

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R SM.1753-1
(04/2010)

Методы измерения радиошума

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 1 МСЭ-R. 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 Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/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 службы |
| SM | Управление использованием спектра |
| SNG | Спутниковый сбор новостей |
| TF | Передача сигналов времени и эталонных частот |
| V | Словарь и связанные с ним вопросы |

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 МСЭ-R.

Электронная публикация
Женева, 2010 г.

© ITU 2010

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.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R SM.1753-1

Методы измерения радишума

(2006-2010)

Сфера применения

Для измерения радишума необходимо иметь единый, независимый от частоты метод получения от различных систем измерения сравнимых, точных и воспроизводимых результатов. В этой Рекомендации описан ряд операций или этапов, которые должны быть включены в процедуру измерения, позволяющую получить такие сравнимые результаты.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что благодаря появлению многих типов электрического и электронного оборудования, создающего радишумы, и сетей радиосвязи, например, сверхширокополосных (UWB), обеспечивающих электросвязь по линиям электропередачи (PLT), и компьютеров, уровни радишума, указанные в Рекомендации МСЭ-R P.372, могут возрасти;
- b) что для эффективного управления использованием спектра администрации должны знать точные уровни шума;
- c) что необходимо согласовать методы измерения для измерений шума с целью получения воспроизводимых результаты, которые были бы взаимно сравнимыми;
- d) что для измерения шума требуются определенные минимальные технические характеристики оборудования,

рекомендует,

- 1** что измерения радишума следует выполнять так, как это описывается в Приложении 1.

Приложение 1

Методы измерения радишума

1 Введение

В настоящем Приложении описаны методы для измерения и оценки радишума в практических радиоустановках.

2 Источники радишума

- излучение от грозовых разрядов (атмосферный шум, создаваемый грозами);
- совокупные непреднамеренные излучения от электрических машин, электрического и электронного оборудования, линий электропередач или систем зажигания двигателей внутреннего сгорания (промышленный шум);
- излучения из-за отражений от атмосферных газов и гидрометеоров;
- излучения из-за отражений от земной поверхности или других препятствий на пути луча антенны;
- излучение от небесных источников радиоволн.

В то время как маловероятно, что шум, обусловленный естественными причинами, будет значительно изменяться в течение длительных интервалов времени, в некоторых участках спектра радиочастот зачастую преобладает промышленный шум (MMN), и его интенсивность может изменяться по мере увеличения плотности размещения электрических и электронных устройств, введения устройств новых типов и изменения мер по улучшению электромагнитной совместимости. Таким образом, промышленный шум является таким видом шума, который представляет основной интерес при проведении измерений радишума.

ТАБЛИЦА 1

Важность источников радишума в разных диапазонах частот

| Источник шума | Представляющий интерес диапазон частот |
|--|--|
| Атмосферный шум из-за молний | 9 кГц – 30 МГц |
| Космический шум | 4 МГц – 100 МГц |
| Промышленный шум | 9 кГц – 1 ГГц |
| Излучения из-за отражений от атмосферных газов и пр. | Выше 10 ГГц |

3 Составляющие радишума

Исходя из определения, приведенного в Рекомендации МСЭ-R P.372, радишум представляет собой сумму излучений от многих источников, не создаваемых передатчиками радиосвязи. Если в определенном месте проведения измерений нет преобладания одиночных источников шума, то характеристика радишума имеет нормальное распределение амплитуды и может рассматриваться как белый Гауссовский шум.

Однако в условиях высокой плотности устройств, создающих шум, которые часто встречаются в крупных городах и жилых районах, фактически невозможно найти место, в котором хотя бы временно не преобладают шум или излучения, создаваемые отдельным источником. Эти источники часто излучают импульсы или одиночные несущие. Так как оборудование радиосвязи должно работать в таких условиях, исключить эти составляющие из измерений радишума может оказаться невозможным.

ТАБЛИЦА 2
Составляющие радишума

| Составляющие шума | Свойства | Источники (примеры) |
|--|--|--|
| Белый Гауссовский шум ⁽¹⁾ (WGN) | Некоррелированные электромагнитные векторы Ширина полосы равна или больше ширины полосы приемника Уровень спектральной мощности увеличивается линейно с ростом ширины полосы | Компьютеры, сети связи по линиям электропередач, проводные компьютерные сети, космический шум |
| Импульсный шум (IN) | Коррелированные электромагнитные векторы Ширина полосы больше ширины полосы приемника Уровень спектральной мощности увеличивается пропорционально квадрату ширины полосы | Свечи зажигания, молнии, стартеры газонаполненных ламп, компьютеры, устройства сверхширокополосной связи |
| Шум от одной несущей (SCN) | Одна или несколько различных спектральных линий Ширина полосы меньше ширины полосы приемника Уровень спектральной мощности не зависит от ширины полосы | Проводные компьютерные сети, компьютеры, импульсные источники электропитания |

(1) В данном Приложении к Рекомендации МСЭ-R SM.1753 считается, что белый Гауссовский шум (WGN) представляет непрерывный шумовой сигнал, который демонстрирует практически плоскую спектральную плотность мощности в диапазонах частот около ширины полосы измерения.

В то время как составляющая WGN достаточно хорошо описывается среднеквадратичным значением, охарактеризовать импульсный шум (IN) гораздо сложнее. В современных цифровых службах связи почти всегда применяется коррекция ошибок, что делает их более устойчивыми, особенно к импульсному шуму. Однако когда достигается определенная длительность импульсов и частота повторения импульсов, IN может создавать существенные помехи работе таких служб.

Поэтому желательно измерять радишум таким образом, чтобы получать не только значения уровня IN, но и определенную информацию о статистическом распределении параметров импульсов.

Шум от одной несущей (SCN) определяется только, когда он происходит от отдельного источника, расположенного вблизи места проведения измерений. Многочисленные источники, излучающие единичные несущие, быстро повышают шумоподобность спектра по мере увеличения их числа. Рекомендация МСЭ-R P.372 определяет радишум как сумму непреднамеренных излучений разных источников и, в частности, исключает излучения от одиночных источников, которые можно определить. Поэтому необходимо выбрать места для измерений и/или частоты, в которых нет преобладающих излучений от таких отдельных источников, что делает необязательным дальнейшее рассмотрение шумов SCN в контексте измерений MMN.

4 Ключевые параметры

Описанные здесь процедуры измерения дадут результаты для следующих параметров радишума:

WGN:

- среднеквадратичный уровень, представленный как отдельное значение или средние значения для каждого часа суток.

IN:

- пиковый уровень, представленный в виде распределения.

- Длительность импульса/пачек импульсов, представленная в виде распределения.
- Период импульса/пачек импульсов, представленный в виде распределения.

5 Принципы измерений

Составляющую белый Гауссовский шум (WGN) можно измерить с помощью среднеквадратичного детектора. Этот метод измерения далее называется "среднеквадратичным методом". Используя описанной в п.10.3 20%-е уменьшение, можно получить среднеквадратичное значение шума непосредственно при сканировании частот, даже если некоторые частоты заняты полезными сигналами.

Однако IN можно измерить только при помощи быстрой выборки моментальных значений радиочастотной (РЧ) амплитуды. Для получения параметров импульсов эти значения хранятся для рассмотрения в режиме офф-лайн. Измерения предпочтительнее выполняется на отдельной частоте, свободной от полезных сигналов и непрерывных несущих. Максимальное время между двумя последовательными выборками составляет:

$$T_s \leq \frac{1}{2 * RBW}, \quad (1)$$

где:

- T_s : время между двумя последовательными выборками;
- RBW : ширина полосы фильтра, использованного для измерений.

Этот метод измерения далее называется "методом первичной выборки".

6 Тип измерений

Определение истинного уровня и характеристик MMN, включая IN, для всех диапазонов частот может оказаться очень затратной по времени сложной измерительной задачей. Однако когда интерес представляет только составляющая WGN, или когда требуется рассмотреть только определенные диапазоны частот, измерения можно упростить без потерь важной информации и снижения точности. Поэтому для проведения измерений радишума рекомендованы следующие три различные методики:

Тип А: Только WGN. Этот Тип дает в результате только уровни WGN, не учитывая IN. Для его выполнения требуется только измерить оставшийся среднеквадратичный уровень на "свободной" частоте. Можно применять как метод среднеквадратичной выборки, так и метод выборки необработанных данных. Оценка данных относительно проста.

Тип В: WGN и IN. Этот Тип 3 дает в результате уровни WGN и характеристики важных параметров радишума IN. Он требует быстрой выборки данных (метод первичной выборки). Оценка данных более сложная и требует длительной пост-обработки, большую часть которой можно выполнить только на компьютере.

Тип С: WGN, IN и выделение MMN. В дополнение к уровням WGN и характеристикам IN этот Тип в значительной степени выделяет из атмосферного шума составляющие MMN, IN, что может иметь значение в диапазоне частот ВЧ. Процесс измерения аналогичен измерениям для Типа В, но его требуется проводить в двух разных местах, а оборудование в обоих местах должно быть синхронизировано по времени.

Выбор соответствующего Типа измерения зависит от требований, категории окружающей среды и диапазона частот. Если результаты измерений должны быть представлены для общего пользования, рекомендованный Тип подчеркивается.

ТАБЛИЦА 3

Рекомендованные Типы измерений

| Диапазон частот | Измерения вне зданий | Измерения внутри зданий |
|------------------------|----------------------|-------------------------|
| 9 кГц – 300 кГц (НЧ) | А, В | А, В |
| 300 кГц – 3 МГц (СЧ) | А, В, С | А, В |
| 3 МГц – 30 МГц (ВЧ) | А, В, С | А, В |
| 30 МГц – 300 МГц (ОВЧ) | А, В | А, В |
| 300 МГц – 3 ГГц (УВЧ) | А, В | А, В |
| > 3 ГГц (СВЧ) | А | А |

7 Технические характеристики оборудования

7.1 Приемник и предусилитель

Измерительный приемник должен быть стандартным транспортируемым измерительным приемником или спектроанализатором, и любое дополнительное оборудование предусиления, например малозумящий усилитель (МШУ), должно иметь низкий коэффициент шума оборудования и высокую стабильность усиления, что имеет важное значение для качественных показателей измерения шума.

Для того чтобы гарантировать приемлемую степень точности измерений, необходимо поддерживать измеряемый шум на уровне, который как минимум на 10 дБ превышает минимальный уровень собственных шумов оборудования, если используется среднеквадратичный детектор. МШУ может это обеспечить. Это особенно важно на частотах > 20 МГц.

Следует проявлять осторожность в использовании измерительного приемника со встроенной коррекцией ошибок, которая может повлиять на результаты измерений при небольших отношениях S/N . Если эта коррекция шума допускает переключение, ее можно включить. Однако в таком случае никакая дополнительная коррекция не применяется, как описано в п. 10.2.

В таблице 4 приводятся требования к измерительной системе, которые не описывают нового набора технических характеристик измерительных приемников или МШУ, а лишь указывают дополнительные или специфические требования, предъявляемые к приемникам и МШУ, используемым для измерений радишума. Обозначения полос частот также основано на практической реализации систем измерения шума и не указывают на какую-либо конкретную приемную систему.

ТАБЛИЦА 4

Требования к системе измерения шума (приемник/МШУ)

| Функция | Диапазон частот | | |
|---------------------------|--|---|-----------------------|
| | 9 кГц – 30 МГц | 30–500 МГц | 0,5–3 ГГц |
| Диапазон частот | 9 кГц – 30 МГц | 30–500 МГц | 0,5–3 ГГц |
| Вход (антенный вход) VSWR | 50 Ом, номинал < 1,5 | | |
| Перехват 3-го порядка | ≥ 20 дБм (> 3 МГц) | ≥ 10 дБм | ≥ 0 дБм |
| Перехват 2-го порядка | ≥ 60 дБм (> 3 МГц) | ≥ 50 дБм | ≥ 40 дБм |
| Преселекция | Набор субоктавных полосовых фильтров или следящих фильтров | Следящий или неперестраиваемый фильтр Фильтр нижних/верхних частот | |
| Общий коэффициент шума | ≤ 15 дБ (> 2 МГц) | ≤ 2 дБ ⁽¹⁾ (> 20 МГц) | ≤ 2 дБ ⁽¹⁾ |

ТАБЛИЦА 4 (окончание)

| Функция | Диапазон частот | | |
|---|--|----------|----------|
| | | | |
| Подавление помех по ПЧ | > 80 дБ | > 90 дБ | > 100 дБ |
| Подавление помех от зеркального канала | > 80 дБ | > 90 дБ | > 100 дБ |
| Усиление МШУ | ≤ 18 дБ | ≤ 25 дБ | ≤ 25 дБ |
| Стабильность усиления МШУ | ≤ 0,7 дБ при 20–30°С | | |
| Равномерность усиления МШУ в интересующем диапазоне частот | < 0,4 дБ | < 0,4 дБ | < 0,5 дБ |
| АРУ | Результаты измерения должны быть получены без применения АРУ | | |
| Электромагнитная совместимость комплекта измерительного оборудования, включая компьютеры и интерфейсы | Любая помеха, произведенная и полученная этим комплектом, должна быть на > 10 дБ ниже среднего значения измеряемых шумов | | |

(1) Этот коэффициент шума применяется к МШУ.

Когда используется МШУ, требования из таблицы 4 должны выполняться в комплексе приемника и МШУ. Коэффициент шума МШУ является основной составляющей в коэффициенте шума системы.

Необходимо следить за тем, чтобы не перегрузить приемник или МШУ. Для предотвращения перегрузки должен применяться внешний полосовой фильтр. На частотах ниже 30 МГц сигналы с самым высоким входным уровнем создаются радиовещательными станциями. Ослабление полосового фильтра во всех диапазонах частот должно быть как минимум 20 дБ.

Избирательность по ПЧ в пределах 6–60 дБ должна быть известна с высокой степенью точности для того, чтобы рассчитать эквивалентную полосу шумов в тех случаях, когда необходимо сравнить результаты измерений с различными фильтрами промежуточной частоты. Если указано, полоса шумов может быть исключена из технических характеристик приемника. Это полоса (теоретически) прямоугольного фильтра, который пропускает ту же мощность шума, что и фильтр приемника или анализатора.

7.2 Антенны

В соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.372 уровнем шума считается коэффициент шума (в дБ выше теплового шума), а не напряженность поля. Этот коэффициент шума согласно определению относится к антенне "без потерь". Что касается источников шума, которые равномерно распределены по горизонтальной плоскости или сигнал от которых принимается с относительно небольшим вертикальным углом, то можно сказать, что наиболее подходящей антенной без потерь является настроенный вертикальный диполь. Поэтому для измерений шума на частотах выше 30 МГц рекомендуется использовать такой диполь.

На частотах ниже 30 МГц использование вертикальных диполей непрактично, так как их размеры становятся слишком большими. Также они идеально подходят, только если располагаются достаточно далеко от земли, что опять же трудно осуществить. Поэтому в Рекомендации МСЭ-R P.372 в качестве эталонной антенны для частот ниже 30 МГц используется короткий вертикальный монополюс на идеально проводящей почве. В качестве измерительной антенны рекомендуется использовать короткий вертикальный монополюс высотой менее одной десятой длины волны. Однако этот короткий монополюс должен быть электрически согласован с входным сопротивлением приемника (обычно 50 Ом). Это согласование обычно достигается при помощи активных элементов. Важно, чтобы в антенне не было дополнительного усиления, так как это может привести к перегрузке антенны из-за сильных радиовещательных сигналов.

Если применять модель, в которой шумовые сигналы принимаются равномерно со всех углов, тогда нет необходимости корректировать возможную направленность измерительной антенны. Даже большинство направленных антенн, например антенна Яги, достигают своего усиления в предпочтительном направлении только при помощи соответствующего подавления сигналов с других направлений, так что среднее усиление для шумового окружения равно нулю. Поэтому для измерений в ситуациях, когда ожидается, что шум будет равномерно распределен, можно использовать направленные антенны, если они согласованы.

Для вычислений коэффициента внешнего шума необходимо знать коэффициент направленного действия антенны, который можно использовать для вычисления напряженности поля из измеренного напряжения антенны. Часто этот коэффициент указывается производителем, но в следующих случаях следует проявлять осторожность:

- Если антенна направленная, коэффициент направленного действия антенны, указанный производителем, применяется только к направлению главного луча. Однако для вычисления напряженности шумового поля должен использоваться только средний¹ коэффициент направленного действия антенны от сигналов, исходящих из любого направления.
- На низких частотах особенно важно, чтобы выполнялись условия, которые производитель указал для коэффициента направленного действия антенны. Такие условия, как расстояние антенны от земли, препятствия в непосредственной близости от антенны и заземление могут значительно менять коэффициент направленного действия антенны.

Когда коэффициент направленного действия неизвестен, его также можно измерить при помощи эталонной антенны с известным коэффициентом направленного действия, но указанные выше соображения применяются всегда. Практическим способом определения коэффициента направленного действия антенны является сравнение уровней, полученных на измерительной и эталонной антенне, для большого количества излучений из случайных направлений и средних результатов для каждого диапазона частот.

Что касается эталонных антенн из Рекомендации МСЭ-R P.372, и для того чтобы они соответствовали практическим случаям приема, точка электропитания измерительной антенны должна быть на уровне земли или близко к нему для частот до 60 МГц и как минимум на 5 м выше земли для более высоких частот.

8 Анализ неточностей

Конечный результат соответствующего измерения должен отражать реальное значение, которое может быть воспроизведено даже при использовании любого другого измерительного оборудования. Необходимо определить не только среднюю точность, но и допустимые пределы изменения значений. Для каждого измерения необходимо подготовить бюджет неточностей, учитывающий все факторы, влияющие на общую неточность измерения. Информацию об этом можно почерпнуть, например, из "Руководства для выражения неточностей в измерениях" Международной организации стандартизации (ИСО).

9 Процесс измерений

9.1 Выбор мест для проведения измерений

Даже на одной частоте значения уровня радишума, особенно при доминировании MMN, различаются в зависимости от времени и места. В полосах частот ниже 30 МГц значения уровня шума в основном изменяются по времени в зависимости от условий распространения. Поэтому в целом следует провести большое количество измерений в разных местах.

¹ Когда источники шума распределены равномерно, мощность шума, полученного направленной измерительной антенной и теоретической изотропной антенной, будет одинакова. В данном контексте этот коэффициент направленного действия антенны получен при помощи применения соответствующей коррекции к усилению антенны в определенном направлении.

В Рекомендации МСЭ-R P.372 определены четыре разных категории местоположений. Для отражения полученных различий на уровне ММН места проведения измерений следует выбирать в соответствии с их категориями. Тем не менее для лучшего проведения более подробной оценки рекомендуется классифицировать измерения шума по следующим категориям:

ТАБЛИЦА 5

Критерии выбора мест проведения измерений вне зданий

| Категория | Определение |
|------------------------------|---|
| Удаленная сельская местность | В пределах 5 км нет очевидных признаков цивилизации, строений, дорожного движения, электрических установок |
| Сельская местность | Открытая сельская местность, в основном с агропромышленной деятельностью, плотность застройки < 1/га, нет крупных дорог, электрифицированной железной дороги |
| Районы жилой застройки | Деревни и районы скудной жилой застройки без коммерческих и промышленных предприятий. В пределах 1 км нет электрифицированных железных дорог, крупных автомобильных дорог, воздушных линий электропередач или установок высокого напряжения |
| Город | Плотная жилая застройка, включая небольшие коммерческие или промышленные предприятия и магазины. В пределах 500 м нет электрифицированных железных дорог и воздушных линий электропередач или установок высокого напряжения |
| Крупный город | Плотная коммерческая или промышленная застройка и офисы. Рядом могут быть крупные дороги и железная дорога, но не должны преобладать |
| Промышленный район | Районы с плотной застройкой заводскими зданиями и тяжелой промышленности |
| Железная дорога | Места, где преобладают электрифицированные железные дороги |
| Дороги | Места, где преобладает дорожное движение, например шоссе |

Результаты измерений для каждой категории места следует рассматривать отдельно. Для того чтобы иметь возможность создавать корректное статистическое утверждение об уровне ради шума, измерения для каждой категории следует провести как минимум в 10 местах.

Все приведенные выше места для измерения должны быть вне зданий. Для оценки среднего уровня ради шума внутри зданий от многих источников, результаты измерений на соответствующей частоте, проведенных вне зданий, можно уменьшить на ожидаемое ослабление из-за зданий.

Однако опыт показывает, что уровень шума внутри зданий обычно даже выше уровня шума вне зданий. Это происходит из-за преобладания некоторых отдельных источников шума, находящихся внутри зданий, в которых проводятся измерения. Если необходимо исследовать эти условия, то категории мест из таблицы 5 неприменимы, так как неважно находится ли здание в крупном городе, районах жилой застройки или в сельской местности. Вместо них рекомендованы другие категории зданий, которые приведены в таблице 6.

Следует заметить, что при измерениях внутри зданий всегда измеряется сумма шума и помех от отдельных источников. В большинстве случаев внутри зданий будут преобладать излучения от отдельных источников. В соответствии с существующими определениями из Рекомендации МСЭ-R P.372 эти излучения не являются ММН. Однако службы радиосвязи должны справляться со всеми нежелательными сигналами, являются они шумом или помехами, для стабильной работы. Поэтому, по практическим причинам, может быть желательным измерять сумму их обоих.

ТАБЛИЦА 6

Критерии выбора для мест проведения измерений внутри зданий

| Категория | Определение |
|-------------------------|--|
| Дома | Отдельный дом или квартира с обычными электрическими и электронными устройствами для частного применения |
| Офис | Электрические и электронные устройства для делового использования, оборудование информационных технологий (ИТ) и электросвязи, например компьютеры, принтеры, локальные сети |
| Торговый центр | Место с магазинами и супермаркетами |
| Железнодорожная станция | Крупные железнодорожные станции внутри крытых зданий вокзала |
| Терминал аэропорта | Крупные аэропорты внутри зданий терминалов |
| Фабрики | Внутри зданий фабрик, где преобладает электротехническое оборудование |
| Больница | Место, где преобладают медицинские аппараты |

9.2 Выбор частоты

Можно проводить измерения на отдельной частоте (канале) или в определенной полосе частот, например 100 кГц, эти наблюдения можно выполнять автоматически, а результат обрабатывать в соответствии с определенным ранее протоколом.

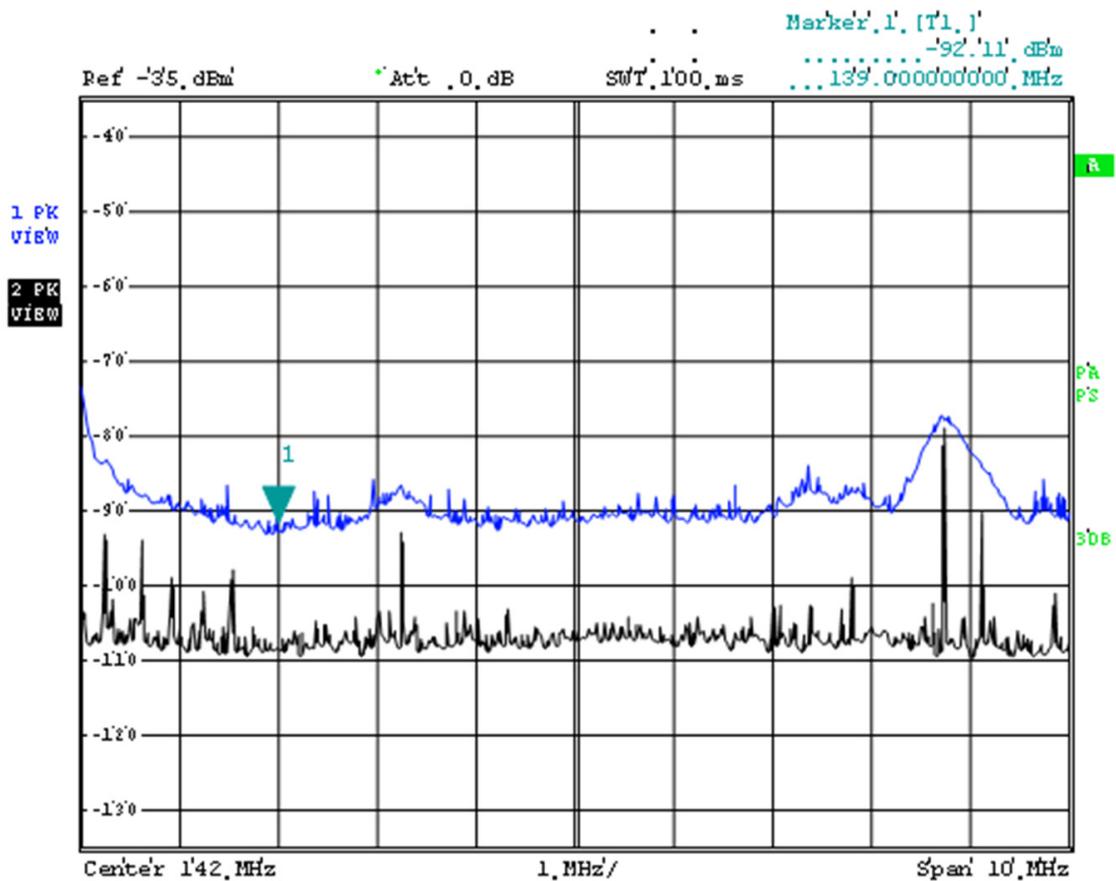
В ВЧ диапазоне частот фактически невозможно найти частоту, которая была бы свободна от полезных сигналов в течение всего 24-часового периода измерений. Самым простым способом найти подходящую частоту или полосу является использование информации об испытательных измерениях или статистические данные. Однако нет гарантий того, что можно использовать все выборки измерений, так как во время проведения исследования канал может неожиданно оказаться занятым. Поэтому вместо выбора фиксированной частоты или полосы для измерений, желательно для определения уровня WGN провести сканирование всего интересующего диапазона частот. Частота, имеющая самый низкий уровень в диапазоне сканирования, будет использована в режиме одной частоты для определения уровня IN в течение как минимум 0,5 с. Эту процедуру выбора частоты рекомендуется повторять перед каждым измерением особенно в диапазоне частот ниже 30 МГц с изменением загруженности в течение суток.

В диапазоне частот выше 30 МГц полезные излучения обычно создаются национальными источниками, и его занятость известна. В этом случае используется фиксированная частота без активных присвоений.

В примере на рисунке 1 показан спектр вблизи частоты 142 МГц, где есть несколько излучений от пользователей частот, записанных при помощи MaxHold с двумя разными разрешающими способностями по частоте (RBW) (верхняя линия: 300 кГц, нижняя линия: 10 кГц). Отмеченная частота выбрана для измерений шума, так как предполагалось, что она свободна от излучений и достаточно удалена от используемых каналов.

Не всегда можно предположить, что выбранная частота содержит только шум, особенно при проведении необслуживаемых автоматических исследований и выбора частот. Выбор диапазона частот, в котором наблюдается в основном фоновый шум с гауссовским распределением амплитуды, увеличивает точность измерений уровня мощности шума. Наиболее достоверным способом доказательства того, содержит ли частота (полоса) только WGN, является применение математической концепции сингулярного разложения (SVD). Этот метод включает создание матрицы автокорреляции полученной из принятого сигнала, а затем оценку результатов, полученных после применения SVD к полученной матрице автокорреляции.

РИСУНОК 1
Выбор одной частоты



SM.1753-01

Наиболее практичным способом выбора подходящей частоты (полосы) состоит в том, чтобы, во-первых, найти возможную полосу для испытаний при помощи сканирования желательного диапазона частот и определить частоту (полосу) с самым низким уровнем. Пригодность к эксплуатации этой частоты (полосы) можно проверить при помощи процесса SVD. Если SVD обнаружит, что результаты сканирования в основном демонстрируют WGN, можно осуществлять измерение. Если нет, следует выбрать другую частоту (полосу).

Подробно метод SVD описан в Дополнении 1.

9.3 Установочные параметры анализатора/приемника

В таблице 7 приводятся рекомендуемые установочные параметры оборудования:

ТАБЛИЦА 7

Установочные параметры анализатора/приемника

| | |
|-----------------|--|
| Время измерения | Имеет смысл получать результат каждые 10–30 с. Для измерений WGN при помощи среднеквадратичного детектора целесообразно использовать время развертки или время сканирования продолжительностью 10–20 с. Для первичной выборки имеет смысл проводить одно сканирование длительностью как минимум 0,5 с каждые 10–30 с. Во время сканирования амплитуды выборки должны собираться на очень большой скорости (частота выборки как минимум 1/RBW). |
| Диапазон частот | Диапазон частот наблюдения полностью зависит от использования выбранной полосы частот; эта полоса частот даже может быть разделена на подполосы или частоты в зависимости от конкретной полосы частот. |

ТАБЛИЦА 7 (окончание)

| | |
|----------------------------------|--|
| RBW | В случае если используется метод сканирования частоты, то ширина полосы частот применяемого фильтра зависит от диапазона частот, разделенного требуемым разрешением. Метод первичной выборки требует, чтобы RBW была бы вдвое меньше частоты, на которой производится выборка. Необходимо определить коэффициент прямоугольности фильтра, для того чтобы можно было сравнить результаты измерений из различных приемников. Рекомендованные значения RBW см. в таблице 8. |
| Детектор | Для измерения WGN необходим точный среднеквадратический детектор, любой другой детектор не подходит. Некоторые производители также называют этот детектор средним (среднеквадратичным). Важно отметить, что этот детектор усредняет мощность, а не напряжение. Такие детекторы обычно основаны на дискретизаторе, чья частота дискретизации определена шириной полосы фильтра. Из этих выборок за определенный период времени вычисляется среднеквадратичная мощность. Этот период времени является периодом измерения. Когда используется среднеквадратический детектор без выборки, время интегрирования этого детектора должно быть равно $10/2B_N$ (кГц), если ожидается 1% неточности. Таким образом, если ширина полосы шума B_N равна 500 Гц, минимальное время интеграции должно быть 10 с. Особое внимание здесь должно быть уделено, если используются приемники прежних поколений. Если измеряемые величины оказываются менее чем на 10 дБ выше уровня шума собственного оборудования, то такой детектор требует специального калибрования. Метод первичных данных должен использовать детектор выборок, поскольку обработка данных, включая расчеты среднеквадратичного значения, будут сделаны позднее. |
| Аттенюатор | 3 дБ Рекомендуется, чтобы внешний аттенюатор между антенной и МШУ установил заданное комплексное сопротивление входа приемника, для того чтобы гарантировать невысокую погрешность измерений. Если можно гарантировать, что антенна точно соответствует сопротивлению входа МШУ, нет необходимости в дополнительном ослаблении. |
| Механизм предварительного выбора | Включен (если допускает переключения) |

ТАБЛИЦА 8

Ширина полос измерения

| Диапазон частот | RBW для Типа измерения А (только WGN) | RBW для Типов измерения В и С (WGN и IN) |
|------------------|---------------------------------------|--|
| 300 кГц – 30 МГц | 100 Гц | 10 кГц |
| 30 МГц – 450 МГц | 1 кГц | 100 кГц |
| 450 МГц – 1 ГГц | 1 кГц | 300 кГц |
| 1 ГГц – 3 ГГц | 10 кГц | 5 МГц |
| > 3 ГГц | 10 кГц | 10 МГц |

В данном контексте RBW является эквивалентной шумовой полосой номинальной ширины полосы по уровню 3 дБ.

Использование RBW с большими значениями, как показано в таблице 8, дает больше данных для обработки из-за более высокой скорости, необходимой для выборки. Однако IN можно рассмотреть более четко. Если используются Типы измерения В и С, для измерений WGN все-таки рекомендуется использовать более узкую полосу пропускания, а более высокую полосу пропускания только для измерений IN.

9.4 Период измерения

Период измерения должен выбираться с учетом времени, в пределах которого можно ожидать значительных изменений в измеряемом шуме. Например, для того чтобы учесть дневные и ночные различия в распространении ВЧ и временно используемое оборудование, стандартный период измерения должен быть равен 24 часам. Для того чтобы учесть сезонные колебания, можно производить повторные измерения ВЧ по нескольку раз в год. Для частот выше 30 МГц рекомендовано, чтобы минимальный период исследования во время рабочих дневных часов был равен 10 часам.

9.5 Отделение промышленного шума от атмосферного (только Тип измерения С)

На частотах ниже 30 МГц значительная часть составляющей IN может создаваться атмосферными шумами, например, молниями. Если целью измерений является только MMN, то атмосферный шум из результатов измерений следует исключить. Однако это возможно только для IN. Для определения происхождения IN необходимо провести измерения в двух разных местах в одно и то же время:

- месте проведения измерений; и
- эталонном местоположении.

Расстояние между этими местами должно быть больше расстояния для обычных излучений MMN, но достаточно малым, чтобы были обеспечены одинаковые условия распространения в ионосфере (рекомендовано: от 500 м до 10 км).

Измерительное оборудование в обоих местах должно быть точно синхронизировано во времени (максимальный сдвиг: 100 мс). Примерами достижения точной синхронизации по времени являются:

- периодическое переключение измерительного приемника к стандартному сигналу точного времени, например DCF77;
- использование сигнала точного времени от встроенного приемника GPS.

Переданное время можно использовать для настройки часов внутреннего процессора, или можно вычислить сдвиг между часами процессора и переданным фактическим временем и использовать его для коррекции временной метки, которая должна сохраняться в каждом измерительном сканировании.

Позднее при помощи этих меток времени каждое сканирование можно сравнить с соответствующим сканированием в другом месте. Если сигнал обнаруживается в обоих местах проведения измерений, он считается атмосферным шумом или полезным излучением, полученным через ионосферу, и исключается из результатов перед дальнейшей обработкой. Сигналы, которые принимаются только в месте проведения измерений, считаются MMN из близлежащих источников.

9.6 Сбор данных и последующая обработка

9.6.1 Измерения WGN при помощи среднеквадратичного детектора (Тип измерений А)

Анализатор спектра сканирует полосы частот в несколько этапов (частотных бинов). Обычно количество бинов в современных анализаторах спектра составляет 500–10 000. Если, например, время сканирования равно 10 с, результатами измерения является база данных (матрица) из от 500×8600 до $10\,000 \times 8600$ выборок измерений в день. Для того чтобы иметь возможность исключения определенных частей из измерений и применять различные статистические методы, впоследствии эта база данных должна быть обработана при помощи соответствующих программ.

9.6.2 Измерение WGN + IN с выборкой первичных данных (Типы измерения А, В и С)

Для того чтобы иметь возможность завершить оценку импульсов, будет необходимо проводить выборки с такой скоростью, чтобы каждый отдельный импульс регистрировался как минимум один раз. Однако это приведет к очень большому количеству данных, которые должны храниться. Для статистической оценки необязательно применение непрерывного наблюдения в диапазоне частот. Вместо этого исследование можно разделить на отдельные сеансы сканирования одной частоты или одной полосы. Один сеанс сканирования должен иметь длительность как минимум 0,5 с, в течение которого уровень мгновенного сигнала захватывается максимально быстро ($T_s \leq 1/RBW$). Затем до начала следующего

сеанса сканирования можно ввести паузу в несколько секунд, в течение которой ничего не измеряется. С помощью этого метода в одном исследовании все равно производится выборка многих миллионов примеров, которая должна оцениваться статистически при помощи специальных программ.

10 Обработка данных

10.1 Обзор

В таблице 9 представлены разные этапы обработки для разных принципов измерения.

ТАБЛИЦА 9
Этапы обработки

| Этап обработки | Измерение среднеквадратичного WGN | Выборка первичных данных |
|---|--------------------------------------|--------------------------------|
| Коррекция шума оборудования | х | х |
| Определение уровня WGN при помощи "20% метода" | х | |
| Проверка 20% предельного значения | х | |
| Построение диаграммы распределения вероятностей амплитуды (APD) первичной выборки | | х |
| Вычисление F_a | х | х |
| Отделение выборок IN от WGN | | дополнительно |
| Объединение цепочек импульсов в пачки импульсов | | дополнительно |
| Отделение импульсов MMN от атмосферного шума | | дополнительно |
| Вычисление распределения параметров импульса | | дополнительно |

10.2 Поправка на шум оборудования

Измеряемые сигналы фактически являются сигналами, наложенными на шум оборудования. Для того чтобы определить разницу между внешним шумом и шумом оборудования, можно провести ручное измерение для определения поправки следующим образом:

- при помощи среднеквадратичного детектора на "свободной" на данный момент времени частоте измерить уровень WGN;
- заменить антенну нагрузкой в 50 Ом и измерить сумму шума системы и нагрузки теплового шума при помощи тех же условий, что и выше.

Если результат отличается от измерений а) и б) и равен K дБ или больше, нет необходимости в дополнительной поправка на шум оборудования. Если меньше, следует линейно вычесть шум оборудования из измерения б) из всех значений внешнего шума:

$$p_{WGN} = p_a - \frac{f-1}{f} p_b, \quad (2)$$

где:

- p_a : уровень шума из измерения а) в линейных единицах;
- p_b : уровень шума из измерения б) в линейных единицах;
- f : коэффициент шума оборудования.

Коэффициент K можно вычислить следующим образом:

$$K(\text{дБ}) = 10 \log \frac{11(f-1)}{f} . \quad (3)$$

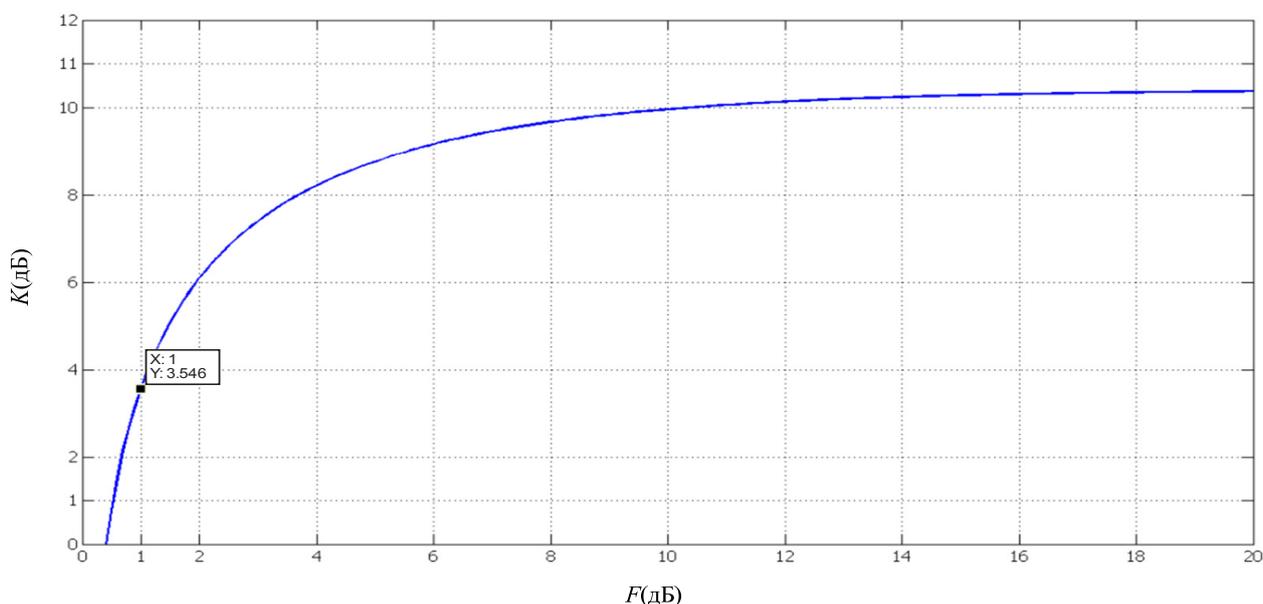
В спецификациях оборудования обычно указывается коэффициент шума F . Так как это коэффициент шума, выраженный в децибеллах, то коэффициент шума f можно вычислить по формуле:

$$f = 10^{\left(\frac{F}{10}\right)} . \quad (4)$$

Рассчитанная кривая на рисунке 2 показывает зависимость значения K от коэффициента шума.

РИСУНОК 2

Порог для поправки на шум оборудования



SM.1753-02

10.3 Определение уровня WGN при помощи "20% метода" (измерение только средневладратичного WGN)

На частотах ниже 30 МГц никогда нельзя предположить, что частота (или полоса) измерения будет свободна в течение всего периода измерений. Поэтому рекомендуется проводить сканирование в небольшой полосе частот вместо того, чтобы измерения выполнять только на одной частоте. Нежелательную занятость можно убрать из результатов, используя только 20% выборок с самыми низкими уровнями и удалив остальные 80%. Однако это также устранил некоторые выборки, содержащие шум, и поэтому, если не будет применена поправка, даст в результате очень низкий уровень шума. Необходимая поправка определяется при помощи подключения к приемнику источника белого шума, сбора нескольких выборок измерения и определения среднего средневладратичного уровня из всех (100%) выборок. Затем 80%, имеющие самые высокие уровни, отсекается и вычисляется средний средневладратичный уровень из 20% выборок с самым низким уровнем. Необходимая поправка представляет собой разницу между средними средневладратичными уровнями (100% и 20%).

10.4 Проверка 20% значения предела (измерение только среднеквадратичного WGN)

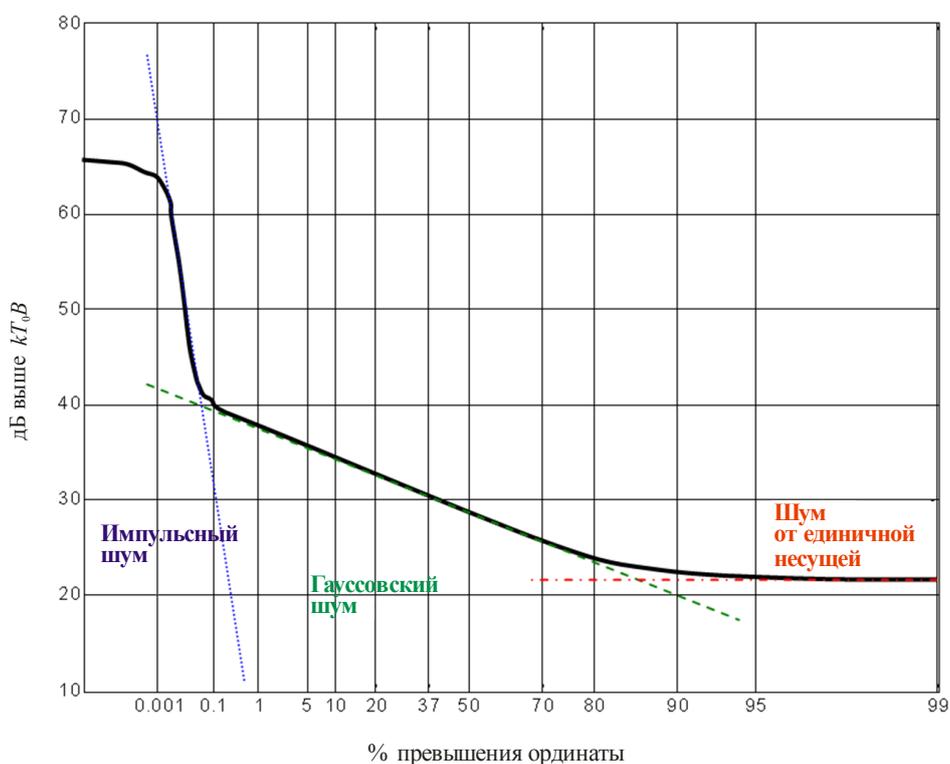
Для диапазона ВЧ 20% самых низких значений являются практическим значением для определения уровня шума. Для остальных диапазонов частот можно проверить, являются ли эти 20% значений верными, или их следует заменить другим значением. В Дополнении 2 описаны некоторые методы проверки значений предела.

10.5 Построение диаграммы APD (только для первичной выборки)

Если для определения WGN используется первичная выборка, то среднеквадратичный уровень теоретически можно определить при помощи линейного усреднения уровней мощности всех выборок, измеренных в течение определенного времени (интеграции). Однако это верно только в том случае, если во время измерений не наблюдалось ничего кроме WGN. Это часто может не подразумеваться, особенно в ВЧ. В таких случаях среднеквадратичный уровень WGN можно определить при помощи построения диаграммы первичной выборки на так называемом графике "Распределения вероятностей амплитуды": На этом графике показано процентное отношение выборки измерений, которая превышает определенную амплитуды (см. рисунок 3).

РИСУНОК 3

Стандартное распределение вероятностей амплитуды



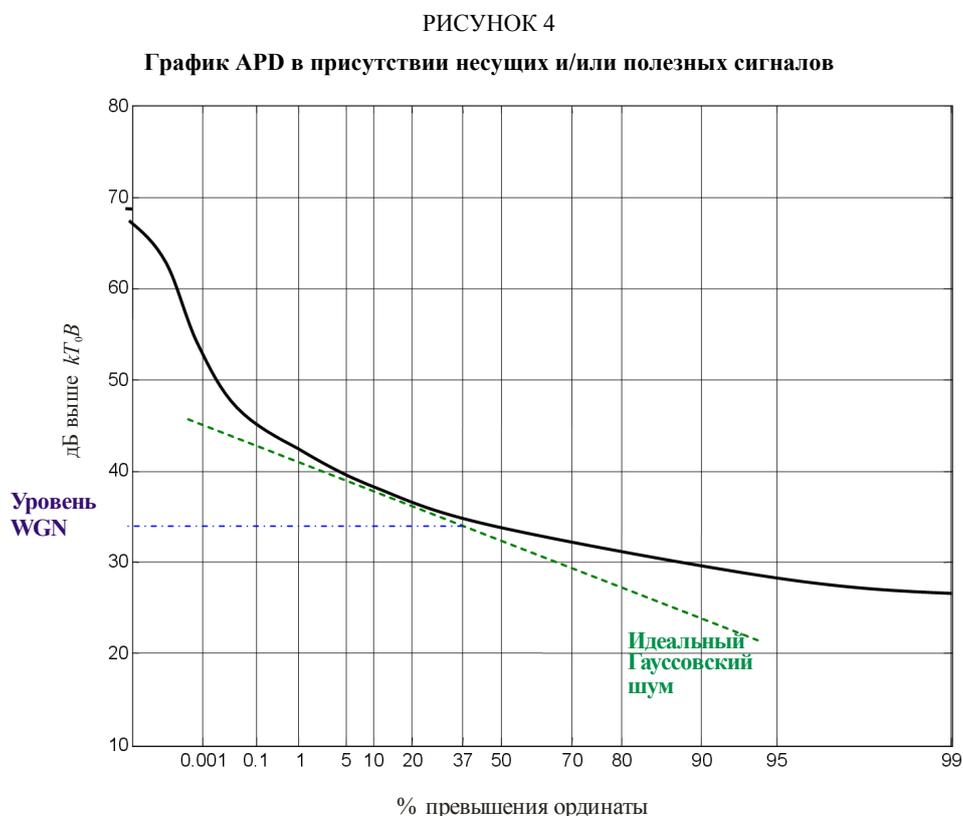
SM.1753-03

Ось x графика APD имеет Рэлево масштабирование. При помощи этого масштабирования легко разделять разные типы шума: Белый шум демонстрирует прямую наклонную линию (посередине графика). Математически можно выразить, что отклонение этой линии составляет -10 , когда обе шкалы переведены в линейный формат. Это значит, что линия падает на 10 дБ между 0,1%, 37%, 90% и 99%.

Верхний край слева обозначает импульсный шум, выравнивание к правому краю происходит из-за единичных несущих от близлежащих источников и границы индикации нижнего уровня измерительного приемника.

Если не наблюдаются единичные несущие или узкополосные полезные излучения, общий среднеквадратичный уровень является значением в точке, где кривая пересекает 37% абсциссы.

Однако наличие несущих и полезных излучений не только дает возрастание к правому краю APD, но возрастание всей кривой, включая значение 37%, и создает изогнутую кривую вместо прямой линии в средней части графика, как на рисунке 4.



SM.1753-04

В этом случае уровень WGN определяется при помощи подгонки WGN к прямой линии с идеальным наклоном WGN. Среднеквадратичный уровень WGN определяется в точке, где касательная пересекает 37% значение абсциссы.

Для того чтобы увеличить точность, измеренные значения, полученные в течение определенного времени, можно перевести в частотную область, применив преобразование Фурье. Второй график APD построен из результирующих значений в частотной области, и снова касательная подгоняется к средней части графика. Среднеквадратичный уровень WGN также является 37% значением APD в частотной области. В тех случаях, когда во время измерения наблюдались полезные сигналы или отдельные радиосигналы, создавался только один из двух графиков APD в зависимости от природы сигналов. Точное общее значение WGN в таком случае ниже обоих 37% значений. Этот метод оценки особенно необходим, когда измерения шума проводятся внутри полос частот, занятых полезными сигналами. Когда частоты выбраны так, чтобы не было преобладающих несущих и полезных излучений, быстрое преобразование Фурье (БПФ) обычно не требуется.

10.6 Вычисление F_a

В соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.372 уровень шума выражается в виде коэффициента шума антенны без потерь из-за внешнего шума F_a в дБ выше теплового шума.

Тепловой шум можно вычислить следующим образом:

$$P_0 = 10 \log(K * t * b), \quad (5)$$

где:

K : постоянная Больцмана $1,38 * 10^{-23}$ (Дж/К);

- t : температура окружающей среды (К);
 b : ширина полосы измерительного фильтра, эквивалентная шуму (Гц).

При эталонной температуре $t_0 = 290$ К (17°C), P_0 имеет значение -174 дБм с шириной полосы 1 Гц.

Уровень измеренного шума является суммой внешнего шума и шума измерительной системы, в основном состоящего из шума приемника и, при использовании МШУ, шума от МШУ. Коэффициент внешнего шума f_a можно вычислить при помощи уравнений из Рекомендации МСЭ-R P.372. В реальных условиях измерений имеет смысл предположить, что температура всех частей измерительной системы одинакова. Более того, ее можно установить равной эталонному значению температуры t_0 17°C , что не внесет значительной ошибки, за исключением особых случаев экстремальных температур. Исходя из этих соображений, основное уравнение, используемое для вычисления f_a , имеет вид:

$$f_a = f - f_c f_t f_r + 1, \quad (6)$$

где:

- f : измеренный общий коэффициент шума в линейных единицах (p_{meas}/p_0);
 f_c : коэффициент шума, относящийся к антенне (мощность на выходе антенны/доступном входе);
 f_t : коэффициент шума, связанный с линией передачи (мощность на входе/выходе кабеля);
 f_r : коэффициент шума принимающей системы (приемника и МШУ, если используется).

Все параметры нижнего регистра даны в линейных единицах, а не в дБ. Для перевода в более часто используемые логарифмические единицы следует заметить, что все параметры являются уровнями мощности, так что для перевода применяется правило:

$$F_a \text{ (дБ)} = 10 \log(f_a). \quad (7)$$

В некоторых практических ситуациях измерений можно сделать следующие допущения:

- Антенна может считаться антенной без потерь ($f_c = 1$), особенно если используются согласованные антенны, например, настроенные диполи для частот выше 30 МГц.
- Потерями на линии передач можно пренебречь ($f_t = 1$), особенно на частотах ниже 30 МГц.
- Шумом приемника можно пренебречь ($f_r = 1$), когда мощность измеренного шума как минимум на 10 дБ выше шума в приемнике (см. п. 10.2).

В этих случаях мощность измеренного шума практически равна мощности внешнего радишума.

Когда измерение производится в дБм, коэффициент шума F_a в дБ можно рассчитать как:

$$F_a = P_n - P_0, \quad (8)$$

где:

- P_0 : мощность теплового шума (дБм);
 P_n : мощность внешнего шума (дБм).

Для диапазонов частот выше 60 МГц, когда используется вертикально настроенный диполь, F_a действительно можно рассчитать, как указано выше. Однако для нижних частот обычно невозможно использовать антенну без потерь.

В таком случае коэффициент внешнего шума можно рассчитать при помощи среднего коэффициента антенны (см. п. 7.2):

$$E = U + AF \quad \text{дБ(мкВ/м)}, \quad (9)$$

где:

- E : напряженность поля дБ(мкВ/м);
 U : напряжение терминала антенны дБ(мкВ);
 AF : коэффициент антенны (дБ)².

Когда AF известен, F_a можно вычислить из уровня измеренного шума по формуле:

$$F_a = P + AF - 20 \log(f) - 10 \log(b) + 202,5 \quad \text{дБ}, \quad (10)$$

где:

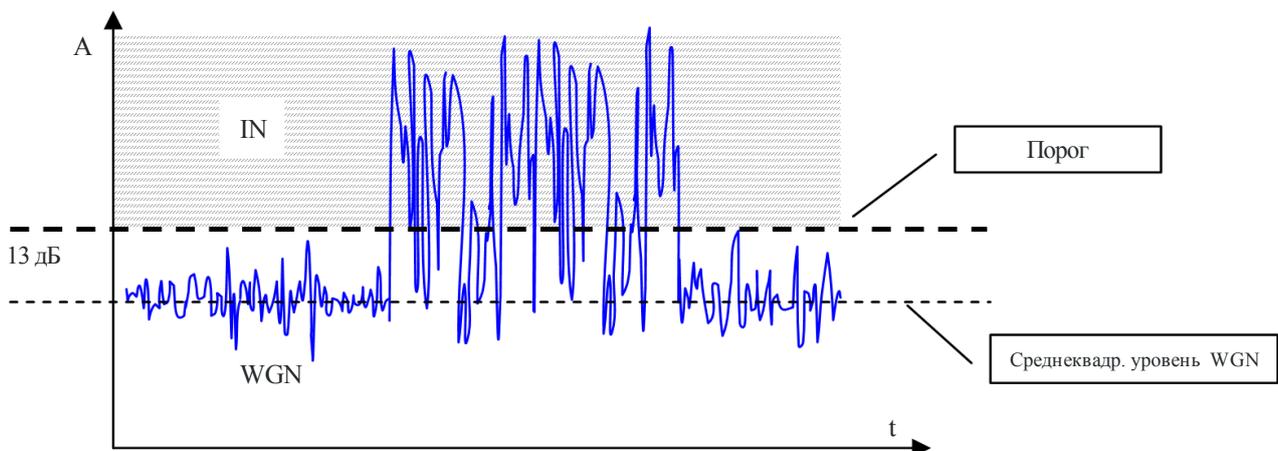
- F_a : коэффициент шума антенны из-за внешнего шума (дБ);
 P : среднеквадратичный уровень WGN (дБм);
 AF : коэффициент антенны (дБ);
 f : частота измерения (МГц);
 b : ширина полосы измерения (Гц).

Приведенная выше формула была получена из формулы (7) из Рекомендации МСЭ-R P.372 для короткого вертикального монополя в качестве эталонной антенны, приведенной выше формулы (9) и предполагая, что используется 50 Ом измерительная система с P (дБм) = U (дБ(мкВ)) - 107 дБ.

10.7 Отделение выборок IN от WGN (только Тип измерений m B и C)

Опыт показывает, что IN из MMN не подходит идеально ни к одной из описанных математическим способом моделей. Если выборка производится достаточно быстро, WGN также может иметь короткие пики, которые сильно превышают средний уровень. Для того чтобы извлечь только выборки, создаваемые IN, необходимо применять порог, который намного превышает пиковые значение WGN. Пороговое значение установлено таким, что оно на 13 дБ выше среднеквадратичного уровня WGN, так как это является обычным коэффициентом CREST (разницей между среднеквадратичным и пиковым значением) для WGN. Все выборки измерений выше порога считаются IN.

РИСУНОК 5
Отделение IN и WGN



SM.1753-05

² Коэффициент усиления антенны обычно указывается просто как "а" и выражается в дБ. Известно, что это некорректно по размерности, но отражает обычную инженерную практику.

10.8 Объединение цепочек импульсов в пачки импульсов (только Типы измерения В и С)

При исследовании РЧ амплитуды фактических импульсов по отношению ко времени можно увидеть, что большинство импульсов фактически являются сериями коротких пиков или "цепочек импульсов". Так как измерение импульсных уровней для ММН фокусируется на возможности помех импульса, необходимо интегрировать пиковые цепочки импульсов в одно событие, которое называется "пачка импульсов". Эта интеграция проводится до тех пор, пока как минимум 50% выборок измерений выше пороговых значений.

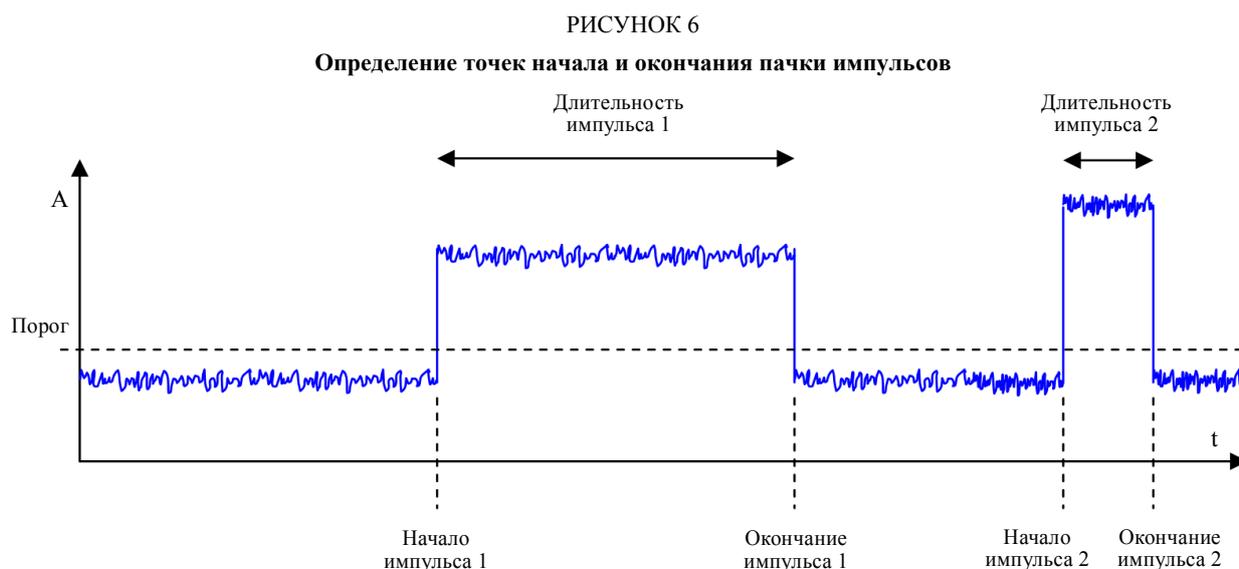
Длительность каждой пачки импульсов в записи вычисляется так, чтобы следующие условия удовлетворялись для всех импульсов, полученных в течение всего события:

- 1 выборка, следующая сразу за точкой старта пачки импульсов, всегда превышает порог, выборка, следующая сразу за точкой окончания пачки импульсов, всегда ниже порога;
- 2 как минимум 50% выборок между началом и окончанием пачки импульсов превышают порог.

В течение как минимум 255% времени длительность пачки импульсов всех выборок перед началом и после окончания пачки импульсов находится ниже порогового значения.

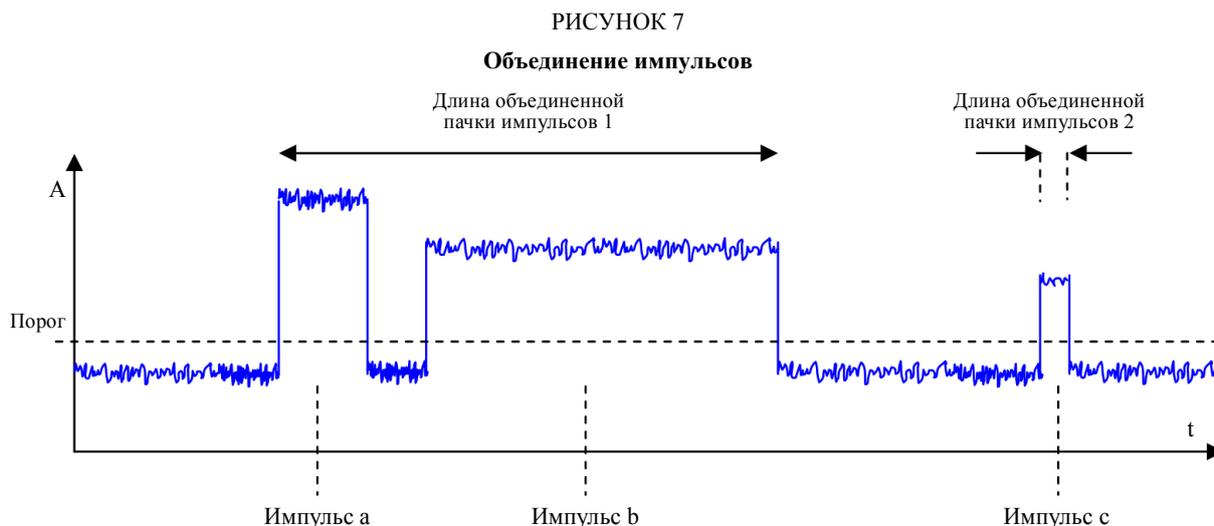
Следствием этих условий является то, что определенные пики в пределах нерегулярных цепочек импульсов объединены в одну длинную пачку импульсов.

На приведенном ниже рисунке показано несколько примеров:



SM.1753-06

Начиная с центра импульса 1 на рисунке 6, "разрыв" между окончанием импульса 1 и началом импульса 2 равен более 25% длительности импульса 1, так что второй пик рассматривается как отдельный импульс.



SM.1753-07

На рисунке 7 все три условия, указанные выше, соблюдены для импульса а), чтобы определить его как законченную пачку импульсов. Однако для импульса b) условие, что как минимум 25% выборок измерения перед началом подимпульса должны быть ниже порога, не соблюдено, если не включить импульс а), и не сформировать законченный импульс (пачку импульсов). Время между окончанием этой пачки импульсов 1 и началом импульса 3 больше 25% длины пачки импульсов 1. Поэтому импульс с) не включен, но рассматривается как отдельный импульс.

10.9 Отделение импульсов MMN от атмосферного шума (только Тип измерения С)

Как сказано ранее, это отделение возможно, только если применяется метод 3 с измерениями в двух местах с синхронизацией по времени. IN из атмосферного шума в основном из-за грозовых разрядов будет получен как в месте проведения измерения, так и в эталонном местоположении, поэтому цель состоит в том, чтобы определить в результатах измерений данный вид сигналов.

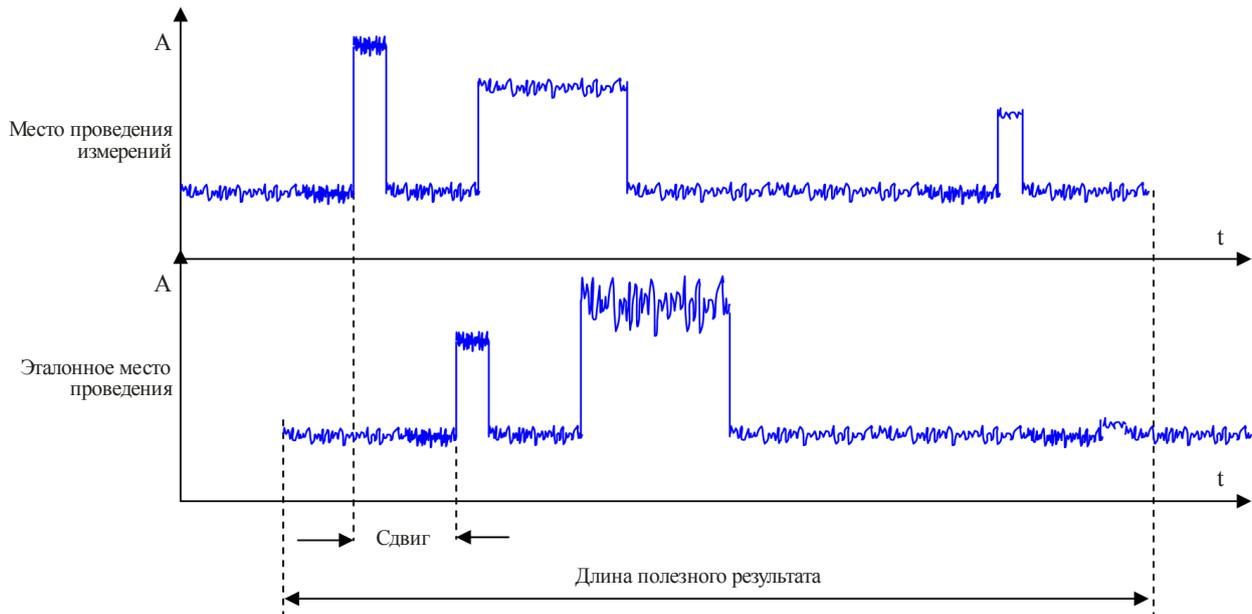
Так как синхронизация измерительного оборудования по времени никогда не будет иметь точность одного отсчета, сначала следует определить точный сдвиг по времени между местоположениями. Это выполняется при помощи сравнения времени начала и окончания всех выборок импульсов/пачек импульсов в месте проведения измерения и эталонном местоположении и вычисления значения корреляции. Затем все выборки из места проведения измерения сдвигаются по времени на одну выборку, и снова вычисляется значение корреляции и т. д. Точка с самой высокой корреляцией будет соответствовать точному сдвигу по времени измерениями. Дальнейшие этапы вычисления применяются только к тем выборкам, которые были измерены в обоих местах проведения (длина полезного результата).

Пример: Максимальная корреляция, полученная на сдвиге +100 мс, применяется к эталонному месту проведения. Время измерения (сканирования) равно 1 с. Следовательно, длина полезного результата равна 0,1–1,0 с в эталонном месте проведения и 0–0,9 с в месте проведения измерений (см. рисунок 8).

В пределах длины полезного результата исследуются выборки начала импульса/пачки импульсов: Если для каждого импульса/пачки импульсов они находятся в пределах допустимого предела 50% от длины импульса/пачки импульсов как в месте проведения измерения, так и в эталонном месте проведения, этот импульс/пачка импульсов удаляются из результатов, так как считается, что они получены через ионосферу и, следовательно, скорее всего, имеют атмосферную природу. Если точка начала импульса/пачки импульсов наблюдается только в месте проведения измерений, она сохраняется для обработки IN.

РИСУНОК 8

Определение временного сдвига между местами проведения измерений



SM.1753-08

10.10 Вычисление распределения параметров импульса (только Типы измерения В и С)

Как было сказано ранее, чтобы полностью охарактеризовать IN требуются следующие параметры:

- уровень импульсов/пачки импульсов;
- длина импульсов/пачки импульсов;
- частота повторений или период импульсов/пачки импульсов;
- общее время импульсов/пачки импульсов.

Так как первые три параметра изменяются случайным порядком, их значения должны выражаться в виде диаграммы распределения.

10.10.1 Уровень импульсов/пачки импульсов

Общий уровень импульсов/пачки импульсов (уровень IN) можно точно измерить только для импульсов/пачки импульсов с длиной как минимум $1/RBW$. Так как импульсы/пачки импульсов могут создавать помехи для современных цифровых систем связи, только когда их длина равна, по меньшей мере, времени символа, выбор RBW в соответствии с таблицей 8 уже дает в результате значения измерения, которые отражают истинную возможность помех. Однако уровень IN все еще зависит от RBW. Поэтому, если присутствуют уровни IN, следует указать на использование RBW. Для того чтобы не зависеть от ширины полосы измерения, рекомендуется нормализовать измеренные результаты с использованным RBW и указать уровень IN в качестве плотности уровня. Тогда значения оси у APD IN выражаются в дБ(мкВ/МГц). Для перевода значения измеренного IN в плотность уровня IN применяется следующая формула:

$$Wg = U + 20 \log(1/b) \quad \text{дБ(мкВ/МГц)}, \quad (11)$$

где:

- Wg : спектральная плотность дБ(мкВ/МГц);
- U : напряжение измеренного шума от антенны без потерь дБ(мкВ);
- b : ширина полосы шума (МГц).

В случае если антенну нельзя считать антенной без потерь, к напряжению измеренного шума следует применять соответствующую поправку согласно п. 10.6.

Для каждой частоты и места проведения будет одна диаграмма распределения IN в соответствии с таблицами 5 и 6.

10.10.2 Длина и период импульсов/пачки импульсов

Как только определены выборки начала и окончания импульсов/пачки импульсов, длительность каждого импульса/пачки импульсов вычисляется по формуле:

$$N_1 / f_s, \quad (12)$$

где:

N_1 : количество выборок между началом и окончанием импульсов/пачки импульсов;
 f_s : частота выборки.

Период импульсов/пачки импульсов вычисляется по формуле:

$$N_2 / f_s, \quad (13)$$

где:

N_2 : количество выборок между последовательными точками начала импульсов/пачки импульсов;
 f_s : частота выборки.

10.10.3 Общее время импульсов/пачки импульсов

Общее время импульсов/пачки импульсов приводится в виде процентного отношения общего времени исследования:

$$i = (N_i / N) * 100, \quad (14)$$

где:

N_i : количество выборок, превышающих порог IN;
 N : общее количество выборок измерения.

11 Представление результатов

11.1 Измерения WGN

Кроме представления в единицах F_a , уровень шума обычно выражается также в единицах напряженности поля, особенно на частотах ниже 30 МГц. Для этого типа представления требуется перевести мощность измеренного шума при помощи следующего уравнения из Рекомендации МСЭ-R P.372:

$$E_n = F_a + 20 \log(f / \text{МГц}) + B + 95,5, \quad (15)$$

где:

F_a : коэффициент шума из-за внешнего шума ($F_a = 10 \log(f_a)$);
 f : частота измерения (МГц);
 B : логарифмический шум, эквивалентный ширине полосы измерения ($B = 10 \log(b)$).

Уравнение (15) действительно для вертикальных монополей. Для согласованных диполей значение 95,5 следует заменить на 99,0.

В диапазонах частот ниже 30 МГц радишум значительно изменяется в течение дня. Поэтому результаты вычислений следует предоставлять за 24-часовой период.

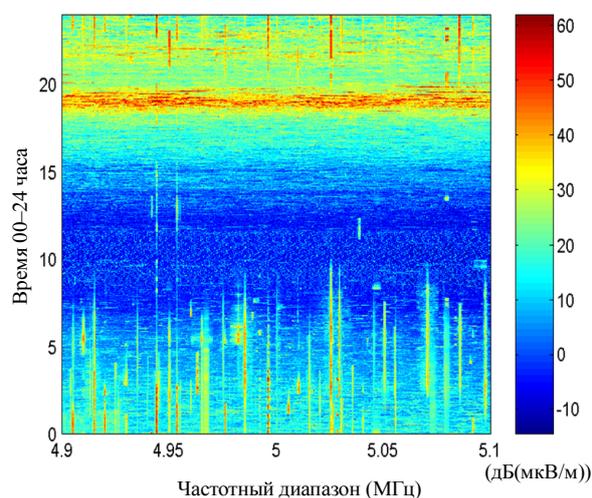
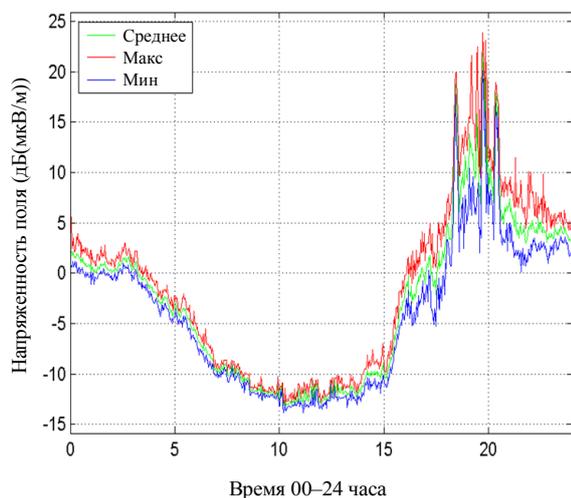
На рисунке 9 приведен пример результатов измерений на частоте 5 МГц (4,9–5,1 МГц). На диаграмме слева видны максимальное, среднее и минимальное значение в течение 24-часового периода, а справа показана спектрограмма всех сеансов сканирования за 24 часа.

РИСУНОК 9

Усредненное, максимальное и минимальное значение и спектрограмма за 24-часовой период

©TSO Nera значения уровня шума полосы частот: 4,9–5,1 МГц
дата: 17.07.2004 г.

©TSO Nera спектрограмма, дата: 17.07.2004 г.



SM.1753-09

Результаты также можно интегрировать за период 1 час и представить в виде таблицы (одно значение для каждого часа).

Другим способом является представление результатов WGN в виде так называемой коробчатой диаграммы. В блоке вычисляются и показываются максимальные, верхние 90%, усредненные, нижние 10% и минимальные значения для каждого часа.

РИСУНОК 10

Принцип коробчатой диаграммы



SM.1753-10

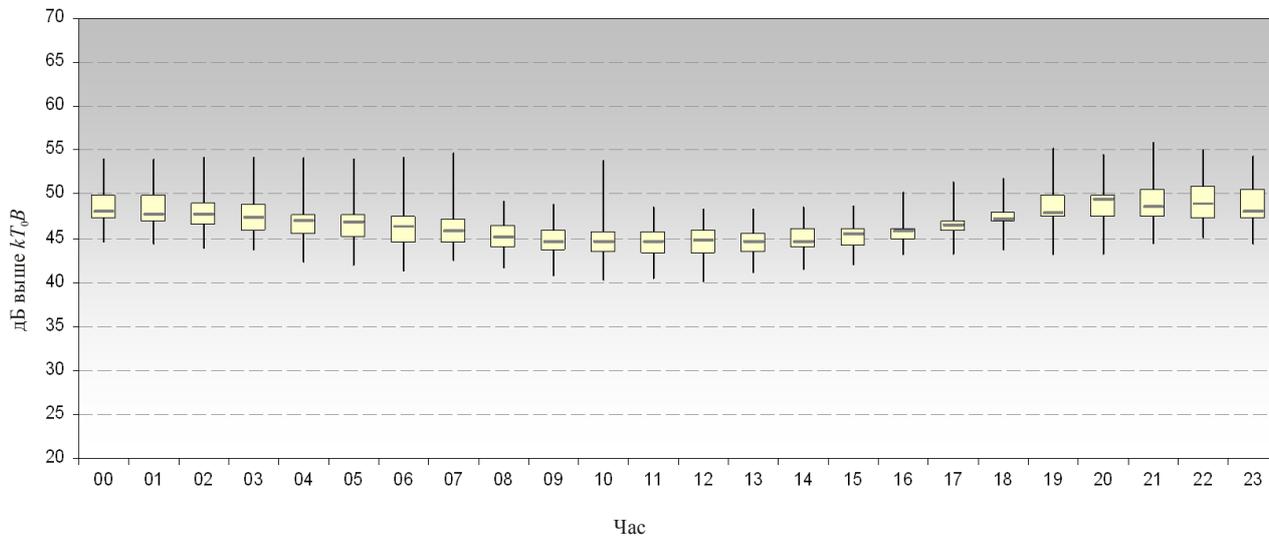
В частности коробчатая диаграмма используется для отражения в одной диаграмме результатов множества измерений.

На рисунке 11 показана коробчатая диаграмма, объединяющая результаты 23 измерений, проводившихся в сельской местности.

РИСУНОК 11

Среднеквадратичные результаты WGN, представленные в виде коробчатой диаграммы

Коробчатая диаграмма для сельской местности на частоте 5 МГц



SM.1753-11

11.2 Измерения IN

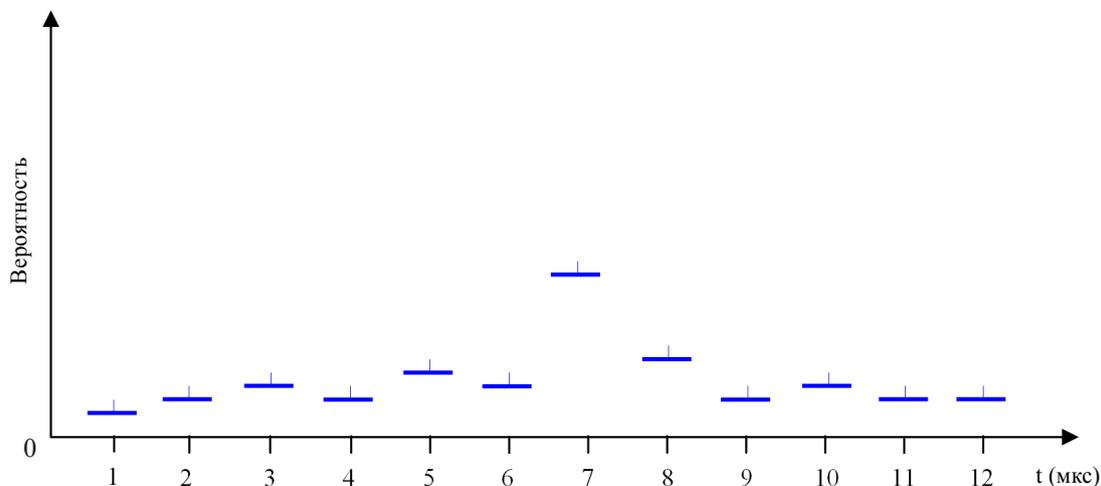
Статистические данные об уровне импульсов/пачек импульсов лучше всего отражаются на графике APD, как, например, на рисунке 3. Если в APD включены все выборки (выборки IN и WGN), относительное количество импульсов можно рассчитать напрямую из графика, считывая значения в тех точках, где график отклоняется от прямой линии влево. В примере на рисунке 3 это будет в точке 0,1%.

Однако более подробную информацию о распределении уровней импульсов можно получить из APD, возникшего только из выборок IN и преобразованного в плотность уровней (см. п. 10.10.1).

Распределение длины и периода импульсов/пачек импульсов лучше всего можно представить в виде графика, отражающего относительную вероятность по отношению к самим длительности или периоду, как на рисунке 12.

РИСУНОК 12

Пример распределения длины импульсов/пачек импульсов



SM.1753-12

Пример показывает, что большая часть импульсов имеет длину 7 мкс.

Разрешение по времени соответствует частоте дискретизации.

12 Ограничения

Описанный подход к отделению IN от WGN и расчету их ключевых значений приводит к следующим ограничениям параметров IN:

ТАБЛИЦА 10

Ограничения для IN, могущего быть измеренным

| Параметр | Значение |
|--|---|
| Самый низкий уровень IN | На 13 дБ выше уровня WGN |
| Самая малая длина импульса | 1/частоту выборки |
| Самая большая длина импульса | Для измерений при помощи анализатора с качанием частоты: время развертки Для непрерывных измерений: время измерения |
| Самая низкая псевдослучайная функция (PRF) | Для измерений при помощи анализатора с качанием частоты: 1/время развертки Для непрерывных измерений, например FFT: 1/время исследования |
| Самая высокая PRF | Частота выборки/2 |

Дополнение 1

Проверка выбора частоты WGN при помощи SVD

SVD является аналитическим методом определения того, что измеренный шум является не гауссовским. В целом SVD является матричной технологией последовательных приближений, которая отфильтровывает нулевые значения и работает с сингулярными числами матрицы. Матрицы относятся к сигналам, а SVD эффективно отделяет данные шума от данных сигнала.

Применение SVD для определения Гауссовского шума является процедурой, состоящей из трех этапов:

Этап 1: При помощи значений I и Q измеренного сигнала формируется комплексное значение $x(n)$ с длиной N , при помощи значений измеренного сигнала создаются оценка автокорреляционной последовательности (ACS) посредством длины M и автокорреляции посредством этой последовательности следующим образом:

Сначала определяется порядок p размера матрицы автокорреляции R_x . Этот размер зависит от доступных выборок данных. Если ACS с длиной M была вычислена при помощи измеренных значений N в сканировании, размер матрицы автокорреляции равен $(p + 1) * (p + 1)$, где $M = p + 1$. Можно использовать количество менее $p = 19$, но в принципе более высокое значение p даст лучшую классификацию.

Затем создается (общая комплексная) оценка при помощи матрицы автокорреляции \hat{R}_k :

$$\hat{R}_x = \begin{bmatrix} \hat{r}_x(0) & \hat{r}_x^*(1) & \hat{r}_x^*(2) & \cdots & \hat{r}_x^*(p) \\ \hat{r}_x(1) & \hat{r}_x^*(0) & \hat{r}_x^*(1) & \cdots & \hat{r}_x^*(p-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{r}_x(p) & \hat{r}_x^*(p-1) & \hat{r}_x^*(p-2) & \cdots & \hat{r}_x^*(0) \end{bmatrix} \in \mathbf{C}^{(p+1) \times (p+1)}, \quad (16)$$

где:

$$\hat{r}_x(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x(n+m)x^*(n). \quad (17)$$

Знак * обозначает сопряженную величину. Стоит отметить, что, так как R_x является матрицей автокорреляции, уникальные значения ACS $p+1$ используются для заполнения матрицы. Эти уникальные значения созданы при помощи уравнения (17). Каждое из этих значений использует до N измерений.

Этап 2: На этом этапе вычисляются сингулярные значения матрицы из уравнения (16), применяя SVD. Из SVD \hat{R}_k вычисляются две вспомогательные унитарные матрицы U , V и диагональная матрица Σ того же размера:

$$\hat{R}_x = U \Sigma V^H. \quad (18)$$

Существует $p+1$ сингулярных значений σ_k матрицы Σ , которые или нулевые или положительные. Следует отметить, что, так как Σ является диагональной матрицей, сингулярные значения являются просто диагональными значениями.

Этап 3: Вычисление величин на основе сингулярных значений как метрических для определения того, является ли шум Гауссовским. В частности, при помощи уравнения (19) вычисляется метрическое значение $v(k)$ и его показатель k :

$$v(k) = \frac{\|\hat{R}_k^{(k)}\|_F}{\|\hat{R}_k\|_F} = \left[\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_k^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_{p+1}^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (19)$$

где $\|\hat{R}_k\|_F$ это Фробениусова норма матрицы \hat{R}_k .

Стоит отметить, что Фробениусова норма соответствует норме вектора, которая появляется при создании колонок матрицы наверху друг у друга.

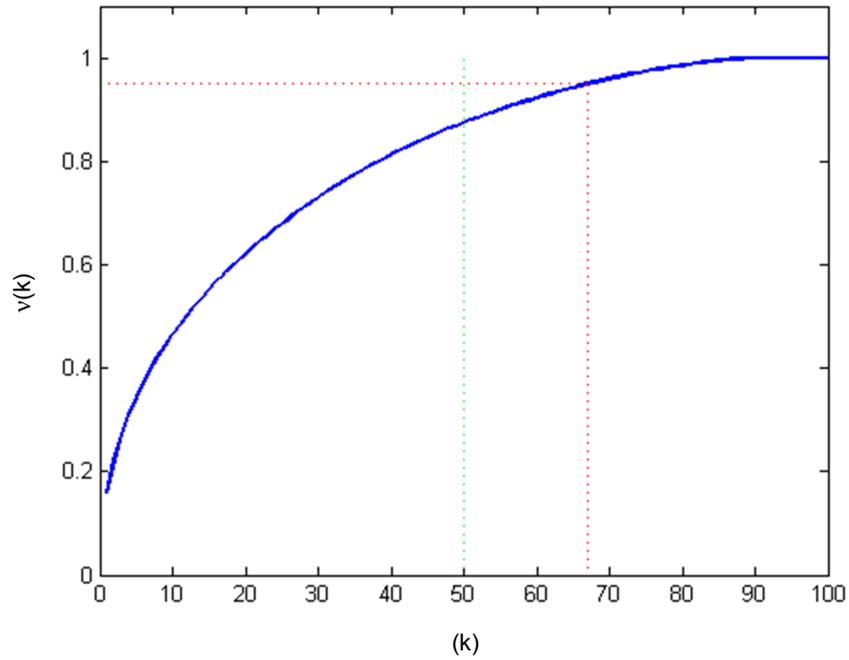
Конечным этапом будет определение эталонного показателя значения k , которое удовлетворяет $v(k) = 0,95$. В зависимости от необходимого уровня достоверности можно использовать другие значения, отличные от 0,95. Уровень достоверности возрастает, когда значение приближается к 1. По результатам эксперимента в качестве практического значения рекомендуется 0,95.

Если $k > \frac{p+1}{2}$, то в выборке измерения содержится только WGN, в противном случае наблюдаются сигнал(ы) плюс шум.

Максимально возможное значение k составляет $p+1$. Следует отметить, что когда в уравнении (19) возрастает значение k , $v(k)$ стремится к 1. На рисунке 13 приведен пример такого графика для сигнала, содержащего только выборки шума.

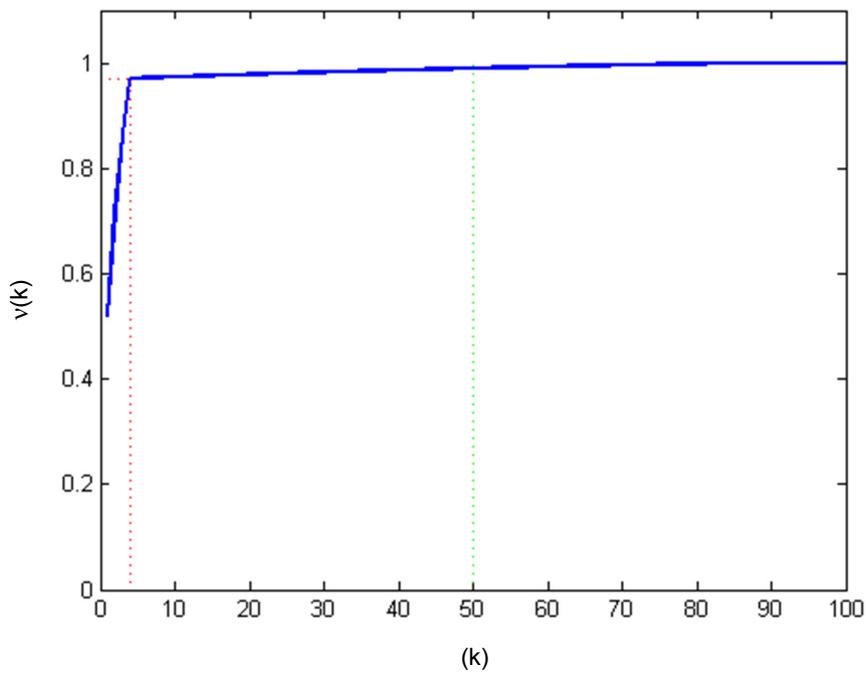
На рисунке 14 приведен пример сканирования, содержащего шум, смешанный с несколькими слабыми несущими.

РИСУНОК 13
График $v(k)$ для WGN
($v(k)$) $p = 99$, $k(v_{0,99}) = 67$



SM.1753-13

РИСУНОК 14
График $v(k)$ для случая с четырьмя несущими (мощность канала -97 дБм)
($v(k)$) $p = 99$, $k(v_{0,99}) = 4$



SM.1753-14

Можно видеть, что хотя отношение S/N включенных несущих очень низкое (APD показывает практически прямую линию), кривая $v(k)$ демонстрирует совсем другие характеристики по сравнению со случаем, когда наблюдается только шум. Поэтому метод SVD гораздо более чувствителен, чем чистое вычисление APD.

Этот метод также применяется к измерениям реальных значений.

Дополнение 2

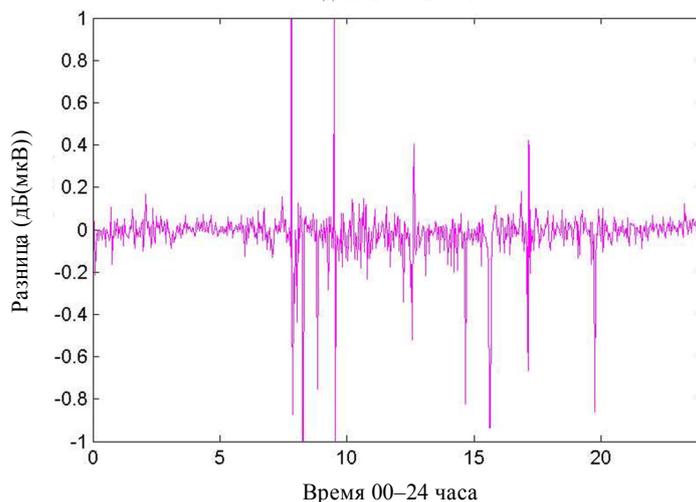
Проверка значений предела при использовании прямых среднеквадратичных измерений

Предполагается, что $X\%$ значений измерений сканирования содержат только выборки шума. Если из процесса вычислений исключить правильное процентное отношение значений, срединное и среднее значение оставшихся выборок шума должны быть одинаковы. Практическим испытанием будет создание диаграммы разницы между средним и срединным значением, которая очевидно испытывает воздействие сигналов без шума.

РИСУНОК 15

Разница между средним и срединным значениями (20% выборка)

©TSO Nera разница срединной и средней ($X\%$) частоты: 10,2–10,4 МГц
дата: 27.07.2004 г.



SM.1753-15

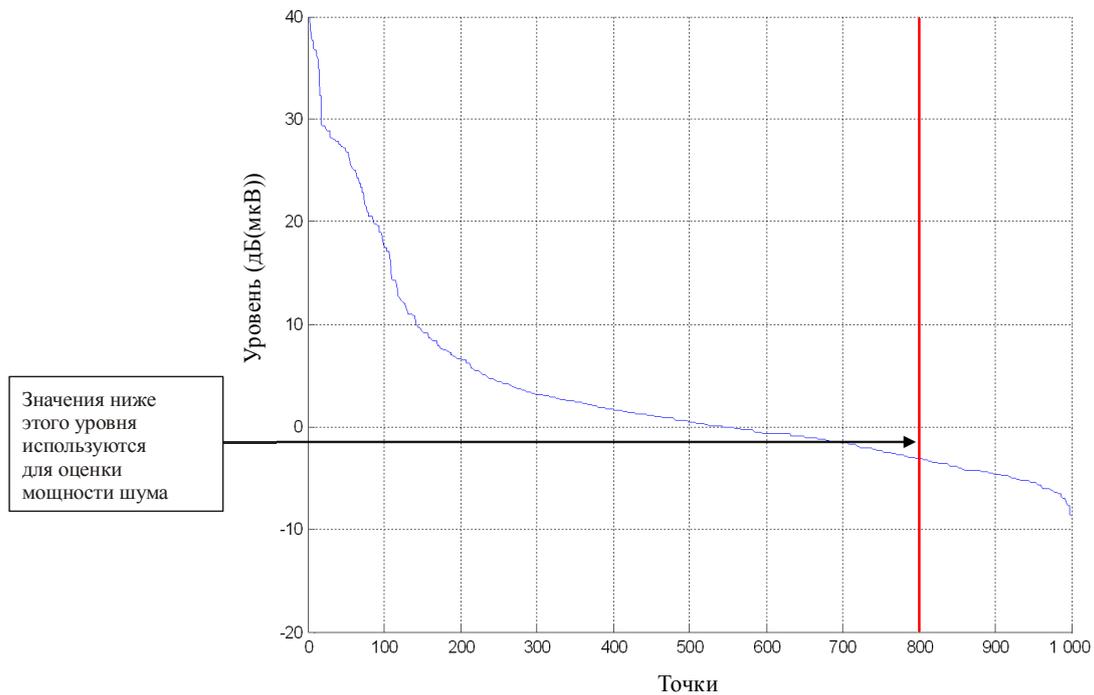
Для примера график на рисунке 15 показывает разницу между средним и медианным значениями с фиксированным процентным отношением в 20% для всех сканирований. Период наблюдения равен 24 часам (00:00 – 23:59). В течение периода с 07:00 до 20:00 грозовые разряды обусловили распределение 20% выборок, имеющих большие кривые и потому большую разницу между срединным и средним значениями мощности.

Другим испытанием будет нанесение на диаграмму отношения нескольких выборок измерения определенного уровня к этому уровню и проверки того, является ли эта кривая справа от точки предела " $X\%$ " плавной, и имеет ли она небольшие плечи. На рисунке 16 приведен пример.

РИСУНОК 16

Случайно выбранное сканирование с классифицированными значениями

Классифицированное сканирование одной частоты



SM.1753-16

Выбранное значение предела (вертикальная линия) находится в точке 800 из 1000 выборок измерений, что соответствует 20%. Можно увидеть, что в этом примере выбор предельного значения не критичен: можно выбрать любое значение между 70% и 10% (300 и 900 выборок), так как это – диапазон, где кривая имеет стабильный наклон.

Оба метода испытаний требуют некоторой *предварительной* настройки. Также в вычислении следует использовать значимое количество выборок, например в данном Типе испытаний нельзя использовать одну единственную выборку.

Справочные материалы

Рекомендация МСЭ-R P.372 – Радишум.

Отчет МСЭ-R SM.2055 – Измерения радишума.

Отчет МСЭ-R SM.2155 – Измерения промышленного шума в ВЧ диапазоне.

Отчет МСЭ-R SM.2157 – Методы измерения для систем электросвязи высокоскоростной передачи данных по линиям электропередач.