

УДК 338.532.65

Построение эталонной модели сети сотовой связи стандарта LTE

Получены аналитические выражения для определения требуемого количества базовых станций для построения эталонной модели сети подвижной сотовой электро-связи стандарта LTE. Показана зависимость требуемого количества базовых станций от количества абонентов, типа застройки территории оказания услуг, имеющегося радиочастотного ресурса, требований к качеству оказываемых услуг.

А. А. КАРПУК,
доцент кафедры программного обеспечения сетей телекоммуникаций, к. т. н., доцент

П. Ю. ЛАКИЗО,
начальник планово-экономического отдела, магистр управления

Н. И. КАБАК,
аспирант кафедры телекоммуникационных систем, магистр управления

Белорусская государственная академия связи

Ключевые слова:

сети сотовой связи, стандарт LTE, базовая станция, зона обслуживания, пропускная способность сети радиосвязи.

Введение. Задача построения эталонной модели сети сотовой связи была поставлена в работе [1]. Под построением эталонной модели сети сотовой связи будем понимать процесс определения требуемого количества базовых станций (БС) заданных типов для оказания на заданной территории заданных услуг сотовой связи с заданным качеством для заданного количества абонентов. В отличие от проектирования сети сотовой связи при построении эталонной модели сети не определяются конкретные точки установки БС, а вместо конкретных значений высоты антенн и излучаемой мощности базовых и абонентских станций используются их максимальные или средние значения. При построении эталонной модели сети сотовой связи должны использоваться современные методы оценки площади зон обслуживания и пропускной способности БС, в результате чего требуемое количество БС эталонной модели будет незначительно отличаться от реального количества БС, установленных при проектировании и развертывании сети сотовой связи. Это обстоятельство позволяет использовать результаты построения эталонной модели сети сотовой связи для оценки затрат на развертывание этой сети, для оценки эффективности использования радиочастотного спектра операторами сотовой связи, а также для определения размера платы

за выделение и использование радиочастотного спектра.

В работе [2] предложены методы построения эталонных моделей сетей сотовой связи стандартов GSM и UMTS. Первая попытка построить эталонную модель сети сотовой связи стандарта LTE была предпринята в работе [3]. По результатам этой работы можно определить общее количество БС, требуемое для развертывания сети сотовой связи стандарта LTE в Республике Беларусь, однако в этой работе не учитываются многие особенности стандарта LTE, влияющие на построение эталонной модели сети. В первую очередь не учитывается возможность одновременного использования БС, работающих в разных частотных диапазонах, и возможность использования полос частот разной ширины. Не учитывается также зависимость используемой модуляционно-кодирующей схемы от фактического отношения сигнал/шум. В настоящей статье рассмотрены особенности стандарта LTE, влияющие на построение эталонной модели сети, и предложен новый метод построения эталонной модели сети сотовой связи стандарта LTE.

Особенности стандарта LTE, влияющие на построение эталонной модели сети. Главным отличием стандарта LTE от стандартов GSM и UMTS является полный отказ от коммутации каналов.

Обмен данными в сетях сотовой связи стандарта LTE осуществляется методом коммутации пакетов по протоколу IP. Минимальной единицей частотного ресурса, выделяемого для взаимодействия БС с каждой АС, является ресурсный блок (RB) шириной 180 кГц, содержащий 12 поднесущих. С учетом служебных данных под каждый RB отводится 200 кГц радиочастотного спектра. Для работы каждой БС стандарта LTE выделяется одна или более полос радиочастот шириной от 1,4 до 20 МГц. В Республике Беларусь для развертывания сети сотовой связи стандарта LTE выделены 1 полоса шириной 10 МГц в диапазоне 800 МГц (LTE-800), 2 полосы шириной 10 МГц и 20 МГц в диапазоне 1800 МГц (LTE-1800) и 2 полосы шириной 15 МГц и 20 МГц в диапазоне 2600 МГц (LTE-2600). Таким образом, общий радиочастотный ресурс для развертывания сети сотовой связи стандарта LTE составляет 50 RB для БС LTE-800, 150 RB для БС LTE-1800 и 175 RB для БС LTE-2600. БС LTE-800 используются для развертывания сети сотовой связи стандарта LTE в сельской местности, БС LTE-1800 и LTE-2600 используются для развертывания сети сотовой связи стандарта LTE в условиях пригородной, городской и плотной городской застройки.

При функционировании сети сотовой связи стандарта LTE каждая АС постоянно определяет среднюю мощность пилотных (опорных) сигналов от одного ресурсного блока каждой доступной БС (параметр RSRP) и отношение сигнал/шум для каждой доступной БС (параметр SINR). Считается, что АС находится в зоне обслуживания той БС, для которой значение параметра RSRP является максимальным. Об этом АС сообщает БС, передавая ей значение индикатора качества канала (параметр CQI), которое определяется по значению

параметра RSNR и представляет собой целое число от 1 до 15. При необходимости обмена с АС для оказания одной из возможных услуг БС на основе значения параметра CQI определяет оптимальную модуляционно-кодирующую схему (MCS) для оказания услуги и, в зависимости от вида услуги, выделяет требуемое количество RB для оказания услуги. Вариант таблицы для определения значения параметра CQI, оптимальной MCS, пропускной способности одного RB и полосы в 20 МГц из литературы [4] приведен в табл. 1.

При вычислении максимальных возможных радиусов сот для БС стандартов GSM и UMTS в [2] использовались величины требуемого отношения сигнал/шум и чувствительности приемника. Как видно из табл. 1, для стандарта LTE отношение сигнал/шум на входе АС может изменяться в достаточно широких пределах от -6,7 до 22,7 дБ.

Соты БС стандартов GSM и UMTS являются равномерными, нахождение АС в любой точке соты обеспечивает наличие связи с заданным качеством. Соты БС стандарта LTE не являются равномерными, каждую соту в общем случае можно разбить концентрическими окружностями на 15 фрагментов, в которых пропускная способность одного RB изменяется от 933,2 Кбит/с в ближайшем к БС фрагменте до 25,6 Кбит/с в самом дальнем фрагменте. В случае когда SING в ближайшем к БС фрагменте окажется меньше 22,7 дБ, общее количество фрагментов будет меньше 15.

Важной особенностью сетей стандарта LTE является способность одновременно поддерживать соединения с различными требованиями качества обслуживания (QoS). БС стандарта LTE поддерживают концепцию EPS с разделением потоков на 2 класса: соединения с гарантированной

Таблица 1 – Определение значений CQI, MCS и пропускной способности

SINR, дБ	Индикатор CQI	Модуляция	Кодовая скорость	Информационных битов на символ	Пропускная способность на 1 ресурсный блок, Кбит/с	Пропускная способность на полосу 20 МГц, Мбит/с
SINR < -6,7	0	No	—	—	—	—
-6,7 ≤ SINR < -4,7	1	QPSK	0,076	0,1523	25,6	2,6
-4,7 ≤ SINR < -2,3	2	QPSK	0,12	0,2344	39,4	3,9
-2,3 ≤ SINR < 0,2	3	QPSK	0,19	0,377	63,3	6,3
0,2 ≤ SINR < 2,4	4	QPSK	0,3	0,6016	101,1	10,1
2,4 ≤ SINR < 4,3	5	QPSK	0,44	0,877	147,3	14,7
4,3 ≤ SINR < 5,9	6	QPSK	0,59	1,1758	197,5	19,8
5,9 ≤ SINR < 8,1	7	16QAM	0,37	1,4766	248,1	24,8
8,1 ≤ SINR < 10,3	8	16QAM	0,48	1,9141	321,6	32,2
10,3 ≤ SINR < 11,7	9	16QAM	0,6	2,4063	404,3	40,4
11,7 ≤ SINR < 14,1	10	64QAM	0,45	2,7305	458,7	45,9
14,1 ≤ SINR < 16,3	11	64QAM	0,55	3,3223	558,2	55,8
16,3 ≤ SINR < 18,7	12	64QAM	0,65	3,9023	655,6	65,6
18,7 ≤ SINR < 21,0	13	64QAM	0,75	4,5234	759,9	76,0
21,0 ≤ SINR < 22,7	14	64QAM	0,85	5,1152	859,4	85,9
22,7 ≤ SINR	15	64QAM	0,93	5,5547	933,2	93,3

Таблица 2 – Примеры услуг классов QCI и значения параметров QoS

QCI	Класс потока	Приоритет	Задержка (мс)	Частота потери пакета	Примеры услуг
1	GBR	2	100	10^{-2}	Телефония в режиме реального времени
2		4	150	10^{-3}	Видеотелефония, видео в режиме реального времени
3		3	50	10^{-3}	Игры в режиме реального времени
4		5	300	10^{-6}	Потоковое видео по протоколу TCP/IP
5	Non-GBR	1	10	10^{-6}	Сигнализация (IMS)
6		6	300	10^{-6}	Видео с буферизацией по протоколу TCP/IP, TCP-сервисы (e-mail, FTP, чаты и др.) для приоритетных пользователей
7		7	100	10^{-3}	Аудио, видео в режиме реального времени, интерактивные игры (по протоколу UDP/IP)
8		8	300	10^{-6}	Видео с буферизацией по протоколу TCP/IP, TCP-сервисы для обычных пользователей
9		9			

минимальной скоростью передачи (GBR) и соединения с негарантированной минимальной скоростью передачи (Non-GBR). Для соединений класса GBR БС гарантирует минимальную скорость, а при наличии ресурсов может ее увеличить. Для соединений класса Non-GBR БС не гарантирует минимальную скорость и может ее как увеличить, так и уменьшить. В соответствии с требованиями QoS, все типы услуг, оказываемых в сетях стандарта LTE, подразделяются на 9 классов, каждому из которых соответствует идентификатор QCI (QoS Class Identifier) от 1 до 9. Примеры услуг каждого класса QCI и требуемые для них значения параметров QoS приведены в табл. 2.

Построение эталонной модели сети сотовой связи стандарта LTE. Для построения эталонной модели сети сотовой связи стандарта LTE будем использовать значения параметров, описанных в табл. 3. Предполагается, что для построения эталонной модели сети стандарта LTE могут не применяться БС диапазона LTE-2600.

Построение эталонной модели сети сотовой связи стандарта LTE включает следующие шаги.

1. Вычислить максимальный возможный радиус соты БС диапазона LTE-800 $R_0^{(1)}$ на территории с сельской застройкой, максимальные возможные радиусы сот БС диапазона LTE-1800 $R_0^{(2)}$, $R_1^{(2)}$, $R_2^{(2)}$, $R_3^{(2)}$ на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно, максимальные возможные радиусы сот БС диапазона LTE-2600 $R_2^{(3)}$, $R_3^{(3)}$ на территории с городской и плотной городской застройкой соответственно. Максимальные возможные радиусы сот будем определять по направлению от АС к БС.

Для вычисления максимального возможного радиуса соты БС стандарта LTE-800 используем модель распространения радиоволн Окумура – Хата в редакции работы [5]. В результате несложных преобразований получим, что максимальный возможный радиус соты БС стандарта LTE-800 в км на территории с сельской застройкой выражается в виде

$$R_0^{(1)} = 10^{\left(\frac{A-B+G-Z_0^{(1)}-S-69,55-26,16 \lg f + 13,82 \lg h_0^b + \alpha_0(f, h^a) + K_0(f)}{44,9-6,55 \lg h_0^b} \right)}, (1)$$

где f – средняя частота радиочастотного канала от АС к БС, для БС стандарта LTE-800 можно принять $f = 857$ МГц;

$\alpha_0(f, h^a)$ – поправочный коэффициент для высоты антенны АС, вычисляется по формуле $\alpha_0(f, h^a) = h^a (1,1 \lg f - 0,7) - (1,56 \lg f - 0,8)$;

$K_0(f)$ – поправочный коэффициент на тип застройки, вычисляется по формуле $K_0(f) = 4,78(\lg f)^2 - 18,33 \lg f + 40,94$.

Для значений параметров по умолчанию, приведенных в табл. 3, по формуле (1) получим $R_0^{(1)} = 29,05$ км.

Для вычисления максимальных возможных радиусов сот БС стандарта LTE-1800 используем модель распространения радиоволн COST231 – Хата в редакции работы [5]. В результате несложных преобразований получим, что максимальный возможный радиус соты БС стандарта LTE-1800 в км



Таблица 3 – Описание параметров для построения эталонной модели сети стандарта LTE

№	Обозначение параметров	Описание параметров	Ограничение на значение или значение по умолчанию
1.	$m^{(1)}, m^{(2)}, m^{(3)}$	Количество полос частот, имеющихся для построения сети стандарта LTE в диапазоне 800 МГц, 1800 МГц, 2600 МГц соответственно	$m^{(1)} = 1$ $m^{(2)} = 2$ $m^{(3)} = 2$
2.	$k^{(1)}, k^{(2)}, k^{(3)}$	Количество RB, имеющихся для построения сети стандарта LTE в диапазоне 800 МГц, 1800 МГц, 2600 МГц соответственно	$k^{(1)} = 50$ $k^{(2)} = 150$ $k^{(3)} = 175$
3.	$v_j, j = \overline{1,9}$	Минимальная допустимая скорость обмена по линии вниз при оказании услуги со значением класса QCI, равным $j, j = \overline{1,9}$, в час наибольшей нагрузки, Мбит/с	$v_1 = 0,025$ $v_2 = v_5 = 0,4$ $v_3 = v_4 = v_7 = 3$ $v_6 = v_8 = v_9 = 1$
4.	S_0, S_1, S_2, S_3	Площади территории, на которой оказываются услуги сотовой связи стандарта LTE, с сельской (rural), пригородной (suburban), городской (urban) и плотной городской (dense urban) застройкой соответственно, км ²	
5.	$N_{j0}, N_{j1}, N_{j2}, N_{j3}, j = \overline{1,9}$	Количество абонентов, которым оказываются услуги сотовой связи стандарта LTE со значением класса QCI, равным $j, j = \overline{1,9}$, в час наибольшей нагрузки на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно	
6.	$h_0^b, h_1^b, h_2^b, h_3^b$	Высота антенны БС на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно, м	$h_0^b = 50$ $h_1^b = h_2^b = h_3^b = 30$
7.	h^a	Высота антенны АС, м	$h^a = 1,5$
8.	A	Эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) АС, дБм	$A = 23$
9.	B	Чувствительность приемника БС, дБм	$B = -115,3$
10.	G	Коэффициент усиления антенны приемника БС с учетом потерь в фидере, дБ	$G = 17,6$
11.	$Z_i^{(1)}, Z_i^{(2)}, Z_i^{(3)}, i = \overline{0,3}$	Запас на проникновение в помещение и автомобиль для диапазонов 800 МГц, 1800 МГц, 2600 МГц на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой	$Z_0^{(1)} = 0$ $Z_1^{(1)} = Z_0^{(2)} = 3$ $Z_2^{(1)} = Z_1^{(2)} = Z_0^{(3)} = 8$ $Z_3^{(1)} = Z_2^{(2)} = Z_1^{(3)} = 12$ $Z_3^{(2)} = Z_2^{(3)} = 17$ $Z_3^{(3)} = 22$
12.	S	Запас на замирания и отношение сигнал/шум на входе БС	$S = 12$
13.	$T_i^{(1)}, T_i^{(2)}, T_i^{(3)}, i = \overline{0,3}$	Средняя пропускная способность соты на 1 RB для диапазонов 800 МГц, 1800 МГц, 2600 МГц на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой, Мбит/с	от 0,1 до 0,4



на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой выражается в виде

$$R_i^{(2)} = 10^{\left(\frac{A-B+G-Z_i^{(2)}-S-46,33-33,91 \lg f + 13,82 \lg h_i^b + \alpha(f, h^a) - C_i}{44,9-6,55 \lg h_i^b} \right)}, \quad (2)$$

$$i = \overline{0,3},$$

где f – средняя частота радиочастотного канала от АС к БС, для БС стандарта LTE-1800 можно принять $f = 1755$ МГц;

$\alpha(f, h^a)$ – поправочный коэффициент для высоты антенны АС, вычисляется так же, как в формуле (1);

C_i – поправочные коэффициенты на тип застройки, принимают значения $C_0 = C_1 = C_2 = 0$, $C_3 = 3$.

Для значений параметров по умолчанию, приведенных в табл. 3, по формуле (2) получим $R_0^{(2)} = 1,39$ км, $R_1^{(2)} = 1,0$ км, $R_2^{(2)} = 0,77$ км, $R_3^{(2)} = 0,46$ км.

2. Определить требуемое количество БС стандарта LTE-800 $K_0^{(1)}$ для построения эталонной модели сети сотовой связи на территории с сельской застройкой, требуемое количество БС стандарта LTE-1800 $K_0^{(2)}$, $K_1^{(2)}$, $K_2^{(2)}$, $K_3^{(2)}$ для построения эталонной модели сети сотовой связи на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно, требуемое количество БС стандарта LTE-2600 $K_2^{(3)}$, $K_3^{(3)}$ для построения эталонной модели сети сотовой связи на территории с городской и плотной городской застройкой соответственно. Алгоритм определения требуемого количества БС состоит из следующих шагов.

2.1. Вычислить количество БС стандарта LTE-800 $P_0^{(1)}$, требуемое для бесшовного покрытия сотовой связью всей территории с сельской застройкой, по формуле

$$P_0^{(1)} = \left[\frac{S_0}{1,5\sqrt{3} \left(R_0^{(1)} \right)^2} \right].$$

Положить $K_0^{(1)} = P_0^{(1)}$.

2.2. Вычислить количество БС стандарта LTE-1800 $P_1^{(2)}$, $P_2^{(2)}$, $P_3^{(2)}$, требуемое для бесшовного покрытия сотовой связью всей территории с пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно, по формуле

$$P_i^{(2)} = \left[\frac{S_i}{1,5\sqrt{3} \left(R_i^{(2)} \right)^2} \right], \quad i = \overline{1,3}.$$

Положить $K_i^{(2)} = P_i^{(2)}$, $i = \overline{1,3}$.

2.3. Вычислить суммарную пропускную способность H_0, H_1, H_2, H_3 , которую должна обеспечивать сеть сотовой связи в час наибольшей нагрузки на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно, по формуле

$$H_i = \sum_{j=1}^9 v_j N_{ji}, \quad i = \overline{1,3}.$$

2.4. Вычислить пропускную способность в час наибольшей нагрузки одной БС стандарта LTE-800 $A_0^{(1)}$ на территории с сельской застройкой, одной БС стандарта LTE-1800 $A_0^{(2)}$, $A_1^{(2)}$, $A_2^{(2)}$, $A_3^{(2)}$ на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно, одной БС стандарта LTE-2600 $A_2^{(2)}$, $A_3^{(2)}$ на территории с городской и плотной городской застройкой соответственно по формулам

$$A_0^{(1)} = 3k^{(1)} T_0^{(1)} / m^{(1)}; A_i^{(2)} = 3k^{(2)} T_i^{(2)} / m^{(2)}, \quad i = \overline{0,3};$$

$A_i^{(3)} = 3k^{(3)} T_i^{(3)} / m^{(3)}$, $i = \overline{2,3}$. Приведенные формулы получены в предположении, что каждая БС обслуживает три 120-градусных соты, а кластер с неповторяющимися радиоканалами состоит из $m^{(j)}$, $j \in \overline{1,3}$, БС.

2.5. Если $A_0^{(1)} K_0^{(1)} \geq H_0$, то положить $K_0^{(2)} = 0$ и перейти к шагу 2.6, иначе вычислить количество БС стандарта LTE-1800 $K_0^{(2)}$, которое требуется установить на территории сельской застройки для обеспечения требуемой пропускной способности сети, по формуле $K_0^{(2)} = \left[(H_0 - A_0^{(1)} K_0^{(1)}) / A_0^{(2)} \right]$.

2.6. Если $A_1^{(2)} K_1^{(2)} \geq H_1$, то перейти к шагу 2.7, иначе вычислить количество БС стандарта LTE-1800 $K_1^{(2)}$, которое требуется установить на территории пригородной застройки для обеспечения требуемой пропускной способности сети, по формуле $K_1^{(2)} = K_1^{(2)} + \left[(H_1 - A_1^{(2)} K_1^{(2)}) / A_1^{(2)} \right]$.

2.7. Если $A_2^{(2)} K_2^{(2)} \geq H_2$, то положить $K_2^{(3)} = 0$ и перейти к шагу 2.8, иначе вычислить количество БС стандарта LTE-2600 $K_2^{(3)}$, которое требуется установить на территории городской застройки для обеспечения требуемой пропускной способности сети, по формуле $K_2^{(3)} = \left[(H_2 - A_2^{(2)} K_2^{(2)}) / A_2^{(3)} \right]$.

2.8. Если $A_3^{(2)}K_3^{(2)} \geq H_3$, то положить $K_3^{(3)} = 0$ и закончить работу, иначе вычислить количество БС стандарта LTE-2600 $K_3^{(3)}$, которое требуется установить на территории плотной городской застройки для обеспечения требуемой пропускной способности сети, по формуле $K_3^{(3)} = \lceil (H_3 - A_3^{(2)}K_3^{(2)}) / A_3^{(3)} \rceil$ и закончить работу.

Заключение. В статье получены аналитические выражения, позволяющие определить требуемое количество базовых станций, работающих в диапазонах 800 МГц, 1800 МГц и 2600 МГц, для построения эталонной модели сети подвижной сотовой электросвязи стандарта LTE. В качестве параметров эталонной модели сети используются количество полос частот и количество ресурсных блоков, имеющихся для построения сети в указанных диапазонах, количество абонентов, которым одновременно оказываются услуги сотовой связи на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой, требования к качеству оказываемых услуг. Результаты построения эталонной модели сети сотовой связи могут использоваться для оценки затрат на развертывание этой сети, для оценки эффективности использования радиочастотного спектра операторами сотовой связи, а также для определения размера платы за выделение и использование радиочастотного спектра.



ЛИТЕРАТУРА

1. Лапцевич, А. А. Алгоритм проектирования системы мобильной связи стандарта GSM 900/1800 в рамках создания эталонной сети сотовой подвижной электросвязи на территории Республики Беларусь / А. А. Лапцевич, О. В. Домакур // Проблемы инфокоммуникаций. – 2016. – № 2 (4). – С. 54–61.
2. Лакизо, П. Ю. Построение эталонных моделей сетей сотовой связи стандартов GSM и UMTS / П.Ю. Лакизо, А.А. Карпук, Н.И. Кабак // Проблемы инфокоммуникаций. – 2021. – № 2(14). – С. 12–19.
3. Лапцевич, А. А. Проектирование системы мобильной связи стандарта LTE при создании эталонной сети сотовой подвижной электросвязи на территории Республики Беларусь / А. А. Лапцевич, С. И. Половения // Проблемы инфокоммуникаций. – 2019. – № 1 (9). – С. 28–35.
4. Zhang, X. LTE Optimization Engineering Handbook / X. Zhang. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Ltd, 2018. – 845 p.
5. Попов, В. И. Математические модели и алгоритмы распространения радиоволн в сотовых сетях мобильной связи / В. И. Попов, В. А. Скуднов, А. С. Васильев // Евразийский Союз Ученых. – 2016. – № 3 (24). – С. 68–80.

Analytical expressions are obtained to determine the required number of base stations for building a reference model of a mobile cellular telecommunications network of the LTE standard. The dependence of the required number of base stations on the number of subscribers, the type of development of the territory for the provision of services, the available radio frequency resource, and the requirements for the quality of services provided are shown.

Keywords: cellular networks, LTE standard, base station, service area, radio network capacity.

Получено 03.08.2022.