

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ стандартов четвертого поколения

О.Шорин, д.т.н., профессор, генеральный директор ЗАО "НИРИТ",
Г.Бокк, д.т.н., директор по науке ООО "НСТТ"

LTE – наиболее перспективная среди распространенных в России технологий мобильной связи. Сети этого стандарта развиваются совместно с сетями других технологий, развернутых или планируемых в смежных участках спектра. Поэтому проблема межсистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) становится определяющим фактором не только внедрения и развития того или иного стандарта мобильной связи, но и эффективного использования частотного ресурса в целом.

4G и ЭМС

Технологии LTE, определяющие стратегическое направление развития мобильной связи в сегменте сетей общего пользования, не могут в полной мере удовлетворить потребности профессиональных и корпоративных пользователей, которые сегодня, применяя даже наиболее прогрессивные цифровые стандарты TETRA, APCO25 и др., пользуются хотя и качественной, но узкополосной связью. Насущная потребность в широкополосной профессиональной связи очевидна, и изыскания мировых производителей профессионального радиооборудования в этом направлении ведутся под условным термином LTE professional. Коммерческие сети, построенные на базе такого оборудования, ожидаются в России не раньше 2020 года [1]. Причем существенным будет вопрос выделения рекомендованного участка спектра для этих целей. Решение такого вопроса в России, как известно, сопряжено с большими трудностями конверсии загруженных участков спектра. Однако уже сейчас существует стандарт четвертого поколения McWill (Маквил, NG-1), включенный в рекомендацию МСЭ-Р М.1801-1

и полностью реализующий весь функционал профессиональной связи с широкополосным радиointерфейсом CS-OFDMA. Отличительная особенность данного стандарта в том, что он может использовать частотный диапазон 1785-1805 МГц, не рекомендованный Международным союзом электросвязи для сетей LTE (3GPP TS 36.101, версия 13.2.0, январь 2016). Следовательно, его применение никак не сократит потенциально доступный для развития сетей LTE частотный ресурс и вместе с тем предоставит возможность развития других перспективных стандартов, обеспечивающих удовлетворение существующего спроса пользователей в корпоративном секторе.

По указанному частотному диапазону существует решение ГКРЧ от 23 октября 2006 года № 06-17-03-001 [2], определяющее основные параметры технологии, которая может использоваться, и защитный интервал для обеспечения межсистемной ЭМС в 2,5 МГц. В основу принятия этого решения были заложены натурные испытания, проведенные ФГУП "НИИР" и определившие возможность применения технологии широкополосного доступа

с радиointерфейсом OFDMA (в испытаниях использовалось оборудование стандарта iBURST) со стандартом GSM-1800.

В 2011 году ЗАО "НИРИТ" в соответствии с решением ГКРЧ от 29 октября 2010 года № 10-09-09 были проведены повторные испытания в рамках опытной зоны в г. Воронеж по технологии Маквил [6], имеющей идентичный радиointерфейс. Испытания полностью подтвердили выводы, сделанные НИИР в 2006 году. С формальной точки зрения, проведенные испытания не ответили прямо на вопрос, изменятся ли требования к межсистемной ЭМС при переходе от GSM-1800 к LTE-1800, так как на момент испытаний LTE-1800 существовало только в стадии зарождения. Межсистемная ЭМС зависит от большого перечня факторов, которые нужно учитывать: территориальный разнос базовых станций, частотное разнесение используемых участков спектра, поляризация излучаемого сигнала, допустимые мощности излучения, чувствительность приемников, частотная селективность приемников/передатчиков, использование специальных антенных систем и многое другое.

Для мобильных систем общего пользования, использующих широкополосный радиointерфейс, утвердилась методика расчета ЭМС без учета фактора территориального разноса. Основанием к этому служит тот факт, что системы общего пользования должны строиться по принципу обслуживания максимального трафика на заданной территории. Следовательно, в конечной перспективе радиусы сот могут быть очень маленькими, не превышающими сотни метров, а число станций на обслуживаемой территории будет очень большое. Поэтому проще для всех (и регулятора, и операторов) разрешить строительство станций по существу на всей территории, согласовав лишь необходимый частотный разнос. Такой подход, наверное, оправдан в странах, где частотного ресурса в гражданском применении много и исключение из использования 5-10 МГц не является серьезной потерей для государства. Но в России ситуация сложнее: доступного частотного ресурса, который может быть использован для коммерческого применения значительно меньше, чем в других странах, поэтому его надо максимально эффективно использовать. В связи с этим любое рассмотрение межсистемной ЭМС на соседних участках спектра, использующих разные технологии, необходимо проводить с учетом не просто частотного, а частотно-территориального разноса (ЧТР).

Определенный оптимизм в данном вопросе внушает то, что регулятор в отрасли связи имеет достаточно квалифицированные специализированные подразделения, имеющие большой опыт по расчету ЭМС с учетом норм ЧТР. Если указанные нормы ЧТР не учитывать, а определить раз и навсегда требования по частотному разнесу, то из коммерческого оборота неизбежно будут выведены большие участки спектра, доступные к использованию.

Поэтому обоснование необходимых норм по ЧТР для технологии NG-1 (Маквил) с учетом перехода GSM-1800 на LTE-1800 необходимо провести с учетом всех вышеуказанных факторов.

Стандартные пространственные разносы, под которыми понимаем минимальный уровень сближения антенн, будем рассматривать для типовых трасс: $BC_{NG} - BC_{LTE}$ по горизонтали, $BC_{NG} - BC_{LTE}$ по вертикали, $BC_{NG} - AC_{LTE}$, $BC_{LTE} - AC_{NG}$ и $AC_{LTE} - AC_{NG}$. Соответственно, это 20 м (средняя протяженность одного подъезда в жилых застройках), 2 м, 50 м (при более близких дистанциях абоненты попадают в зону под антенной БС, в которой мешающие сигналы существенно подавляются) и 20 м между абонентами.

Семь случаев воздействия

Рабочая полоса, выделенная решениями ГКРЧ № 06-17-05-255 – № 06-17-05-258 от 23.10.2006 [2] для сети NG-1, составляет 1797.5–1802.5 МГц. Она ближе всего примыкает к полосе, распределенной для линий передачи базовых станций LTE-1800 Band 3 [9, п. 5.5] 1805–1880 МГц. Поэтому критичными с точки зрения обеспечения совместимости могут быть только случаи воздействия на приемный тракт абонентской станции сети LTE, а также абонентской и базовой станции сети NG-1. Работа $BC_{LTE-1800}$ не является критичной, так как в диапазоне 1805–1880 МГц она работает только на передачу. Таким образом, чтобы полностью ответить на вопрос совместимости, нужно рассмотреть следующие ситуации воздействия: $BC_{NG} \rightarrow AC_{LTE-1800}$; $BC_{LTE-1800} \rightarrow AC_{NG-1}$; $AC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$; $AC_{NG-1} \rightarrow AC_{LTE-1800}$; $AC_{LTE-1800} \rightarrow AC_{NG-1}$; $BC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$ при вертикальном разнесении антенн; $BC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$ при горизонтальном разнесении антенн.

Проведем расчет уровня внеполосных излучений, попадающих в приемный тракт для указанных случаев. Для этого воспользуемся данными табл.1-4. Поскольку характеристики в таблицах приведены для измерительной полосы 100 кГц, то полученные на их основе результаты можно непосредственно сравнивать со значениями, установленными

Таблица 1. Параметры БС NG-1

Название параметра	Обозначение	Значение	Источник
Мощность трансляции	$P_{\text{БС NG}}$	34 дБм	[2], решение № 06-17-03-001
Ширина полосы излучения NG-1	$\Delta F_{\text{БС NG}}$	5,0 МГц	[2], решение № 06-17-03-001
Мощность трансляции в полосе 100 кГц	$\rho_{\text{БС NG}}$	17 дБм	Расчет по формуле $P_{\text{БС NG}} - 10 \times \lg(\Delta F_{\text{БС NG}}/100\text{кГц})$
Коэффициент усиления антенны БС NG-1	$K_{i \text{ БС NG}}$	11 дБи	[2], решение № 06-17-03-001
Потери в фидере тракта передачи БС NG-1	$\gamma_{\text{БС NG Tr}}$	2,5 дБ	Типовое значение
Потери в фидере приемного тракта БС NG-1	$\gamma_{\text{БС NG Rx}}$	2,5 дБ	Типовое значение
Подавление в полосовом фильтре приемного тракта на краю диапазона	$\gamma_{\text{БС NG Rx BF}}$	1,7 дБ	Приложение, с учетом [9, 10]
Уровень продуктов интермодуляции плюс внеполосного излучения после цифровой фильтрации, при отстройке 2,5 МГц	$\gamma_{\text{InterMod БС NG}}$	39 дБ	Экспериментальные данные [3, 4], [5, п. 4.1], [6, п.п. 1, 3, 5, 6]
Подавление в аналоговом полосовом фильтре при отстройке 2,5 МГц	$\gamma_{\text{ABF БС NG}}$	24 дБ	Экспериментальные данные [3]
Потери на распространение БСNG – ACLTE	$L_{\text{FS БС NG-AC}}(d, f, H_{\text{БС}}, h_{\text{AC}})$	Расширенная модель Хаты	[7], приложение 2, здесь d – расстояние трассы (км), f – частота (МГц), $H_{\text{БС}}$, h_{AC} – высоты антенн БС _{NG-1} и АС _{LTE-1800}
Уровень подавления антенны в направлениях близких к 90° или –90° в вертикальной плоскости	$\gamma_{\text{БС NG vert}}$	16 дБ	Типовое ограничение для антенн с $K_i = 11$ дБи [14, антенна K80010046V01, с. 79]
Дополнительное подавление помех в приемнике за счет режима Transmit Diversity	ξ_{TRD} (в линиях Ur режим Transmit Diversity применяется всегда)	3 дБ	[8, п. 3.12.1]. Расширение полосы сигнала в 2 раза
Уровень подавления направленной помехи в адаптивной антенной системе	$\gamma_{\text{БС NG AAR}}$	22 дБ	Технические испытания [5]. (Будем учитывать только в самых критических случаях)

рекомендациями 3GPP TS 36.104 [9, п. 6.6.4.4.1] в качестве необходимых для обеспечения совместимости работы сотовых сетей на уровне радиointерфейса. Конкретно для технологии LTE Band 3 это пороговое значение, которое не должен превышать уровень внеполосного излучения, равно –96 дБм [9, п. 6.6.4.4.1].

1. Случай воздействия БС_{NG} → АС_{LTE-1800}

$$\rho_{\text{БС NG}} + K_{i \text{ БС NG}} - \gamma_{\text{БС NG Tr}} - \gamma_{\text{InterMod БС NG}} - \gamma_{\text{ABF БС NG}} - L_{\text{FS БС NG-AC}}(0,05, 1805, 27, 1,5) - \gamma_{\text{AC Body}} + K_{i \text{ ACLTE}} - \gamma_{\text{ACLTE Rx BF}} = 17 \text{ дБм} + 11 \text{ дБи} - 2,5 \text{ дБ} - 39 \text{ дБ} - 24 \text{ дБ} - 77,7 \text{ дБ} - 3,0 \text{ дБ} + 3 \text{ дБи} - 1,7 \text{ дБ} = -116,9 \text{ дБм} (< -96 \text{ дБм})$$

2. Случай воздействия БС_{LTE-1800} → АС_{NG-1}

$$\rho_{\text{БС LTE}} + K_{i \text{ БС LTE}} - \gamma_{\text{БС LTE Tr}} - \gamma_{\text{InterMod БС LTE 2,5}} - \gamma_{\text{ABF БС LTE 2,5}} - L_{\text{FS БС LTE-AC}}(0,05, 1802,5, 27, 1,5) - \gamma_{\text{AC Body}} + K_{i \text{ AC NG}} - \gamma_{\text{AC NG Rx BF}} - \xi_{\text{TRD}} = 20 \text{ дБм} + 16 \text{ дБи} - 2,5 \text{ дБ} - 36,5 \text{ дБ} - 20,3 \text{ дБ} - 77,7 \text{ дБ} - 3,0 \text{ дБ} + 3 \text{ дБи} - 1,7 \text{ дБ} - 3 \text{ дБ} = -105,7 \text{ дБм} (< -96 \text{ дБм})$$

3. Случай воздействия АС_{LTE-1800} → БС_{NG-1}

$$\rho_{\text{АС LTE}} + K_{i \text{ АС LTE}} - \gamma_{\text{InterMod АС LTE 2,5}} - \gamma_{\text{ABF АС LTE 2,5}} - \gamma_{\text{AC Body}} - L_{\text{FS БС NG-AC}}(0,05, 1802,5, 27, 1,5) + K_{i \text{ БС NG}} - \gamma_{\text{БС NG Rx}} - \gamma_{\text{БС NG Rx BF}} - \xi_{\text{TRD}} = 20,5 \text{ дБм} + 3 \text{ дБи} - 40,5 \text{ дБ} - 20,3 \text{ дБ} - 3 \text{ дБ} - 77,7 \text{ дБ} + 11 \text{ дБи} - 2,5 \text{ дБ} - 1,7 \text{ дБ} - 3 \text{ дБ} = -114,2 \text{ дБм} (< -96 \text{ дБм})$$

Таблица 2. Параметры БС LTE-1800 (E-UTRA Band 3)

Название параметра	Обозначение	Значение	Источник
Максимальная допустимая мощность трансляции	$P_{\text{MAX БС LTE}}$	46 дБм	Типовое значение для полосы 10 МГц, также см. [9, п. 6.2]
Типовая средняя мощность трансляции	$P_{\text{БС LTE}}$	40 дБм	Типовое значение для полосы 10 МГц, также следует из сопоставления подавления и абсолютного уровня излучения аппаратуры класса "В" [9, п. 6.6.2.1]
Ширина полосы излучения LTE	$\Delta F_{\text{БС LTE}}$	10,0 МГц	Типовое значение для диапазона 1800 МГц. Более значительный рефарминг полосы в 1800 МГц пока не прогнозируется
Мощность трансляции в полосе 100 кГц	$P_{\text{БС LTE}}$	20 дБм	Расчет по формуле $P_{\text{БС LTE}} - 10\lg(\Delta F_{\text{БС LTE}}/100\text{кГц})$
Коэффициент усиления антенны БС LTE	$K_i_{\text{БС LTE}}$	16 дБи	Типовое значение для городских сегментов сети диапазона 1800 МГц
Подавление в полосовом фильтре приемного тракта на краю диапазона	$\gamma_{\text{БС LTE Rx BF}}$	1,7 дБ	Приложение, с учетом [10, 11]
Потери в фидере тракта передачи БС LTE-1800	$\gamma_{\text{БС LTE Tr}}$	2,5 дБ	Типовое значение
Потери в фидере приемного тракта БС LTE-1800	$\gamma_{\text{БС LTE Rx}}$	2,5 дБ	Типовое значение
Уровень продуктов интермодуляции плюс внеполосного излучения после цифровой фильтрации, при отстройке 2,5 МГц	$\gamma_{\text{InterMod БС LTE 2.5}}$	36,5 дБ	Согласно [9, п. 6.6.3.2] и с учетом значения $P_{\text{MAX БС LTE}}$: $\gamma_{\text{DF БС LTE 2.5}} = P_{\text{MAX БС LTE}} - 10\lg(10\text{МГц}/100\text{кГц}) - (-14\text{ дБм}) + -3,5\text{ дБм} = 36,5\text{ дБ}$
Уровень продуктов интермодуляции плюс внеполосного излучения после цифровой фильтрации, при отстройке 5,0 МГц	$\gamma_{\text{InterMod БС LTE 5.0}}$	40,0 дБ	Согласно [9, п. 6.6.3.2] и с учетом значения $P_{\text{MAX БС LTE}}$: $\gamma_{\text{DF БС LTE 2.5}} = P_{\text{MAX БС LTE}} - 10\lg(10\text{МГц}/100\text{кГц}) - (-14\text{ дБм}) = 40,0\text{ дБ}$
Подавление внеполосного излучения в аналоговом полосовом фильтре при отстройке 2,5 МГц	$\gamma_{\text{ABF БС LTE 2.5}}$	20,3 дБ	Приложение с учетом [9, п. 6.6.4.3.1 и п. 6.6.4.1]
Подавление внеполосного излучения в аналоговом полосовом фильтре при отстройке 5,0 МГц	$\gamma_{\text{ABF БС LTE 5.0}}$	34,0 дБ	Приложение с учетом [9, п. 6.6.4.3.1 и п. 6.6.4.1]
Потери на распространение по трассе БС LTE – АС _{NG}	$L_{\text{FS БС LTE-AC}}(d, f, H_{\text{БС}}, h_{\text{AC}})$	Расширенная модель Хаты	[7], приложение 2, здесь d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц), $H_{\text{БС}}$, h_{AC} – высоты расположения антенн БС _{LTE-1800} и АС _{NG-1}
Потери на распространение по трассе БС LTE – БС _{NG}	$L_{\text{FS БС LTE-BS}}(d, f)$	Формула свободного пространства	[7], приложение 2 $32.4 + 20\lg(d) + 20\lg(f)$ (дБ), где d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц)
Уровень подавления антенны в направлениях близких к 90° или –90° в вертикальной плоскости	$\gamma_{\text{БС LTE vert}}$	25 дБ	Типовое ограничение для антенн с $K_i = 16$ дБи [14, антенна K80010291V02, с. 53]

Таблица 3. Параметры АС NG-1 (UE NG-1)

Название параметра	Обозначение	Значение	Источник
Мощность трансляции АС	$P_{AC\ NG}$	23 дБм	Типовое ограничение для UE LTE [12, п. 6.2.2]
Ширина полосы излучения АС NG-1 в минимальном случае	$\Delta F_{AC\ NG}$	120 кГц	[8, п.п. 3.3, 3.7, 3.19] и с учетом режима Transmit Diversity [8, п. 3.12.1] (Расширение полосы сигнала в 2 раза)
Мощность трансляции в полосе 100 кГц	$\rho_{AC\ NG}$	22,2 дБм	Расчет по формуле $P_{AC\ NG} - 10\lg(\Delta F_{AC\ NG}/100\text{кГц})$
Коэффициент усиления антенны АС NG-1	$K_{i\ AC\ NG}$	3 дБи	Стандартное значение для мобильной станции [13, с. 447]
Потери на экранизацию телом антенны АС NG-1	$\gamma_{AC\ Body}$	3,0 дБ	Типовое значение
Подавление в полосовом фильтре приемного тракта на краю диапазона	$\gamma_{AC\ NG\ Rx\ BF}$	1,7 дБ	Приложение, с учетом [10, 11]
Уровень продуктов интермодуляции плюс внеполосного излучения после цифровой фильтрации при отстройке 2,5 МГц	$\gamma_{InterMod\ AC\ NG}$	39 дБ	В соответствии с данными для БС NG-1 [3,4], [5, п. 4.1], [6, п.п. 1, 3, 5, 6].
Подавление излучения в аналоговом полосовом фильтре при отстройке 2,5 МГц	$\gamma_{ABF\ AC\ NG}$	24 дБ	В соответствии с данными для БС NG-1 [3].
Потери на распространение по трассе БС _{LTE} – АС _{NG}	$L_{FS\ БС\ LTE-AC}(d, f, H_{БС}, h_{AC})$	Расширенная модель Хаты	[7], приложение 2, здесь d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц), $H_{БС}$, h_{AC} – высоты расположения антенн БС _{LTE-1800} и АС _{NG-1} .
Потери на распространение по трассе АС _{LTE} – АС _{NG}	$L_{FS\ AC-AC}(d, f)$	Формула свободного пространства	[7], приложение 2, $32,4 + 20\lg(d) + 20\lg(f)$ (дБ), где d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц)
Дополнительное подавление помех в приемнике за счет режима Transmit Diversity	ξ_{TD} (режим Transmit Diversity в линиях Down может не использоваться)	3 дБ	[8, п. 3.12.1] Расширение полосы сигнала в 2 раза

4. Случай воздействия АС_{NG-1} → АС_{LTE-1800}

$\rho_{AC\ NG} + K_{i\ AC\ NG} - \gamma_{InterMod\ AC\ NG} - \gamma_{ABF\ AC\ NG} - \gamma_{AC\ Body} - L_{FS\ AC-AC}(0,02, 1805,0) - \gamma_{AC\ Body} + K_{i\ AC\ LTE} - \gamma_{AC\ LTE\ Rx\ BF} = 22,2\text{ дБм} + 3\text{ дБи} - 39\text{ дБ} - 24\text{ дБ} - 63,6\text{ дБ} - 3\text{ дБ} + 3\text{ дБ} - 1,7\text{ дБ} = -103,1\text{ дБм} (< -96\text{ дБм}).$

Выявленный запас $103,1\text{ дБм} - 96\text{ дБм} = 7,1\text{ дБ}$ в пересчете на расстояние (по формуле свободного пространства) показывает, что АС_{LTE-1800} сохранит работоспособность на нижнем крае рабочего диапазона вплоть до сближений с абонентами NG-1 на 8,8 м ($20\text{ м} \times 10^{0,1 \times 7,1/2} = 8,8\text{ м}$). Сближение на расстояния, меньшие 8,8 м, может приводить к процедуре handover с переводом ресурса радиоканала АС_{LTE-1800} на участки полосы, удаленные

от края 1805 МГц. При этом участок полосы на краю может быть перераспределен другим абонентам LTE, находящимся от абонентов NG-1 на расстояниях больше 8,8 м.

5. Случай воздействия АС_{LTE-1800} → АС_{NG-1}

$\rho_{AC\ LTE} + K_{i\ AC\ LTE} - \gamma_{InterMod\ AC\ LTE\ 2,5} - \gamma_{ABF\ AC\ LTE\ 2,5} - \gamma_{AC\ Body} - L_{FS\ AC-AC}(0,02, 1802,5) - \gamma_{AC\ Body} + K_{i\ AC\ NG} - \gamma_{AC\ NG\ Rx\ BF} - \xi_{TD} = 20,5\text{ дБм} + 3\text{ дБи} - 40,5\text{ дБ} - 20,3\text{ дБ} - 3\text{ дБ} - 63,5\text{ дБ} - 3,0\text{ дБ} + 3\text{ дБи} - 1,7\text{ дБ} - 3\text{ дБ} = -108,5\text{ дБм} (< -96\text{ дБм}).$

Выявленный запас $108,5\text{ дБм} - 96\text{ дБм} = 12,5\text{ дБ}$ в пересчете на расстояние (по формуле свободного пространства) показывает, что АС_{NG-1} сохранит работоспособность на верхнем крае

Таблица 4. Параметры AC LTE-1800 (UE E-UTRA Band 3)

Название параметра	Обозначение	Значение	Источник
Мощность трансляции AC	$P_{AC LTE}$	23 дБм	[12, п. 6.2.2] для класса 3
Ширина полосы излучения AC LTE в минимальном случае	$\Delta F_{AC LTE}$	180 кГц	[13, п. 1.3.1] для случая объединения в сигнале SC-FDMA частотного ресурса одного RB [13, п. 6.2]
Мощность трансляции в полосе 100 кГц	$P_{AC LTE}$	20,5 дБм	Расчет по формуле $P_{AC NG} - 10\lg(\Delta F_{AC LTE}/100\text{кГц})$
Коэффициент усиления антенны AC LTE	$K_{i AC LTE}$	3 дБи	Стандартное значение для мобильной станции [13, с. 447]
Потери на экранизацию телом антенны AC LTE	$\gamma_{AC Body}$	3,0 дБ	Типовое значение
Подавление в полосовом фильтре приемного тракта на краю диапазона	$\gamma_{AC LTE Rx BF}$	1,7 дБ	Приложение с учетом [10, 11]
Уровень продуктов интермодуляции плюс внеполосного излучения после цифровой фильтрации при отстройке 2,5 МГц	$\gamma_{InterMod AC LTE 2.5}$	40,5 дБ	[12, п. 6.6.2.11] и с учетом значения $P_{AC LTE} : \gamma_{DF AC LTE 2.5} = P_{AC LTE} - (-10 \text{ дБм}) + 10\lg(1\text{МГц}/100\text{кГц}) = 40,5 \text{ дБ}$
Уровень продуктов интермодуляции плюс внеполосного излучения после цифровой фильтрации при отстройке 5,0 МГц	$\gamma_{InterMod AC LTE 5.0}$	43,5 дБ	[12, п. 6.6.2.11] и с учетом значения $P_{AC LTE} : \gamma_{DF AC LTE 5.0} = P_{AC LTE} - (-13 \text{ дБм}) + 10\lg(1\text{МГц}/100\text{кГц}) = 43,5 \text{ дБ}$
Подавление внеполосного излучения в аналоговом полосовом фильтре при отстройке 2,5 МГц	$\gamma_{ABF AC LTE 2.5}$	20,3 дБ	На основе условия $\gamma_{ABF AC LTE 2.5} = \gamma_{ABF BC LTE 2.5}$
Подавление излучения в аналоговом полосовом фильтре при отстройке 5,0 МГц	$\gamma_{ABF AC LTE 5.0}$	34,0 дБ	На основе условия $\gamma_{ABF AC LTE 5.0} = \gamma_{ABF BC LTE 5.0}$
Потери на распространение по трассе $BC_{NG-1} - AC_{LTE}$	$L_{FS BC NG-AC}(d, f, H_{BC}, h_{AC})$	Расширенная модель Хаты	[7] приложение 2, здесь d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц), H_{BC} , h_{AC} – высоты расположения антенн BC_{NG-1} и $AC_{LTE-1800}$
Потери на распространение по трассе $AC_{LTE} - AC_{NG}$	$L_{FS AC-AC}(d, f)$	Формула свободного пространства	[7] приложение 2, $32,4 + 20\lg(d) + 20\lg(f)$ (дБ), где d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц)

рабочего диапазона вплоть до сближений с абонентами LTE на 4,75 м ($20 \text{ м} \times 10^{0,1 \times 12,5/2} = 4,75 \text{ м}$). Это меньше границы включения процедуры handover, полученной в случае 4. То есть абонент LTE-1800 будет раньше уходить из нижней части диапазона.

6. Случай воздействия $BC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$ при вертикальном разнесении антенн

$$P_{BC LTE} + K_{i BC LTE} - \gamma_{BC LTE vert} - \gamma_{BC LTE Tr} - \gamma_{InterMod BC LTE 2.5} - \gamma_{ABF BC LTE 2.5} - L_{FS BC LTE-BC}(0,02, 1802,5) + K_{i BC NG} - \gamma_{BC NG vert} - \gamma_{BC NG Rx} - \gamma_{BC NG Rx BF} - \xi_{TrD} = 20 \text{ дБм} + 16 \text{ дБи} - 25 \text{ дБ} - 2,5 \text{ дБ} - 36,5 \text{ дБ} - 20,3 \text{ дБ} - 43,5 \text{ дБ} + 11 \text{ дБи} - 16 \text{ дБ} - 2,5 \text{ дБ} - 1,7 \text{ дБ} - 3 \text{ дБ} = -104,0 \text{ дБм} (< -96 \text{ дБм}).$$

Выявленный запас $104 \text{ дБм} - 96 \text{ дБм} = 8 \text{ дБ}$ в расчете на расстояние (по формуле свободного пространства) показывает, что в вертикальном направлении антенны базовых станций NG-1 и LTE-1800 можно разносить на расстояние до 0,8 м.

7. Случай воздействия $BC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$ при горизонтальном разнесении антенн

$$P_{BC LTE} + K_{i BC LTE} - \gamma_{BC LTE Tr} - \gamma_{InterMod BC LTE 2.5} - \gamma_{ABF BC LTE 2.5} - L_{FS BC LTE-BC}(0,02, 1802,5) + K_{i BC NG} - \gamma_{BC NG Rx} - \gamma_{BC NG Rx BF} - \xi_{TrD} = 20 \text{ дБм} + 16 \text{ дБи} - 2,5 \text{ дБ} - 36,5 \text{ дБ} - 20,3 \text{ дБ} - 63,5 \text{ дБ} + 11 \text{ дБи} - 2,5 \text{ дБ} - 1,7 \text{ дБ} - 3 \text{ дБ} = -83,0 \text{ дБм}.$$

Полученный результат показывает, что этот случай самый сложный для обеспечения условий

совместной работы. Без использования дополнительных резервов выйти на уровень -96 дБм не удастся.

Выявленный дефицит 13 дБ (96 дБм – 83 дБм) в пересчете на расстояние (по формуле свободного пространства) показывает, что совместимость обеспечивается начиная с разнесения антенн базовых станций в горизонтальном направлении на 89 м.

Если удастся обеспечить разнесение антенн в пределах 40 м, то в пересчете дистанции на потери трассы (по формуле свободного пространства) получаем, что уровень внеполосного излучения может оказаться выше необходимого на 7 дБ. Это умеренное значение, которое можно достаточно просто скомпенсировать путем грубой настройки наклонов антенн BC_{NG-1} так, чтобы в вертикальной диаграмме направленности происходило дополнительное подавление сигнала, приходящего от BC_{LTE} , на 7 дБ. Если ориентироваться на типовой вариант с антенной K80010046V01 [14, с. 79], то по форме вертикальной диаграммы можно видеть, что указанный уровень подавления обеспечат наклоны, выполненные с погрешностью $\pm 2,5^\circ$.

Если разнесение антенн нельзя сделать больше 40 м, то дефицит в 13 дБ можно восполнить путем точной настройки наклонов антенн BC_{NG-1} , обеспечивающих попадание направления на антенны $BC_{LTE-1800}$ в ноль вертикальной диаграммы направленности с точностью $\pm 1^\circ$.

Кроме того, есть еще один существенный ресурс BC_{NG-1} , который остался пока не рассмотренным. Он связан с адаптивным режимом пространственной селекции, осуществляемым в антенной системе BC_{NG-1} . В соответствии с данными производителя [5], он позволяет подавлять направленные помехи, в данном случае внеполосное излучение от BC_{LTE} , на 22 дБ ($g_{BC\ NG\ AAR}$). При активации указанного режима условие совместимости для варианта воздействия $BC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$ будет выполнено уже начиная с 7 м разнесения антенн базовых станций.

Выводы

Проведенный анализ показывает, что условия совместимости между сетями LTE-1800 и NG-1, работающими в диапазоне 1797,5–1802,5 МГц, выделенном решением ГКРЧ [2], выполняются без оговорок в шести из семи возможных вариантов воздействия. И только в случае воздействия на BC_{NG-1} со стороны $BC_{LTE-1800}$ для обеспечения совместимости может потребоваться использование дополнительных ресурсов, связанных с настройкой антенной системы на стороне BC_{NG-1} . Если дистанция между антеннами базовых станций будет больше 89 м, то дополнительные ресурсы для обеспечения совместимости не требуются. Если дистанция между антеннами сократится до 40 м, то

дополнительные ресурсы, достаточные для обеспечения совместимости, позволяет получить грубая (с точностью $\pm 2,5^\circ$) настройка наклонов антенн BC_{NG-1} так, чтобы ноль в вертикальных диаграммах был направлен на антенны $BC_{LTE-1800}$. Сближение антенн базовых станций до 20 м потребует либо точной настройки наклонов антенн BC_{NG-1} (с погрешностью $\pm 1,0^\circ$) или обязательного использования режима адаптивной пространственной обработки в антенной системе BC_{NG-1} .

ПРИЛОЖЕНИЕ

Технология организации радиоканала в сетях связи подвижных абонентов в настоящее время построена исключительно на методах цифровой обработки/формирования сигналов.

Формирователь сигнала в такой технологии представляет собой программу, генерирующую квадратурные составляющие полезного видеосигнала (на нулевой несущей частоте) в виде двух цифровых потоков. Указанные цифровые потоки подвергаются обработке в цифровых фильтрах низкой частоты, которые обеспечивают очень высокую частотную избирательность при очень незначительных значениях смещений частоты за пределы рабочей полосы. После этого профильтрованные квадратурные потоки подаются на схемы ЦАП, на входе которых превращаются в аналоговые квадратурные сигналы. Указанные квадратурные видеосигналы пропускают через аналоговые фильтры низкой частоты, полоса которых согласована с размером ширины спектра сигнала. Но она не превосходит 5 МГц, так как в случаях, когда диапазон превосходит 5 МГц, групповой сигнал на несущей формируется путем сопряжения частотных сегментов по 5 МГц. Аналоговая фильтрация решает две задачи – дополнительного подавления излучения, проникающего в соседние рабочие диапазоны; подавления "зеркальных" копий спектра полезного сигнала, с неизбежностью появляющихся с периодичностью частоты дискретизации при цифровом способе формирования.

После этого квадратурные сигналы в схеме преобразования частоты переносятся на несущую частоту и поступают на вход усилителя мощности. На выходе усилителя мощности появляются продукты интермодуляции. С целью подавления продуктов интермодуляции, перед трансляцией в эфир сигналы проходят через аналоговые полосовые фильтры. Приведенная структура является типовой и предопределяет два этапа фильтрации: цифровой и аналоговый.

В [9, п.п. 6.6.3, 6.6.4.4] идет речь о работе в смещенном диапазоне. Это означает, что мешающие друг другу сигналы находятся в общей полосе аналоговых

фильтров. Подавление внеполосных излучений при этом полностью реализуется в цифровых фильтрах и путем разнесения по дистанции, плюс на базе селективных свойств антенн.

А в [9, п. 6.6.4.3] рекомендации рассматривают ситуации, когда мешающие сигналы попадают в различные полосы, сформированные аналоговыми фильтрами. В этом случае уровень внеполосных излучений будет претерпевать дополнительное подавление за счет аналоговой фильтрации.

Согласно [9, п. 6.6.3.2, табл. 6.6.3.2-6], сигналы LTE с полосой 5 МГц (и более) после цифровой фильтрации имеют спектр с очень крутым скатом подавления. До уровня -7 дБм (на 33 дБ = 26 дБ - (-7) дБм) при отстройках от края рабочей полосы всего на 50 кГц. При дальнейшем увеличении частотной отстройки (до значений $5,05$ МГц) происходит достаточно медленный рост уровня подавления (всего на 7 дБ). А при отстройках после 5 МГц уровень подавления вообще может не изменяться.

Отсюда следует:

1. Полоса цифрового ФНЧ равна $2,5$ МГц.
2. Отстройки частоты более чем на 5 МГц рассматриваются как не имеющие преимуществ с точки зрения фильтрации.
3. Полоса аналоговых фильтров, которая должна быть согласована с полосой цифровых ФНЧ и имеет значение, близкое к 5 МГц.
4. Штатные уровни подавления внеполосного излучения в последовательном соединении цифрового и аналогового фильтров должны наблюдаться уже при отстройках частоты на 5 МГц.

Уровень подавления внеполосного излучения в цифровом фильтре БС LTE позволяет оценить данные [9, п. 6.6.3.2, табл.6.6.3.2-6]. Действительно, с учетом типового значения максимально допустимого в полосе 10 МГц для БС LTE уровня излучения 40 Вт получаем, что в пересчете на полосу 100 кГц излучаемая мощность не должна превышать 46 дБм - $10 \lg(10 \text{ МГц}/100 \text{ кГц}) = 26$ дБм. Поэтому при отстройках частоты на $2,5$ МГц (с учетом [9, табл.6.6.3.2-6]) получаем подавление 26 дБм - (-7) дБм - $(-3,5)$ дБм = $36,5$ дБ. А при отстройках на 5 МГц и более, подавление составит 26 дБм - (-7) дБм - (-7) дБм = $40,0$ дБ.

Регламентируемый уровень подавления, который должен обеспечивать аналоговый фильтр при отстройке на 5 МГц, можно оценить на основе сопоставления данных [9, п. 6.6.4.3.1, табл.6.6.4.3.1-1] и [9, п. 6.6.4.4.1, табл.6.6.4.4.1-1]. Первая из указанных таблиц устанавливает уровень внеполосного излучения (нас интересует Band 3, полоса $1805-1880$ МГц),

который после дополнительного подавления в аналоговых фильтрах разделения полос не нарушит работоспособность сети, совмещение с которой рассматривается. В пересчете на полосу 100 кГц он будет -52 дБм - $10 \lg(1 \text{ МГц}/100 \text{ кГц}) = -62$ дБм. Вторая из указанных таблиц (нас интересует позиция Band 3) устанавливает уровень внеполосных излучений, который не нарушит работоспособность без дополнительного подавления в разделительных аналоговых фильтрах. Он составляет -96 дБм.

Отсюда регламентируемый уровень подавления в аналоговых фильтрах при отстройке на $5,0$ МГц составляет 96 дБм - 62 дБм = -34 дБ.

Будем использовать для описания характера подавления сигнала на скатах полосового фильтра аппроксимацию Баттерворта [10, 11]:

$$\eta_{\text{ПФ}}(\Delta f) \approx \frac{1}{\left(\frac{\Delta F_{\text{П}}/2 + \Delta f}{\Delta F_{\text{ПЧ}}/2}\right)^{2n}},$$

где $\Delta F_{\text{П}}$ - рабочая полоса фильтруемого диапазона, Δf - отстройка по частоте рассматриваемой позиции на скате от края рабочего диапазона, $\Delta F_{\text{ПЧ}}$ - полоса пропускания фильтра по уровню подавления 3 дБ. Для того чтобы уменьшить уровень искажений на краях рабочего диапазона, стандартно выбирают $\Delta F_{\text{ПЧ}} = 1,1 \Delta F_{\text{П}}$. В нашем случае $\Delta F_{\text{П}} = 5,0$ МГц и, как отмечалось, при $\Delta f = 5,0$ МГц должно выполняться $10 \lg(\eta_{\text{ПФ}}) = -34$ дБ.

Отсюда для $\Delta f = 2,5$ МГц находим:

$$\begin{aligned} 10 \lg(\eta_{\text{ПФ}}(2,5)) &\approx -10 \lg\left(\frac{5 \text{ МГц}}{2,75 \text{ МГц}}\right) \times 2n = \\ &= \left(-10 \lg\left(\frac{7,5 \text{ МГц}}{2,75 \text{ МГц}}\right) \times 2n\right) \times \frac{\lg\left(\frac{5 \text{ МГц}}{2,75 \text{ МГц}}\right)}{\lg\left(\frac{7,5 \text{ МГц}}{2,75 \text{ МГц}}\right)} = \\ &= -34 \text{ дБ} \times \frac{\lg\left(\frac{5 \text{ МГц}}{2,75 \text{ МГц}}\right)}{\lg\left(\frac{7,5 \text{ МГц}}{2,75 \text{ МГц}}\right)} \approx -20,3 \text{ дБ} \end{aligned}$$

Это значение использовано в таблицах для параметров: $\gamma_{\text{ABF БС LTE 2.5 И}} \gamma_{\text{БС LTE RХ BF}}$.

А на краю рабочей полосы подавление в фильтре составит:

$$10 \lg(1 + \eta_{\text{ПФ}}^{-1}(0)) = 10 \lg(1 + (1,1)^{-2n}) \approx 10 \lg\left(1 + (1,1)^{-3,4/\lg\left(\frac{7,5}{2,75}\right)}\right) \approx 1,7 \text{ дБ}.$$

Это значение использовано в таблицах для параметров: $\gamma_{\text{БС NG RХ BF}}$, $\gamma_{\text{БС LTE RХ BF}}$, $\gamma_{\text{АС NG RХ BF}}$ И $\gamma_{\text{АС LTE RХ BF}}$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. **Акимов В.** Спецсвязь медленно мигрирует в LTE [Электронный ресурс]. ComNews. 28 сентября 2015 г.

2. Решение государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) № 06-17-03-001 от 23.10.2006.
3. Report of the visit by officers of TEC and WPC to see the test up demonstration by M/s NGTL at ALTTC (GSM Lab), Ghaziabad, on 14.8.2008 regarding Out of band spurious emission and interference between NG-1 system and GSM 1800 MHz BTS. P.12.
4. Test Report of Interference from NG-1 BTS to GSM BTS// Doc no: NGTL/NG-1/2008/TEC/1.4. Next Generation Telecommunications India Private Limited (NGTL) 19 July, 2008, P. 8.
5. REPORT ON FCC CRF 47 Part2: 2007 & Part 27: 2007 Testing of Beijing Xinwei Telecom Technology Inc., Broadband Wireless Base Station McWill XW5000-07// FCC ID: WIN-XW5000-07, Doc Number 57008048, Report 01 Issue 1. August 2008.
6. Протоколы № 36-0001071-10 - 36-0014-71-10// Радиочастотный центр Центрального федерального округа (ФГУП "РЧЦ ЦФО") от 03.11.2015 и 17.11.2015.
7. Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). Report 131. Derivation of a block edge mask (BEM) for terminal stations in the 2.6 GHz frequency band (2500–2690 MHz). Dublin, January 2009. P. 66.
8. YD. Industry Standard fo Communications in PRC. YDT 1956–2009. Technical Requirements for Air Interface of SCDMA Wideband Radio Access Network System. 2009-06-15 issued. Issued by MIIT of PRC. P. 149.
9. 3GPP TS 36.104 V8.5.0 (2009-03) // 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 8).
10. **Айфичер Э., Джервис Б.** Цифровая обработка сигналов: практический подход / Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. С. 992.
11. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. С. 1104.
12. 3GPP TS 36.101 V8.5.1 (2009-03)// 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 8).
13. **Sesia S., Toufik I., Baker M.** LTE – The UMTS Long Term Evolution. A John Wiley & Sons, 2011. P. 752.
14. Antennas & Filters fo Mobile Communications. 700–3800 MHz. Kathrein Scala Division [электронный ресурс]. Каталог 2013 г.

