

К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СТАНДАРТОВ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ

*О.А. Шорин, Генеральный директор ООО «НСТТ», профессор, д.т.н., oshorin@gmail.com;
Г.О. Бокк, директор по науке ООО «НСТТ», д.т.н., bokkg@yandex.ru*

УДК 621.396

Аннотация. Рассмотрен режим совместной работы сети LTE 1800 FDD и сети NG-1 TDD. Исследовались вопросы ЭМС в условиях, когда рабочая полоса сети NG-1 находится в пределах разграничительного интервала дуплексных каналов сети LTE: 1787,5-1802,5 МГц. Проанализированы все варианты взаимного влияния: БС <-> БС, БС <-> АС и АС <-> АС. Установлено, что самой сложной по обеспечению ЭМС является ситуация БС <-> БС при горизонтальном разnose антенн. Добиться ЭМС в этом случае удастся, если защитный частотный интервал между рабочими диапазонами сетей составляет не менее 2,5 МГц, а разнос антенн базовых станций не меньше 89 м. Но если имеется возможность хотя бы грубо настраивать позицию и наклон антенны БС сети NG-1, то требуемый разнос сокращается до 40 м.

Ключевые слова: NG-1, LTE.

TO THE QUESTION ABOUT THE FOURTH GENERATION ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY STANDARDS

*Oleg Shorin, General Director LLC «NXTT», professor, doctor of technical sciences;
German Bokk, science director LLC «NXTT», doctor of technical sciences*

Annotation. Examines the LTE 1800 FDD network and NG-1 TDD collaboration. We studied EMS in conditions when the band of the network NG-1 is within the boundary interval of duplex channels LTE: 1787,5-1802,5 MHz. Analyzed all the variants of mutual influence: BS <-> BS BS <-> AC and AC <-> AC. Found that most difficult to ensure the EMS is the situation BS <-> BS horizontal spacing of the antennas. It is possible to achieve EMC in this case if the protective frequency spacing between the operating ranges of the networks is not less than 2.5 MHz, and the spacing of base station antennas is not less than 89 m. However, if you have the opportunity to at least roughly adjust the position and tilt of the antenna BS network NG-1, the required spacing is reduced to 40 m.

Keywords: NG-1, LTE.

Вопрос электромагнитной совместимости (ЭМС) является одним из важнейших, определяющих возможности внедрения и развития того или иного стандарта широкополосного беспроводного доступа, особенно для систем мобильной связи. Наиболее распространенной и перспективной технологией мобильной связи в России, на сегодняшний день, является LTE. Однако она развивается совместно с другими технологиями, развернутыми или планируемыми к развертыванию в смежных участках спектра. Поэтому межсистемная ЭМС является определяющим фактором эффективного использования национального достояния – частотного ресурса.

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 другие, 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 г. [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 (NG-1), включенный в рекомендацию ITU-RM.1801-1 и полностью реализующий весь функционал профессиональной связи с широкополосным радиоинтерфейсом CS-OFDMA. Отличительной особенностью данного стандарта является то, что он может использовать частотный диапазон 1785-1805 МГц, не рекомендованный Международным союзом электросвязи для сетей LTE (см. 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.

Мобильные сети четвертого поколения (4G) появились как результат технологического прогресса, произошедшего с момента появления сетей младших поколений. Но в них, наряду с заметно возросшей спектральной эффективностью, возник досадный недостаток: ухудшились условия межсистемной электромагнитной совместимости (ЭМС). Заметно возросли требования к величине защитных частотных полос. Так, для сетей UMTS (поколение 3G), практика показала достаточность отстройки несущих на 5 МГц, что соответствует защитной полосе 1,16 МГц. А для сетей LTE утвердилось применение защитной полосы 5 МГц. В результате для UMTS процент защитной полосы составляет $(5-3,84) \text{ МГц} / 3,84 \text{ МГц} = 30\%$, а для LTE – 100% или 50% (при нарезке каналов по 5 или 10 МГц).

Поэтому вопрос возможности улучшения межсистемной ЭМС и уменьшения защитной полосы для сетей 4G особенно актуален. Чтобы на него ответить, необходимо выделить наиболее значимые источники внеполосного излучения, выявить их характеристики и установить их связь с технологическими параметрами. Это позволит выяснить, какие дополнительные ресурсы существуют для сокращения защитных полос, и какие показатели реально достижимы в этом направлении. Определенный оптимизм по данному вопросу внушают результаты работы [1], где с учетом ресурсов, связанных с территориальным и угловым размещением антенн, показана возможность совместной работы сетей четвертого поколения стандартов NG-1 (McWiLL) и LTE, при защитной полосе 2,5 МГц.

По частотному диапазону 1785-1805 МГц существует решение ГКРЧ № 06-17-03-001 от 23 октября 2006 г. [3], 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 радиоинтерфейсом OFDMA (в испытаниях использовалось оборудование стандарта iBURST) со стандартом GSM 1800.

В 2011 г. ЗАО «НИРИТ» в соответствии с решением ГКРЧ № 10-09-09 от 29 октября 2010 г. были проведены повторные испытания в рамках опытной зоны в городе Воронеж по технологии McWiLL, имеющей идентичный радиоинтерфейс. Испытания полностью подтвердили выводы, сделанные НИИРОм в 2006 г. С формальной точки зрения, проведенные испытания не ответили прямо на вопрос, изменятся ли требования к межсистемной ЭМС при переходе от GSM1800 к LTE1800, так как на момент испытаний LTE1800 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 радиоинтерфейс, 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 потому, что 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. 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.

С учетом цифровой технологии формирования сигналов в сетях 4G, можно утверждать, что существуют только два источника внеполосного излучения: остаточные продукты цифровой фильтрации и продукты комбинационного излучения, порождаемые на нелинейных элементах схем частотного преобразования и усилителя мощности. В работе [2] подробно рассмотрен этот вопрос. В [5] содержат рекомендации на допустимые в LTE рабочие полосы передатчиков (1,4; 3 и 5 МГц) и ограничительные маски внеполосного излучения для них. Эти маски имеют изломы в характерных позициях отстроек, равных значениям рабочей полосы и удвоенной полосы. Но указанные позиции соответствуют границам исчезновения комбинационных продуктов 3-го и 5-го порядков. А скаты масок от края до первого излома во всех случаях линейные с коэффициентом наклона, обратно пропорциональным значению рабочей полосы. Это соответствует приближенному расчету уровня для комбинационных компонент 3-го порядка. Из этого следует, что, согласно [5], основной вклад во внеполосное излучение приносят комбинационные продукты. И только при отстройках за зону комбинационных продуктов 3-го порядка обнаруживается вклад другого источника – остаточных продуктов цифровой фильтрации

Поэтому обоснование необходимых норм по ЧТР для технологии NG-1 (McWiLL) с учетом перехода GSM1800 на LTE1800 необходимо провести с учетом всех вышеуказанных факторов.

В качестве стандартных пространственных разносов будем использовать:

| Тип трассы | Минимальный уровень сближения антенн (м) | Примечание |
|---|--|---|
| $BC_{NG} - BC_{LTE}$ по горизонтали | 20 | Стандартная протяженность одного подъезда в жилых застройках |
| $BC_{NG} - BC_{LTE}$ по вертикали | 2 | |
| $BC_{NG} - AC_{LTE}$, $BC_{LTE} - AC_{NG}$ | 50 | При более близких дистанциях абоненты попадают в зону под антенной БС, в которой мешающие сигналы существенно подавляются |

Параметры, нужные для расчетов, приведены в нижеследующих таблицах.

Таблица 1. Параметры БС NG-1.

| Название параметра | Обозначение | Значение | Источник |
|--------------------------------------|---------------------|----------|--|
| Мощность трансляции | $P_{BC\ NG}$ | 34 dBm | [2, решение № 06-17-03-001] |
| Ширина полосы излучения NG-1 | $\Delta F_{BC\ NG}$ | 5 МГц | [2, решение № 06-17-03-001] |
| Мощность трансляции в полосе 100 кГц | $p_{BC\ NG}$ | 17 dBm | Расчет по формуле $P_{BC\ NG} - 10 \cdot \lg(\Delta F_{BC\ NG}/100\text{кГц})$ |
| Коэффициент усиления антенны БС NG-1 | $K_{i\ BC\ NG}$ | 11 dBi | [2, решение № 06-17-03-001] |

| Название параметра | Обозначение | Значение | Источник |
|---|---|-------------------------|---|
| Потери в фидере тракта передачи БС NG-1 | $\gamma_{BC\ NG\ Tr}$ | 2,5 dB | Типовое значение |
| Потери в фидере приемного тракта БС NG-1 | $\gamma_{BC\ NG\ Rx}$ | 2,5 dB | Типовое значение |
| Подавление в полосовом фильтре приемного тракта на краю диапазона | $\gamma_{BC\ NG\ Rx\ BF}$ | 1,7 dB | Приложение 1, с учетом [9, 10] |
| Подавление внеполосного излучения в цифровом фильтре при отстройке 2,5 МГц | $\gamma_{DF\ BC\ NG}$ | 39 dBc | 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 | $\gamma_{ABF\ BC\ NG}$ | 24 dBc | Экспериментальные данные [3] |
| Потери на распространение БСNG – ACLTE | $L_{FS\ BC\ NG-AC}(d, f, H_{BC}, h_{AC})$ | Расширенная модель Хаты | [7], приложение 2, здесь d – расстояние трассы (км), f – частота (МГц), H_{BC} , h_{AC} – высоты антенн БС _{NG-1} и АС _{LTE-1800} |
| Уровень подавления антенны в направлениях близких к 90° или -90° в вертикальной плоскости | $\gamma_{BC\ NG\ vert}$ | 16 dB | Типовое ограничение для антенн с $K_i = 11$ dBi [14, антенна K80010046V01, стр. 79] |
| Дополнительное подавление помех в приемнике за счет режима Transmit Diversity | ξ_{TrD} | 3 dB | [8, п. 3.12.1]. Расширение полосы сигнала в 2 раза. |
| Уровень подавления направленной помехи в адаптивной антенной системе | $\gamma_{BC\ NG\ AAR}$ | 23 dB | Технические испытания. (Будем учитывать только в самых критических случаях) |

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

| Название параметра | Обозначение | Значение | Источник |
|--|-----------------------------|----------|--|
| Максимальная допустимая мощность трансляции | $P_{MAX\ BC\ LTE}$ | 46 dBm | Типовое значение для полосы 10 МГц, также см. [9, п. 6.2]. |
| Типовая средняя мощность трансляции | $P_{BC\ LTE}$ | 40 dBm | 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 | $\Delta F_{BC\ LTE}$ | 10 МГц | Типовое значение для диапазона 1800 МГц. Более значительный рефарминг полосы в 1800 МГц пока не прогнозируется. |
| Мощность трансляции в полосе 100 кГц | $P_{BC\ LTE}$ | 20 dBm | Расчет по формуле $P_{BC\ LTE} - 10 * \lg(\Delta F_{BC\ LTE} / 100\text{кГц})$ |
| Коэффициент усиления антенны БС LTE | $K_i\ BC\ LTE$ | 16 dBi | Типовое значение для городских сегментов сети диапазона 1800 МГц |
| Подавление в полосовом фильтре приемного тракта на краю диапазона | $\gamma_{BC\ LTE\ Rx\ BF}$ | 1,7 dB | Приложение 1, с учетом [10, 11]. |
| Потери в фидере тракта передачи БС LTE1800 | $\gamma_{BC\ LTE\ Tr}$ | 2,5 dB | Типовое значение |
| Потери в фидере приемного тракта БС LTE1800 | $\gamma_{BC\ LTE\ Rx}$ | 2,5 dB | Типовое значение |
| Подавление внеполосного излучения в цифровом фильтре при отстройке 2,5 МГц | $\gamma_{DF\ BC\ LTE\ 2,5}$ | 36,5 dBc | Согласно [9, п. 6.6.3.2] и с учетом значения $P_{MAX\ BC\ LTE}$: $\gamma_{DF\ BC\ LTE\ 2,5} = P_{MAX\ BC\ LTE} - 10\lg(10\text{МГц}/100\text{кГц}) - (-14\text{ dBm}) + -3,5\text{ dBm} = 36,5\text{ dBc}$ |

| Название параметра | Обозначение | Значение | Источник |
|---|---------------------------------------|---------------------------------|---|
| Подавление внеполосного излучения в цифровом фильтре при отстройке 5 МГц | $\gamma_{DFBC LTE5}$ | 40dBc | Согласно [9, п. 6.6.3.2] и с учетом значения $P_{MAX BC LTE}$: $\gamma_{DFBC LTE 2,5} = P_{MAX BC LTE} - 10Lg(10МГц/100кГц) - (-14 dBm) = 40,0 dBc$ |
| Подавление внеполосного излучения в аналоговом полосовом фильтре при отстройке 2,5 МГц | $\gamma_{ABF BC LTE 2,5}$ | 20,3 dBc | Приложение 1, 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 МГц | $\gamma_{ABF BC LTE 5}$ | 34 dBc | Приложение 1, с учетом [9, п.6.6.4.3.1 и п.6.6.4.1]. |
| Потери на распространение по трассе $BC_{LTE} - AC_{NG}$ | $L_{FS BC LTE-AC}(d,f,H_{BC},h_{AC})$ | Расширенная модель Хаты | [7, приложение 2], здесь d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц), H_{BC} , h_{AC} – высоты расположения антенн $BC_{LTE-1800}$ и AC_{NG-1} . |
| Потери на распространение по трассе $BC_{LTE} - BC_{NG}$ | $L_{FS BC LTE-BC}(d,f)$ | Формула свободного пространства | [7, приложение 2] $32,4+20lg(d)+20lg(f)$ (dB), где d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц) |
| Уровень подавления антенны в направлениях близких к 90° или -90° в вертикальной плоскости | $\gamma_{BC LTEvert}$ | 25 dB | Типовое ограничение для антенн с $K_i = 16$ dBi [14, антенна K8001029V0, стр. 53] |

Таблица 3. Параметры AC NG-1 (UENG-1).

| Название параметра | Обозначение | Значение | Источник |
|--|---------------------------------------|-------------------------|---|
| Мощность трансляции AC | $P_{AC NG}$ | 23 dBm | Типовое ограничение для UELTE [12, п. 6.2.2]. |
| Ширина полосы излучения AC 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 dBm | Расчет по формуле $P_{AC NG} - 10*lg(\Delta F_{AC NG}/100кГц)$ |
| Коэффициент усиления антенны AC NG-1 | $K_{i AC NG}$ | 3 dBi | Стандартное значение для мобильной станции [13, стр. 447] |
| Потери на экранизацию телом антенны AC NG-1 | $\gamma_{AC Body}$ | 3 dB | Типовое значение |
| Подавление в полосовом фильтре приемного тракта на краю диапазона | $\gamma_{AC NGRxBF}$ | 1,7 dB | Приложение 1, с учетом [10, 11] |
| Подавление внеполосного излучения в цифровом фильтре при отстройке 2,5 МГц | $\gamma_{DF AC NG}$ | 39 dBc | В соответствии с данными для BC 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 dBc | В соответствии с данными для BC NG-1 [3]. |
| Потери на распространение по трассе $BC_{LTE} - AC_{NG}$ | $L_{FS BC LTE-AC}(d,f,H_{BC},h_{AC})$ | Расширенная модель Хаты | [7, приложение 2], здесь d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц), H_{BC} , h_{AC} – высоты расположения антенн $BC_{LTE-1800}$ и AC_{NG-1} . |

| Название параметра | Обозначение | Значение | Источник |
|---|---------------------|---------------------------------|--|
| Потери на распространение по трассе $AC_{LTE} - AC_{NG}$ | $L_{FS AC-AC}(d,f)$ | Формула свободного пространства | [7, приложение 2], $32,4+20\lg(d)+20\lg(f)$ (dB), где d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц) |
| Дополнительное подавление помех в приемнике за счет режима Transmit Diversity | ξ_{TrD} | 3 dB | [8, п. 3.12.1] Расширение полосы сигнала в 2 раза. |

Таблица 4. Параметры ACLTE-1800 (UEE-UTRA Band 3).

| Название параметра | Обозначение | Значение | Источник |
|--|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| Мощность трансляции AC | $P_{AC LTE}$ | 23 dBm | [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 | $\rho_{AC LTE}$ | 20,5 dBm | 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 dBi | Стандартное значение для мобильной станции [13, стр. 447] |
| Потери на экранизацию телом антенны AC LTE | $\gamma_{AC Body}$ | 3 dB | Типовое значение |
| Подавление в полосовом фильтре приемного тракта на краю диапазона | $\gamma_{AC LTERxBF}$ | 1,7 dB | Приложение 1, с учетом [10, 11] |
| Подавление внеполосного излучения в цифровом фильтре при отстройке 2,5 МГц | $\gamma_{DF AC LTE 2,5}$ | 40,5 dBc | [12, п. 6.6.2.11] и с учетом значения $\rho_{AC LTE}$: $\gamma_{DF AC LTE 2,5} = \rho_{AC LTE} - (110 \text{ dBm}) + 10\lg(1\text{МГц}/100\text{кГц}) = 40,5 \text{ dBc}$ |
| Подавление внеполосного излучения в цифровом фильтре при отстройке 5 МГц | $\gamma_{DF AC LTE 5}$ | 43,5 dBc | [12, п. 6.6.2.11] и с учетом значения $\rho_{AC LTE}$: $\gamma_{DF AC LTE 5} = \rho_{AC LTE} - (-13 \text{ dBm}) + 10\lg(1\text{МГц}/100\text{кГц}) = 43,5 \text{ dBc}$ |
| Подавление внеполосного излучения в аналоговом полосовом фильтре при отстройке 2,5 МГц | $\gamma_{ABF AC LTE 2,5}$ | 20,3 dBc | На основе условия $\gamma_{ABF AC LTE 2,5} = \gamma_{ABF BC LTE 2,5}$ |
| Подавление излучения в аналоговом полосовом фильтре при отстройке 5 МГц | $\gamma_{ABF AC LTE 5}$ | 34 dBc | На основе условия $\gamma_{ABF AC LTE 5} = \gamma_{ABF BC LTE 5}$ |
| Потери на распространение по трассе $BC_{NG} - AC_{LTE}$ | $L_{FS BC NG-AC}(d,f,H_{BC},h_{AC})$ | 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], $32,4+20\lg(d)+20\lg(f)$ (dB), где d – расстояние трассы (км), f – частота передачи (МГц) |

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 LTE1800 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 ситуации:

- 1) Воздействие $BC_{NG} \rightarrow AC_{LTE-1800}$.
- 2) Воздействие $BC_{LTE-1800} \rightarrow AC_{NG-1}$.
- 3) Воздействие $AC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$.
- 4) Воздействие $AC_{NG-1} \rightarrow AC_{LTE-1800}$.
- 5) Воздействие $AC_{LTE-1800} \rightarrow AC_{NG-1}$.
- 6) Воздействие $BC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$, при вертикальном разнесении антенн.
- 7) Воздействие $BC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$, 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 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 dBm [9, п. 6.6.4.4.1].

1) *Случай воздействия $BC_{NG} \rightarrow AC_{LTE-1800}$*

$$P_{BC\ NG} + K_{i\ BC\ NG} - \gamma_{BC\ NGTr} - \gamma_{DF\ BC\ NG} - \gamma_{ABF\ BC\ NG} - L_{FS\ BC\ NG-AC} (0,05; 1805; 27; 1,5) - \gamma_{AC\ Body} + K_{i\ AC\ LTE} - \gamma_{AC\ LTERx\ BF} = 17\ dBm + 11\ dBi - 2,5\ dB - 39\ dB - 24\ dB - 77,7\ dB - 3\ dB + 3\ dBi - 1,7\ dB = -116,9\ dBm (<-96\ dBm)$$

2) *Случай воздействия $BC_{LTE-1800} \rightarrow AC_{NG-1}$*

$$P_{BC\ LTE} + K_{i\ BC\ LTE} - \gamma_{BC\ LTETr} - \gamma_{DF\ BC\ LTE\ 2,5} - \gamma_{ABF\ BC\ LTE\ 2,5} - L_{FS\ BC\ LTE-AC} (0,05; 1802,5; 27; 1,5) - \gamma_{AC\ Body} + K_{i\ AC\ NG} - \gamma_{AC\ NGRx\ BF} - \xi_{TrD} = 20\ dBm + 16\ dBi - 2,5\ dB - 36,5\ dB - 20,3\ dB - 77,7\ dB - 3\ dB + 3\ dBi - 1,7\ dB - 3\ dB = -105,7\ dBm (<-96\ dBm)$$

3) *Случай воздействия $AC_{LTE-1800} \rightarrow BC_{NG-1}$*

$$P_{AC\ LTE} + K_{i\ AC\ LTE} - \gamma_{DF\ AC\ LTE\ 2,5} - \gamma_{ABF\ AC\ LTE\ 2,5} - \gamma_{AC\ Body} - L_{FS\ BC\ NG-AC} (0,05; 1802,5; 27; 1,5) + K_{i\ BC\ NG} - \gamma_{BC\ NGRx} - \gamma_{BC\ NGRx\ BF} - \xi_{TrD} = 20,5\ dBm + 3\ dBi - 40,5\ dBc - 20,3\ dBc - 3\ dB - 77,7\ dB + 11\ dBi - 2,5\ dB - 1,7\ dB - 3\ dB = -114,2\ dBm (<-96\ dBm)$$

4) *Случай воздействия $AC_{NG-1} \rightarrow AC_{LTE-1800}$*

$$P_{AC\ NG} + K_{i\ AC\ NG} - \gamma_{DF\ AC\ NG} - \gamma_{ABF\ AC\ NG} - \gamma_{AC\ Body} - L_{FS\ AC-AC} (0,02; 1805) - \gamma_{AC\ Body} + K_{i\ AC\ LTE} - \gamma_{AC\ LTE\ Rx\ BF} = 22,2\ dBm + 3\ dBi - 39\ dBc - 24\ dBc - 63,6\ dB - 3\ dB + 3\ dB - 1,7\ dB = -103,1\ dBm (<-96\ dBm)$$

Выявленный запас $103,1\ dBm - 96\ dBm = 7,1\ dB$, в пересчете на расстояние (по формуле свободного пространства) показывает, что $AC_{LTE-1800}$ сохранит работоспособность на нижнем крае рабочего диапазона вплоть до сближений с абонентами NG-1 на 8,8 м ($20\ м * 100,1^{*7,1/2} = 8,8\ м$). Сближение на расстояния меньше 8,8 м может приводить к процедуре handover с переводом ресурса радиоканала $AC_{LTE-1800}$ 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 $AC_{LTE-1800} \rightarrow AC_{NG-1}$*

$$P_{AC\ LTE} + K_{i\ AC\ LTE} - \gamma_{DF\ AC\ LTE\ 2,5} - \gamma_{ABF\ AC\ LTE\ 2,5} - \gamma_{AC\ Body} - L_{FS\ AC-AC} (0,02; 1802,5) - \gamma_{AC\ Body} + K_{i\ AC\ NG} - \gamma_{AC\ NGRx\ BF} - \xi_{TrD} = 20,5\ dBm + 3\ dBi - 40,5\ dBc - 20,3\ dBc - 3\ dB - 63,5\ dB - 3\ dB + 3\ dBi - 1,7\ dB - 3\ dB = -108,5\ dBm (<-96\ dBm)$$

Выявленный запас $108,5\ dBm - 96\ dBm = 12,5\ dB$, в пересчете на расстояние (по формуле свободного пространства) показывает, что AC_{NG-1} сохранит работоспособность на верхнем крае рабочего диапазона вплоть до сближений с абонентами LTE на 4,75 м ($20\ м * 10^{0,1^{*12,5/2}} = 4,75\ м$). Это меньше границы включения процедуры handover, полученной в четвертом случае. То есть, абонент LTE1800 будет раньше уходить из нижней части диапазона.

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

$$P_{\text{БС LTE}} + K_i \text{ БС LTE} - \gamma_{\text{БС LTEvert}} - \gamma_{\text{БС LTETr}} - \gamma_{\text{DF БС LTE 2,5}} - \gamma_{\text{ABF БС LTE 2,5}} - L_{\text{ФС БС LTE-БС}} (0,002; 1802,5) + \\ + K_i \text{ БС NG} - \gamma_{\text{БС NGvert}} - \gamma_{\text{БС NGRx}} - \gamma_{\text{БС NGRxBF}} - \xi_{\text{TrD}} = 20 \text{ dBm} + 16 \text{ dBi} - 25 \text{ dB} - 2,5 \text{ dB} - 36,5 \text{ dB} - \\ - 20,3 \text{ dB} - 43,5 \text{ dB} + 11 \text{ dBi} - 16 \text{ dB} - 2,5 \text{ dB} - 1,7 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = -104,0 \text{ dBm} (< -96 \text{ dBm}).$$

Выявленный запас $104 \text{ dBm} - 96 \text{ dBm} = 8 \text{ dB}$, в пересчете на расстояние (по формуле свободного пространства) показывает, что в вертикальном направлении антенны базовых станций NG-1 и LTE1800 можно разносить на расстояние до 0,8 м.

7) *Случай воздействия БС_{LTE1800} → БС_{NG-1}, при горизонтальном разнесении антенн*

$$P_{\text{БС LTE}} + K_i \text{ БС LTE} - \gamma_{\text{БС LTETr}} - \gamma_{\text{DF БС LTE 2,5}} - \gamma_{\text{ABF БС LTE 2,5}} - L_{\text{ФС БС LTE-БС}} (0,02; 1802,5) + K_i \text{ БС NG} - \\ - \gamma_{\text{БС NGRx}} - \gamma_{\text{БС NGRxBF}} - \xi_{\text{TrD}} = 20 \text{ dBm} + 16 \text{ dBi} - 2,5 \text{ dB} - 36,5 \text{ dB} - 20,3 \text{ dB} - 63,5 \text{ dB} + \\ + 11 \text{ dBi} - 2,5 \text{ dB} - 1,7 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = -83 \text{ dBm}.$$

Полученный результат показывает, что этот случай самый сложный для обеспечения условий совместной работы. Без использования дополнительных резервов выйти на уровень – 96 dBm не удастся.

Выявленный дефицит 13 dB ($96 \text{ dBm} - 83 \text{ dBm}$), 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 dB. Это умеренное значение, которое можно достаточно просто скомпенсировать путем грубой настройки наклонов антенн БС_{NG-1} так, чтобы в вертикальной диаграмме направленности происходило дополнительное подавление сигнала, приходящего от БС_{LTE} на 7 dB. Если ориентироваться на типовой вариант с антенной K80010046V01 [14, стр. 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 dB можно восполнить путем точной настройки наклонов антенн БС_{NG-1}, обеспечивающих попадание направления на антенны БС_{LTE-1800} в ноль вертикальной диаграммы направленности с точностью $\pm 1^\circ$.

Кроме того, есть еще один существенный ресурс БС_{NG-1}, который остался пока не рассмотренным. Он связан с адаптивным режимом пространственной селекции, осуществляемым в антенной системе БС_{NG-1}. В соответствии с данными производителя [5], он позволяет подавлять направленные помехи, в данном случае внеполосное излучение от БС_{LTE}, на 23 dB ($\gamma_{\text{БС NGAAR}}$). При активации указанного режима условие совместимости для варианта воздействия БС_{LTE-1800} → БС_{NG-1} будет выполнено, уже начиная с 7 м разнесения антенн базовых станций.

Выводы

Сети мобильной связи 4G на текущий момент существенно уступают сетям 3G по показателю величины защитных частотных интервалов, требующихся для обеспечения совместной работы. В статье выявлен ряд дополнительных возможностей, доступных для сетей стандарта LTE, позволяющих добиться выполнения условий межсетевой ЭМС, прописанных в рекомендациях 3GPP TS 36,104 при защитных интервалах сопоставимых с применяемыми в сетях 3G. На примере совместной работы сетей 4G стандартов LTE1800 и NG-1 (McWiLL) показана возможность совместной работы в условиях применения защитного частотного интервала 2,5 МГц при условии дополнительной настройки наклона антенн.

Проведенный анализ показывает, что условия совместимости между сетями LTE1800 и NG-1, работающей 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 БС_{NG-1} со стороны БС_{LTE-1800} для обеспечения совместимости может

потребуется использование дополнительных ресурсов, связанных с настройкой антенной системы на стороне БС_{NG-1}.

Литература

1. Акимов В. Спецсвязь медленно мигрирует в LTE. ComNews, 28.09.2015. URL <http://www.comnews.ru/node/97700>
2. Решение государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) № 06-17-03-001, от 23.10.2006, 3 с.
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. – 992 с.
11. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
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. Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. 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 URL www.kathrein-scala.com Каталог 2103.