

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Отчет МСЭ-R SM.2421-0
(06/2018)

**Нежелательные излучения
цифровых радиосистем**

Серия SM
Управление использованием спектра



Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Отчетов МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REP/en>.)

| Серия | Название |
|-----------|---|
| BO | Спутниковое радиовещание |
| BR | Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения |
| BS | Радиовещательная служба (звуковая) |
| BT | Радиовещательная служба (телевизионная) |
| F | Фиксированная служба |
| M | Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы |
| P | Распространение радиоволн |
| RA | Радиоастрономия |
| RS | Системы дистанционного зондирования |
| S | Фиксированная спутниковая служба |
| SA | Космические применения и метеорология |
| SF | Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы |
| SM | Управление использованием спектра |

Примечание. – Настоящий Отчет МСЭ-R утвержден на английском языке Исследовательской комиссией в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2018 г.

© ITU 2018

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

ОТЧЕТ МСЭ-R SM.SM.2421-0

Нежелательные излучения цифровых радиосистем

(2018)

Сфера применения

В настоящем Отчете представлены результаты измерения нежелательных излучений ряда образцов оборудования цифровых радиосистем и их сравнения:

- с предельными уровнями внеполосных излучений, приведенными в Рекомендации МСЭ-R SM.1541, региональных соглашениях и/или публикациях организаций по разработке стандартов (ОРС);
- с предельными уровнями побочных излучений, приведенными в Рекомендации МСЭ-R SM.329, ERC/REC 74-01 и/или публикациях организаций по разработке стандартов (ОРС).

Границы нежелательных излучений, связанных с модуляцией, полученные при этих измерениях, сравниваются с границей между областями внеполосных (ОоВ) и побочных излучений из публикаций МСЭ-R.

Сокращения и акронимы

| | | | |
|----------|--|----------|--|
| 3GPP | 3 rd Generation Partnership Project | | Проект партнерства третьего поколения |
| BCCH | Broadcast control channel | | Широковещательный канал управления |
| BS | Base station | | Базовая станция |
| BW | Bandwidth | | Ширина полосы частот |
| CEPT | European Conference of Postal and Telecommunications Administrations | СЕПТ | Европейская конференция администраций почт и электросвязи |
| D/A | Digital to analogue | ЦАП | Цифро-аналоговое преобразование |
| DAB | Digital audio broadcasting | | Цифровое звуковое радиовещание |
| DECT | Digital enhanced cordless telecommunications | | Улучшенная цифровая беспроводная электросвязь |
| DSP | Digital signal processor | | Цифровой сигнальный процессор |
| DSSS | Direct-sequence spread spectrum | | Расширение спектра по методу прямой последовательности |
| DVB-T | Digital video broadcasting – Terrestrial | | Наземное цифровое телевизионное радиовещание |
| ECC | Electronic Communications Committee | | Комитет по электронным средствам связи |
| ERC | European Radiocommunications Committee | | Европейский комитет радиосвязи |
| e.i.r.p. | Equivalent isotropically radiated power | э.и.и.м. | Эквивалентная изотропно излучаемая мощность |
| e.r.p. | Effective radiated power | э.и.м. | Эффективная излучаемая мощность |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute | ЕТСИ | Европейский институт стандартизации электросвязи |
| FDD | Frequency division duplex | | Дуплексная передача с частотным разделением |
| FS | Fixed service | ФС | Фиксированная служба |
| FSK | Frequency shift keying | | Частотная манипуляция |
| GMSK | Gaussian minimum shift keying | | Гауссова манипуляция с минимальным сдвигом |
| GSM | Global system for mobile communications | | Глобальная система подвижной связи |
| G-TEM | Gigahertz transverse electromagnetic | | Гигагерцевая продольно-поперечная электромагнитная система |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers | | Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике |

| | | | |
|---------|--|-------|---|
| IMT | International Mobile Telecommunications | | Международная подвижная электросвязь |
| ITU | International Telecommunication Union | МСЭ | Международный союз электросвязи |
| ITU-R | International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector | МСЭ-R | Международный союз электросвязи – Сектор радиосвязи |
| I/Q | In-phase/Quadrature | | Синфазная/квадратурная |
| LTE | Long term evolution | | Долгосрочное развитие |
| OFDM | Orthogonal frequency-division multiplexing | | Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением |
| OoB | Out-of-band | | Внеполосный |
| PMR | Private mobile radio | | Частная подвижная радиосвязь |
| QAM | Quadrature amplitude modulation | | Квадратурная амплитудная модуляция |
| QPSK | Quadrature phase shift keying | | Квадратурная фазовая манипуляция |
| RB | Resource block | | Ресурсный блок |
| RF | Radio frequency | РЧ | Радиочастота |
| RLAN | Radio local area network | | Локальная радиосеть |
| RMS | Root mean square | | Среднеквадратическое значение |
| Rx | Receiver | | Приемник |
| SC-FDMA | Single carrier frequency division multiple access | | Многостанционный доступ с частотным разделением каналов с одной несущей |
| SRD | Short range devices | | Устройства связи малого радиуса действия |
| TDD | Time division duplex | | Дуплексная передача с временным разделением |
| TDMA | Time division multiple access | | Многостанционный доступ с временным разделением |
| TETRA | Terrestrial trunked radio | | Наземная транковая радиосистема |
| TFES | TC MSG/TC ERM Task Force for the production of Harmonised Standards under the R&TTE Directive for the IMT family | | Целевая группа TC MSG/TC ERM по разработке согласованных стандартов семейства IMT в соответствии с Директивой R&TTE |
| Tx | Transmitter | | Передатчик |
| UE | User equipment | | Оборудование пользователя |
| UMTS | Universal mobile telecommunications system | | Универсальная система подвижной электросвязи |
| VHF | Very high frequency | ОВЧ | Очень высокая частота |
| W-CDMA | Wideband code division multiple access | | Широкополосный многостанционный доступ с кодовым разделением каналов |
| WiMAX | Worldwide interoperability for microwave access | | Всемирная функциональная совместимость для микроволнового доступа |
| WLAN | Wireless local area network | | Беспроводная локальная сеть |

1 Введение

В настоящем Отчете рассматриваются нежелательные излучения в области как внеполосных, так и побочных излучений с уделением основного внимания в этой связи узкополосным и широкополосным цифровым системам.

Современные передатчики цифровых систем всегда генерируют РЧ-сигналы цифровым способом в так называемой полосе групповых частот. После цифро-аналогового преобразования (ЦАП) два компонента полосы групповых частот сдвигаются в диапазон радиочастот с применением квадратурной (I/Q) модуляции. В результате явные пики в области побочных излучений отсутствуют. Цифровые передатчики в отличие от аналоговых не создают пиков.

Существующие общие ограничения для нежелательных излучений цифровых радиосистем были впервые обновлены или разработаны около 15 лет назад, и с тех пор цифровые технологии претерпели существенные изменения. В период с 1996 по 2004 год, когда цифровые радиосистемы уже преобладали над аналоговыми, было разработано несколько Рекомендаций серии SM (Рекомендации МСЭ-R SM.1541, МСЭ-R SM.329, МСЭ-R SM.1539 и др.). ERC/REC 74-01 – это Рекомендация Европейской конференции администраций почт и электросвязи (СЕПТ) по нежелательным излучениям в области побочных излучений, относящаяся к ограничениям категории В, указанным в Рекомендации МСЭ-R SM.329.

Были проверены измерения нежелательных излучений ряда образцов оборудования цифровых систем с использованием процесса измерения и измерительных установок, указанных в Приложении 1. Результаты измерений представлены в Приложении 2 и кратко описаны в пунктах 2, 3 и 4.

2 Внеполосные излучения

В таблице 1 содержится краткая информация о сравнении результатов измерений нескольких цифровых систем с существующими предельными уровнями внеполосных излучений, указанными в Рекомендации МСЭ-R SM.1541, RRC06 и соответствующих стандартах ЕТСИ.

При измерениях следующих систем результаты оказались лучше конкретных масок внеполосных излучений, определенных в соответствующих стандартах ЕТСИ:

- базовые станции LTE800 (рисунок 8);
- оборудование пользователей LTE800 (рисунок 10);
- базовые станции GSM900 (рисунок 16);
- базовая станция UMTS (рисунок 19);
- RLAN (рисунок 21); и
- линия связи пункта с пунктом 25 ГГц (рисунок 24).

При измерениях излучения передатчиков DVB-T (см. рисунок 7) и линии связи пункта с пунктом 25 ГГц (см. рисунок 20) получены данные, которые значительно ниже общих пределов безопасной работы, определенных в масках из Рекомендации МСЭ-R SM.1541; для других систем, указанных в таблице 1, информация о предельных уровнях внеполосных измерений в Рекомендации МСЭ-R SM.1541 отсутствует.

Следует также отметить, что в некоторых случаях (например, DECT на рисунке 17) ограничения соблюдаются минимально.

ТАБЛИЦА 1

Сравнение результатов измерений нескольких цифровых систем с предельными уровнями внеполосных излучений

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|----------------------------------|------------|---|---|---|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с RRC06 | с ETSI |
| Передатчик DAB+ | Рисунок 5 | – | Видно, что критическая маска нарушена в области сдвига на 2,2 МГц, но из-за ограниченной чувствительности измерительного оборудования о причине нарушения маски судить трудно | – |
| Передатчики DVB-T | Рисунок 7 | Уровень излучения DVB-T ниже указанных пределов на ~20 дБ или более | Близкое соответствие | – |
| Базовые станции LTE800 | Рисунок 8 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | – | ETSI EN 301 908-14, таблица 4.2.2.2.3-3. Даже если внешние фильтры не применяются, внеполосные излучения за пределами сдвига приблизительно в 15 МГц (150% ширины полосы канала) уже на 20 дБ ниже предельного уровня. Однако при меньших сдвигах (< 10 МГц) один из этих сигналов всего лишь соответствует маске, и это может измениться при увеличении времени измерения |
| Оборудование пользователя LTE800 | Рисунок 10 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | – | ETSI EN 301 908-13, таблица 4.2.3.1.2-1. Проверенные образцы оборудования пользователя превосходят маску внеполосных излучений и демонстрируют асимметричные излучения с более высоким подавлением на частоте выше 862 МГц. Это предполагает наличие (внутренней) фильтрации для решения проблем сосуществования с системами, работающими в соседних полосах частот |
| Базовые станции GSM900 | Рисунок 16 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | – | ETSI TS 145 005. Во всем диапазоне уровень нежелательных излучений ниже предела, установленного ETSI, и, в частности, при сдвиге на 400 кГц он ниже маски излучения примерно на 10 дБ |

ТАБЛИЦА 1 (окончание)

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|-------------------------------------|------------|--|---------|--|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с RRC06 | с ETSI |
| DECT | Рисунок 17 | | | В диапазоне сдвига около 1 МГц уровни внеполосных излучений обоих измеряемых устройств DECT не соответствуют требованиям стандарта ETSI [17]. Поскольку в области внеполосных излучений видны только излучения, связанные с модуляцией, можно предположить, что у всех устройств DECT будет почти один и тот же спектр ОоВ и в этом случае имеется значительный запас между предельным уровнем внеполосных излучений и их фактическим уровнем, особенно в диапазоне соседнего канала со сдвигом на 2 МГц |
| Базовая станция UMTS | Рисунок 19 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | – | ETSI TS 125 104 , пункт 6.6.2.1, таблица 6.5. Уровень внеполосных излучений по меньшей мере на 15 дБ ниже уровня маски. Уже при сдвиге около 125% ширины полосы канала нежелательные излучения, вызванные модуляцией, исчезают в широкополосном шуме усилителя |
| RLAN | Рисунок 21 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | – | ETSI EN 300 328 . При сдвиге на 250% уровень внеполосных излучений обычно более чем на 20 дБ ниже предельного |
| Линия связи пункта с пунктом 25 ГГц | Рисунок 24 | Общие пределы внеполосных излучений, называемые пределами безопасной работы, для ФС из Приложения 12 к данной Рекомендации соблюдены с запасом около 20 дБ | – | ETSI EN 302 217-2-2 , пункт 4.2.4.2.1. Специальный предел соблюден с запасом не менее 10 дБ |

3 Побочные излучения

В таблице 2 содержится краткая информация о сравнении результатов измерений нескольких цифровых систем с существующими предельными уровнями нежелательных излучений в области побочных излучений, указанных в Рекомендации МСЭ-R SM.329, ERC/REC 74-01 и соответствующих стандартах ЕТСИ.

За исключением гармонических частот, показанных на рисунке 13 (оборудование пользователя LTE800), предельные уровни нежелательных излучений в области побочных излучений, приведенные в Рекомендации МСЭ-R SM.329 и ERC/REC 74-01, 9, как правило, соблюдаются со значительным запасом в несколько десятков децибелов:

- передатчик DAB (рисунок 6);
- передатчик DVB-T (рисунок 7);
- базовая станция LTE800 (рисунок 9);
- оборудование пользователя LTE800 (рисунок 11);
- оборудование пользователя LTE 2,3 ГГц (рисунок 14);
- базовая станция GSM900 (рисунок 16);
- базовая станция UMTS (рисунок 20);
- RLAN (рисунок 22);
- оборудование пользователя WIMAX 3,6 ГГц (рисунок 23);
- линия связи пункта с пунктом 25 ГГц (рисунок 25).

Следующие измерения показывают, что уровень нежелательных излучений в области побочных излучений не остается постоянным с изменением частоты, как это предполагается в Рекомендации МСЭ-R SM.329 и соответствующих стандартах ЕТСИ, особенно в случае применения выходных фильтров:

- передатчик DAB (рисунок 6);
- базовая станция LTE800 (рисунок 9);
- оборудование пользователя LTE800 (рисунок 11);
- оборудование пользователя LTE 2,3 ГГц (рисунок 14);
- базовая станция GSM900 (рисунок 16);
- базовая станция UMTS (рисунок 20);
- линия связи пункта с пунктом 25 ГГц (рисунок 24).

С увеличением сдвига частоты уровни побочных излучений непрерывно снижаются. Передатчики с фильтрами, как правило, не имеют измеримых побочных излучений при сдвигах, более чем в четыре раза превышающих ширину полосы сигнала, а иногда уже на границе 250% (см., например, рисунок 26). Однако в диапазонах частот, близких к гармоникам центральной частоты, обычно ожидается побочная полоса частотной характеристики фильтра.

Даже передатчики без фильтров показывают зависимость побочных излучений от частоты. Исключением может быть пик на гармониках. См. оборудование пользователя LTE800 на рисунке 13, где представлен пример нежелательных излучений измеренного оборудования на частоте второй гармоники, но даже этот пик на 1,5 дБ ниже предела, указанного в ERC/REC 74-01.

ТАБЛИЦА 2

Сравнение результатов измерений нескольких цифровых систем с предельными уровнями нежелательных излучений в области побочных излучений

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|-----------------------------------|--|--|--|-----------------------------------|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с соответствующим стандартом ETSI |
| Передатчики DAB/DAB+ | Рисунок 5 (передатчик DAB+) и рисунок 6 (передатчик DAB) | Передатчики DAB дали лучшие результаты, чем ограничение категории А для "всех служб, кроме перечисленных ниже" (рисунок 6) | Уровни побочных излучений передатчиков DAB/DAB+ с фильтрацией при сдвигах относительно центральной частоты более чем на ~10 МГц и уровни гармонических излучений находятся ниже чувствительности измерения и более чем на 57 дБ ниже предельных уровней, указанных в ERC/REC 74-01 | – |
| Передатчики DVB-T | Рисунок 7 | | Благодаря необходимой фильтрации уровень нежелательных излучений даже в начале области побочных излучений (сдвиг на 20 МГц) ниже чувствительности измерения и по меньшей мере на 30 дБ ниже предельного уровня, указанного в таблице 4.1 ERC/REC 74-01 | |
| Базовая станция LTE800 | Рисунок 9 | | Благодаря применяемым выходным фильтрам уровни побочных излучений по меньшей мере на 40 дБ ниже ограничений категории В для сухопутной подвижной службы, указанных в Рекомендации МСЭ-R SM.329, таблице 2.1 ERC/REC 74-01 и ETSI EN 301 908-14 | |
| Оборудование пользователя LTE800 | Рисунок 11 | | В этой конфигурации показатели обоих образцов оборудования пользователя по меньшей мере на 20 дБ ниже предельных уровней, установленных в Рекомендации МСЭ-R SM.329 (ограничение категории В, сухопутная подвижная служба), таблице 2.1 ERC/REC 74-01 и соответствующем стандарте ETSI EN 301 908-13 (таблица 4.2.4.1.2-2). Фактический уровень побочных излучений еще ниже по причине ограниченности доступной чувствительности измерения | |
| Оборудование пользователя LTE2300 | Рисунок 14 | | При большем сдвиге частоты уровень побочных излучений на 30 дБ ниже предельного. Следует однако отметить, что измерения в области побочных излучений ограничены динамическим диапазоном измерительного оборудования. Поэтому уровни нежелательных излучений устройств могут быть еще ниже, чем показано на рисунке 14 | |

ТАБЛИЦА 2 (окончание)

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|--|------------|--|-----------------|---|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с соответствующим стандартом ETSI |
| Базовая станция GSM900 | Рисунок 16 | За пределами присвоенной полосы GSM показатели по меньшей мере на 30 дБ ниже ограничений на побочные излучения категории В (базовые станции сухопутных подвижных систем), указанных в Рекомендации МСЭ-R SM.329 и ERC/REC 74-01 | | В частности, благодаря внутренней фильтрации для защиты соседних служб за пределами присвоенной полосы GSM уровень нежелательных излучений более чем на 25 дБ ниже предельного уровня, установленного в ETSI TS 145 005 |
| Базовая станция UMTS | Рисунок 20 | Хотя передача осуществляется по самому высокочастотному каналу и, таким образом, соответствует наиболее сложному случаю с точки зрения соблюдения предельных уровней побочных излучений, результат измерения станции оказался ниже этих уровней примерно на 10 дБ даже в самом начале области побочных излучений. Для сдвигов более чем на 20 МГц результат ниже предельных уровней минимум на 30 дБ. Фактический уровень побочных излучений для этих сдвигов еще ниже, чем показано. Ограничение вызвано чувствительностью измерения | | |
| RLAN | Рисунок 22 | Пределы соблюдаются с типичным запасом от 20 до 30 дБ | | |
| Оборудование пользователя WiMax 3,6 ГГц | Рисунок 23 | Хотя измерение охватывает лишь небольшой диапазон частот с очень большим сдвигом, видно, что пределы соблюдаются с запасом по меньшей мере 40 дБ | | |
| Линии связи пункта с пунктом 25 ГГц | Рисунок 25 | Предельный уровень побочных излучений соблюдается с запасом более 20 дБ | | |

4 Граница между областями внеполосных и побочных излучений

За исключением некоторых систем подвижной связи общего пользования (стандарты 3GPP), в общем случае граница между областями внеполосных и побочных излучений определена на уровне 250% от ширины полосы сигнала (необходимая ширина полосы B_n). Для широкополосных систем Регламент радиосвязи (Дополнение 1 к Приложению 3) определяет более строгую границу на уровне $1,5 * B_n$. Однако эта формула часто применяется только к системам с более широкой полосой частот, чем фактически используемая в данном диапазоне. Примеры:

- на частотах между 30 МГц и 1 ГГц граница на уровне $1,5 B_n$ применяется только при $B_n > 10$ МГц. У типичных систем, таких как TETRA, DAB, DVB-T, GSM, UMTS и LTE, полоса частот уже;
- на частотах между 1 ГГц и 3 ГГц сокращенная граница применяется только при $B_n > 50$ МГц. Почти все системы, работающие в этом диапазоне, включая GSM, UMTS, DECT, LTE и RLAN, имеют более узкую полосу частот.

В результате для всех систем, на которых проводились измерения для настоящего Отчета, граница находится на уровне 250% от ширины полосы сигнала, за исключением диапазонов служб подвижной связи общего пользования, где граница часто определяется относительно краев присвоенной полосы. Например, в некоторых системах ИМТ, основанных на переменной ширине полосы канала, граница для базовых станций в настоящее время указывается в пункте 2.6 Рекомендации МСЭ-R M.2070 как отстоящая от границы рабочей полосы на 10 МГц.

Измерения, проведенные для настоящего Отчета, показали, что нежелательные излучения, вызванные модуляцией, особенно у широкополосных систем, часто заканчиваются при сдвигах, значительно меньших, чем 250% от ширины полосы. Это особенно справедливо для базовых станций систем с фильтрацией, таких как DAB (см. рисунок 26), DVB-T (см. рисунок 7) и GSM/UMTS/LTE (см. рисунки 15 и 16 для GSM, рисунок 19 для UMTS, рисунки 8 и 9 для базовых станций LTE800 и рисунок 11 для оборудования пользователя LTE800).

5 Резюме

В настоящем Отчете представлены результаты измерений ограниченного числа образцов оборудования на основе различных радиотехнологий. Было отмечено, что измеренные уровни излучений, как правило, ниже предельных уровней, указанных в Рекомендациях МСЭ-R и стандартах ЕТСИ, с существенным запасом в несколько десятков децибелов в области побочных излучений, за исключением гармонических частот. Этот вывод имеет важное значение для исследований совместного использования частот и совместимости, которые обычно основываются на предположении, что оборудование всего лишь соответствует пределам, установленным в стандартах.

Однако это должно быть доказано статистически, поскольку измерения проводились при ограниченном наборе условий (как условий окружающей среды, так и параметров настройки) и на весьма ограниченном количестве образцов оборудования.

Введение дополнительных ограничений или внесение изменений в пределы или границы, установленные в действующих Рекомендациях МСЭ-R, на основе примеров, представленных в этом исследовании, не предполагается.

Справочные документы

- [1] Рекомендация МСЭ-R SM.1541 "Нежелательные излучения в области внеполосных излучений"
- [2] ERC REC 74-01 (Шиюфок-98, Ницца-99, Сезимбра-02, Градец-Кралове-05, Кардифф-11) "Нежелательные излучения в области побочных излучений"
- [3] Рекомендация МСЭ-R SM.329 "Нежелательные излучения в области побочных излучений"
- [4] Регламент радиосвязи МСЭ, издание 2016 года

- [5] Рекомендация МСЭ-R SM.1539 "Изменение границы между областью внеполосных излучений и областью побочных излучений, необходимое для применения Рекомендаций МСЭ-R SM.1541 и МСЭ-R SM.329"
- [6] ETSI EN 301 908 "Сотовые сети IMT; Согласованный европейский стандарт EN, охватывающий основополагающие требования статьи 3.2 Директивы по R&TTE"
- [7] ETSI EN 301 908-3 v7.1.1 "Сотовые сети IMT; Согласованный европейский стандарт EN, охватывающий основополагающие требования статьи 3.2 Директивы по R&TTE; Часть 3: Базовые станции (BS) с использованием технологии CDMA с прямым расширением спектра (UTRA FDD)"
- [8] ETSI EN 301 908-13 v7.1.1 (2015-12) "Сотовые сети IMT; Согласованный европейский стандарт EN, охватывающий основополагающие требования статьи 3.2 Директивы по R&TTE; Часть 13: Оборудование пользователя (UE) сети расширенного универсального наземного радиодоступа (E-UTRA)"
- [9] ETSI EN 301 908-14 v7.1.1 "Сотовые сети IMT; Согласованный европейский стандарт EN, охватывающий основополагающие требования статьи 3.2 Директивы по R&TTE; Часть 14: Базовые станции (BS) сети расширенного универсального наземного радиодоступа (E-UTRA)"
- [10] ETSI EN 301 908-18 v7.1.1 "Сотовые сети IMT; Согласованный европейский стандарт EN, охватывающий основополагающие требования статьи 3.2 Директивы по R&TTE; Часть 18: Базовая станция (BS) мультистандартного радио (MSR), поддерживающая радиодоступ E-UTRA, UTRA и GSM/EDGE"
- [11] Соглашение Женева-06 (GE-06): Региональное соглашение, касающееся планирования цифровой наземной радиовещательной службы в Районе 1 (частях Района 1, расположенных к западу от меридиана 170° в. д. и к северу от параллели 40° ю. ш., за исключением территории Монголии) и в Исламской Республике Иран в полосах частот 174–230 МГц и 470–862 МГц (<http://www.itu.int/pub/R-ACT-RRC.14-2006/en>)
- [12] ETSI EN 302 077 v1.1.1 'Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Terrestrial - Digital Audio Broadcasting (T-DAB) service; Part 1: Technical characteristics and test methods'
- [13] ETSI EN 302 296 v1.1.1 'Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the digital television broadcast service, Terrestrial (DVB-T)'
- [14] LTE User Equipment – Coexistence with 862-870 MHz, Ofcom, September 2012: <http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/award-800mhz/statement/lte-coexistence.pdf>
- [15] Рекомендация МСЭ-R M.2071 "Общие характеристики нежелательных излучений подвижных станций, использующих наземные радиointерфейсы IMT-Advanced"
- [16] ETSI TS 145 005 v13.0.0 (2016-01) "Система цифровой сотовой связи (этап 2+); Радиопередача и прием (3GPP TS 45.005, версия 13.0.0, выпуск 13)"
- [17] ETSI EN 300 175-2 v2.6.1 (2015-07) "Система улучшенной цифровой беспроводной электросвязи (DECT). Общий интерфейс (CI); Часть 2: Физический уровень (PHL)"
- [18] ETSI TS 125 104 "Универсальная система подвижной электросвязи (UMTS); Радиопередача и прием (FDD) базовой станции (BS)"
- [19] ETSI EN 300 328 v1.9.1 'Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2.4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive'
- [20] ETSI EN 302 217-2-2 v2.0.0 'Fixed Radio Systems; Characteristics and requirements for point-to-point equipment and antennas'
- [21] ETSI EN 301 390 v1.3.1 'Fixed Radio Systems; Point-to-point and Multipoint Systems; Unwanted emissions in the spurious domain and receiver immunity limits at equipment/antenna port of Digital Fixed Radio Systems'
- [22] ECC Recommendation (02)05 'Unwanted emissions'

- [23] ETSI EN 301 406 v1.5.1 'Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Harmonized EN for Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT) covering the essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive; Generic radio'
- [24] Liaison Statement from ECC PT1 to ETSI ERM RM and ERM/MSG TFES on "IMT 2000/UTRA Category B spurious emission limits", Doc ECC PT1(06)184 Annex 12
- [25] Техническая спецификация ETSI TS 136 521 "LTE; Расширенный универсальный наземный радиодоступ (E-UTRA); спецификация соответствия оборудования пользователя (UE); прием и передача радиосигналов"
- [26] Report ITU-R M.2292 'Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/interference analyses'
- [27] ECC Report 174 'Compatibility between the mobile service in the band 2500-2690 MHz and the radiodetermination service in the band 2700-2900 MHz'
- [28] IEEE 802.11-2012: Стандарт IEEE для информационных технологий – Электросвязь и обмен информацией между системами – Локальная и городская сети – Конкретные требования – Часть 11: Спецификации уровня управления доступом к среде (MAC) и физического уровня (PHY) в беспроводной локальной сети
- [29] ETSI EN 301 908-21 v5.2.1 'IMT cellular networks; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive; Part 21: OFDMA TDD WMAN (Mobile WiMAX) FDD User Equipment (UE)'
- [30] Рекомендация МСЭ-R M.1580 "Общие характеристики нежелательных излучений базовых станций, использующих наземные радиointерфейсы IMT-2000"
- [31] Рекомендация МСЭ-R M.1581 "Общие характеристики нежелательных излучений подвижных станций, использующих наземные радиointерфейсы IMT-2000"
- [32] Рекомендация МСЭ-R M.2070 "Общие характеристики нежелательных излучений базовых станций, использующих наземные радиointерфейсы IMT-Advanced"
- [33] Рекомендация МСЭ-R SM.1540 "Нежелательные излучения в области внеполосных излучений, попадающие в соседние распределенные полосы"
- [34] Directive 2014/53/EU of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014
- [35] 3GPP TS 36.211: V13.1.0 "Расширенный универсальный наземный радиодоступ (E-UTRA); физические каналы и модуляция"
- [36] ETSI EN 302 408 V8.0.1 'Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); GSM Cordless Telephony System (CTS), Phase 1; CTS-FP Radio subsystem'
- [37] ETSI EN 301 502 V12.1.1 'Global System for Mobile communications (GSM); Harmonized EN for Base Station Equipment covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive'
- [38] Рекомендация МСЭ-R SM.328 "Спектры и ширина полосы излучений"

Приложение 1

Процесс измерения и измерительные установки

Содержание

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Установка типа 1 | 12 |
| 2 | Установка типа 2 | 13 |
| 3 | Установка типа 3 | 14 |
| 4 | Случаи пиковой и усредненной спектральных масок | 15 |

В настоящем Приложении описываются типичные установки для измерения внеполосных и побочных излучений. Выбор установки зависит от требуемого динамического диапазона результата и от того, является ли излучение импульсным или непрерывным.

Для кондуктивных измерений передатчиков, не требующих обратного канала, сигнал берется непосредственно с выхода передатчика после соответствующего ослабления (фиктивная нагрузка) или с измерительного выхода (если таковой имеется). В случае применения на выходе внешнего фильтра точка измерения находится на выходе фильтра.

Для кондуктивных измерений передатчиков, для работы которых требуется обратный канал, при отсутствии измерительного выхода сигнал берется с выхода направленного ответвителя, включенного в канал передачи. Основным недостатком этого метода является то, что измеряемый сигнал ослабляется направленным ответвителем (обычно на 20 дБ), что ограничивает уровень обнаружения нежелательных излучений, особенно для очень маломощных устройств. Некоторые системы обеспечивают доступ к линии передачи перед ответвителем Rx/Tx, что является предпочтительной точкой измерения.

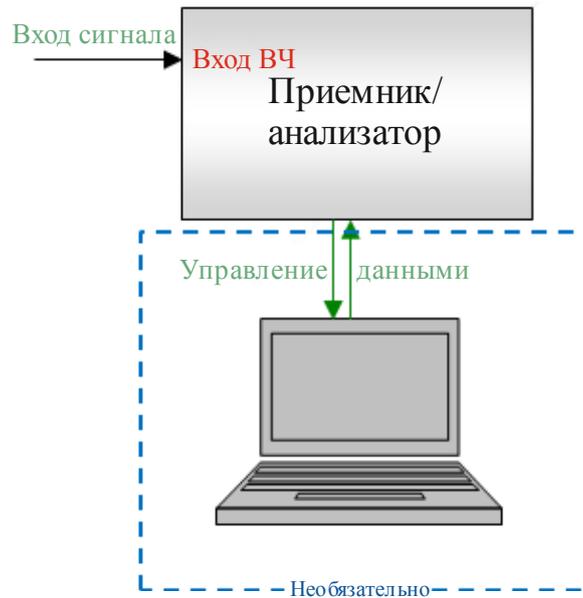
У передатчиков, не имеющих порта антенны, приходится измерять излучаемый сигнал, предпочтительно в камере G-ТЕМ с известными радиочастотными свойствами.

При измерении излучаемого сигнала мощных передатчиков сигнал снимается с измерительной антенны. В этом случае главные проблемы заключаются в том, чтобы собрать как можно больше РЧ-энергии и чтобы в представляющем интерес диапазоне частот не было излучений от других передатчиков. Обе проблемы можно решить, используя антенну с высокой направленностью (и, следовательно, большим коэффициентом усиления), наведенную непосредственно на передающую антенну и расположенную на максимально коротком расстоянии от нее.

1 Установка типа 1

Если требуемый динамический диапазон не превышает разности между максимальным уровнем излучения, с которым измерительный приемник может работать без перегрузки, и его собственным уровнем шума, то для измерения непрерывных сигналов можно использовать простейшую установку.

РИСУНОК 1
Принцип измерения установки типа 1



Report SM.2421-01

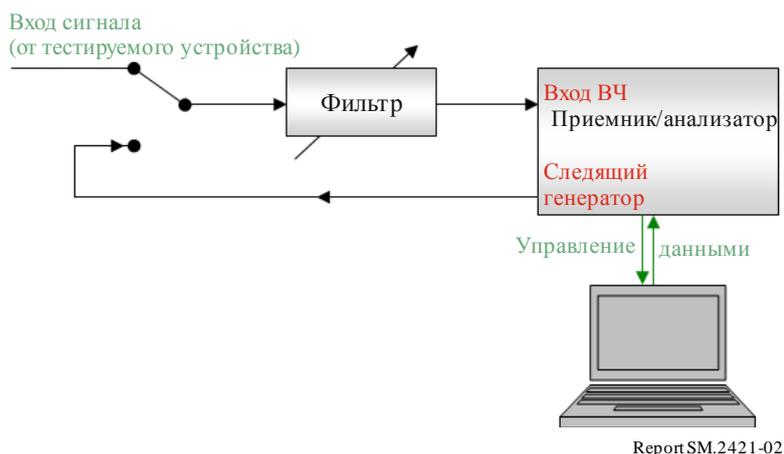
2 Установка типа 2

Эту установку можно использовать для измерения непрерывных сигналов, когда требуемый динамический диапазон результата превышает возможности измерительного приемника/анализатора.

В целях улучшения динамического диапазона измерительного приемника/анализатора требуемый сигнал подавляется с помощью (настраиваемого) фильтра. Сначала измеряется и регистрируется отфильтрованный спектр в требуемом канале/на требуемой частоте, а также в области внеполосных или побочных излучений. При втором измерении измеряется и регистрируется ослабление (частотная характеристика) фильтра при тех же настройках приемника/анализатора. Затем обе кривые складываются с помощью программного инструмента (например, Microsoft Excel), чтобы сохранить исходный спектр сигнала. Это измерение является наиболее эффективным, если оно выполняется под управлением компьютера.

В зависимости от применения, частоты и ширины полосы измеряемого сигнала можно использовать полосовой или заградительный фильтр. Для побочных излучений предпочтителен заградительный фильтр, настроенный на желаемую частоту, поскольку он позволяет одновременно измерить весь диапазон побочных излучений. Для измерения внеполосных излучений также можно использовать полосовые фильтры, настроенные на диапазон частот измеряемой области внеполосных излучений.

РИСУНОК 2
Принцип измерения установки типа 2

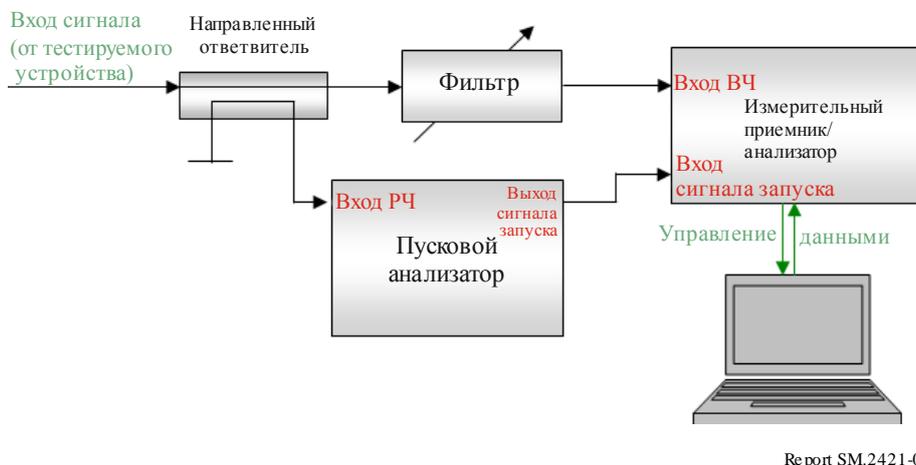


3 Установка типа 3

Для систем TDMA, которые передают данные в виде пакетов, ограничения обычно относятся ко времени, когда ведется передача. Если в соответствующей Рекомендации явно не указан пиковый уровень, то необходимо измерять средний уровень для пакета, который представляет собой среднеквадратическое значение уровня излучения за время передачи пакета. Это делается путем внешнего запуска измерительного приемника в начале пакета и корректировки времени измерения в соответствии с длиной пакета. Запуск производится вторым анализатором спектра, работающим в режиме нулевого разброса частот и настроенным на требуемую частоту.

Процесс измерения идентичен процессу для установки типа 2.

РИСУНОК 3
Установка типа 3 для измерения систем TDMA



Обработка данных

Полоса измерения всегда выбирается равной или меньше эталонной ширины полосы, указанной в соответствующей Рекомендации или стандарте. Необходимо использовать узкую полосу измерения, особенно вблизи пиковых побочных излучений и в области внеполосных излучений, близкой к требуемой частоте, поскольку в противном случае измеряемый спектр будет чрезмерно расширен, что приведет к переоценке уровня нежелательного излучения.

Уровни сигналов (или спектральные плотности) в выбранной полосе измерения линейно преобразуются в соответствующие уровни или плотности мощности в эталонных полосах частот с использованием следующей формулы:

$$P_{refBW} = P_{measBW} + 10 * \log_{10} \left(\frac{refBW}{measBW} \right),$$

где:

- P_{refBW} : уровень сигнала в эталонной полосе;
- P_{measBW} : уровень сигнала в полосе измерения;
- $refBW$: эталонная ширина полосы;
- $measBW$: ширина полосы измерения.

4 Случаи пиковой и усредненной спектральных масок

При наличии фиксированных предельных уровней нежелательных излучений, которые никогда не должны превышать, необходимо измерять излучения с помощью пикового детектора. Однако опорный уровень 0 дБ для спектральных масок внеполосных излучений в большинстве случаев – это среднеквадратическое значение общей мощности сигнала в канале или п.п.м. в данной эталонной полосе.

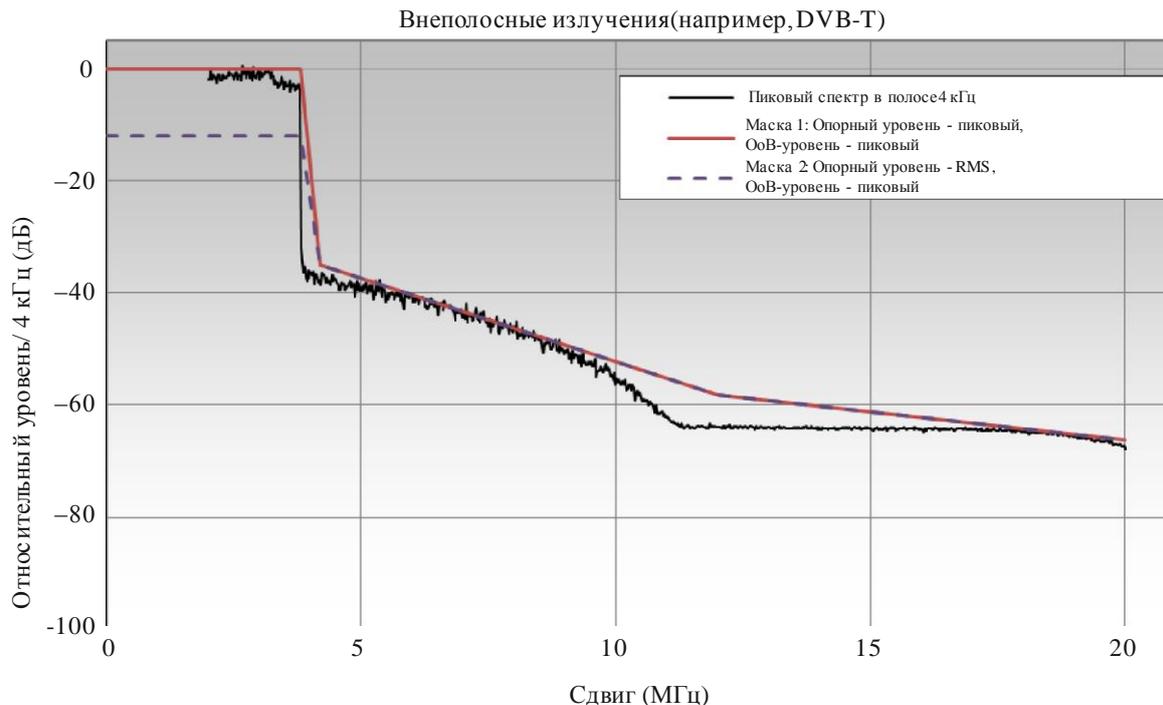
Если для аналоговых приемников возможность помех от нежелательного излучения зависит главным образом от его пикового уровня, то для цифрового приемника возможность таких помех определяется именно его среднеквадратическим уровнем. Это подтверждено различными измерениями в ходе исследований совместимости.

В цифровых системах почти все нежелательные излучения, равно как и полезное излучение, подобны шуму, а это означает, что между среднеквадратическим и пиковым уровнями обычно имеется фиксированная разность около 13 дБ. Для этих систем можно определить либо среднеквадратический, либо пиковый предельный уровень, поскольку другой соответствующий уровень можно рассчитать. Исключения составляют пики, вызванные гармониками или продуктами смешения.

Однако может быть полезно рассмотреть систему в каждом случае отдельно и определить как уровни внеполосных/побочных излучений, так и опорный уровень 0 дБ на одной и той же основе (в среднеквадратических или пиковых значениях) и адаптировать их к конкретному случаю, поскольку это позволит выполнить прямое сравнение измеренного спектра с маской. На рисунке 4 показан пример (внеполосные излучения DVB-T), когда предельные уровни внеполосных излучений маски всегда определяются в пиковых значениях. Маска 1 – это пиковое значение спектральной плотности в эталонной полосе частот 4 кГц. Эту маску можно непосредственно сравнить с измеренным спектром внеполосных излучений. Однако для маски 2 опорный уровень 0 дБ представляет собой среднеквадратическое значение спектральной мощности в полосе 4 кГц. В этом случае имеет место разность примерно в 13 дБ между измеренной спектральной плотностью в канале и опорным уровнем маски 0 дБ.

РИСУНОК 4

Различные определения масок – пример (внеполосные излучения DVB-T)



Report SM.2421-04

Во многих случаях опорным уровнем для спектральной маски служит мощность немодулированной несущей. В цифровых системах несущая никогда не бывает немодулированной, поэтому ее нельзя измерить непосредственно. Вместо этого можно измерить среднеквадратическое (RMS) значение общей мощности модулированного сигнала в канале, поскольку она равна мощности немодулированной несущей. Однако эталонной шириной полосы для этого измерения должна служить ширина занимаемой полосы сигнала, которая может отличаться от эталонной ширины полосы нежелательных излучений. В этих случаях у спектральной маски, сравниваемой с измеренным спектром, нет опорной линии в канале. В примере, показанном на рисунке 4, горизонтальная линия между сдвигом 0 МГц и сдвигом 4 МГц будет отсутствовать, а опорный уровень 0 дБ будет сдвинут на разницу, вызванную коррекцией ширины полосы (в данном случае DVB-T: $10 \cdot \log_{10}(8 \text{ МГц}/4 \text{ кГц}) = 23 \text{ дБ}$).

Приложение 2

Измерения нежелательных излучений распространенных цифровых систем

Содержание

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Общие замечания | 17 |
| 2 | DAB/DAB+..... | 18 |
| 3 | DVB-T..... | 21 |
| 4 | Базовые станции LTE800..... | 23 |
| 5 | Оборудование пользователя LTE800 | 27 |
| 6 | Оборудование пользователя LTE2300 | 33 |
| 7 | Базовая станция GSM900..... | 34 |
| 8 | DECT | 38 |
| 9 | Базовые станции UMTS 2100..... | 42 |
| 10 | Устройства RLAN, работающие в диапазоне 2,4 ГГц | 45 |
| 11 | Оборудование пользователя WIMAX 3,6 ГГц..... | 47 |
| 12 | Линия связи пункта с пунктом 25 ГГц..... | 49 |
| 13 | Системы с фильтрацией и без фильтрации..... | 52 |
| 14 | Излучения в импульсных цифровых системах при переходных процессах..... | 53 |
| 15 | Узкополосные и широкополосные нежелательные излучения..... | 55 |

1 Общие замечания

В этом разделе представлены результаты измерений нежелательных излучений (в области как внеполосных, так и побочных излучений) нескольких распространенных цифровых систем. Измерения основаны на ограниченном количестве образцов оборудования, которые не обязательно являются типичными представителями более широкого спектра оборудования.

На рисунках с результатами измерений также указаны соответствующие пределы для непосредственного сравнения. Если пределы определены как абсолютные уровни мощности, они пересчитываются в относительные величины с использованием того же опорного уровня мощности передаваемой несущей, что и для измеренных спектров. Если же пределы заданы в единицах спектральной плотности мощности в полосах, отличных от полосы измерения, то измеренные спектры преобразуются в эталонную полосу с использованием скользящего окна интеграции. Для упрощения сравнения с измеренным спектром предельные линии внеполосных излучений строятся от сдвига 0 МГц относительно центральной частоты как опорной линии, указывающей внутриполосную спектральную плотность мощности.

На каждом рисунке указано контрольное предельное значение внеполосных излучений (например, спектральная маска), взятое из соответствующего стандарта. По возможности, для сравнения с более строгим фактическим стандартизованным пределом также включен предел безопасной работы из Рекомендации МСЭ-R SM.1541 для рассматриваемой службы.

Следует отметить, что чувствительность измерения на разных графиках может различаться, но она не всегда точно известна. Поэтому иногда кажется, что спектры заканчиваются (почти) горизонтальным градиентом, который фактически соответствует минимальному уровню шума измерительного приемника, а не нежелательным излучениям, поступающим от передатчика. Это особенно справедливо для передатчиков, имеющих выходной фильтр, который ограничивает нежелательные излучения для соблюдения определенных системных требований (например, защиты соответствующей полосы приема). Такие системы почти никогда не демонстрируют какого-либо измеримого побочного излучения при больших сдвигах. Следует также отметить, что на некоторых рисунках указание "шум приемника" следует читать как "минимальный шум анализатора спектра".

Объяснение того, в каких случаях следует использовать пиковые или средние значения спектральной маски, приведено в пункте 4 Приложения 1.

2 DAB/DAB+

Эта система OFDM является одной из цифровых систем, которые могут заменить аналоговую систему звукового радиовещания. Соответствующие РЧ-параметры систем DAB и DAB+ имеют одинаковые значения¹:

| | |
|-------------------------------------|--|
| Модуляция | – OFDM с 1736 активными несущими |
| Ширина полосы передатчика | – 1,536 МГц |
| Мощность передатчика | – 780 Вт = 28,9 дБВт (выходная мощность передатчика), 10 кВт (э.и.м.) |
| Выходной фильтр передатчика | – имеется |
| Конец области внеполосных излучений | – 3,84 МГц (250% от необходимой ширины полосы) |

2.1 Внеполосные излучения

На рисунке 5 показаны измерения передатчика DAB+ наряду с соответствующими предельными уровнями.

Одна из масок, определенных в Специальном соглашении GE-06 (рисунок 3-2 и соответствующая таблица 3-10), указывает предельный уровень для спектра сигнала внеполосного излучения в любой полосе шириной 4 кГц. Центральная частота передатчика составляла 174,928 МГц, что соответствует блоку самых низких частот в диапазоне ОВЧ. Поэтому в качестве эталона для измерений излучений в нижней боковой полосе использовалась наиболее критическая маска.

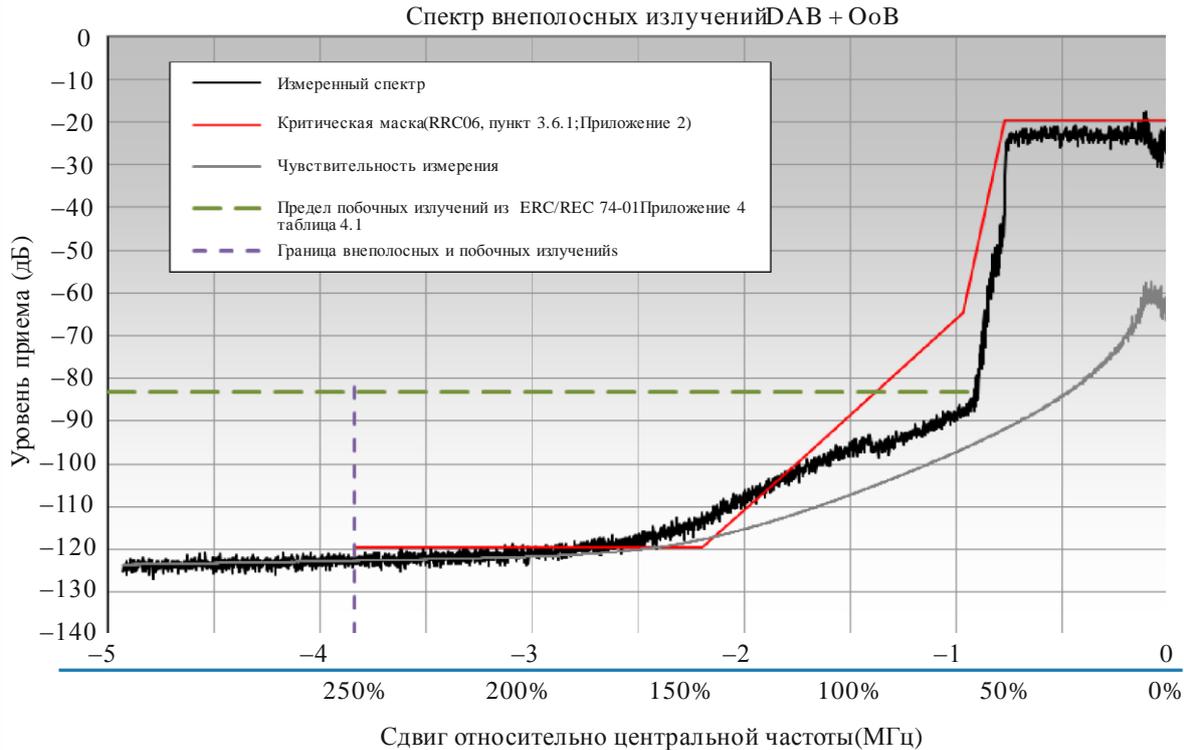
Измерения проводились на входе антенны передатчика с шириной полосы по разрешению 3 кГц. Исходная эталонная полоса спектральной маски из GE-06 составляет 4 кГц. Эта маска была преобразована в спектральную маску в полосе 3 кГц; полученная спектральная маска показана на рисунке 5.

Для информации на рисунке 5 также показан соответствующий предельный уровень побочных излучений из ERC/REC 74-01.

¹ Поскольку разница между DAB и DAB+ заключается только в цифровом кодировании, для обоих стандартов используются одни и те же передатчики, так что типичные нежелательные излучения одинаковы.

РИСУНОК 5

Измерения внеполосных излучений передатчика DAB+



Report SM.2421-05

Поскольку измеренные уровни спектральных излучений при сдвигах более чем на 2,5 МГц очень близки к уровню чувствительности измерительного оборудования, можно сказать лишь то, что фактические уровни внеполосных излучений при больших сдвигах, чем этот, ниже уровня критической (наиболее строгой) маски из Специального соглашения GE-06. Однако ввиду ограниченного динамического диапазона измерений нельзя определить, насколько излучения передатчика ниже уровня критической маски. Фактическая чувствительность системы, используемой при измерении, составляла от -115 до -120 дБм при сдвиге частоты на 2,2 МГц.

Выводы по рисунку 5

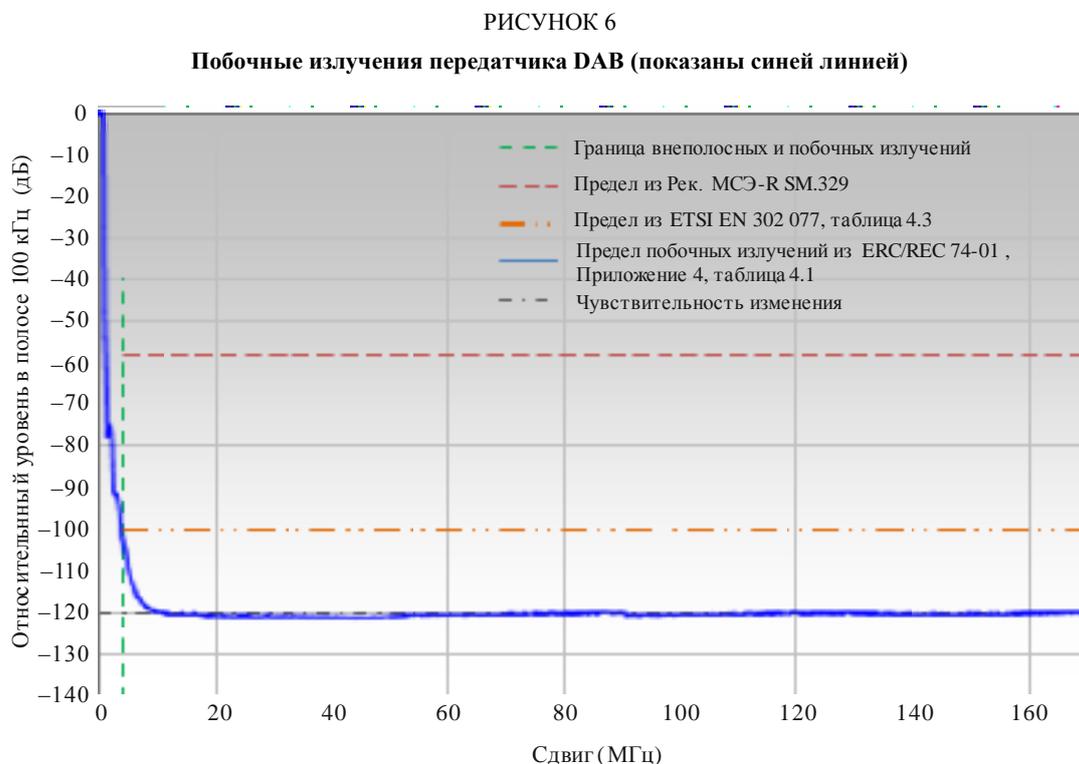
- Видно, что критическая маска нарушена в области сдвига 2,2 МГц, но из-за ограниченной чувствительности измерительного оборудования о причине нарушения маски судить трудно.

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|-----------------|-----------|----------------------|--|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с RRC06 |
| Передатчик DAB+ | Рисунок 5 | | Видно, что критическая маска нарушена в области сдвига 2,2 МГц, но из-за ограниченной чувствительности измерительного оборудования о причине нарушения маски судить трудно |

2.2 Побочные излучения

Как упоминалось выше, передатчики DAB/DAB+ всегда оснащены выходными фильтрами для ограничения нежелательных излучений. Измерения, проведенные на нескольких передатчиках DAB в Германии, показали, что нежелательные излучения в области побочных излучений при больших сдвигах относительно центральной частоты, а также гармонические излучения выше минимального уровня шума измерительной системы не обнаруживаются.

На рисунке 6 показаны результаты измерений побочных излучений передатчика DAB (темно-синяя кривая) и соответствующие регламентарные пределы.



Сравнение результатов измерений с регламентарными пределами.

- Рекомендация МСЭ-R SM.329 не содержит конкретных ограничений на побочные излучения для DAB в категории В (Европа). Поэтому используется ограничение категории А для "всех служб, кроме перечисленных ниже".
- Измерение проводилось на входе антенны передатчика DAB с выходной мощностью 780 Вт (э.и.м. 10 кВт). Ограничение категории А на побочные излучения для "всех служб, кроме перечисленных ниже" из Рекомендации МСЭ-R SM.329 в полосе 100 кГц составляет 70 дБн. Поскольку кривая на рисунке 6 приведена к внутриполосному спектральному уровню в полосе 100 кГц, этот предел преобразуется в относительное ослабление: $70 \text{ дБн} - 10 \cdot \log_{10}(1536/100) = 58,2 \text{ дБн}$. В ERC/REC 74-01, Приложение 4, таблица 4.1, указан предел в 75 дБн для передатчиков с выходной мощностью от 8 до 800 Вт при эталонной ширине полосы 100 кГц. Это приводит к внутриканальной спектральной плотности мощности в полосе 100 кГц; предельный уровень составляет $75 \text{ дБн} - 10 \cdot \log_{10}(1536/100) = 63,2 \text{ дБн}$.
- В ETSI EN 302 077-1, таблица 4.3 [12], указан относительный предел 126 дБн в эталонной полосе 4 кГц для передатчиков со средней выходной мощностью от 25 до 1000 Вт. Поскольку кривая на рисунке 6 приведена к внутриполосному спектральному уровню в полосе 100 кГц, этот предел преобразуется в относительное ослабление: $126 \text{ дБн} - 10 \cdot \log_{10}(1536/4) = 100,2 \text{ дБн}$.

Выводы по рисункам 5 и 6

- Относительное подавление побочных излучений по отношению к мощности несущей вблизи границы внеполосных излучений составляет приблизительно 100 дБ (см. также рисунок 5 для смещений ниже –3,84 МГц).
- Уровни побочных излучений передатчиков DAB/DAB+ с фильтрацией при сдвигах относительно центральной частоты более чем на ~10 МГц и уровни гармонических излучений находятся ниже чувствительности измерения и более чем на 57 дБ ниже предельных уровней, указанных в ERC/REC 74-01.
- Маска внеполосных излучений достигает предельного уровня побочных излучений, указанного в ERC/REC 74-01, при сдвигах около 1,4 МГц, или 90% от ширины полосы сигнала (см. рисунок 5).

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|----------------------|--|--|---|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 |
| Передатчики DAB/DAB+ | Рисунок 5 (передатчик DAB+) и рисунок 6 (передатчик DAB) | Передатчики DAB дали лучшие результаты, чем ограничение категории А для "всех служб, кроме перечисленных ниже" (рисунок 6) | Уровни побочных излучений передатчиков DAB/DAB+ с фильтрацией при сдвигах относительно центральной частоты более чем на ~10 МГц и уровень гармонических излучений находятся ниже чувствительности измерения и более чем на 57 дБ ниже предельных уровней, указанных в ERC/REC 74-01 |

3 DVB-T

Это система цифрового наземного телевизионного вещания, используемая в Европе. Предельные уровни внеполосных излучений, указанные в Рекомендации МСЭ-R SM.1541, были признаны недостаточными для защиты соседних каналов и/или служб радиосвязи. Поэтому в Соглашении GE-06 были определены более строгие ограничения. Для удовлетворения этих требований передатчики DVB-T должны быть всегда оснащены полосовыми фильтрами, установленными после последнего каскада усиления.

Параметры измеряемой системы DVB-T:

- Модуляция – OFDM 8k с 6817 активными несущими
- Ширина полосы – 7,61 МГц
- Мощность передатчика – 1 кВт (выходная мощность передатчика), э.и.м. 10 кВт
- Выходной фильтр передатчика – имеется
- Граница области внеполосных излучений – 20 МГц (см. Рекомендацию МСЭ-R SM.1541, Приложение 6, пункт 2.2.1)

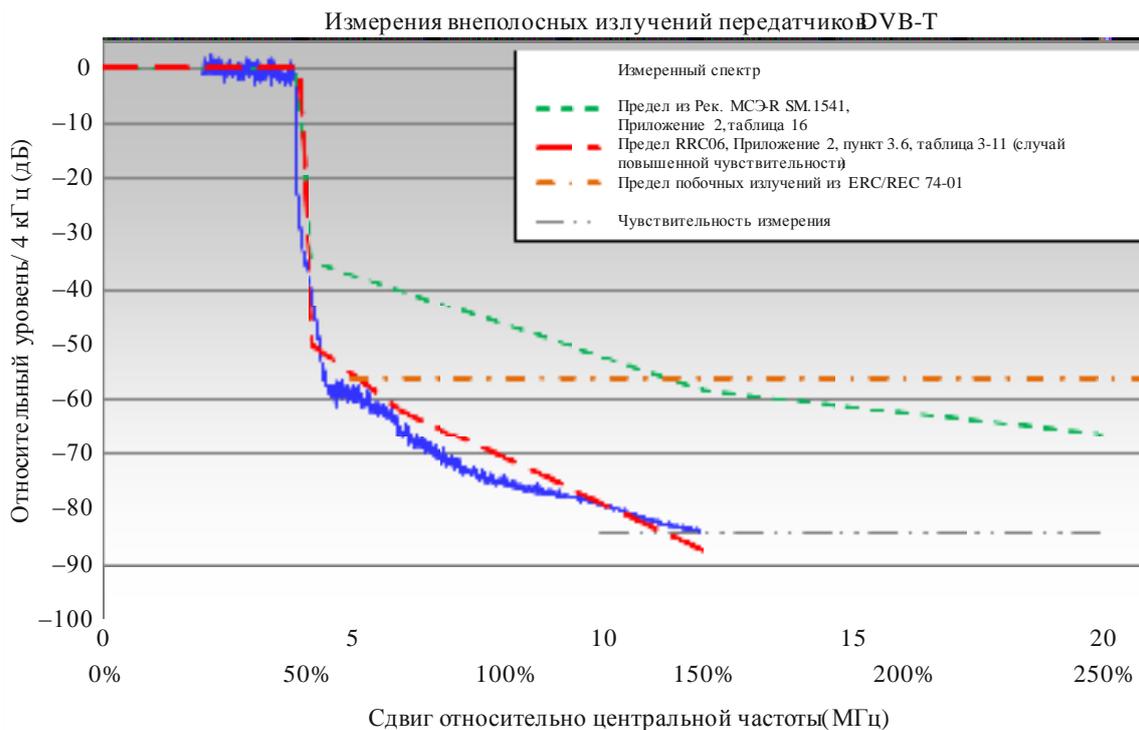
См. также дополнительные пояснения в Приложении 1, пункт 4.

3.1 Внеполосные излучения

Измерения проводились на фидере антенны при ширине полосы измерения 7,5 кГц, и их результаты представлены на рисунке 7 с эталонной полосой частот 4 кГц. Измеренные уровни были приведены к внутриполосной спектральной плотности мощности в полосе 4 кГц. В Рекомендации МСЭ-R SM.1541 указаны относительные предельные уровни для всего диапазона внутриполосных излучений. В целях обеспечения защиты служб радиосвязи в соседних полосах был разработан выходной фильтр для измеряемого передатчика, соответствующий наиболее строгой маске из GE-06, пункт 3.6, таблица 3-11, для случаев повышенной чувствительности. Следует отметить, что в большинстве случаев применяется некритическая спектральная маска RRC06.

РИСУНОК 7

Измерения внеполосных излучений передатчиков DVB-T



Report SM.2421-07

Выводы по рисунку

- Внеполосные излучения удалось измерить только до уровня точки излома маски из GE-06 на частоте 12 МГц. Уровни внеполосных излучений при больших сдвигах частоты ниже этой самой строгой маски, но из-за ограниченной чувствительности измерения количественно определить их было невозможно.

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|-------------------|-----------|--|----------------------|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с RRC06 |
| Передатчики DVB-T | Рисунок 7 | Показатели DVB-T лучше указанных предельных уровней ~20 дБ или более | Близкое соответствие |

3.2 Побочные излучения

Сравнение с регламентарными пределами.

- Соглашение GE-06 не содержит никаких пределов побочных излучений.
- Поскольку в Рекомендации МСЭ-R SM.329 не указаны конкретные значения для DVB-T, могут быть приняты общие ограничения категории А для передатчиков "телевизионного вещания". Рекомендуется выбирать наименее строгий предел из двух значений $46 \text{ дБ} + 10 \cdot \log_{10}(P/W)$ или 60 дБн, но не выше 12 мВт (10,8 дБм). Для передатчиков с выходной мощностью выше 50 Вт подходит значение ослабления 60 дБн в полосе 100 кГц; для передатчиков мощностью выше 12 кВт требуемое ослабление составляет $19 \text{ дБ} + 10 \cdot \log_{10}(P/W)$.
- В таблице 4.1 ERC/REC 74-01 указан предельный уровень побочных излучений -16 дБм в полосе 100 кГц для передатчика со средней выходной мощностью 1 кВт на входе антенны.

При выходной мощности 59 дБм в полосе 8 МГц этот предел приводит к относительному ослаблению $59 \text{ дБм} - 10 \cdot \log_{10}(8000/100) - (-16 \text{ дБм}) = 56 \text{ дБ}$. Этот предел показан на рисунке 7.

- В соответствующем стандарте ЕТСИ, EN 302 296 [13], указаны более строгие предельные уровни побочных излучений, чем в Рекомендации МСЭ-R SM.329. Например, при выходной мощности передатчика более 1 кВт предельное значение таких излучений в этом стандарте ЕТСИ составляет –36 дБм в полосе 100 кГц (400–790 МГц и 862–100 МГц), что приводит к относительному ослаблению более 96 дБн.

Как упоминалось выше, передатчики DVB-T всегда оснащены выходными фильтрами в соответствии с требованиями Соглашения GE-06. Наиболее критической точкой является сдвиг на 12 МГц, где должен достигаться самый низкий уровень внеполосных излучений. На границе между областями внеполосных и побочных излучений в точке 20 МГц выходной фильтр дополнительно ослабляет нежелательные излучения, так что их уровень становится значительно ниже любого предела. Как следствие, никаких побочных излучений или гармоник, превышающих чувствительность измерения, ожидать не приходится. Измерения, проведенные BNetzA в Германии, показали, что спектральная плотность нежелательных излучений DVB-T в области побочных излучений ослабляется более чем на 100 дБ по отношению к эталонной внутриполосной спектральной плотности мощности в той же полосе частот.

Выводы по рисунку 7

- Благодаря необходимой фильтрации уровень нежелательных излучений даже в начале области побочных излучений (сдвиг на 20 МГц) ниже чувствительности измерения и по меньшей мере на 30 дБ ниже предельного уровня, указанного в таблице 4.1 ERC/REC 74-01.

Маска внеполосных излучений из GE-06 достигает предельного уровня побочных излучений, указанного в таблице 4.1 ERC/REC 74-01, уже при сдвигах частоты на 5 МГц, или 62% от ширины полосы сигнала.

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|-------------------|-----------|---------------------|--|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 |
| Передатчики DVB-T | Рисунок 7 | | Благодаря необходимой фильтрации уровень нежелательных излучений даже в начале области побочных излучений (сдвиг на 20 МГц) ниже чувствительности измерения и по меньшей мере на 30 дБ ниже предельного уровня, указанного в таблице 4.1 ERC/REC 74-01 |

4 Базовые станции LTE800

В настоящее время многие операторы внедряют стандарт подвижной связи 4-го поколения (LTE). Стандарт 3GPP TS 36.211 позволяет гибко настраивать многие РЧ-параметры, включая полосу РЧ. Измерения проводились на нескольких базовых станциях LTE800 разных производителей. Основные РЧ-параметры измеренных базовых станций:

| | |
|----------------------|--|
| Диапазон частот | – 796 МГц для передатчика 1 (Tx1) и передатчика 2 (Tx2), 816 МГц для передатчика 3 (Tx3) |
| Модуляция | – OFDM |
| Ширина полосы | – 10 МГц |
| Мощность передатчика | – 46 дБм (40 Вт) на выходе передатчика, э.и.и.м. 60,5 дБм (1122 Вт) |

- Выходной фильтр передатчика – в передатчиках 1 и 3 отсутствует; в передатчике 2 имеется дополнительный внешний фильтр для соответствия требованиям защиты DVB-T (на практике измерялась нижняя боковая полоса Tx2, а результат зеркально отражался относительно центральной частоты на верхнюю боковую полосу, чтобы обеспечить прямое сравнение с результатами Tx1 и Tx3 на одном графике)
- Конец области внеполосных излучений – для Tx1 – сдвиг на 35 МГц, для Tx2 и Tx3 – сдвиг на 15 МГц (относительно центральной частоты)

Хотя для Tx1 и Tx3 внешние выходные фильтры не применялись, эти передатчики были оснащены внутренними фильтрами для ограничения побочных излучений за пределами распределенной полосы линии вниз, чтобы защитить свои приемники, работающие в полосе линии вверх (832–862 МГц).

Измерения основаны на ограниченном количестве образцов оборудования, а результаты для наихудшего случая могут значительно отличаться от показанных результатов ввиду динамического характера систем LTE 3GPP. Кроме того, во время измерений не всегда была известна конкретная конфигурация ресурсного блока.

4.1 Внеполосные излучения

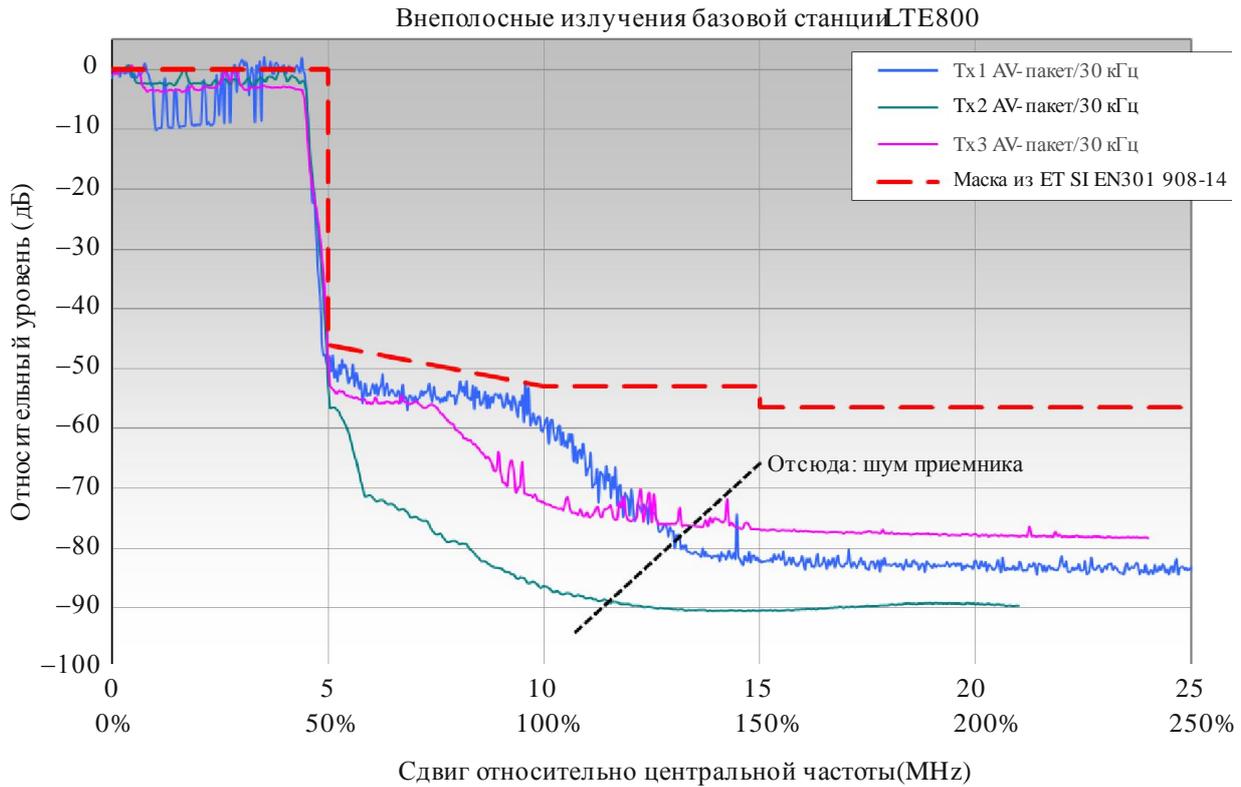
Система передает пакеты разной длины и с разной шириной полосы в зависимости от конфигурации базовой станции и трафика. Измерения проводились, когда базовые станции находились в режиме испытаний с использованием всех доступных ресурсных блоков и, следовательно, создавали максимальные излучения в боковой полосе. Ширина полосы измерения составляла от 30 до 100 кГц. Выходная мощность передатчиков всех трех базовых станций LTE составляла 40 Вт = 16 дБВт = 46 дБм. Мощность излучения была равна 60,5 дБм.

Поскольку в Рекомендации МСЭ-R SM.1541 отсутствует какая-либо информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений, для сравнения на рисунке 8 показаны маски из ETSI EN 301 908-14, таблица 4.2.2.2.3-3.

Уровни измеренных и предельных значений преобразованы в полосу 30 кГц и нормализованы.

Значения справа от черной пунктирной линии на рисунке 8 демонстрируют технические ограничения, вызванные шумом приемника.

РИСУНОК 8
Внеполосные излучения базовых станций LTE800



Report SM.2421-08

Выводы по рисунку 8

- Даже если внешние фильтры не применяются (см. Tx1 и Tx3), внеполосные излучения, выходящие за пределы сдвига приблизительно в 15 МГц (150% ширины канала), уже подавлены на 80 дБ или на 20 дБ ниже предельного уровня (см. также рисунок 27, верхнюю боковую полосу).
- Однако следует отметить, что при меньших сдвигах (< 10 МГц) Tx1 всего лишь соответствует маске, и это может измениться при увеличении времени измерения.

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|------------------------|-----------|---|--|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с ETSI EN 301 908-14, таблица 4.2.2.2.3-3 |
| Базовые станции LTE800 | Рисунок 8 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | Даже если внешние фильтры не применяются, внеполосные излучения за пределами сдвига приблизительно в 15 МГц (150% ширины канала) уже на 20 дБ ниже предельного уровня. Однако при меньших сдвигах (< 10 МГц) один из этих сигналов всего лишь соответствует маске, и это может измениться при увеличении времени измерения |

4.2 Побочные излучения

Сравнение с регламентарными пределами.

- Поскольку в Рекомендации МСЭ-R SM.329 (категория В) не содержится конкретных значений для систем широкополосного беспроводного доступа, работающих в диапазоне частот ниже 1 ГГц, для сравнения на рисунке 9 показано общее ограничение категории В для сухопутной подвижной службы, составляющее -36 дБм в полосе 100 кГц.
- В соответствующем стандарте ETSI EN 301 908-14, пункт 4.2.4.2.1, и в таблице 2.1 ERC/REC 74-01 также указывается предельный уровень побочных излучений -36 дБм в полосе 100 кГц, измеренный кондуктивным способом на выходе передатчика. Этот предел должен быть отнесен к общей внутриполосной мощности 40 Вт = 46 дБм в полосе 10 МГц, что соответствует внутриполосной спектральной плотности мощности 46 дБм $- 10\log_{10}(10\ 000/100) = 26$ дБм в полосе частот 100 кГц. В результате относительное ослабление побочных излучений составляет 26 дБм $- (-36$ дБм) = 62 дБ.

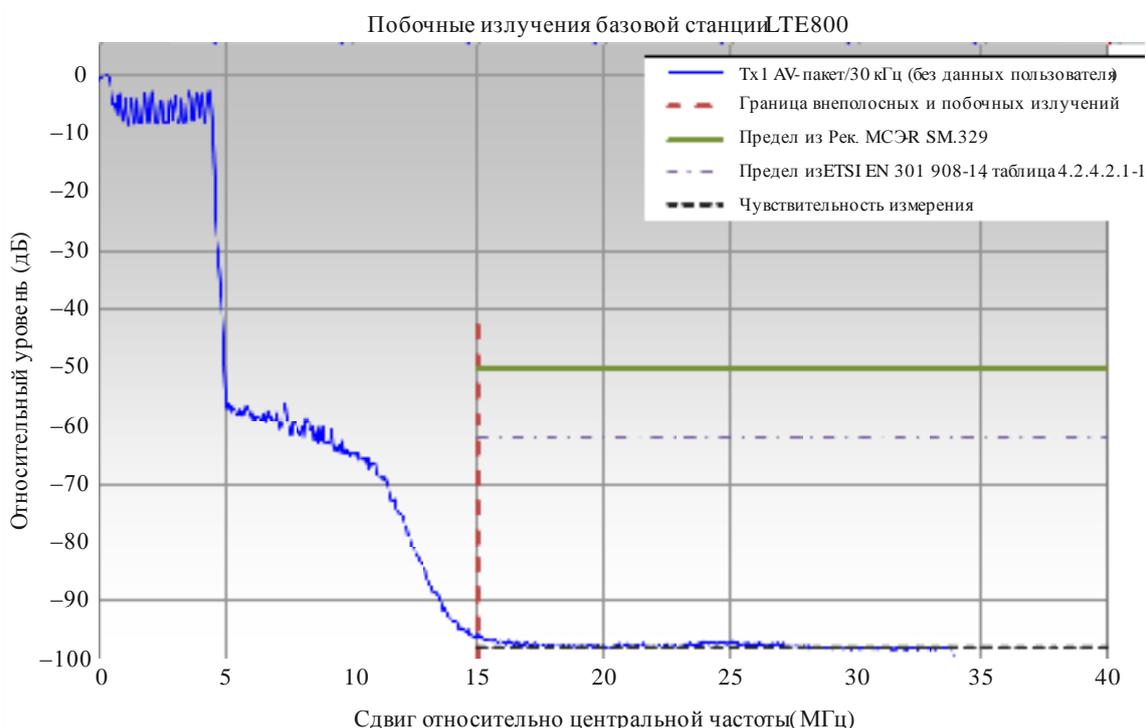
Как видно из результатов измерений внеполосных излучений на рисунке 8, на границе области побочных излучений уровень излучения уже ниже чувствительности измерительной системы. Поскольку все базовые станции LTE имеют по крайней мере внутренние фильтры для защиты своих полос приема, при любых дальнейших сдвигах частоты никакие побочные излучения обнаружить нельзя.

На рисунке 9 показаны результаты кондуктивного измерения на выходе передатчика базовой станции LTE, работающей на частоте 796 МГц. Базовая станция настроена на передачу с максимальной мощностью, хотя не все ресурсные блоки выделены для пользовательских данных. Можно предположить, что в режиме максимальной мощности передачи базовой станции, когда все ресурсные блоки выделены для пользовательских данных, уровень нежелательных излучений будет выше, и этот случай можно считать наихудшим.

Согласно принципам, описанным в пункте 3.2, область побочных излучений начинается со сдвига в 15 МГц, показанного на рисунке 9, ниже, красной пунктирной линией.

РИСУНОК 9

Излучения базовой станции LTE800



Выводы по рисунку 9

- Уже при сдвиге около 15 МГц (150% ширины полосы) модулированные сигналы исчезают под порогом чувствительности.
- Благодаря применяемым выходным фильтрам уровни побочных излучений по меньшей мере на 40 дБ ниже ограничений категории В для сухопутной подвижной службы, указанных в Рекомендации МСЭ-R SM.329, таблице 2.1 ERC/REC 74-01 и ETSI EN 301 908-14.
- При том что это не наихудший случай режима работы станции, видно, что выходной фильтр оказывает наибольшее влияние при сдвигах более чем на 12 МГц, хотя область побочных излучений начинается со сдвига 25 МГц.

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|------------------------|-----------|--|-----------------|--------|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с ЕТСИ |
| Базовая станция LTE800 | Рисунок 9 | Благодаря применяемым выходным фильтрам уровни побочных излучений по меньшей мере на 40 дБ ниже ограничений категории В для сухопутной подвижной службы, указанных в Рекомендации МСЭ-R SM.329, таблице 2.1 ERC/REC 74-01 и ETSI EN 301 908-14 | | |

5 Оборудование пользователя LTE800

Оборудование пользователя (UE) LTE800 может представлять собой установленные в домах модемы с внутренними или внешними антеннами или смартфоны. Во время активных соединений оборудование пользователя всегда передает канал управления с шириной полосы 180 кГц. В определенные интервалы времени планировщик в базовой станции выделяет дополнительную часть ширины канала мобильному устройству для передачи пользовательских данных. Это приводит к постоянному изменению полосы сигнала UE в зависимости от трафика. Кроме того, система управления мощностью постоянно регулирует выходную мощность UE таким образом, чтобы уровень сигнала был достаточным лишь для приема базовой станцией.

Измерения проводились с использованием нескольких образцов оборудования пользователя LTE800 разных производителей. Как известно, в идеале для получения статистических моделей работы применяемых на практике мобильных устройств необходимо проанализировать статистически представительное количество образцов оборудования/эталонных образцов. Однако по практическим причинам измерения основаны на ограниченном количестве образцов оборудования, а результаты для наихудшего случая могут значительно отличаться от показанных результатов ввиду динамического характера систем LTE 3GPP. Например, не всегда указывается используемая конфигурация LTE (то есть количество ресурсных блоков, распределение ресурсных блоков по времени/частоте и т. д.). Даже "полная нагрузка", когда UE ведет передачу с использованием всех возможных ресурсных блоков с максимальной мощностью, не обязательно приводит к максимальным нежелательным излучениям, поэтому согласно стандартам ЕТСИ, применяемым для испытаний на соответствие, оборудование должно эксплуатироваться в нескольких различных конфигурациях, ни одна из которых не должна вызывать нежелательные излучения, превышающие

предельный уровень². Однако результаты измерений могут содержать ценные данные для исследований совместного использования частот и совместимости.

Основные РЧ-параметры измеряемого оборудования пользователя:

| | |
|-------------------------------------|---|
| Диапазон частот | – 832–862 МГц |
| Модуляция | – SC-FDMA |
| Ширина полосы | – 180 кГц – 10 МГц |
| Конец области внеполосных излучений | – сдвиг на 20 МГц (относительно центральной частоты) (см. ETSI EN 301 908-13, таблица 4.2.4.1.2-1) |
| Мощность передатчика | – э.и.и.м. до 23 дБм (200 мВт) |
| Выходной фильтр передатчика | – отсутствует |

Хотя внешние выходные фильтры не применялись, устройства оснащены некоторыми внутренними фильтрами для ограничения побочных излучений за пределами распределенной полосы линии вверх, чтобы защитить свои приемники, работающие в полосе 791–821 МГц, или соседние службы.

Поскольку в этом частотном диапазоне представляет интерес только режим FDD, работа в режиме TDD не исследовалась.

5.1 Внеполосные излучения

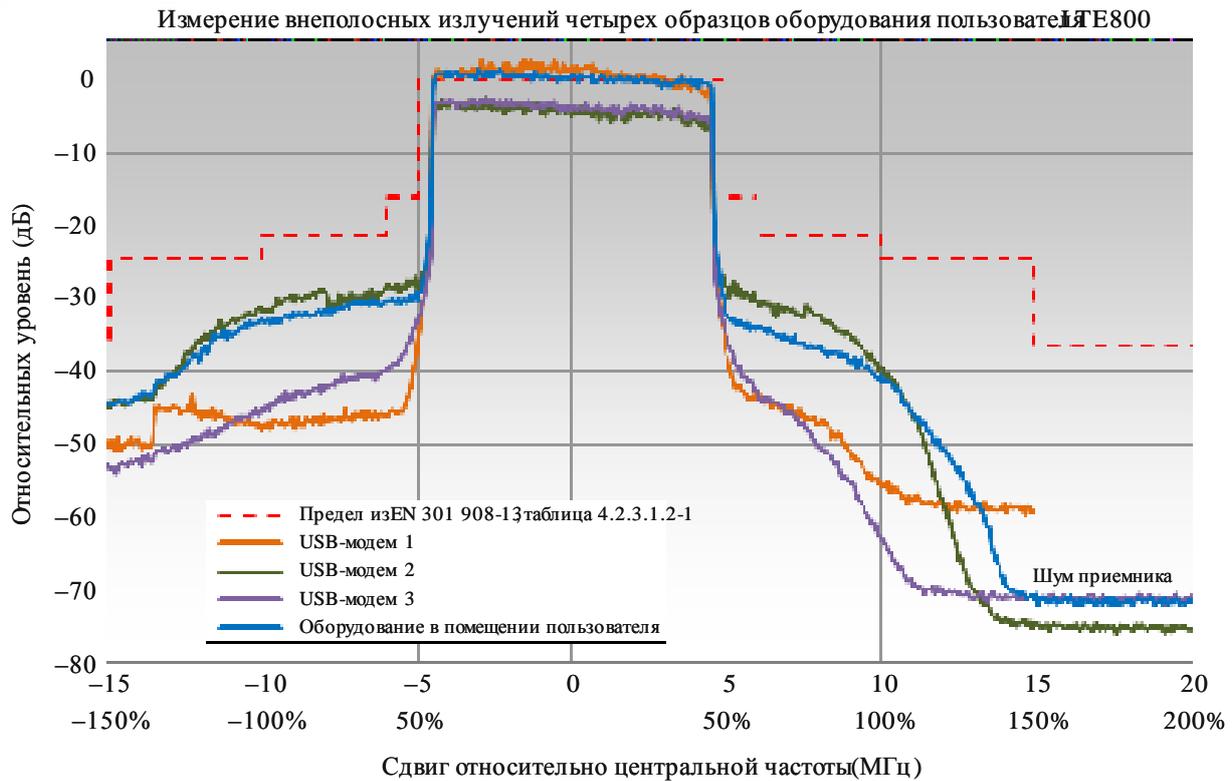
В Отчете [14] опубликованы результаты измерений, проведенных на четырех разных образцах оборудования пользователя LTE800. В нем отмечается, что измерения регистрировались как среднее квадратическое значение мощности в полосе разрешения 10 кГц, при этом каждое UE было настроено на передачу с максимальной мощностью (23 дБм) с использованием модуляции 16QAM – наивысшего порядка модуляции, поддерживаемого всеми тестируемыми устройствами. Это обеспечило максимальные уровни нежелательных излучений. Поскольку в Рекомендации МСЭ-R SM.1541 отсутствует какая-либо информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений, для сравнения на рисунке 10 показаны маски из ETSI EN 301 908-13, таблица 4.2.3.1.2-1. Следует отметить, что этот стандарт также определяет границу внеполосных излучений для сигнала LTE 10 МГц на уровне сдвига 20 МГц, что соответствует 200% ширины полосы канала.

Уровни измеренных и предельных значений преобразованы в полосу 10 кГц и нормализованы.

² Примечание. – В системе LTE трудно определить наихудший случай выделения ресурсного блока с точки зрения внеполосных и побочных излучений. На практике такая конфигурация наихудшего случая отличается от конфигурации полной нагрузки, когда как в базовой станции, так и в оборудовании пользователя распределены все доступные ресурсные блоки. Причины следующие: в LTE имеются очень гибкие возможности распределения ресурсных блоков (RB), которое может варьироваться в пределах от 1 до 100 блоков для одной несущей. Позиции этих ресурсных блоков также могут варьироваться в пределах от 0 до 99, так что существуют тысячи комбинаций. В случае объединения несущих эти тысячи комбинаций для первой несущей могут объединяться с комбинациями для второй несущей, что приводит к еще большему числу комбинаций. Хотя в некоторых случаях полное распределение представляет собой наихудший случай, поскольку приводит к довольно широкополосному сигналу, существуют и другие случаи, когда среднее число ресурсных блоков может вызвать более сильные внеполосные излучения. Другим таким случаем является передача одного ресурсного блока, поскольку одиночные передачи RB имеют очень высокую спектральную плотность мощности. Поэтому продукты интермодуляции между передаваемым ресурсным блоком, несущей частотой и частотой зеркального канала могут попасть в частотный диапазон внеполосных излучений при значительных амплитудах, близких к предельным. При объединении несущих даже возможно, что на каждой из несущих будет один ресурсный блок. Тогда продукты интермодуляции между несущими, выходящими за пределы диапазона, могут быть довольно сильными, так что в этом случае потребуются снижение мощности для соблюдения предельных уровней внеполосных и побочных излучений.

РИСУНОК 10

Измерение внеполосных излучений четырех образцов оборудования пользователя LTE800



Report SM.2421-10

Выводы по рисунку 10

- Результаты показывают, что все образцы оборудования пользователя в разной степени превосходят маску внеполосных излучений.
- Все проверенные образцы оборудования пользователя продемонстрировали асимметричные излучения с более высоким подавлением на частоте выше 862 МГц. Это предполагает наличие (внутренней) фильтрации для решения проблем сосуществования с системами, работающими в соседних полосах частот.

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|----------------------------------|------------|---|---|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с ETSI EN 301 908-13, таблица 4.2.3.1.2-1 |
| Оборудование пользователя LTE800 | Рисунок 10 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | Проверенные образцы оборудования пользователя в разной степени превосходят маску внеполосных излучений и демонстрируют асимметричные излучения с более высоким подавлением на частоте выше 862 МГц. Это предполагает наличие (внутренней) фильтрации для решения проблем сосуществования с системами, работающими в соседних полосах частот |

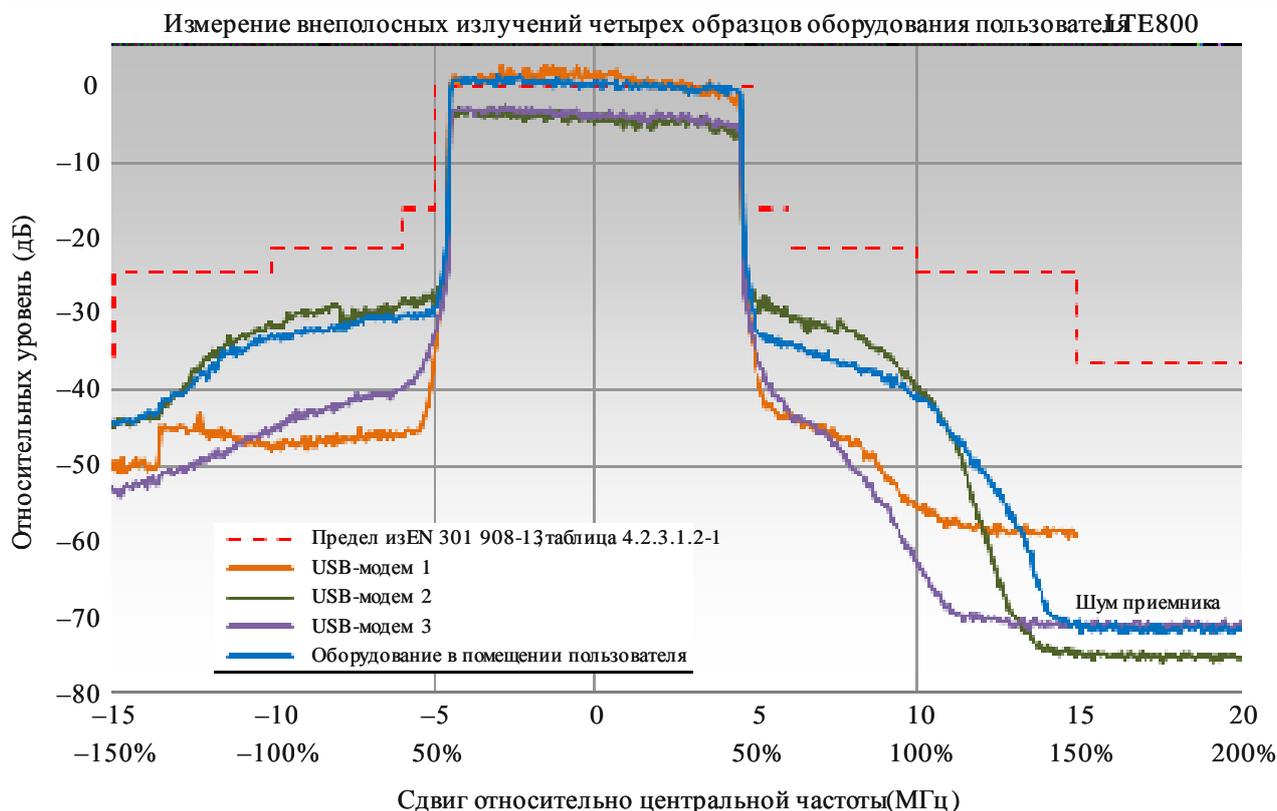
5.2 Побочные излучения

- В Рекомендации МСЭ-R SM.329 (ограничения категории В, сухопутная подвижная служба), в таблице 2.1 ERC/REC 74-01 и в соответствующем стандарте ETSI EN 301 908-13 (таблица 4.2.4.1.2-2) указан предельный уровень побочных излучений -36 дБм в эталонной полосе 100 кГц (измеренный кондуктивным способом на выходе передатчика). Этот предел должен быть отнесен к общей внутриполосной мощности 200 мВт = 23 дБм в полосе 10 МГц, что соответствует внутриполосной спектральной плотности мощности 23 дБм – $10\log_{10}(10\,000/100) = 3$ дБм в полосе частот 100 кГц. В результате относительное ослабление побочных излучений составляет 3 дБм – $(-36$ дБм) = 39 дБ.
- Следует отметить, что стандарт ETSI EN 301 908-13 также определяет границу внеполосных излучений для сигналов LTE 10 МГц на уровне сдвига 20 МГц, что соответствует 200% ширины полосы канала (см. таблицу 4.2.4.1.2-1 указанного стандарта).

На рисунке 11 показаны результаты измерения двух образцов оборудования пользователя LTE800, работающих на частоте 857 МГц, в диапазоне сдвига вблизи границы внеполосных излучений.

РИСУНОК 11

Излучения двух образцов оборудования пользователя LTE800



Report SM.2421-10

Выводы по рисунку 11

- Видно, что в данной конфигурации уровень излучения обоих образцов оборудования пользователя ниже предельных значений из таблицы 2.1 ERC/REC 74-01 по крайней мере на 20 дБ. Фактический уровень побочных излучений еще ниже, чем показано, по причине ограниченности доступной чувствительности измерения.
- Тот факт, что образцы оборудования пользователя работают в самом высокочастотном канале LTE800, где побочные излучения дополнительно подавляются для защиты соседних служб, приводит к очень сильному ослаблению побочных излучений, даже ниже

чувствительности измерения. Исследуя нижние боковые полосы на рисунке 11, можно заметить, что на границе в неполюсных излучений и даже внутри полосы LTE800 уровень побочных излучений значительно ниже установленных пределов.

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|----------------------------------|------------|--|-----------------|--------|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с ETSI |
| Оборудование пользователя LTE800 | Рисунок 11 | В этой конфигурации показатели обоих образцов оборудования пользователя по меньшей мере на 20 дБ ниже предельных уровней, установленных в Рекомендации МСЭ-R SM.329 (ограничение категории В, сухопутная подвижная служба), таблице 2.1 ERC/REC 74-01 и соответствующем стандарте ETSI EN 301 908-13 (таблица 4.2.4.1.2-2). Фактический уровень побочных излучений еще ниже по причине ограниченности доступной чувствительности измерения | | |

5.3 Гармонические излучения

Нежелательные излучения серийно выпускаемого оборудования пользователя LTE800 измерялись на частоте второй гармоники, так они попадают в полосу частот приемника радионавигационной спутниковой службы. Поскольку частота этих нежелательных излучений всегда выше 1 ГГц, применим предельный уровень -30 дБм в эталонной полосе частот 1 МГц, установленный в Рекомендации МСЭ-R SM.329 как ограничение категории В для сухопутной подвижной службы, а также в таблице 2.1 ERC/REC 74-01 и ETSI EN 301 908-13. Тот же предельный уровень указан в Рекомендации МСЭ-R M.2071, применимой к оборудованию пользователя ИМТ-Advanced. Общая измеренная излучаемая мощность составляла 27 дБм в полосе 10 МГц, что приводит к внутриканальной спектральной плотности 17 дБм/МГц. Поэтому требуемое подавление гармонических частот должно составлять 17 дБм/МГц $- (-30$ дБм) = 47 дБ.

Частота передатчика составляла 858 МГц. Измерения излучений проводились на лабораторных установках с полосой измерения 100 кГц. Измеренный внутриполосный сигнал и его вторая гармоника показаны на рисунках 12 и 13.

РИСУНОК 12

Внутриполосные излучения оборудования пользователя LTE800

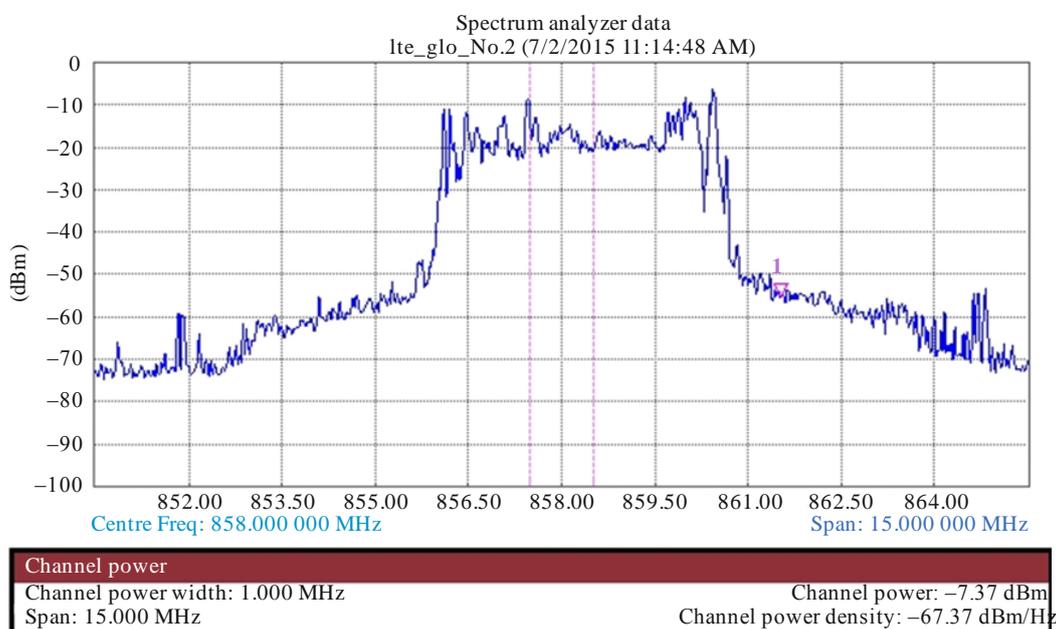
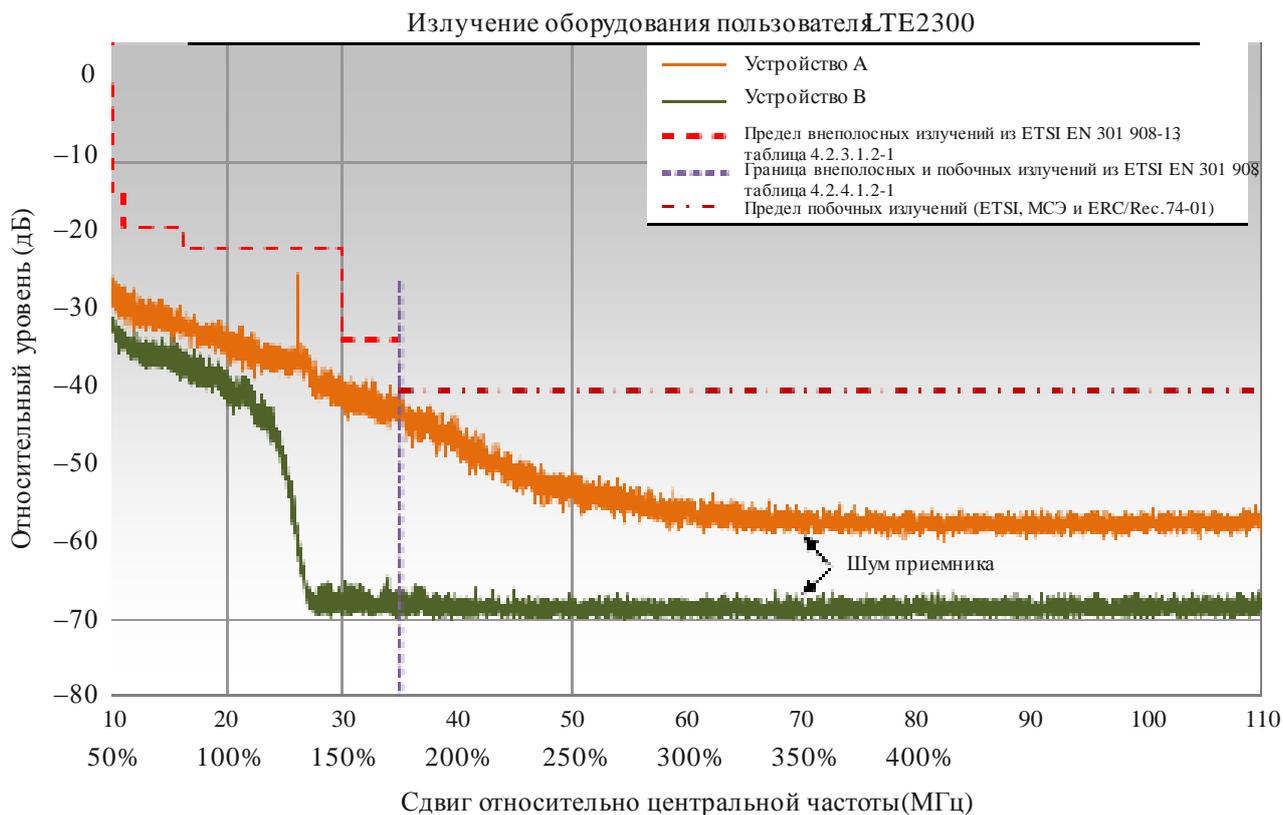


РИСУНОК 13

Излучение оборудования пользователя LTE800 на частоте второй гармоники



Report SM.2421-14

Бюджет линии для этих измерений показан в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3
Бюджет линии

| Параметр | Излучение основной частоты | Излучение второй гармоники |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Частота | 858 МГц | 1716 МГц |
| Измеренная мощность | -7,35 дБм/МГц | -62,45 дБм/МГц |
| Коэффициент усиления антенны | 7,8 дБ | 7,5 дБ |
| Затухание в кабеле | 1,2 дБ | 1,5 дБ |
| Затухание в свободном пространстве | 31,2 дБ | 37,14 дБ |
| Излучаемая мощность | 17,23 дБм/МГц | -31,31 дБм/МГц |

Подавление второй гармоники для измеренного оборудования пользователя оценивается как $17,23 \text{ дБм/МГц} - (-31,31 \text{ дБм/МГц}) = 48,54 \text{ дБ}$.

Вывод

- Нежелательные излучения измеренного UE на частоте второй гармоники примерно на 1,5 дБ ниже предельного уровня.

6 Оборудование пользователя LTE2300

В некоторых европейских странах LTE также используется в диапазоне 2,3 ГГц. Система в основном такая же, что и LTE800, за исключением того, что ширина каналов, как правило, составляет 20 МГц. Соответствующие РЧ-параметры:

| | |
|-------------------------------------|--|
| Диапазон частот | – 2300–2400 МГц |
| Модуляция | – SC-FDMA |
| Ширина полосы | – 180 кГц – 20 МГц |
| Мощность передатчика | – до 23 дБм (200 мВт) на выходе передатчика и э.и.и.м. |
| Выходной фильтр передатчика | – отсутствует |
| Конец области внеполосных излучений | – сдвиг на 35 МГц (относительно центральной частоты) (см. ETSI EN 301 908-13, таблица 4.2.4.1.2-1) |

На рисунке 14 показаны результаты лабораторных измерений нежелательных излучений двух разных образцов оборудования пользователя LTE, работающих в канале 20 МГц диапазона TDD LTE 2,3 ГГц в полосе 2370–2390 МГц. Измерения регистрировались как среднее квадратическое значение мощности в полосе разрешения 10 кГц, при этом каждый образец был настроен на передачу с максимальной мощностью (23 дБм) с использованием модуляции 16QAM.

По причинам, аналогичным обсуждавшимся в пункте 5, измерения основаны на двух образцах оборудования, и результаты для наихудшего случая могут значительно отличаться от показанных результатов ввиду динамического характера систем LTE 3GPP. Кроме того, не всегда указывается используемая конфигурация LTE (то есть количество ресурсных блоков, распределение ресурсных блоков по времени/частоте и т. д.).

График на рисунке 14 приведен к внутриканальной спектральной плотности мощности в полосе частот 10 кГц.

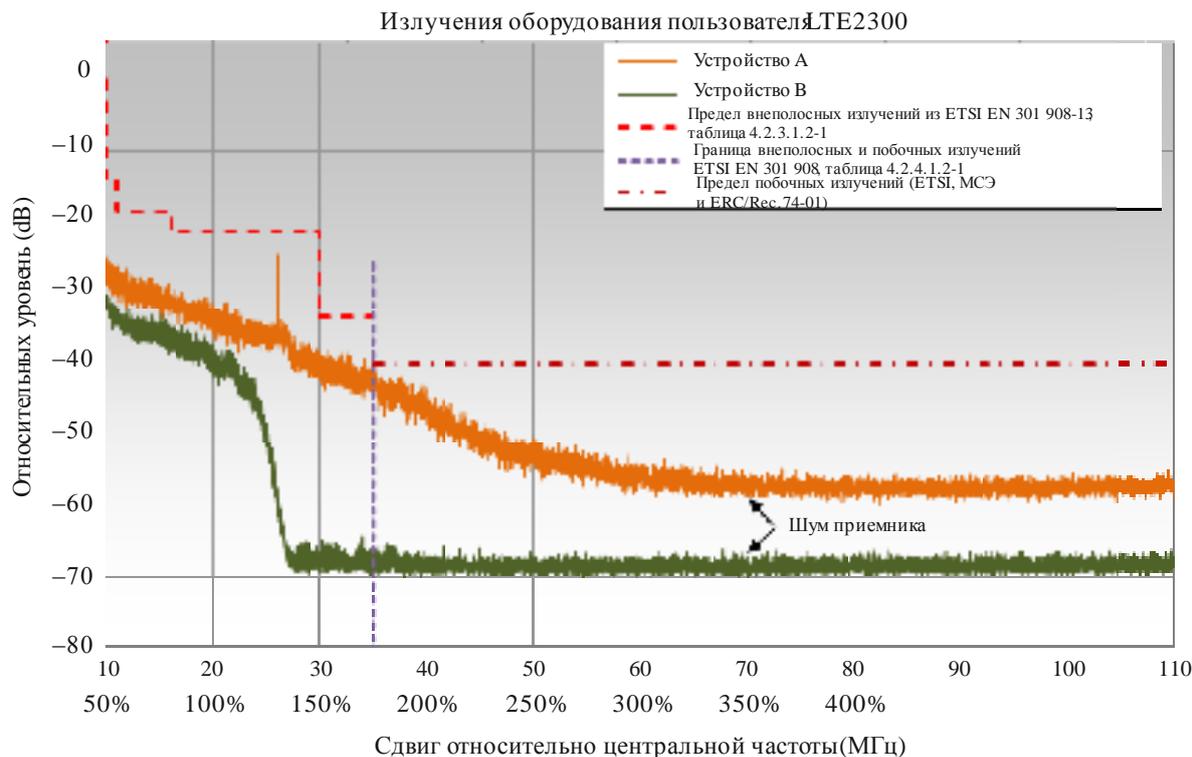
В Рекомендации МСЭ-R SM.1541 отсутствуют предельные уровни внеполосных излучений для этой системы, поэтому на рисунке 14 показана спектральная маска из соответствующего стандарта ETSI EN 301 908-13 (таблица 4.2.3.1.2-1), преобразованная в полосу 10 кГц, которая сравнивается с внутриканальной спектральной плотностью мощности.

В соответствующем стандарте ETSI EN 301 908-13 (таблица 4.2.4.1.2-2), Рекомендации МСЭ-R SM.329 (ограничения категории В для сухопутных подвижных систем) и ERC/REC 74-01 (таблица 2.1) устанавливается предельное значение побочных излучений –30 дБм в полосе 1 МГц. Поскольку это значение на выходе передатчика, регламентарный предел должен быть отнесен к общей внутрисполосной мощности $200 \text{ мВт} = 23 \text{ дБм}$ в полосе 20 МГц, что соответствует внутрисполосной спектральной плотности мощности $23 \text{ дБм} - 10 \log_{10}(20/1) = 10 \text{ дБм}$ в полосе частот 1 МГц. Результирующее относительное ослабление побочных излучений составляет $10 \text{ дБм} - (-30 \text{ дБм}) = 40 \text{ дБ}$.

Следует отметить, что стандарт ETSI EN 301 908-13 (таблица 4.2.4.1.2-1) также определяет границу внеполосных излучений для сигналов LTE 20 МГц на уровне сдвига 35 МГц, что соответствует 175% ширины канала.

РИСУНОК 14

Измерения нежелательных излучений двух образцов оборудования пользователя LTE 2,3 ГГц
(среднеквадратическая мощность, ширина полосы по разрешению = 10 кГц)



Report SM.2421-14

Выводы по рисунку 14

- В измеренном профиле излучений наблюдается заметная разница между двумя устройствами. Устройство А демонстрирует линейный спад, за исключением всплеска в области внеполосных излучений, и лишь только соответствует предельному уровню побочных излучений сразу за их границей. Устройство В демонстрирует значительно лучшие характеристики с гораздо более крутым спадом в области внеполосных излучений.
- Уровень побочных излучений при большем сдвиге частоты на 30 дБ ниже предельного. Следует однако отметить, что измерения в области побочных излучений ограничены динамическим диапазоном измерительного оборудования. Поэтому уровни нежелательных излучений устройств могут быть еще ниже, чем показано на рисунке 14.

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|---|------------|---|-----------------|--------|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с ЕТСИ |
| Образцы оборудования пользователя LTE2300 | Рисунок 14 | Уровень побочных излучений при большем сдвиге частоты на 30 дБ ниже предельного. Следует однако отметить, что измерения в области побочных излучений ограничены динамическим диапазоном измерительного оборудования. Поэтому уровни нежелательных излучений устройств могут быть еще ниже, чем показано на рисунке 14 | | |

7 Базовая станция GSM900

Соответствующие РЧ-параметры базовой станции GSM900:

- Диапазон частот — 925–960 МГц
- Модуляция — GMSK

| | |
|-------------------------------------|--|
| Ширина занимаемой полосы | – 250 кГц |
| Разнос каналов | – 200 кГц |
| Конец области внеполосных излучений | – сдвиг на 500 кГц (относительно центральной частоты) (правило 250%, использование разноса каналов (Примечание 1)) |
| Мощность передатчика | – до 46 дБм на выходе передатчика (типичное значение) |
| Выходной фильтр передатчика | – отсутствует |

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В исследованиях совместимости обычно используется сдвиг на 500 кГц до начала области побочных излучений. В спецификациях GSM ETSI EN 302 408 V8.0.1, пункт 4.3.3.1, и EN 301 502 V12.1.1, пункт 4.2.5.1.3 и таблица 4.2.5.1, побочные излучения определяются, начиная со сдвига на 1,8 МГц от центра несущей внутри полосы передачи и сдвига на 2 МГц от края полосы вне полосы передачи.

Хотя внешние выходные фильтры не применяются, передатчики обычно обеспечивают некоторую внутреннюю фильтрацию для ограничения нежелательных излучений в соседних полосах и для защиты своей полосы приема на линии вверх (880–915 МГц).

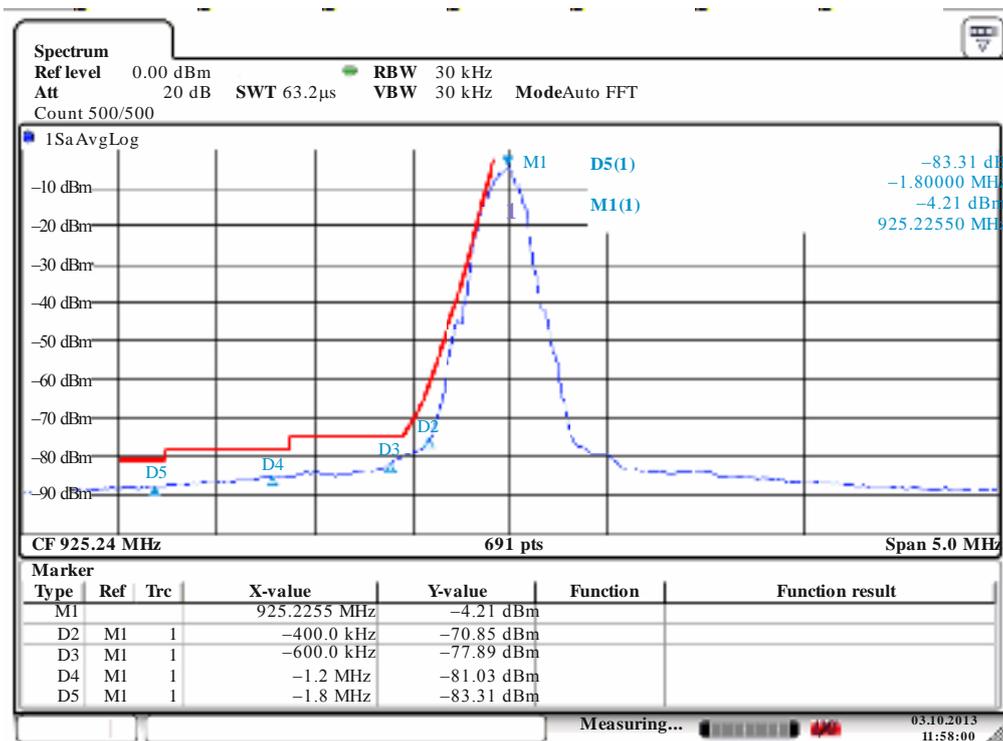
7.1 Внеполосные излучения

Рекомендация МСЭ-R SM.1541 не содержит конкретных пределов внеполосных излучений для GSM. Соответствующий стандарт ETSI TS 145 005 не предъявляет отдельных требований к внеполосным и побочным излучениям. Однако в пункте 4.2.1 ETSI TS 145 005 "Спектр, вызванный модуляцией и широкополосным шумом" определена спектральная маска (пункт 4.2.1.3, таблица a2), которую можно использовать в качестве эталона. Эта эталонная маска показана красной линией на рисунке 15.

Базовая станция, на которой проводились измерения, была настроена на самый низкий возможный рабочий канал (№ 975), который соответствует центральной частоте линии вниз 925,2 МГц. Анализатор спектра был настроен на ширину полосы по разрешению 30 кГц с использованием RMS-детектора и отображением линии максимального удержания.

РИСУНОК 15

Результат измерений базовой станции GSM900



Выводы по рисунку 15

- Во всем диапазоне уровень нежелательных излучений ниже предела, установленного ЕТСИ, и, в частности, при сдвиге на 400 кГц он ниже маски излучения примерно на 10 дБ.

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|---------|------------|---|--|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с ETSI TS 145 005 |
| GSM900 | Рисунок 16 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | Во всем диапазоне уровень нежелательных излучений ниже предела, установленного ЕТСИ, и, в частности, при сдвиге на 400 кГц он ниже маски излучения примерно на 10 дБ |

7.2 Побочные излучения

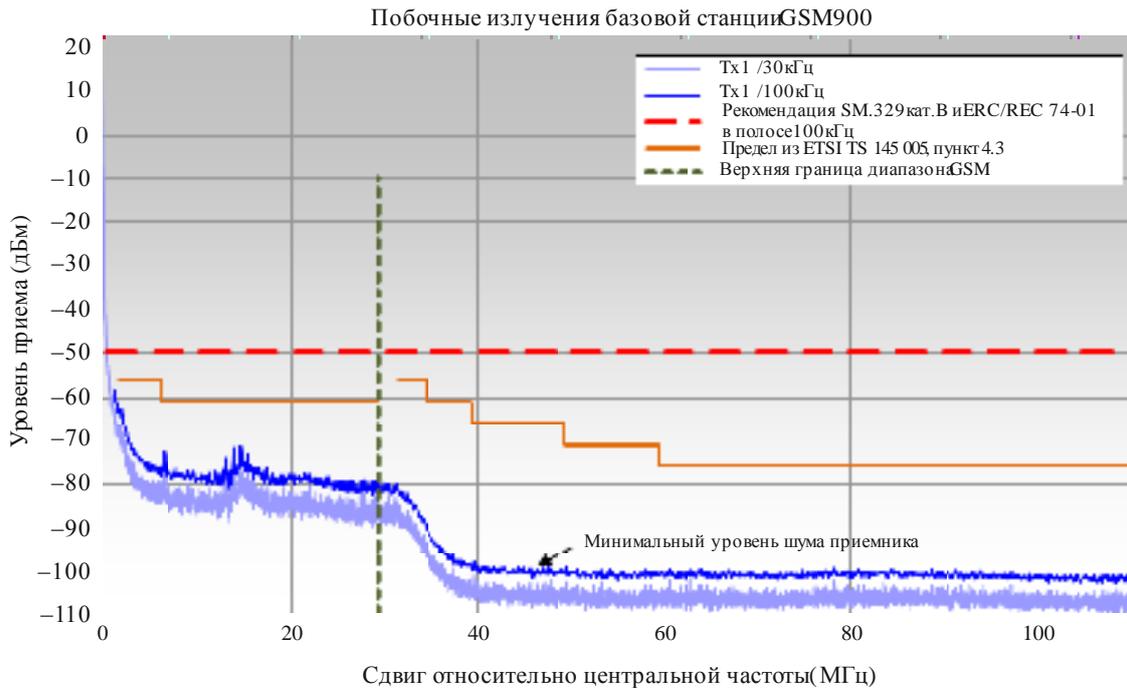
Измерения проводились на выходе передатчика обычной базовой станции GSM на так называемой частоте C1 (930,6 МГц), несущей широкополосного канала (BCCH). Хотя GSM представляет собой систему TDMA и обычно осуществляет передачу в виде пакетов, частота C1 передается непрерывно с полной мощностью. Поэтому для измерения среднеквадратического уровня внешний запуск не требовался.

В ERC/REC 74-01 и Рекомендации МСЭ-R SM.329 определен предельный уровень побочных излучений -36 дБм в полосе 100 кГц для базовых станций в рамках ограничения категории В для сухопутных систем подвижной связи. В данном случае выходная мощность передатчика составляла 42 дБм в канале шириной 200 кГц, поэтому этот предел соответствует относительному ослаблению побочных излучений в 42 дБм $- (-36 \text{ дБм} + 10 \cdot \log_{10}(200/100)) = 75$ дБ. Внутриканальный уровень приема базовой станции, на которой проводились измерения, составил +20 дБм в полосе измерения 30 кГц, что соответствует +25 дБм в эталонной полосе 100 кГц. Таким образом, предельный уровень из Рекомендации МСЭ-R SM.329 и ERC/REC 74-01 на диаграмме составляет $+25 \text{ дБм} - 75 \text{ дБ} = -50$ дБм.

В ETSI TS 145 005 содержатся довольно сложные предельных уровни побочных излучений; они установлены отдельно для применения внутри и вне присвоенного диапазона GSM. Однако результирующие ограничения намного строже ограничений из Рекомендации МСЭ. Верхняя граница полосы частот линии вниз GSM находится на уровне 960 МГц. При частоте передачи измеренной базовой станции 930,6 МГц граница расположена на уровне сдвига 29,4 МГц.

РИСУНОК 16

Побочные излучения базовой станции GSM900 (верхний диапазон частот)



Report SM.2421-16

Выводы по рисунку 16

- Фактический уровень побочных излучений дальше сдвига на 40 МГц может быть еще ниже, чем показано на рисунке, из-за ограниченной чувствительности измерительного приемника.
- Вне присвоенного диапазона GSM показатели по меньшей мере на 30 дБ ниже ограничений на побочные излучения категории В (базовые станции сухопутных систем подвижной связи), указанных в Рекомендации МСЭ-R SM.329 и ERC/REC 74-01.
- В частности, благодаря внутренней фильтрации для защиты соседних служб за пределами присвоенной полосы GSM уровень нежелательных излучений более чем на 25 дБ ниже предельного уровня, установленного ETSI [16].

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|------------------------|------------|--|-----------------|---|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с ETSI |
| Базовая станция GSM900 | Рисунок 16 | Вне присвоенного диапазона GSM показатели по меньшей мере на 30 дБ ниже ограничений на побочные излучения категории В (базовые станции сухопутных систем подвижной связи), указанных в Рекомендации МСЭ-R SM.329 и ERC/REC 74-01 | | В частности, благодаря внутренней фильтрации для защиты соседних служб за пределами присвоенной полосы GSM уровень нежелательных излучений более чем на 25 дБ ниже предельного уровня, установленного ETSI TS 145 005 |

Вторая гармоника не видна над уровнем шума измерительного приемника; это означает, что она ниже -100 дБм (уровень приемного оборудования в полосе 100 кГц), что соответствует уровню менее -90 дБм (уровень передачи в полосе 100 кГц). Выше второй гармоники излучения измерялись, но не регистрировались, поскольку при сдвиге более чем на 110 МГц излучения над уровнем шума не обнаруживались.

8 DECT

Стандарт улучшенной цифровой беспроводной электросвязи (DECT) широко применяется в системах персональной связи. Это система TDMA, так что фиксированное и переносное оборудование передает сигнал пакетами. Параметры систем, на которых проводились измерения:

| | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Частота передатчика | – 1897,344 МГц |
| Модуляция | – 2-FSK |
| Излучаемая мощность | – 250 мВт = 24 дБм (средний пакет) |
| Ширина занимаемой полосы | – 1,15 МГц |
| Начало области побочных излучений | – сдвиг на 2,875 МГц |
| Продолжительность пакета | – 90 мкс или 368 мкс |
| Период повторения пакета | – 10 мс |
| Ширина полосы измерения | – 100 кГц |

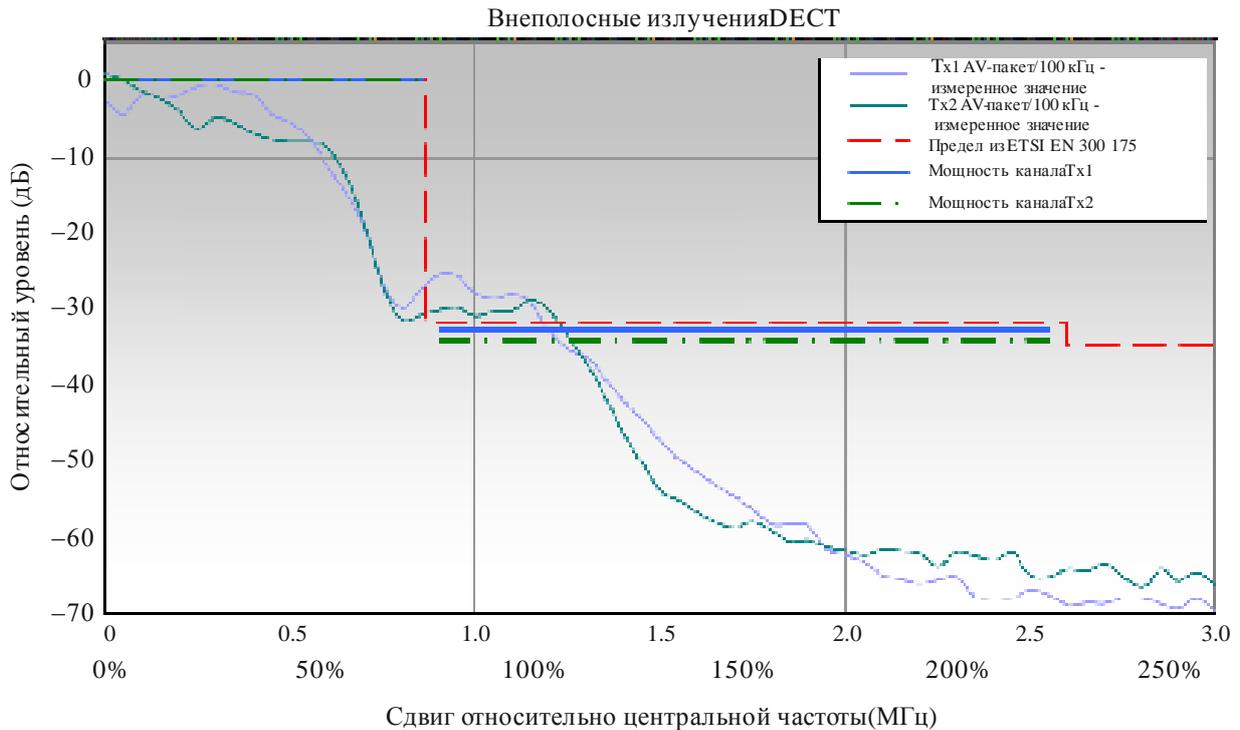
Измерения проводились на излучении (в эфире), поскольку оборудование обычно не имеет разъемов для внешней антенны. Измеренные уровни представляют собой среднеквадратические уровни только во время передачи пакетов (средний уровень пакетов). Для синхронизации измерения с передаваемыми пакетами использовался внешний запуск (см. описание измерительной установки в Приложении 1).

8.1 Внеполосные излучения

Измерялись две телефонные трубки DECT разных производителей с шириной полосы по разрешению 100 кГц. Полученные спектры внеполосных излучений показаны на рисунке 17 как Tx1 AV-пакет/100 кГц и Tx2 AV-пакет/100 кГц.

Рекомендация МСЭ-R SM.1541 не содержит Приложения, в котором указываются предельные уровни внеполосных излучений для DECT, поэтому в качестве эталона была взята маска из применимого стандарта ETSI EN 300 175-2 (пункт 5.5.1, таблица 1). Пределы внеполосных излучений определены в виде уровней мощности по всей ширине полосы канала как для эталонного излучения 0 дБ, так и для внеполосных излучений, поэтому никакого преобразования полосы частот не требуется. Чтобы получить прямое сравнение с предельными уровнями, измеренные спектральные плотности интегрировались по ширине полосы 1,15 МГц для используемого и соседнего каналов. Результаты показаны на рисунке 17 в виде горизонтальных линий ("мощность канала Tx1" и "мощность канала Tx2"). Масштаб осей на рисунке приведен к эталонной линии 0 дБ общей внутриканальной мощности.

РИСУНОК 17
Внеполосные излучения DECT (верхний диапазон частот)



Report SM.2421-17

Выводы по рисунку 17

- Видно, что в диапазоне сдвига около 1 МГц уровни внеполосных излучений обоих измеряемых устройств DECT не соответствуют требованиям стандарта ETSI.
- Поскольку в области внеполосных излучений видны только излучения, связанные с модуляцией, можно предположить, что у всех устройств DECT будет почти один и тот же спектр внеполосных излучений и в этом случае имеется значительный запас между предельным уровнем внеполосных излучений и их фактическим уровнем, особенно в диапазоне соседнего канала со сдвигом на 2 МГц.

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|---------|------------|---------------------|-----------------|---|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с ETSI |
| DECT | Рисунок 17 | | | В диапазоне сдвига около 1 МГц уровни внеполосных излучений обоих измеряемых устройств DECT не соответствуют требованиям стандарта ETSI. Поскольку в области внеполосных излучений видны только излучения, связанные с модуляцией, можно предположить, что у всех устройств DECT будет почти один и тот же спектр внеполосных излучений и в этом случае имеется значительный запас между предельным уровнем внеполосных излучений и их фактическим уровнем, особенно в диапазоне соседнего канала со сдвигом на 2 МГц |

8.2 Побочные излучения

Для службы DECT в Рекомендации МСЭ-R SM.329 (ограничения категории В0, сухопутная подвижная служба) и ERC/REC 74-01 указан предельный уровень побочных излучений -30 дБм в эталонной полосе частот 1 МГц. При мощности передачи 24 дБм этот предел соответствует относительному ослаблению побочных излучений на 24 дБм $- (-30$ дБм) = 54 дБ.

Эквивалентный измеренный внутриканальный уровень приема в полосе 1 МГц составил -12 дБм. Таким образом, ось уровня на рисунке 18 можно преобразовать так, чтобы она отражала излучаемую мощность в полосе шириной 1 МГц, прибавив 36 дБ для учета потерь в установке. На рисунке 18 линия необходимого подавления побочных излучений на 54 дБ лежит на уровне -12 дБм $- 54$ дБ = -66 дБм.

В пункте 5.5.4 стандарта ETSI EN 300 175-2 указан предельный уровень побочных излучений в 1 мкВт = -30 дБм выше присвоенной DECT полосы. Эталонная полоса частот для этого уровня составляет от 30 кГц до 3 МГц, что приводит к уменьшению предельного уровня при отнесении его к полосе 1 МГц на рисунке 18. Измеряемые устройства были настроены на частоту передачи $1897,344$ МГц – самый высокочастотный канал DECT в Европе. Присвоенная DECT полоса заканчивается на частоте 1900 МГц, что соответствует сдвигу на $2,656$ МГц.

Поскольку устройства DECT передают пакеты, нежелательные излучения измерялись только во время передачи пакетов с использованием анализатора спектра с внешним запуском. Подробное описание измерительной установки приведено в Приложении 1, пункт 3, установка типа 3.

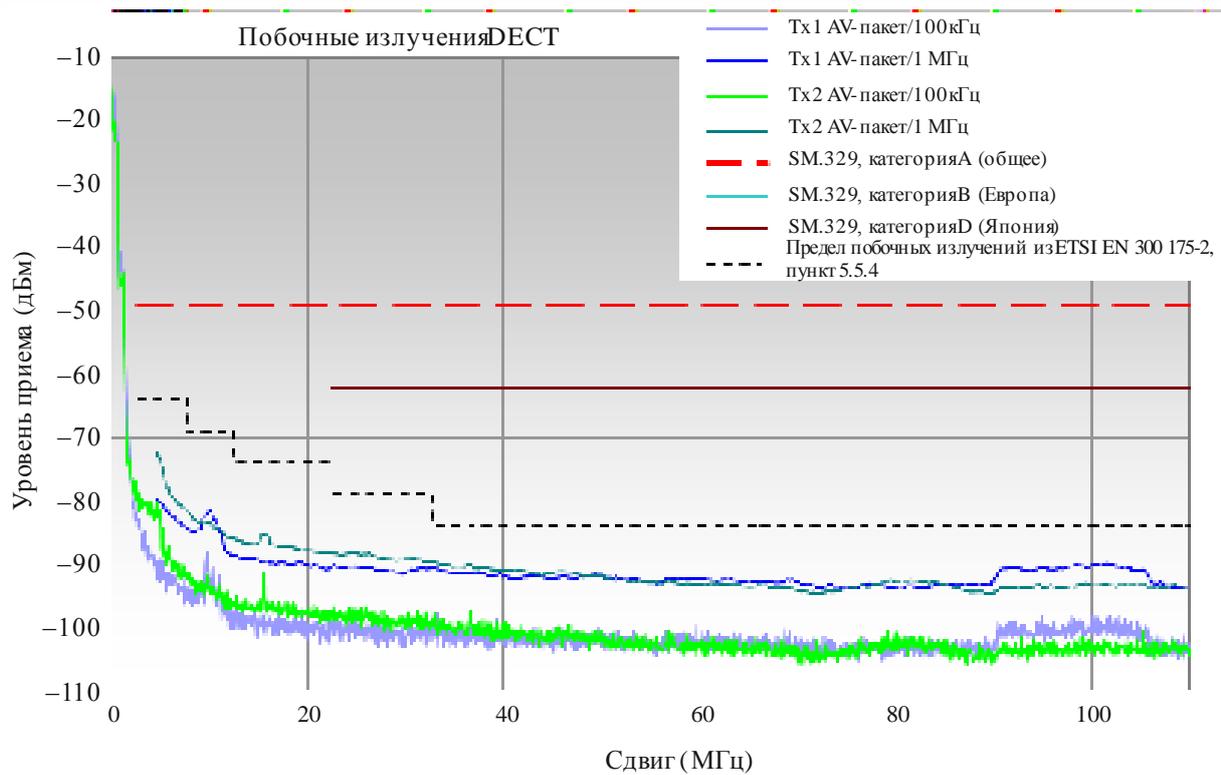
Для интегрирования уровней излучения в эталонную полосу 1 МГц на уровнях, измеренных в полосе частот 100 кГц, применялось скользящее окно. Полученные спектральные линии, показанные темно-синим и темно-зеленым цветом, должны быть сравнены с предельными значениями, приведенными на рисунке 18.

Чтобы сравнить измеренные уровни с пределом из стандарта ETSI EN 300 175-2 v2.6.1, определяемым в виде пикового уровня мощности, при вычислении предельного уровня, представленного на рисунке 18, было использовано уменьшение на 13 дБ³ для учета разницы между средним и пиковым уровнями шумоподобных сигналов.

³ Эта цифра получена эмпирическим путем. Она относится к шумоподобным сигналам, измеренным пиковым и RMS-детектором.

РИСУНОК 18

Побочные излучения DECT (верхний диапазон частот)



Report SM.2421-18

Гармоники измерялись отдельно; результаты приведены в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4

Уровни гармоник базовых станций DECT, на которых проводились измерения

| | Tx1 | | | Tx2 | | |
|------------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|
| | Частота | Уровень/1 МГц | Ослабление | Частота | Уровень/1 МГц | Ослабление |
| Основная частота | 1881,6 МГц | -6,0 дБм | 0,0 дБн | 1890,4 МГц | -8,0 дБм | 0,0 дБн |
| 2-я гармоника | 3763,2 МГц | -80,0 дБм | 74,0 дБн | 3780,8 МГц | -77,0 дБм | 69,0 дБн |
| 3-я гармоника | 5644,8 МГц | -79,0 дБм | 73,0 дБн | 5671,2 МГц | -85,0 дБм | 77,0 дБн |
| 4-я гармоника | 7526,4 МГц | < -88 дБм | > 82 дБн | 7561,6 МГц | < -88 дБм | > 80 дБн |

Выводы по рисункам 17 и 18

- Результаты измерений показывают, что предельные уровни побочных излучений, указанные в Рекомендации МСЭ-R SM.329 и ERC/REC 74-01, соблюдаются с большим запасом. При больших сдвигах уровень побочных излучений обычно на 30 дБ ниже этих предельных значений.
- Как и в случае других цифровых систем, критический сдвиг находится на границе между областями внеполосных и побочных излучений, где Tx1 соблюдает требуемые ограничения категории В с запасом 5 дБ.
- Предельный уровень побочных излучений из ETSI EN 300 175-2 обычно соблюдается с запасом 10 дБ.

- Уровень всех гармонических излучений измеренных устройств значительно ниже предельных уровней побочных излучений.

9 Базовые станции UMTS 2100

В этой системе подвижной сотовой связи 3G используется метод расширения спектра W-CDMA для управления многостанционным доступом. Она широко применяется в Европе и во всем мире как развитие стандарта GSM. Параметры системы UMTS:

| | |
|-----------------------------------|---|
| Диапазон частот | – 2110–2170 МГц (диапазон I линии вниз FDD) |
| Модуляция | – QPSK |
| Ширина полосы | – 5 МГц (канал) |
| Внешний фильтр передатчика | – отсутствует |
| Начало области побочных излучений | – сдвиг на 12,5 МГц (правило 250%) |

Хотя на выходе передатчика дополнительная фильтрация не применялась, предполагается, что для защиты собственной полосы приема базовой станции и, возможно, соседних служб используется некоторая внутренняя фильтрация.

9.1 Внеполосные излучения

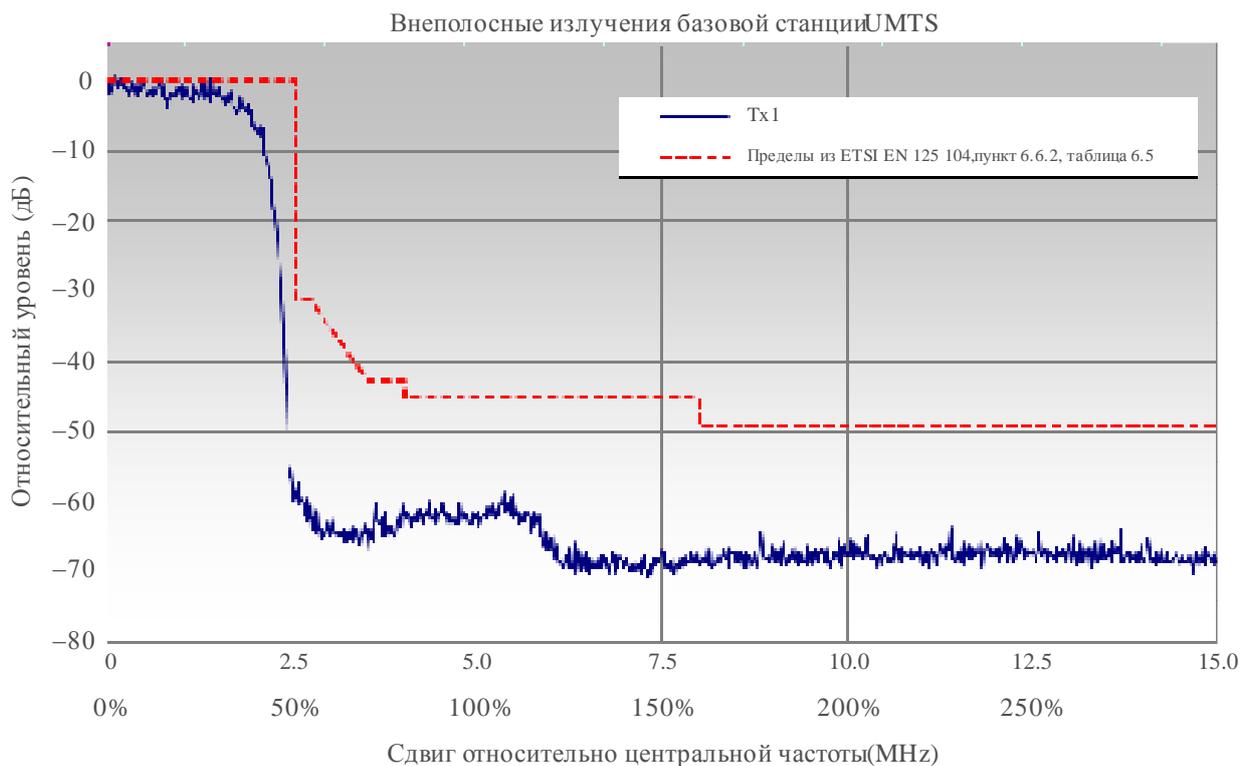
Были проведены следующие измерения внеполосных излучений на выходе передатчика. Соответствующие РЧ-параметры станции, на которой проводились измерения:

| | |
|-------------------------|---|
| Частота передатчика | – 2152 МГц (центральная) |
| Мощность передатчика | – 3 Вт/35 дБм (среднеквадратическое значение на выходе передатчика) |
| Ширина полосы измерения | – 4 кГц |

Измеренный спектр, представленный на рисунке 19, ниже, демонстрирует относительные уровни в децибелах (дБ), приведенные к максимальной спектральной плотности мощности в полосе измерения 4 кГц.

В Рекомендации МСЭ-R SM.1541 не указаны предельные уровни для систем W-CDMA. Поэтому показаны пределы, определенные в ETSI TS 125 104, пункт 6.6.2.1, таблица 6.5. Поскольку они заданы в эталонных полосах частот шириной от 30 кГц до 1 МГц, предел на следующем рисунке получен путем коррекции ширины полосы и приведен к измеренной внутриканальной спектральной плотности мощности.

РИСУНОК 19
Внеполосные излучения базовой станции UMTS



Report SM.2421-19

Выводы по рисунку 19

- Результаты измерений показывают, что предельный уровень, указанный в соответствующем стандарте ETSI TS 125 104, легко соблюдается. Уровень внеполосных излучений по меньшей мере на 15 дБ ниже маски.
- Уже при сдвиге около 125% ширины полосы канала нежелательные излучения, вызванные модуляцией, исчезают в широкополосном шуме усилителя.

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|----------------------|------------|---|---|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с ETSI TS 125 104, пункт 6.6.2.1, таблица 6.5 |
| Базовая станция UMTS | Рисунок 19 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | Уровень внеполосных излучений по меньшей мере на 15 дБ ниже маски. Уже при сдвиге около 125% ширины полосы канала нежелательные излучения, вызванные модуляцией, исчезают в широкополосном шуме усилителя |

9.2 Побочные излучения

В Рекомендации МСЭ-R SM.329 в ограничениях категории В (Европа) для сухопутной подвижной службы (базовые станции), в таблице 6.9 ETSI TS 125 104 и в таблице 2.1 ERC/REC 74-01 указан максимальный уровень побочных излучений –30 дБм/МГц. В пункте 6.6.3 стандарта ETSI [18] определена применимость предела побочных излучений для сдвигов более чем на 12,5 МГц ниже первой несущей частоты, используемой в диапазоне UMTS, или более 12,5 МГц выше последней используемой несущей частоты.

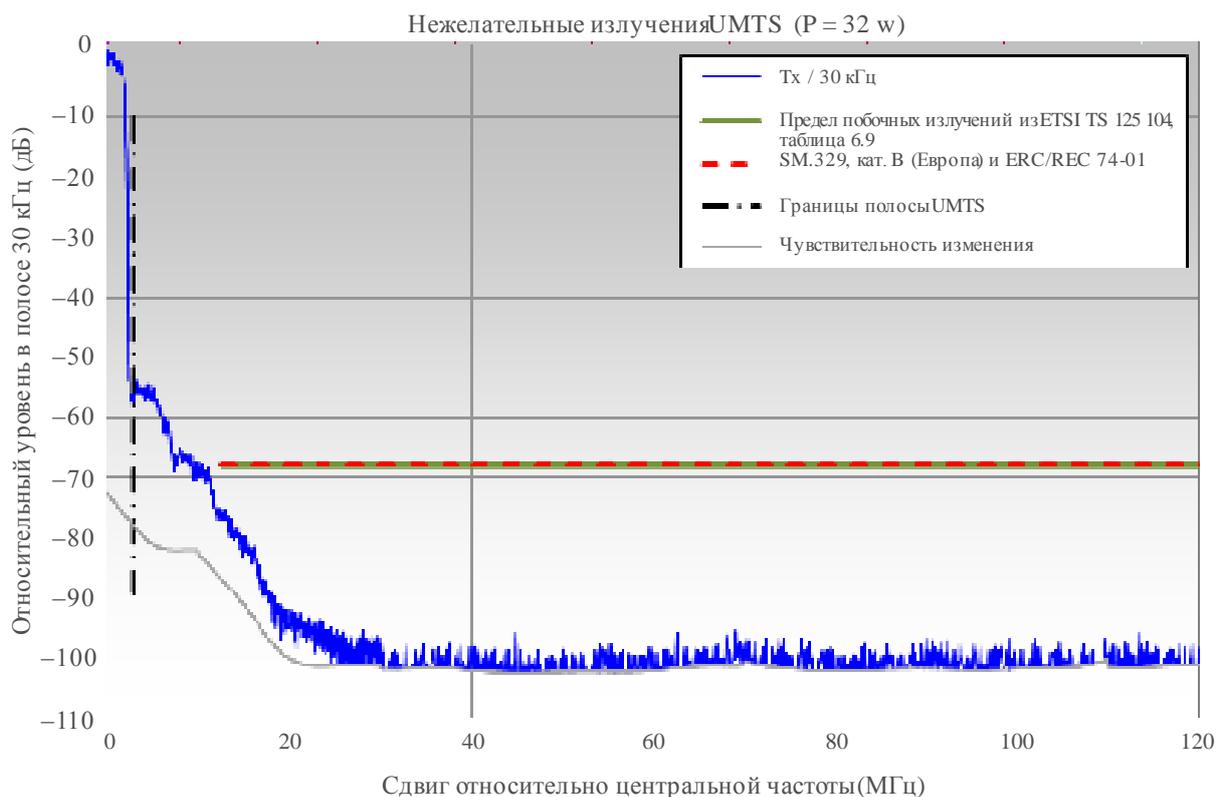
На рисунке 20 показан измеренный уровень излучений базовой станции UMTS, работающей в самом высокочастотном канале диапазона I UMTS. Соответствующие РЧ-параметры:

| | |
|-------------------------|--|
| Частота передатчика | – 2167,2 МГц (центральная частота) |
| Мощность передатчика | – 32 Вт/45,1 дБм (среднеквадратическое значение на выходе передатчика) |
| Ширина полосы | – 5 МГц (канал) |
| Ширина полосы измерения | – 30 кГц |

На рисунке 20 уровни приведены к внутриканальной спектральной плотности мощности в полосе 30 кГц. Предельный уровень -30 дБм определен в полосе 1 МГц. Преобразование в полосу UMTS 5 МГц дает $10 \cdot \log_{10}(5) = 7$ дБ. На рисунке показан предельный уровень после этой коррекции и приведения к внутриканальной спектральной плотности мощности: -30 дБм $- (45,1$ дБм $- 7$ дБ) $= -68$ дБ.

РИСУНОК 20

Побочные излучения базовой станции UMTS



Report SM.2421-20

Выводы по рисунку 20

- Хотя передача осуществляется по самому высокочастотному каналу и, таким образом, соответствует наиболее сложному случаю с точки зрения соблюдения предельных уровней побочных излучений, результат измерения станции оказался ниже этих уровней примерно на 10 дБ даже в самом начале области побочных излучений.
- Для сдвигов более чем на 20 МГц результат измерения ниже предельных уровней минимум на 30 дБ. Фактический уровень побочных излучений для этих сдвигов еще ниже, чем показано. Ограничение вызвано чувствительностью измерения.

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|----------------------|------------|---|-----------------|--------|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с ЕТСИ |
| Базовая станция UMTS | Рисунок 20 | <p>Хотя передача осуществляется по самому высокочастотному каналу и, таким образом, соответствует наиболее сложному случаю с точки зрения соблюдения предельных уровней побочных излучений, результат измерения станции оказался ниже этих уровней примерно на 10 дБ даже в самом начале области побочных излучений.</p> <p>Для сдвигов более чем на 20 МГц результат измерения ниже предельных уровней минимум на 30 дБ. Фактический уровень побочных излучений для этих сдвигов еще ниже, чем показано. Ограничение вызвано чувствительностью измерения</p> | | |

10 Устройства RLAN, работающие в диапазоне 2,4 ГГц

Устройства RLAN или WLAN широко используются во всем мире. Данная служба соответствует стандарту IEEE 802.11 [28]. В зависимости от варианта этого стандарта используется частота в диапазоне около 2,4 ГГц или 5,6 ГГц. Параметры:

| | |
|-------------------------------------|--|
| Модуляция | – QPSK или OFDM |
| Максимальная излучаемая мощность | – 100 мВт = 20 дБм (средний пакет) |
| Ширина полосы | – около 16 МГц |
| Конец области внеполосных излучений | – сдвиг на 40 МГц (правило 250%). |
| Длительность пакета | – переменная, в зависимости от трафика, например 100 мкс |
| Период повторения пакета | – переменный, в зависимости от трафика, например 100 мс |

10.1 Внеполосные излучения

Измерения проводились на трех разных устройствах WLAN:

Tx1 – точка доступа RLAN, работающая в режиме 802.11g (OFDM), измерение излучения;

Tx2 – маршрутизатор RLAN, работающий в режиме 802.11b (DSSS), измерение на выходе Tx;

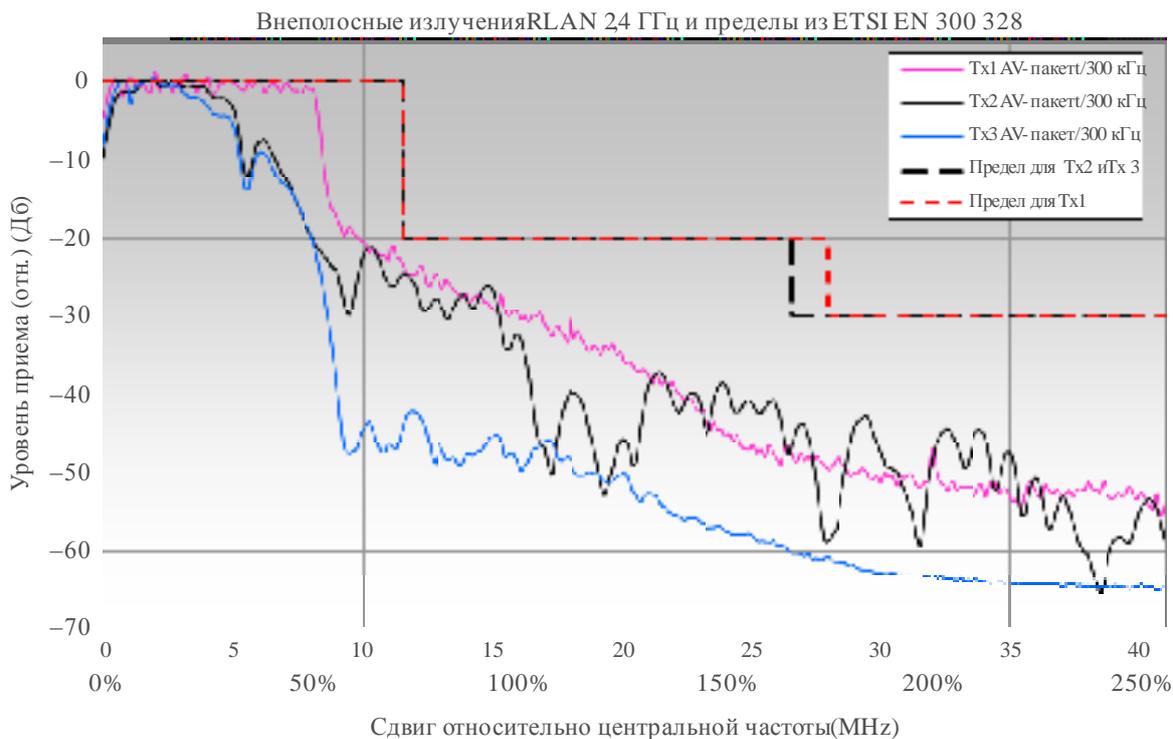
Tx3 – смартфон с поддержкой RLAN, работающий в режиме 802.11b (DSSS), измерение излучения.

Поскольку Рекомендация МСЭ-R SM.1541 не содержит Приложения, в котором указываются предельные уровни внеполосных излучений для SRD, в качестве эталона была взята маска из применимого стандарта ETSI EN 300 328 V1.9.1 [19], пункт 4.3.2.8.3. Определение пределов внеполосных излучений вне распределенной полосы зависит от ширины занимаемой полосы (OBW), которая составляла 16,5 МГц для Tx1 и 15 МГц для Tx2 и Tx3. Во время измерения все три передатчика работали в самом высокочастотном канале диапазона с центральной частотой 2472 МГц. От границы полосы (2480 МГц) и точки 2480 + OBW предел составляет –10 дБм/МГц, а между точками 2480 + OBW и 2480 + 2*OBW он составляет –20 дБм/МГц (см. иллюстрацию этого явления на рисунке 21).

Уровни, обозначенные на рисунке 21, показывают относительные значения в децибелах (дБ) и нормированы так, что 0 дБ соответствует максимальной внутриканальной спектральной плотности мощности в полосе измерения 300 кГц. Пределы также приведены к ширине полосы 300 кГц, чтобы обеспечить прямое сравнение.

РИСУНОК 21

Внеполосные излучения RLAN



Report SM.2421-21

Выводы по рисунку 21

- Все три измеренных устройства соответствуют предельным уровням внеполосных излучений из стандарта ETSI EN 300 328. При сдвиге на 250% уровень внеполосных излучений обычно более чем на 20 дБ ниже предельного.

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|---------|------------|---|---|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с ETSI EN 300 328 |
| RLAN | Рисунок 21 | Информация по предельным уровням внеполосных излучений для такого рода применений в этой Рекомендации отсутствует | При сдвиге на 250% уровень внеполосных излучений обычно более чем на 20 дБ ниже предельного |

10.2 Побочные излучения

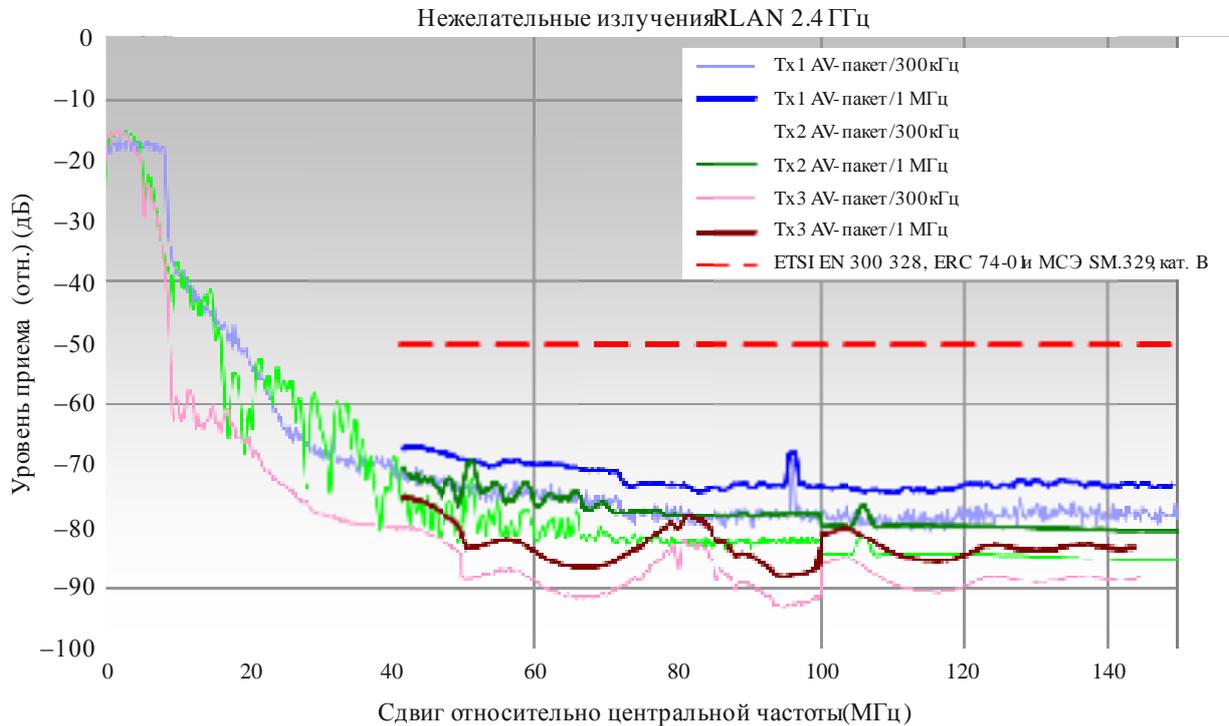
Для систем RLAN в ERC/REC 74-01 (таблица 2.1, справочный номер 2.1.2) и в Рекомендации МСЭ-R SM.329 для Европы (ограничения категории В) указан предельный уровень побочных излучений –30 дБм в полосе 1 МГц.

В ETSI EN 300 328, пункт 4.3.1.10.3, таблица 1, определен уровень побочных излучений для передатчиков широкополосных излучений –30 дБм в полосе 1 МГц в диапазоне частот 1–12,75 ГГц.

Измерения проводились на тех же трех устройствах RLAN, что и измерения внеполосных излучений, представленные на рисунке 21, с полосой измерения 300 кГц. В целях прямого сравнения с установленными пределами применялось скользящее окно интегрирования шириной 1 МГц для преобразования измеренных значений в значения в эталонной полосе 1 МГц. Поскольку рисунок 22 приведен к общей внутриканальной мощности 20 дБм, предел –30 дБм из Рекомендации МСЭ-R SM.329 и ETSI EN 300 328 соответствует относительному уровню –50 дБ.

Уровни, показанные на графике, можно прямо преобразовать в уровни излучения в полосе 1 МГц, добавив 20 дБ.

РИСУНОК 22
Побочные излучения RLAN



Report SM.2421-22

Выводы

- Соблюдаются более строгие пределы, указанные в Рекомендации МСЭ-R SM.329, как правило, с запасом 20–30 дБ.

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|---------|------------|---|-----------------|--------|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с ЕТСИ |
| RLAN | Рисунок 22 | Пределы соблюдаются с типичным запасом от 20 до 30 дБ | | |

11 Оборудование пользователя WiMAX 3,6 ГГц

WiMAX – это система широкополосного беспроводного доступа. Соответствующая полоса WiMAX имеет следующие РЧ-характеристики:

- Диапазон частот – 3600–3800 МГц
- Модуляция – OFDM
- Ширина полосы – 10 МГц (канал)

11.1 Побочные излучения

Предельный уровень побочных излучений для UE/BS в сухопутной подвижной службе в соответствии с таблицей 2.1 ERC/REC 74-01 составляет –30 дБм/МГц. Тот же предельный уровень

определен и в Рекомендации МСЭ-R SM.329 для частот выше 1 ГГц. В пункте 4.2.4 стандарта EN 301 908-21 определены предельные уровни побочных излучений передатчика для оборудования пользователя OFDMA TDD WMAN (система подвижной связи WiMAX) в режиме FDD.

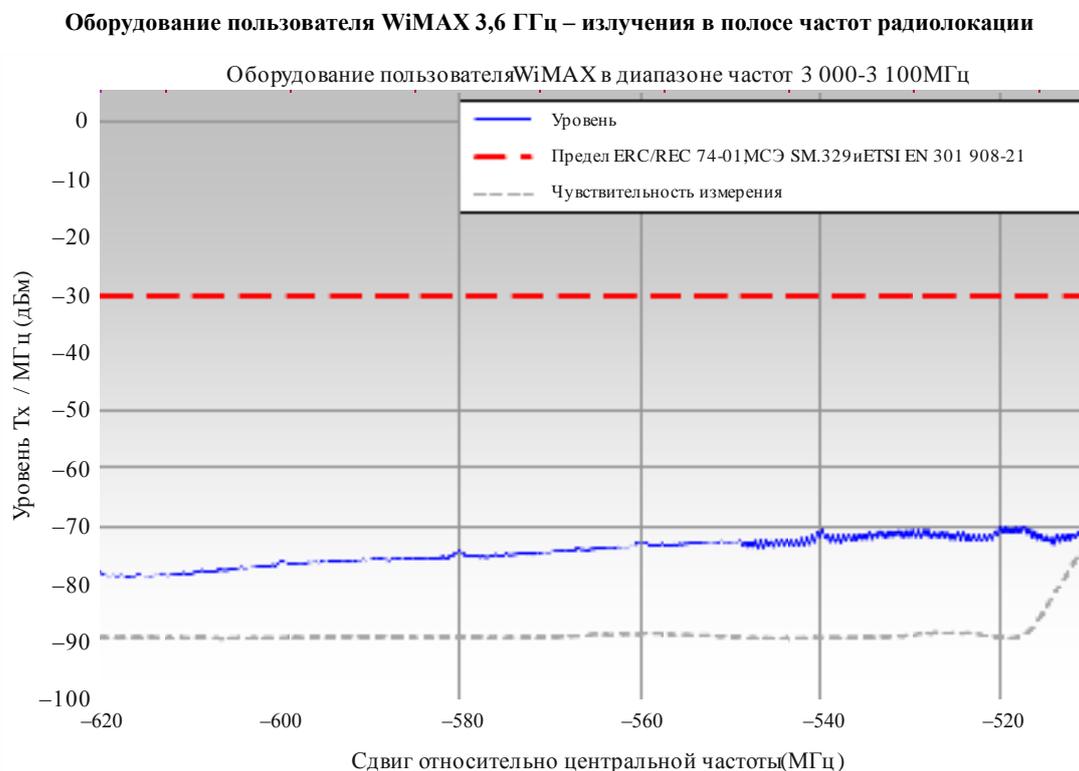
На рисунке 23 показан результат измерения кондуктивным способом непосредственно на выходе передатчика побочных излучений промышленной серии терминалов WiMAX в соседней полосе радиолокации. Для измерения использовались следующие РЧ-параметры:

| | |
|-----------------------------------|---|
| Частота передатчика | – 3620 МГц (самый низкий доступный для использования канал линии вверх) |
| Мощность передатчика | – 27 дБм/500 мВт (на выходе передатчика) |
| Внешний фильтр передатчика | – отсутствует |
| Начало области побочных излучений | – сдвиг на 25 МГц (правило 250%) |
| Ширина полосы измерения | – 1 МГц |

Хотя на выходе передатчика дополнительная фильтрация не применялась, предполагается, что для защиты собственной полосы приема на линии вниз и соседних служб используется некоторая внутренняя фильтрация.

Поскольку эталонная ширина полосы равна ширине полосы измерения, преобразование не требуется.

РИСУНОК 23



Report SM.2421-23

Выводы по рисунку 23

- Хотя измерение охватывает лишь небольшой диапазон частот с очень большим сдвигом, видно, что пределы соблюдаются с запасом по меньшей мере 40 дБ.
- Даже при очень больших сдвигах частоты уровень побочных излучений зависит от частоты и имеет тенденцию к снижению с ростом сдвига.

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|---|------------|--|-----------------|--------|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с ЕТСИ |
| Оборудование пользователя WiMax 3,6 ГГц | Рисунок 23 | Хотя измерение охватывает лишь небольшой диапазон частот с очень большим сдвигом, видно, что пределы соблюдаются с запасом по меньшей мере 40 дБ | | |

12 Линия связи пункта с пунктом 25 ГГц

Эти системы связи пункта с пунктом обычно используются для соединения базовых станций службы подвижной связи общего пользования (GSM, UMTS, LTE и т. п.). В зависимости от требуемой скорости передачи данных присваиваются полосы частот шириной до 50 МГц. Общие характеристики этого оборудования:

| | |
|----------------------|--|
| Диапазон частот | – 25,1–26,5 ГГц |
| Модуляция | – QPSK или QAM |
| Ширина полосы | – 3,5–50 МГц (канал) |
| Мощность передатчика | – –10 дБм – 24 дБм (на выходе передатчика) |

Хотя внешние фильтры не применяются, предполагается, что собственный приемник защищен от сигнала противоположной станции внутренней фильтрацией.

12.1 Внеполосные излучения

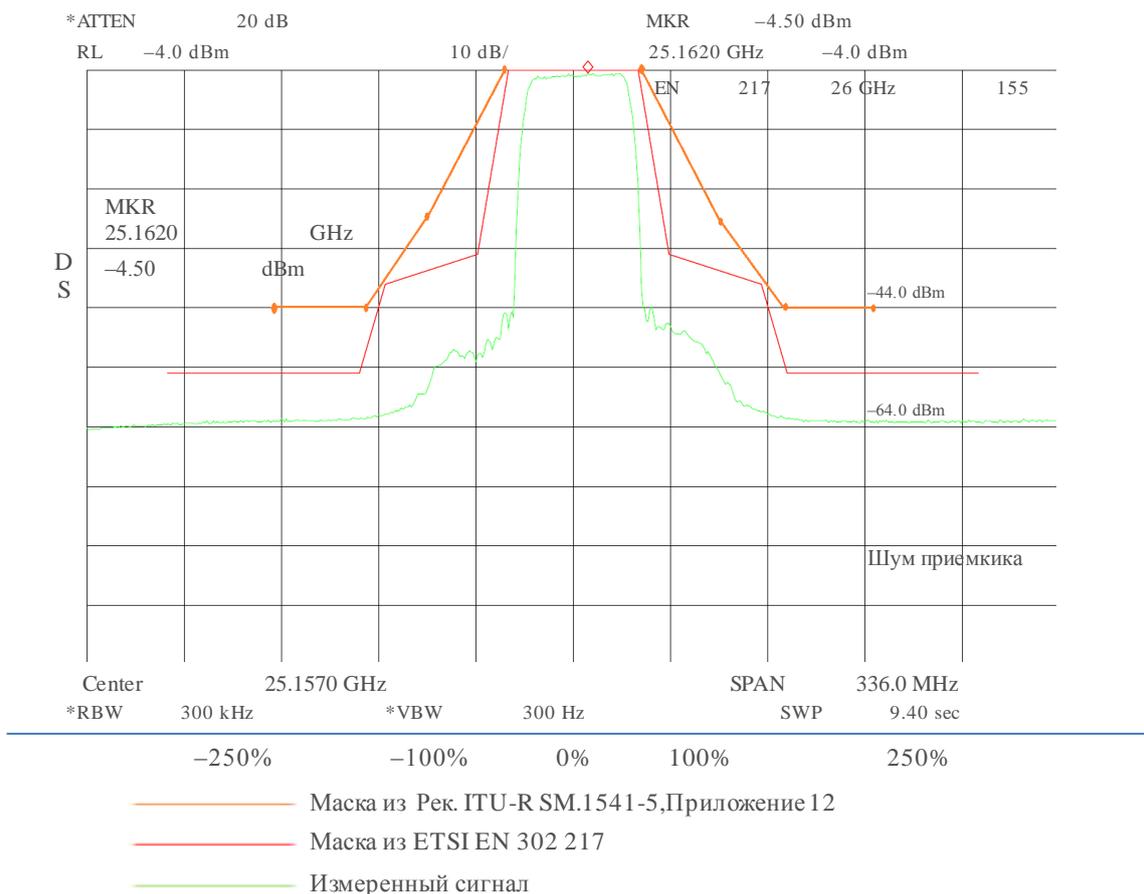
На рисунке 24 показаны результаты измерения кондуктивным способом нежелательных излучений устройства связи пункта с пунктом 25 ГГц. Соответствующие РЧ-параметры:

| | |
|----------------------------|----------------------------------|
| Центральная частота | – 25,157 ГГц |
| Модуляция | – 64QAM |
| Ширина полосы | – 40 МГц (канал) |
| Мощность передатчика | – 17 дБм (на выходе передатчика) |
| Внешний фильтр передатчика | – отсутствует |
| Ширина полосы измерения | – 300 кГц |

На рисунке 24 уровни приведены к максимальной внутриканальной спектральной плотности мощности в полосе 300 кГц. Общие предельные уровни внеполосных излучений для ФС взяты из Приложения 12 Рекомендации МСЭ-R SM.1541-5, а конкретные предельные уровни для этой системы – из ETSI EN 302 217-2-2, пункт 4.2.4.2.1, и преобразованы в относительные уровни в полосе 300 кГц.

РИСУНОК 24

Нежелательные излучения линии связи пункта с пунктом 25 ГГц



Report SM.2421-24

Измерения при сдвигах более чем на ± 75 МГц ограничены чувствительностью приемника. Фактически нежелательные излучения в этих диапазонах сдвигов даже выше, чем показано.

Выводы по рисунку 24

- Общие пределы внеполосных излучений, называемые пределами безопасной работы, для ФС из Приложения 12 к Рекомендации МСЭ-R SM.1541 соблюдаются с запасом около 20 дБ.
- Конкретный предельный уровень, указанный в ETSI EN 302 217-2-2, пункт 4.2.4.2.1, соблюдается с запасом не менее 10 дБ.

Что касается характеристик и уровней внеполосных излучений, то эти дополнительные измерения демонстрируют ту же тенденцию, что и результаты, представленные на рисунке 24.

| Система | Рисунок | Сравнение | |
|---------------------------|------------|---|--|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.1541 | с ETSI EN 302 217-2-2, пункт 4.2.4.2.1 |
| Линия прямой связи 25 ГГц | Рисунок 24 | Общие пределы внеполосных излучений, называемые пределами безопасной работы, для ФС из Приложения 12 к Рекомендации МСЭ-R SM.1541 соблюдаются с запасом около 20 дБ | Конкретный предельный уровень соблюдается с запасом не менее 10 дБ |

12.2 Побочные излучения

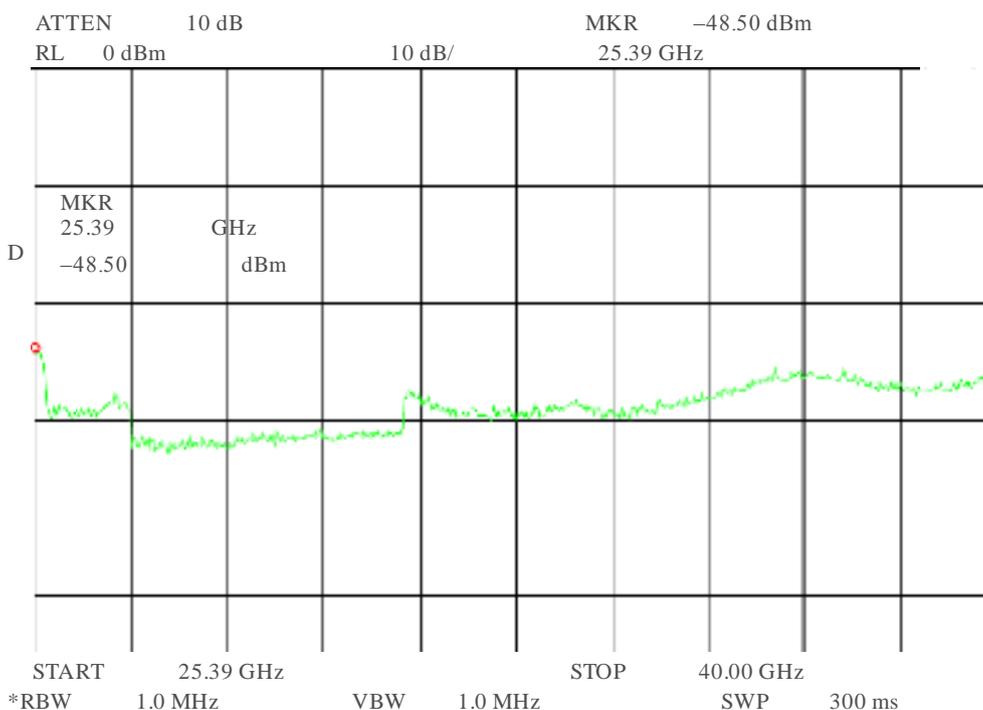
Предельный уровень побочных излучений, указанный в ERC/REC 74-01 и Рекомендации МСЭ-R SM.329 (ограничения категории В/Европа), составляет -30 дБм/МГц.

Соответствующий стандарт ETSI EN 301 390 также ссылается в своем пункте 4.1.1 на предельные уровни побочных излучений, указанных в ERC/REC 74-01.

Были проведены измерения побочных излучений ряда устройств связи пункта с пунктом, работающих в диапазоне 25 ГГц с различной шириной полосы частот. На следующем рисунке показан типичный пример побочных излучений в начале наиболее критичного диапазона побочных излучений до 40 ГГц. Представлено то же устройство, что и для области внеполосных излучений (см. выше). Полоса измерения составляла 1 МГц. Эталонный уровень 0 дБ – это внутриканальная спектральная плотность мощности в полосе 1 МГц.

РИСУНОК 25

Побочные излучения линии связи пункта с пунктом 25 ГГц



Report.SM.2421-25

Выводы по рисунку 25

- Предельный уровень побочных излучений соблюдается с запасом более 20 дБ.

| Система | Рисунок | Сравнение | | |
|-------------------------------------|------------|---|-----------------|--------|
| | | с Рек. МСЭ-R SM.329 | с ERC/REC 74-01 | с ЕТСИ |
| Линии связи пункта с пунктом 25 ГГц | Рисунок 25 | Предельный уровень побочных излучений соблюдается с запасом более 20 дБ | | |

Измерения побочных излучений, проведенные на том же оборудовании в других частотных диапазонах (например, 28 ГГц, 32 ГГц, 38 ГГц в диапазоне измерений от 25,157 ГГц до 40 ГГц), дополнительно показали, что при бóльших сдвигах частоты уровни излучения еще ниже физически ожидаемых.

Что касается характеристик и уровней внеполосных излучений, то эти дополнительные измерения демонстрируют ту же тенденцию, что и результаты, представленные на рисунке 25.

13 Системы с фильтрацией и без фильтрации

Национальные и международные органы по управлению использованием частот при распределении полосы частот конкретной службе нередко требуют высокого подавления нежелательных излучений во избежание создания вредных помех соседним радиослужбам. В большинстве случаев эти требования могут быть выполнены, только если до или после выходного каскада передатчика применяется какая-либо дополнительная физическая фильтрация. В случае наличия таких фильтров уровень нежелательных излучений в области побочных излучений сильно зависит от частоты. Кроме того, их абсолютный уровень часто бывает настолько низким, что он не поддается измерению. В этом случае побочные излучения не могут создавать вредных помех другим службам радиосвязи, так что в исследованиях совместимости/совместного использования частот ими можно пренебречь.

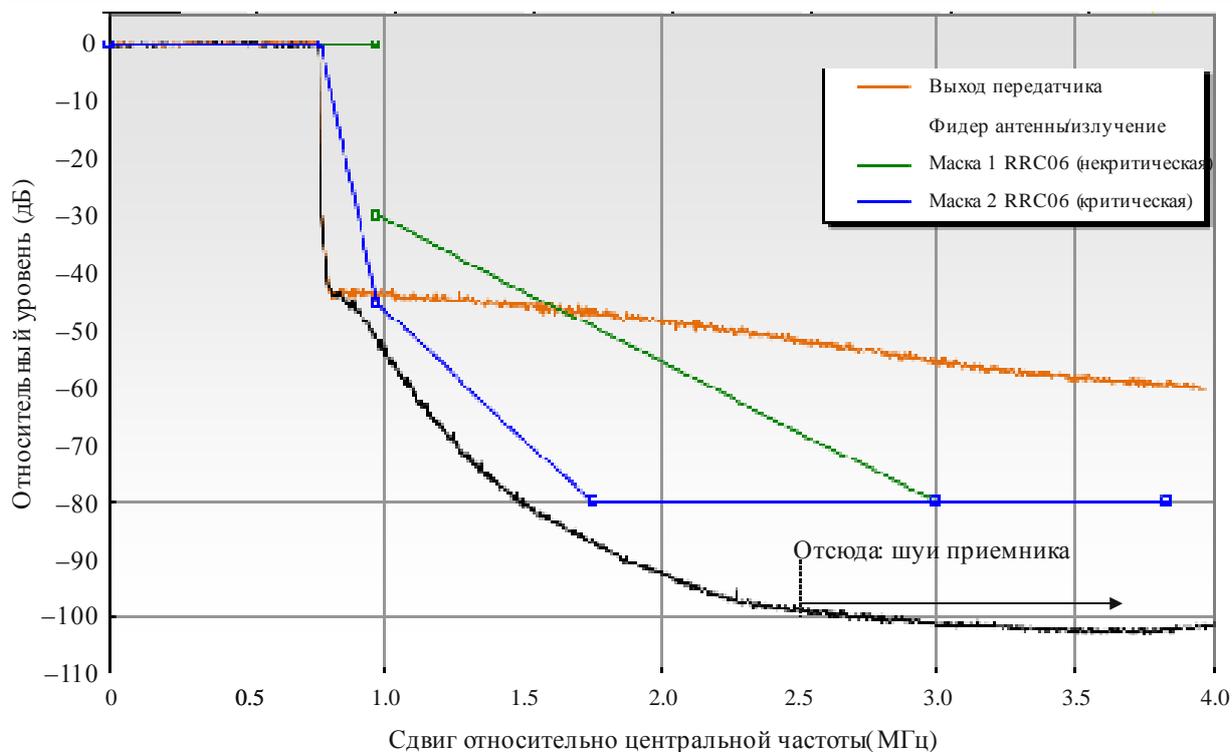
Примерами систем, в которых на выходе передатчика всегда применяются фильтры, могут служить системы DAB, базовые станции LTE и DVB-T.

13.1 DAB

На рисунке 26 показаны результаты измерения нежелательных излучений передатчика DAB непосредственно на выходе этого передатчика и после дополнительного фильтра на фидере антенны.

РИСУНОК 26

Нежелательные излучения DAB в области внеполосных излучений



Выводы по рисунку 26

- Нефильтрованный спектр не соответствует маске 1 GE-06 (некритической) и маске 2 GE-06 (критической), являющимся масками внеполосных излучений, которые должны соблюдаться в Европе.
- В фильтрованном спектре нежелательные излучения значительно подавлены даже в области внеполосных излучений.
- Нежелательные излучения в области побочных излучений не поддаются измерению и на самом деле даже ниже уровня шума, показанного на рисунке 26.

13.2 Базовая станция LTE800

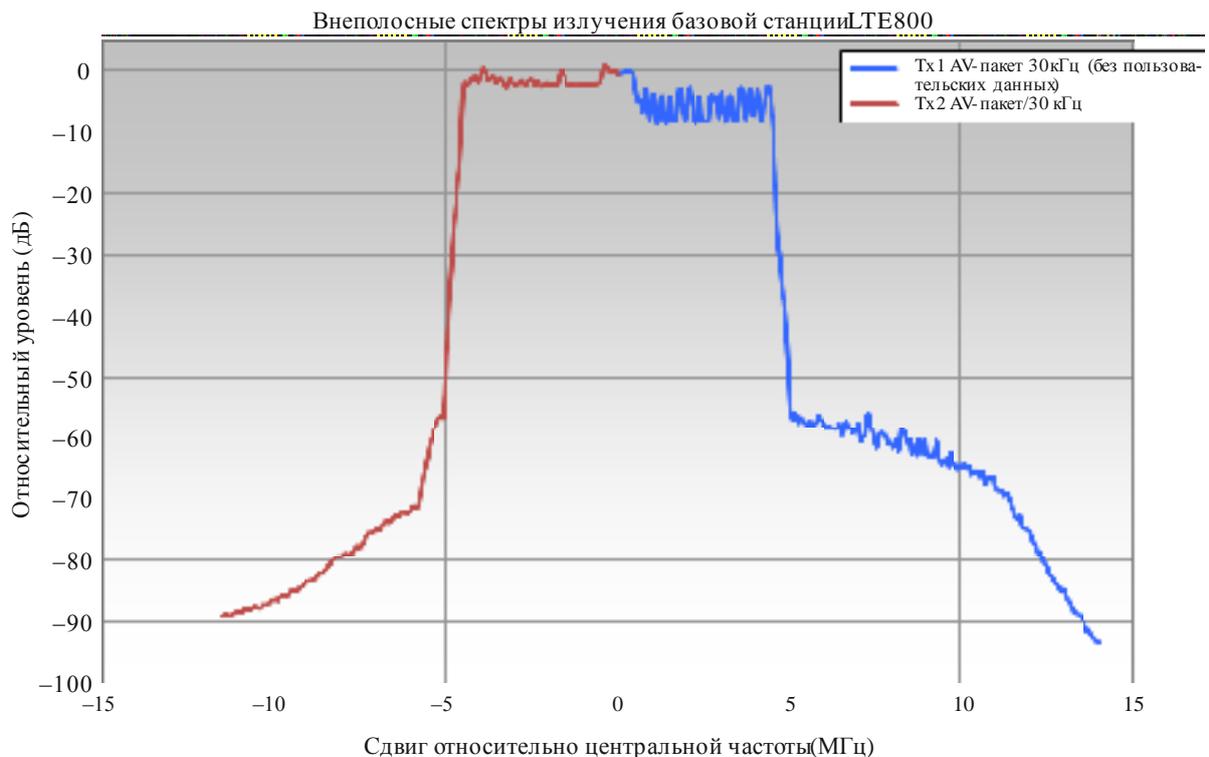
Требования по подавлению излучений в соседних полосах могут привести к "асимметричным" внеполосным излучениям, поскольку фильтры необходимо применять для подавления излучений только в нижней или верхней соседней полосе частот.

На рисунке 27 показаны внеполосные излучения двух различных базовых станций LTE800, работающих в самом низкочастотном канале LTE (796 МГц). Верхняя половина графика отражает излучение передатчика в режиме ожидания (Tx1), поэтому внутриполосная мощность поднесущих ниже, чем у Tx2.

На рисунке видно, что внутриполосные излучения вблизи желаемого канала намного ниже в нижней боковой полосе, потому что для защиты непосредственно прилегающей полосы DVB-T должен применяться фильтр с крутой характеристикой.

РИСУНОК 27

Асимметричные спектры внеполосных излучений базовой станции LTE800



Report SM.2421-27

14 Излучения в импульсных цифровых системах при переходных процессах

Многие системы TDMA создают так называемые переходные нежелательные излучения. Эти излучения имеют место в течение лишь очень короткого периода времени при включении

и выключении передатчика в начале и в конце каждого пакета. Тот же эффект возникает в некоторых системах OFDM при смене передаваемых символов. Внутреннее устройство некоторых систем TDMA также приводит к тому, что окончательный каскад передатчика (усилитель мощности) оказывается постоянно включенным, а пакеты, включая время включения и выключения, генерируются DSP в полосе групповых частот.

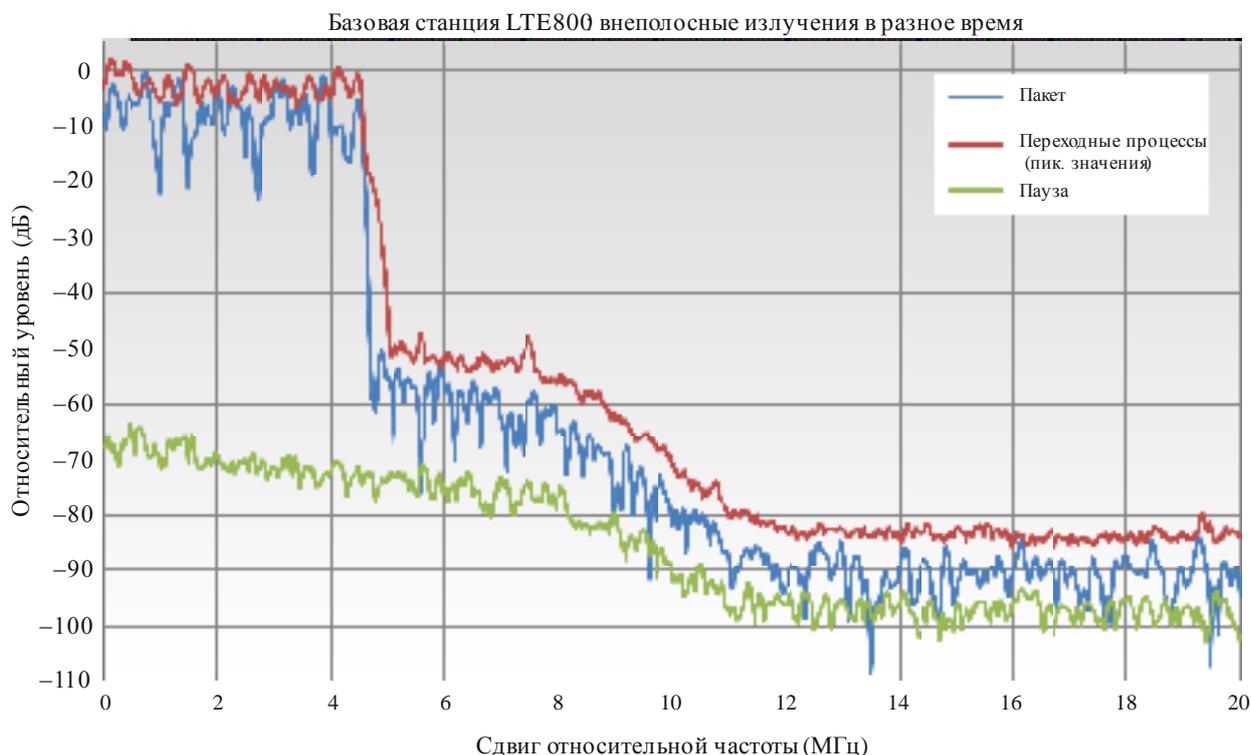
В результате возникают нежелательные излучения трех видов:

- широкополосный шум усилителя, который присутствует постоянно;
- зависимые от модуляции побочные излучения, присутствующее только во время передачи пакета;
- переходные излучения, присутствующие только во время изменения мощности или смены символов.

На рисунке 28 показаны внеполосные излучения, записанные во время передачи базовой станцией LTE800 кадра длительностью 10 мс на всех вышеперечисленных этапах.

РИСУНОК 28

Базовая станция LTE800: внеполосные излучения в разное время



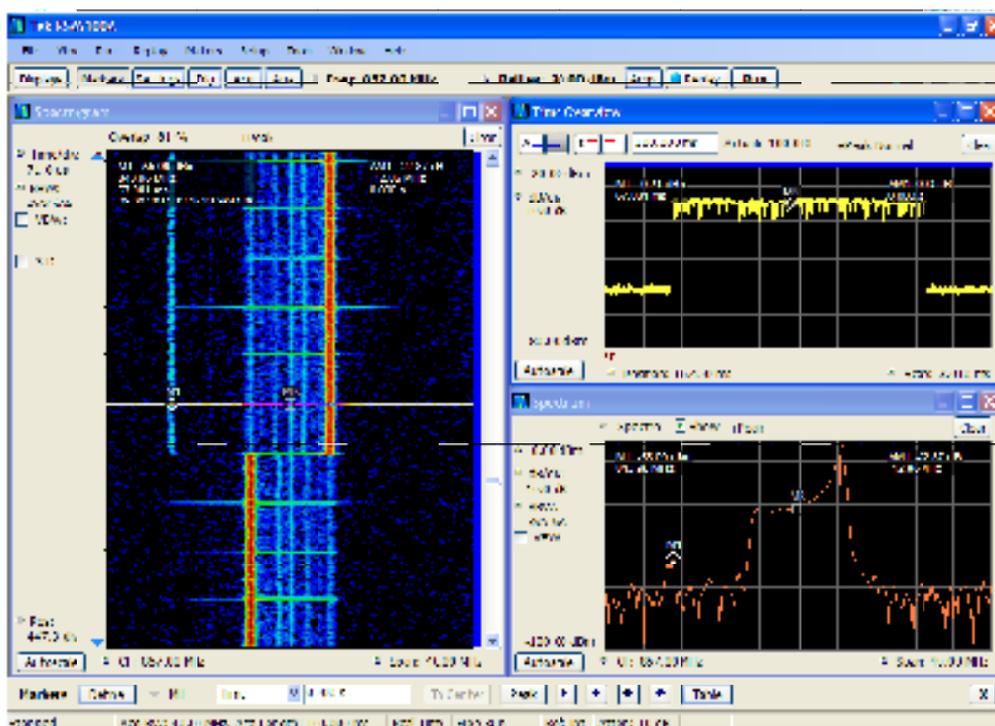
Report SM.2421-28

Этот пример дает повод для обсуждения вопроса о том, достаточно ли одного предела для реалистичного представления возможных помех со стороны импульсной цифровой системы, особенно в области внеполосных излучений.

На рисунке 29 показана работа оборудования пользователя LTE800 с высоким временным разрешением. Выделяется только один ресурсный блок, так что используемая ширина полосы составляет всего 180 кГц. Однако передаваемый символ и модуляция всех используемых поднесущих изменяются каждые 71 мкс.

РИСУНОК 29

Спектр, зависимость мощности от времени и мгновенный спектр в момент времени, обозначенный линией (с точками M1 и MR), на спектрограмме случайно выбранного оборудования пользователя LTE800 с высоким временным разрешением



Report SM.2421-29

Выводы по рисунку 29

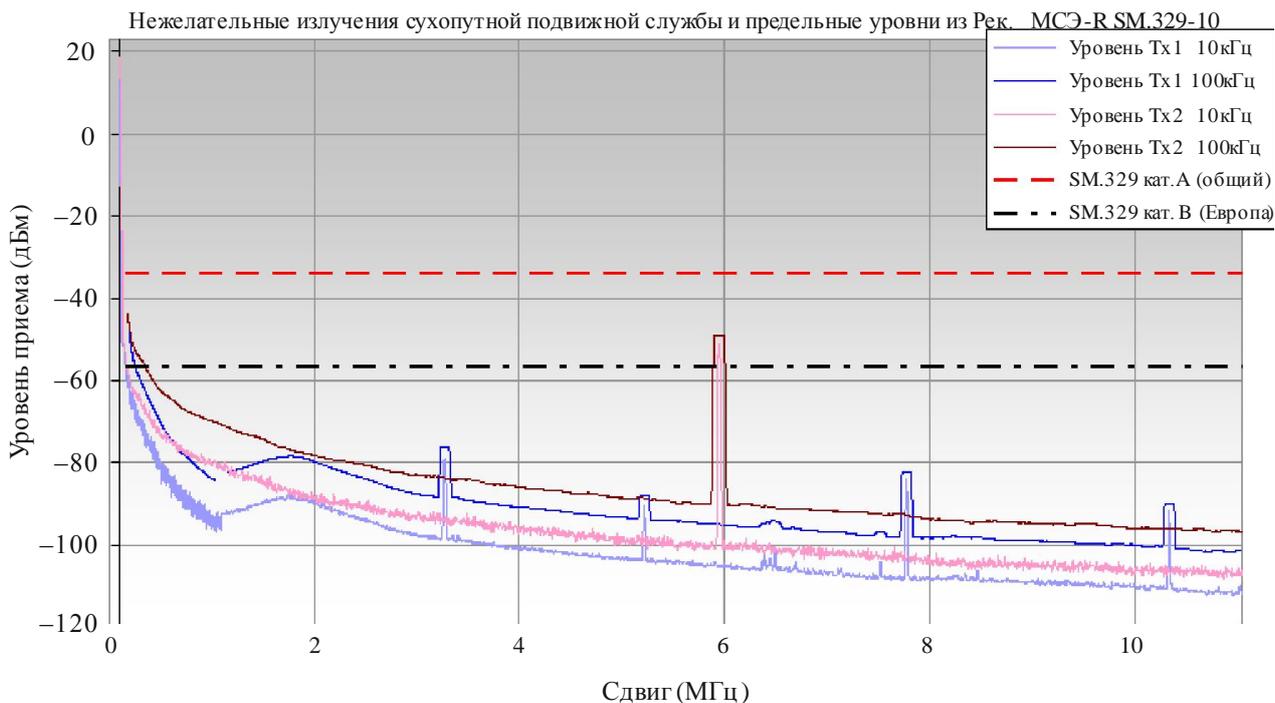
- В момент смены символов (одна смена символа отмечена красным кругом) уровень внеполосных излучений значительно возрастает.
- При измерении пиковых уровней внеполосных излучений результирующий спектр боковой полосы выглядит как в момент смены символа. Однако, как видно из спектрограммы, эти излучения наихудшего случая имеют место лишь в течение очень короткого периода времени (переходных процессов) и, возможно, имеют не такой потенциал помех, как в том случае, если бы они присутствовали непрерывно.

15 Узкополосные и широкополосные нежелательные излучения

Все выходные каскады усилителей передатчиков всегда создают определенный шум, который можно рассматривать как широкополосные нежелательные излучения в области как внеполосных, так и побочных излучений. Кроме того, аналоговые передатчики часто создают узкополосные излучения на отдельных конкретных частотах в области побочных излучений, которые обусловлены генерацией РЧ различными каскадами смесителя и промежуточной частоты внутри передатчика. Эти пики часто имеют значительно более высокие уровни, чем широкополосный шум. На рисунке 30 показан типичный пример с двумя разными передатчиками PMR.

РИСУНОК 30

Побочные излучения двух разных PMR-передатчиков сухопутной подвижной службы
(верхний частотный диапазон)



Report SM.2421-30

Эти пики могут быть вызваны только одиночными немодулированными несущими. При измерении с разной шириной полосы их уровень не меняется. Поэтому уровни нежелательных излучений, измеренные в узкой полосе, нельзя легко преобразовать в уровни в эталонной полосе 100 кГц. На рисунке 30 спектры нежелательных излучений, измеренные в полосе 10 кГц (светло-голубая и малиновая линии), пришлось преобразовывать в эталонную полосу 100 кГц путем применения скользящего окна интеграции (темно-синяя и коричневая линии).

На рисунке видно, что это преобразование повышает уровни широкополосного шума примерно на 10 дБ, тогда как уровень пиков остается почти неизменным.

Современные передатчики цифровых систем генерируют цифровым способом РЧ-сигналы в так называемой полосе групповых частот. После цифро-аналогового преобразования (ЦАП) два компонента полосы групповых частот сдвигаются в диапазон радиочастот с применением квадратурной (I/Q) модуляции. В результате явные пики в области побочных излучений отсутствуют. Все измерения, представленные в настоящем документе, показывают, что побочные излучения носят исключительно широкополосный характер. Это основная причина того, что уровни побочных излучений цифровых систем, на которых проводились измерения, часто намного ниже предельных уровней, указанных в Рекомендации МСЭ-R SM.329 и ERC/REC 74-01, которые ориентированы на пики, характерные для аналоговых систем. Одно из преимуществ такого поведения заключается в том, что побочные излучения цифровых систем обычно можно преобразовать в другие полосы частот с помощью постоянного коэффициента коррекции $10 \cdot \log_{10}(BW1/BW2)$.