

Международный союз электросвязи

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Отчет МСЭ-R SM.2269
(06/2013)

**Методики соотнесения излучения,
создаваемого установками электросвязи
по линиям электропередачи, с выходной
мощностью модема электросвязи
по линиям электропередачи**

Серия SM
Управление использованием спектра



Международный
союз
электросвязи

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 Приложении 1 к 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	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая 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 службой
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, 2014 г.

© ITU 2014

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.2269

Методики соотнесения излучения, создаваемого установками электросвязи по линиям электропередачи, с выходной мощностью модема электросвязи по линиям электропередачи

(Вопрос МСЭ-R 221-1/1)

(2013)

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
1 Введение	1
2 Методика оценки переходного затухания	2
3 Методика точечного источника излучения	9
4 Экспериментальное определение РЧ-токов, циркулирующих по проводам сети электропитания, характеристик РЧ-помех и эквивалентных характеристик антенны установки PLT внутри здания	16

1 Введение

Одной из важнейших составляющих исследований воздействия электросвязи по линиям электропередачи (PLT) на частотах выше 80 МГц является разработка средств, позволяющих оценить количество излучаемой РЧ-энергии, которая подается в провода сети электропитания модемами PLT. Такие средства обеспечат основу для:

- оценки соблюдения ограничений, налагаемых условиями электромагнитной совместимости (ЭМС) на создаваемые излучения;
- определения итогового увеличения минимального уровня шума; и
- оценки возможности причинения помех службам радиосвязи.

Если окажется возможным соотнести излучения, создаваемые установками PLT, с непосредственно измеряемыми величинами спектральной плотности мощности и суммарной выходной мощности модема PLT, это упростит задачу предоставления руководящих указаний по развертыванию PLT посредством Рекомендаций МСЭ-R и МСЭ-T. В семействе Рекомендаций МСЭ-T G.9960 содержится комплект материалов, которые позволяют национальным регуляторным органам адаптировать маску спектральной плотности мощности (PSD) и суммарную выходную мощность к условиям местных рынков. Не хватает только средства соотнесения ограничений на неприемлемые уровни радиочастотного шума и радиочастотных помех службам радиосвязи с подаваемой модемами PLT мощностью и спектральной плотностью мощности.

Для того чтобы использовать уровень PSD в качестве эталонного для оценки и контроля излучений, создаваемых установками PLT, требуются некоторые средства определения характерных переходных затуханий в типовых установках PLT. Далее, это позволило бы напрямую увязать величину излучения радиоволн, создаваемого типовыми установками PLT, с PSD и суммарной выходной мощностью модема.

В Отчет МСЭ-R SM.2158 вошли несколько исследований, в которых показаны методы и меры, используемые при выполнении измерений воздействия излучения, создаваемого системами PLT, на радиовещательные системы, действующие на частотах ниже 80 МГц. Ниже приведены исследования, содержащиеся в дополнениях к Отчету МСЭ-R SM.2158, в которых измеряется излучение PLT в диапазонах ВЧ:

- В Исследовании А3.1 (Бразилия) сообщается об измерениях электрического поля, излучаемого системами PLT одиночного доступа. В исследовании делается вывод, что напряженность поля помехи в месте приема не должна превышать 16 дБ(мкВ/м), что может быть ниже уровня фонового шума окружающей среды, а не измеренные 60 дБ(мкВ/м).
- В Исследовании А3.2 (NABA/CRC) сообщается об измерениях электрического поля, излучаемого системами PLT внутри зданий, и показывается, что уровень принимаемых сигналов PLT составляет приблизительно 50–60 дБ(мкВ/м) на расстоянии 3–10 м.
- В Исследовании А3.5.3 (IUCAF) сообщается об измерениях электрического поля, излучаемого системами PLT, в отдельно стоящем доме и показывается, что уровень принимаемых сигналов PLT составляет приблизительно 50 дБ(мкВ/м) на расстоянии 10 м.

В настоящем Отчете собраны исследования, которые способствуют достижению цели разработки методики для соотнесения излучений, создаваемых установками PLT, с выходной мощностью и спектральной плотностью мощности модемов.

2 Методика оценки переходного затухания

Данное исследование, проведенное радиовещательными организациями Norddeutscher Rundfunk (NDR) и Zweites Deutsches Fernsehen (ZDF), направлено на оценку излучений, создаваемых установками PLT, путем учета связанного с ними переходного затухания. Предусматривается разработать метод, посредством которого можно численно определить суммарное переходное затухание в какой-либо типовой ситуации. При этом ставится задача расширения этого метода на целый ряд характерных ситуаций.

В данном исследовании продолжается работа по измерению помех, о которых сообщается в этом документе в п. 3.2.1, с тем чтобы изучить способы упрощения оценки излучений, создаваемых установками PLT. Оценка того, каким образом создаваемое системами PLT излучение будет воздействовать на приемник в виде дополнительного шума или помехи, включает много этапов. К сожалению, ни один из соответствующих этапов не поддается простому моделированию или измерению. Единственной величиной, поддающейся стабильному и повторяемому измерению, является PSD, которая подается в провода сети электропитания модемом PLT.

Задача администраций, регуляторных органов и организаций по стандартизации упростилась бы, если бы уровень подаваемой PSD можно было использовать в качестве эталонного при установлении ограничений на неприемлемые уровни шума и помех. Для этого потребовались бы средства оценки характерных переходных затуханий в типовых установках PLT, которые далее позволили бы напрямую увязать величину излучения радиоволн, создаваемого типовыми установками PLT, с PSD и суммарной выходной мощностью модема.

Задача исследования NDR/ZDF заключалась в моделировании переходных затуханий во всей цепи, начиная от радиочастотной энергии, подаваемой в провода сети электропитания, далее в излучаемую часть, и наконец, в часть энергии, принимаемую в здании. Если можно объединить эти составляющие в характерное суммарное переходное затухание, то можно оценить возможность создания помех устройствами PLT, зная их характеристики – суммарную выходную мощность и PSD.

Для создания повторяемой основы для моделирования в данном исследовании используется модулятор DVB-T, создающий широкополосный РЧ-сигнал с известными спектральными характеристиками.

2.1 Методика измерений

Измерения уровня излучений, создаваемых установкой PLT с использованием антенн, сопряжено с трудностями, потому что мощность, подаваемая модемами PLT в линию электропередач, изменяется во времени. В ненагруженном режиме присутствуют только некоторые пики сигнала. Максимальная мощность передается только во время передачи данных, которая носит в основном неустойчивый характер.

Выходная мощность модема PLT известна производителю этого устройства. Можно рассчитать уровень мощности помех на выходе определенной приемной антенны, если известно переходное затухание между модемом PLT, подключенным к настенной розетке сети питания, и выходом антенны. Переходное затухание можно также использовать для расчета максимально допустимой выходной мощности или PSD модема PLT, если задан максимальный уровень помех на входе приемника.

Проведение приемлемых измерений переходного затухания является весьма трудоемким процессом, потому что требуется учитывать разные типы зданий, схемы проводки сети электропитания, разные положения антенн и т. д. Более эффективный подход состоит в том, чтобы смоделировать несколько типов зданий с разными схемами проводки сети электропитания, подключить модем PLT к линии электропередачи в разных местах и использовать средства расчета излучения электромагнитных волн, чтобы определить переходное затухание между модемом и антенной в здании по уровню принимаемого сигнала. Эта антенна должна быть помещена во много разных мест в разных положениях. Можно рассчитать множество значений переходного затухания для разных моделей проводки и допущений, обеспечив эффективный статистический подход. Эти значения могут быть проверены с использованием ряда показательных измерений.

Для получения некоторых экспериментальных значений переходного затухания в диапазоне ОВЧ институтом IRT¹ были выполнены измерения в лаборатории и в типовом необособленном доме в сельском районе Германии.

2.2 Измерительная установка

Первые измерения переходного затухания были выполнены в лаборатории IRT, чтобы получить о нем хотя бы некоторое представление. Однако лабораторные условия не характерны для места приема сигналов радиовещания. Реалистичные измерения переходного затухания были выполнены в типовом необособленном доме в сельском районе Германии. Дом сделан из кирпичей, имеет первый этаж и еще два этажа с бетонными полами/потолками, см. рисунок 1.

РИСУНОК 1

Необособленный дом (центральный), в котором проводились измерения переходного затухания между модемом PLT и симметричной вибраторной антенной



Report SM.2269-01

¹ IRT (Institut für Rundfunktechnik GmbH) – научно-исследовательский институт государственных радиовещательных организаций Германии, Австрии и Швейцарии, расположенный в Мюнхене, Германия.

Для измерения излучаемой и принимаемой мощности помех в линии электропередачи должен подаваться стабильный сигнал с известным уровнем. Выходная мощность модема PLT непосредственно не подходит, потому что она неустойчива. Поскольку в системах PLT для передачи данных используются сигналы COFDM, для измерений был использован аналогичный сигнал, т. е. сигнал DVB-T. Сигнал DVB-T с шириной полосы 7 МГц на частоте 198,5 МГц подавался в домашнюю розетку генератором сигналов SFQ Rohde & Schwarz (R&S), см. рисунок 2.

РИСУНОК 2

Генератор сигналов SFQ, подающий сигнал DVB-T в розетку

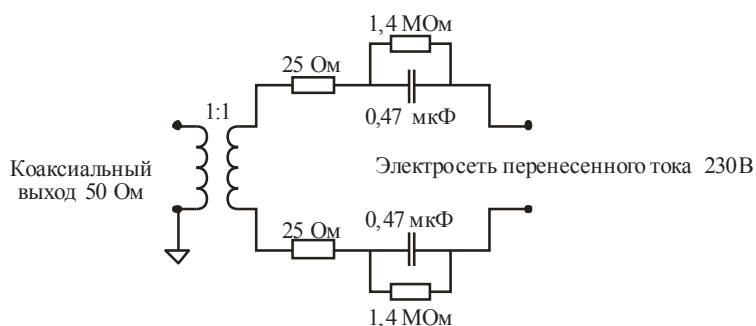


Report SM2269-02

Согласование 50-Омного коаксиального выхода генератора с симметричной линией электропередачи и разделительным трансформатором 230В было выполнено с помощью цепи, изображенной на рисунке 3.

РИСУНОК 3

Согласующая и разделительная цепь



Report SM.2269-03

Эта цепь может существенно ослаблять сигнал генератора, если полное сопротивление линии меньше 1000 Ом (т. е. 3,5 дБ на 100 Ом). Полное сопротивление линии зависит от нескольких параметров, не поддающихся контролю. Для связанных с этим расчетов в данном документе считается, что согласующая цепь ослабляет сигнал DVB-T на 3 дБ.

Для приема сигнала использовалась вертикально поляризованная штыревая антенна с противовесами, как показано на рисунке 4. Антенна была помещена на высоту 1,5 м над уровнем земли и подключена к анализатору спектра, чтобы измерить принимаемую мощность в канале. Усиление этой штыревой антенны составляет 0 дБд, т. е. такое же, как у полуволнового симметричного вибратора.

РИСУНОК 4

Вертикально поляризованная штыревая антенна с противовесами, использованная для измерения



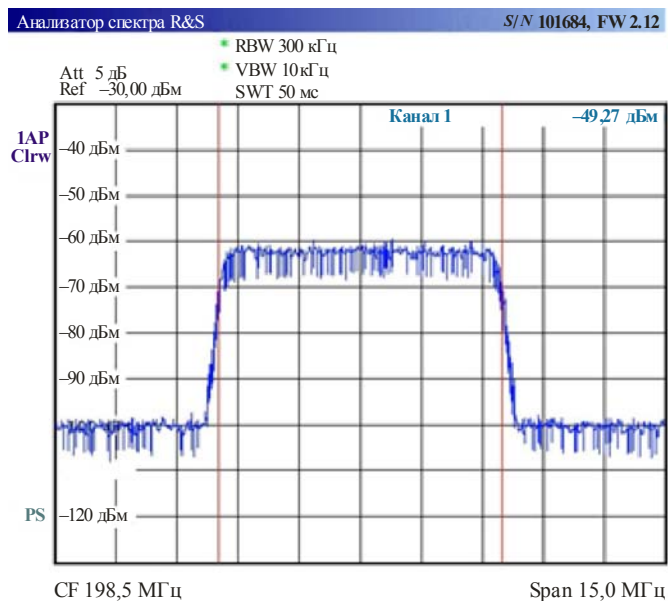
Report SM.2269-04

Использовался анализатор спектра R&S ETL, который может измерять мощность в заданной ширине полосы. Для калибровки измерительной установки уровень мощности генератора сигнала SFQ был выставлен равным -50 дБм. Генератор был подключен непосредственно к настроенному на ширину полосы канала 7 МГц анализатору ETL, который измерял его уровень. Измеренный спектр изображен на рисунке 5. Измеренная мощность в канале составила $-49,27$ дБм, т. е. ошибка измерения была меньше 1 дБ.

Во всех последующих измерениях настройки анализатора спектра не изменялись.

РИСУНОК 5

Спектр сигнала DVB-T, использованного для измерений
(уровень -50 дБм на выходе генератора)



Report SM.2269-05

2.3 Результаты измерений

2.3.1 Результаты измерений в лаборатории IRT

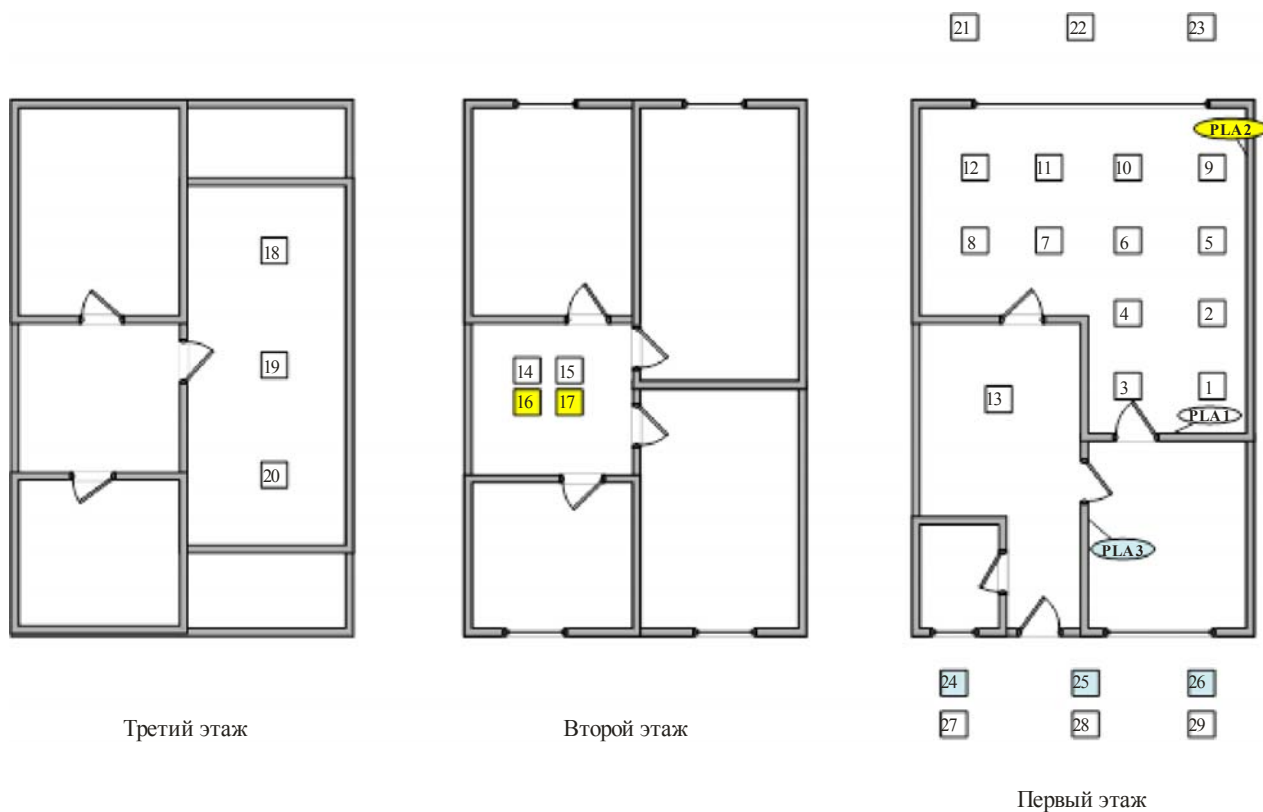
Генератор сигнала DVB-T был подключен к настенной розетке сети питания. Мощность сигнала на выходе штыревой антенны, установленной на высоте 1,5 над уровнем земли, измерялась в шести положениях в лаборатории.

2.3.2 Результаты измерений в необособленном доме

Дом, в котором проводились измерения, сделан из кирпичей, имеет первый этаж и еще два этажа с бетонными полами/потолками, см. рисунок 1. Фактически, там было три смежных дома: левый, центральный и правый. План центрального дома приведен на рисунке 6, а план левого смежного дома – на рисунке 7. Измерительный сигнал был подведен в настенную розетку центрального дома, расположенную на первом этаже.

РИСУНОК 6

План центрального дома

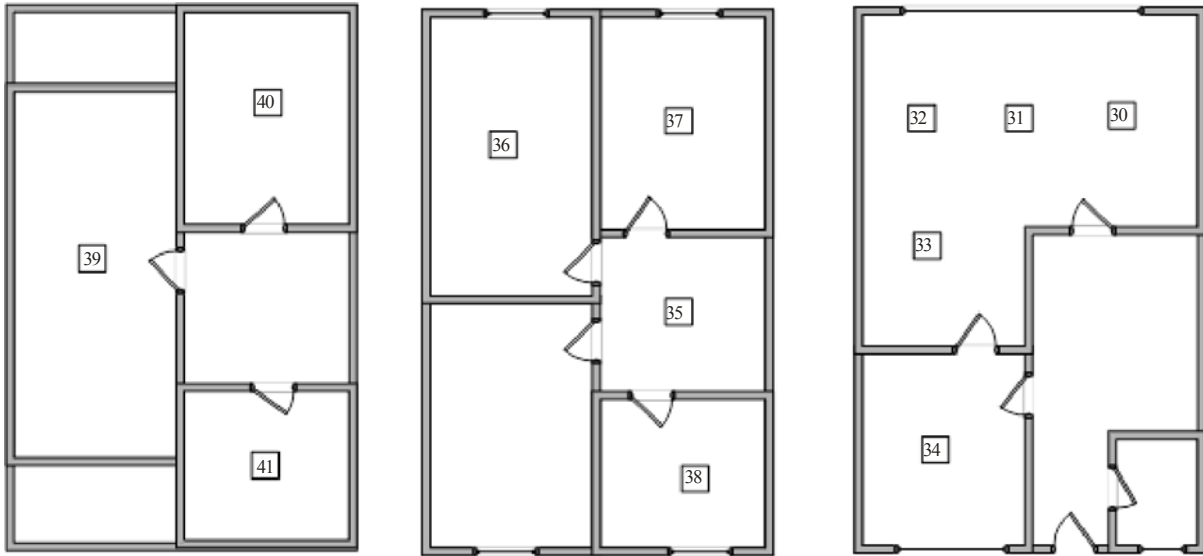


Report SM.2269-06

Выходная мощность генератора DVB-T была установлена на 0 дБ. Он последовательно подключался к настенным розеткам на первом этаже в точках PLT modem 1 (белая), PLT modem 2 (желтая) и PLT modem 3 (голубая). Измерения производились в точках 1–29 центрального дома и в точках 30–41 левого смежного дома. Цвет точек измерения соответствует месту связи генератора при измерении (PLT modem 1, 2 или 3).

РИСУНОК 7

План левого смежного дома



Третий этаж

Второй этаж

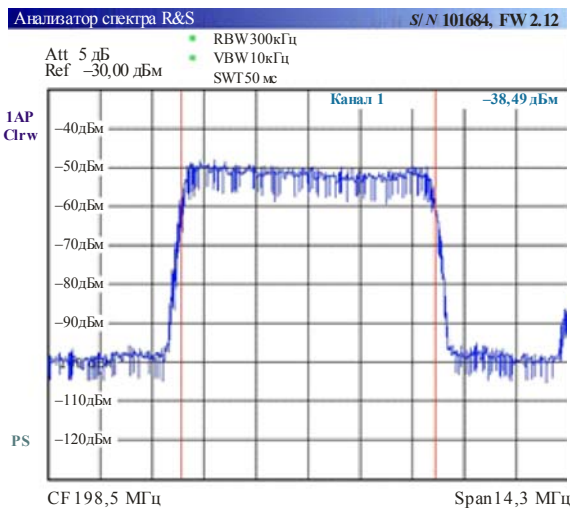
Первый этаж

Report SM.2269-07

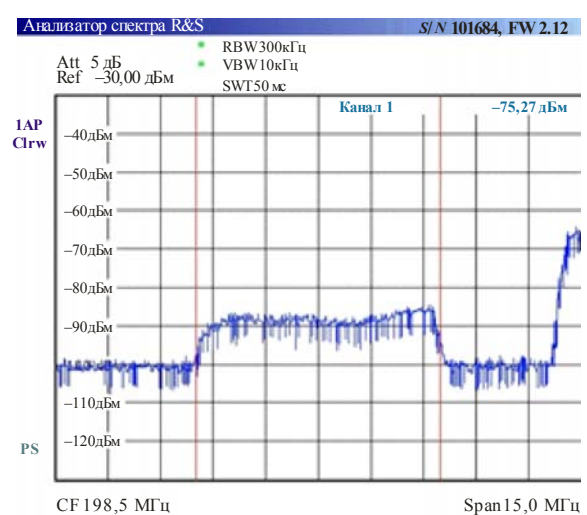
Антенна помещалась в точки измерения, указанные на рисунках 6 и 7 в виде нумерованных квадратов. В каждой точке измерения анализатором спектра ETL записывался спектр. Кроме того, указывалась принимаемая мощность в канале. В качестве примера на рисунке 8 приведены результаты для точки с потенциально высоким уровнем помех PLT и точки с потенциально низким уровнем помех PLT.

РИСУНОК 8

Спектр в двух точках измерения с высоким и низким уровнями помех



а) Точка измерения 1; высокий уровень помех



б) Точка измерения 39; низкий уровень помех

Report SM.2269-08

С правого края на рисунке 8 б), за пределами ширины полосы измерения сигнала DVB-T, расположен сигнал DAB, передаваемый в этом районе.

Измерения выполнялись в центральном доме на первом этаже в комнате, где подавался сигнал, в соседней комнате, на втором и третьем этажах и за пределами дома.

Кроме того, измерения выполнялись в левом смежном доме на первом, втором и третьем этажах.

2.4 Результаты измерения переходного затухания

2.4.1 Результаты, полученные в лаборатории IRT

Среднее переходное затухание, рассчитанное по значениям в шести точках измерения, составляет -47 дБ. Стандартное отклонение этих значений равно 6 дБ.

2.4.2 Результаты измерений в центральном доме

В одном и том же доме переходное затухание между выходом модема PLT и выходом приемной антенны изменяется в пределах от 48 дБ до 57 дБ. Колебание измеренных значений достаточно велико, при этом стандартное отклонение составляет около 6 дБ. За пределами здания переходное затухание в точках на расстоянии 4 м от стены дома спереди здания равно 57 дБ, переходное затухание в точках на расстоянии 10 м позади дома равно 60 дБ. Средние измеренные значения фактического переходного затухания равны:

- в той же комнате: 48 дБ;
- в соседней комнате 44 дБ;
- этажом выше 54 дБ;
- двумя этажами выше 57 дБ;
- в точках за пределами здания на расстоянии 4 м 57 дБ;
- в точках за пределами здания на расстоянии 10 м 60 дБ.

2.4.3 Результаты измерений в смежном доме

Переходное затухание между выходом PLA 1 в центральном доме и выходом приемной антенны в левом смежном доме изменяется в пределах от 62 дБ до 70 дБ, в зависимости от расстояния и этажа. Средние измеренные значения равны:

- на том же этаже 62 дБ;
- этажом выше 62 дБ;
- двумя этажами выше 70 дБ.

2.5 Поясняющий расчет максимально допустимой выходной мощности модема PLT

Максимально допустимая мощность на выходе модема PLT, при которой не допускается помех приему DAB, рассчитывается исходя из следующих предпосылок:

- помехи приему DAB на частоте 200 МГц не должны увеличиваться более чем на 1% относительно суммарной мощности шума в точке приема;
- установка PLT передает свою мощность с равномерно распределенным спектром в полосе от 30 МГц до 300 МГц;
- коэффициент шума (F) приемника DAB равен 8 дБ;
- усиление приемной антенны DAB равно $-2,2$ дБд;
- допустимый уровень шума искусственного происхождения (MMN) на частот 200 МГц при использовании указанной выше антенны равен 2 дБ;
- прием сигнала DAB осуществляется в смежной квартире, где переходное затухание составляет 62 дБ.

Характер помехи, создаваемой сигналом COFDM модема PLT, аналогичен белому шуму. Если исходный уровень помех не должен увеличиться более чем на 1%, мощность помехи от модема PLT должна быть на 20 дБ ниже эквивалентного суммарного уровня шума на входе приемника.

Эквивалентный уровень шума на входе приемника равен сумме уровня теплового шума, коэффициента шума приемника и MMN – допуска на принимаемый антенной шум искусственного происхождения. Этот результат не зависит от ширины полосы сигнала, если вместо мощности использовать PSD.

PSD теплового шума при температуре 20°C равна -174 дБм/Гц. После прибавления F и MMN минимальный уровень PSD шума на входе приемника равен -164 дБм/Гц.

Помеха PLT должна быть как минимум на 20 дБ ниже, т. е. на уровне -184 дБм/Гц.

Переходное затухание между модемом PLT и симметричной вибраторной антенной принимается равным 62 дБ. Усиление приемной антенны DAB равно $-2,2$ дБ относительно симметричного вибратора, поэтому суммарное переходное затухание между модемом PLT и приемником DAB равно 64,2 дБ. Прибавив переходное затухание к минимальному уровню PSD шума получим, что PSD на выходе модема PLT должна быть ниже $-119,8$ дБм/Гц.

Соответственно, суммарная выходная мощность в полосе 30–300 МГц не должна превышать $-35,5$ дБм.

2.6 Выводы

Мощность помехи на входе приемника можно рассчитать на основе PSD на выходе модема PLT, если известно переходное затухание между выходом модема PLT и выходом антенны приемника. И наоборот, задав максимально допустимый уровень помехи на входе приемника, можно рассчитать максимально допустимую PSD выходного сигнала модема PLT с использованием переходного затухания.

Переходное затухание между модемом PLT, подключенным к розетке питания, и вертикально поляризованной симметричной вибраторной антенной в диапазоне ОБЧ измерялось в лаборатории и в типовом необособленном доме в сельском районе Германии. Были получены значения в пределах 48–57 дБ в доме и 62–70 дБ между смежными домами.

Из результатов измерений следует, что если мощность помехи в смежной квартире не должна повышать суммарную мощность шума приемной системы при приеме сигнала DAB в диапазоне ОБЧ более чем на 1%, то максимальная PSD выходного сигнала модема PLT не должна превышать -120 дБм/Гц.

Измеренные значения переходного затухания и рассчитанная максимальная PSD выходного сигнала модема PLT действительны для домов, похожих на те, в которых проводились измерения, и имеющих аналогичную схему электропроводки. Для других типов домов и схем электропроводки эти значения могут существенно отличаться.

3 Методика точечного источника излучения

В данном разделе рассматривается воздействие PLT на подвижную сотовую связь в полосе 450–470 МГц. Во всех экспериментальных и теоретических оценках воздействия PLT на частотах меньше приблизительно 250 МГц затрудняющим фактором являются сложные свойства электропроводки как распределенного источника излучения. Однако на определенных частотах характеристики модема PLT, подключенного к длине проводки, становятся более похожими на характеристики точечного источника.

Под влиянием поверхностного эффекта затухание по длине проводки увеличивается с частотой. Поэтому при увеличении рабочей частоты только короткий отрезок провода вблизи точки ввода сможет излучать радиоволны, и проблема создаваемых излучений PLT сводится к проблеме нескольких модемов PLT, излучающих радиоволны как точечные источники с короткого отрезка провода в каждой точке подключения. По тому же принципу можно считать, что связь по проводам электросети объясняется в большей степени излучением и приемом радиоволн в каждой точке подключения, а не прохождением ослабленных сигналов PLT по всей длине проводов.

Информации о том, когда происходит данное изменение характеристик в типовой проводке электросети, не имеется, однако очевидно, что по мере увеличения частоты использование простой модели точечного источника для оценки переходного затухания, связанного с создаваемыми излучениями PLT, будет более обоснованным.

3.1 Методика и расчеты для защиты служб сотовой подвижной связи

В Региональном соглашении GE06 содержатся ссылки на Рекомендации МСЭ-R M.1767 и МСЭ-R F.1670, предназначенные для защиты подвижной и фиксированной служб от цифрового телевидения. Метод расчета, приведенный ниже в п. 3.2, основан на той же методике и обеспечивает пороговые значения помех и маски излучения PLT.

С учетом расстояний (от системы PLT до приемника, испытывающего помехи; расстояния указаны в круглых скобках в строке 3 таблицы 1) и описанных ранее допущений, можно получить следующие пороговые уровни и максимально допустимые значения пиковой мощности PLT:

ТАБЛИЦА 1

Пороговые уровни и максимальная пиковая мощность PLT для разных приемников, испытывающих помехи, в диапазоне 80–470 МГц

Мощность и напряженность поля в полосе 1 МГц	Терминал сотовой связи или домашняя базовая станция внутри помещения	Макросотовая/микросотовая базовая станция и фиксированная станция вне помещения	Радиолокационная станция вне помещения
Пороговый уровень мощности (дБм)	-129	-141	-149
Пороговый уровень напряженности поля (дБмкВ/м)	1,5	-10,5	-18,5
Максимальная пиковая мощность PLT (дБм)	-103 (1 м)	-95 (10 м)	-83 (100 м)

Данный метод анализа помех, создаваемых излучениями PLT приему одной из наземных служб, которые широко используются в домах, может применяться и для защиты радиовещательных служб в диапазонах ОВЧ и УВЧ. Кроме того, данная методика может предоставить полезную основу для изучения защиты служб радиосвязи от непреднамеренных излучений, создаваемых промышленным, научным и медицинским (ПНМ) оборудованием и распределительным оборудованием кабельного телевидения.

Допустимое снижение чувствительности приемников наземных служб равно 0,05 дБ; допустимый уровень мешающего сигнала на 20 дБ ниже порогового уровня шума; пороговым уровнем является величина КТВФ, равная – 20 дБ. Если допустимое снижение чувствительности приемников наземных служб равно 0,5 дБ, то допустимый уровень мешающего сигнала на 10 дБ ниже порогового уровня шума, и все значения в таблице 1 будут выше на 10 дБ.

Худшим случаем защиты наземных служб внутри помещения от PLT является случай сотовой радиотелефонной трубки, так как сотовый телефон удален от PLT только на 1 м. Для обеспечения надлежащей защиты для работы наземных служб в условиях слабого сигнала в диапазоне ОВЧ/УВЧ, создаваемые устройствами или установками PLT излучения не должны превышать максимального значения в 1,5 дБмкВ/м в полосе шириной 1 МГц, при этом измерение производится вне помещения на расстоянии 1 м от установки PLT; см. дополнительные значения, приведенные в таблице 4. При условии распространения в свободном пространстве и отсутствии ослабления сигнала в стенах, напряженность поля не зависит от частоты. Мощность зависит от частоты; на частоте 460 МГц максимально допустимая пиковая мощность PLT равна –103 дБм/МГц. Для получения ухудшения запаса на замирание в 0,5 дБ (а не 0,05 дБ), значения равны 11,5 дБмкВ/м в полосе шириной 1 МГц, при этом измерение производится вне помещения на расстоянии 1 м от установки PLT; а на частоте 460 МГц допустимая пиковая мощность PLT равна –93 дБм/МГц.

Худшим случаем защиты наземных служб вне помещения от PLT является случай сотовой базовой станции, находящейся на расстоянии 10 м от PLT. В этом случае максимальная пиковая мощность PLT равна -95 дБм/МГц при ухудшении запаса на замирание в $0,05$ дБ и -85 дБм/МГц при ухудшении запаса на замирание в $0,5$ дБ.

3.2 Метод расчета для оценки излучений от PLT

Чтобы рассчитать соответствующие пороговые значения мощности и напряженности поля при оценке уязвимости систем радиосвязи от помех, эти системы можно оценить по их параметрам: коэффициенту шума, G_i и L_F . Отметим, что маска допустимого излучения PLT зависит от частоты полезного сигнала, R_F , так как распространение меняется с частотой.

В расчетах используются следующие параметры:

- F : коэффициент шума приемника наземной подвижной станции (дБ);
- B : эталонная ширина полосы (BW) создающей помехи системы PLT (МГц);
- g_i : усиление антенны приемника наземной станции (радиотелефонная трубка или оборудование класса В) (число);
- G_i : усиление антенны приемника сотовой станции (радиотелефонная трубка или оборудование класса В) (дБи);
- L_F : потери в фидере кабеля антенны (дБ);
- f : эталонная частота (МГц);
- $P_{handset}$: пороговый уровень мощности/МГц на входе сотовой радиотелефонной трубки (дБм);
- P_{BS} : пороговый уровень мощности/МГц на входе наземной базовой станции (BS) (дБм);
- P_{RL} : пороговый уровень мощности/МГц на входе радиолокационной станции (RL) (дБм);
- $E_{handset}$: пороговый уровень напряженности поля/МГц на входе сотовой радиотелефонной трубки (дБмкВ/м);
- E_{BS} : пороговый уровень напряженности поля/МГц на входе наземной базовой станции (дБмкВ/м).

3.2.1 Пороговые уровни для защиты наземных служб от излучения PLT

Мощность теплового шума приемника КТBF² на входе изотропной антенны без потерь для ширины полосы $BW = 1$ МГц и типового коэффициента шума (F) в 5 дБ равна:

$$\text{КТBF}/1 \text{ МГц} = -114 + 5 = -109 \text{ дБм/МГц} \quad (1)$$

$$\text{КТBF} - 20 \text{ дБ} (1 \text{ МГц}) = -109 \text{ дБм} - 20 \text{ дБ} = -129 \text{ дБм/МГц}. \quad (2)$$

Коэффициент усиления антенны неприменим к радиотелефонным трубкам, поэтому критерием защиты для сотовых радиотелефонных трубок является то, что излучения PLT для эталонного сигнала в полосе шириной 1 МГц не должны превышать:

$$P_{handset} (1 \text{ МГц}) = -129 \text{ дБм/МГц}. \quad (3)$$

В отношении базовых станций сотовых сетей подходящими параметрами для определения требований по защите от излучений PLT являются параметры $G_i = 15$ дБи и $L_F = 3$ дБ. Таким образом, пороговый уровень мощности на входе антенны базовой станции задается выражением:

² При k (постоянная Больцмана) = $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К, $T \sim 300$ Кельвин и $B = 1$ МГц, коэффициент КТВ равен -114 дБм.

$$P_{BS}(1 \text{ МГц}) = -129 \text{ дБм/МГц} - 15 \text{ дБ} (G_i) + 3 \text{ дБ} (L_F) = -141 \text{ дБм/МГц}. \quad (4)$$

Для сравнения отметим, что для радиолокационного приемника подходящими параметрами для определения требований по защите от излучений РЛТ являются параметры $G_i = 23$ дБи и $L_F = 3$ дБ. Таким образом, пороговый уровень мощности на входе радиолокационной антенны задается выражением:

$$P_{RL}(1 \text{ МГц}) = -129 \text{ дБм/МГц} - 20 \text{ дБ} = -149 \text{ дБм/МГц}. \quad (5)$$

С помощью стандартного уравнения получаем:

$$P_r = \frac{E^2 g \lambda^2}{Z_0 4\pi} = \frac{E^2 g c^2}{480\pi^2 f^2}.$$

Формула перехода от напряженности электрического поля (дБмкВ/м) на входе антенны к мощности (дБм) имеет вид:

$$P(\text{дБм}) = E(\text{дБмкВ/м}) - 77,21 - 20 \log f(\text{МГц}) + G_i - L_F \quad (6)$$

В связи с одинаковым эквивалентным уровнем шума на входе приемника (т. е. коэффициент шума, эталонная ширина 1 МГц и частота $R_F = 460$ МГц), разница в значениях напряженности поля определяется различными значениями усилений и потерь на входе приемной антенны.

Для эталонной частоты $R_F = 460$ МГц по формуле перехода (6) получаем:

$$-129 (\text{дБм}) = E(\text{дБмкВ/м}) - 77,21 - 53,25. \quad (7)$$

Таким образом:

$$E_{handset}(1 \text{ МГц}) = 1,5 (\text{дБмкВ/м}) \quad (8)$$

$$E_{BS}(1 \text{ МГц}) = E_{fixed}(1 \text{ МГц}) = 1,5 (\text{дБмкВ/м}) - 12 \text{ дБ} = -10,5 (\text{дБмкВ/м}) \quad (9)$$

$$E_{RL}(1 \text{ МГц}) = E = 1,5 (\text{дБмкВ/м}) - 20 \text{ дБ} = -18,5 (\text{дБмкВ/м}). \quad (10)$$

3.2.2 Маска уровня допустимого излучения РЛТ для защиты наземных служб

Допустим, что имеет место распространение в свободном пространстве радиоволн, излучаемых модемом РЛТ, который считается точечным источником, в направлении радиоприемников наземных служб. Тогда с использованием уравнения (4) из Рекомендации МСЭ-R P.525 и расстояния d в метрах (а не километрах), получим:

$$L_{bf} = -27,6 + 20 \log f + 20 \log d (\text{дБ}). \quad (11)$$

Следовательно, максимально допустимая пиковая мощность РЛТ, P_{PLT} , на частоте $f = 460$ МГц для защиты сотовой радиотелефонной трубки на расстоянии 1 м от источника РЛТ, равна:

$$\begin{aligned} P_{PLT}(\text{дБм/МГц}) &= P_{handset}(\text{дБм/МГц}) + L_{bf} = -129 - 27,6 + 20 \log f + 20 \log d \\ &= -129 - 27,6 + 20 \log 460 + 20 \log 1 = -129 - 27,6 + 53,3 \approx -103 (\text{дБм/МГц}). \end{aligned} \quad (12)$$

Аналогичным образом, максимально допустимая пиковая мощность РЛТ, P_{PLT} , на частоте $f = 460$ МГц для защиты сотовой базовой станции/базовой станции ИМТ на расстоянии 10 м от источника РЛТ, равна:

$$\begin{aligned}
 P_{PLT} \text{ (дБм/МГц)} &= P_{BS} \text{ (дБм/МГц)} + L_{bf} \\
 &= -141 - 27,6 + 53,3 + 20 \log 10 \approx -95 \text{ (дБм/МГц)}.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Максимально допустимая пиковая мощность PLT, P_{PLT} , на частоте $f = 460$ МГц для защиты радиолокационного приемника на расстоянии 100 м от источника PLT, равна:

$$\begin{aligned}
 P_{PLT} \text{ (дБм/МГц)} &= P_{RL} \text{ (дБм/МГц)} + L_{bf} \\
 &= -149 - 27,6 + 53,3 + 20 \log 100 \approx -83 \text{ (дБм/МГц)}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

3.3 Метод расчета для оценки совокупного излучения от установок PLT

Настоящий подраздел посвящен оценке, связанной с совокупным излучением от установок PLT в ситуации, когда одновременно включено несколько модемов PLT. В связи с тем, что установки PLT включают ряд модемов PLT, излучающих по-отдельности на общей частоте, суперпозиция этих нескольких излучений способна привести к вредным помехам, причиняемых службам радиосвязи установками PLT. Соответственно, при этом несколько излучений, создаваемых модемами PLT, имеют разные фазы, изменяющиеся случайным образом на конкретном расстоянии измерения. Эта случайная характеристика приводит к явлению усиливающей и ослабляющей интерференции, которая стохастическим образом возникает на входе испытывающего помехи приемника.

Несмотря на то, что несколько модемов PLT имеют одинаковые передаваемые мощности, излучения от этих модемов могут быть разными на одинаковом расстоянии, в зависимости от условий работы установок PLT. Поэтому при оценке воздействия установок PLT на службы радиосвязи следует учитывать напряженность поля. Как показано в Рекомендации МСЭ-R SM.1879, во многих странах допускаются излучения систем PLT, выраженные через напряженность электрического поля. Для оценки напряженности электрического поля совокупного излучения от установок PLT применяется вероятностный подход, представленный в Рекомендации МСЭ-T К.62. В нем учитываются изменения электрического поля, создаваемого несколькими мешающими сигналами со случайными разностями фаз на входе приемника, испытывающего помехи. Таким образом, в данном подразделе представлен метод расчета для оценки совокупного излучения от установок PLT с позиций вероятностного подхода.

3.3.1 Математическая модель

Пусть имеются излучения от установок PLT, состоящих из нескольких модемов PLT, которые окружают испытывающий помехи приемник, как показано на рисунке 9. На этом рисунке r_i – это расстояние между i -м источником PLT и точкой измерения, а d_i – расстояние между i -м источником PLT и приемником, испытывающим помехи. Амплитуда совокупного излучения от установки PLT на входе испытывающего помехи приемника может быть математически выражена следующим образом:

$$E_o(t) = \sum_{i=1}^N E_{oi} \cos(\omega_c t + \theta_i) = E_o \cos(\omega_c t + \alpha)
 \tag{15},$$

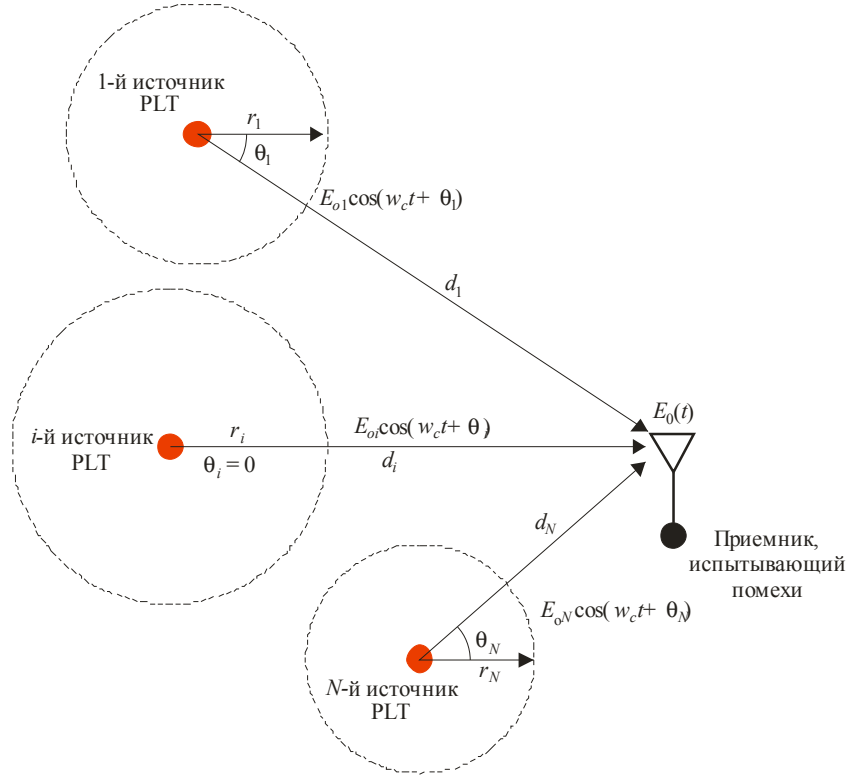
где

- E_o : амплитуда совокупного излучения на входе приемника, испытывающего помехи (мкВ/м);
- N : количество источников PLT;
- E_{oi} : амплитуда излучения, создаваемого i -м источником PLT на расстоянии измерения (мкВ/м);
- ω_c : частота в радианах (Гц);
- θ_i : разность фаз между излучением, создаваемым i -м источником PLT, и некоторым согласованным эталонным излучением на входе приемника, испытывающего помехи (радиан);
- α : разность фаз между совокупным излучением и некоторым согласованным эталонным излучением на входе приемника, испытывающего помехи (радиан).

Целью данного подраздела является расчет вероятности возникновения помех $\{E_o > E_{PR}\}$, в случае если амплитуда совокупного излучения от установок PLT, E_o , превышает требуемый уровень защиты приемника, испытывающего помехи, E_{PR} .

РИСУНОК 9

Геометрические параметры совокупного излучения, создаваемого установками PLT, на входе приемника, испытывающего помехи



Report SM.2269-09

Для расчета вероятности помех, $P_r\{E_o > E_{PR}\}$, разность фаз θ_i статистически моделируется с использованием случайной величины, имеющей равномерное распределение (RV), с функцией плотности вероятности, равной $1/2\pi$ в интервале $[-\pi, \pi]$, как это было сделано в Рекомендации МСЭ-Т К.62. Используя простое распространение в дальней зоне, рассчитываем амплитуду излучения, создаваемого i -м источником PLT, на расстоянии d_i , $E_{oi}^{dB}(d_i)$, в логарифмических единицах (дБмкВ/м) следующим образом:

$$E_{oi}^{dB}(d_i) = E_{oi}^{dB}(r_i) - 20 \cdot \beta \cdot \log_{10}(d_i/r_i) \quad (16)$$

где $E_{oi}^{dB}(r_i)$ – амплитуда излучения $E_{oi}(r_i)$ на расстоянии r_i в логарифмических единицах (дБмкВ/м) и β – коэффициент распространения волны. В случае распространения в свободном пространстве β равен 1. Амплитуда совокупного излучения, создаваемого установками PLT, на входе приемника, испытывающего помехи, E_o , рассчитывается с помощью уравнения (3) из Рекомендации МСЭ-Т К.62 следующим образом:

$$E_o = \sqrt{\sum_{i=1}^N E_{oi}^2(d_i) + 2 \sum_{j>i}^N \sum_{i=1}^N E_{oi}(d_i) E_{oj}(d_j) \cos(\theta_i - \theta_j)}, \quad i < j \leq N \quad (17)$$

Соответственно, вероятность помехи, $P_r\{E_o > E_{PR}\}$, рассчитывается с помощью уравнения (17) и путем генерирования случайной величины, имеющей равномерное распределение, $\theta_i; i = 1, \dots, N$.

3.3.2 Пример

В качестве примера расчета $P_r\{E_o > E_{PR}\}$, рассмотрим базовую станцию вне помещения как испытывающий помехи приемник с уровнем защиты $E_{PR} = 0,3$ мкВ/м ($= -10,5$ дБмкВ/м) при наличии установки PLT. Уровень защиты равен значению, полученному в предыдущем пункте 3.1.1. Параметры установки PLT описаны в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2
Краткий обзор параметров

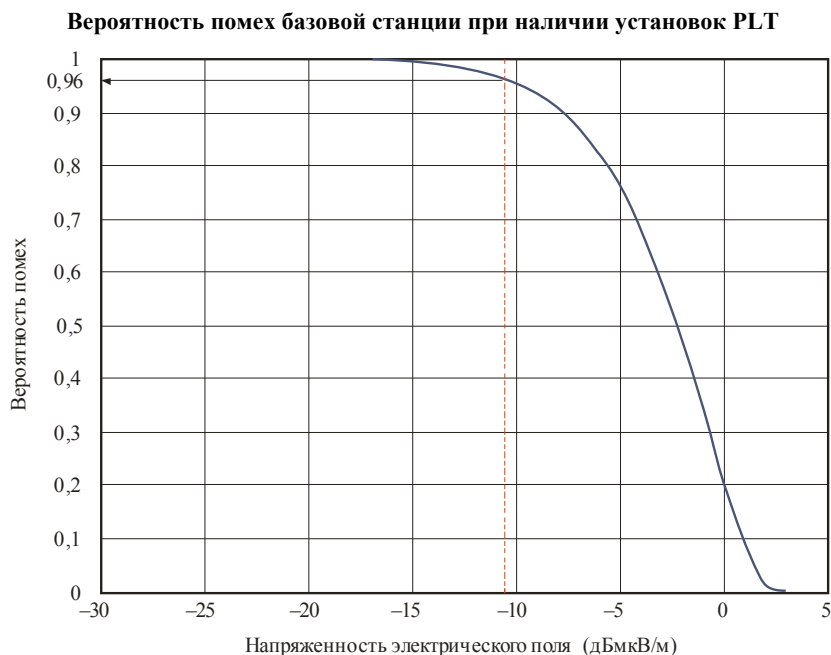
Параметры	Значение	Примечания
Количество источников PLT (N)	5	Предполагаемые условия работы установки PLT
Напряженность поля, создаваемого источниками PLT, на расстоянии измерения 10 м ($E_{oi}^{dB}(r_i)$)	37 дБмкВ/м*	Пять источников PLT с одинаковыми амплитудами излучения
Общая частота	460 МГц	См. уравнение (9)
Коэффициент распространения радиоволн (β)	2	Отсутствие прямой видимости
Расстояние между источниками PLT и приемником, испытывающим помехи (d_i)	100, 150, 200, 250 и 300 м	Предполагаемые условия работы установки PLT

* Это значение является пределом излучения для оборудования информационных технологий класса В, описанного в Публикации 22 Международного специального комитета по радиопомехам (СИСПР).

Как показано на рисунке 10, вероятность помех базовой станции при наличии установки PLT, $P_r\{E_o > 0,3$ мкВ/м ($= -10,5$ дБмкВ/м)}, составляет около 0,96. Сравнив вероятность помехи в 0,96 на входе приемника, испытывающего помехи, с уровнем доверительной вероятности СИСПР в 80%, получим $P_r\{E_o > E_{PR}\} = 0,2$ или $P_r\{E_o < E_{PR}\} = 0,8$. Получается, что установка PLT, описанная в таблице 2, создает помехи расположенной вне помещения базовой станции с уровнем защиты $-10,5$ дБмкВ/м.

Из этого примера видно, что представленный метод расчета может быть использован для оценки совокупного излучения установок PLT.

РИСУНОК 10



Report SM.2269-10

4 Экспериментальное определение РЧ-токов, циркулирующих по проводам сети электропитания, характеристик РЧ-помех и эквивалентных характеристик антенны установки PLT внутри здания

Измеренные РЧ-помехи, токи синфазного и дифференциального режимов, создаваемые системами PLT, и характеристики антенны сети линий электропередач внутри здания

В главе 2 Отчета МСЭ-R SM.2158 отмечается, что воздействие излучения электропроводки и экранирующее действие здания имеют сложный характер и изменяются от здания к зданию и от страны к стране в зависимости от местной практики строительства зданий и прокладки электропроводки. Если методики моделирования, базирующиеся на теоретических или статистических соображениях, разрабатываются для целей управления потенциалом помех установок PLT, то проверка их прогнозов и сферы действия должна выполняться путем проведения экспериментов и измерений в реальных ситуациях. В настоящем разделе представлены результаты натуральных экспериментов, выполненных в Японии.

4.1 Измеренные РЧ-помехи от системы PLT³

Основную опасность для служб радиосвязи представляет напряженность поля помехи относительно уровня фонового шума за пределами зданий, в которых установлены системы PLT. В ходе этих экспериментов напряженность поля измеряется с использованием пассивной рамочной антенны, расположенной на расстоянии 10 м от внешней стены дома, в котором установлена система PLT.

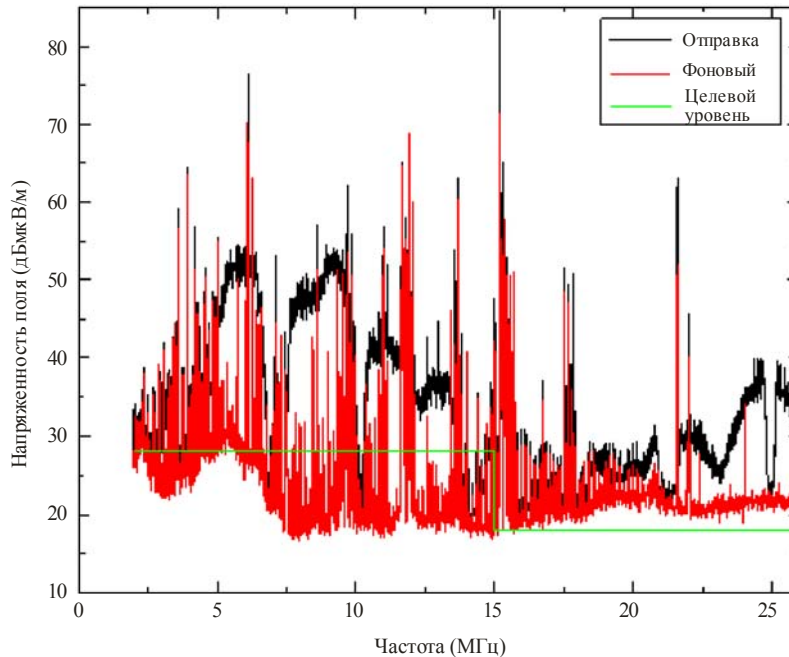
Напряженность поля помехи PLT ("Отправка") измеряется в период, когда система PLT используется. Напряженность поля фонового шума ("Фоновый") измеряется, когда система PLT не используется. Результаты показаны на рисунке 10. Напряженность поля помехи от системы PLT значительно превышает уровень фонового шума в большей части ВЧ-спектра и достигает 55 дБмкВ/м (ширина полосы = 10 кГц). Это более чем на 30 дБ выше уровня фонового шума. Для сравнения: пределы напряженности поля, установленные соответствующими национальными нормативными актами для

³ Kitagawa, M. and Ohishi, M. [September 2008] – Measurements of the Radiated Electric Field and the Common Mode Current from the In-house Broadband Power Line Communications in Residential Environment, Proc. 8th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2008), pp. 433-438, Hamburg, Germany.

места проведения измерений, составляют 28 дБмкВ/м (ниже 15 МГц) и 18 дБмкВ/м (выше 15 МГц). Значения измеренной напряженности поля были выше установленных пределов. Кроме того, в диапазоне ниже 15 МГц при работающей установке PLT измеренная напряженность поля примерно на 10 дБ выше фактического измеренного уровня фонового шума.

РИСУНОК 11

РЧ-помехи, создаваемые системой PLT



Report SM.2269-11

4.2 Измеренные РЧ-токи в розетке электропитания³

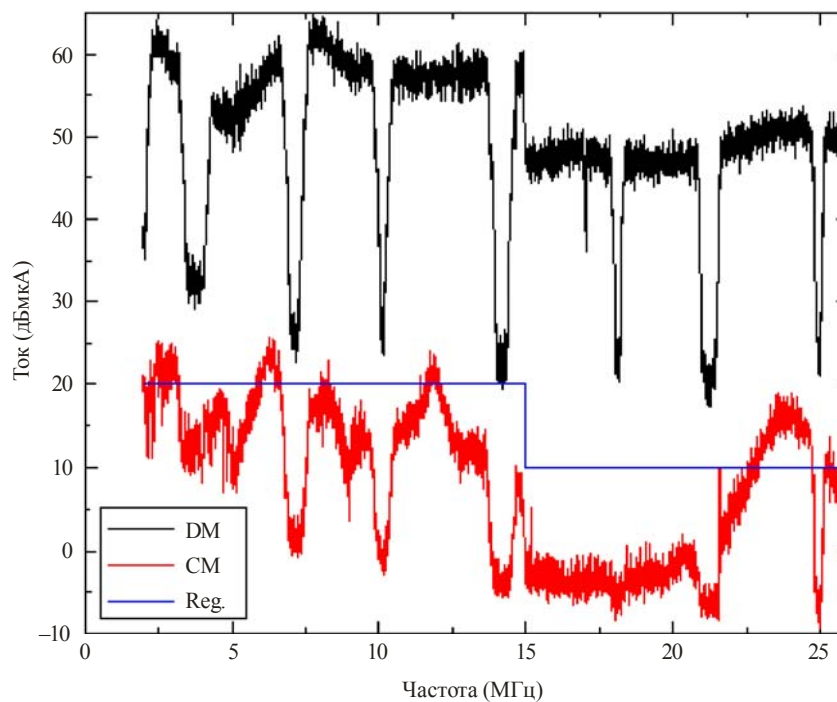
Для локализации источника РЧ-помех для данной установки PLT измерялись РЧ-токи в синфазном (СМ) и дифференциальном режиме (DM)⁴ в розетке электропитания, в которую подается сигнал PLT. Результаты показаны на рисунке 11.

На рисунке 12 ток СМ (нижняя диаграмма) соответствует разрешенным уровням тока (20 дБмкА ниже 15 МГц и 10 дБмкА выше 15 МГц) в большей части ВЧ спектра. Ток DM составляет 60 дБмкА в диапазоне ниже 15 МГц и 50 дБмкА – выше 15 МГц. Ток DM на 40 дБ превышает ток СМ, хотя предполагается, что он должен превышать ток СМ только на 16 дБ. Существует расхождение в 24 дБ между измеренным током DM и планируемым током DM, которое может быть причиной большей части расхождения в 27 дБ между измеренной напряженностью поля (55 дБмкВ/м) и целевым уровнем (28 дБмкВ/м).

⁴ Объяснение механизма образования в проводах сети электропитания синфазных и дифференциальных РЧ-токов см. в главе 2 Отчета МСЭ-R SM.2158.

РИСУНОК 12

Токи дифференциального и синфазного режимов в розетке электропитания, к которой подключен модем PLT



Reg.: разрешенный уровень

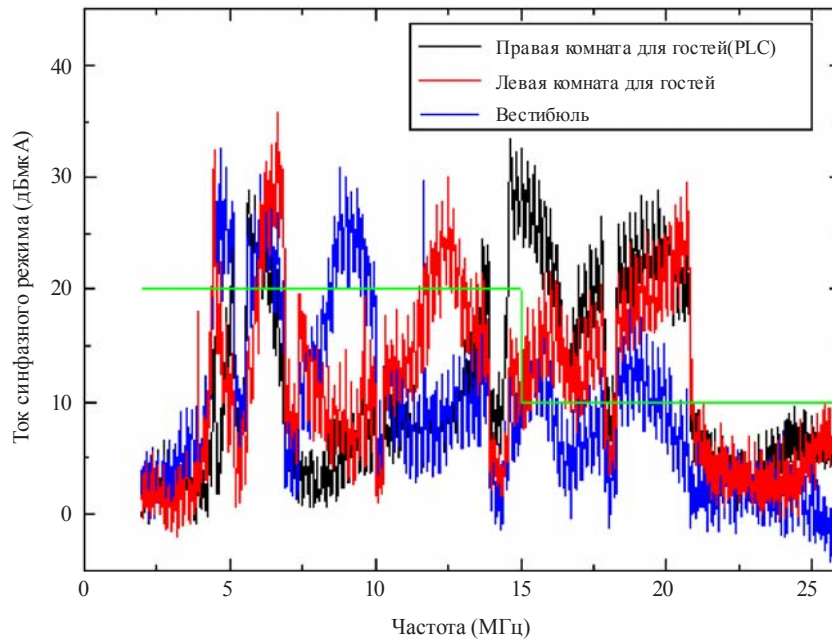
Report SM.2269-12

4.3 Измеренные токи CM в проводах сети электропитания

Токи CM в линии электропитания могут значительно отличаться от тока CM, измеренного в розетке электропитания, на которую подается сигнал PLT. Однако измерить ток CM в уже проложенной проводке электропитания сложно. Подсоединяя короткий (3 м) кабель электропередачи к неиспользуемой сетевой розетке, возможно измерить ток CM, протекающий около неиспользуемой розетки. Результаты измерений тока CM в различных розетках показаны на рисунке 13. Ток CM около неиспользуемых розеток превышал ток CM, измеренный в розетке электропитания, в которую подается сигнал PLT, на 20 дБ, и наблюдается превышение предела тока CM более чем на 10 дБ. Возможным объяснением причин превышения целевого предела токов CM может быть значительно большая величина тока DM по сравнению с планируемой.

РИСУНОК 13

Токи синфазного режима в розетке электропитания, к которой НЕ подсоединен модем PLT (измеренные с помощью короткого кабеля-удлинителя)



Report SM.2269-13

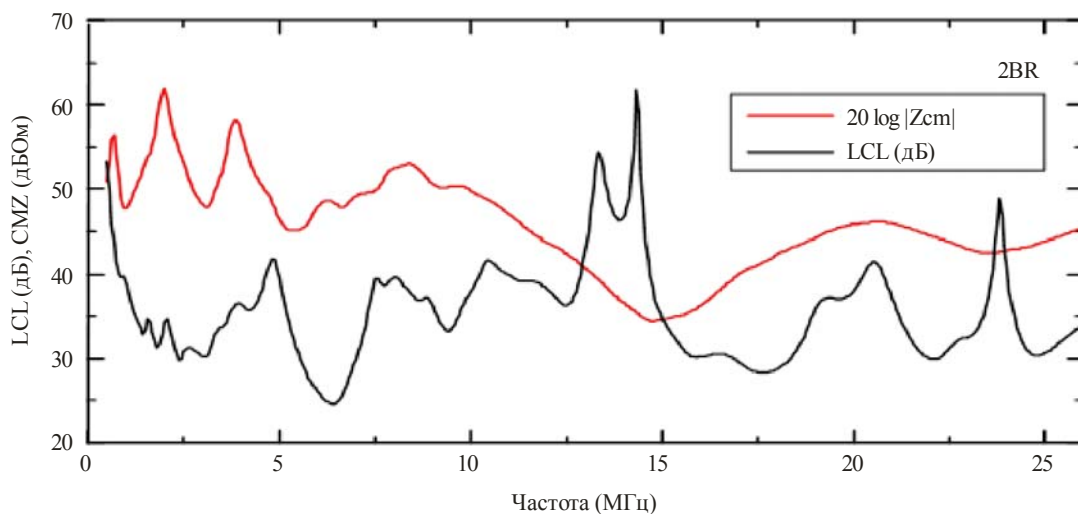
4.4 Потери разбалансировки, измеренные в розетке

Предел уровня тока СМ был установлен при предположении, что потери разбалансировки (LCL) составляют 16 дБ и выше. Если LCL линии электропередачи в здании меньше 16 дБ (т. е. производительность ниже нормативной вследствие большего объема преобразования тока DM в токи СМ), то можно предполагать, что ток СМ будет больше планируемого предела. В целях исследования этой вероятности были измерены LCL.

Результаты показаны на рисунке 14. Минимальные обнаруженные LCL составляют 24 дБ, что выше (т. е. более высокая производительность) 16 дБ. Не существует отрицательной корреляции между измеренными LCL и измеренной напряженностью поля помех, создаваемых PLT.

РИСУНОК 14

LCL и полное входное сопротивление для синфазного режима, измеренные в розетке



Report SM.2269-14

4.5 Эквивалентное усиление антенны установки PLT в здании⁵

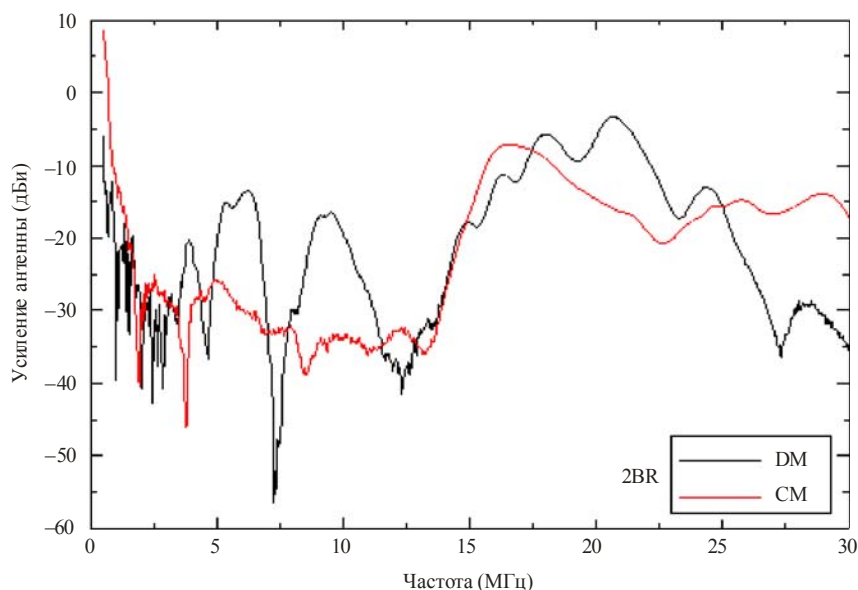
Меньшее по сравнению с ожидаемым экранирующее действие здания может объяснять, почему измеренные РЧ-помехи выше планируемого предела. Кроме того, РЧ-помехи от линии электропередачи зависят также от геометрической структуры проводки, при условии что в линии электропередачи находится тот же объем тока СМ. Такую информацию вряд ли можно получить по количественным значениям, таким как LCL, измеренным только в розетках электропитания.

Наиболее непосредственно связанным и надежным количественным значением, которое представляет общий коэффициент преобразования мощности сигнала PLT (PSD) в напряженность поля РЧ-помех, является усиление антенны всей установки PLT, получаемое по токам DM в розетке, в которую подается сигнал DM PLT, в приемную антенну за пределами здания. На рисунке показаны и антенный эффект разводки электропитания, и экранирующее действие здания. Токи DM и СМ в точке ввода (розетка) селективно возбуждаются путем использования цепи датчика LCL; затем с помощью сетевого анализатора измеряется коэффициент пропускания из розетки в выбранном режиме в эталонную антенну (пассивная рамочная), расположенную на расстоянии 10 м от внешней стены дома.

Результаты показаны на рисунке 15. В большей части нижнего диапазона ВЧ-спектра усиление антенны DM больше усиления СМ. Кроме того, между усилением антенны DM и напряженностью поля помехи существует жесткая положительная корреляция. Это объясняет наличие сильных РЧ-помех около 6 и 9 МГц, где эквивалентное усиление проводки здания составляет порядка -15 дБи. В верхнем диапазоне ВЧ-спектра DM и СМ имеют сопоставимые значения усиления антенны, составляющие от -10 до -5 дБи.

РИСУНОК 15

Усиление антенны в установке электропередачи в здании, где РЧ подается в розетку электропитания в дифференциальном режиме и синфазном режиме



Report SM.2269-15

⁵ Kitagawa, M. [October 2007] – In-situ Measurement of the Antenna Factor of in-house Power Lines, IEICE Tech. Rep., Vol. 107, EMCJ2007-54, pp. 7-12 (на японском языке).