

УДК 621.391.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СОВМЕЩЕНИЯ СЕТЕЙ ДВУХ СТАНДАРТОВ — GSM И LTE — В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 1800 МГц

В. Г. Скрынников, эксперт ОАО «Мобильные ТелеСистемы», к.т.н.; skvg@mts.ru

Предложен метод совмещения сетей двух стандартов — GSM и LTE — при реализации принципа технологической нейтральности в диапазоне частот 1800 МГц. Проведенное исследование позволило обосновать наиболее рациональное распределение радиочастотного спектра, имеющегося у оператора связи, между этими сетями. Показано, что такое распределение приводит к необходимости применения в сети GSM стандартизированной процедуры псевдослучайной перестройки рабочих частот (ППРЧ). Методами аналитического расчета в сочетании со статистическим моделированием на программной платформе SEAMCAT оценены количественные характеристики возможного ухудшения связи в исследуемых сетях. На основе полученных характеристик сформулирована практическая рекомендация по рациональному совмещению сетей GSM и LTE в диапазоне частот 1800 МГц в России.

**Ключевые слова:** LTE (Long Term Evolution), радиочастотный спектр, совмещение сетей связи двух стандартов, псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ), вероятность совпадения частот при ППРЧ, вероятность ухудшения связи.

**Введение.** Диапазон радиочастот 1800 МГц, использовавшийся до недавнего времени только в сетях сотовой связи GSM, в последние годы привлекает особое внимание в связи с появлением сетей стандарта LTE (Long Term Evolution). На радиочастотах этого диапазона можно одновременно обеспечить и высокую пропускную способность, и хорошее радиопокрытие.

Данный диапазон радиочастот сегодня широко используется в мире коммерческими сетями LTE [1]. Принятие Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) решения о технологической нейтральности диапазона частот 1800 МГц открыло возможность его использования для строительства сетей LTE на территории России [2]. Однако на начальном этапе, когда сохраняются действующие сети GSM, сложно перераспределить рационально имеющийся у российских операторов связи радиочастотный ресурс между сетями двух стандартов. Этот факт обуславливает проблему совмещения сетей двух стандартов в общем диапазоне частот. При этом важно получить высокую производительность новой сети LTE при ширине канала не менее 10 МГц и потерять по минимуму в производительности существующей сети GSM. При таком условии задача оптимизации использования ограниченного радиочастотного ресурса в совмещенных сетях GSM-1800 и LTE-1800 представляется крайне важной.

Одним из приемлемых решений такой задачи может стать применение в совмещаемой сети GSM стандартизированной процедуры псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ). Эта процедура, получившая в стандартах GSM название Frequency Hopping (FH) [3—5], не столько носит практический (организационно-технический) характер, сколько является предметом теоретических исследо-

ваний. Как будет рассмотрено ниже, взаимодействие двух сетей разных стандартов приводит к решению принципиально новой теоретической задачи, изменяющей известные результаты из области совмещения сетей GSM за счет введения режима ППРЧ [6, 7].

**Текущие условия.** Проведенный анализ показал, что сегодня у российских операторов в сетях GSM-1800 доступным является частотный ресурс в дуплексных полосах радиочастот  $2 \times 14,4$  МГц и более (в ряде случаев), а в среднем он составляет  $2 \times 14,8$  МГц [8]. На рис. 1 приведены возможные сценарии его распределения между совмещаемыми сетями.

В соответствии с текущей стратегией операторов связи указанный частотный ресурс обеспечивает построение сети с конфигурацией  $4 \times 3 \times 4$  (кластер из 4 сот, по 3 сектора в каждой соте и по 4 частоты в каждом секторе) (рис. 1, а). Количество частотных каналов в каждом секторе такого кластера условно назовем емкостью кластера сети GSM.

Выделение непрерывной полосы 4,5 МГц для сети LTE со стандартизированной шириной канала 5 МГц не повлечет за собой изменения конфигурации каналов GSM, позволив сохранить первоначальную емкость кластера (100%) (рис. 1, б). Однако при этом пропускная способность сети LTE будет составлять лишь 50% от потенциально эффективного показателя при ширине канала 10 МГц [9].

Чтобы достичь этого показателя для сети LTE со стандартизированной шириной канала, потребуется выделить активный ресурс 9 МГц. Но такое перераспределение ресурса приведет к уменьшению конфигурации каналов в сети GSM, число частотных каналов в каждом секторе сократится вдвое, емкость кластера составит 50% от первоначального значения (рис. 1, в).

В качестве компромиссного решения рассматривается увеличение снизившейся емкости кластера сети GSM за счет введения процедуры ППРЧ, позволяющей сохранить первоначальное количество частотных каналов (по 4 канала) в каждом секторе при меньшем частотном ресурсе.

Особенности введения процедуры ППРЧ (рис. 1, г):

- необходимость назначения фиксированных частот для служебных каналов ВССН с их переиспользованием (по одному общему каналу на смежный взаимодействующий сектор в кластере  $4 \times 3$ );

- использование перестраиваемых несмежных частотных каналов (частот) в сетке ППРЧ с интервалом 0,4 МГц между центральными частотами. Такое условие выбрано с учетом результатов ранних исследований, показавших значительное влияние смежных частотных каналов при ППРЧ [3]. На рис. 1 интервалы между частотами показаны как защитные каналы;

- возможное перекрытие (пересечение) в частотной области канала LTE с динамично перестраиваемыми частото-

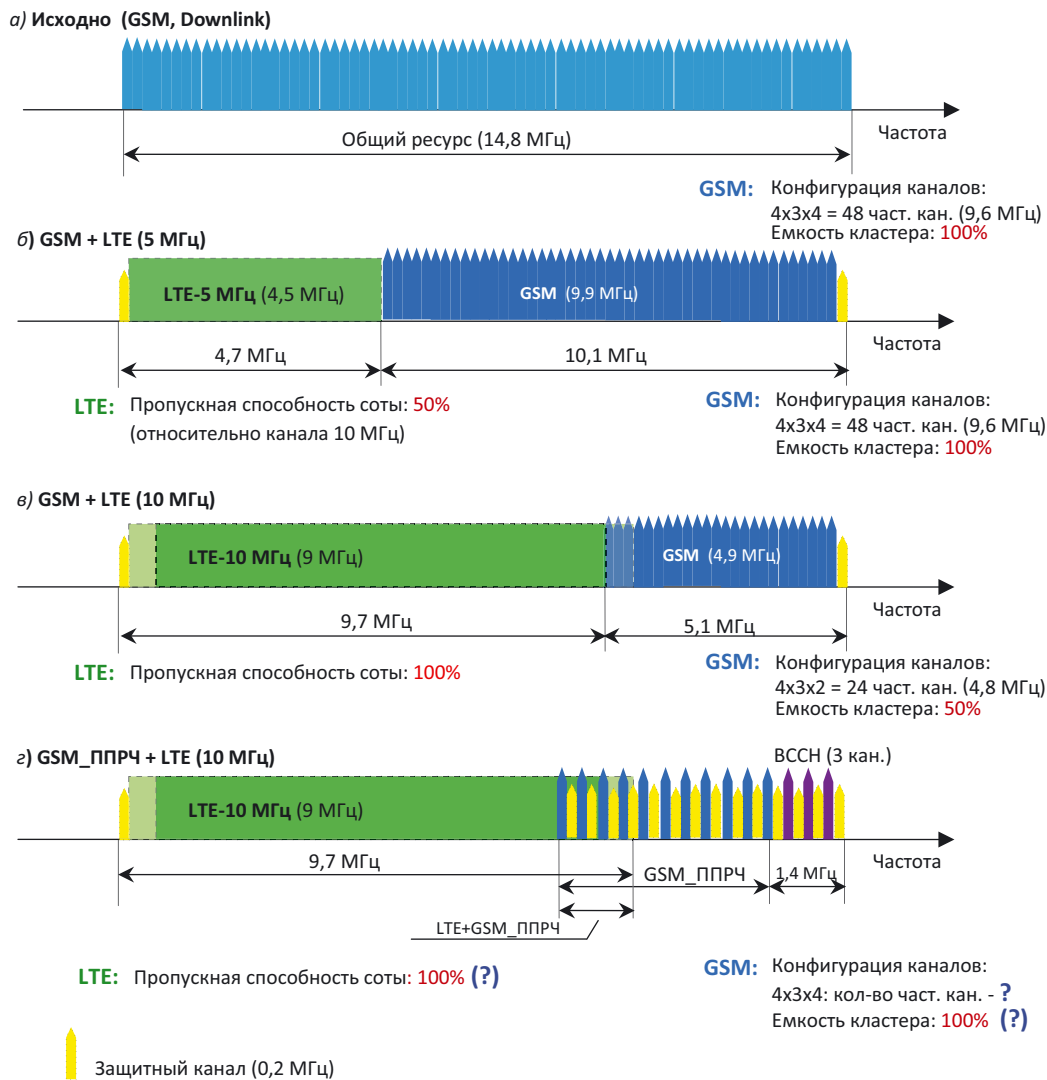


Рис. 1. Сценарии распределения частотного ресурса в диапазоне 1800 МГц (Downlink)

тами GSM (LTE+GSM\_ППРЧ); степень этого перекрытия будет зависеть от выбранного количества частот в сетке ППРЧ.

**Формулировка задачи и метод исследований.** При выбранном сценарии распределения частотного ресурса (см. рис. 1, г) задачу исследований можно свести к двум составляющим:

- оценка минимально требуемого количества частот для сетки ППРЧ при приемлемом ухудшении связи в сети GSM (при снижении емкости кластера);
- оценка условий совмещения «пересекающихся» сетей LTE и GSM\_ППРЧ при учете их взаимного влияния и допу-

стимом ухудшении связи (потери пропускной способности в сети LTE и емкости кластера в сети GSM).

Метод исследований (оценки) — комбинирование статистического моделирования и аналитических расчетов, поскольку в ходе моделирования на модели SEAMCAT (версия 4.11) была выявлена некорректная работа алгоритма формирования сетки псевдослучайных частот с задаваемым равномерным законом распределения. Оказалось, что ряд распределения их в сетке ППРЧ, формируемый в модели SEAMCAT (рис. 2), имеет отличия от равномерного распределения. Сумма всех вероятностей не равна строго единице (она составляет примерно 0,93). Номиналы частот, соответствующие их номерам, приведены в табл. 1.

**Теория вопроса.** В качестве параметра для теоретической оценки взаимного влияния при ППРЧ используют вероятность ухудшения связи (нарушения нормального функционирования в виде появления ошибок в передаваемых данных), которая описывается зависимостью

$$P_e = P_{сч} P_{есч} + (1 - P_{сч}) P_{енсч} ,$$

где  $P_e$  — полная вероятность ухудшения связи;  $P_{сч}$  — вероятность совпадения частот разных передатчиков, при котором возникают помехи (вероятность конфликта);  $P_{есч}$  — вероятность ухудшения связи при совпадении частот;  $P_{енсч}$  —

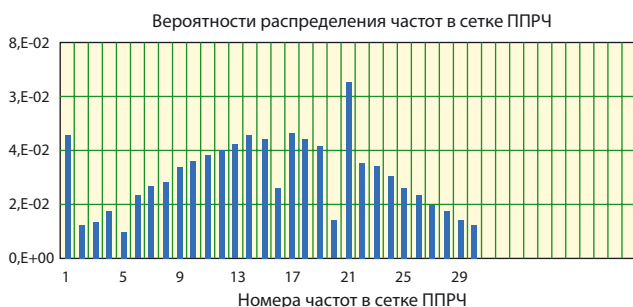


Рис. 2. Ряд распределения 30 частот в сетке ППРЧ в статистической модели SEAMCAT

Таблица 1. Номера и номиналы частот в сетке ППРЧ

Номер частоты на рис. 2	Номинал частоты, МГц	Номер частоты на рис. 2	Номинал частоты, МГц	Номер частоты на рис. 2	Номинал частоты, МГц
1	1810,0	11	1814,0	21	1818,0
2	1810,4	12	1814,4	22	1818,4
3	1810,8	13	1814,8	23	1818,8
4	1811,2	14	1815,2	24	1819,2
5	1811,6	15	1815,6	25	1819,6
6	1812,0	16	1816,0	26	1820,0
7	1812,4	17	1816,4	27	1820,4
8	1812,8	18	1816,8	28	1820,8
9	1813,2	19	1817,2	29	1821,2
10	1813,6	20	1817,6	30	1821,6

вероятность ухудшения связи при несовпадении частот (из-за помех на текущей частоте, не связанных с ППРЧ):

- при низком отношении сигнал/шум в радиоканале (чрезмерная удаленность мобильной станции, некачественное радиопокрытие и т.п.);

- при помехе от соседнего частотного канала.

Очевидно, что вероятность  $P_{\text{енсч}}$  является вероятностью влияния помех внутри традиционной сети GSM (без ППРЧ) при «ручном» назначении рабочих частот, когда  $\Delta f \geq 0,4$  МГц. С учетом этого найдем степень ухудшения связи при введении ППРЧ в виде соответствующей вероятности:

$$\begin{aligned} \Delta P_e &= P_e - P_{\text{енсч}} = P_{\text{сч}} P_{e\text{сч}} + (1 - P_{\text{сч}}) P_{\text{енсч}} - P_{\text{енсч}} = \\ &= P_{\text{сч}} (P_{e\text{сч}} - P_{\text{енсч}}). \end{aligned} \quad (1)$$

При равномерном распределении номеров частот в сетке ППРЧ вероятность совпадения двух и более частот на разных передатчиках подчинена биномиальному распределению и определяется выражением

$$P_{\text{сч}} = \sum_{i=2}^{n_{\text{Tx}}} C_{n_{\text{Tx}}}^i P_f^i (1 - P_f)^{(n_{\text{Tx}} - i)}, \quad (2)$$

где  $n_{\text{Tx}}$  — число передатчиков (Tx) с ППРЧ;  $P_f$  — вероятность излучения на частоте  $f_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_f$ , т.е. вероятность появления  $k$ -й частоты,  $P_f = 1/N_f$  — равномерное распределение;  $N_f$  — количество частот в сетке ППРЧ;  $C_{n_{\text{Tx}}}^i$  — биномиальный коэффициент.

Приведенные выражения позволяют оценить степень влияния передатчиков с ППРЧ друг на друга (внутрисистемные помехи). В исследованиях оценка этого влияния была произведена для сети GSM-1800 в соответствии с описанными ниже сценариями.

**Сценарии для исследований.** Для исследований был выбран кластер сети GSM, состоящий из четырех сот (рис. 3). Как следует из рисунка, взаимное воздействие будет наблюдаться между тремя смежными секторами: сектором собственной соты (CC) и двумя секторами смежных сот (СмС1 и СмС2). Поскольку предполагается, что ППРЧ в сети GSM позволит сохранить по 4 передатчика в каждом секторе, то и в сценарии было выбрано такое же их количество (4Tx).

**Статистическая модель сценария 4TxCC.** В данном сценарии четыре приемопередатчика (4Tx) сети GSM со-

вмещены в одном (собственном) секторе шириной  $120^\circ$ ; по отношению к одному из приемопередатчиков три остальных являются помеховыми, т.е. источниками помех (см. рис. 3). Стохастическое распределение взаимодействующих радиосредств в модели SEAMCAT показано на рис. 4.

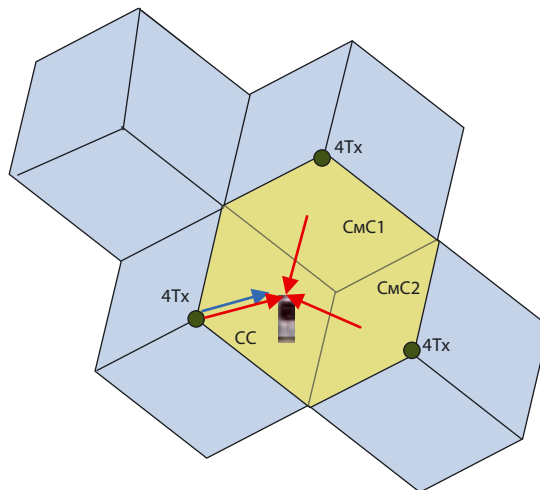


Рис. 3. Общий сценарий для исследования

Обозначения на рис. 4: ILT (Interference Link Transmitter, красный квадрат) — передатчики помех, совмещенные в пространстве между собой и с передатчиком линии-рецептора помех (VictimSystemLink Tx), на которую воздействуют помеховые передатчики; ILR (Interference Link Receiver, зеленый треугольник) — приемники линий, создающих помехи, которые находятся в активных соединениях с тремя помеховыми Tx (ILT); VictimSystemLink Rx (коричневые ромбы) — приемники линии-рецептора помех, находящиеся в активных соединениях со своим передатчиком (VictimSystemLink Tx).

**Статистические модели сценариев 4TxСмС1, 4TxСмС2 для смежных секторов.** Стохастическое распределение взаимодействующих радиосредств в модели SEAMCAT для этих сценариев представлено на рис. 5 и 6. Показано по четыре передатчика (4Tx) в каждом из двух секторов шириной



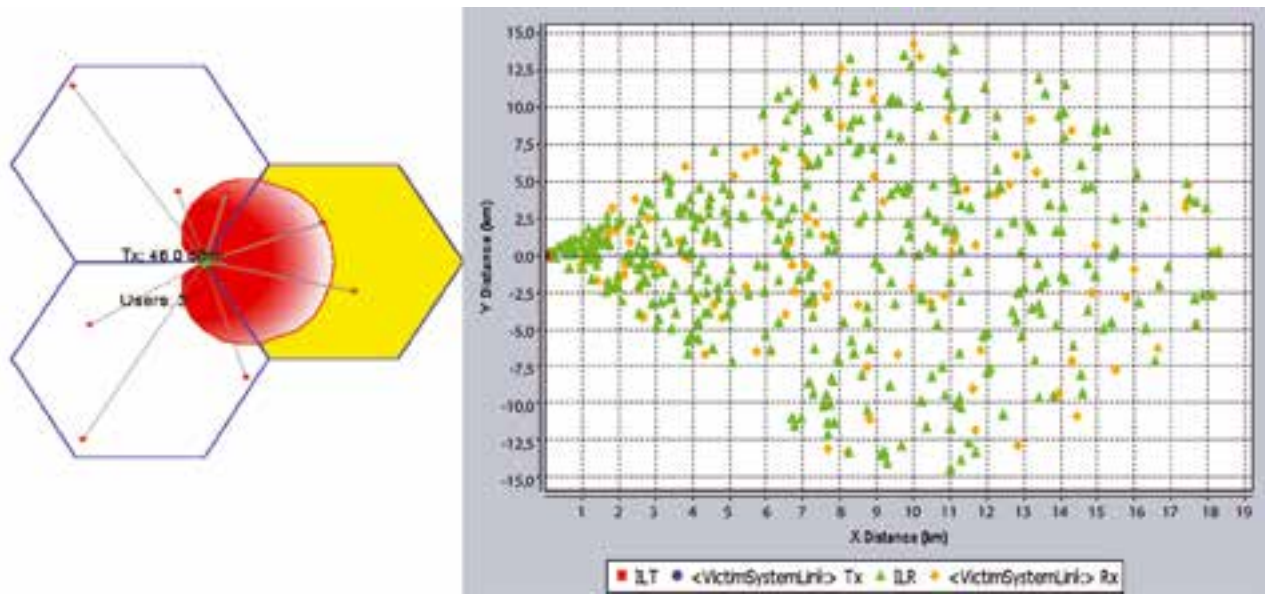


Рис. 4. Сценарий 4TxCC

120°. По отношению к приемнику линии-рецептора помех (VictimSystemLink Rx, коричневые ромбы) все четыре Tx являются помеховыми. Смежные секторы смещены в пространстве на ±60°.

Обозначения на этих рисунках такие же, как и на рис. 4, за исключением того, что все четыре передатчика помех

ILT (красный квадрат) в каждом смежном секторе совмещены в пространстве между собой.

Статистическая модель общего сценария показана на рис. 7.

В описанных моделях расстояние между смежными сотами выбрано по результатам моделирования следующим: в городе 3,4 км, в пригороде 7,44 км и на открытой местности 27,45 км. На рис. 4—7 показаны сценарии для открытой местности (Rural).

**Результаты моделирования и расчета. Сценарий 4TxCC.** Чтобы определить ухудшение связи, воспользуемся формулой (1), исходными данными для которой служат вероятности ухудшения связи при совпадении частот  $P_{\text{есч}}$  и ухудшения связи при несовпадении частот  $P_{\text{несч}}$ . Значения этих вероятностей получены посредством статистического моделирования и приведены в табл. 2 для центральной частоты сигнала 1810 МГц при отстройках по частоте  $\Delta f = 0$  МГц (совпадение частот) и  $\Delta f = 0,4$  МГц (несовпадение частот).

Полная вероятность того, что совпадут две частоты и более (до четырех частот), найдена по формуле (2), ее значения приведены в табл. 3 для разного количества частот в сетке ППРЧ.

Значения вероятностей, приведенные в табл. 2 и 3, позволяют рассчитать полные вероятности ухудшения связи

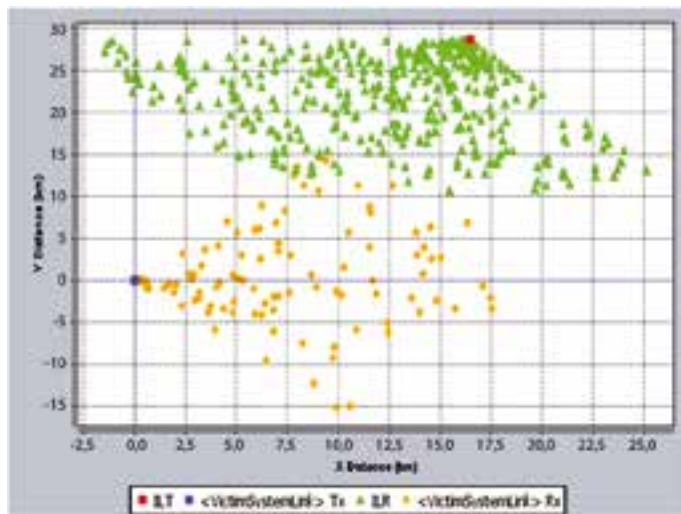


Рис. 5. Сценарий 4TxSmC1

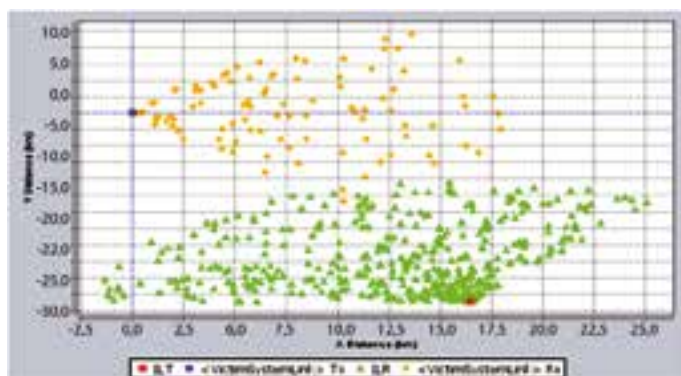


Рис. 6. Сценарий 4TxSmC2

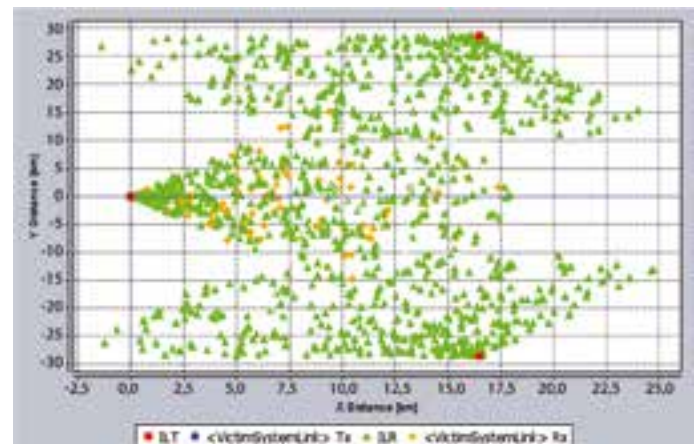


Рис. 7. Статистическая модель общего сценария

Таблица 2. Вероятности ухудшения связи без ППРЧ (сценарий 4ТхСС)

Количество совпадающих частот/количество помеховых Тх	$\Delta f = 0$ МГц ( $P_{\text{свч}}$ )			$\Delta f = 0,4$ МГц ( $P_{\text{свч}}$ )		
	Город	Пригород	Открытая местность	Город	Пригород	Открытая местность
2f/1Тх	0,76	0,75	0,75	$1,0 \times 10^{-2}$	$6,7 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-3}$
3f/2Тх	0,89	0,89	0,88	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-3}$
4f/3Тх	0,93	0,93	0,92	$2,9 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-3}$

Таблица 3. Вероятности совпадения частот при ППРЧ (сценарий 4ТхСС)

Количество частот в сетке ППРЧ	Количество совпадающих частот				Полная вероятность совпадения частот (от 2 до 4 частот)
	1*	2	3	4	
10f	0,29	$4,9 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-2}$
15f	0,23	$2,9 \times 10^{-2}$	$1,28 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-5}$	$3,0 \times 10^{-2}$
20f	0,17	$1,35 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-4}$	$6,25 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-2}$
30f	0,11	$5,1 \times 10^{-3}$	$1,05 \times 10^{-4}$	$8,1 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-3}$

\*Появление одной частоты.

Таблица 4. Полные вероятности ухудшения связи при ППРЧ (сценарий 4ТхСС)

Количество частот в сетке ППРЧ	Город	Пригород	Открытая местность
10f	$4,77 \times 10^{-2}$	$4,85 \times 10^{-2}$	$4,85 \times 10^{-2}$
15f	$2,7 \times 10^{-2}$	$2,75 \times 10^{-2}$	$2,74 \times 10^{-2}$
20f	$1,26 \times 10^{-2}$	$1,28 \times 10^{-2}$	$1,28 \times 10^{-2}$
30f	$4,7 \times 10^{-3}$	$4,8 \times 10^{-3}$	$4,76 \times 10^{-3}$

ухудшения связи при влиянии каждого из смежных секторов в отсутствие ППРЧ.

Вероятности совпадения частот при ППРЧ в каждом из смежных секторов также одинаковы, их значения найдены по формуле умножения вероятностей:

$$P_{\text{сч}}(\text{CC} \cap \text{См}) = P_{\text{сч}}(1/4)P_f. \quad (3)$$

Здесь рассматриваются два совместных (одновременных) независимых случайных события: совпадение до четырех частот ППРЧ на помеховых передатчиках в одном смежном секторе между собой и одновременно с рабочей частотой линии связи-рецептора помех в собственном секторе. Вероятность первого события  $P_{\text{сч}}(1/4)$  определяется по формуле (2) с той разницей, что суммирование производится от 1 до 4. При расчете этой вероятности использованы значения из табл. 3 для сценария (4ТхСС). Вероятность появления каждой частоты ППРЧ  $P_f$  зависит от количества частот в сетке ППРЧ. Найденные значения суммарных вероятностей (3) приведены в табл. 6.

С учетом этого вероятности ухудшения связи из-за действия помех ППРЧ от каждого из двух смежных секторов найдем по аналогии с предыдущим сценарием (выражение (1)). Значения этих вероятностей приведены в табл. 7 и на рис. 9.

*Полный сценарий (4ТхСС, 4ТхСмС1, 4ТхСмС2).* По аналогии найдем полную вероятность совокупного ухудшения связи из-за влияния ППРЧ в собственной соте и от двух смежных секторов кластера 4х3 сети GSM как сумму вероятностей трех совместных событий:

● помехи в собственной ячейке СС (вероятность в табл. 4);

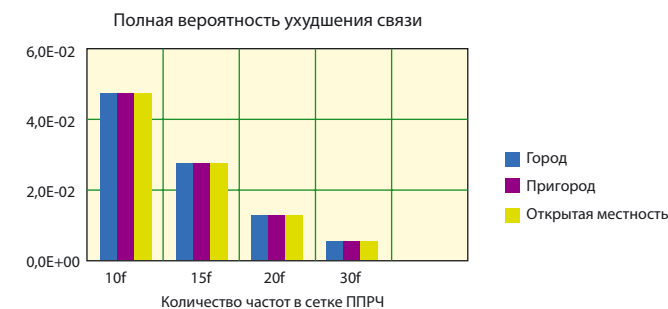


Рис. 8. Полные вероятности ухудшения связи в собственном секторе при ППРЧ

в рассматриваемом сценарии, значения которых приведены в табл. 4 и на рис. 8.

*Сценарии 4ТхСмС1, 4ТхСмС2.* Моделирование показало идентичность помехового влияния обеих смежных сот, поэтому в табл. 5 приведены общие значения вероятностей

Таблица 5. Вероятности ухудшения связи без ППРЧ (сценарии 4ТхСмС1 и 4ТхСмС2)

Количество помеховых Тх	$\Delta f = 0$ МГц ( $P_{\text{свч}}$ )			$\Delta f = 0,4$ МГц ( $P_{\text{свч}}$ )		
	Город	Пригород	Открытая местность	Город	Пригород	Открытая местность
1Тх	0,26	0,25	0,23	$3,88 \times 10^{-2}$	$3,83 \times 10^{-2}$	$3,73 \times 10^{-2}$
2Тх	0,39	0,38	0,38	$3,9 \times 10^{-2}$	$3,98 \times 10^{-2}$	$3,85 \times 10^{-2}$
3Тх	0,46	0,45	0,45	$3,93 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-2}$
4Тх	0,52	0,51	0,5	$4,0 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$

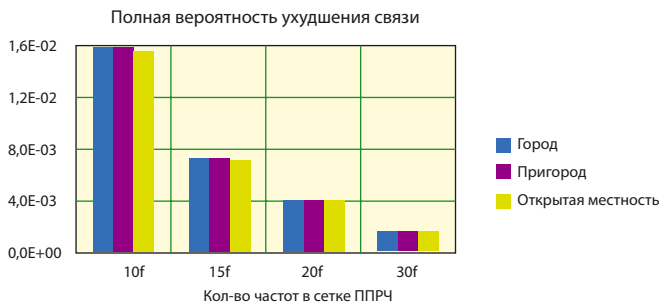


Рис. 9. Полные вероятности ухудшения связи от смежных секторов при ППРЧ

- помехи от смежного сектора СмС1 (вероятность в табл. 7);
- помехи от смежного сектора СмС2 (вероятность в табл. 7), то есть

$$\Delta P_{e(к\text{ластер})} = \Delta P_{e(CC)} + \Delta P_{e(СмС1)} + \Delta P_{e(СмС2)} - \Delta P_{e(CC)} \Delta P_{e(СмС1)} \Delta P_{e(СмС2)} \quad (4)$$

Значения рассчитанных вероятностей приведены в табл. 8 и на рис. 10.

Полученные результаты позволяют сделать главный вывод: для функционирования сети GSM без ощутимых помех наиболее приемлемыми являются сетки ППРЧ, состоящие из 20 частот и более с интервалом между частотами, равным 0,4 МГц. Использование такого количества частот в сетке ППРЧ позволит обеспечить беспомеховую работу четырех

Таблица 6. Вероятности совпадения частот при ППРЧ (сценарии 4ТхСмС1, 4ТхСмС2)

Количество частот в сетке ППРЧ	Полная вероятность совпадения частот (от 1 до 4 частот), выражение (2)	Суммарная вероятность совпадения частот, выражение (3)
10f	0,34	3,4×10 <sup>-2</sup>
15f	0,26	1,56×10 <sup>-2</sup>
20f	0,18	9,0×10 <sup>-3</sup>
30f	0,12	3,6×10 <sup>-3</sup>

Таблица 7. Полные вероятности ухудшения связи при ППРЧ (сценарии 4ТхСмС1, 4ТхСмС2)

Количество частот в сетке ППРЧ	Город	Пригород	Открытая местность
10f	1,6×10 <sup>-2</sup>	1,6×10 <sup>-2</sup>	1,56×10 <sup>-2</sup>
15f	7,5×10 <sup>-3</sup>	7,3×10 <sup>-3</sup>	7,2×10 <sup>-3</sup>
20f	4,3×10 <sup>-3</sup>	4,2×10 <sup>-3</sup>	4,1×10 <sup>-3</sup>
30f	1,7×10 <sup>-3</sup>	1,68×10 <sup>-3</sup>	1,65×10 <sup>-3</sup>

Таблица 8. Полные вероятности ухудшения связи в кластере 4x3 при ППРЧ

Количество частот в сетке ППРЧ	Город	Пригород	Открытая местность
10f	8,0×10 <sup>-2</sup>	8,0×10 <sup>-2</sup>	8,0×10 <sup>-2</sup>
15f	4,2×10 <sup>-2</sup>	4,2×10 <sup>-2</sup>	4,2×10 <sup>-2</sup>
20f	2,1×10 <sup>-2</sup>	2,1×10 <sup>-2</sup>	2,1×10 <sup>-2</sup>
30f	8,1×10 <sup>-3</sup>	8,1×10 <sup>-3</sup>	8,1×10 <sup>-3</sup>

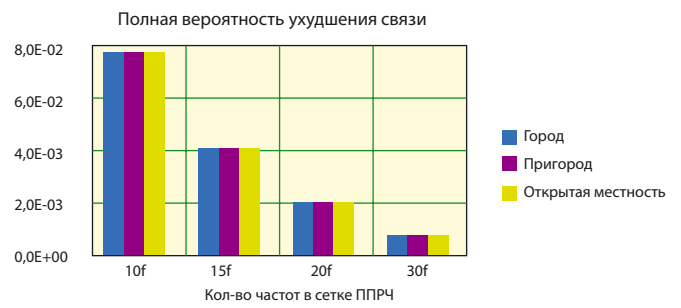


Рис. 10. Полные вероятности ухудшения связи в кластере 4x3 при ППРЧ

передатчиков в каждом из секторов сети GSM-1800, сохранив при этом прежнюю емкость сети (см. рис. 1).

Однако, учитывая наличие совмещенной сети другого стандарта LTE, следует задаться вполне закономерным вопросом: как поведет себя эта сеть при возникшем наложении частот (см. рис. 1, з).

**Взаимное влияние сетей GSM\_ППРЧ и LTE.** Чтобы ответить на поставленный вопрос, необходимо, помимо влияния ППРЧ в сети GSM, оценить взаимное помеховое влияние двух сетей — GSM и LTE. Воспользуемся статистическими моделями описанных выше сценариев.

*Влияние LTE на сеть GSM.* Прежде чем оценить это влияние, сделаем несколько замечаний. Во-первых, не будем учитывать влияние помех LTE от смежных секторов, поскольку они не должны оказывать практически никакого воздействия на испытываемые абонентские устройства LTE и GSM благодаря стандартизированной процедуре координации внутрисистемных помех ICIC (eICIC) [6]. С другой стороны, размер зоны обслуживания в сети LTE при ширине канала 10 МГц значительно меньше, чем у GSM, что позволяет также не учитывать дополнительное влияние помех со стороны смежных сот сети LTE на испытываемое абонентское устройство GSM.

С учетом замечания о процедуре ICIC вероятность ухудшения связи в сети GSM с ППРЧ от воздействия сети LTE оценим по приближенной формуле, схожей с (1):

$$\Delta P_{e(LTE)} \approx \rho P_{eсч(LTE)} \quad (5)$$

где  $P_{eсч(LTE)}$  — вероятность ухудшения связи в сети GSM при совпадении фиксированной рабочей частоты (без ППРЧ) с полосой канала LTE. Параметр  $\rho$ , входящий в формулу (5), определяет долю полосы ППРЧ, перекрывающейся с активным каналом LTE (LTE+GSM\_ППРЧ/GSM\_ППРЧ на рис. 1, з). По своему физическому смыслу он соответствует ранее используемой вероятности совпадения частот при ППРЧ  $P_{сч}$ . В табл. 9 показано соотношение частотного ресурса в двух совмещаемых сетях при разном количестве частот в сетке ППРЧ.

Указанное соотношение в совокупности с результатами статистического моделирования позволяет оценить значения вероятности  $\Delta P_{e(LTE)}$  (выражение (5)), приведенные в табл. 10.

Знание этой вероятности, в свою очередь, позволит рассчитать полные вероятности ухудшения связи в сети GSM при совокупном влиянии на нее процедуры ППРЧ и сети LTE. Указанная вероятность может быть рассчитана подобно (4) как сумма вероятностей  $\Delta P_{e(LTE)}$  (выражение (5), табл. 10) и  $\Delta P_{e(к\text{ластер})}$  (выражение (4), табл. 8) двух совместных событий. Рассчитанные значения этой вероятности приведены в табл. 11 (колонка «Сеть GSM»).



Таблица 9. Соотношение частот в сетях LTE и GSM при ППРЧ

Количество частот в сетке ППРЧ	Общее количество частотных каналов для ППРЧ с учетом защитных каналов	Полоса перекрытия LTE+GSM_ ППРЧ, МГц	$\rho$
10f	19 (3,8 МГц)	0,1	0,01
15f	29 (5,8 МГц)	2,1	0,23
20f	39 (7,8 МГц)	4,1	0,46
30f	59 (11,8 МГц)	7,1	0,79

Таблица 10. Вероятности ухудшения связи в сети GSM от воздействия LTE

Количество частот в сетке ППРЧ	Вероятность $\Delta P_c$ (LTE)		
	Город	Пригород	Открытая местность
10f	$2,3 \times 10^{-3}$		$2,4 \times 10^{-3}$
15f	$5,2 \times 10^{-2}$		$5,5 \times 10^{-2}$
20f	0,1		0,11
30f	0,18		0,19

Таблица 11. Результирующие данные по ухудшению связи в совмещенных сетях GSM и LTE

Количество частот в сетке ППРЧ	Ухудшение связи в совмещенных сетях	
	Сеть GSM (вероятность)	Сеть LTE (потери пропускной способности)
10f	$8,2 \times 10^{-2}$	< 1%
15f	$9,5 \times 10^{-2}$	< 5%
20f	0,13	< 10%
30f	0,2	< 20%

*Влияние GSM на сеть LTE.* Степень влияния сети GSM с сетками ППРЧ и перекрытиями ею канала LTE, рассмотренными ранее, оценивалась статистическим моделированием в полном сценарии по потерям пропускной способности сектора сети LTE. Значения этих потерь также приведены в табл. 11 (колонка «Сеть LTE»).

**Закключение.** По условиям решаемой задачи при выбранном сценарии для статистического моделирования и аналитических расчетов полученные результаты отражают граничные количественные показатели ухудшения связи, т.е. верхнюю границу. Они показывают тот порог ухудшения

связи, который в реальных сетях может быть значительно ниже, но не выше.

Окончательные оценки, сведенные в результирующую табл. 11, свидетельствуют о том, что для совмещения в диапазоне частот 1800 МГц сети LTE с шириной канала 10 МГц и сети GSM достаточно иметь в сетке ППРЧ от 10 до 15 частот. При этом потери пропускной способности сети LTE не будут превышать допустимые значения (< 5%), а потери емкости кластера сети GSM не превысят 9,5%, в результате чего его итоговая емкость составит не менее 90% от первоначальной.

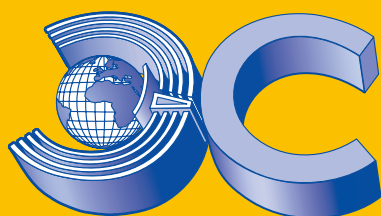
Данный результат не противоречит тому известному факту, что эффективность ППРЧ растет прямо пропорционально количеству частот, поскольку он был получен с учетом взаимного влияния двух сетей, причем разных стандартов. Это и обусловило необходимость ограничения количества частот в сетке ППРЧ сети GSM. Как отмечалось в начале статьи, такой результат свидетельствует о принципиально новой теоретической задаче, которая и была решена.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Spectrum used currently in commercially launched LTE FDD networks.— GSA's Evolution to LTE report. December 5, 2013.
2. Об использовании полос радиочастот 890—915 МГц и 935—960 МГц радиоэлектронными средствами стандарта UMTS и последующих его модификаций и полос радиочастот 1710—1785 МГц и 1805—1880 МГц для применения РЭС сетей связи стандарта LTE и последующих его модификаций.— Решение ГКРЧ № 13—22—02, декабрь 2013.
3. 3GPP TS 05.01 v8.9.0 (2004—11). Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Networks; Physical layer on the radio path; General description // Technical Specification (Release 1999), 2004.
4. 3GPP TS 05.02 v8.11.0 (2003—06). Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Networks; Multiplexing and multiple access on the radio path // Technical Specification (Release 1999), 2003.
5. Тихвинский В. О., Терентьев С. В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS.— М.: Эко-Трендз, 2007.— 400 с.
6. Скрынников В. Г. Эффективность режима ППРЧ в сотовых сетях стандарта GSM // Мобильные системы.— 2006.— № 5.
7. Скрынников В. Г. Повышение эффективности использования радиочастотного ресурса в сетях GSM/UMTS в диапазонах частот 900 МГц и 1800 МГц // Мобильные телекоммуникации.— 2009.— № 1.
8. Об использовании полос радиочастот 1710—1785 МГц и 1805—1880 МГц радиоэлектронными средствами стандарта GSM.— Решение ГКРЧ № 12—15—03, октябрь 2012.
9. Скрынников В. Г. Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика.— М.: Спорт и Культура-2000, 2012.— 865 с.

Получено 28.01.14

Не забудьте подписаться на журнал «Электросвязь»



• во всех почтовых отделениях по каталогам:

«Агентство «Роспечать», индекс – 71107; «Пресса России», индекс – 41411; «Почта России», индекс – 61854;

• через альтернативные агентства:

«Урал-Пресс» – www.ural-press.ru

• в редакции журнала «Электросвязь»

тел. (495) 625-84-36, e-mail: tim@elsv.ru www.elsv.ru