился в нижней половине подгруппы, а знак «–», если в верхней. Наконец, номер поднесущей для передачи четвертой символьной группы определяют по правилу выбора номера поднесущей для второй символьной группы: $n_{SC4} = n_{SC3} \pm 1$. При передаче повторных циклов преамбулы номер поднесущей для передачи первой символьной группы в каждом новом цикле определяется номерами поднесущих предыдущего цикла и идентификатором N_{ID}^{Cell} .

Качественные характеристики каналов NB-IoT

При организации сетей NB-IoT, естественно, требуется обеспечение таких характеристик, как пропускная способность, надежность, задержки.

Пропускную способность сети NB-IoT можно оценить числом передаваемых пакетов за единицу времени (1 секунду). Для определения средней длины пакетов воспользуемся статистикой трафика в Интернете, основанной на распределении Парето с ограничениями [10]. Плотность распределения вероятности для ограниченного распределения Парето:

$$f_k(x) = \frac{\alpha k^\alpha}{1 - \left(\frac{k}{L}\right)^\alpha} \cdot x^{-\alpha-1}, \quad k \leq x \leq L, \quad (3)$$

$$0 < \alpha < 2,$$

где k – минимальная, а L – максимальная длина пакета.

Математическое ожидание длины пакета равно:

$$M[x] = \frac{\alpha(Lk^\alpha - L^\alpha k)}{(1 - \alpha)(L^\alpha - k^\alpha)}, \quad (4)$$

и при заданных k и L зависит от параметра прогиба кривой плотности распределения α .

Максимальную длину дейтаграммы L примем равной 1500 байт. Минимальная длина информационной части сообщения может составлять 1 байт. Однако при передаче пакетов по радиоканалу к ней необходимо добавить объем сжатых IP/TCP (UDP) заголовков (3 байта) и минимальную суммарную длину заголовков подуровней PDCP, RLC, MAC (3 байта). С учетом этого минимальное $M[x]$ составляет 9 байт (72 бита). Сообщения, которые передаются в виде псевдо-сигнального

трафика Non Access Stratum, не обрабатывают на подуровне PDCP, но к ним, кроме заголовков подуровней RLC и MAC, будет присоединено поле проверки целостности длиной в 32 бита.

При расчете числа передаваемых пакетов вниз введем следующие параметры и допущения. В соответствии с рисунком 3 около 25 % времени отведено на передачу синхронизирующих сигналов и канала управления NPBSCH. Загрузку канала ρ принимаем равной 0,5 и 0,7. На передачу канала NPDCCH, под который выделяют отдельные субкадры, отведем 30 % времени передачи трафика вниз. В соответствии с таблицей 5 выбираем модуляционно-кодирующие схемы I_{MCS} и указываем число субкадров N_{SF} , необходимых для передачи одного пакета. Результаты расчетов пропускной способности вниз для однократной передачи сообщения N_{mes} , двукратной передачи N_{mes}^{rep2} и четырехкратной передачи N_{mes}^{rep4} при $M[x] = 366$ бит и 72 бита сведены в таблицу 8.

ТАБЛИЦА 8. Пропускная способность канала NB-IoT вниз

$M[x]$	360 бит				72 бита		
I_{MCS}	11	6	4	2	5	2	1
N_{SF}	2	4	6	10	1	2	4
ρ	0,5						
N_{mes}	122	61	40	24	245	122	61
N_{mes}^{rep2}	61	30	20	12	122	61	30
N_{mes}^{rep4}	30	15	10	6	61	30	15
ρ	0,7						
N_{mes}	183	91	61	36	366	183	91
N_{mes}^{rep2}	91	45	30	18	183	91	45
N_{mes}^{rep4}	45	22	15	9	91	45	22

Для передачи трафика вверх существует множество различных сценариев в зависимости от того, сколько поднесущих выделено в РЕ и какую модуляционно-кодирующую схему используют. При оценке пропускной способности канала вверх необходимо учитывать время, отводимое на передачу преамбул запросов на доступ к сети. При загрузке канала $\rho = 0,7$ и размещении одного пакета в одном РЕ можно передать до 500–600 одиночных пакетов трафика в секунду.

Надежность передачи в сетях NB-IoT обеспечивается:

- HARQ с повторной передачей непринятых пакетов;
- многократной передачей сообщений трафика и сигнализации.

Задержка в доставке трафика определяется:

- выбором формата передачи (минимальное время передачи 1 мс;
- задержкой начала передачи после получения сообщения по каналу NPDCCH;
- загрузкой сети (ожиданием в очереди).

Необходимо также учитывать задержки, обусловленные процедурой запросов на доступ UE к сети и подключения к ней.

В [11] приводится прогноз статистики соединений IoT в сотовых сетях и соединений NB-IoT, представленный Technology&Telecommunications (рисунок 10).

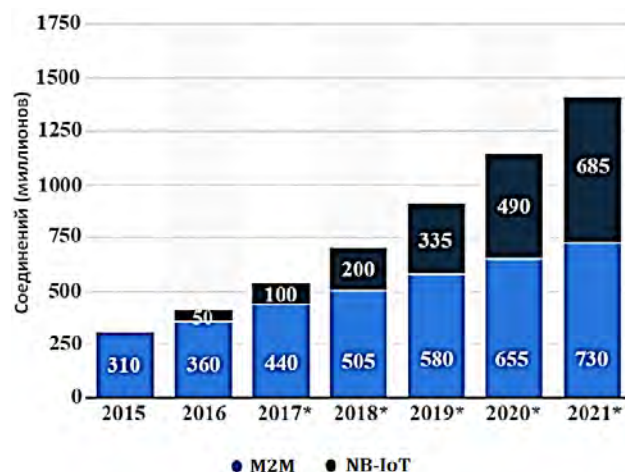


Рис. 10. Статистика соединений беспроводного сотового интернета вещей

Заключение

Технология NB-IoT предоставляет большие возможности для широкого развертывания самых разных структур интернета вещей. В настоящее время сети NB-IoT проходят стадию испытаний во многих странах Европы (включая Россию), Юго-Восточной Азии, в Китае, Австралии и США, хотя в США операторы более ориентированы на использование технологии LTE-M с полосой радиоканала в 1,4 МГц. Согласно отчету GSA к ноябрю 2017 г. фирмами-производителями аппаратуры выпущены 33 устройства категории NB1, обеспечивающих передачу данных со скоростями от 10 до 100 кбит/с. В процессе проводимых испытаний операторы совместно с представителями фирм отрабатывают важнейшие характеристики KPI: уровни покрытия территории, включая проникновение сигналов в здания, доступность сетей для пользователей, надежность передачи информации, пропускную способность и задержки. Отметим, что в сравнении с сетями LTE-M при той же номинальной мощности передатчиков терминалов (23; 20 дБм) допустимые потери на трассах в сетях NB-IoT возрастают на 8дБ. Выпуск аппаратуры категории NB2 даст возможность увеличить скорость передачи данных вниз до 120 кбит/с, а вверх – увеличить до 160 кбит/с.

Дальнейшее развитие технологии NB-IoT предполагает ужесточение режима экономии энергии, в частности, увеличение времени отключения устройств от сети в режиме DTX с 2,56 секунд до десятков минут и удлинение пауз при приеме сигналов пейджинга.

В целом перспективы развития сетей NB-IoT напрямую связаны с модернизацией структур радиодоступа при переходе к сетям 5G. Здесь прежде всего следует указать на использование многослойных структур (network slicing), позволяющих организовывать для сетей NB-IoT вертикальные слои, в свою очередь, разделенные на горизонтальные для разных операторов, организаций и отдельных групп аппаратных устройств (например,

устройств с групповым вызовом – *multicast service*). Многослойные структуры позволяют упростить ядро сети, оптимизируя использование сетевых ресурсов. Появляется также информация о создании выделенных и частных сетей NB-IoT, работающих как в лицензированных, так и в нелицензированных диапазонах спектра аналогично сетям LTE MulteFire Alliance.

Список используемых источников

1. Алексеев В. Технология мобильной связи для IoT стандарта 3GPP Rel.13 // Беспроводные технологии. 2016. № 4. С. 44–55.
2. Narrowband Internet of Things. Whitepaper. Rohde&Schwarz. 2016. URL: https://cdn.rohdeschwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf
3. 3GPP TS 36.101 V15.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). User Equipment (UE) radio transmission and reception. 2017. 1547 p.
4. Рыжков А.Е., Сиверс М.А., Бабкин А.С., Пыленок А.М., Трофимов А.П. Сети стандарта LTE. Развитие технологий радиодоступа. СПб: СПбГУТ, 2015. 256 с.
5. Lavrukhin V.A., Lazarev V.O., Ryjkov A.E. Correlation Properties Comparative Analysis of Pseudorandom Binary Sequences and LTE standard ZC sequences // Lecture Notes in Computer Science. 2016. Vol. 9870. P. 414–425.
6. Лазарев В.О., Рыжков А.Е. Исследование ZC-последовательностей, используемых в стандарте LTE // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 1. С. 79–86.
7. Лазарев В.О., Рыжков А.Е. Исследование ZC-последовательностей в сетях NB-IoT LTE // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 4-х т. СПб.: СПбГУТ. 2017. Т. 1. С. 223–228.
8. 3GPP TS 36.211 V14.4.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical Channels and Modulation. 2017. 197 p.
9. 3GPP TS 36.213 V14.4.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical Layer Procedures. 2017. 461 p.
10. Галкин А.М., Симонина О.А., Яновский Г.Г. Анализ характеристик сетей NGN с учетом свойств самоподобия трафика // Электросвязь. 2007. № 12. С. 23–26.
11. Number of Cellular Internet of Things (M2M and NB-IoT) Connections Worldwide from 2015 to 2021 (in millions). 2017. URL: <https://www.statista.com/statistics/671216/global-m2m-and-nb-iot-connections-forecast/>

* * *

NB-IoT TECHNOLOGY IN PROGRESS

A. Ryzhkov¹

¹The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Ryzhkov A. NB-IoT Technology in Progress // Proceedings of Telecommunication Universities. 2017. Vol 3. Iss. 4. PP. 94–101.

Abstract: *On the basis of LTE specifications (Releases 13–15) NB-IoT technology physical level channels and signals are considered, including synchronization signals and preamble for random access procedure. Transport block formats are presented, differences in downlink and uplink traffic channel structures are discussed. NB-IoT traffic channel throughput is estimated.*

Keywords: *NB-IoT, physical level, traffic, transport block, channel throughput.*