

Методика использования частотного ресурса при проектировании железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD

Д.П.Лобеев, аспирант кафедры "Электрическая связь" Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I / mladkevich@mail.ru

УДК 656.241.1:654.165, DOI: 10.22184/2070-8963.2025.128.4.58.68

При проектировании цифровой сети технологической железнодорожной радиосвязи на основе стандарта LTE-1800 TDD, а также при частотно-территориальном планировании наиболее актуальны задачи использования частотного ресурса и обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) системы. В статье рассмотрены актуальные аспекты построения сети, а также предлагается вариант использования частотного ресурса для железнодорожного транспорта с учетом ЭМС.

Сеть LTE по своей сути является адаптивной системой и ее начальная конфигурация и настройка существенным образом могут повлиять на скорости передачи в зонах обслуживания сети после развертывания. Начальная конфигурация и настройка должны в полной мере соответствовать предполагаемым условиям и специфике ее работы [1]. Но в ситуации выбора оптимальной полосы частот для проектирования важно учитывать электромагнитную совместимость.

Сеть стандарта LTE, как адаптивная система, способна самостоятельно решать возникающие проблемы ЭМС. Под "проблемой ЭМС" в данном случае понимается ситуация, когда на входе приемника абонентской или базовой станции на узкополосных несущих

принимаемого ресурсного блока (одного или нескольких) образуются дополнительные совпадающие несущие от другого передатчика этой радиосети. "Проблема ЭМС" наиболее остро стоит при развертывании сетей на железной дороге.

Условия применения и основные характеристики технологической сети железнодорожной радиосвязи стандарта LTE в полосе радиочастот 1785–1805 МГц определены в Решении Госкомиссии по радиочастотам (ГКРЧ) №18-46-02 от 11.09.2018 года [2]. Стандартом LTE определены шесть вариантов ширины используемых полос частот, однако упомянутое решение ГКРЧ предусматривает использование полосы шириной не более 10 МГц. Следовательно, необходимо использовать вариант из набора: 1,4 МГц; 3; 5 и 10 МГц.

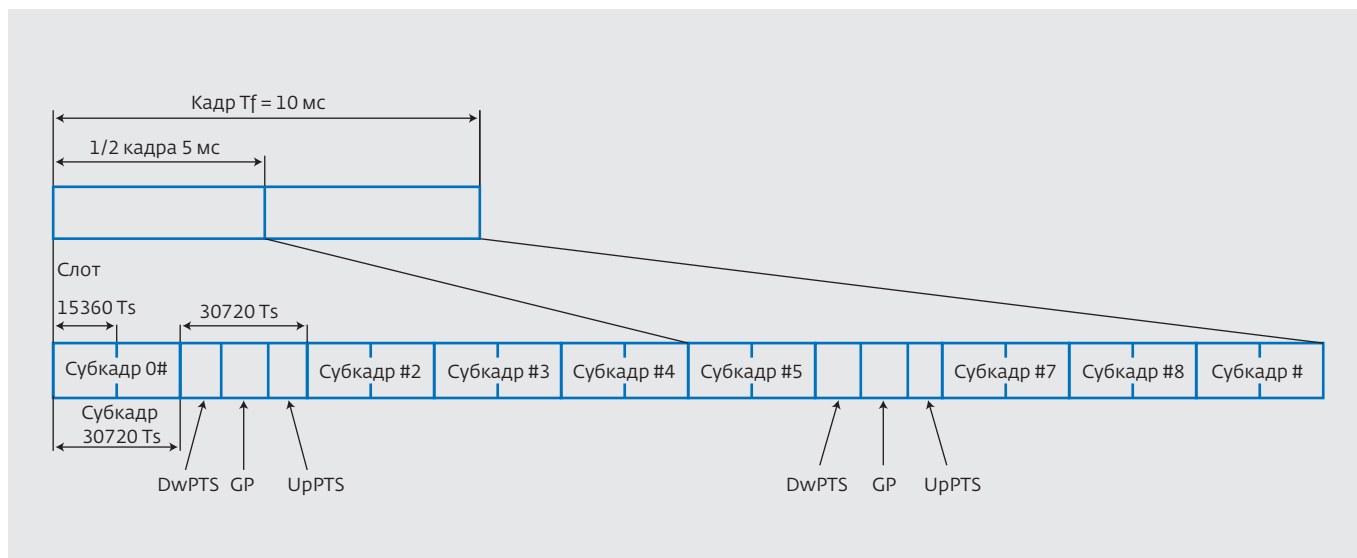


Рис.1. Структура кадра при временном дуплексе

На физическом уровне в стандарте LTE применяется технология OFDMA – мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов – с модуляцией QPSK, 16QAM, 64QAM. При этом максимальное количество поднесущих частот в рабочей полосе достигает 2048. Передача по радиоканалу производится кадрами длительностью 10 мс.

Кадры в LTE подразделяются на два типа:

- с частотным дуплексом (FDD);
- с временным дуплексом (TDD).

Так как в решении ГКРЧ тип дуплекса определен как TDD, то далее будем рассматривать структуру кадра с временным дуплексом. Она показана на рис.1.

Кадр длиной 10 мс включает в себя 10 субкадров длиной 1 мс, содержащих: передачу вниз (D), передачу вверх (U), а также специальные субкадры (S), в состав которых входят три поля: UpPTS – поле передачи вверх, DwPTS – поле передачи вниз и GP – защитный интервал. Конфигурации, определенные стандартом LTE, представлены в табл.1.

Поскольку между поднесущими расстояние составляет $\Delta f = 15$ кГц, длина OFDM-символа

равна $\frac{1}{\Delta f} \approx 66,7$ мкс. Половина субкадра (слот длитель-

ностью 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 $160T_s \approx 5,2$ мкс перед первым символом и $144T_s \approx 4,7$ мкс перед остальными символами. Возможен также вариант применения расширенного

циклического префикса $512T_s \approx 16,7$ мкс. Пример структуры слота на физическом уровне представлен на рис.2.

Так как основным информационным носителем является ресурсный блок (РБ), то пропускная способность сектора базовой станции (БС) LTE определяется числом доступных РБ. Максимальное число РБ для каждой табулированной полосы частот LTE представлено в табл.2. В предположении, что каждый ресурсный элемент (РЕ) РБ несет 6 бит информации (модуляция 64QAM), можно получить оценку суммарной (предельной) пропускной способности

Таблица 1. Конфигурации кадра при TDD

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

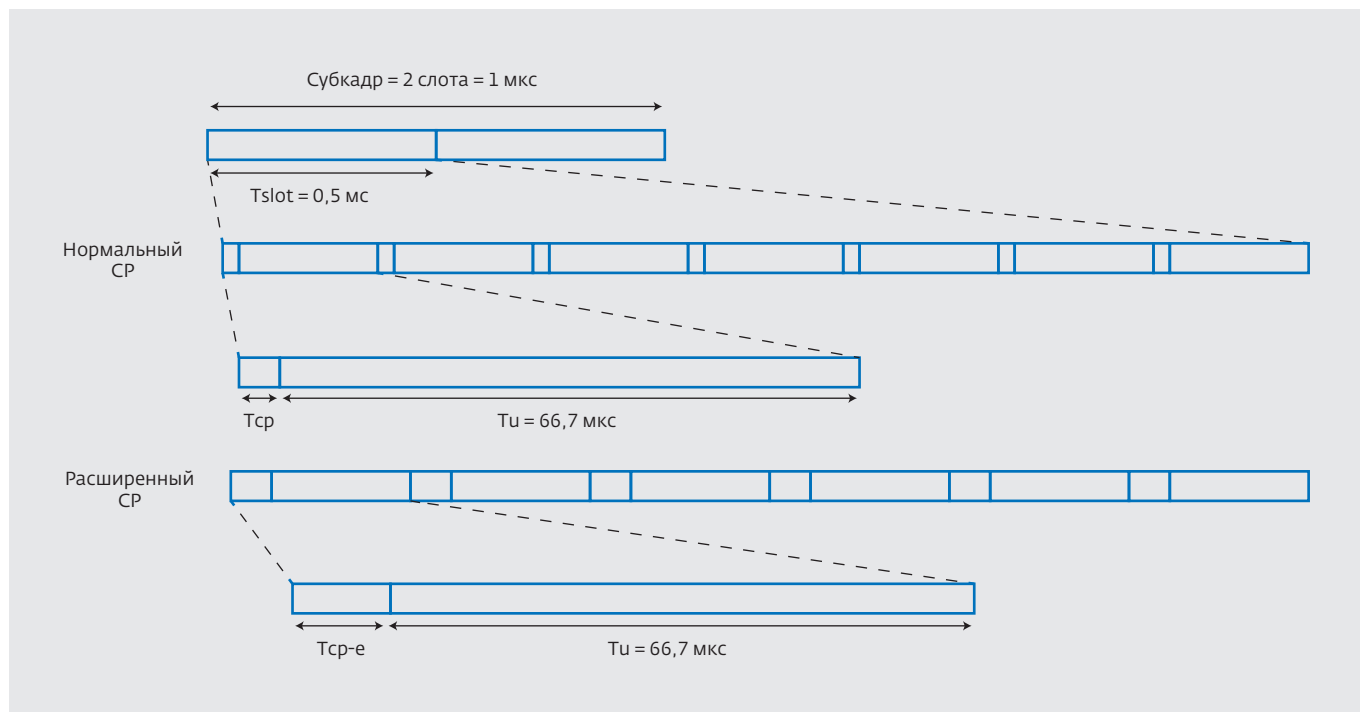


Рис.2. Структура слота на физическом уровне

LTE в зависимости от ширины используемой полосы (см. табл.2).

Представленные в табл.2 значения предельной пропускной способности определены с учетом модуляции 64QAM и без учета потерь на кодирование и процента ресурсных элементов, используемых для передачи служебной информации. Эти потери могут снизить пропускную способность LTE на 20–30%.

Предельная пропускная способность включает передачу в обоих направлениях (и в "восходящем", и в "нисходящем" каналах) с учетом дополнительных потерь на TDD, составляющих 10–20%.

Теоретические значения отношения "сигнал / помеха + шум" (SINR) для всех вариантов сигнально-кодовых конструкций, предусмотренных в LTE, представлены в табл.3. Там же введен запас

Таблица 2. Зависимость числа РБ от ширины полосы пропускания

Полоса, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число РБ макс.	6	15	25	50	75	100
Число поднесущих макс.	72	180	300	600	900	1200
Эффективная полоса (В), МГц	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18
Мощность теплового шума (КТВ) в полосе В, дБм	-113	-109	-107	-104	-102	-101
Пропускная способность, Мбит/с: нормальный префикс расширенный префикс	6,05 5,2	15,12 12,96	25,2 21,6	50,4 43,2	75,6 64,8	100,8 86,4

Таблица 3. Значения SINR для разных видов модуляции

Модуляция	№	FEC	SINR, дБ	IM, дБ	SINR+IM, дБ
QPSK	0	1/8	-5,1	2,5	-2,6
	1	1/5	-2,9		-0,4
	2	1/4	-1,7		0,8
	3	1/3	-1,0		1,5
	4	1/2	2,0		4,5
	5	2/3	4,3		6,8
	6	3/4	5,5		8,0
	7	4/5	6,2		8,7
16QAM	8	1/2	7,9	3	10,9
	9	2/3	11,3		14,3
	10	3/4	12,2		15,2
	11	4/5	12,8		15,8
64QAM	12	2/3	15,3	4	19,3
	13	3/4	17,5		21,5
	14	4/5	18,6		22,6

на практическую реализацию (Implementation Margin – IM), так как на практике не всегда удается достигнуть теоретических пределов. Результирующее значение SINR, используемое при расчетах, должно включать значение запаса IM [3].

При использовании технологии OFDMA весь имеющийся спектр разбивается на поднесущие, ортогональные друг другу. В зависимости от используемой ширины канала общее количество поднесущих может быть 72, 180, 300, 600, 900 или 1200. Каждая из поднесущих может иметь свой вид модуляции. Могут использоваться следующие виды модуляции: QPSK, 16QAM, 64QAM. Множественный доступ организуется за счет того, что одна часть поднесущих выделяется одному пользователю в кадре, другая часть – второму пользователю и т.д. [4].

Основной плюс технологии OFDMA заключается в том, что она позволяет бороться при приеме сигнала

с негативными эффектами, вызванными многолучевым распространением. Однако этой технологии также присущи и некоторые недостатки. Основные из них заключаются в том, что она очень чувствительна к синхронизации по частоте, а также, сгенерированный OFDMA сигнал обладает высоким PARP (Peak to Average Ratio). Это, в свою очередь, сказывается на том, что используемый усилитель сигнала будет работать в нелинейных участках своей характеристики. Поэтому его эффективность будет низкой, что достаточно критично для устройств с ограниченным запасом энергии (мобильных терминалов). Из-за этого в восходящем канале LTE используется другая технология множественного доступа – SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Отличие SC-FDMA от OFDMA заключается в том, что в SC-FDMA в качестве дополнительной обработки сигнала используется преобразование Фурье. Так же, как и в нисходящем канале,

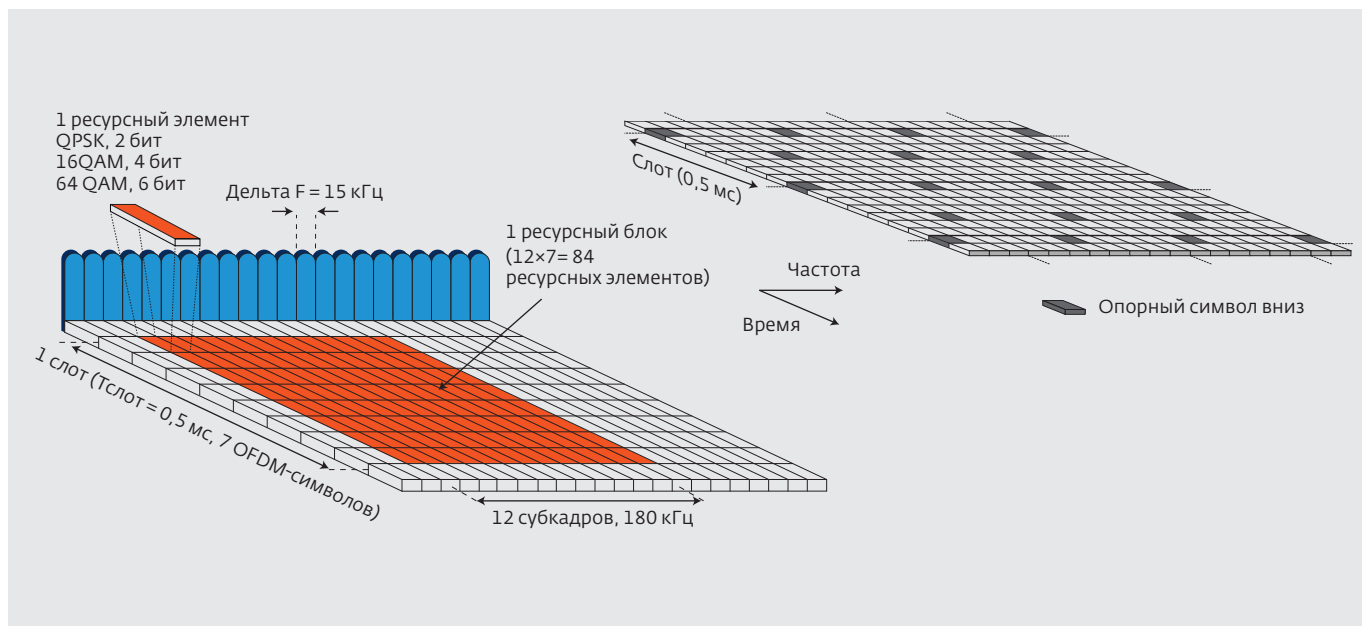


Рис.3. Структура ресурсного блока при передаче "вниз"

в восходящем канале могут использоваться следующие виды модуляции: QPSK, 16QAM, 64QAM.

Канальный ресурс

Существующий каналный ресурс состоит из ресурсных блоков (РБ), каждый из которых включает 12 расположенных рядом поднесущих, занимающих полосу 180 кГц, и одного временного слота (7 или 6 OFDM-символов на интервале 0,5 мс). Каждый OFDM-символ представляет собой ресурсный элемент (РЭ), параметрами которого являются два значения: $\{k, l\}$, где k – номер поднесущей, а l – номер символа в ресурсном блоке. Во время передачи по линии "вниз" в каждом блоке находится $12 \times 7 = 84$ ресурсных элемента, некоторые из которых применяют для отправки опорных символов (рис.3). Выделяемый каналный ресурс определяют количеством ресурсных блоков или групп ресурсных блоков [5].

Следует учитывать, что скорость передачи сокращается, поскольку часть ресурса занимают опорные символы и управляющие каналы. Опорные символы используют для реализации когерентной демодуляции и оценки каналов. Во время передачи по линии "вниз" на базовой станции могут функционировать до четырех антенн. При этом каждой антенне выделены фиксированные ресурсные элементы для передачи опорных символов. Рис.4 поясняет расположение опорных символов в ресурсном блоке, где символами, помеченными R0,

являются символы, передаваемые антенной 0, символы R1 передаются антенной 1, R2 – антенной 2, R3 – антенной 3.

Канальный ресурс по линии "вверх" (UL) выделяют также ресурсными блоками (12 поднесущих общей

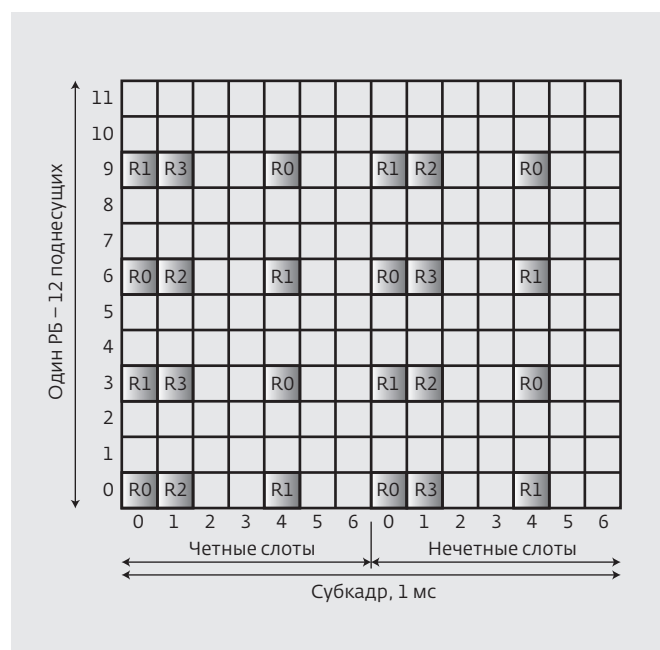


Рис.4. Расположение опорных символов в ресурсном блоке во время передачи по линии "вниз" (DL)

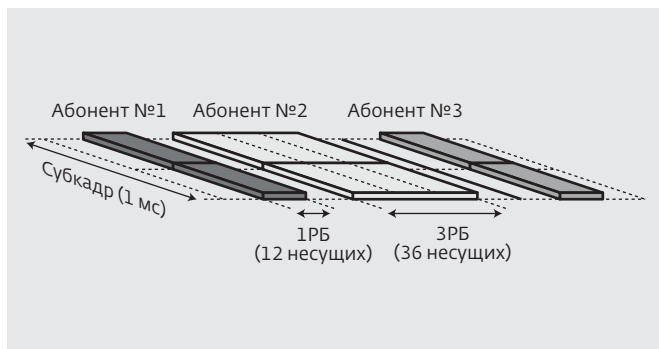


Рис.5. Распределение канального ресурса на линии "вверх"

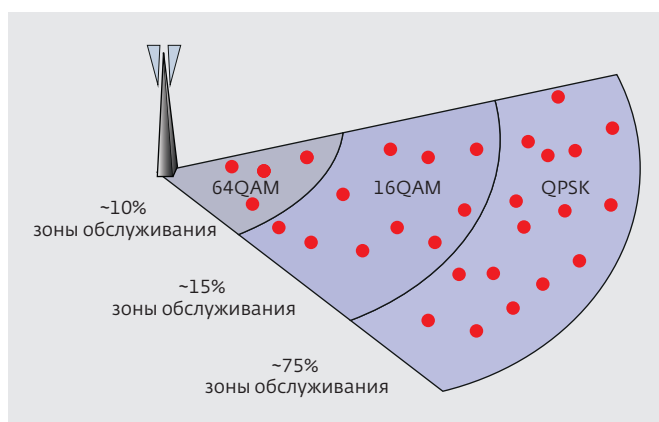


Рис.6. Зона обслуживания при проектировании сетей

полосой 180 кГц в слоте) и субкадрами длительностью 1 мс с 7 или 6 OFDM-символами в каждом слоте. Во время передачи по линии "вверх" применяют измененную технологию OFDMA, а фактически производят передачу широкополосного сигнала на одной несущей. Данная технология называется SC-FDMA. Пример распределения канального ресурса приведен на рис.5.

Требования для проектирования сетей

На рис.6 показана зона обслуживания БС с распределением модуляции внутри зоны.

Требования к профессиональной радиосвязи намного жестче, чем требования, предъявляемые к сетям общего пользования ввиду обеспечения безопасности движения поездов. В частности, для железнодорожной радиосвязи также предъявляются более жесткие требования, поскольку она используется в обеспечении безопасности движения поездов [6]. В числе их:

- на границах зон обслуживания скорость передачи данных в радиоканале должна быть не менее

2 Мбит/с (DL) и 1 Мбит/с (UL). В аварийном режиме (при выходе из строя БС) допускается снижение минимальной скорости на границах зон обслуживания;

- вероятность радиодоступа по месту и времени должна составлять 95%;
- надежность канала;
- обеспечение двойного радиопокрытия зоны;
- ограничения по энергетическим условиям (40 Вт и 18 дБм для БС);
- помехоустойчивость и др.

На опытных полигонах, где развернута сеть на основе стандарта LTE-1800 TDD, предъявляются следующие требования по пропускной способности канала: для "восходящего" канала (UL) – 1 Мбит/с, для "нисходящего" – 2 Мбит/с. Исходя из требований, для достижения требуемых скоростей на всем участке развертывания, необходимо использовать полосы шириной либо 5 МГц, либо 10 МГц. Но в ситуации "проблемы ЭМС", предпочтительнее использовать полосу шириной 5 МГц для обеспечения предъявляемых требований [7].

Использование полосы 5 МГц и стандартный режим работы сети

Работа в полосе 5 МГц дает по сути два номинала частот, что несколько упрощает проблему ЭМС.

Проведем анализ основных источников и направлений прихода помех.

Типовой (определенный стандартом) режим работы базовой станции сети LTE заключается в том, что в один и тот же момент времени все БС синхронно работают или только "на прием" или только "на передачу" [8].

Предположим, что в момент времени t_1 все БС работают только "на передачу". На рис.7а представлен такой сценарий, когда абонентская станция (АС) принимает сигнал (С) на частоте F1 от антенны "левого" сектора БС3. При этом на вход приемника АС поступают излучения (J) от секторов, работающих на излучение на этой же частоте. При этом наибольшую мощность имеет излучение от соответствующего сектора БС-4. Но и другие излучения от "сонаправленных" секторов имеют значение.

В следующий момент времени t_2 все БС переходят в режим работы "на прием" (рис.7б). В этом случае сигналом для соответствующего приемника на БС-3 будет излучение расположенной на обслуживаемом участке абонентской станции (АС). При этом работа на излучение других АС на других участках может создавать помехи.

Проведем сравнительный анализ качественных характеристик работы сети LTE при различных

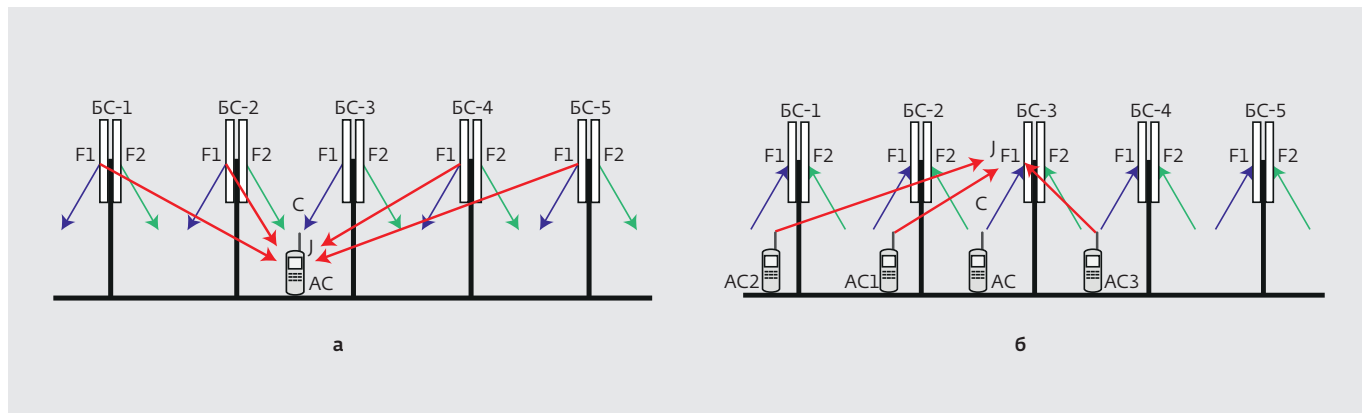


Рис.7. Источники помех при стандартном режиме работы БС: а – момент времени t_1 , когда все БС работают "на передачу"; б – момент времени t_2 , когда все БС работают "на прием"

режимах и условиях. Для такого сравнительного анализа построим карты распределения значений отдельных параметров.

Для более наглядного представления влияния помех на зоны обслуживания расчет на этом этапе проведем без учета рельефа местности (т.е. на "гладкой сфере"). На этом этапе будем использовать конфигурацию субкадра №0, обеспечивающую более привилегированные условия для обратного канала.

На рис.8 представлена карта распределения пропускной способности западного сектора БС 03 применительно

к носимой АС без учета помех от других БС (все остальные БС выключены) на линейном участке.

Из рис.8 видно, что в идеальных условиях требуемая скорость передачи в прямом направлении (2 Мбит/с) обеспечивается практически на двух перегонах, вплоть до БС 02.

"Включим на передачу" все БС сети и построим карту распределения пропускной способности с учетом внутрисистемной ЭМС в соответствии с типовым режимом работы сети (все БС работают на передачу или прием

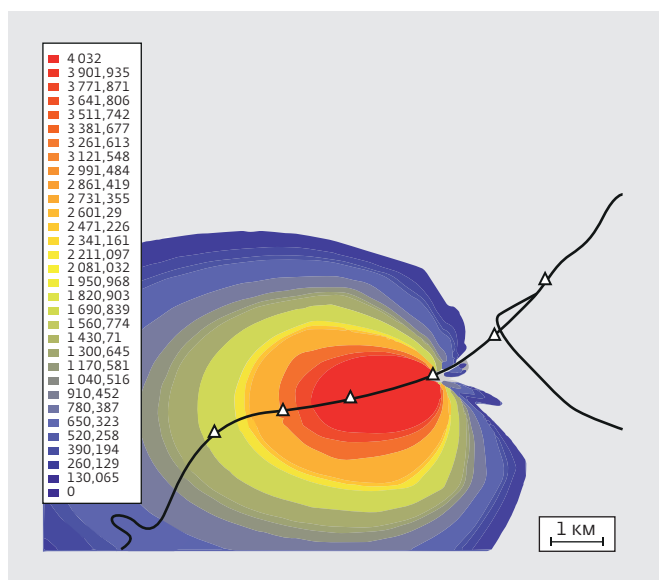


Рис.8. Скорость передачи в прямом направлении (Down) на носимые АС без учета помех от других БС, конфигурация кадра №0

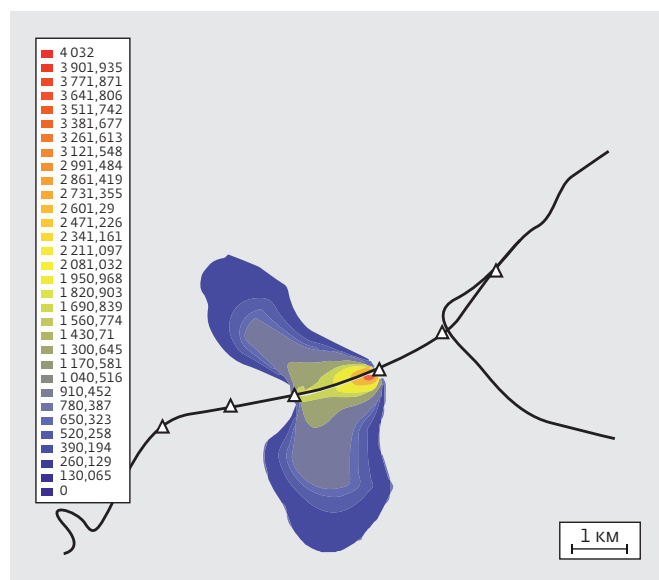


Рис.9. Скорость передачи в прямом направлении (Down) на носимые АС с учетом помех от других БС, конфигурация кадра №0

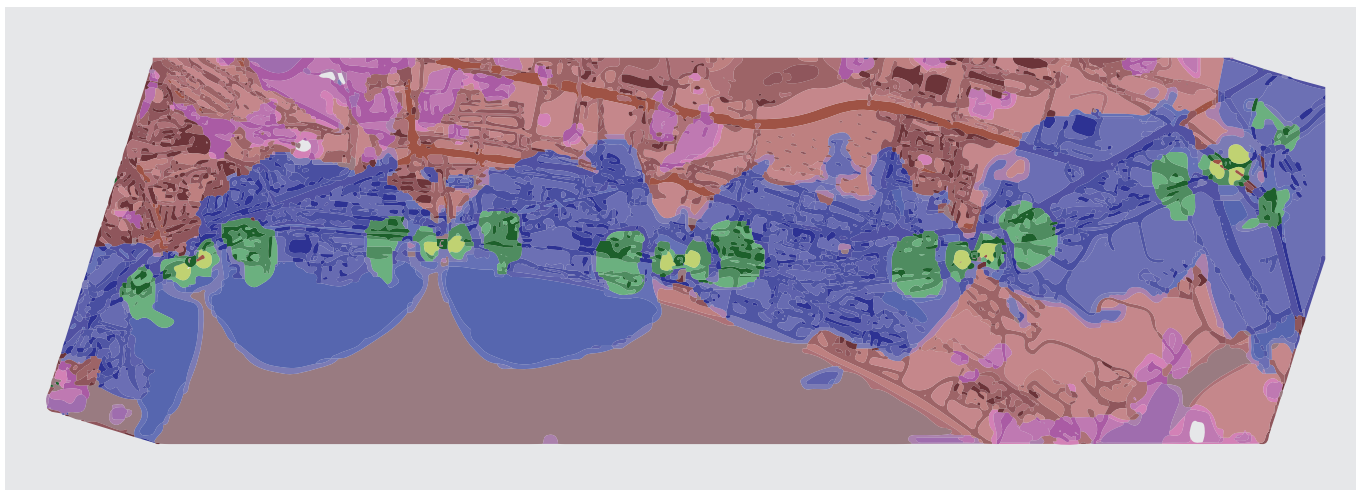


Рис.10. Карта распределения доступных видов модуляции на линии вниз при учете внутрисистемных помех (зеленый цвет – 16 QAM, синий цвет – QPSK)

синхронно и одновременно). Результат представлен на рис.9.

На нем мы видим, что размер зоны обслуживания, где обеспечивается требуемая скорость передачи, сократился в разы. Зона обслуживания для скоростей передачи более 2 Мбит/с не перекрывает и половины основного участка. Очевидно, что это связано с воздействием помех от других секторов других БС этой сети. Максимальное значение SINR составляет около 18 дБ. А работа с модуляцией 64QAM, обладающей максимальной спектральной эффективностью, возможна при значениях SINR более 19 дБ. Следовательно, при стандартном режиме работы сети LTE работа на линии "вниз" модуляцией 64QAM маловероятна.

В качестве примера на рис.10 представлена карта распределения доступных видов модуляции на линии вниз при учете внутрисистемных помех (зеленый цвет – 16 QAM, синий – QPSK). Из рисунка видно, что на большей части зоны обслуживания будет использована модуляция QPSK, что существенно снижает пропускную способность системы.

Так как требования по скорости передачи не хуже 2 Мбит/с на линии вниз не выполняются, единственным вариантом решения проблемы является переход на другую конфигурацию субкадра, в частности на №1, обеспечивающую равные возможности для линии "вверх" и "вниз".

На рис.11 представлена карта распределения пропускной способности в прямом направлении (Down) на носимые АС с учетом помех от других БС, при конфигурации кадра №1.

Как видно из этого рисунка, при использовании конфигурации №1 в прямом направлении на всем перегоне обеспечивается требуемая скорость передачи не менее 2 Мбит/с.

Однако переход с конфигурации №0 на конфигурацию №1 может ухудшить ситуацию в обратном канале (Up) на линии "вверх". Для оценки данной ситуации на рис.12 представлена карта распределения пропускной способности на линии "вверх" для варианта конфигурации субкадра.

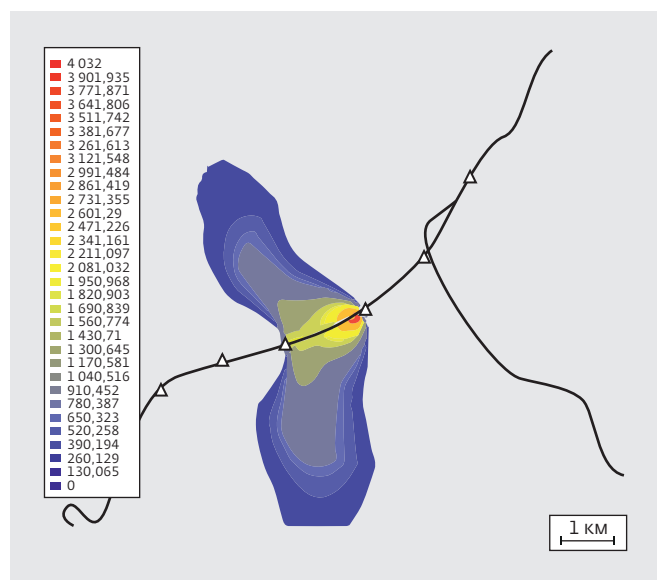


Рис.11. Скорость передачи в прямом направлении (Down) на носимые АС с учетом помех от других БС, конфигурация кадра №1

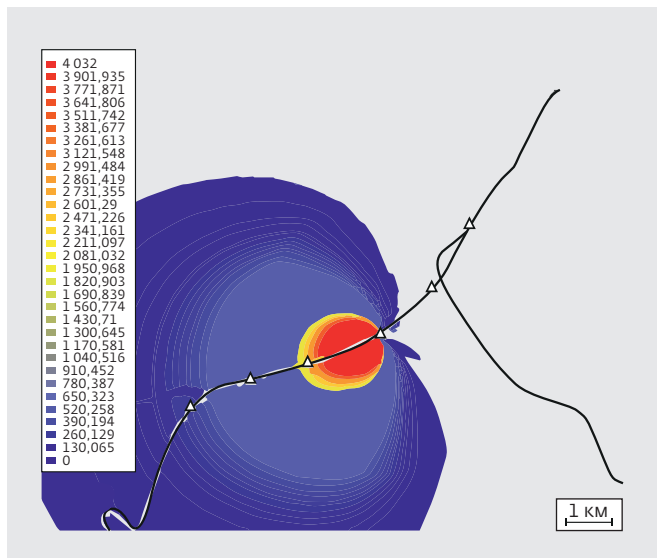


Рис.12. Скорость передачи в обратном направлении (U_p), носимые АС, конфигурация кадра №1

Из рис.11 и 12 видно, что несмотря на снижение пропускной способности обратного направления, требования по скорости передачи (не менее 1 Мбит/с) выполняются для обоих вариантов конфигурации.

Таким образом, предварительные расчеты показали, что для реализации требуемой пропускной способности на линиях "вверх" и "вниз" при стандартном режиме работы сети LTE (все одновременно работают только на прием или только на передачу) и работе в двух полосах по 5 МГц целесообразно использовать вариант конфигурации субкадра №1.

Использование полосы 5 МГц и оптимальный режим работы сети

Как было показано выше, основная проблема в снижении реальной пропускной способности сети LTE при ее стандартном режиме работы заключается в воздействии внутрисистемных помех, ограничивающих использование сигнально-кодовых конструкций с высокой спектральной эффективностью. Данная проблема может быть частично решена при некотором изменении режима работы сети. В частности, если при стандартном режиме работы все БС сети одновременно работают либо только "на прием", либо только "на передачу", то при "оптимальном" (с точки зрения ЭМС) режиме работы "на передачу" и "на прием" должны чередоваться от станции к станции. Например, в момент времени t_1 все четные БС работают "на передачу", а нечетные – "на прием". И наоборот, в следующий момент времени t_2 четные БС работают "на прием", нечетные – "на передачу".

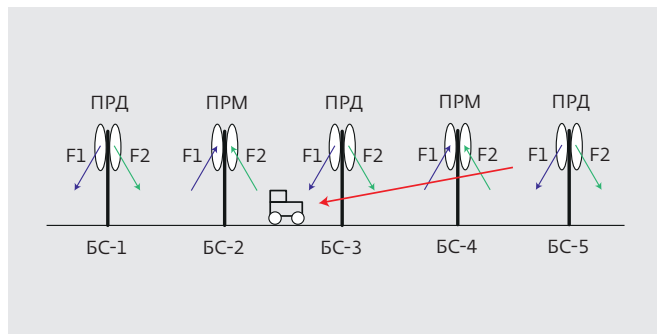


Рис.13. Частотно-территориально-временной план сети

Поясняющая картинка представлена на рис.13. Основную составляющую помехи на линии "вниз" будет создавать сонаправленный сектор базовой станции 5, которая расположена через одну БС-4. Источниками помех могут быть также и абонентские станции, расположенные на соседних участках.

На линии "вверх" помеху создают две смежные БС. К существенной деградации не приводит излучение от соседнего (левого) сектора БС, а также значения SINR на входе АС, так как происходит значительное ослабление излучения ДН антенны в направлении АС. Равно как и излучение другой смежной БС-2 ослаблено примерно на такую же величину, так как рецептор помехи расположен с обратной стороны от направления ее электрической оси.

Наибольшую угрозу представляет сектор БС, расположенный правее от участка. Для оценки влияния этого сектора на ЭМС можно представить следующую ситуацию: АС расположена на границе зоны обслуживания (рядом с БС-2) и расстояния между БС одинаковы. Значения отношения мощности сигнала к мощности помехи практически совпадают со значением отношения потерь передачи на участках от БС-3 и БС-5. В качестве модели распространения радиоволн использовалась Рекомендация МСЭ-R P.1546. Проведенные расчеты показали, что значение отношения сигнал/(помеха+шум) для нашего случая составит от 15 дБ до 18 дБ при дальности между БС до 1,5 км.

На рис.14 представлена карта распределения пропускной способности линии "вниз" для оптимального режима работы сети. Как видно из рисунка, пропускная способность при оптимальном режиме работы увеличивается практически в два раза.

Для реализации такого частотно-временного плана необходимо использовать конфигурацию субкадра №1. В частности, на рис.15 показан пример работы двух

**11-12
СЕНТЯБРЯ
НОВОСИБИРСК**

V Международная выставка-форум



ПРОБЕЗОПАСНОСТЬ 2025
отраслевые решения систем безопасности

**ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ
СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИИ
ВОЗМОЖНОСТИ И ПРЕПЯТСТВИЯ**

80 ВЕДУЩИХ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

2000 УЧАСТНИКОВ
И ЭКСПЕРТОВ

50 НАПРАВЛЕНИЙ
ПО БЕЗОПАСНОСТИ

При поддержке Правительства Новосибирской области



Правительство
Новосибирской области

PROtech



**НОВОСИБИРСК
ЭКСПО ЦЕНТР**



Контакты организатора

Верещагин Сергей Владимирович
Телефон: +7-913-208-72-80
E-mail: sv@pro-tek.pro

Зарегистрироваться



форумпробезопасность.рф

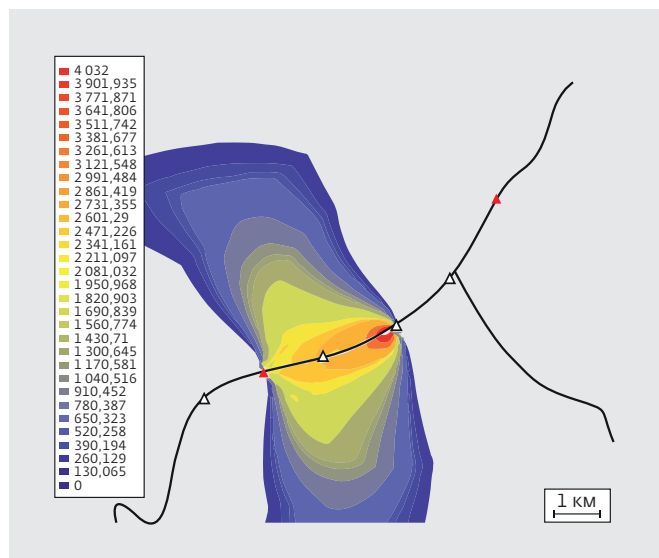


Рис.14. Карта распределения пропускной способности на линии "вниз" с учетом помех, конфигурация кадра №1

смежных БС с вариантом конфигурации №1 и синхронизацией режимов приема/передачи.

Из рис.15 видно, что для реализации частотно-временного плана достаточно обеспечить относительный сдвиг субкадров смежных БС на величину половины его длительности. Если длительность радиокadra 10 мс, то требуемый сдвиг составит 5 мс. При этом циклы приема и передачи на смежных БС будут разные. Исключение составляет субкадр S со специальными полями. Однако, чередование данного субкадра с режимами приема и передачи соседней БС позволяет минимизировать последствия.

Заключение

Таким образом, для проектирования сети стандарта LTE в составе пяти БС в виду ограниченного частотного ресурса, а также проблемами ЭМС при работе в полосе 10 МГц, предлагается использование двух полос по 5 МГц с конфигурацией субкадра №1. Режим работы БС сети LTE рекомендуется "оптимальный", когда режимы приема и передачи базовых станций чередуются от одной БС к другой. Если это реализовать не представляется возможным, то необходимо использовать стандартный режим, когда все БС работают одновременно и синхронно либо только "на прием", либо только "на передачу".

Также можно рассмотреть режим SFN (Single Frequency Network), в котором БС могут объединяться в группу "соправленных" и работать совместно в одном направлении (одним сектором) по одному азимуту, тем самым улучшая ЭМС. Но важно понимать, что все "верхние"

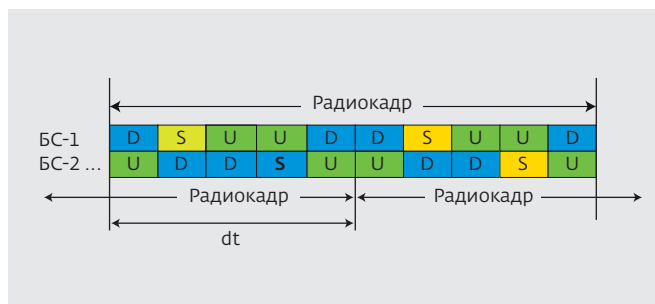


Рис.15. Временная синхронизация режимов работы БС

выделенные частоты будут работать для всех нечетных абонентов, а все "нижние" – для четных. В таком случае будут выполняться требуемые технические условия, условия ЭМС и условия резервирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тараненко А.Ю., Гриценко А.А., Лобеев Д.П. Оптимизация использования частотного спектра // Автоматика. Связь. Информатика. 2025 № 1. С. 9–12.
2. Решение ГКРЧ при Минкомсвязи России от 11.09.2018 № 18-46-02 (с изм. от 23.12.2022) "О выделении полосы радиочастот 1785–1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте.
3. ГОСТ 33973-2016. Межгосударственный стандарт. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля. М.: Стандартинформ, 2017.
4. Скрынников В.Г. Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика. М.: Спорт и Культура–2000, 2012. 864 с.
5. 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. М.: Российский институт стандартизации, 2023.
6. TS 122 289-V17.0.0 LTE; 5G; Mobile communication system for railways (3GPP TS 22.289 version 17.0.0 Release 17). ETSI, 2022. 19 p.
7. Физический уровень сетей LTE [Электронный ресурс]. URL: <https://1234g.ru/4g/lte/fizicheskij-uroven-standarta-lte/fizicheskij-uroven-setej-lte> (дата обращения 18.01.2025).
8. LTE The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. 2nd edition. John Wiley & Sons, 2011. 792 p.

rus-elektronika.ru



ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ

Международная ВЫСТАВКА-ФОРУМ

25|26|27
НОЯБРЯ
2025 МОСКВА
Крокус Экспо



12+

Организатор:



Официальная поддержка:



Партнеры:



**ЗАБРОНИРУЙТЕ
СТЕНД:**

+7 (812) 401 69 55,
electron@mvk.ru