

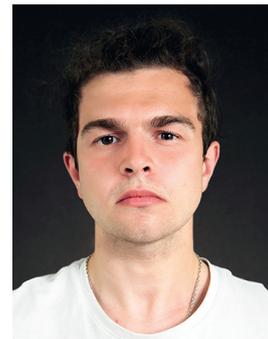
# ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА



**ТАРАНЕНКО**  
Артем Юрьевич,  
АО «Росжелдорпроект»,  
Проектный институт  
«Гипротрансигналсвязь»,  
главный инженер проекта,  
Санкт-Петербург, Россия



**ГРИЦЕНКО**  
Андрей Аркадьевич,  
АО «Информационно-  
космический центр «Северная  
корона», генеральный  
директор, канд. техн. наук,  
Санкт-Петербург, Россия



**ЛОБЕЕВ**  
Дмитрий Петрович,  
АО «Росжелдорпроект»,  
Проектный институт  
«Гипротрансигналсвязь»,  
инженер отдела связи, аспирант,  
Санкт-Петербург, Россия

**Ключевые слова:** LTE, цифровые системы технологической радиосвязи (ЦСТР), частотный спектр, ширина полосы частоты, LTE-1800 TDD

**Аннотация.** Статья посвящена анализу и оптимизации частотного спектра в сетях LTE на железнодорожном транспорте. Промоделирована работа цифровых систем технологической радиосвязи в рамках оптимизации частотного ресурса в сетях стандарта LTE. Сегодня ведется проектирование и разработка высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва – Санкт-Петербург», в которой основной технологией в области радиосвязи будет технология стандарта LTE. Ввиду узкой полосы, выделенной для железнодорожного транспорта (1785–1805 МГц), и ограничений ГКРЧ по ширине используемого канала сделан обоснованный выбор по оптимальному использованию полосы частотного спектра.

■ Сеть LTE по своей сути является адаптивной системой, и ее начальная конфигурация и настройка существенным образом могут повлиять на скорость передачи в зонах обслуживания сети после развертывания. Начальная конфигурация и настройка должны в полной мере соответствовать предполагаемым условиям и специфике работы. Но при выборе оптимальной полосы частот для проектирования важно учитывать электромагнитную совместимость (ЭМС).

Стандартом LTE определены шесть вариантов полос частот. Поскольку решение ГКРЧ №18-46-02 предусматривает использование полосы шириной не более 10 МГц, то возможна реализация полосы из набора: 1,4; 3; 5 и 10 МГц.

На опытных полигонах к развернутой сети на основе стандарта LTE 1800 TDD предъявляются требования по пропускной способности канала: для восходящего (UL) – 1 Мбит/с, для нисходящего (DL) – 2 Мбит/с. Исходя из указанных требований, для достижения необходимых скоростей следует использовать полосы шириной 5 или 10 МГц.

На физическом уровне в стандарте LTE применяют технологию OFDMA-мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов с модуляцией QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) или 64QAM. Максимальное количество поднесущих частот в рабочей полосе

достигает 2048. Передача по радиоканалу производится кадрами длительностью 10 мс.

Основное преимущество технологии OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) – это исключение негативных эффектов при приеме сигнала, вызванных его многолучевым распространением. Этой технологии присущи и некоторые недостатки, заключающиеся в очень высокой чувствительности к синхронизации по частоте. В связи с этим в восходящем канале LTE используется технология множественного доступа – SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Ее отличие состоит в том, что в качестве дополнительной обработки сигнала задействовано

Таблица 1

№ режима	Конфигурация субкадров									D; U; S	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U	2; 6; 2
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D	4; 4; 2
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D	6; 2; 2
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D	6; 3; 1
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D	7; 2; 1
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D	8; 1; 1
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D	3; 5; 2

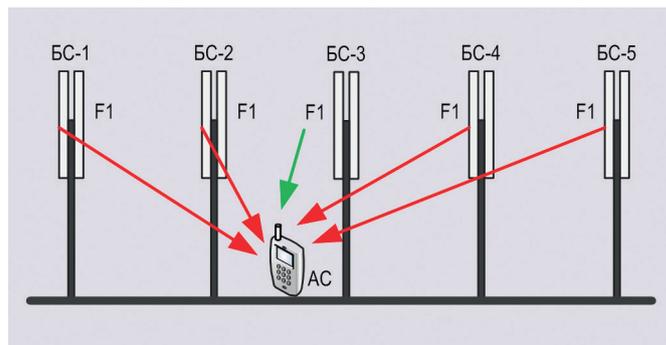


РИС. 1

преобразование Фурье. Причем в «восходящем» канале могут использоваться те же модуляции, что в «нисходящем» канале: QPSK, 16QAM, 64QAM. [1].

Кадры в LTE подразделяются на два типа: с частотным (FDD) и временным (TDD) дуплексом, но по решению ГКРЧ выбран TDD.

Базовая станция (БС), работающая в режиме TDD, позволяет конфигурировать каналы, которые используются для передачи вверх (U) – от абонента к базовой станции, вниз (D) – от базовой станции к абоненту и служебные каналы (S). Количество режимов согласно стандарту LTE указано в табл. 1 [2].

Поскольку между поднесущими частотами расстояние составляет  $\Delta f = 15$  кГц, длина OFDM-символа равна  $1/\Delta f \approx 66,7$  мкс. Половина субкадра (слот длительностью 0,5 мс) состоит из 6 или 7 OFDM-символов в зависимости от величины циклического префикса и активной паузы между символами. Значение циклического префикса равно 5,2 мкс перед первым символом и 4,7 мкс – перед остальными символами. Возможен также вариант применения расширенного циклического префикса 16,7 мкс.

По результатам расчетов радиопокрытия, в случае если необходимо предоставить преимущество по распределению для восходящего канала, предпочтительным является режим конфигурации №0, а если необходимо равномерно распределить субкадры между всеми каналами, применим режим № 1 (см. табл. 1). Режим конфигурации TDD может быть также изменен в процессе эксплуатации сети по результатам измерений статистики трафика [1].

Рассмотрим возможность и

особенности использования полосы частот для нисходящего и восходящего каналов связи.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОСЫ 10 МГц И ПРОБЛЕМЫ ЭМС

■ Использование максимально доступной полосы частот 10 МГц по сути означает, что все БС сети будут работать на одной частоте, что без применения специальных мер может привести к деградации зон обслуживания и обрыву связи [3]. Режим работы БС в полосе частот 10 МГц показан на рис. 1. Зеленым цветом обозначен полезный сигнал, красным – сигнал помехи.

При моделировании работы системы в полосе 10 МГц были выявлены следующие ситуации.

На обслуживаемом участке на секторах двух смежных БС для исключения помех оказалась использованной только полоса в 5 МГц (сектор одной БС на первых поднесущих 5 МГц (1790–1795 МГц), сектор другой БС – на оставшихся частотных поднесущих (1795–1800 МГц), что приведет к снижению пропускной способности. Без применения специальных мер, таких как настройка протоколов ICIC и CoMP, часть этого участка будет подвержена помехам от двух других ближайших к участку

БС, что создаст дополнительную деградацию зоны обслуживания. При этом система управления LTE дополнительно разобьет полосы частот на более узкие, что дополнительно сократит пропускную способность. Резко возрастет объем служебной информации, циркулирующей в каналах обмена между БС. Данный фактор вызовет дополнительное снижение информационной скорости передачи, что можно интерпретировать как потерю пропускной способности.

Учитывая, что специфической чертой построения объектов стандарта LTE является применение двухсекторных БС, размещаемых «в цепочке», целесообразно рассмотреть использование полосы частот шириной 5 МГц.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОСЫ 5 МГц И СТАНДАРТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ СЕТИ

■ Переход на работу в полосе 5 МГц дает два номинала частот, что несколько упрощает проблему ЭМС, поскольку в один и тот же момент времени все БС могут действовать только «на прием» или «на передачу».

Для наглядности работы БС, а также влияния помех на зоны обслуживания представим результаты расчета скорости передачи

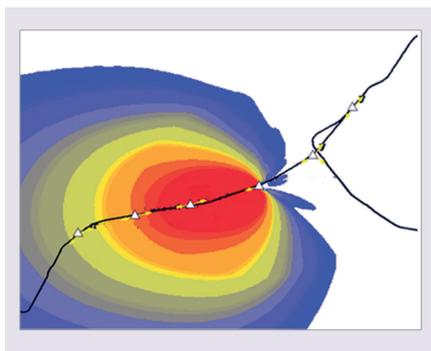


РИС. 2

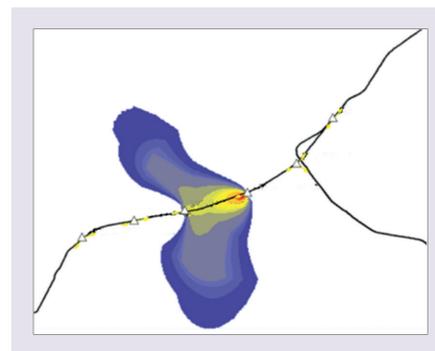


РИС. 3

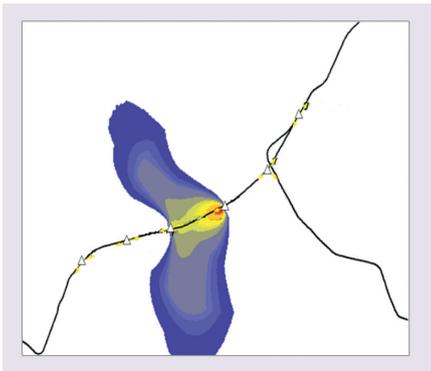


РИС. 4

без учета рельефа местности (конфигурация субкадра «0»). Скорость передачи по нисходящей линии для ситуации, когда на всем участке работает только одна БС, показана на рис. 2. В данном случае удовлетворяются все требуемые для построения сети условия, т.е. скорость передачи в прямом направлении (2 Мбит/с) обеспечивается практически на двух перегонах.

На рис. 2–5 приведены следующие цветовые обозначения: синим цветом показаны участки со скоростями до 1 Мбит/с; желтым – от 1 до 2 Мбит/с; оранжевым – от 2 до 3 Мбит/с, красным – свыше 3 Мбит/с.

Скорость передачи по нисходящей линии, когда все БС участка включены «на передачу», представлена на рис. 3. В этом случае зона обслуживания существенно сокращается и появляется влияние других секторов БС сети. При этом зона обслуживания для скорости передачи данных более 2 Мбит/с не перекрывает и половины перегона. Данная ситуация

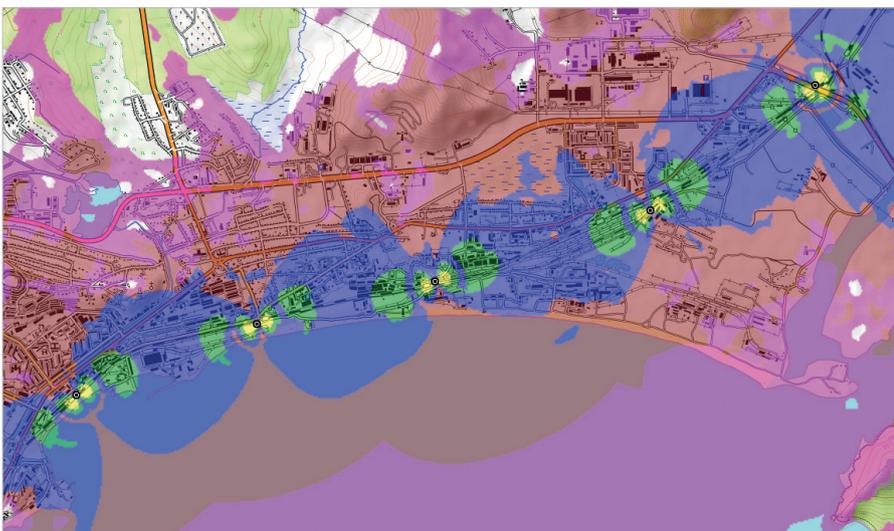


РИС. 6

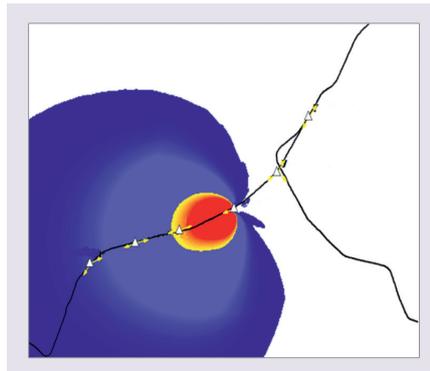


РИС. 5

показывает, что на большей части территории будет задействована модуляция QPSK, которая существенно снижает пропускную способность системы.

Для того, чтобы удовлетворить требования по скорости передачи, необходимо использовать иную конфигурацию субкадра. На рис. 4 и 5 показаны скорости передачи по DL и UL для конфигурации субкадра «1».

Таким образом, предварительные результаты показали, что для реализации требуемой пропускной способности на линиях вверх и вниз при стандартном режиме (все БС одновременно работают только «на прием» или «на передачу») и работе в двух полосах по 5 МГц целесообразно использовать конфигурацию субкадра «1».

#### СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

■ Зоны обслуживания и виды модуляции для каждой БС на примере городской застройки показаны на рис. 6 (желтый цвет – 64 QAM,

зеленый – 16 QAM, синий – QPSK). Используются двухсекторные антенны.

При моделировании данного участка были учтены требования, предъявляемые к сети радиосвязи железнодорожного транспорта, в том числе:

на границах зон обслуживания скорость передачи в радиоканале должна быть не менее 2 Мбит/с (DL) и 1 Мбит/с (UL);

вероятность радиодоступа по месту и времени должна составлять 95 %;

должны обеспечиваться двойное радиопокрытие зоны и соблюдаться ограничения по энергетическим условиям (40 Вт и 18 дБм для БС);

помехоустойчивость и др. [3].

При моделировании линейного участка, состоящего из пяти базовых станций, были получены результаты, представленные в табл. 2, где для сравнения даны теоретические (т) и экспериментальные (э) данные. Они показывают, что условия по скорости передачи выполняются как в полосе 5 МГц, так и в полосе 10 МГц.

Рассмотрим в качестве примера расчет скорости передачи данных для сигнально-кодовой конструкции QPSK1/3. Будем считать, что количество задействованных ресурсных блоков для полосы 5 МГц составляет 25, ресурсных элементов – 84, продолжительность – 5 мс. Согласно стандарту 3GPP количество бит на 1 символ равно 2, общая скорость передачи данных 8,4 Мбит/с.

Для расчета скорости по восходящему и нисходящему каналам необходимо предусмотреть коэффициент ошибки согласно выбранной сигнально-кодовой конструкции. Для сигнально-кодовой конструкции QPSK1/3 вероятность ошибки (FEC) равна 0,33. При этом скорость для DL и UL составит 1,12 Мбит/с.

Также можно найти уровень сигнала для данной сигнально-кодовой конструкции. Для этого необходимо определить сумму допустимых потерь на трассе распространения сигнала, мощности теплового шума в полосе приема, коэффициента шума приемника и отношения сигнал/помеха+шум. В результате уровень сигнала для QPSK1/3 будет равен –98,5 дБ.

№ БС	Ресурсные блоки		Ресурсные элементы	Продолжительность ресурсного элемента, с	Бит на символ	Общая скорость, Мбит/с		Скорость UL (э), Мбит/с		Скорость DL (э), Мбит/с		Скорость UL (т), Мбит/с		Скорость DL (т), Мбит/с	
	5 МГц	10 МГц				5 МГц	10 МГц	5 МГц	10 МГц	5 МГц	10 МГц	5 МГц	10 МГц		
БС1	25	50	84	0,0005	2	16,8	33,6	3,62	13,8	7,51	5,36	4,48	8,96	4,48	8,96
БС1–БС2	25	50	84	0,0005	4	8,4	16,8	4,38	12,2	5,97	4,28	1,12	2,24	1,12	2,24
БС2	25	50	84	0,0005	2	16,8	33,6	4,21	12,6	7,44	10,9	4,48	8,96	4,48	8,96
БС2–БС3	25	50	84	0,0005	4	8,4	16,8	3,56	13,3	6,3	4,84	1,12	2,24	1,12	2,24
БС3	25	50	84	0,0005	2	16,8	33,6	3,7	12,8	7,3	4,89	4,48	8,96	4,48	8,96
БС3–БС4	25	50	84	0,0005	4	8,4	16,8	1,1	13,1	3	6,2	1,12	2,24	1,12	2,24
БС4	25	50	84	0,0005	2	16,8	33,6	3,6	12,5	7,17	11,5	4,48	8,96	4,48	8,96
БС4–БС5	25	50	84	0,0005	4	8,4	16,8	3,5	13,1	4,7	4,56	1,12	2,24	1,12	2,24
БС5	25	50	84	0,0005	2	16,8	33,6	3,2	13,5	7,16	3,13	4,48	8,96	4,48	8,96

Анализируя полученные данные можно заметить, что в обеих полосах обеспечиваются требуемые скорости передачи как по восходящей, так и по нисходящей линиям. При расчетах учтены потери на свободное пространство, потери в зависимости от рельефа и на интерференцию, а также собственные потери. Но в ситуации выбора оптимальной полосы частот для проектирования важно учитывать и электромагнитную совместимость (ЭМС).

Таким образом, при работе в полосах по 5 МГц достигаются преимущества: не требуется организация сложного информационного взаимодействия между БС, упрощается инфраструктура и настройка сети, обеспечивает-

ся резервирование на границах зоны обслуживания, увеличивается дальность обслуживания абонентов в сети. Вместе с тем при работе в полосе 10 МГц наблюдаются такие особенности, как возможность использования всего ресурса канала для «приоритетного» абонента и более «гибкое» распределение ресурсных блоков.

Учитывая дефицит частотного ресурса, приведенные результаты расчетов показывают пути возможной оптимизации частотного спектра в необходимых случаях.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Интернет-ресурс <https://1234g.ru/4g/lte/fizicheskij-uroven-standarta-lte/fizicheskij-uroven-setej-lte>

2. TS 122 289-V17.0.0-LTE; 5G; Mobile communication system for railways (3GPP TS 22.289 version 17.0.0 Release 17). France, ETSI, 2022.

3. ГОСТ 33973-2016 межгосударственный стандарт. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля. Railway electric communication. Train radio communication. Technical requirements and methods of control. 01.09.2017 г.

4. ПНСТ 828-2023 предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Устройства и системы электросвязи для систем управления железнодорожным подвижным составом в автоматическом и дистанционном режимах. Общие технические требования. Telecommunication devices and systems for railway rolling stock control systems in automatic and remote modes. General technical requirements. С 10.10.2023 до 10.10.2026 г.

