

УДК 621.396.946

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE ПРИ СОЗДАНИИ ЭТАЛОННОЙ СЕТИ СОТОВОЙ ПОДВИЖНОЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

А.А. ЛАПЦЕВИЧ, С.И. ПОЛОВЕНЯ

*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220114, Беларусь*

*Поступила в редакцию 8 апреля 2018*

Предложена методика определения основных пространственно-технических параметров при проектировании системы мобильной связи стандарта LTE с последующим ее использованием в создаваемой модели эталонной сети сотовой подвижной электросвязи с целью оптимального управления радиочастотным спектром и повышения эффективности реально действующей сети мобильной связи на территории Республики Беларусь.

*Ключевые слова:* радиочастотный спектр, сотовая подвижная электросвязь (мобильная связь), стандарты UMTS, LTE, метод Окумура-Хата, скорость передачи данных, емкость сети, пропускная способность, абонентский трафик, нагрузка в сети, эталонная сеть мобильной связи.

### Введение

В настоящее время сети мобильной связи стандартов UMTS, LTE стали повсеместной реальностью и показали явное преимущество перед сетями предыдущих поколений. Основными причинами их динамичного развития является все возрастающая потребность пользователей в услугах высокоскоростного доступа к информационным ресурсам глобальной сети Интернет, использование достижений технологии VoIP, а также снижение капитальных затрат на передачу единицы трафика. Одними из важных вопросов в дальнейшем развитии мобильной сети стандартов UMTS, LTE являются определение пространственно-технических параметров сети сотовой связи, осуществление частотно-территориального планирования и построение на их основе эталонной сети мобильной связи. Проектирование и построение эталонной сети мобильной связи позволит повысить эффективность использования, распределения и оптимального управления радиочастотным спектром (РЧС), который является неотъемлемым ресурсом современного информационного общества. Проектирование эталонной сети сотовой подвижной электросвязи представляет собой пошаговый эволюционный процесс: изначально проектируется мобильная сеть стандарта GSM/UMTS с последующим созданием на ее основе мобильной сети стандарта LTE [1].

Проектируемая в процессе планирования эталонная сеть мобильной связи будет решением, относительно которого будет строиться реальная сеть с учетом оценки по зоне покрытия, абонентской емкости, скорости передачи, пропускной способности, качеству радиосвязи и эффективности использования РЧС. При этом необходимо учитывать, что в отличие от сетей стандарта GSM/UMTS сети мобильной связи стандарта LTE являются сетями пакетного трафика с гибким использованием каналов с изменяемой шириной полосы излучения/приема сигнала до 20 МГц, построенных на основе новых технологий многостанционного доступа, модуляции и формирования сигналов с ортогональной частотной манипуляцией (OFDMA) и технологии многолучевых антенных систем (MIMO).

В данной статье предложена методика расчета пространственно-временных характеристик системы мобильной связи стандарта LTE с последующим включением его

в проектируемую обобщенную модель эталонной сети сотовой подвижной электросвязи на территории Республики Беларусь.

### Построение эталонной сети сотовой подвижной электросвязи стандарта LTE

Для построения сети начального приближения LTE необходимо начать с определения количества базовых станций или количества каналов, обеспечивающих покрытие требуемой территории.

Площадь зоны покрытия одной базовой станции можно рассчитать по формуле [2]:

$$S = \frac{3}{2} \sqrt{3} \cdot R^2, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус сектора, или максимальная дальность связи с учетом потерь на трассе распространения сигнала.

Тогда

$$R = \sqrt{\frac{S}{2,56}}. \quad (2)$$

Требуемое количество базовых станций рассчитывается по формуле [2]:

$$N_{BS} = \frac{S_{LTE}}{3 \cdot S}, \quad (3)$$

где  $S_{LTE}$  – площадь, которую требуется покрыть.

При построении начального приближения LTE сетей целесообразно применять модель МСЭ-R P.1546 «Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц», которая содержит кривые распространения и соответствующие таблицы в электронном виде. Для частот и высот подвеса антенн, отличных от приведенных на кривых распространения, напряженность электромагнитного поля вычисляется методом интерполяции согласно формулам из вышеназванной рекомендации. Для городских условий вводятся соответствующие поправки в виде коэффициентов.

Настоящая рекомендация дает сходные с методом Окумура-Хата результаты для расстояний до 10 км, высоты антенны мобильной станции  $h_{BS} = 1,5$  м, репрезентативной высоте местных препятствий  $R = 15$  м.

В методе Окумура-Хата используется следующее уравнение:

$$E_R = 69,82 - 6,16 \lg f + 13,82 \lg f_{BS} + \alpha(h_{MS}) - (44,9 - 6,55 \lg h_{BS}) \cdot (\lg R)^r, \quad (4)$$

где  $E_R$  – напряженность электромагнитного поля, дБ (мкВ/м);

$f$  – частота, МГц;

$h_{BS}$  – эффективная высота антенны базовой станции над уровнем земли в диапазоне 30–200 м;

$h_{MS}$  – высота антенны подвижной станции над уровнем земли в диапазоне 1–10 м;

$R$  – расстояние, км;

$\alpha = 1$  для  $R < 20$  км,

$$\alpha = 1 + (0,14 + 0,000187f + 0,00107H_1^i)(\lg 0,05R)^{0,8} \text{ для } R > 20 \text{ км,}$$

где

$$H_1' = H_1 / (1 + 0,000007 h_{BS}^2)^{0,5}$$

Для диапазона частот 1,5...2 ГГц используется модифицированная модель COST231-Nata. Формула для расчета среднего затухания в городе, дБ:

$$L_p = 46,3 + 33,9 \lg(f) - 13,82 \lg(h_{BS}) + (44,9 - 6,55 \lg(h_{BS})) \lg(R) - a(h_{MS}) - K,$$

где  $h_{BS}$  – высота подвеса антенн базовой станции, м;

$h_{MS}$  – высота мобильной станции, м;

$R$  – расстояние до передатчика, км;

$K = 0$  дБ для малых и средних городов,  $K = 3$  дБ для больших городов;

$a(h_{MS}) = [1,1 (\lg(f) - 0,7) h_{MS} - [1,56 (\lg(f) - 0,8)]$  – поправочный коэффициент для высоты антенны подвижного объекта, зависящий от типа местности для малых и средних городов;

$a(h_{MS}) = 3,2 (\lg(11,75 h_{MS}))^2 - 4,97$  – поправочный коэффициент для высоты антенны подвижного объекта, зависящий от типа местности для большого города.

$$a(1,5) = 3,2 (\lg(11,75 \cdot 1,5))^2 - 4,97 = -0,00092$$

Таким образом, максимально возможная дальность связи напрямую зависит от максимальных потерь на трассе распространения и вычисляется по формуле:

$$R = 10^\alpha, \quad (5)$$

где

$$\alpha = \frac{L_p - (46,3 + 33,9 \lg(f)) + 13,82 \lg(h_{BS}) + a(h_{MS})}{44,9 - 6,55 \lg(h_{BS})}. \quad (6)$$

Примем  $h_{BS} = 30$  м для города и  $h_{BS} = 70$  м для сельской местности.

В любой модели конечный расчет сводится к вычислению уровня сигнала на приеме по формуле [2]:

$$P_c = P_{РПД} + G_{РПД}(\varphi_{РПМ}) + G_{РПМ}(\varphi_{РПД}) - U_{РПД} - U_{РПМ} - L(R), \quad (7)$$

где  $P_{РПД}$  – мощность передатчика, дБ;

$G_{РПД}(\varphi_{РПМ})$  – коэффициент усиления передающей антенны в направлении на приемник, дБ;

$G_{РПМ}(\varphi_{РПД})$  – коэффициент усиления приемной антенны в направлении на передатчик, дБ;

$U_{РПД}, U_{РПМ}$  – затухание в антенно-фидерных трактах передатчика и приемника, дБ;

$L(R)$  – потери на трассе распространения сигнала, дБ.

Таким образом, максимально возможные потери можно рассчитать по формуле:

$$L_p = ЭИИМ - P_c, \quad (8)$$

где  $ЭИИМ$  – эффективная изотропно-излучаемая мощность, дБ;

$P_c$  – уровень полезного сигнала на входе приемника, дБ.

При этом расчет  $ЭИИМ$  производится исходя из требований к равенству дальности связи между линией «вверх» и линией «вниз». Таким образом, формула для расчета линии «вниз», то есть от базовой станции к мобильной станции примет следующий вид:

$$\text{ЭИИМ} = P_{\text{вых}BTS} + G_{aBTS} - L_f, \quad (9)$$

где  $P_{\text{вых}BTS}$  – мощность на выходе передатчика БС, дБм;

$G_{aBTS}$  – коэффициент усиления передающей антенны, дБ;

$L_f$  – потери в антенно-фидерном тракте, дБ.

Уровень полезного сигнала на входе приемника можно рассчитать по формуле [2]:

$$P_C = P_{inMS} - G_{aMS} + L_{fMS} + SNR + RF + IF + L_D, \quad (10)$$

где  $P_{inMS}$  – входная мощность, или чувствительность приемника, дБ;

$G_{aMS}$  – усиление приемной антенны, дБ;

$L_{fMS}$  – потери в антенно-фидерном тракте приемника, дБ;

$SNR$  – требуемое отношение сигнал-шум на входе приемника, дБ;

$RF$  – запас на релеевское замирание, дБ;

$IF$  – запас на замирание от интерференции сигналов, дБ;

$L_D$  – потери, зависящие от среды распространения сигнала, дБ.

Так как большинство абонентских устройств, работающих по технологии LTE обладают внутренней антенной (Patch antenna, PIFA antenna), то полагаем, что у всех мобильных станций диаграмма направленности составляет  $360^\circ$ , что соответствует коэффициенту усиления, равному 0 дБ, и потери в фидере также составляют 0 дБ, тогда формулу (10) удобно привести к виду:

$$P_C = P_{inMS} + SNR + RF + IF + L_D \quad (11)$$

Потери, зависящие от среды распространения сигнала, рассчитываются по формуле [2]:

$$L_D = L_{log} + \sum L_{pi}, \quad (12)$$

где  $L_{log}$  – запас на логарифмически нормальное замирание, дБ;

$L_{pi}$  – потери на прохождение через препятствия (человеческое тело, стены зданий, обшивка машин), дБ.

В соответствии с условиями рассматриваемой модели для городской местности следует задать значение  $L_{log} = 10$  дБ [3]. Остальные потери регламентированы, и при расчетах используют значения, приведенные в табл. 1 [3].

Таблица 1. Значения параметров для расчета уровня сигнала

Параметр	Обозначение	Величина
Отношение сигнал-шум, дБ	SNR	10
Запас на релейское замирание, дБ	RF	3
Запас на замирание от интерференции, дБ	IF	2
Запас на логарифмически нормальное замирание, дБ	$L_{\log}$	10
Потери при прохождении через человеческое тело, дБ	$L_i$	3
Потери при прохождении через обшивку автомобиля, дБ	$LP_{car}$	6
Потери при прохождении через стены зданий, дБ	LPbuild	12

Чувствительность приемника мобильной станции в случае LTE зависит от класса мощности терминала и может находиться в диапазоне от  $-107$  дБ до  $-113$  дБ [3].

По формуле (12) определяются потери при распространении в свободной среде, то есть учитывается только затухание сигнала при прохождении через тело человека.

При расчете данных потерь в автомобиле, помимо потерь в теле человека, следует учесть затухание сигнала при прохождении через обшивку автомобиля, а при расчете потерь внутри зданий к потерям в теле необходимо прибавить потери при прохождении сигнала через стены зданий.

Принимая 20 % запас на соединения, а также учитывая потери в соединительных элементах (минимум по 2 коннектора на фидер), определяются максимально возможные потери при распространении в свободном пространстве, при распространении сигнала в автомобиле и внутри зданий по формуле (8).

Выбирается значение наибольших потерь для определения на наихудший случай. Определяется параметр  $\alpha$  для сети LTE ячеек в свободном пространстве, в автомобиле и внутри зданий и максимально возможная дальность связи или радиус ячейки по формуле (5).

### Вычисление пропускной способности LTE сети.

Важнейшей особенностью сетей LTE является масштабируемость занимаемого ими частотного спектра до 20 МГц, которая способствует быстрому внедрению технологии в условиях ограниченности радио ресурсов. Очевидно, что, чем шире полоса, тем больше будут скорости.

Информация, передаваемая на радио интерфейсе, делится на служебную информацию, которая транслируется по различным каналам управления, и на пользовательские данные канала PDSCH (Physical Downlink Shared Channel).

Радиоинтерфейс LTE поддерживает как частотное, так и временное дуплексирование восходящего и нисходящего каналов (FDD и TDD), что позволяет разворачивать сети даже при отсутствии спаренных диапазонов.

Рассмотрим особенности FDD режима, его структуру кадра и соотношение между пользовательскими и служебными ресурсами.

FDD-кадр LTE состоит из десяти субкадров по 1 мс ( $N_{SFR} = 10$ ). Каждый субкадр состоит из двух слотов, внутри которых содержится 7 OFDM-символов или ресурсных элементов.

Для синхронизации абонентов с сетью в первом субкадре каждого кадра по каналам первичной и вторичной синхронизации (PSS и SSS) передаются специальные последовательности. Они занимают 1200 поднесущих (с учетом неиспользуемых ресурсных элементов по краям диапазона) – 1200 OFDM-символа.

Для того чтобы оценить скорости передачи данных в нисходящем канале (downlink), сначала определяем, сколько ресурсных элементов (или OFDM-символов) передается в миллисекундном кадре в зависимости от имеющейся полосы частот. Если время распространения невелико (используется короткий циклический префикс), то в одном субкадре на одной поднесущей передается 14 OFDM-символов. Таким образом, число OFDM-символов в кадре будет равно [4]:

$$N_{OFDM} = N_{SFR} \cdot 2 \cdot N_{OFDMS} \cdot N_{SRB} \cdot N_{RB}, \quad (13)$$

где  $N_{OFDMS}$  – количество OFDM символов в слоте;

$N_{SRB} = 12$  – количество поднесущих в ресурсном блоке;

$N_{RB} = 100$  – количество ресурсных блоков (табл. 2) [5].

Таблица 2. Соотношение между шириной полосы частот и числом ресурсных блоков

Полоса, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число поднесущих	72	180	300	600	900	1200
Число ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100

$$N_{OFDM} = 10 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot 100 = 168000$$

Из рассчитанного числа требуется вычесть 1200 ресурсных элементов под PSS, 1200 – под SSS, и  $1200 \cdot 4 = 4800$  – под PBCH (Physical Broadcast Channel),  $10 \cdot 100 \cdot 12 \cdot 3 = 36\,000$  – под PDCCH (Physical Downlink Control Channel), PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel), и часть RS (Reference Signal). Оставшаяся часть ресурсных элементов, требуется под пилот-сигнал (RS).

Таким образом, 47 200 из 168 000 элементов занято служебными каналами, что составляет 28 %.

В сети LTE используются следующие виды модуляции: QPSK, QAM16 и QAM64 – и их удельный вес в общем потоке данных составляет 10 %, 10 % и 80 % соответственно. Скорость, которую может обеспечивать одна поднесущая [4]:

$$V = 2 \cdot N_{OFDMS} \cdot N_{SFR} \cdot N_{RB} \cdot \log(I_m), \quad (14)$$

где  $I_m$  – индекс модуляции.

Пропускная способность может быть определена следующим образом:

$$C = V \cdot N_{SRB} \cdot N_{RB}. \quad (15)$$

Учитывая, что 28 % от рассчитанных величин будет потрачено на управление, и исходя из рассчитанных значений скоростей [5], примем среднюю пропускную способность равной 51 Мб/с.

Исходя из требований СТБ 1904-2011 «Услуги сотовой подвижной электросвязи. Требования к качеству и методы контроля» на одного абонента минимально допустимая скорость передаваемой информации равна 1 Мб/с. Тогда один канал при использовании современных модуляционно-кодирующих схем и трехсекторных антенн может обслуживать до 153 абонентов.

Общая емкость будет определяться суммарной емкостью сети LTE. При этом емкость сети будет определяться количеством секторов, а также максимально возможной нагрузкой на каждом из них. Определение можно свести к вычислению по следующей формуле:

$$C_{LTE} = \frac{N_{cBTS} \cdot C_{BTS}}{A_{аб/ЧНН}}, \quad (16)$$

где  $C_{LTE}$  – емкость сети LTE;

$A_{аб/ЧНН}$  – нагрузка на одного абонента в ЧНН, Эрл;

$N_{cBTS}$  – количество секторов в сети LTE;

$C_{BTS}$  – емкость сектора LTE (число абонентов на сектор).

Как было отмечено выше по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь численность населения на 1 января 2016 года составляла 9 498 400 человек, однако количество абонентов сотовой подвижной электросвязи составляло 11 448 300 человек, и 31 % из них (3 548 973 человек) по данным операторов пользовались смартфонами, т. е. являлись потенциальными абонентами сети LTE.

Число одновременно говорящих абонентов рассчитывается по формуле:

$$A = A_{cp} \cdot N_{аб}, \quad (17)$$

где  $A_{cp} = 0,05 \text{ Эрл}$  – нагрузка одного абонента в час наибольшей нагрузки;

$N_{аб}$  – количество абонентов.

Для сотовых сетей с применением технологии LTE возможно обобщение рассматриваемого параметра для абонентского трафика, включающего передачу речевой информации и пакетную передачу данных с объединением тайм-слотов в радиоканале. При этом прежде всего определяются и приводятся в соответствие первичные параметры трафика.

Возможности конкретного использования данного принципа могут быть рассмотрены на примере определения величины «добавки» к средней нагрузке в ЧНН на одного абонента сети по речевому трафику за счет передачи данных.

Средняя нагрузка в ЧНН на одного абонента сети по речевому трафику

$$y_0 = C_{cp} \cdot t_{cp} / 3600, \quad (18)$$

где  $C_{cp}$  – среднее число вызовов в ЧНН на одного абонента сети для передачи речевых сообщений;

$t_{cp}$  – среднее время разговора.

Средняя нагрузка в ЧНН на одного абонента сети по передаче данных

$$y_0^* = C_{cp}^* \cdot t_{cp}^* / 3600, \quad (19)$$

где  $C_{cp}^*$  – среднее число вызовов в ЧНН на одного абонента сети для передачи данных;

$t_{cp}^*$  – средняя длительность передачи сообщений.

$Y_0$  – суммарное значение средней нагрузки в ЧНН на одного абонента сети:

$$Y_0 = y_0 + y_0^*. \quad (20)$$

Средняя нагрузка в сети по передаче данных будет равна:

$$Y_0^* = y_0^* \cdot N_{LTE}, \quad (21)$$

где  $N_{LTE}$  – количество абонентов сети LTE.

Полученная нагрузка по каналу данных прибавляется к числу одновременно говорящих абонентов, и рассчитывается суммарная нагрузка канала данных и речевого канала:

$$A^* = A + Y_0^*, \quad (22)$$

где  $A$  – число одновременно говорящих абонентов по речевому каналу.

Определив нагрузку на сеть и количество активных абонентов, можно установить количество требуемых каналов сети LTE.

Рассчитаем возможное число обслуживаемых абонентов с заданным качеством. Например, в г. п. Копысь Оршанского района Витебской области проживает 850 человек.

С учетом использования модуляционно-кодирующих схем, позволяющих повторять радиоканал на каждом из трех секторов БС и трех возможных для использования радиоканалов, одна БС может взять на обслуживание  $51 \cdot 9 = 459$  одновременно говорящих человек. Если принять количество активных абонентов 20 % от всех жителей, т. е. 170 человек, то для обеспечения покрытия требуется 1 радиоканал или одна БС.

Результаты расчетов числа каналов сети LTE по областям Республики Беларусь сведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчетов числа каналов

Брестская область	Витебская область	Гомельская область	Гродненская область	Минская область	Могилевская область
660	640	737	601	1909	555

В результате рассчитано необходимое количество каналов электросвязи для обеспечения условий эталонной сети по всем населенным пунктам, автомобильным дорогам и железнодорожным путям, которые будут использоваться в дальнейшем для размещения базовых станций по территории Республики Беларусь с учетом требований построения эталонной сети.

### **SYSTEM DESIGN OF MOBILE COMMUNICATION STANDARD LTE WHEN YOU CREATE A REFERENCE OF CELLULAR MOBILE TELECOMMUNICATION NETWORK ON THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BELARUS**

A.A. LAPTSEVICH, S.I. POLOVENJA

#### **Abstract**

The technique of definition of basic spatial and technical parameters when designing a system for mobile communications standard LTE followed by its use in the reference model of cellular mobile telecommunication network for optimal spectrum management and efficiency really existing mobile communication network on the territory of the Republic of Belarus.

#### **Список литературы**

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. Holma, H. LTE for UMTS. OFDMA and CS-FDMA Based Radio Access / H. Holma, A. Toskala. – John Wiley, 2009. – 450 p.
3. Sesia, S. LTE – The UMTS Long Term Evolution. : From Theory to Practice / S. Sesia. – John Wiley, 2009. – 792 p.
4. Дроздова, В. Г. Оценка пропускной способности сетей LTE / В. Г. Дроздова, М. А. Белов // Мобильные телекоммуникации. – 2012. – № 5. – С. 20–22.
5. ETSI TS 102 250-5 V1.2.1 (2005-05) Technical «Specification Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 5: Definition of typical measurement profiles»: European Telecommunications Standards Institute, 2005. – 19 p.