



# 4TEST



## Принципы измерения мощности

*Начальное руководство  
по измерению мощности на высоких и сверхвысоких частотах*



# ***Принципы измерения мощности***

***Начальное руководство по измерению мощности  
на высоких и сверхвысоких частотах***

Наша компания постоянно ищет пути совершенствования своих изделий, поэтому содержащаяся в данном документе информация дает лишь общее представление об их возможностях, рабочих характеристиках и эксплуатационной пригодности и не может составлять предмет контрактов. Наша компания оставляет за собой право на внесение изменений без предварительного уведомления. Данный материал сформирован на основе данных, почерпнутых из многих источников, поэтому компания Wireless Telecom Group не несет ответственности за возможные ошибки или пропуски важной для понимания информации.  
Компания-учредитель Wireless Telecom Group © Wireless Telecom Group, 2011 г. Все товарные знаки подтверждены.

[www.WirelessTelecomGroup.com](http://www.WirelessTelecomGroup.com)



## *О нашей компании*

Компания Wireless Telecom Group является глобальной компанией-разработчиком и производителем высокочастотных («RF») и сверхвысокочастотных изделий для промышленности беспроводной связи и промышленности перспективных средств связи. Наша компания предоставляет изделия и услуги во всем мире под торговыми знаками Boonton Electronics («Boonton»), Microlab/FXR («Microlab») и Noisecom. Наши торговые знаки и изделия заслужили свою безупречную репутацию благодаря неуклонному совершенствованию предоставляемых своим заказчикам пользователям технологий в области связи. Наша компания предлагает своим заказчикам полный комплект высокопроизводительных измерительных устройств и компонентов, характеристики которых удовлетворяют требованиям различных стандартов, включая измерители пикового уровня мощности, анализаторы сигналов, источники шума, делители мощности, устройства уплотнения, диплексеры, модули шума и прецизионные генераторы шума. Наша компания является поставщиком рынков коммерческих и государственных учреждений в сфере спутниковой связи, кабельной связи, радарных систем, авиационного электронного оборудования, медицинского и компьютерного оборудования. Штаб-квартира нашей компании находится в городе Парсиппани (Parsippany), штат Нью-Джерси, в зоне Нью-Йорка и поддерживает сеть торговых представительств для поддержки наших изделий и услуг по всему миру.

Компания Wireless Telecom Group, Inc. предпринимает постоянные усилия по внедрению в жизнь своих перспективных разработок. Наш успех в существенной части обусловлен мерой нашими технологическими возможностями, а также нашими стратегиями обслуживания заказчиков.

# Принципы измерения мощности

Начальное руководство по измерению мощности на высоких и сверхвысоких частотах

## Содержание

<b>Раздел 1 Основные принципы измерения мощности на высоких и сверхвысоких частотах</b>	<b>1</b>
<b>Глава 1: Основные положения относительно измерения мощности</b>	<b>3</b>
1.1 Что такое «мощность»?	3
1.2 Зачем измерять мощность?	5
1.3 Историческая справка по измерению мощности	7
<b>Глава 2: Методы измерения мощности</b>	<b>11</b>
2.1 Тепловые датчики ВЧ-мощности	11
2.2 Детекторные (диодные) датчики ВЧ-мощности	14
2.3 Измерение амплитуды с использованием приемника	18
2.4 Измерение амплитуды сигналов с использованием монолитных интегральных схем	19
2.5 Измерение амплитуды с использованием непосредственной выборки ВЧ-сигналов	19
2.6 Что такое измеритель уровня мощности ВЧ-сигналов?	20
<b>Глава 3: Мощность непрерывного сигнала, средняя мощность и пиковая мощность</b>	<b>23</b>
3.1 Ограничения для измерителей уровня мощности непрерывных сигналов	23
3.2 Решение для измерения «пикового уровня мощности»	24
3.3 Все о ширине полосы частот	25
3.4 Значение динамического диапазона	27
<b>Раздел 2 Выполнение измерений уровня мощности</b>	<b>31</b>
<b>Глава 4: Выбор оборудования</b>	<b>33</b>
4.1 Выбор надлежащего измерителя уровня мощности	33
4.2 Выбор датчика ВЧ-мощности	35
4.3 Выбор режима измерения	37
4.4 Сравнение измерителей уровня мощности с анализаторами спектра	40
4.5 Осциллографы и детекторы	48
<b>Глава 5: Калибровка</b>	<b>52</b>
5.1 Заводская калибровка без обратной связи	52
5.2 Одноточечная, двухточечная и многоточечная калибровка линейности	53
5.3 Способы калибровки линейности в условиях эксплуатации	56
5.4 Корректировка амплитудно-частотной характеристики	59

<b>Глава 6: Анализ ВЧ-мощности .....</b>	<b>62</b>
6.1 Непрерывные измерения.....	63
6.2 Запускаемый и импульсный анализ.....	64
6.3 Статистический анализ мощности.....	68
<b>Глава 7: Варианты измерений уровня мощности .....</b>	<b>75</b>
7.1 Измерения импульсов с большой скважностью.....	75
7.2 Статистический анализ сигналов современных систем связи.....	80
7.3 Использование измерителей уровня мощности для выполнения проверки на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости (EMC).....	87
<b>Глава 8: Примечания по рабочим характеристикам .....</b>	<b>91</b>
8.1 Уменьшение уровня помех при выполнении измерений.....	91
8.2 Оптимизация рабочих характеристик автоматического тестового оборудования (ATE).....	94
8.3 Тестирование усилителей систем связи.....	104
<b>Глава 9: Точность измерений .....</b>	<b>110</b>
9.1 Ввод понятия погрешности.....	110
9.2 Вклад различных компонентов в погрешность измерений уровня мощности .....	112
9.3 Типовые вычисления погрешности измерений .....	116
<b>Раздел 3 Справочная информация по измерениям уровня мощности .....</b>	<b>125</b>
<b>Глава 10: Справочные таблицы .....</b>	<b>126</b>
10.1 Преобразование единиц измерения амплитуды.....	126
10.2 Обратные потери / Коэффициенты отражения / Преобразование КСВН.....	127
10.3 Системы беспроводной связи и радиолокационные системы/СВЧ-диапазоны.....	129
10.4 Воздействие длины кабеля датчика.....	129
<b>Глава 11: Решения компании Boonton.....</b>	<b>131</b>
11.1 Измерители уровня ВЧ-мощности серии 4240.....	131
11.2 Измерители уровня ВЧ-мощности серии 4530.....	132
11.3 Измерители уровня ВЧ-мощности серии 4540.....	133
11.4 Анализатор пикового уровня ВЧ-мощности Boonton 4500В.....	134
11.5 Датчики непрерывных сигналов и датчики пиковой мощности компании Boonton .....	135
11.6 Самые популярные датчики пиковой мощности .....	138

## Раздел 1

# ***Основные принципы измерения мощности на высоких и сверхвысоких частотах***

Измерение мощности на высоких частотах представляет собой важный аспект для разработчиков и операторов с самого начала зарождения проводной и беспроводной связи и передачи информации. При сегодняшних сложных типах модуляции, постоянно увеличивающейся потребности в беспроводной передаче и режимах импульсной связи точные и эффективные измерения мощности на высоких частотах стали жизненно необходимыми для обеспечения оптимальных рабочих характеристик коммуникационных систем и компонентов.





**Что такое мощность?** Физическое определение мощности, а также терминов «вольты», «амперы» и «ватты». Информация о том, насколько усложняется измерение мощности переменного тока и высокочастотной мощности в случае комплексного импеданса и сдвига по фазе.

**Почему необходимо измерять мощность?** Существует много причин, из-за которых необходимо измерять высокочастотную мощность в широком диапазоне отраслей промышленности и технологий. В данном разделе рассматриваются вопросы практического использования устройств измерения мощности.

**Краткая хронология измерений высокочастотной мощности.** Измерение высокочастотной мощности получило мощный стимул к развитию с самого начала появления беспроводной связи. Часть этой истории можно отследить по хорошо известным компаниям-первооткрывателям радиосвязи, и большая часть инноваций связана именно с этими компаниями, которые в большинстве своем по-прежнему остаются в данном сегменте измерений. Значительная часть истории измерений высокочастотной мощности относится к северной части штата Нью-Джерси, являющегося родиной компании Boonton Electronics.

**Методы измерения мощности.** Рассмотрение используемых на сегодняшний день ключевых методов измерения высокочастотной мощности, включая следующие решения – измерение на основе выделенного тепла, измерение с использованием диодов, измерение с использованием приемника, измерение с использованием непосредственной выборки высокочастотных сигналов и измерение с использованием интегральных схем.

**Сравнение непрерывных и импульсных сигналов.** Измерение мощности проделало длинный путь, начиная с самых первых способов, касающихся измерений немодулированных сигналов. В данном разделе указаны ограничения для различных типов измерителей мощности модулированных сигналов, и каким образом современные решения повлияли на улучшение ситуации.

**Проблемы, связанные с шириной полосы частот и динамическим диапазоном.** Не каждый сигнал точно соответствует возможностям устройств измерения мощности. Зная ширину полосы частот и динамический диапазон сигнала, можно значительно упростить выбор наилучшего способа измерения.

# Глава 1: Основные положения относительно измерения мощности

## 1.1 Что такое «мощность»?

С точки зрения физики мощность представляет собой скорость передачи энергии в единицу времени. Поскольку существует большое число различных форм энергии (кинетическая, потенциальная, тепловая, электрическая, химическая), также существует большое число различных форм мощности. Одно механическое определение энергии представляет собой силу, умноженную на расстояние – сила, перемещающая объект, умноженная на его перемещения.

$$\text{Энергия} = \text{Сила} \times \text{Расстояние}$$

Для определения мощности или скорости передачи энергию необходимо разделить на время ее передачи. Поскольку расстояние за единицу времени представляет собой скорость, механическая энергия часто рассчитывается как сила, умноженная на время.

$$\begin{aligned} \text{Мощность} &= \text{Сила} \times \text{Расстояние} / \text{Время} \\ &= \text{Сила} \times \text{Скорость} \end{aligned}$$

С электрической точки зрения сила приравнивается напряжению, также называемому «электродвижущей силой» (ЭДС). Эта указывает, под каким «давлением» перемещаются электроны. Скорость аналогична электрическому току, который представляет собой заряд (число электронов) в единицу времени.

$$\text{Мощность (электрическая)} = \text{ЭДС} \times \text{Ток}$$

ЭДС обычно измеряется в вольтах, а ток – в амперах. Один ампер – это один кулон (единица заряда, равная  $6,2 \times 10^{18}$  электронов) в секунду. Произведение тока и напряжения – это мощность в ваттах.

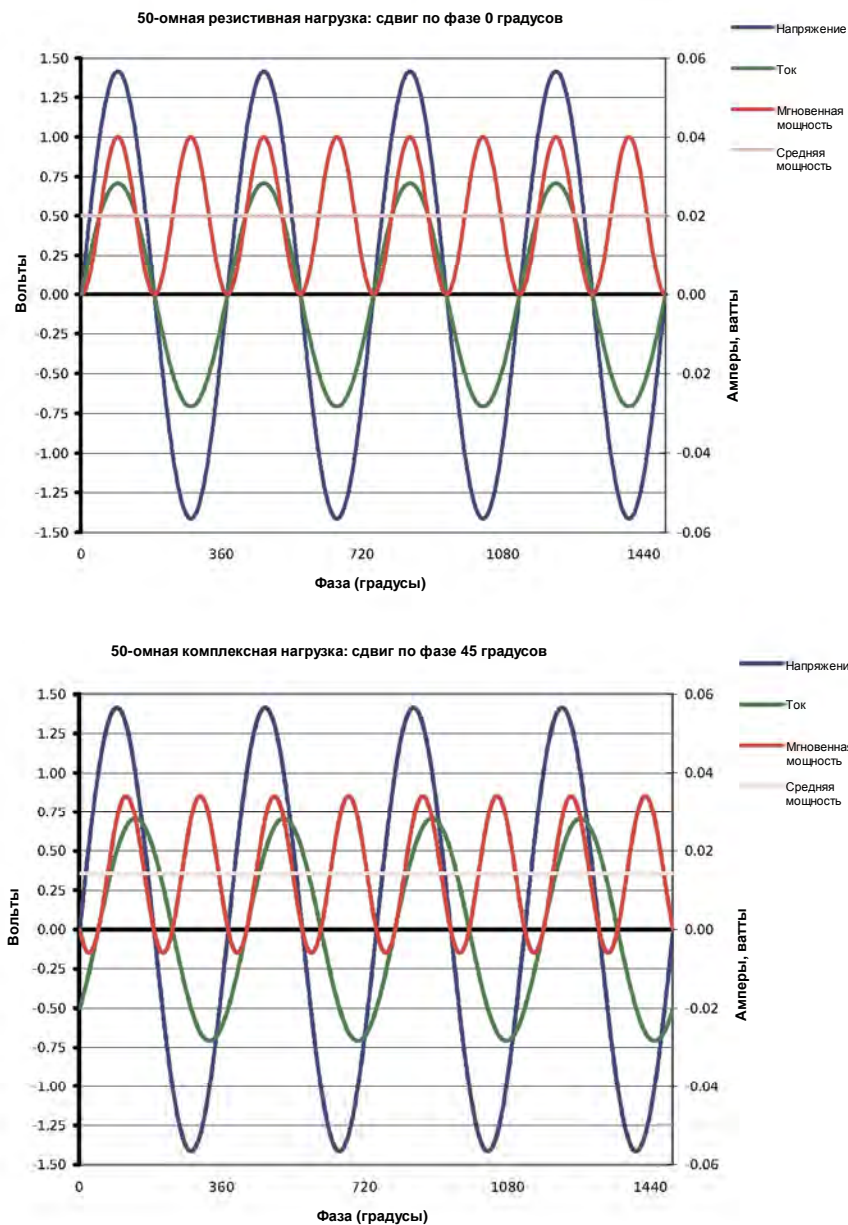
$$\text{Ватты} = \text{Вольты} \times \text{Амперы}$$

При стабильном напряжении или стабильном токе вычисление средней мощности является довольно простым – достаточно перемножить среднее напряжение на средний ток. Однако если оба этих значения изменяются (как в случае переменного тока), то средняя мощность может быть вычислена только путем определения математического среднего значения мгновенной мощности за один или несколько периодов сигнала.

Если ограничиться только синусоидальными формами сигналами переменного тока, то можно увидеть, что мощность изменяется синхронно напряжению и току. На резистивных нагрузках фазы тока и напряжения совпадают. Фазы тока и напряжения одновременно будут либо положительными, либо отрицательными. На графике можно увидеть, что в любом случае мощность будет положительной, поскольку произведение двух отрицательных величин является положительным результатом. См. Рис. 1.1.1.

Если между током и напряжением имеется сдвиг по фазе, то в некоторые моменты напряжение и ток будут иметь противоположные полярности, что приведет к отрицательной мощности. В результате этого средняя мощность уменьшается даже в том случае, если амплитуда напряжения и тока не изменится.

Из-за этого для определения мощности сигнала недостаточно просто измерить напряжение или ток. Предпочтительным является непосредственное измерение уровня мощности, при котором сигнал подается на прецизионную оконечную нагрузку, на которой фаза напряжения и тока практически совпадают. Если это выполнено надлежащим образом, то для определения действительного уровня мощности может быть выполнено измерение напряжения на нагрузке. Рассеиваемая мощность может быть вычислена путем непосредственного измерения тепловой мощности на нагрузке. Более подробно это рассматривается в следующем разделе.



На Рис. 1.1.1 показана мгновенная и средняя мощность, когда напряжение и ток совпадают по фазе на резистивной нагрузке (сверху), и мгновенная и средняя мощность, когда напряжение и ток не совпадают по фазе на комплексной нагрузке (снизу)

## 1.2 Зачем измерять мощность?

Первый вопрос заключается в следующем – почему вообще требуется измерять мощность, а не напряжение? Дело заключается в том, что точные измерения напряжения, пригодные для выполнения последующего анализа, могут выполняться на постоянном токе, а при переменном токе это становится достаточно затруднительно. На звуковых частотах и на низких радиочастотах (диапазон длинных волн, частота ниже 10 МГц) можно отдельно измерять ток и напряжение сигнала. При увеличении частоты это становится все более трудным, и измерение мощности является более простым и более точным методом измерения амплитуды сигнала.

В СВЧ-диапазоне длина волны становится намного меньше, и все большее влияние оказывают отражения сигналов, стоячие волны и несоответствие импеданса. Надлежащим образом спроектированный детектор уровня мощности может минимизировать воздействие этих факторов и обеспечить выполнение точных и повторяемых измерений амплитуды. По этим причинам МОЩНОСТЬ и была принята в качестве первичного количественного показателя при измерении амплитуды любого ВЧ или СВЧ-сигнала.

Существует много причин необходимости измерения ВЧ-мощности. Наиболее распространенными являются проверка соответствия требованиям, предъявляемых на этапе проектирования, оборудования, проверка соответствия требованиям стандартов и нормативных актов, проверка обеспечения безопасности, проверка эффективности системы и проверка защиты компонентов; также существуют тысячи других уникальных вариантов применения, для которых измерение ВЧ-мощности является необходимым или полезным.

В промышленности средств связи (включая беспроводную связь) обычно существует большое число обязательных спецификаций, которые должны быть соблюдены передающими устройствами. Максимальная передаваемая мощность практически всегда является одной из важнейших спецификаций. Федеральная комиссия по средствам связи США (FCC) и другие регулирующие органы определяют предельные уровни мощности передачи в конкретных диапазонах для предотвращения недопустимого взаимодействия оборудования беспроводной передачи. Хотя на самом деле требуется ограничение фактически передаваемой мощности, в большинстве случаев на практике указывается максимальная мощность, подаваемая в передающую антенну.



*Воздействие на передачу*

Помимо проблем, обусловленных необходимостью соблюдения требований, предъявляемых регулируемыми организациями, во многих системах связи также необходимо ограничение мощности передатчика для оптимального использования частотного спектра и географического размещения устройств беспроводной связи. Если два устройства передачи работают в одной и той же полосе частот и расположены достаточно близко друг от друга, то возможно, что приемникам будет тяжело различать сигналы, если уровень одного сигнала значительно выше уровня другого сигнала. Даже при коммерческом вещании мощность передачи каждого объекта вещания лицензируется и должна постоянно контролироваться для того, чтобы операторы не оказывали неблагоприятного воздействия на другие станции, занимающие те же самые или близкие частоты в соседних городах.

Управление мощностью передачи особенно необходимо в современных сотовых сетях, в которых операторы постоянно стремятся максимально увеличить емкость и пропускную способность системы. Во многих современных протоколах беспроводной связи используется тот или иной тип мультиплексирования, при котором большое число мобильных передатчиков (например, сотовые телефоны) одновременно передают данные на общую базовую станцию. В таких ситуациях необходимо внимательно контролировать и управлять мощностью передачи каждого устройства таким образом, чтобы их сигналы поступали на базовую станцию с приблизительно одинаковыми амплитудами. Если одно устройство в канале имеет чрезмерно высокий уровень мощности передачи, то оно воздействует на процесс передачи других устройств, совместно использующих этот канал, и препятствует базовой станции декодировать эти сигналы.

Другая проблема управления мощностью в сотовых системах обусловлена непосредственной близостью базовых станций в перенаселенных зонах. Если какое-либо устройство передает чрезмерно высокий уровень мощности, то оно не только воздействует на сигналы в своей соте, но также может воздействовать на сигналы устройств в соседних сотах. Мобильные устройства в таких системах обычно поддерживают режим управления мощностью своих передатчиков в режиме реального времени как без обратной связи, так и с обратной связью. Без точного управления мощностью каждого устройства в диапазоне базовой станции возможно значительное уменьшение пропускной способности сети сотовой связи.

Чрезмерно высокий уровень мощности также опасен по другим причинам. Системы с более высокими уровнями передачи могут быть опасны для обслуживающего персонала и животных с биологической точки зрения. Часто указываются безопасные пределы по передаваемой мощности для защиты пользователей и посторонних лиц от опасного воздействия ВЧ-излучения большой мощности. В качестве примера потенциальной опасности ВЧ-излучения можно привести обычную микроволновую печь, которая может разогреть еду, а может стать и причиной ожогов. Радиопередатчики и радиолокационные передатчики работают на еще более высоких уровнях мощности и представляют еще большую опасность. Считается, что передающие устройства даже малой мощности (например, сотовые телефоны) могут стать причиной неблагоприятного биологического воздействия. Во всех этих случаях иногда требуется контролировать эффективную мощность для соблюдения требований стандартов или руководящих указаний по обеспечению безопасности.

Измерение мощности также очень важно для схемотехников. Любое электронное устройство может быть перегружено или повреждено чрезмерно высоким уровнем сигнала. Чрезмерно высокий уровень средней мощности может привести к перегреву и к повреждению и пассивных, и активных компонентов. Чрезмерно высокий уровень мгновенной («пиковой») мощности может привести к перегрузке полупроводниковых устройств, пробоем диэлектрических изоляторов или к образованию дуги в пассивных компонентах, соединителях и кабелях.

Даже при уровнях мощности значительно ниже предельного уровня повреждения схемных компонентов чрезмерный уровень мощности может привести к перегрузке системы, ограничению сигналов, искажениям, потере данных и другим нежелательным последствиям. Таким же образом, недостаточный уровень мощности может привести к падению уровня полезного сигнала ниже уровня собственных шумов системы передачи, что также приведет к ухудшению качества сигнала или к его потере.

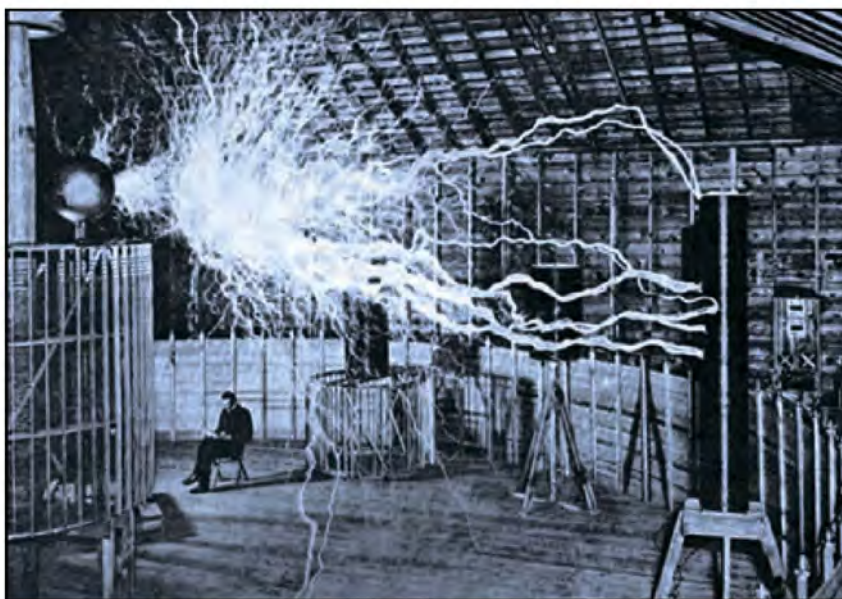
### 1.3 Историческая справка по измерению мощности

Необходимость измерения выходной мощности ВЧ-схем является актуальной с конца XIX-го века, когда Никола Тесла в первый раз продемонстрировал беспроводную передачу. Основным направлением работ Теслы была беспроводная передача электрической энергии, поэтому Тесла часто работал в мегаваттном диапазоне и в качестве относительной индикации мощности использовалась длина формируемого разряда. По очевидным причинам попытки выполнения «контактных» измерений не выполнялись.

В 1888 г. австрийский физик Эрнст Лехер разработал свой способ для измерения частоты ВЧ- или СВЧ-генератора с помощью параллельных проводов или стержней. Это устройство, часто называемое «лехеровскими линиями», состоит из пары параллельных неизолированных проводов или стержней, находящихся на фиксированном расстоянии друг от друга, со скользящей перемычкой между ними. Эти провода формируют высокочастотную линию передачи. При перемещении закорачивающей перемычки в этой линии создаются стоячие волны с пучностями (точки с максимальным напряжением) и узлами (точки с нулевым напряжением). Для вычисления частоты необходимо измерить физическое расстояние между двумя соседними пучностями или двумя узлами на линии передачи (длина волны сигнала равна этому удвоенному расстоянию между пучностями узлами).

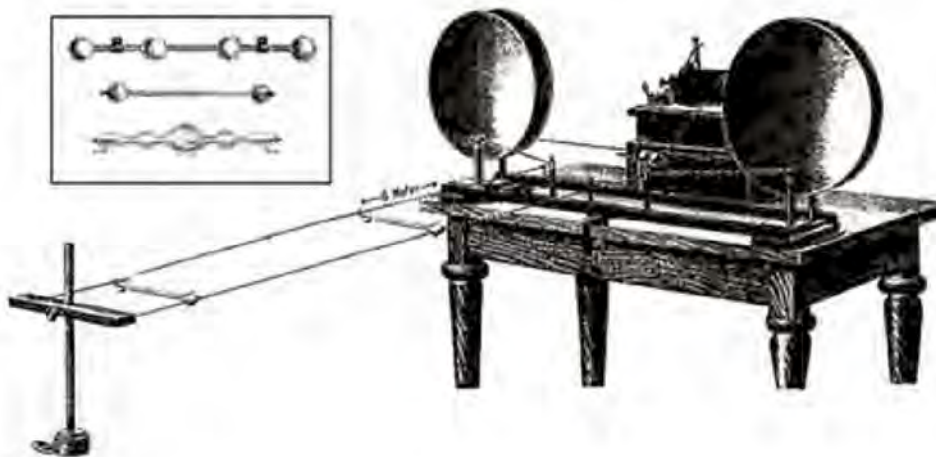
Для определения местоположения пучностей и узлов Эрнст Лехер в качестве детектора мощности первоначально использовал простую лампу накаливания, подключаемую к этим проводам. Уровень свечения лампы накаливания соответствует амплитуде выходного сигнала генератора. Одним из недостатков использования лампы накаливания заключается ее низкий (и переменный) импеданс нити накаливания, который изменяет характеристики линии, и может воздействовать на резонансную частоту стоячей волны и амплитуду выходного сигнала генератора.

По этой причине лампа накаливания была заменена на высокоимпедансную лампу тлеющего разряда. Стеклообразная колба помещалась прямо на провода, а поле ВЧ-сигнала средней мощности соответствовало уровню возбуждения тлеющего разряда в лампе. Лампа тлеющего разряда сильно не изменяет импеданс созданного колебательного контура, что облегчает ее использование для визуального определения местоположения пучностей и узлов при перемещении по проводам. Затем стали использовать неоновые лампы, но свойственное им высокое напряжение зажигания затрудняет точную локализацию узлов (точек минимального напряжения).



*Историческое фото опытов Николы Теслы*

В 1933 г. инженер Вестингхауз, лауреат Нобелевской премии, усовершенствовал часть изобретений Николы Теслы и смог передать несколько сотен ватт на частоте 100 МГц на расстояние около десяти метров. Эта передача ВЧ-энергии без проводов была продемонстрирована на Всемирной выставке в Чикаго. Используемая частота была достаточно низкой, чтобы напряжения передаваемых и принимаемых сигналов можно было напрямую измерить с помощью стандартных электронных устройств того времени – с помощью вакуумной лампы и детекторов с проволочными контактами. Однако на более высоких частотах эти простые методы недостаточно эффективны – лампы и проволочные контакты не могут обеспечить необходимую точность и повторяемость измерений.



*Устройство Эрнста Лехера для измерения амплитуды ВЧ-сигналов*

Братья Вариан использовали другой способ индикации в конце 1930-х годов во время разработки клистрона. Они просверлили маленькое отверстие на боковой стороне объемного резонатора и разместили рядом с ним люминесцентный экран. Свечение клистрона указывает на наличие высокочастотных сигналов, а яркость свечения может использоваться для грубой индикации уровня мощности при выполнении настройки. Необходимо отметить, что на самом деле часть маленьких передатчиков, произведенных в 1960-х годах, содержали маленькую лампу накаливания или неоновую лампу в последнем резонансном контуре для выполнения настройки. Этот резонансный контур настраивается по максимальной яркости свечения лампы. Эти технологии попадают в категорию индикаторов ВЧ-сигналов, а не фактических средств измерения.

Проточный калориметр, известное устройство для других вариантов использования, адаптирован для измерения более высоких уровней ВЧ-сигналов за счет для измерения теплового воздействия ВЧ-энергии, и может использоваться везде, где можно установить «поглощающую нагрузку». Контролируя поток воды и повышение температуры воды, используемой для охлаждения нагрузки, достаточно просто измерить среднюю мощность, рассеиваемую нагрузкой, за длительный промежуток времени.

Использование термопары является одним из самых старых способов прямого измерения низких уровней ВЧ-мощности. В этом случае измеряется тепловое воздействие на нагрузку, и в настоящее время это способ по-прежнему широко используется для измерения «истинной среднеквадратической» мощности. ВЧ-амперметры на основе термопар использовались до 1930-х годов, но их использование было ограничено низкими частотами. Только в 1970-х годах были разработаны термопары, которые предоставили возможность их использования в качестве датчикам в диапазоне СВЧ и СВЧ.

В последующие годы использование термопар и полупроводниковых диодов предоставило возможность улучшения чувствительности и увеличения диапазона измерений. К середине 1940-х годов хрупкие, галеновые детекторы с «проволочными контактами» были заменены стабильными, корпусированными диодами, которые могли быть откалиброваны в соответствии с применяемыми стандартами и которые могли использоваться при выполнении большей части измерений уровня мощности высокочастотных сигналов.

Измерение уровня мощности с использованием полупроводниковых диодов получило дальнейшее развитие в 50-х и 60-х годах, и компания Boonton Electronics внесла заметный вклад в данную отрасль промышленности, первоначально в измерении напряжения высокой частоты. Модель 91В была представлена в 1958 г. и могла использоваться для измерения от одного милливольт до нескольких вольт. При надлежащей оконечной нагрузке поддерживался калиброванный динамический диапазон от -50 дБм до +22 дБм в диапазоне частот от 200 кГц до 500 МГц.

Высокочастотные вольтметры и измерители уровня мощности продолжали развиваться в течение 70-х за счет применения цифровых и микропроцессорных технологий, но все они были устройствами, измеряющими «только среднее значение», и только некоторые из них поддерживали возможность измерения пиковых значений. При необходимости измерения характеристик импульсных сигналов используется осциллограф и диодный выпрямитель для просмотра формы сигнала и выполнения измерения среднего уровня мощности группового сигнала с помощью либо измерителя уровня мощности непрерывных сигналов, либо измерителя более высокого уровня мощности (например, калориметра).





*Высокочастотный вольтметр Boonton SIC*

В «компенсационном ваттметре» использовался диодный детектор, и напряжение постоянного тока заменяло ВЧ-импульс при его отключении, что предоставляло возможность измерения амплитуды импульса при компенсации скважности. Однако более общим подходом является упрощение определения характеристик диодного детектора для коррекции для его импульсной характеристики – способ, впервые внедренный компанией Boonton Radio, местной компанией, внесшей большой технологический вклад в компанию Boonton Electronics.

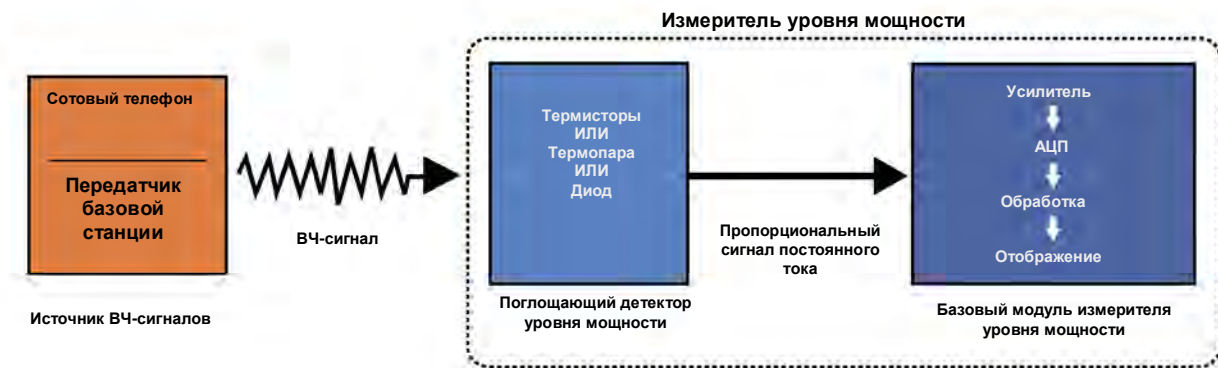
Современная реализация измерителя пикового уровня мощности относится к началу 1990-х годов. Компании Boonton Electronics, Hewlett Packard (позднее – Agilent Technologies) и Wavetek представили устройства, специально предназначенные для измерения импульсных или модулированных сигналов и для коррекции нелинейной характеристик детекторных диодов в режиме реального времени. Эти измерительные устройства развивались в течение длительного времени с применением детекторов с постоянно улучшающимися характеристиками и высокоскоростной технологии цифровой обработки сигналов.

## Глава 2: Основные методы измерения мощности

Используется несколько различных методов измерения ВЧ-мощности. Эти методы разделены на четыре категории:

- Тепловой** Измеряется тепловое действие ВЧ-мощности на чувствительном элементе.
- Детекторный** ВЧ-сигнал выпрямляется («детектируется») для вывода напряжения постоянного тока, пропорционально амплитуде сигнала.
- С приемником** Сначала сигнал принимается схемой типа «тюнер», а затем измеряется его амплитуда.
- С выборкой ВЧ-сигнала** ВЧ-сигнал обрабатывается как сигнал переменного тока АС в основной полосе частот и затем оцифровывается.

И тепловой, и детекторные способы измерения представляются собой измерения «прямого типа», в которых амплитуда ВЧ-сигнала, подаваемого на нагрузку, измеряется посредством преобразования сигнала высокой частоты в легко измеряемый сигнал постоянного тока. Это преобразование «сигнал высокой частоты – сигнал постоянного тока» обычно выполняется в непосредственной близости к источнику сигналов путем подключения преобразователя-датчика малого размера, называемого «датчиком ВЧ-мощности» для тестируемого устройства.



Блок-схема прямого измерения уровня мощности

Способы измерения с использованием приемника и с выборкой ВЧ-сигнала обычно являются косвенными (непрямыми) – сигнал подается в измерительное устройство по кабельному соединению, обрабатывается в многоступенчатой схеме для вывода информации об амплитуде и затем масштабируется по мощности.

Ниже рассматривается каждый из этих способов измерений.

### 2.1 Тепловые датчики ВЧ-мощности

В тепловых датчиках входящая ВЧ-энергия повышает температуру оконечной нагрузки. Повышение температуры нагрузки измеряется либо прямо, либо косвенно, после чего вычисляется подаваемая входная мощность. Самым простым является первый детектор в виде лампочки, используемый Эрнстом Лехером в конце 1800-х годов.

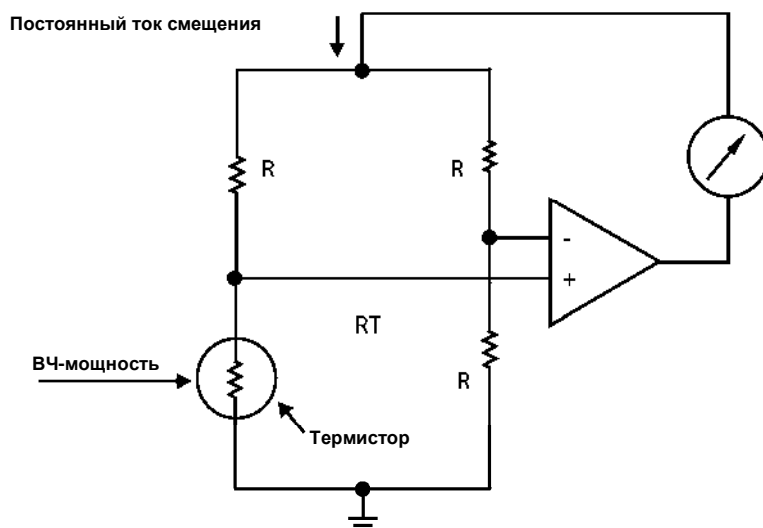


Схема датчика с термистором

В датчиках с термисторами (болометрах) в качестве ВЧ-нагрузки и устройства измерения температуры используется термоэлемент (так называемый «термистор»). Сопротивление термистора изменяется в зависимости от температуры, что обеспечивает простое измерение его температуры путем измерения его внутреннего сопротивления.

Чаще всего термистор размещается в одном углу моста Уитстона, и используется способ замещения постоянного тока, при котором управляемый ток смещения постоянного тока подается на мост для нагрева термистора до тех пор, пока его сопротивление не станет равно сопротивлению других резисторов моста и пока не будет установлено уравновешенное состояние моста. Для усиления выходного сигнала моста и для управления всем мостом с помощью этого тока смещения (за счет нагрева термистора вплоть до установки уравновешенного состояния моста) используется схема автоматической балансировки. Суммарное воздействие заключается в том, что термистор будет использоваться при постоянной температуре, при которой его сопротивление сохраняет надлежащее значение для обеспечения согласованной нагрузки для ВЧ-сигнала – обычно 50 или 100 Ом.

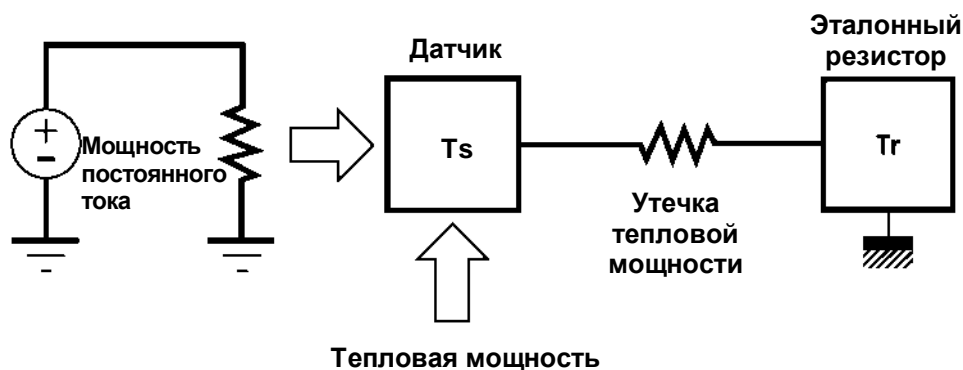


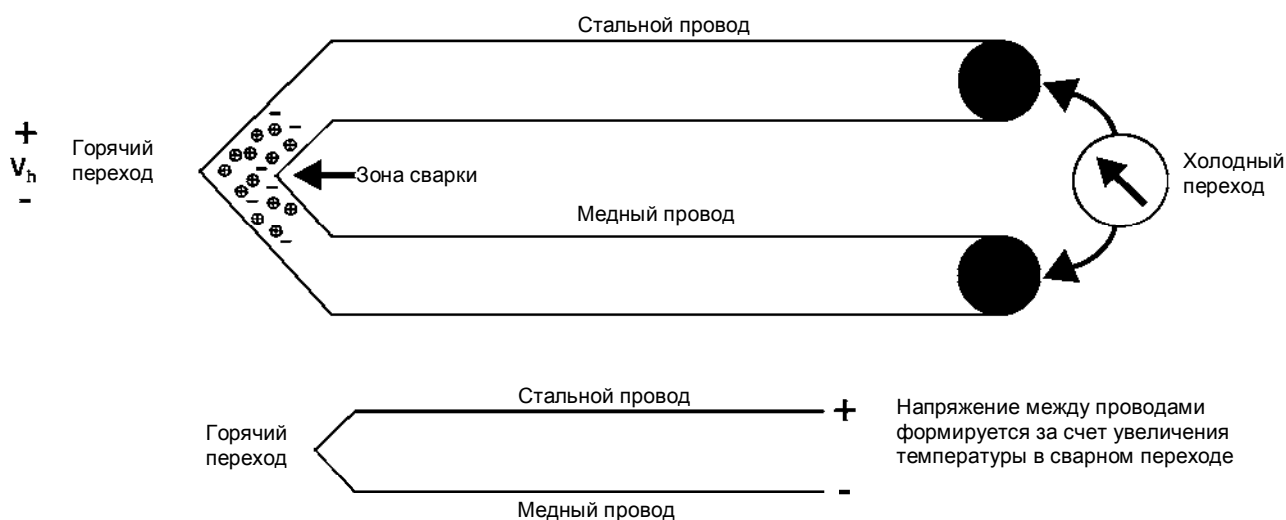
Диаграмма болометра

Общая мощность, рассеиваемая термистором, представляет собой сумму входящей ВЧ-мощности и мощности, обусловленной подачей тока смещения постоянного тока. Мощность, обусловленная ВЧ-нагревом, может быть вычислена путем вычитания эталонной мощности «только по постоянному току» термистора (это значение измеряется при отсутствии ВЧ-сигнала и затем сохраняется) из общей мощности (мощность по постоянному току + мощность ВЧ-сигнала). Когда мост находится в уравновешенном состоянии, рассеяние мощности на термисторе, подачей тока смещения постоянного тока, легко вычисляется как одна четверть общей мощности моста (произведение тока через мост и напряжения на мосте). Другие три резистора в мосте характеризуются малым температурным коэффициентом сопротивления.

На практике применяется два идентичных моста с термисторами, но только один из них используется для измерения мощности ВЧ-сигнала. Второй мост используется для компенсации изменения температуры окружающего воздуха.

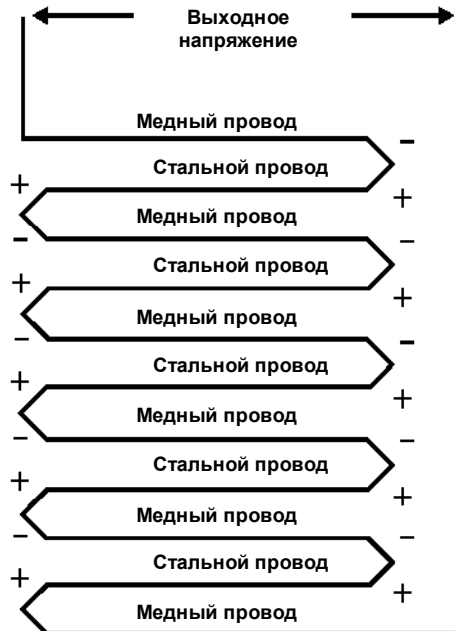
ВЧ-сигнал подается на согласованную нагрузку термодатчика, и измеряется повышение его температуры. Повышение температуры обусловлено действием принципа термопары. Термопара формируется металлургическим переходом между двумя разнородными металлами, который формирует небольшое напряжение в ответ на градиент температуры через каждый металлический сегмент – обычно всего несколько десятков микровольт на градус Цельсия.

На практике в термодатчике мощности может быть последовательно соединено несколько термопар для формирования термоэлектрической батареи. Это обеспечивает увеличение выходного напряжения, что облегчает его усиление и измерение измерителем уровня мощности. Как правило, термоэлектрическая батарея также формирует ВЧ-нагрузку и подключается таким образом, чтобы ВЧ-энергия проходила только через один конец каждой термопары («горячий переход») и нагревала только этот конец. Это выполняется за счет емкостной связи по высокой частоте при поддержании связи по постоянному току для выходного сигнала.



Схема, иллюстрирующая принцип действия термопары

Выходное напряжение термопарного датчика мощности имеет практически линейную зависимость от входной мощности и имеет относительно большую временную константу из-за задержек теплового потока. Это означает, что формируется показание, пропорциональное среднему значению подаваемой ВЧ-мощности. Из-за этого термопарные датчики обычно используются для измерения среднего уровня мощности модулированного сигнала. Из-за относительно низкой чувствительности применение термопарных датчиков существенно ограничено в случаях, когда уровень ВЧ-мощности меньше нескольких микроватт.



Схема, иллюстрирующая термоэлектрическую батарею

## 2.2 Детекторные (диодные) датчики ВЧ-мощности

В диодных датчиках для обнаружения ВЧ-напряжения на резисторе оконечной нагрузки используются высокочастотные полупроводниковые диоды. Эти диоды выполняют преобразование «напряжение переменного тока – напряжение постоянного тока», и это напряжение постоянного тока измеряется измерителем уровня мощности и масштабируется для формирования показания уровня мощности. Строго говоря, эти датчики являются не детекторами уровня мощности, а детекторами напряжения, поэтому изменения импеданса оконечной нагрузки могут привести к большим ошибкам измерений из-за рассогласования по сравнению с тепловыми датчиками. Предыдущие устройства были простыми диодными выпрямителями из галенита с проволочными контактами для формирования грубого диодного перехода.

В диодных датчиках ВЧ-мощности один или несколько диодов выполняют функцию выпрямления (обнаружение пиков сигналов) на высоких уровнях и действуют в качестве нелинейного резистора на низких уровнях, проводя больший ток в прямом направлении, чем в обратном направлении. Это показано на Рис. 2.2.1. Обычно к выходу диода подключается сглаживающий конденсатор для преобразования пульсирующего напряжения постоянного тока в напряжение с установившейся амплитудой. Как правило, используется два диода, поэтому выполняется обнаружение и положительных, и отрицательных периодов несущей; благодаря этому датчик является относительно нечувствительным к искажениям на четных гармониках. Выходное напряжение постоянного тока диодного детектора пропорционально мощности при низких уровнях сигнала и пропорционально пиковому напряжению ВЧ-сигнала при высоких уровнях сигнала.

Для обеспечения высокой чувствительности сопротивление нагрузки, управляемое выходом диода, обычно равно несколькими мегаомам.

Если уровень входного ВЧ-сигнала ниже -20 дБм (пиковое напряжение несущей около 30 мВ), то этого уровня недостаточно для полного открытия диодов в прямом направлении. В этом случае диоды функционируют как нелинейные резисторы, как показано на Рис. 2.2.2 ниже, и формируют выходной сигнал постоянного тока, который почти пропорционален квадрату подаваемого ВЧ-напряжения. Эта область характеристики диодного датчика называется «областью квадратичного детектирования». При работе в этой области среднее выходное напряжение постоянного тока будет пропорционально среднему уровню ВЧ-мощности даже при наличии модуляции. Это означает, что диодный датчик может использоваться для измерения среднего уровня мощности модулированного сигнала, если мгновенная (пиковая) мощность все время находится в области квадратичного детектирования диодов.

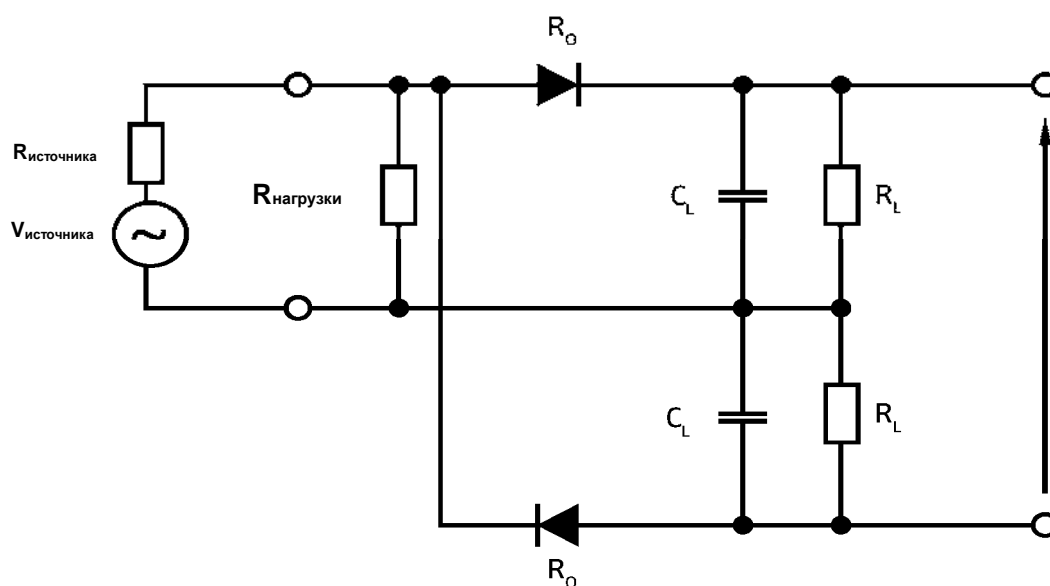


Рис. 2.2.1. Схема сбалансированного датчика с двумя диодами

При уровне сигнала выше 0 дБм (пиковое входное напряжение 300 мВ) диоды переходят в состояние полной проводимости в прямом направлении в каждом периоде несущей, а пиковое напряжение ВЧ-сигнала удерживается сглаживающими конденсаторами. В этой области характеристики датчик функционирует как пиковый детектор (также называется «детектором огибающей модулированного сигнала»), а выходное напряжение постоянного тока будет равно удвоенной амплитуде входного ВЧ-сигнала минус удвоенное падение напряжения на диоде в прямом направлении. Эта область характеристики диодного датчика называется «областью обнаружения пиковых значений». При работе в этой области среднее выходное напряжение постоянного тока будет пропорционально пиковому уровню ВЧ-напряжения.

Динамический диапазон диодных детекторов очень большой, режимы работы в этих двух областях совершенно разные, и ответная реакция датчика является нелинейная во всем динамическом диапазоне. «Область квадратичного детектирования» и «область обнаружения пиковых значений», а также «переходная область» между ними (обычно приблизительно от -20 дБм до 0 дБм), в измерителе уровня мощности должны быть линеаризованы. Этот процесс линеаризации не представляет никаких трудностей для современных измерителей уровня мощности.

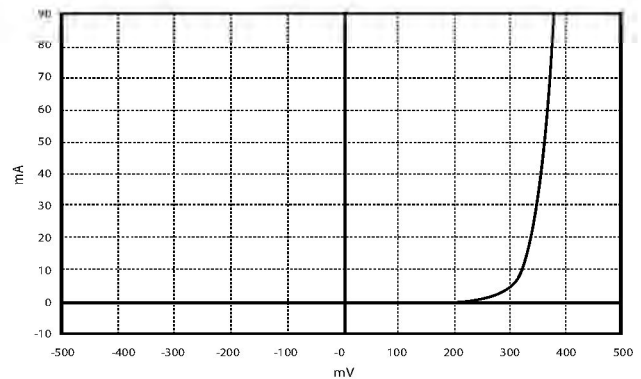
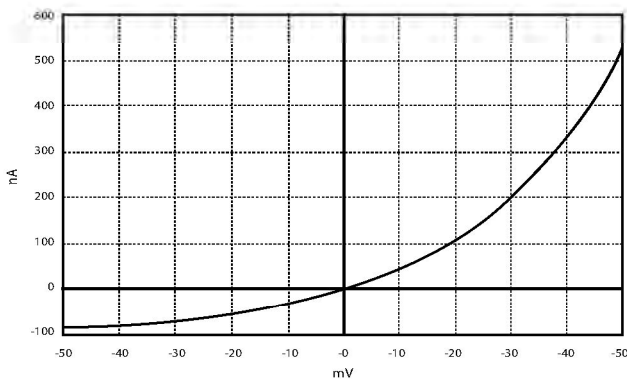
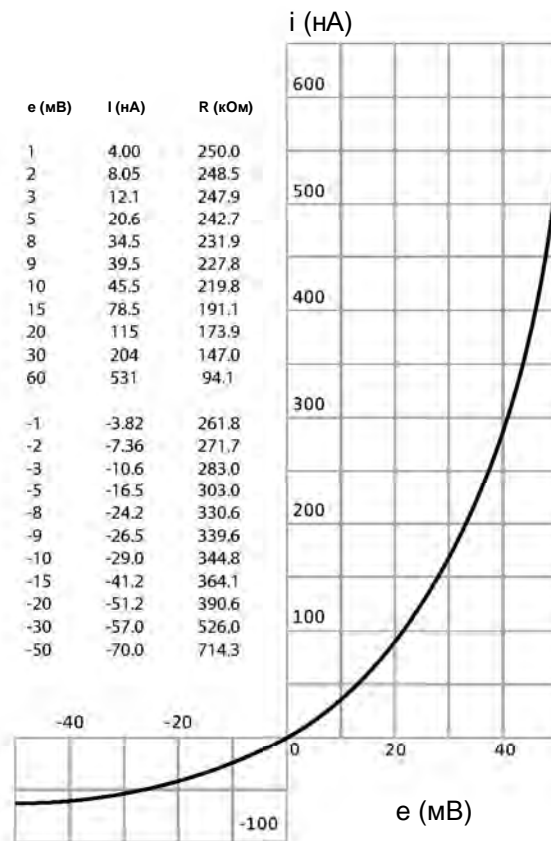
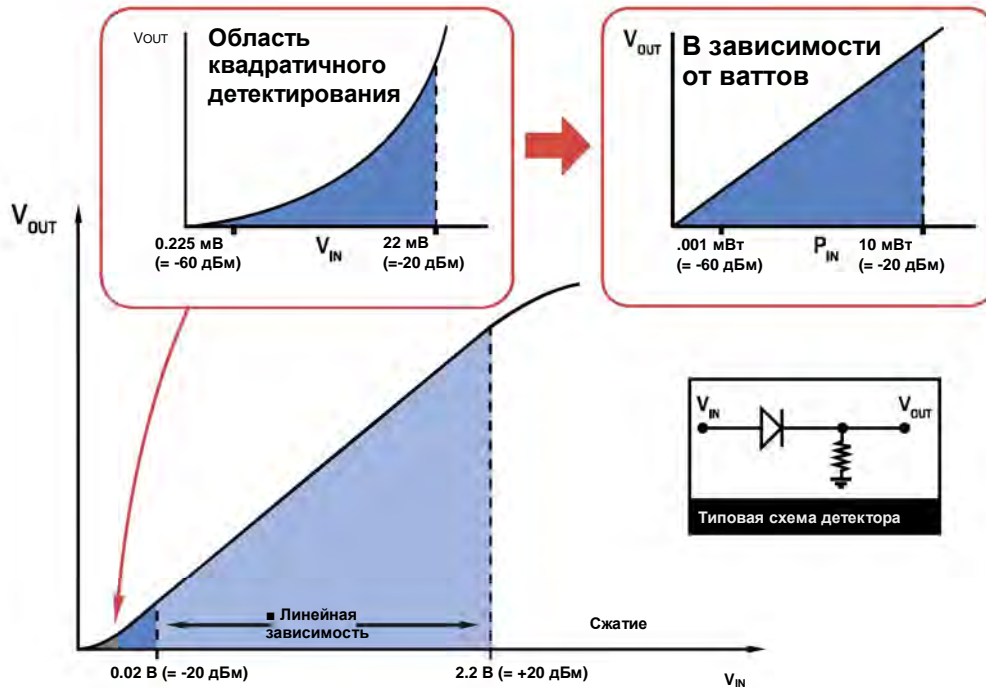


Рис. 2.2.2. Кривая I-V, показывающая характеристику «нелинейного резистора» (сверху), и характеристика I-V диода в низкоуровневой «области квадратичного детектирования» (справа) и в высокоуровневой «области обнаружения пиковых значений» (слева)

Несмотря на высокую чувствительность и простую линейризацию, которые достигаются за счет применения цифровых методов обработки, при модуляции возможна перегрузка диодных датчиков, если пиковая амплитуда сигнала превышает верхнее предельное значение области квадратичного детектирования. При наличии высокоуровневой модуляции амплитуда ВЧ-сигнала переходит в область обнаружения пиковых значений диодного детектора. В этой ситуации выходное напряжение детектора будет быстро подниматься до максимальных пиковых значений и затем медленно опускаться при падении уровня сигнала. Поскольку входной сигнал может иметь любую амплитуду во время падения напряжения конденсатора, больше не возможно будет определить эффективный средний уровень мощности модулированного сигнала, после того, как пиковый уровень ВЧ-мощности перейдет в область обнаружения пиковых значений диода.



Рисунок, демонстрирующий область квадратичного детектирования, область линейного детектирования и область сжатия схемы детектора

Одно из решений этой проблемы заключается в загрузке диодного детектора таким образом, чтобы уровень выходного напряжения уменьшался быстрее и отслеживал изменения огибающей модулированного сигнала. Обычно это достигается уменьшением сопротивления и емкости нагрузки, которая подключается после диодов ( $R_L$  и  $C_L$  на Рис. 2.2.1). Если выходной сигнал датчика точно отслеживает огибающую модулированного сигнала без значительной задержки по времени или без эффекта фильтрации, то, как правило, можно выполнить надлежащую линеаризацию выходного сигнала в режиме реального времени и можно выполнить любую необходимую фильтрацию этого линеаризованного сигнала (см. Рис. 2.2.3). Это предоставляет возможность достаточно быстродействующему диодному датчику точно измерять как мгновенную, так и среднюю мощность модулированных сигналов с любым уровнем мощности в динамическом диапазоне датчика. Этот тип датчика обычно называется «датчиком пикового уровня мощности» и более подробно рассматривается в разделе 4.2.

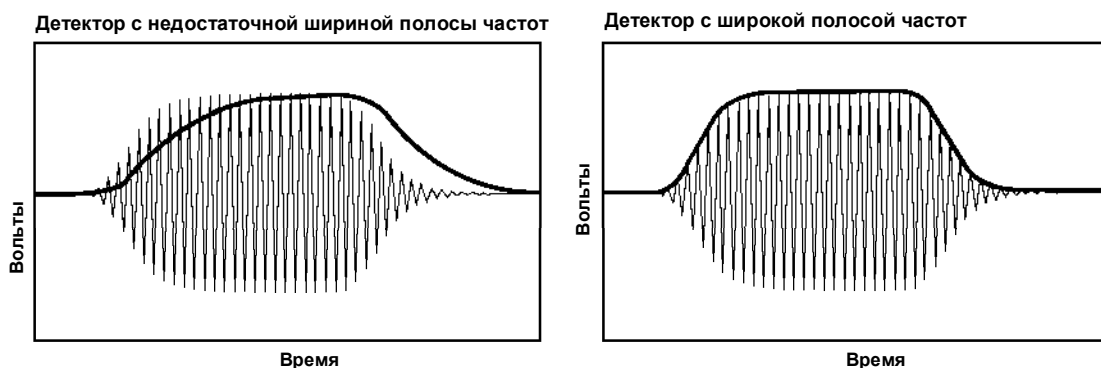


Рис. 2.2.3. Детектор с широкой полосой пропускания точно отслеживает огибающую модулированного сигнала



### 2.3 Измерение амплитуды с использованием приемника

В некоторых ситуациях уровень ВЧ-мощности измеряется косвенным образом с использованием процесса «приемника». Оборудование может различаться от типа приемника до типа анализатора спектра, по типу специализированному тестового комплекта или по типу векторного анализатора сигналов (VSA).

Методика измерений аналогична методике измерений, используемой в обычных радиосистемах с амплитудной модуляцией (AM). Входной сигнал грубо настраивается и преобразуется с понижением частоты до промежуточной частоты (IF) путем объединения в смесителе входящего ВЧ-сигнала с выходным сигналом гетеродина (LO). В выходном сигнале смесителя представлены результаты и суммы, и разницы частоты гетеродина с исходным сигналом. Частота гетеродина (LO) регулируется таким образом, чтобы результат разницы частоты гетеродина с исходным сигналом был равен требуемой промежуточной частоте. Затем эта промежуточная частота (IF) подается на один или несколько настроенных каскадов, которые усиливают сигнал и ограничивают его полосу частот таким образом, чтобы измерение выполнялось только в требуемом диапазоне входных ВЧ-сигналов. Усиленная и подстроенная промежуточная частота затем либо напрямую оцифровываются, либо демодулируется с использованием какого-либо типа детектора (см. Рис. 2.3.1).

Некоторые измерительные устройства в этой категории (например, анализаторы спектра) могут регулировать или «качать» параметры настройки цепи приема (например, частоту настройки и ширину полосы частот (разрешение) ВЧ-сигнала). Это обеспечивает значительное преимущество и гибкость в случаях, когда требуется информация о спектральном составе сигнала, но возможны затруднения при попытке выполнения точных измерений уровня мощности.

Основная причина этого заключается в том, что измерения с использованием приемника не являются измерениями уровня мощности в полном смысле этого слова, а скорее являются измерениями абсолютной амплитуды составляющей напряжения сигнала в конкретном диапазоне частот. Этот способ узкополосных измерений, или способ настраиваемых измерений, очень отличается от широкополосных измерений уровня мощности с использованием датчика; и выводимый результат часто не совпадает с результатом измерения фактического уровня мощности. Разница между измерениями уровня мощности, выполняемыми с помощью измерителей уровня мощности, и измерениями, выполняемыми с помощью анализаторов спектра, подробно рассматривается в разделе 4.4 данного руководства.

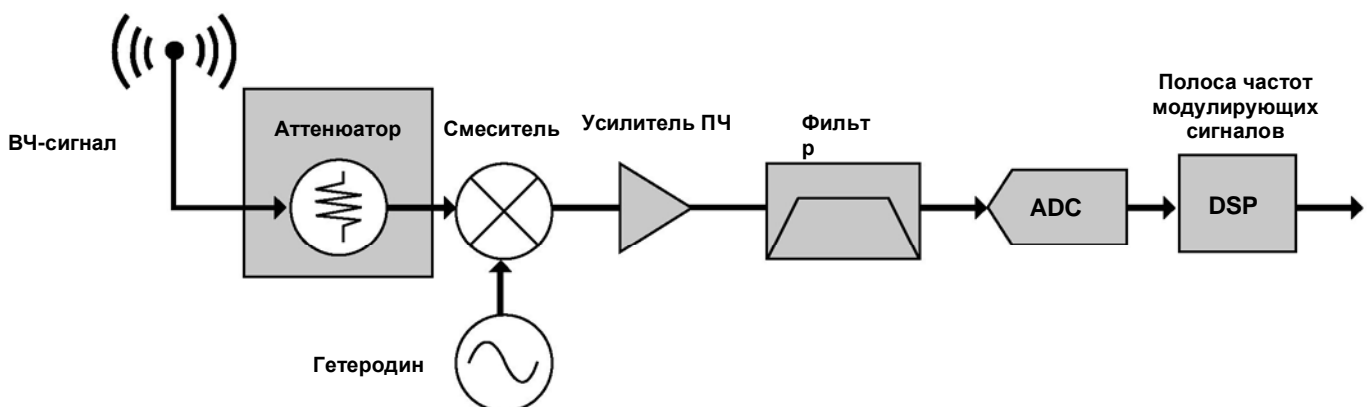


Рис. 2.3.1. Блок-схема типowego приемника

## 2.4 Измерение амплитуды ВЧ-сигналов с использованием монолитных интегральных схем

Как было сказано в главе 1 данного руководства, одна из составляющих «беспроводной революции» была сосредоточена на расширении возможностей беспроводной передачи. Часть увеличения этих возможностей обусловлена использованием различных типов схем мультиплексирования, которые предоставляют нескольким устройствам мобильной связи возможность одновременной работы по одному каналу в восходящем направлении. Многие из этих протоколов зависят от того, каким образом устройства беспроводной связи контролируют и управляют своей передаваемой мощностью для того, чтобы сигнал какого-либо одиночного устройства не преобладал в составном сигнале, принимаемом приемником базовой станции. За счет выполнения процедуры выравнивания амплитуд принимаемых сигналов от всех мобильных передатчиков базовая станция может разделять отдельные сигналы.

Из-за необходимости выполнения этого требования возникло семейство интегральных схем, предназначенных для текущего контроля амплитуды ВЧ-сигналов в режиме реального времени. Существует несколько различных типов интегральных схем, которые были представлены за эти годы, включая детекторы истинного среднеквадратичного значения напряжения, демодулирующие логарифмические усилители, аналоговые множители и специализированные интегральные схемы индикации уровня принимаемого сигнала (RSSI). Они обладают следующими общими рабочими характеристиками – они содержат «быстрый» входной каскад ВЧ-сигналов и выводят напряжение постоянного напряжения, которое – некоторой степени – пропорционально амплитуде входного сигнала.



*Типовые интегральные схемы обнаружения ВЧ-сигналов*

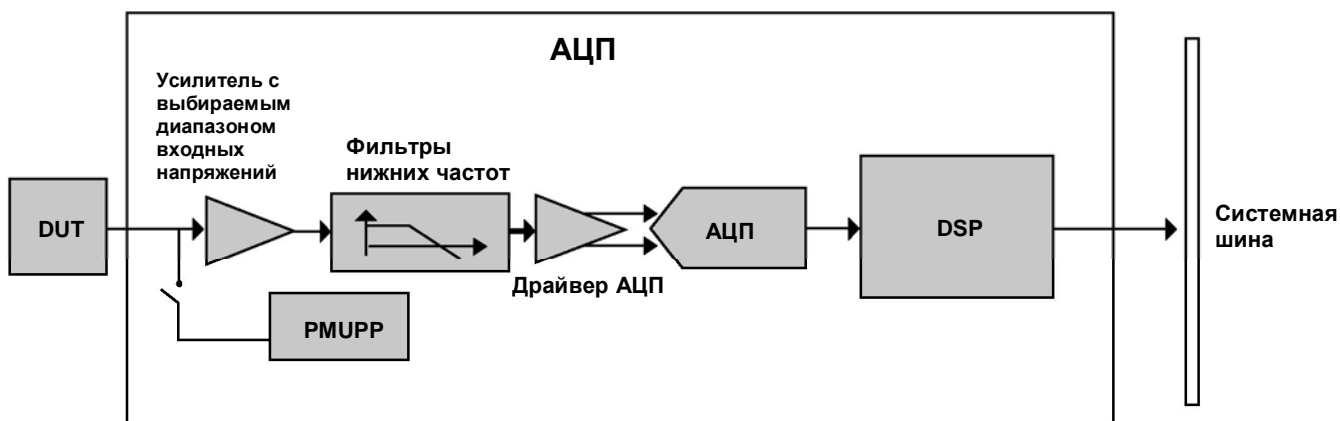
Эти интегрированные решения обычно имеют низкую стоимость и зачастую характеризуются нелинейной амплитудно-частотной характеристикой. Практически всегда эти схемы не калибруются и обычно предназначены для конкретного варианта применения. Кроме того, большая часть этих схем выполняет функцию измерения напряжения, а не функцию обнаружения действительного уровня мощности, хотя надлежащая входная схема может принять сигнал таким образом, чтобы мог быть вычислен эквивалентный уровень мощности. По этим причинам интегральные схемы обнаружения ВЧ-сигналов ограничены по своим возможностям использования для измерений ВЧ-мощности общего назначения.

## 2.5 Измерение амплитуды с использованием непосредственной выборки ВЧ-сигналов

Если частота несущей имеет достаточно низкое значение, то сигнал можно обработать как напряжение переменного тока в полосе частот модулирующих сигналов и напрямую оцифровать его для вывода информации об амплитуде. Для этого могут использоваться высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь или цифровой запоминающий осциллограф (DSO).

Для точного измерения амплитуды сигнала частота выборок должна быть намного выше частоты Найквиста – обычно в четыре раза выше частоты несущей для непрерывных сигналов (CW) и в десять раз выше частоты несущей для широкополосных модулированных сигналов. Для большей части сигналов современных систем связи и радиолокационных систем с частотами несущих в гигагерцовом диапазоне, использование достаточно высокой частоты выборки для выполнения этого критерия характеризуется высокой стоимостью (см. блок-схему аналого-цифрового преобразователя).

Альтернативным вариантом использования частоты выборки Найквиста является выборка с меньшим числом шагов выборки сигнала при поддержании достаточно высокой ширины полосы частот при выборке для отслеживания несущей. При этом способе используется выборка с запоминанием значений в широкой полосе частот, но не требуется, чтобы аналого-цифровой преобразователь работал с максимально возможной частотой. Этот вариант является реальной альтернативой выборке на частоте Найквиста, если для однократных событий не требуется полное восстановление несущей ВЧ-сигнала. Необходимо отметить, что требуется очень внимательно выбирать частоту относительно частоты несущей ВЧ-сигнала для предотвращения возникновения искажений, обусловленных наложением спектров (дискретизируемого сигнала при частоте выборки, меньшей частоты Найквиста).



Блок-схема аналого-цифрового преобразователя

## 2.6 Что такое измеритель уровня мощности ВЧ-сигналов?

Измеритель уровня мощности ВЧ-сигналов представляет собой точное измерительное устройство, специально разработанное для измерения уровня ВЧ-мощности. Обычно измеритель измеряет эффективную мощность, рассеиваемую на оконечной нагрузке, и является, таким образом, «однопортовым» устройством. Предыдущие измерители уровня мощности ВЧ-сигналов часто назывались «ВЧ-микроваттметрами», но к настоящему времени этот термин устарел, и термин «ваттметр» обычно относится к другому классу устройств, рассматриваемому ниже (см. раздел «ВЧ-ваттметр»).

В большинстве случаев измеритель уровня мощности ВЧ-сигналов выполняет свою задачу с использованием одного из рассмотренных выше способов «прямых» измерений уровня мощности ВЧ-сигналов – либо тепловой, либо детекторный способ – с оконечной нагрузкой и детектором уровня мощности, интегрированными в один широкополосный модуль. Этот модуль обычно называется «датчиком мощности» или «головкой датчика мощности» и имеет достаточно малые размеры, благодаря чему его входной соединитель может быть напрямую подключен с источником ВЧ-сигнала без использования кабельных соединений.



*Измерители уровня мощности Boonton 4240 с подключенными датчиками*

Датчики ВЧ-мощности калибруются для обеспечения линейности амплитуды и частоты, и, как правило, содержат модуль температурной стабилизации. Датчики предназначены для работы с малыми уровнями мощности (обычно менее 1 Вт), но иногда их входной диапазон увеличивается до средних уровней мощности (примерно до 50 Вт) за счет интеграции мощных входных аттенюаторов. Если установлен входной аттенюатор, то детектор и аттенюатор, как правило, калибруются как один блок для обеспечения максимальной точности. Датчик мощности может содержать активные электронные устройства после детектора.

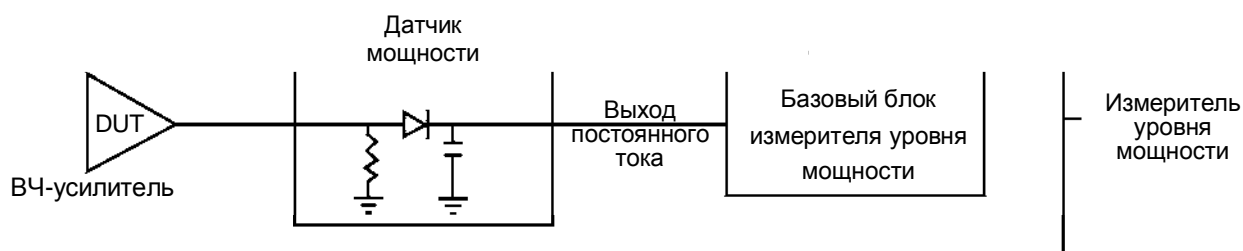
Выход датчика мощности может быть несимметричным или симметричным (дифференциальным) и может быть представлен либо как сигнал постоянного тока, либо как сигнал из полосы частот модулирующих сигналов огибающей входного сигнала. Выходной сигнал обычно буферизуется или усиливается, затем передается по кабелю на базовый блок измерителя уровня мощности, в котором прецизионными аналоговыми каскадами может быть выполнена его необходимая последующая обработка, линейаризация и отображение. В измерителях уровня мощности предыдущих моделей для отображения показаний использовалось аналоговое измерительное устройство, а в измерителях уровня мощности современных моделей перед отображением результатов измерений выполняется вся необходимая оцифровка, обработка и анализ сигналов. Поскольку комбинация устройств «датчик мощности + измеритель уровня мощности» используется для прямого измерения уровня мощности, обычно отсутствует коммутация входных сигналов, усиление ВЧ-сигналов или ограничение ширины полосы частот, представляющие собой типовые источники ошибок. По этой причине такая комбинация, как правило, предоставляет самый точный способ измерения суммарной мощности ВЧ-сигнала.

Другим типовым устройством для измерения уровня ВЧ-мощности является ВЧ-ваттметр. ВЧ-ваттметр представляет собой двухпортовое устройство (вход и выход), в котором измеряется уровень ВЧ-мощности, проходящей через это измерительное устройство. Эти устройства называются «ваттметрами проходного (сквозного) типа». Такое устройство отличается от измерителя уровня мощности, который содержит входной соединитель, и входной сигнал поступает на согласованную оконечную нагрузку внутри этого устройства. Ваттметр рекомендуется использовать для измерения эффективной мощности, подаваемой на нагрузку или в антенну. Из-за того, что импеданс нагрузки может измениться, ваттметр не может использоваться для точной индикации характеристик передатчика, и чаще всего используется для текущего контроля мощности внутри системы, а не для точного измерения уровня мощности. Ваттметры обычно измеряют мощность, проходящую в одном направлении (от входа на выход), и могут использоваться для измерения мощности в прямом направлении или отраженной мощности в зависимости от используемого варианта подключения. В некоторые ваттметры встроены элементы управления для выбора того, измерение какого компонента выполняется.

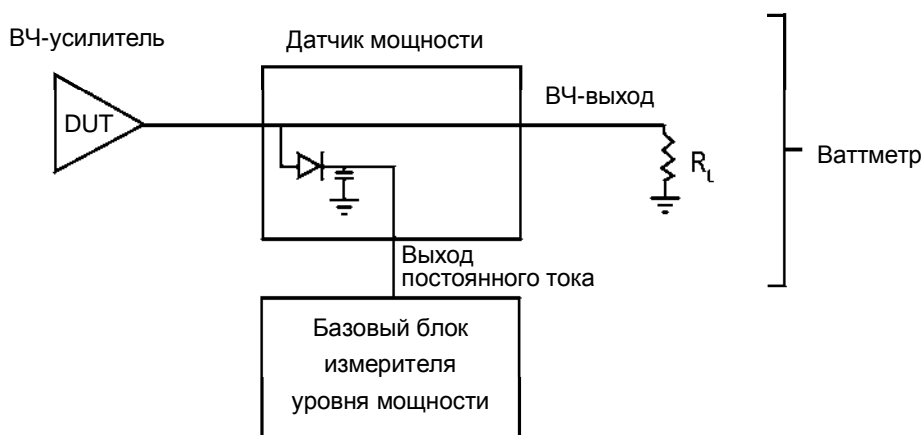
Ваттметры чаще используются для более высоких уровней мощности, и во многих случаях могут быть полностью пассивными – энергия для управления дисплеем или измерителем выделяется непосредственно из ВЧ-сигнала. Измеритель уровня мощности всегда может использоваться в качестве ваттметра при использовании трех- или четырехпортового ВЧ-устройства, например направленного соединителя. За счет надлежащего выбора соединителя и аттенуаторов можно измерять сигналы в пределах от милливатт до мегаватт. Использование двухканального измерителя уровня мощности (с двумя датчиками мощности) предоставляет возможность одновременного измерения мощности в прямом направлении и отраженной мощности. Большинство из этих устройств выполняет относительные измерения между каналами, что обеспечивает непосредственное отображение обратных потерь. Некоторые модели отображают даже вычисленное значение КСВН. Это делает измерители уровня мощности очень полезными для определения проблем либо источника сигнала (передатчика или усилителя мощности), либо нагрузки (антенны) в системе передачи.



ВЧ-ваттметр



ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ МОЩНОСТИ НА СОГЛАСОВАННОЙ НАГРУЗКЕ



«ПРОХОДНОЕ» ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ МОЩНОСТИ

Схема соединений для «проходного» измерения уровня мощности и измерения уровня мощности «на согласованной нагрузке»

## Глава 3: Мощность непрерывного сигнала, средняя мощность и пиковая мощность

Классические измерения ВЧ-мощности выполняются для установившихся непрерывных сигналов. Для любого типа детектора мощности может быть выполнена линейаризация и корректировка для вывода достаточно точного и предсказуемого значения для непрерывного сигнала. Однако при наличии модуляции возникают дополнительные проблемы. Средняя мощность модулированной несущей с изменяющейся амплитудой может быть точно измерена измерителем уровня мощности непрерывных сигналов только в том случае, если в этом измерителе используется тепловой датчик или диодный датчик, работающий на низких уровнях мощности в области квадратичного детектирования.

### 3.1 Ограничения для измерителей уровня мощности непрерывных сигналов

Традиционные измерители уровня мощности непрерывных сигналов предназначены для измерения немодулированных сигналов или непрерывных сигналов, однако при определенных условиях они также могут использоваться для измерения модулированных сигналов, что значительно расширяет диапазон их применения. С точки зрения измерителя уровня мощности любой сигнал с постоянной огибающей является непрерывным сигналом, то есть всегда могут выполняться точные измерения сигналов с частотной (FM) или фазовой (PM) модуляцией. Однако при использовании любого типа амплитудной модуляции возникает ряд проблем.

Измерители уровня мощности с тепловыми датчиками или с диодными датчиками, работающими в области квадратичного детектирования, могут использоваться для вывода истинного среднего уровня мощности огибающей модулированного сигнала, что достаточно для большинства радиоинженеров. Однако оба этих типа датчика характеризуются ограниченным динамическим диапазоном, что препятствует измерению комплексных сигналов. Когда диодный детектор используется для модулированных сигналов с уровнями мощности выше области квадратичного детектирования, измеритель уровня мощности непрерывных сигналов переходит в нелинейный и непредсказуемый режим.

Одно из решений заключается в том, чтобы интегрировать несколько детекторов «действительной мощности» (как правило, детекторов с двумя диодами, работающими в области квадратичного детектирования) в один блок датчика и использовать каждый из этих детекторов на своем уровне сигналов. Это выполняется посредством использования интегрированного делителя мощности и переменных аттенюаторов для того, чтобы каждый детектор работал в своей «области наилучшего функционирования» общего динамического диапазона датчика. Если эти диапазоны перекрываются, то измеритель уровня мощности может объединить выходы этих детекторов для вывода точного результата измерения среднего уровня мощности в относительно широком динамическом диапазоне. При использовании этого способа возможно возникновение следующих проблем: рассогласование, приводящее к изменению амплитудно-частотной характеристики каждого детектора, искажения, возникающие при переключении диапазонов измерений детектора.

Когда требуется выполнить измерение пикового уровня мощности импульсно-модулированного сигнала, импульсная мощность определяется традиционным образом путем регулировки среднего уровня мощности с учетом скважности модулирующего импульса. В дополнение к ограничениям динамического диапазона, необходимо отметить, что этот метод становится неточным, если форма импульса не является идеальной, совершенно непригоден для комплексной модуляции. Эти проблемы более подробно рассматриваются в главе 7.

### 3.2 Решение для измерения «пикового уровня мощности»

Несмотря на то, что диодные датчики непрерывных сигналов могут использоваться для точного измерения уровня мощности непрерывных сигналов в области квадратичного детектирования, эти датчики не могут отслеживать быстрые изменения уровня мощности (при амплитудной модуляции) и выводят ошибочные показания, если пиковые значения мощности превышают уровни, соответствующие области квадратичного детектирования. Оптимизируя время срабатывания датчика (взамен на низкую чувствительность), можно добиться того, чтобы диодные детекторы отслеживали изменения амплитуды сигнала при модуляции. В пиковых датчиках используется низкоимпедансная нагрузка, через которую сглаживающие конденсаторы очень быстро разряжаются при уменьшении амплитуды ВЧ-сигнала. Это – вместе с очень маленькой емкостью сглаживающего конденсатора – предоставляет датчикам пикового уровня мощности возможность обработки ширины полосы частот видеосигнала из нескольких десятков мегагерц и возможность обработки времен нарастания сигналов в диапазоне десяти наносекунд.



Измерители уровня ВЧ-мощности Boonton 4542

Необходимо отметить, что термин «ширина полосы частот видеосигнала» термина используется только для описания диапазона частот изменений огибающей мощности или компонента амплитудной модуляции. Если в сигнале содержатся компоненты других видов модуляций, которые не оказывают воздействия на огибающую (частотная или фазовая модуляция), то частотные составляющие этих модулирующих сигналов не оказывают непосредственного воздействия на ширину полосы частот видеосигнала в том случае, если это не приводит к возникновению интермодуляционных искажениям в виде дополнительной амплитудной модуляции. Для «чистого» частотно-модулированного или фазомодулированного сигнала практически отсутствует амплитудная модуляция, и поэтому для процедуры измерения уровня мощности его можно рассматривать в качестве непрерывный сигнал. Датчики мощности чувствительны к амплитуде ВЧ-сигнала, а не к его частоте или фазе.

Несмотря на то, что выходной сигнал датчика отслеживает огибающую сигнала, передаточная функция является нелинейной – пропорциональна напряжению ВЧ-сигнала на высоких уровнях и пропорциональна квадрату напряжения ВЧ-сигнала на низких уровнях. За счет выборки выходного сигнала датчика и выполнения коррекции нелинейности для каждой выборки перед интегрированием или вычислением среднего значения сигнала, вычислить среднее значение и пиковую мощность модулированного сигнала можно даже в том случае, если входной сигнал выходит из области квадратичного детектирования диода. Кроме того, для выдачи статистики о распределении уровня мощности сигнала большое число выборок уровня мощности может быть проанализировано и транслировано в отображаемый на осциллографе график «уровень мощности от времени» (см. Рис. 3.2.10).



Рис. 3.2.1. Снимок экрана профиля импульса измерителя 4500B



Рис. 3.2.2. Снимок экрана двойной комплементарной интегральной функции распределения (CCDF) измерителя 4540

Высокоскоростные способы сбора и цифровой обработки сигналов предоставляют возможность точного измерения пиковой мощности и средней мощности с единственным ограничением, заключающимся в следующем – должны совпадать общий динамический диапазон и ширина полосы частот модуляции. Информация о способе модуляции или о сигнале модуляции не требуется. Измеритель пикового уровня мощности обеспечивает достаточную точность при измерении непрерывных сигналов, импульсных сигналов (например, в радиолокационных системах) и сигналов современных систем связи с цифровой модуляцией.

Термин «пиковая» мощность относится не к одному понятию, как это можно предположить. Это не только пиковая мощность модулированного сигнала, но также и мгновенная мощность в любой момент времени, и средняя мощность за любой определенный интервал времени. Измеритель «пикового» уровня мощности собирает всю относящуюся об амплитуде информацию сигнала.

### 3.3 Все о ширине полосы частот

Несмотря на то, что измеритель пикового уровня мощности кажется идеальным решением для измерения уровня мощности любого ВЧ-сигнала, все-таки существуют некоторые замечания и ограничения. Самый существенной проблемой является то, что диодный детектор датчика должен обеспечивать точное и постоянное отслеживание изменений огибающей сигнала. Как было сказано в главе 2, скорость срабатывания диодного датчика можно отрегулировать выбором схемных компонентов, определяющих быстродействие диода детектора.

Если скорость срабатывания детектора будет чрезмерно мала, то детектор не сможет точно отслеживать огибающую сигнала и в некоторые моменты времени уровень мощности будет неизвестен. Это проявляется в виде ошибки измерения, а отклонение от истинного значения (в сторону увеличения, либо в сторону уменьшения) зависит от характеристик сигнала и детектора. Скорость, с которой детектор может отслеживать огибающую сигнала, может быть определена по времени нарастания значения датчика при импульсном сигнале, либо по ширине полосы частот сигнала малого уровня при амплитудно-модулированном сигнале.



Время нарастания и ширина полосы частот всегда обратно пропорциональны, но на их точную зависимость в некоторой степени воздействуют нелинейные параметры (например, скорость нарастания выходного напряжения, а также фильтрация сигнала высокого порядка). По этой причине для датчиков пикового уровня мощности часто указываются оба параметра. Для зависимости времени нарастания и ширины полосы частот применяется следующее эмпирическое соотношение:

$$\text{Ширина полосы частот видеосигналов} = 0,35 / \text{Время нарастания,} \\ \text{либо} \quad \text{Время нарастания} = 0,35 / \text{Ширина полосы частот видеосигналов}$$

Воздействие ограниченной ширины полосы частот видеосигнала показано на Рис. 3.3.1. На рисунке слева показана ситуация, в которой детектор слишком медленно отслеживает нарастание и снижение огибающей импульса, что приводит к возникновению ошибок измерения. Необходимо отметить, что в этом случае будет некорректно измерена не только мгновенная мощность, но и средняя мощность. На рисунке справа показан датчик с шириной полосы частот видеосигнала, достаточной для точного отслеживания импульса, благодаря чему ошибка будет минимальной.

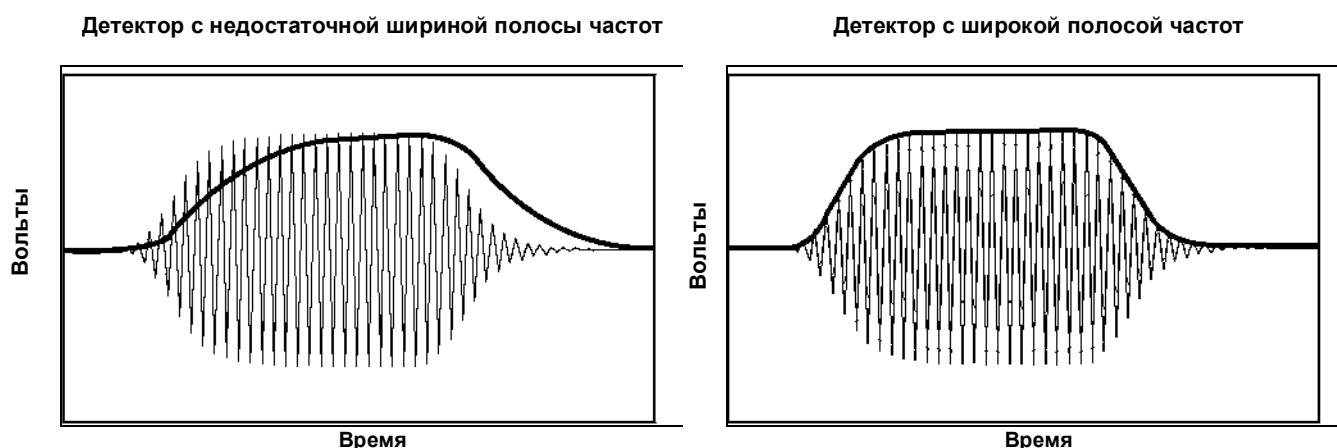


Рис. 3.3.1. Воздействие ширины полосы частот на обнаруженный импульсный сигнал

На Рис. 3.3.1 показано воздействие недостаточной ширины полосы частот на точность измерения уровня мощности; необходимо отметить, что такие же ошибки могут возникнуть в ситуациях быстрого увеличения и уменьшения амплитуды сигналов современных широкополосных систем связи. В случае ограничения ширины полосы частот для сигнала с цифровой модуляцией в первую очередь будут оказывать воздействие пики сигналов малой длительности. Эти пики сигналов будут «закруглены», и будет указано более низкое значение пиковой мощности. Меньшее пиковое значение приводит к уменьшению измеренного отношения пикового к среднему уровню мощности (PAPR) и к изменению статистического распределения уровней мощности (комплементарная интегральная функция распределения (CCDF), интегральная функция распределения (CDF) или функция распределения вероятностей (PDF), рассматриваемые в разделах 6.3 и 8.3 данного руководства) (см. Рис. 3.2.2).

Несмотря на то что конструкция детектора в датчике обычно является определяющим фактором для ширины полосы частот видеосигналов, необходимо помнить, что также оказывают воздействие другие факторы. Весь тракт прохождения сигнала после детектора также является очень важным – надежность цепи определяется ее самым слабым звеном.

Ширина полосы частот может быть ограничена воздействием внутреннего усилителя датчика, выполняющим усиление сигнала после его детектирования, и кабельного передатчика, самим кабелем датчика, а также схемой сопряжения и преобразования внутри измерителя уровня мощности. Значения ширины полос частот всех отдельных каскадов объединяются по закону обратных квадратов для формирования общей ширины полосы частот видеосигналов всей «системы».

Изготовители измерителей уровня мощности обычно указывают ширину полосы частот видеосигналов и время нарастания сигнала датчика, обеспечиваемые при сопряжении с конкретным измерителем уровня мощности и через соединительный кабель стандартной длины. В разделе 10.4 данного руководства приводится таблица, указывающая воздействие кабелей датчика увеличенной длины на ширину полосы частот видеосигналов. Датчики мощности с USB-интерфейсом выполняют выборку или оцифровывают сигнал в датчике для того, чтобы длина USB-кабеля и характеристики базового блока (при наличии) не оказывали бы воздействия на ширину полосы частот видеосигналов. Эти датчики прекращают работать, когда используется кабель заданной максимальной длины и данные больше не могут передаваться с требуемой скоростью.

Современные датчики пикового уровня мощности имеют ширину полосы частот видеосигналов около 100 МГц, а типовое быстродействие системы составляет около 80 МГц (время нарастания сигнала около 4,5 нс) с использованием современных высококачественных анализаторов пикового уровня мощности. Данная ширина полосы частот является вполне достаточной для большей части сигналов, используемых в современных системах, однако в некоторых случаях эти значения не являются достаточными (например, в системах беспроводной связи с несколькими несущими, системах спутниковой связи с высокими скоростями передачи данных и на линиях СВЧ-связи для передачи несжатых видеоданных может потребоваться ширина полосы частот 200 МГц или даже больше).

В этих случаях использование измерителя пикового уровня мощности, как правило, не является наилучшим вариантом выбора, и анализ сигнал должен быть выполнен другим образом – либо с использованием традиционного измерителя уровня ВЧ-мощности, реагирующего на среднюю мощность, либо с использованием измерительного оборудования с качанием частоты (анализатор спектра). В любом из этих решений определяется средняя мощность сигнала, но не определяется информация о мгновенной мощности (временная и статистическая), которую выводит измеритель пикового уровня мощности. В большинстве случаев измерители уровня ВЧ-мощности обеспечивают лучшую точность – принятие оптимального решения по использованию измерителей уровня мощности и измерительного оборудования с качанием частоты более подробно рассматривается в разделе 4.4 данного руководства.

### 3.4 Значение динамического диапазона

Наиболее часто задают следующий вопрос относительно измерений уровня мощности: «Какой минимальный и максимальный уровень мощности я могу измерить?» Ответ на этот вопрос может быть совершенно простым, если ожидаемая мощность сигнала находится в пределах номинального динамического диапазона датчика; но на самом деле все не так просто.

В случае непрерывных сигналов ситуация является достаточно простой. Чрезмерно большой уровень мощности приводит к перегрузке датчика, что, в свою очередь, приводит либо к ошибочным результатам измерения, либо – в некоторых случаях – к необратимому повреждению датчика. При чрезмерно малом уровне мощности, при котором отношение «сигнал/шум» приближается к единице, ошибки возникают из-за собственных помех и дрейфа параметров измерительного устройства. Дiodный датчик непрерывных сигналов обычно имеет динамический диапазон 80–90 дБ и может использоваться для широкого диапазона сигналов (см. Рис. 3.4.1).

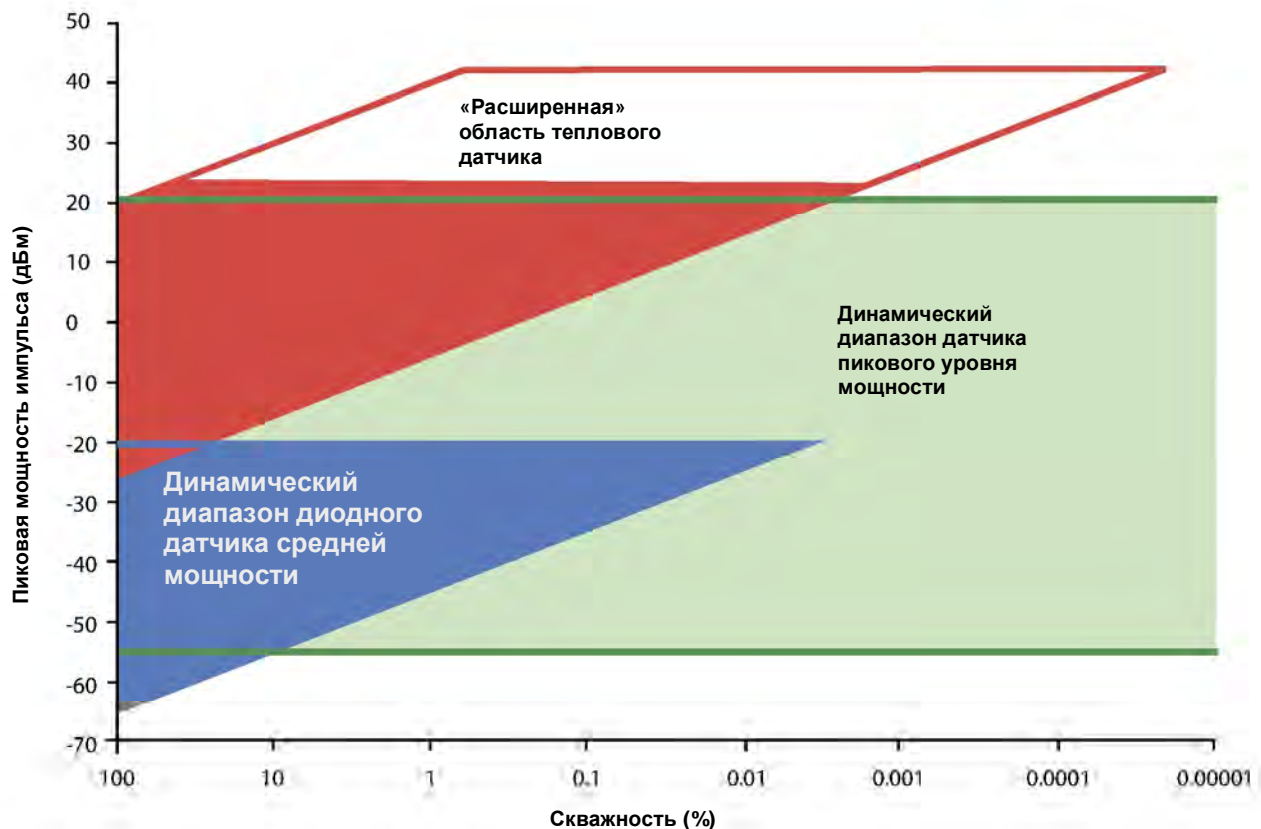


Рис. 3.4.1. График динамического диапазона для разных типов датчиков

При использовании модуляции все усложняется. Для большинства датчиков указывается номинальная средняя мощность для непрерывных сигналов, для многих датчиков также указывается номинальная пиковая мощность для пиков сигналов малой длительности – обычно указывается уровень мощности и временной предел. В действительности существует кривая «безопасной рабочей области» для различных значений сквозности и различных значений длительности импульса, но это, как правило, не публикуется.

Существует несколько относящихся к модуляции ограничений для тепловых датчиков – обычно они могут обрабатывать пиковые значения, которые значительно больше их номинальной средней мощности, и усреднение этих пиков выполняется в линейном режиме. Однако импульсные сигналы с очень большой сквозностью все еще могут превышать номинальную пиковую мощность датчика, поэтому необходимо соблюдать особую осторожность. Это нередкий случай для среднего уровня мощности на 30 дБ ниже пикового уровня мощности для импульсных сигналов, например, радиолокационных систем.

Главным ограничивающим фактором тепловых датчиков является их низкая чувствительность. Динамический диапазон составляет около 50 дБ из-за предельных значений средней мощности сверху и уровнем шума снизу. Большая часть сигналов может быть приведена в соответствие с этими ограничениями (см. Рис. 3.4.1).

Когда диодный датчик, реагирующий на среднее значение, используется для измерения модулированных сигналов, то возникают дополнительные проблемы, обусловленные ограничениями квадратичного детектирования, свойственными диодным детекторам. Область квадратичного детектирования диодного детектора составляет примерно 50 дБ от пригодного для использования динамического диапазона, что сопоставимо с диапазоном теплового датчика, но с намного большей чувствительностью.

Однако для точных измерений пиковое значение сигнала и его среднее значение должны оставаться в области квадратичного детектирования, поэтому в действительности диодный датчик обеспечивает меньший динамический диапазон для сигналов с высоким отношением пикового к среднему уровню мощности (PAPR, также иногда называемым «коэффициентом амплитуды» или «пик-фактором»).

Как было сказано выше в данной главе, данное ограничение иногда устраняется посредством интеграции нескольких детекторов, работающих в области квадратичного детектирования, с переменным затуханием в один блок датчика для того, чтобы каждый детектор работал в своей «области наилучшего функционирования» общего динамического диапазона датчика. В результате этого выполняется «суммирование» динамических диапазонов каждого детектора для формирования составного датчика с более широким диапазоном. Также необходимо обратить особое внимание на совмещение и перекрытие диапазонов. Необходимо отметить, что этот тип датчика может обеспечить динамический диапазон до 80 дБ для сигналов систем связи. Для импульсных сигналов, которые зачастую характеризуются более высоким отношением PAPR (отношение пикового к среднему уровню мощности), этот динамический диапазон существенно меньше и перекрытие диапазонов встроенных детекторов может фактически оставить нелинейные «дыры» в детекторной характеристике (см. Рис. 3.4.2).

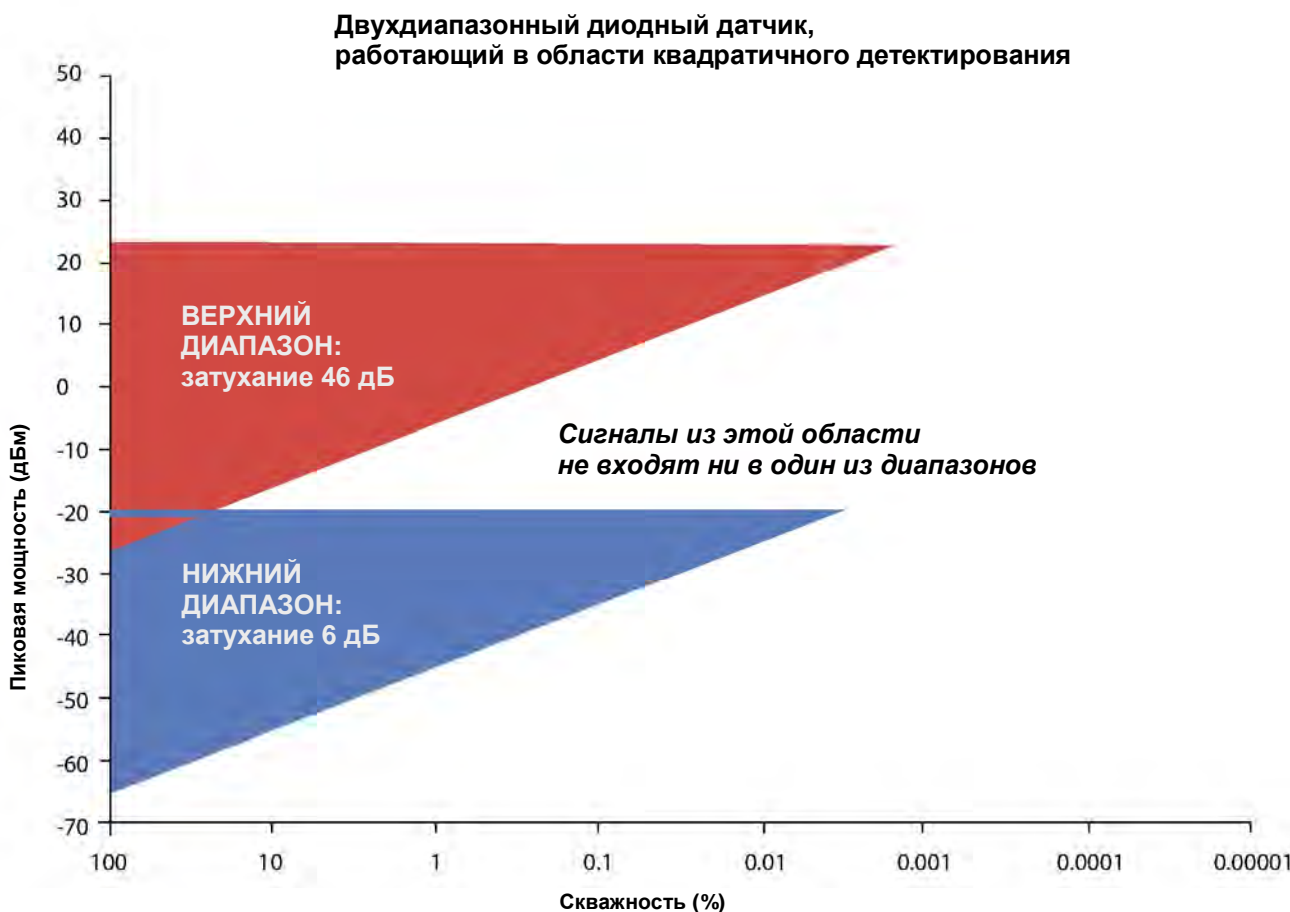


Рис. 3.4.2. График динамического диапазона для разных типов датчиков. Динамический диапазон каждого поддиапазона в двухдиапазонном диодном датчике уменьшается для импульсных сигналов, также остаются промежутки для скважности выше 20 %. Это эквивалентно отношению пикового к среднему уровню мощности 7 дБ пиковое, и достаточно большинства сигналов систем связи, но всего лишь для небольшой части импульсных сигналов.

Для датчиков пикового уровня мощности отсутствуют ограничения квадратичного детектирования, поскольку их детекторы отслеживают огибающую сигнала достаточно быстро для выполнения линеаризации функции преобразования диода в режиме реального времени, после которой выполняется вычисление среднего значения. Несмотря на то, что номинальное значение, при котором перегорают диоды пикового уровня мощности, обычно намного выше среднего номинального значения (теплового датчика), функционирование датчиков пикового уровня мощности должно выполняться в пределах откалиброванной части кривой, обычно ограниченной средним номинальным значением. С другой стороны, на более низких уровнях для датчиков пикового уровня мощности необходимо принять компромиссное решение между чувствительностью и малым временем срабатывания, поэтому результирующий динамический диапазон для датчиков пикового уровня мощности обычно равен 45–75 дБ.

## Раздел 2

# *Выполнение измерений уровня мощности*

Сигналы современных систем связи и радиолокационных систем являются сложными комплексными сигналами, поэтому для измерения параметров этих сигналов требуется современное сложное измерительное оборудование, включая измерители уровня мощности ВЧ-сигналов. В данном разделе рассматривается оборудование измерения уровня мощности и варианты его применения и также рассматривается использование имеющихся способов измерений и измерительных устройств в соответствии с требованиями, предъявляемыми к измерениям.



**Выбор оборудования:** Выбор надлежащего измерителя уровня мощности. Выбор датчика ВЧ-мощности. Сравнение измерителей уровня мощности с анализаторами спектра. Осциллографы и детекторы.

**Калибровка:** Заводская калибровка без обратной связи. Способы калибровки линейности в условиях эксплуатации. Одноточечная, двухточечная и многоточечная калибровка линейности. Корректировка амплитудно-частотной характеристики.

**Анализ ВЧ-мощности:** Непрерывные измерения. Запускаемый и импульсный анализ. Статистический анализ мощности.

**Варианты измерений уровня мощности:** Измерения импульсов с большой скважностью. Измерение сигналов современных систем связи. Использование измерителей уровня мощности для выполнения проверки на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости (EMC).

**Примечания по рабочим характеристикам:** Уменьшение уровня помех при выполнении измерений. Оптимизация характеристик автоматического тестового оборудования (ATE). Проверка усилителей.

**Точность измерений:** Ввод понятия погрешности. Вклад различных компонентов в погрешность измерений уровня мощности. Типовые вычисления погрешности измерений.

## Глава 4: Выбор оборудования

Измерение ВЧ-мощности может быть совершенно несложным для простых сигналов, но постоянно возрастающее усложнение сигналов приводит к тому, что на точность измерений оказывает все большее воздействие частота, амплитуда и типы модуляции. В данной главе рассматриваются наиболее распространенные варианты измерений и использование имеющихся измерительных устройств в соответствии с предъявляемыми требованиями.



Анализатор пикового уровня ВЧ-мощности Boonton 4542

### 4.1 Выбор надлежащего измерителя уровня мощности

Итак, вам необходимо измерить уровень мощности. Первый вопрос: на что похож измеряемый сигнал? Для выбора надлежащего оборудования необходимо знать некоторую информацию:

- Диапазон частот – минимальная и максимальная частота несущей
- Ширина полосы частот видеосигнала – узкая или широкая
- Требование по времени нарастания – время нарастания импульса
- Динамический диапазон – минимальный и максимальный ожидаемые уровни мощности
- Модуляция – модуляция непрерывным сигналом, импульсная модуляция, аналоговая модуляция или цифровая модуляция
- Подключение – тип соединителя (коаксиальный кабель или волноводное соединение)
- Импеданс – 50 Ом или другой

Затем необходимо знать, какие типы измерения сигнала могут потребоваться.

- Только уровень мощности, либо также требуется информация о спектре
- Только среднее значение (при необходимости импульсная мощность вычисляется с учетом скважности)
- Ограниченная информация о пиковых значениях (отношение пикового к среднему уровню мощности)
- Измерения временных характеристик (профиль импульса)
- Статистический анализ уровня мощности



Для простых непрерывных сигналов существует широкий выбор решений. Измеритель уровня мощности непрерывного сигнала обычно является самым экономичным вариантом выбора и может измерять среднюю мощность просто и высокой точностью. Для модулированного сигнала измеритель уровня мощности непрерывного сигнала все еще может быть хорошим вариантом выбора, если выбран подходящий датчик мощности. Первым шагом является выбор датчиков, совместимых с первичными характеристиками измеряемого сигнала, – минимальный и максимальный ожидаемые уровни мощности, частота несущей и импеданс источника сигнала. Информацию о выборе датчика мощности см. в следующем разделе данного справочника.

Главное ограничение измерителя уровня мощности заключается в том, что он указывает только амплитуду. В случаях когда также требуется информация о спектре, более предпочтительными могут быть другие решения. Для измерения амплитуды и вывода информации о спектральном распределении сигнала используются векторные анализаторы сигналов, анализаторы спектра и измерительные приемники.

Ни одно из этих устройств не является измерителем действительного уровня мощности, поскольку эти устройства, как правило, измеряют амплитуду напряжения в узкой полосе частот, а не уровень мощности в широкой полосе частот (тепловое действие). Однако в определенных случаях узкополосные измерения могут быть более предпочтительны. Кроме того, эти типы устройств часто выполняют измерение с качанием частоты в определенном диапазоне частот; также при качании частоты могут пропускаться повторные события, при которых генерируются пиковые уровни мощности на определенных частотах. Это происходит, когда фильтр качания частоты анализатора не согласован со средней частотой события пикового уровня мощности в точный момент времени возникновения этого события. Принятие оптимального решения по использованию измерителей уровня мощности и анализаторов спектра более подробно рассматривается в данной главе.

Средняя мощность модулированного сигнала может быть измерена измерителем уровня мощности непрерывного сигнала или измерителем уровня мощности, реагирующим на среднюю мощность, с надлежащим датчиком. Если же пользователю требуется какая-либо сортировка информации о пиковых значениях, либо если сигнал характеризуется чрезвычайно высоким отношением пикового к среднему уровню мощности, то измеритель пикового уровня мощности часто является предпочтительным вариантом выбора. Измерители пикового уровня мощности имеют различные параметры, которые должны быть согласованы с сигналом и вариантом применения для обеспечения точных измерений уровня мощности. Более подробная информация о важности ширины полосы частот видеосигнала приводится в главе 3 данного руководства. Как датчик, так и измеритель уровня мощности должны иметь достаточную ширину полосы частот для сигнала; в противном случае будут возникать ошибки измерения уровня мощности, обусловленные взаимной модуляцией.

Измерители пикового уровня мощности почти всегда одновременно измеряют среднюю мощность и пиковую мощность, а также указывают отношение между двумя этими значениями. Большинство измерителей поддерживает выполнение запускаемого сбора данных о форме сигнала и может выполнять то или иное профилирование импульса. Наиболее совершенные модели обеспечивают подробный анализ формы сигнала с временным разрешением в доли наносекунд и сбор статистической информации об уровне мощности.

Необходимость в информации о пиковой мощности при выполнении измерений модулированных сигналов обычно определяется вариантом применения. Для простых тестов типа «годен/не годен», в которых результат измерения того или иного устройства сравнивается с эталонным значением, вполне достаточным является измерение среднего уровня мощности.

В этом случае будет указано, что тестируемое устройство выдает ВЧ-мощность приблизительно с ожидаемым уровнем и поэтому оно, скорее всего, является работоспособным. Однако при попытке определения количественных рабочих параметров, часто необходимо измерять параметры пиковой мощности, либо выполнять профилирование сигналов или импульсов.

Для импульсных сигналов, например для сигналов радиолокационных систем, обычно выбираются измерители среднего уровня мощности. Если импульс имеет почти прямоугольную форму, его скважность точно известна и сигнал характеризуется минимальным «размыванием формы» и минимальными помехами в интервале «импульс выключен», то для вывода импульсной мощности может быть выполнена простая коррекция скважности. Однако во многих случаях эти требования не могут быть соблюдены и из-за этого необходимо контролировать форму сигнала (обычно с помощью осциллографа и диодного выпрямителя) для обеспечения требуемых характеристик.

В этих случаях измеритель пикового уровня мощности зачастую является более экономичным решением. Большинство измерителей пикового уровня мощности может измерять и отображать формы импульсов с высокой степенью точности с указанием средней мощности, импульсной мощности и формы импульса. Более современные устройства могут измерять большую часть параметров импульсных сигналов (например, время нарастания импульса, ширину импульсных, выброс на фронте импульса и срез импульса). В разделе 7.1 данного руководства рассматриваются преимущества использования измерителей пикового уровня мощности при выполнении измерений импульсных сигналов.

Необходимость измерений пикового уровня значительно увеличилась в последние годы, поскольку область беспроводной связи заняли технологии с использованием цифровой модуляции. Эти сигналы характеризуются высоким отношением пикового к среднему уровню мощности с относительно нечастым появлением максимальных пиков. За счет этого разность между номинальным и максимально допустимым значением усилителя становится важным параметром, поскольку отсекаемые пики приводят к потере данных. Но поскольку такие отсекаемые пики появляются относительно редко, воздействие такого отсекаемого пика на среднюю мощность сигнала может быть совершенно несущественным. Это приводит к тому, что при измерении только средней мощности довольно трудно обнаружить события сжатия или отсекаемого сигнала.

Измеритель пикового уровня мощности по-прежнему точно измеряет среднюю мощность, но поскольку он также непрерывно измеряет мгновенную мощность, сжатие или отсечение редко возникающих максимальных пиков будут очевидными из-за уменьшения пиковой мощности и отношения пикового к среднему уровню мощности. Статистические методы могут помочь определить в количественном виде воздействие сжатия пиков на сигнал и могут помочь спрогнозировать интенсивность битовых ошибок системы. Статистическое тестирование усилителя подробно рассматривается в разделе 8.3 данного руководства.

## 4.2 Выбор датчика ВЧ-мощности

Абсолютный или относительный уровень мощности непрерывных сигналов может быть точно измерен с использованием диодных датчиков непрерывных сигналов, диодных датчиков, реагирующих на среднее значение (одно- или многодиапазонных), тепловых датчиков или датчиков пикового уровня мощности. Выбор применяемого устройства в основном зависит от уровня мощности и характеристик модуляции сигнала, а также от того, какие значения необходимо определить. Технологии датчиков подробно рассматриваются *главе 2* данного руководства.

Первый вопрос заключается в том, каким образом датчик должен подключаться к измеряемому источнику. На частотах ниже 18 ГГц почти для всех датчиков мощности используются коаксиальные соединители N-типа.

Для некоторых дешевых датчиков также используются соединители SMA. Из-за увеличения частоты используются все меньшие коаксиальные соединители – типовыми являются соединители 3,5 мм, 2,92 мм, 2,4 мм и 1,8 мм, обеспечивающие выполнение измерений на частотах выше 60 ГГц. На частотах от 20 ГГц до 100 ГГц также могут использоваться волноводы. Датчики с волноводными соединителями имеют относительно узкий диапазон (меньше одной октавы), поэтому используемые датчики должны соответствовать диапазону частот, в котором выполняются измерения. Кроме того, датчики с волноводными соединителями достаточно трудно откалибровать, и, самое главное, их использование ограничено измерениями уровня мощности непрерывных сигналов и измерениями среднего уровня мощности.



*Датчики пикового уровня мощности*

Если сигнал всегда является немодулированным, либо если уровень мощности никогда не превышает предельное значение «квадратичного детектирования» для диодных детекторов (около -20 дБм), то **диодный датчик непрерывных сигналов** является превосходным вариантом выбора, что обусловлено его широким динамическим диапазоном, широкой полосой частот и обнаружением действительного среднего уровня мощности. В диодных датчиках непрерывных сигналов для обнаружения ВЧ-напряжения на резисторе оконечной нагрузки используются высокочастотные полупроводниковые диоды. Для обнаружения и положительных, и отрицательных периодов несущей обычно используется два диода, благодаря этому датчик является «симметричным» и относительно нечувствительным к искажениям на четных гармониках.

Диодные датчики непрерывных сигналов обычно поддерживают выполнение измерений от -70 дБм до +20 дБм без перегрузки. В некоторых случаях для смещения этого диапазона в сторону более высоких уровней мощности используется интегрированный аттенуатор, подключаемый перед блоком детектора. Диодные датчики непрерывных сигналов являются относительно быстродействующими устройствами и обеспечивают скорость срабатывания порядка нескольких миллисекунд на более высоких уровнях мощности. При уменьшении уровня мощности скорость срабатывания значительно уменьшается из-за фильтрации для обеспечения вывода полезных результатов – типовое значение около одной секунды на уровне -60 дБм и даже больше на уровне -70 дБм.

Для модулированных сигналов с пиковыми значениями выше -20 дБм возможно несколько вариантов выбора. **Тепловые датчики уровня мощности** реагируют на среднюю мощность любого сигнала – либо непрерывного, либо модулированного. Главным недостатком этих датчиков является недостаточная чувствительность диодных датчиков – нижнее предельное значение измерений редко бывает ниже -30 дБм при максимальном предельном значении средней мощности около +20 дБм. Однако эти датчики могут обрабатывать довольно высокий коэффициент амплитуды и могут выдерживать пиковые значения, существенно превышающие номинальное значение средней мощности при малой длительности и большой скважности импульса. Скорость срабатывания теплового датчика намного ниже скорости срабатывания диодного датчика – приблизительно 50 мс на самых высоких уровнях мощности и около одной секунды и даже больше на уровнях ниже -20 дБм.

Также используются **многодиапазонные диодные датчики**, которые объединяют несколько диодных детекторов и делителей мощности в один откалиброванный блок. В этих датчиках используется несколько пар детекторов (обычно две или три), и выбирается выход той или иной пары, работающей в своей области квадратичного детектирования. Следствием этого является расширение диапазона обнаружения действительного среднего уровня мощности диодного датчика до значительно более высоких уровней мощности – и реализуется устройство, которое обеспечивает динамический диапазон, практически как у диодного датчика непрерывных сигналов, с возможностью определения среднего значения, почти как у теплового элемента. Недостатками многодиапазонных диодных датчиков является высокая стоимость, низкая скорость срабатывания и помехи на определенных уровнях мощности, а также возможные затруднения, обусловленные расхождениями в частотной и температурной коррекции различных пар детекторов. Использование современных средств программного обеспечения может минимизировать воздействие двух последних факторов.

Также для измерения параметров модулированных сигналов используются датчики пикового уровня мощности. Эти датчики обеспечивают динамический диапазон между динамическим диапазоном тепловых датчиков и динамическим диапазоном диодных датчиков непрерывных сигналов, но характеризуются существенно более высокими скоростями срабатывания (микросекунды или меньше). До тех пор пока эта скорость срабатывания (также называемая «шириной полосы частот видеосигналов» и подробно рассматриваемая в главе 3 данного руководства) является достаточной, детектор датчика пикового уровня мощности может точно отслеживать модуляцию огибающей сигнала. Это предоставляет возможность точной линеаризации и усреднения выхода датчика с использованием высокоскоростной схемы выборки данных с применением надлежащей программной обработки. Поскольку датчики пикового уровня мощности непрерывно выдают мгновенный уровень мощности огибающей сигнала, измеритель пикового уровня мощности может указывать не только среднюю мощность. Вот некоторые из наиболее распространенных типов поддерживаемых процедур – измерение мощности в пакетах импульсов (с «временной селекцией»), полное восстановление формы сигнала, профилирование и таймирование импульсов, измерение пикового уровня мощности и статистический анализ мощности.

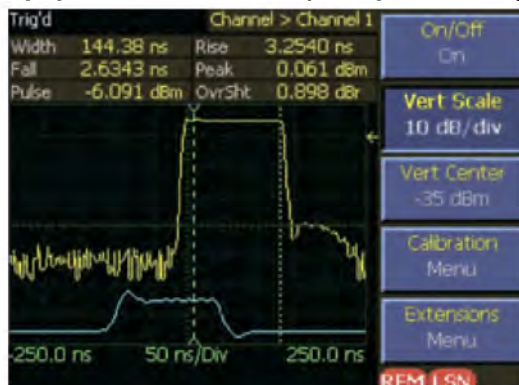
### 4.3 Выбор режима измерения

Некоторые измерители уровня мощности могут работать только с определенными типами датчиков, а некоторые обладают большей гибкостью. Датчики должны использоваться с конкретными режимами измерений в измерителях уровня мощности, которые соответствуют их возможностям:

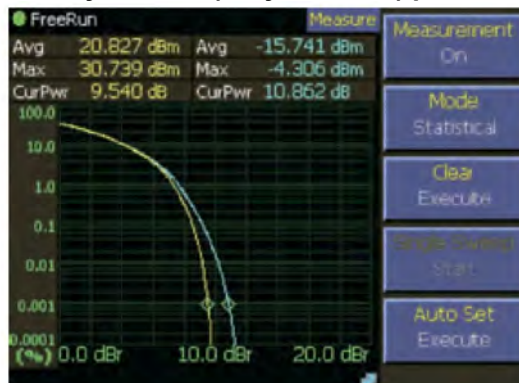
- **Режим измерения непрерывных сигналов или режим непрерывной работы (CW или Continuous):** базовый «режим непрерывной работы или режим автономной работы», используемый для датчиков уровня мощности непрерывных сигналов. В этом режиме указывается средняя мощность непрерывного сигнала CW, а также средняя мощность модулированного сигнала (при использовании теплового датчика или диодного датчика, работающего в области квадратичного детектирования) (см. Рис. 4.3.1 – Верхняя часть).
- **Режим измерения модулированных сигналов (Modulated):** расширенный «режим непрерывной работы или режим автономной работы». Подобен режиму измерения непрерывных сигналов, но в случае использования датчика пикового уровня мощности также указывает ограниченную информацию о пиковых значениях (пиковое значение, минимальное значение, отношение отношения пикового к среднему уровню мощности и динамический диапазон). Этот режим также может называться «режимом автономной работы» в измерителях пикового уровня мощности (см. Рис. 4.3.1 – Верхняя часть).
- **Запускаемый или импульсный режим (Triggered или Pulse):** Этот режим применяется только с датчиками пикового уровня мощности. Обычно в этом режиме также выполняется полное профилирование импульсов и измерения временных характеристик. В некоторых случаях отображается форма сигнала, и пользователь зачастую может выбирать конкретные временные интервалы на форме сигнала для выполнения измерений (см. Рис. 4.3.1 – Средняя часть).

- Статистический режим (Statistical):** Этот режим применяется только с датчиками пикового уровня мощности и указывает информацию о статистическом распределении уровня мощности сигнала. В некоторых случаях эти измерения выполняются как часть режима Modulated (для статистической информации о непрерывных сигналах), либо как часть режима Pulse (выводится синхронная или селективная статистическая информация) (см. Рис. 4.3.1 – Нижняя часть).

#### Режим измерения непрерывных сигналов (измерения модулированных сигналов)



#### Импульсный (запускаемый) режим



#### Статистический режим (двойная комплементарная интегральная функция распределения (CCDF))



Рис. 4.3.1. Режимы измерения

Режимы измерения более подробно рассматриваются в главе 6 данного руководства, но для выбора наиболее подходящего датчика мощности и режима измерения для того или иного сигнала необходимо придерживаться следующих рекомендаций.

Выберите **диодный датчик непрерывных сигналов в режиме измерения непрерывных сигналов** для следующих типов измерений:

- Сигнал имеет низкий уровень мощности, ниже -40 дБм.
- Сигнал является непрерывным – простая немодулированная ВЧ-несущая.
- Необходимо измерить среднюю мощность модулированного сигнала, пики которого не превышают предельное значение области квадратичного детектирования диодного датчика (около -20 дБм).

Выберите **тепловой датчик в режиме измерения непрерывных сигналов** для следующих типов измерений:

- Сигнал является непрерывным или модулированным и имеет средний уровень мощности выше -20 дБм.
- Сигнал имеет практически идеальную форму импульса с большой скважностью и пиками, которые перегрузили бы область квадратичного детектирования диодного датчика непрерывных сигналов или многодиапазонного датчика.

Выберите **датчик пикового уровня мощности в режиме измерения модулированных сигналов** для следующих типов измерений:

- Сигнал имеет средний уровень мощности, выше -40 дБм.
- Этот сигнал является сигналом с непрерывной модуляцией с шириной полосы частот видеосигнала (амплитудная модуляция или огибающая) менее 80 МГц.
- Модуляция сигналов может быть периодической, но требуется выполнение только несинхронных измерений (полная средняя мощность и пиковая мощность).
- «Шумоподобные» сигналы с цифровой модуляцией, например, CDMA или OFDM, том случае, когда требуется выполнение измерений только средней и пиковой мощности. (Если требуется вероятностная информация о пиках, см. статистический режим.)

Выберите **датчик пикового уровня мощности в импульсном режиме** для следующих типов измерений:

- Периодические или импульсные сигналы с импульсной мощностью выше -40 дБм. Импульсы могут быть любой формы.
- Пакетные сигналы, для которых измерение уровня мощности должно быть синхронизировано с модуляцией.
- Требуется любой вид временного измерения профиля мощности или измерения с временной селекцией.

Выберите **датчик пикового уровня мощности в статистическом режиме** для следующих типов измерений:

- Сигнал имеет средний уровень мощности, выше -40 дБм.
- «Шумоподобные» сигналы с цифровой модуляцией, например, CDMA (и все его разновидности) или OFDM, когда для анализа сигнала требуется вероятностная информация.
- Любой модулированный сигнал со случайными редкими пиками, когда требуется знать вероятностную информацию о пиках.

#### **4.4 Измерение ВЧ-сигналов с комплексной модуляцией: Сравнение измерителей уровня мощности с анализаторами спектра**

##### **Измерительные устройства**

Для измерения параметров сигналов систем беспроводной связи, включая системы сотовой/мобильной связи, а также коммерческие и правительственные системы связи/военные радиолокационные системы, разработано большое число измерительных устройств уровня мощности высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов. Для простоты измерительные устройства разделены на две категории: «настраиваемые» и «широкополосные» измерительные устройства.

При выполнении широкополосных или ненастраиваемых измерений уровня мощности используется простая комбинация из детектора уровня мощности и отображающего или регистрирующего устройства. Настраиваемые же измерения обычно выполняются с использованием схемы супергетеродинного типа, состоящую из входного усилителя и/или аттенюатора, гетеродина, смесителя, фильтров и усилителей промежуточной частоты, а также детектора уровня мощности или системы оцифровки. Базовые блоки приемника могут быть объединены для создания анализаторов спектра, СВЧ-приемников, векторных анализаторов сигналов (VSA) или комплектов для тестирования оборудования сотовой связи.

Для обеспечения необходимой скорости и точности измерений в широкой полосе частот комбинация «детектор уровня мощности/регистрирующее устройство» («датчик мощности / измеритель») подает либо среднюю мощность, либо мощность модулированной несущей ВЧ-сигнала на вход датчика. Последние достижения в области технологии датчиков вместе с улучшенными вычислительными возможностями цифровой обработки сигналов предоставляют комбинации «датчик уровня мощности/измеритель» возможность быстрого и точного измерения различных параметров, включая среднюю мощность, отношение пикового к среднему уровню мощности (PAPR) и временные профили форматов комплексной цифровой модуляции, используемых в системах беспроводной связи. Несмотря на то, что комбинация «датчик уровня мощности/измеритель» не поддерживает частотную избирательность, некоторые новые измерительные устройства могут выполнять временные измерения и на большом цветном дисплее отображается подробная информация о сигнале.

Для современных датчиков уровня мощности используется три типовых схемы детектирования – датчики с термисторами, термодатчики и диодные детекторы. Каждая из этих схем детектирования обладает своими преимуществами и ограничениями; подробную информацию см. в главе 2 данного руководства.

В случае измерений пикового уровня мощности с высоким временем нарастания и широкой полосой частот видеосигнала в большинстве случаев наилучшим выбором является высокочастотный/сверхвысокочастотный диодный детектор. Этот диодный детектор также предпочтительнее использовать в случаях, когда требуется высокая чувствительность и широкий динамический диапазон. Датчики с термисторами (боллометры) и термопарные детекторы могут обеспечить выполнение точных измерений истинного среднего уровня мощности как непрерывных, так и широкополосных сигналов в процессе выполнения калибровки (см. Рис. 4.4.1).

В отличие от измерителей уровня мощности устройства супергетеродинного типа (например, анализаторы спектра) обеспечивают частотную избирательность с ограниченной шириной полосы частот. Эти устройства предназначены для выполнения измерений уровня мощности в относительно узком частотном диапазоне с акцентированием на спектральное распределение мощности. Благодаря последним достижениям в области высокоскоростной оцифровки и цифровой обработке сигналов существенно улучшены точность и расширены функциональные возможности этих устройств с точки зрения измерений сигналов с цифровой модуляцией. Некоторые современные анализаторы также выполняют временной и статистический анализ мощности (см. Рис. 4.4.2 и 4.4.3).

### **Источники погрешности и ошибок**

При измерении уровня мощности любого ВЧ-сигнала существует много источников ошибок и погрешности, но эти проблемы еще более усложняются при широкой полосе частот и динамическом диапазоне ВЧ-/СВЧ-сигналов с комплексной модуляцией. Для непрерывных сигналов измерители уровня ВЧ-мощности являются общепринятыми стандартами для точного измерения уровня мощности, но выбор не является таким очевидным при добавлении модуляции. В этом случае существует соблазн использовать анализатор спектра из-за его возможности характеризовать распределение мощности сигнала в зависимости от частоты, но помимо значительно более высокой стоимости, существуют определенные ограничения, которые в большинстве случаев могут уменьшить точность измерений.

В данном разделе объясняется, почему измеритель пикового уровня мощности зачастую является самым экономичным выбором для широкополосных сигналов с цифровой модуляцией, что обусловлено непревзойденной скоростью и точностью.

Точность является важнейшим фактором для каждого специалиста по тестированию, однако существует большое число источников ошибок и погрешности, которые вносят свой вклад в неточность измерений уровня мощности. При выполнении измерений необходимо, чтобы ошибки и погрешности были определены и затем либо скорректированы, либо учтены для улучшения точности измерений.

В измерителях пикового уровня ВЧ-мощности на ошибки измерений воздействует рассогласование с источником сигналов, эталонное значение уровня мощности и нелинейность детектора, погрешность из-за коэффициента калибровки, также собственные шумы и дрейф параметров контрольно-измерительной аппаратуры. Ошибки из-за рассогласования с источником обусловлены различием импеданса между ВЧ-выходом источника сигналов и входом датчика мощности. Для большинства измерений такое рассогласование является источником самой большой доли ошибки, и поддержание наилучшего согласования между источником и датчиком улучшает точность измерений.

Линейность датчика является источником второй по вкладу доли ошибки для диодных датчиков, используемых для измерений в широкой полосе частот и в широком динамическом диапазоне.



Для улучшения линейности датчика используется схема двухполупериодного выпрямления с двумя диодами, см. Рис. 4.4.1. Для сигналов ниже уровня собственных шумов датчика -20 дБм эта диодная схема имеет линейную характеристику и для нее требуется минимальная коррекция линейности. Для сигналов выше -20 дБм в датчике необходимо использовать коррекцию линейности для компенсации нелинейности диодов.

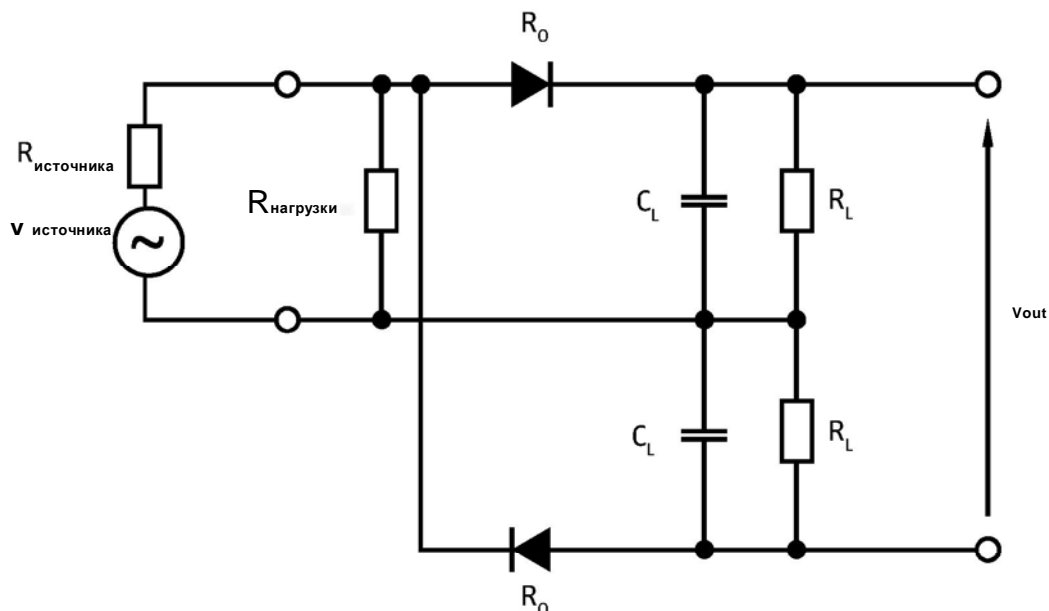


Рис. 4.4.1. Конфигурация датчика уровня ВЧ-мощности с двумя датчиками

Таблицы коррекции линейности для каждого датчика уровня ВЧ-мощности обычно заносятся в датчик во время заводской калибровки. Эти таблицы предоставляют измерительному устройству отображать корректное показание мощности для всех уровней входных сигналов даже в том случае, если характеристика датчика не является линейной.

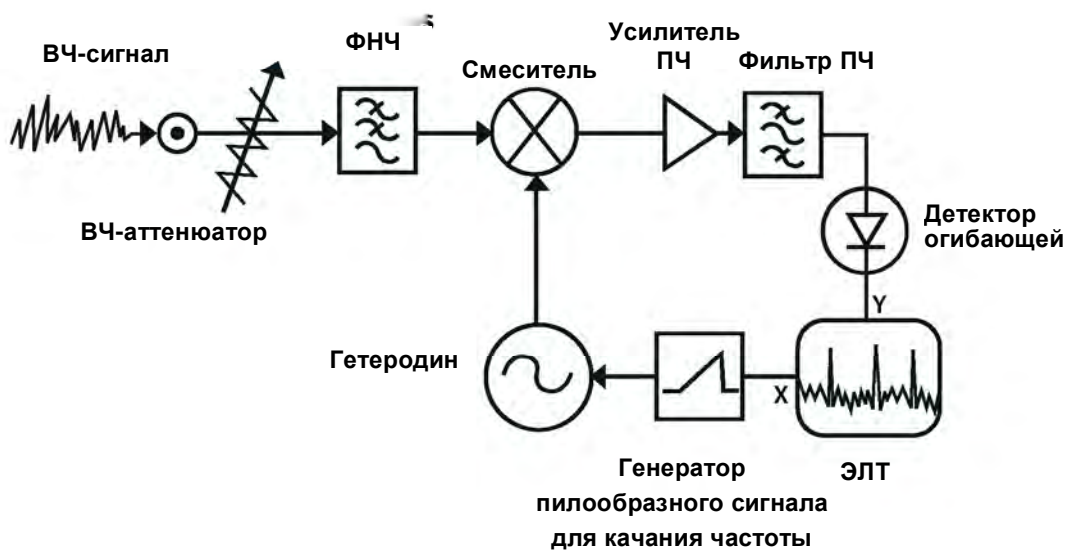


Рис. 4.4.2. Типовая структура супергетеродинного анализатора спектра

Для коррекции незначительных изменений характеристики датчика и измерителя во время выполнения измерений в большинстве высококачественных измерителей уровня мощности содержится встроенный источник отслеживаемой калибровки, либо прецизионный источник эталонного уровня мощности. Способы калибровки датчика мощности подробно рассматриваются в главе 5 данного руководства. Комбинация из заводской калибровки и калибровки в условиях эксплуатации может обеспечить лучшую коррекцию всех типов нелинейностей датчика во всем динамическом диапазоне устройства для минимизации ошибок.

На Рис. 4.4.2 показана схема базового аналогового анализатора спектра. Как и измеритель уровня мощности, анализатор спектра содержит детектор уровня мощности и схему измерения, а также большое число дополнительных компонентов, необходимых в анализаторе спектра для обеспечения частотной избирательности. Все эти дополнительные компоненты – attenuаторы, осцилляторы, смесители, фильтры и усилители – вносят свой вклад в погрешность измерения уровня мощности устройства. Современные анализаторы спектра могут значительно уменьшить ошибки путем выполнения некоторых из этих функций в цифровой форме, подробное описание см. ниже.

Входящий ВЧ-сигнал обычно подается на широкополосный регулируемый входной attenuатор для уменьшения амплитуды сигнала до приемлемого уровня для схемы, которая идет после смесителя. Регулируемые или ступенчатые attenuаторы в редких случаях обеспечивают хорошее согласование ВЧ-сигнала в широком диапазоне частот, то есть первой по значимости ошибкой для входящего сигнала является ошибка из-за рассогласования. Ступенчатый attenuатор откалиброван для внесения определенного затухания на определенной частоте для каждой установки attenuатора, но этот процесс все еще может быть причиной значительной погрешности.

Дополнительная погрешность может быть обусловлена переключением установок attenuатора, поскольку каждая установка характеризуется своим входным импедансом для источника сигналов пользователя. Это является причиной возникновения потерь из рассогласования, зависящим от установок attenuатора. Изменения потерь из рассогласования калибруются только в том случае, если комплексный импеданс источника измеряемого сигнала совпадает с импедансом калибровочного сигнала, используемого для характеристики attenuатора. Если эти импедансы не совпадают, то фактические потери из рассогласования для каждой установки затухания будут отличаться от сохраненного значения калибровки, и показание уровня мощности будет изменяться при каждом изменении диапазона attenuатора.

Измерители уровня мощности не содержат смеситель, работающий в узком динамическом диапазоне, и для них не требуется ступенчатый attenuатор. Источник ВЧ-сигнала подключается к детектору уровня мощности (и к встроенной прецизионной оконечной нагрузке) либо напрямую, либо через одиночный фиксированный attenuатор. Помимо возможности поддержания хорошего согласования в широком диапазоне частот путем удаления схемы переключения attenuаторов, датчик уровня мощности представляет для источника ВЧ-сигналов фиксированную, а не регулируемую оконечную нагрузку. Если это не устраняет потери из рассогласования, то эти потери имеют постоянное значение во всем динамическом диапазоне сигнала, что значительно улучшает линейность измерений уровня мощности.

Измерители уровня мощности обладают дополнительными преимуществами по точности над анализаторами спектра, поскольку у них нет каскада с гетеродином – гетеродина, смесителя и фильтра.

Все эти компоненты вносят свой вклад в погрешность измерения уровня мощности устройства. Смеситель является нелинейным устройством, и – как для диодного детектора – его функция преобразования должна быть точно квалифицирована по частоте, амплитуде и температуре. Типовой смеситель имеет плохое согласование по ВЧ, но из-за того, что он изолирован от источника ВЧ-сигналов, плохое согласование смесителя «видно» источником только при установке анализатора с максимальной чувствительностью. Каскад с гетеродина, каскад промежуточной частоты и детекторный каскад должны быть характеризованы подобным образом.

Все компоненты классического анализатора спектра (входной аттенюатор, устройство переключения нескольких полос частот, гетеродина (LO), смесители, усилители промежуточной частоты (IF) и фильтры, включая фильтр ширины полосы частот («RBW»)) являются аналоговыми компонентами и вносят свой вклад в погрешность измерений уровня мощности. В современных измерительных устройствах содержатся схемные компоненты, за счет цифровой обработки уменьшающие погрешность измерений.

В зависимости от точной конфигурации более новые цифровые версии, как показано на Рис. 4.4.3, содержат подобные версии аттенюаторов и фильтров, но не содержат некоторые версии гетеродинов и смесителей. Использование процесса цифровой обработки добавляет другие источники ошибки, включая ошибку дискретизации аналого-цифрового преобразования и джиттер схемы выборки и хранения, но за счет точного конфигурирования можно минимизировать или, по крайней мере, компенсировать воздействие этих источников ошибок.

Фильтр ширины полосы частот (RBW) анализатора может отвечать требованиям измерения уровня мощности на одной частоте, измерения уровня мощности непрерывного сигнала (CW); но широкополосные сигналы с цифровой модуляцией, части спектра канала, а также части сигнала соседнего канала, могут либо исключаться, либо не исключаться этим фильтром, что уменьшает точность измерения уровня мощности.

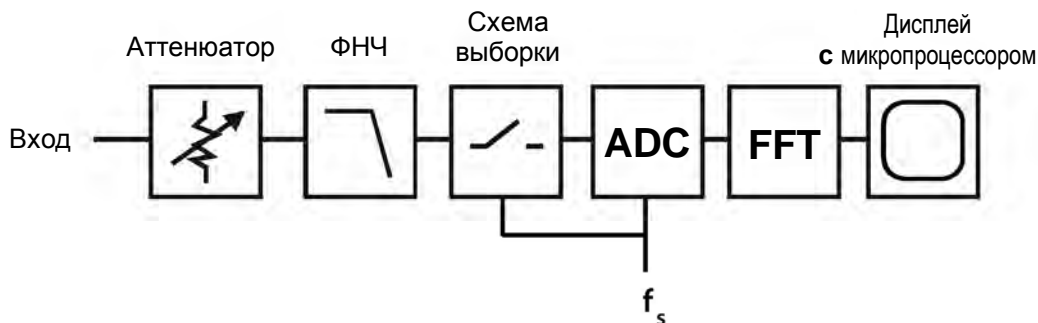


Рис. 4.4.3. Цифровой анализатор спектра с быстрым преобразованием Фурье (FFT)

Погрешность измерений анализатора спектра больше погрешности измерений измерителя пикового уровня мощности из-за дополнительных каскадов измерения, но для многих пользователей эта потеря точности возмещается дополнительными функциональными возможностями, обусловленными частотной избирательностью анализатора.

### Преимущества и ограничения измерителей уровня мощности

Сегодняшние измерители пикового уровня ВЧ-мощности являются быстрыми и точными измерителями, обеспечивающими временные измерения истинного уровня мощности сигнала. Измеритель пикового уровня мощности предназначен для точного измерения пиковых и средних уровней мощности как импульсных ВЧ-сигналов, так и сигналов с комплексной цифровой модуляцией.

Сигналы с комплексной модуляцией, подобно сигналам множественного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA), представляют собой шумоподобные сигналы со случайными пиками мощности, для надлежащего измерения которых требуется использование возможностей статистического анализа. Встроенные схемы цифровой обработки сигналов предоставляют измерителю пикового уровня мощности возможность быстрого выполнения статистического анализа этих комплексных сигналов.

Схема цифровой обработки сигналов, используемая в анализаторах пикового уровня мощности компании Boonton, может непрерывно выполнять сбор и обработку показаний на длительно выдерживаемой скорости выборки до 25 миллионов выборок/с и скорости запускаемой передачи пакетов 50 миллионов выборок/с. Результаты этих измерений быстро отображаются в статистически значащей функции плотности вероятности (PDF), интегральной функции распределения (CDF) или комплементарной интегральной функции распределения (CCDF). Эти функции показывают число событий измерения уровня мощности на различных уровнях (см. Рис. 4.4.4). Функции CDF и CCDF указывают отрезок времени, в течение которого коэффициент амплитуды передатчика выше (или ниже) требуемого уровня. Это может указываться в момент времени, когда выход усилителя обрезается и сжимается. Эту процедуру рекомендуется использовать на этапе проектирования системы усилителя для обеспечения требований по размеру и мощности, либо для выполнения корректирующее действие во время работы усилителя для поддержания оптимальной выходной мощности передатчика. Статистический анализ мощности подробно рассматривается в разделе 6.3 данного руководства.

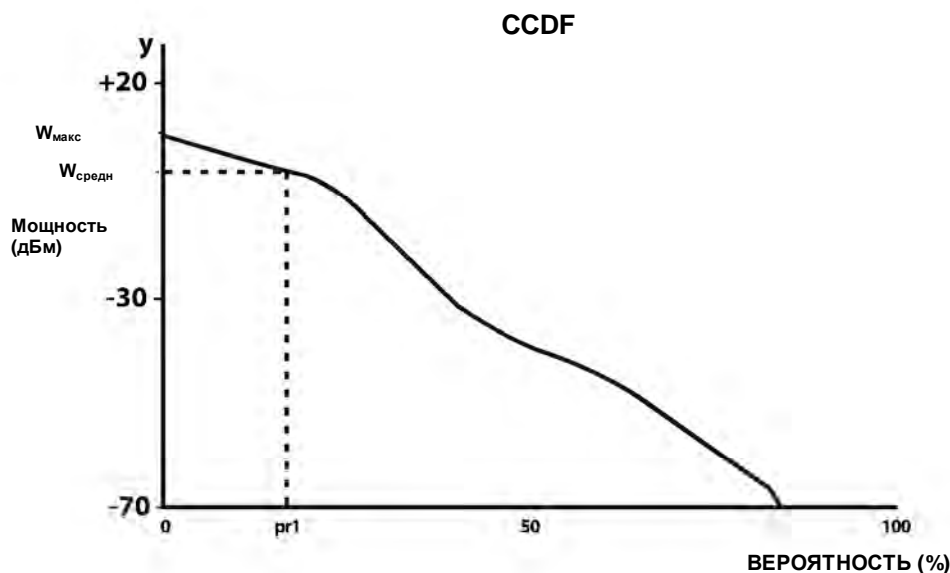


Рис. 4.4.4. Статистическое появление различных уровней мощности

Измерители компании Boonton выводят два регулируемых маркера для ограничения области измерения и могут считывать уровень мощности в любой точке формы сигнала, как показано на Рис. 4.4.5. Это может использоваться для определения максимального или минимального пика мощности, долговременной средней мощности и отношения пикового к среднему уровню мощности (PAR) в определенных областях (обычно в конкретном канале или временном интервале). Измерительные устройства компании Boonton поддерживают возможности запуска, как у осциллографа, для сбора определенных сегментов сигналов. В разделе 6.2 данного руководства рассматриваются запускаемые и импульсные измерения, выполняемые с использованием измерителей пикового уровня мощности.

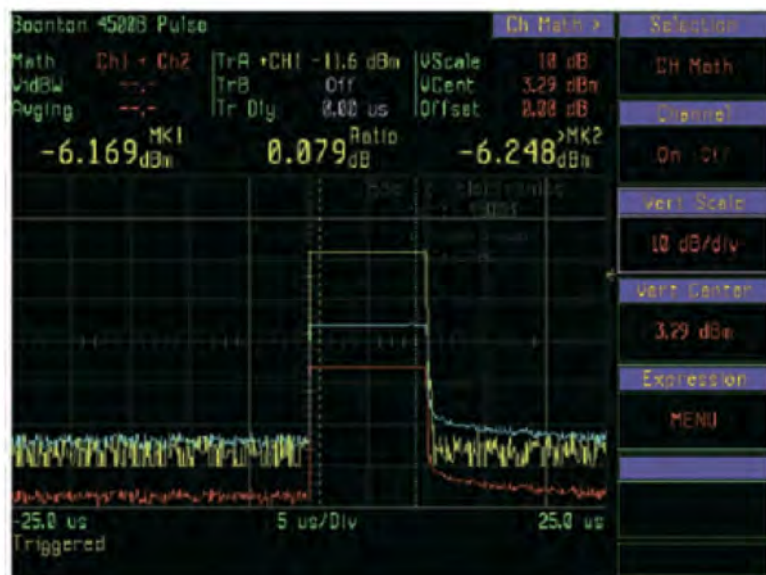


Рис. 4.4.5. Спад импульса на канале 1 и на канале Math (на канале результатов математических вычислений), показывающий изменение усиления во время длительности импульса

Хорошее согласование по входу во всем диапазоне частот датчика минимизирует ошибку из-за рассогласования и улучшает точность измерений. Благодаря интегрированному модулю компенсации дрейфа температуры, современные измерители пикового уровня мощности могут точно измерять абсолютный уровень мощности с точностью до дБ и относительный уровень мощности с точностью до сотых дБ.

В отличие от настраиваемых измерительных устройств, измеритель уровня мощности не может указывать частоту несущей или спектральный состав сигнала или измерять мощность в пределах полосы пропускания определенного канала. Правильнее сказать, измеритель пикового уровня мощности обеспечивает экономичный способ выполнения измерений временных характеристик (измерений импульсных сигналов), предоставления средней и пиковой мощности и статистической информации о мощности (например, выполнение комплементарной интегральной функции распределения (CCDF) сигналов с комплексной модуляцией).

### Преимущества и ограничения анализаторов спектра

Основным преимуществом использования супергетеродинных измерительных устройств, подобных анализаторам спектра, является возможность ограничения измерения уровня мощности требуемым диапазоном частот, либо конкретным каналом при наличии соседних каналов. Благодаря значительному усовершенствованию цифровой обработки сигналов (DSP), микроэлектроники и линейных усилителей, анализаторы спектра, использующие цифровую обработку сигналов, существенно улучшили точность измерения многих типов сигналов, включая новейшие форматы комплексной цифровой модуляции.

Анализаторы спектра также могут отображать амплитуду сигнала в зависимости от частоты в требуемом диапазоне, но эта возможность реализуется в дорогих анализаторах спектра, стоимость которых в два – четыре раза выше стоимости обычного высокопроизводительного измерителя пикового уровня мощности.

Однако возможность настройки в анализаторе спектра может быть помехой при выполнении попытки измерения мощности широкополосного сигнала. На Рис. 4.4.6 показаны ограничения анализатора спектра с использованием фильтра RBW с установками уже полосы частот сигнала, когда мощность добавляется из соседнего канала, что приводит к неточным показаниям. Поскольку измерение ограничено по полосе частот, часть мощности помех исключается из области измерения для уменьшения точности.

В примере (1) непрерывный сигнал может быть точно охарактеризован качаемой или постоянной средней частотой несущей и постоянной установкой ширины полосы частот (RBW).

В примере (2) ширины полосы частот является слишком узкой для сигнала; из-за этого требуется качание средней частоты несущей и использовать интегрирование мощности для определения общей мощности всего спектра сигнала. Такое качание частоты становится причиной того, что время измерения, становится намного больше времени выполнения этого же измерения с использованием измерителя пикового уровня мощности.

В примере (3) показан пример трудного измерения. Ширина полосы частот не может быть установлена достаточно широкой для захвата всех трех каналов и, одновременно с этим, не может быть установлена достаточно узкой для полного исключения соседних каналов. В данном случае для выполнения измерения необходимо использовать очень узкую ширину полосы частот (и очень медленное качание частоты).

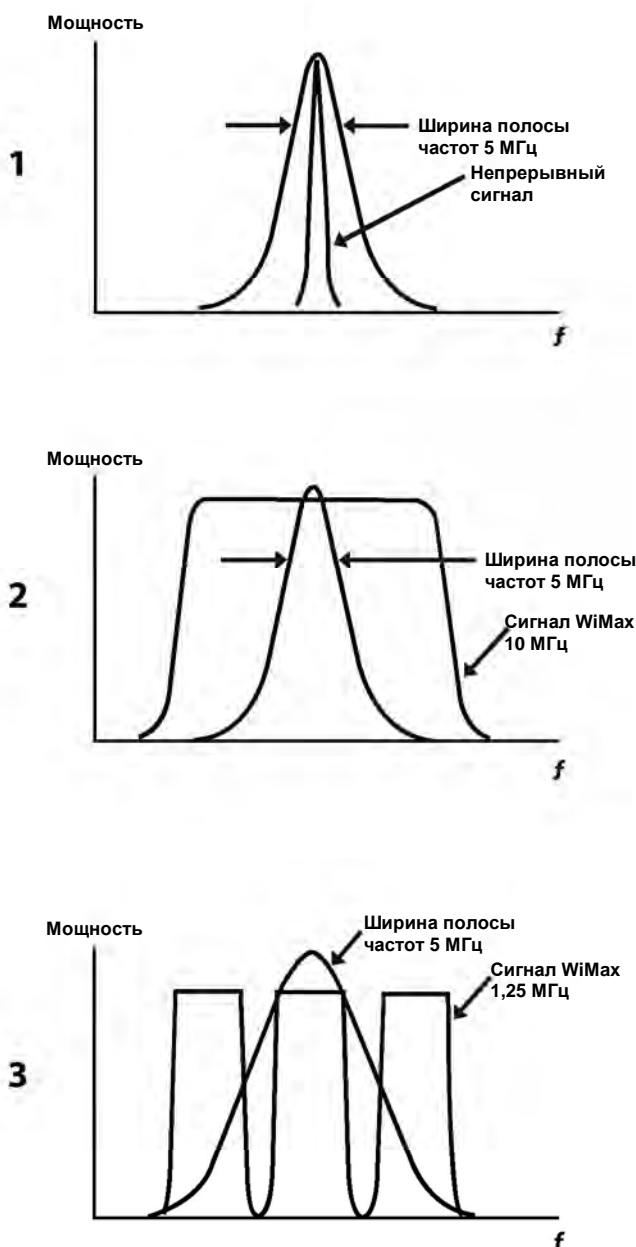


Рис. 4.4.6. Точность измерения зависит от фильтра ширины полосы частот (RBW) анализатора спектра

Точность определения абсолютного значения также уменьшается при качании частоты сигнала с высокой скоростью для сбора данных сигналов с быстрыми переходными состояниями. Будучи измерительными устройствами частотного анализа, у анализаторов спектров отсутствует широкий мгновенный динамический диапазон, необходимый для предоставления значащих статистических данных для функции распределения вероятностей (PDF), интегральной функции распределения (CDF) или комплементарной интегральной функции распределения (CCDF), важной информации, требующейся для сигналов современных систем связи с комплексной цифровой модуляцией.

### **Итоговая информация**

В зависимости от варианта применения для измерения уровня мощности комплексных ВЧ/СВЧ-сигналов требуются как широкополосные, так и настраиваемые измерительные устройства.

В случае импульсной мощности, как в радиолокационных системах, измеритель пикового уровня мощности является идеальным вариантом выбора для быстрых и точных измерений временных характеристик. Для сигналов с высоким временем нарастания и большой скважностью требуется широкий динамический диапазон для измерения сигналов с высоким отношением пикового к среднему уровню мощности.

Для сигналов систем связи – например, для шумоподобного сигнала CDMA – измеритель пикового уровня мощности является привлекательным предложением из-за своего широкого динамического диапазона, широкой полосы частот видеосигнала и возможности выполнения статистического анализа.

Когда информация о частоте или о спектре сигнала не требуется, измерители пикового уровня ВЧ-мощности обеспечивают наилучшую комбинацию скорости и точности измерений в широком диапазоне частот и стоят существенно меньше многих анализаторов спектра. С другой стороны, анализаторы спектра обеспечивают информацию о спектре сигнала и частотную избирательность, которая не может быть предоставлена измерителями уровня мощности.

### **4.5 Осциллографы и детекторы**

Перед использованием современных измерителей пикового уровня мощности система, содержащая диодный выпрямитель, осциллограф, измеритель среднего уровня мощности, импульсный генератор и различные соединители, преобразовывалась для сбора импульсных сигналов из усилителей высокой мощности, используемых для сигналов радиолокационных систем. На Рис. 4.5.1 показана блок-схема диодной детекторной системы.

Для формирования импульсного выходного сигнала радиолокационной системы на вход импульсного усилителя (DUT) подается непрерывный входной сигнал и импульс запуска из подключенного генератора. Этот сигнал передается через направленный соединитель на эквивалент нагрузки или в действительную антенну и в диодную детекторную систему. После этого тестовый сигнал разделяется между измерителем среднего уровня мощности и диодным детектором (огibaющей), подключенным к осциллографу. Измеритель уровня мощности непрерывного сигнала обеспечивает измерение абсолютного среднего уровня мощности, а осциллограф указывает форму огibaющей импульса. Скважность вычисляется делением периода повторения импульсов на длительность импульса огibaющей. После этого импульсная мощность вычисляется делением среднего уровня мощности на скважность (см. Рис. 4.5.2).

При этом вычислении предполагается постоянный уровень мощности во время подачи импульса, совершенно прямоугольная форма огибающей импульса и постоянная скважность. Ошибки вычисления импульсной мощности в большинстве случаев обусловлены широко распространенными аномалиями форм импульсных сигналов – например, неравномерностями вершины импульса (выбросы и переходные процессы в виде затухающих колебаний (т. н. «звон»)) или медленными переходами на границах импульсов. На Рис. 4.5.3 показано несколько примеров искаженных форм импульсов.

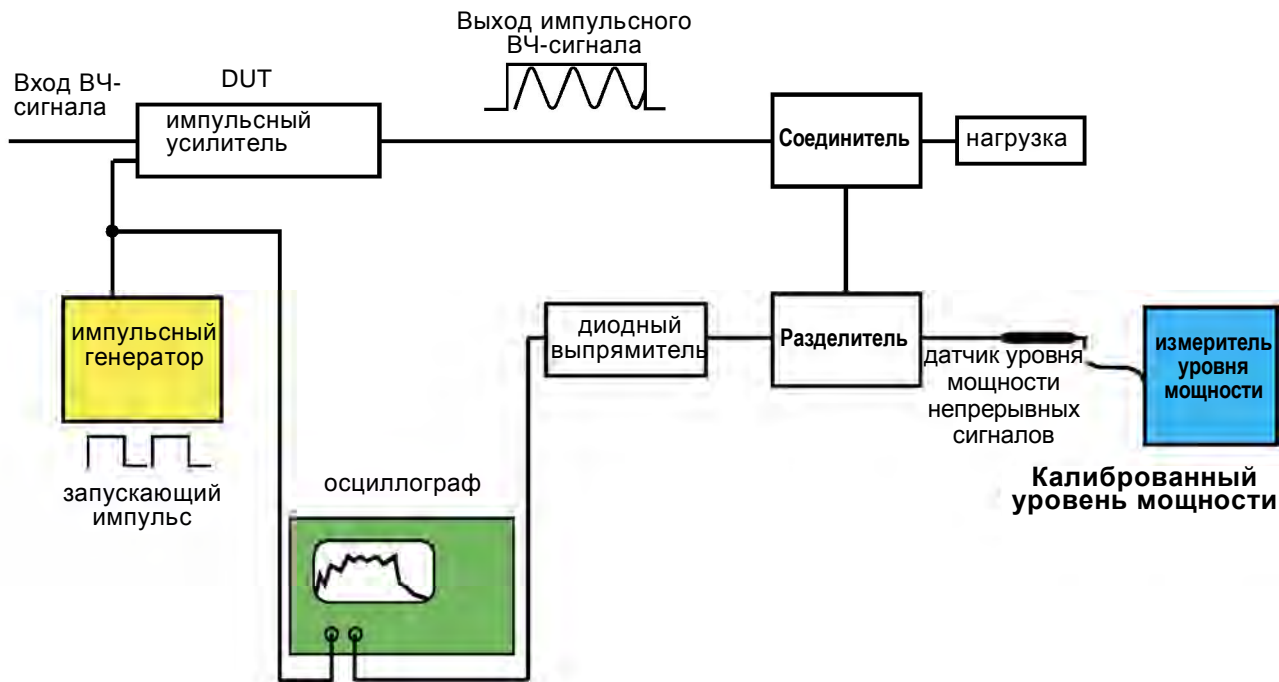


Рис. 4.5.1. Типовая система измерения уровня мощности импульсных сигналов высокой мощности с использованием стандартных способов

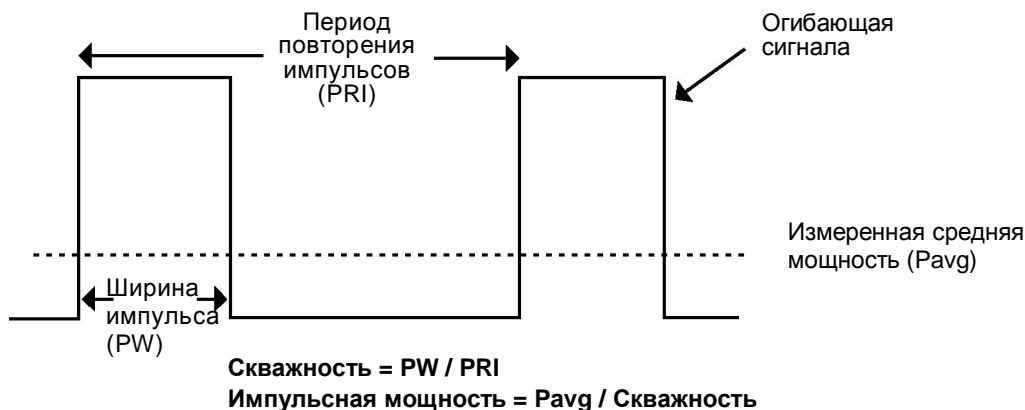


Рис. 4.5.2. Соотношения между средней мощностью, импульсной мощностью и скважностью



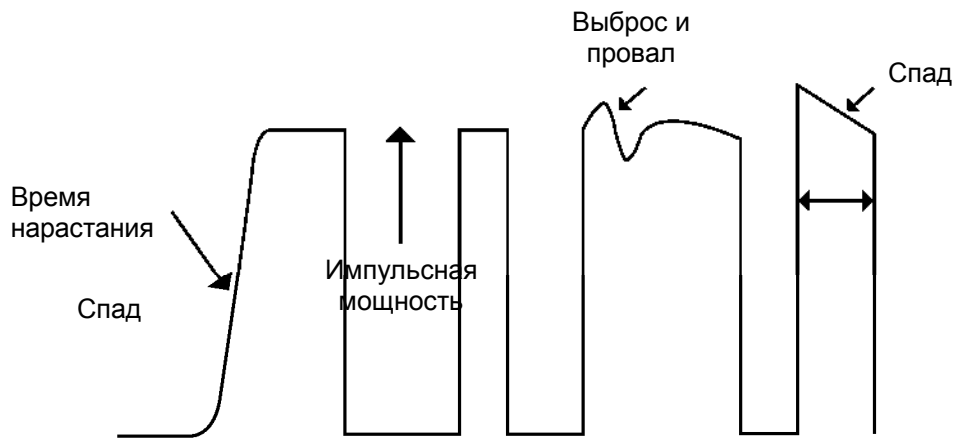


Рис. 4.5.3. Искаженные формы импульсов

На Рис. 4.5.4 показан современный датчик пикового уровня мощности и схема диодного выпрямителя. На верхнем рисунке показана типовая схема однополупериодного выпрямителя с факторами неопределенности, которые содержат некалиброванный детектор с ограниченным динамическим диапазоном и довольно высоким уровнем собственных шумов. Однополупериодный выпрямленный вход не может использоваться для точного измерения несимметричных форм сигналов; кроме того, на него оказывает воздействие гармонические составляющие. Согласование с источником ВЧ-сигналов становится затруднительным из-за воздействия параллельно подключенного импеданса выходной нагрузки. Эта нагрузка необходима для достижения быстрой импульсной характеристики, в качестве этой нагрузки может использоваться либо внутренняя 50-омная нагрузка, либо внешний резистор. Часть этого импеданса подключена параллельно входной нагрузке детектора, что воздействует на КСВН на входе. Это воздействие является очень малым при низких уровнях входных сигналов и становится значительным при высоких уровнях входных ВЧ-сигналов. Несмотря на то, что для увеличения точности измерений однополупериодный детектор может быть откалиброван с использованием простых алгоритмов, дифференциальный датчик с двумя диодами имеет несколько важных преимуществ.

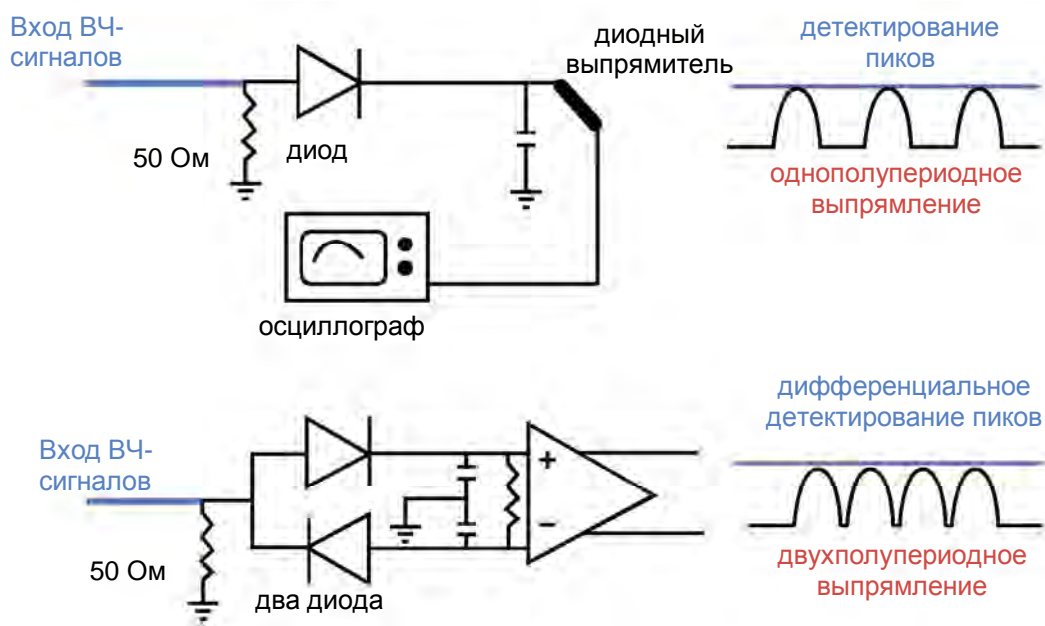


Рис. 4.5.4. Типовые конфигурации из осциллографа и детектора измерителя уровня мощности

Дифференциальная система с двумя балансными диодами используется для измерения с двухполупериодным выпрямлением сигнала. Это улучшает линейность и время срабатывания при измерении и компенсирует большую часть асимметрии формы сигнала при детектировании огибающей сигнала. Дифференциальная конфигурация детектирования обеспечивает уменьшение уровня синфазного шума, что снижает уровень собственных шумов датчика с увеличением динамического диапазона. Двухполупериодное выпрямление также значительно улучшает точность измерения сигналов при высоком уровне четных гармоник. Дальнейшее улучшение достигается путем точной калибровки на нескольких уровнях мощности в линейном диапазоне датчика (в области квадратичного детектирования диодного детектора). Современные измерительные устройства корректируют нелинейность и за пределами этого диапазона, за счет чего калиброванные измерения поддерживаются вплоть до предельного значения уровня мощности детектора (информацию о диапазоне измерений датчика см. в разделе 3.4). Современные двухканальные измерители пикового уровня мощности также обеспечивают возможность одновременного измерения мощности в прямом направлении и отраженной мощности, см. рисунок ниже.

На Рис. 4.5.5 канал 1 представляет собой выход опорного сигнала радиолокационной системы, а канал 2 представляет собой мощность отраженного (обратного) сигнала из антенны. Это значение может использоваться для измерения КПД антенны (обратные потери,  $S_{11}$ ). Дополнительный динамический диапазон за счет калибровки датчика из двух диодов предоставляет пользователю возможность измерения мощности в прямом направлении и отраженной мощности на одном и том же измерительном устройстве. По сравнению с этим, традиционный детектор, подающий сигнал на осциллограф совместно с измерителем среднего уровня мощности, ограничивает динамический диапазон, и для выполнения одиночного измерения требуется разделение входного сигнала.

Двухканальный измеритель пикового уровня мощности обеспечивает более простой, более удобный способ измерения обратных потерь в антенне радиолокационной системы.

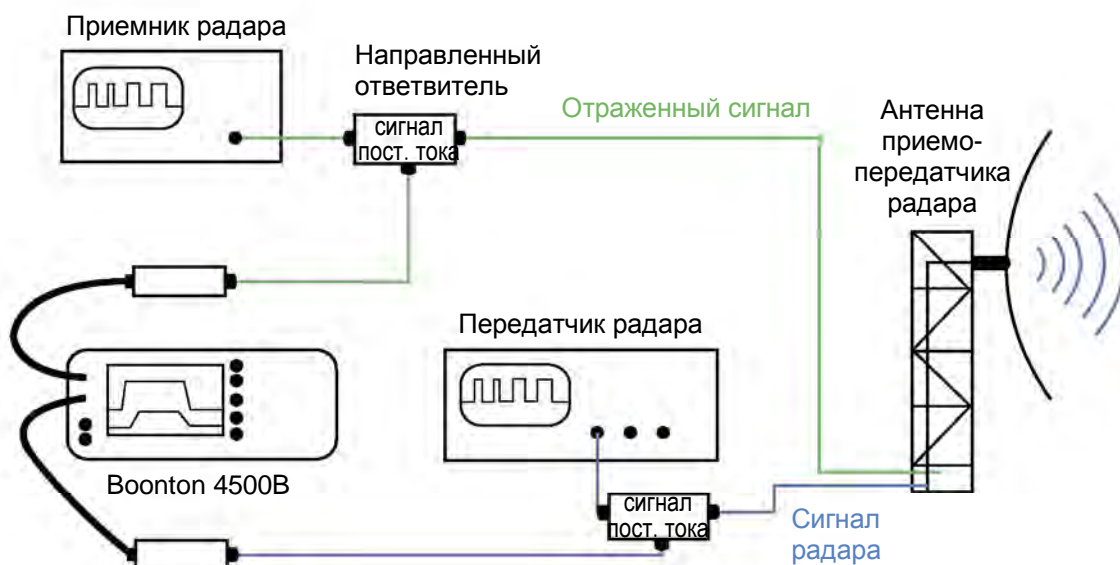


Рис. 4.5.5. Измерение обратных потерь антенны радиолокационной системы с помощью измерителя уровня мощности

## Глава 5: Калибровка

Измерения являются совершенно бессмысленными, если они являются неточными. Даже при использовании надлежащего оборудования для выполнения точных измерений уровня мощности необходимо выполнение действительной калибровки. Измерители уровня мощности должны решить задачу точного указания уровня мощности в различных условиях. И измерительное устройство, и датчик мощности должны быть откалиброваны таким образом, чтобы указываемое значение мощности максимально точно указывало фактический уровень входной ВЧ-мощности независимо от используемой контрольно-измерительной аппаратуры и внешних условий.

В данной главе рассматривается калибровка линейности и частоты, которые являются неотъемлемой частью процесса измерения уровня мощности. Большинство измерителей уровня мощности также содержат модуль температурной компенсации или коррекции – обычно процесс компенсации или коррекции выполняется как часть процесса коррекции линейности и поэтому отдельно не рассматривается.

### 5.1 Заводская калибровка без обратной связи

Самый простой способ калибровки применялся на начальном этапе измерений уровня мощности. При использовании этого способа используются известные уровни сигналов и физическая маркировка положения стрелки измерительного устройства на каждом шаге уровня мощности с последующим нанесением нескольких рисок (при необходимости). В этом случае создается примитивная «таблица преобразования», которая компенсирует усиление и нелинейность (форму) функции преобразования комбинации из датчика и измерителя уровня мощности.

Со временем риски на лицевой стороне измерителя стали фиксированными, и настройки стали выполняться с помощью аналоговых потенциометров, регулирующих усиление и корректирующих форму для каждого диапазона измерителя уровня мощности. Использование нелинейных цепей из диодов и резисторов обеспечивает достаточно точную коррекцию искривления функции преобразования. Затем эти нелинейные цепи для функции «коррекция формы» были заменены дискретной цифровой схемой. Для этого также требуется, чтобы и датчик, измеритель были откалиброваны вместе как один блок.

Поскольку большинство современных измерителей уровня мощности комплектуется сменными датчиками, в настоящее время есть смысл отдельной калибровки измерителей и датчиков для возможного совместного использования различных устройств с сохранением их калибровки. Для калибровки измерителя уровня мощности на него подается одно или несколько прецизионных опорных напряжений постоянного тока, моделирующих выход датчика мощности; после этого измеритель настраивается на нормированные коэффициенты усиления в своем рабочем диапазоне. Этот процесс часто называется калибровкой по постоянному току и гарантирует, что определенный датчик сформирует одно и то же показание на любом откалиброванном измерителе уровня мощности. Это может выполняться как в виде физической регулировки аналоговых потенциометров, так и в виде цифровой регулировки коэффициентов усиления и коррекции формы с использованием программного обеспечения.

Но поскольку датчики мощности отличаются друг от друга, измерителю уровня мощности также должно быть известно точное соотношение между амплитудой входного ВЧ-сигнала и обнаруженным выходным напряжением из подключенного датчика. Эта информация может указываться одним или двумя числами из многомерных таблиц данных калибровки.

Информация о функции преобразования датчика может быть определена на предприятии-изготовителе и записана в энергонезависимой памяти EEPROM датчика. При подключении датчика эти данные калибровки датчика загружаются измерителем уровня мощности и используются для вычисления соответствующей ВЧ-мощности с целью отображения для заданного выходного сигнала датчика (см. Рис. 5.1.1).

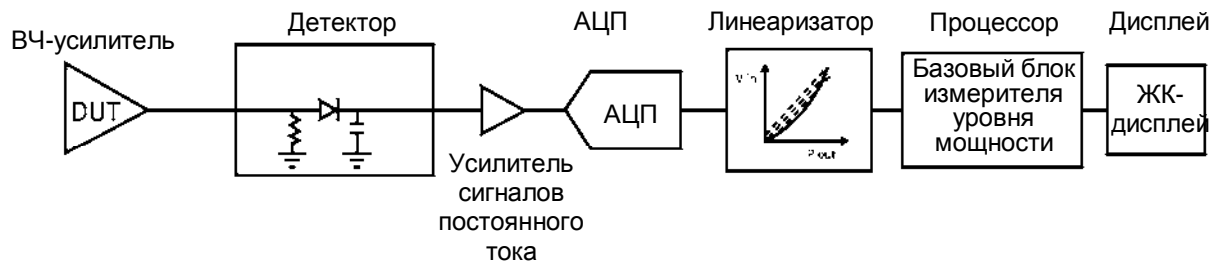


Рис. 5.1.1. Схема прохождения сигнала от датчика до измерителя

Некоторые типы датчиков мощности (например, термопарные датчики) имеют практически линейную характеристику и выводят выходное напряжение, прямо пропорциональное входной ВЧ-мощности. Диодные датчики непрерывных сигналов, работающие в области квадратичного детектирования (ниже -20 дБм), также имеют практически линейную характеристику. Такие линейные детекторы уровня мощности очень просто калибровать, и для некоторых измерений необходимо сохранить только «усиление передачи» – только одно значение в «микровольтах на милливатт» для достаточной точности.

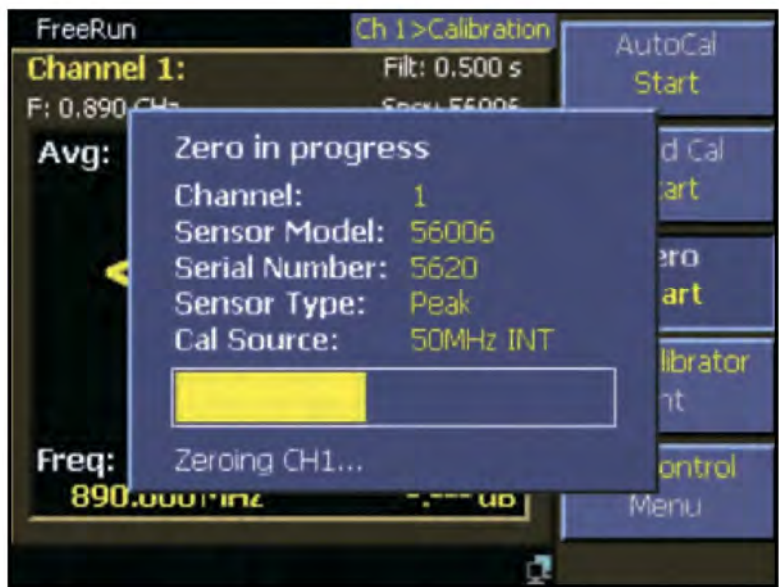
Если функция преобразования становится нелинейной или требуется повышенная точность, то для характеристики функции преобразования требуются более сложные уравнения. Чаще всего используется полиномиальная аппроксимация отдельных сегментов или всей функции. Если точки калибровки достаточно близки друг к другу, то отличные результаты возможны даже при аппроксимации кривой второго порядка.

## 5.2 Одноточечная, двухточечная и многоточечная калибровка линейности

Для получения наилучшей точности в условиях эксплуатации большая часть измерителей уровня мощности поддерживают возможность точной регулировки заводской калибровки с использованием локального опорного уровня. Используется три базовых типа настройки в условиях эксплуатации:

- Одноточечная регулировка при нулевом входном сигнале называется «Нуль датчика» или «Регулировка нуля»; все еще используются сохраненные данные для характеристики детектора, усиления контрольно-измерительной аппаратуры и линейности детектора («коррекция формы»). Опорные ВЧ-сигналы не используются.
- Двухточечная регулировка выполняется при нулевом входном сигнале и при эталонном значении уровня мощности на средней или максимальной частоте диапазона. Выполняется калибровка усиления и смещения, но все еще используются сохраненные на предприятии-изготовителе данные линейности для коррекции функции преобразования.
- Многоточечная регулировка выполняется на серии значений уровня мощности. При выполнении этого процесса используется последовательность шагов уровня мощности во всем динамическом диапазоне датчика для максимально полной характеристики функции преобразования детектора. Этот процесс может заменить или расширить сохраненную на предприятии-изготовителе функцию преобразования.

**Регулировка нуля** поддерживается практически всеми измерительными устройствами и требуется при выполнении измерений низких уровней мощности. Для наилучшей точности регулировка нуля обычно выполняется непосредственно перед любым измерением в нижней части (примерно 10 дБ) динамического диапазона датчика. За счет этого минимизируется воздействие дрейфа параметров датчика и других характеристик, которые не могут быть характеризованы при выполнении заводской калибровке датчика. При регулировке нуля обычно просто берется максимальное отфильтрованное значение за относительно длительный интервал (в большинстве случаев несколько секунд или больше), которое затем используется в качестве значения смещения. Сохраненная на предприятии-изготовителе функция преобразования просто увеличивается или уменьшается (смещается) на нуль датчика.



Снимок экрана «установки на нуль датчика»

Процедура **двухточечной регулировки** состоит из установки на нуль датчика (регулировка смещения) и регулировки усиления с помощью фиксированного эталонного значения уровня мощности. Для выполнения этой регулировки во многих измерителях уровня мощности имеется выход опорных ВЧ-сигналов 1,00 мВт (0 дБм). Путем регулировки усиления кривой можно компенсировать малые изменения затухания, обусловленные дрейфом параметров и старением датчика, а также физическим износом соединителей. Этот процесс иногда называется «фиксированной калибровкой» и оказывает воздействие на все значения уровня мощности в равной степени – либо на фиксированный процент в линейных единицах измерения мощности (милливатты), либо на фиксированное число дБм в логарифмических единицах измерения мощности. Сохраненная на предприятии-изготовителе функция преобразования все еще используется, но регулируется по крутизне характеристики и смещению.

Возможности **многоточечной регулировки** превышают возможности регулировки нуля и фиксированной калибровки. Для измерителей уровня мощности компании Voonton эта процедура в условиях эксплуатации называется «ступенчатой калибровкой» или «автоматической калибровкой» (Auto-Cal). В измерительных устройствах, которые поддерживают выполнение ступенчатой калибровки, фиксированное эталонное значение уровня мощности 0 дБм не используется – в этих устройствах используется прецизионный калибратор уровня мощности, который может генерировать точные, калиброванные уровни ВЧ-сигналов в широком динамическом диапазоне. Ступенчатая перестройка калибратора выполняется во всем динамическом диапазоне датчика, а последовательность значений калибровки сохраняется для конкретной используемой конфигурации соединитель/датчик/кабель/измерительное устройство и для текущей рабочей температуры.



*Выполнение автоматической калибровки датчика*

В зависимости от числа шагов уровня мощности, используемых для выполнения калибровки, заводская функция преобразования может быть либо отрегулирована во всех точках, либо просто заменена. В любом случае число компонентов, формирующих суммарную погрешность измерения, может быть уменьшено или устранено полностью путем «установления обратной связи» в условиях эксплуатации, подробную информацию см. в следующем разделе. Ниже приводятся некоторые общие характеристики выполнения калибровки в условиях эксплуатации:

- Обеспечивает регулировку усиления и смещения
- Точно настраивает функцию преобразования во всем динамическом диапазоне датчика
- Обеспечивает улучшенную калибровку «при текущей температуре» вне определенных на предприятии-изготовителе таблиц компенсации
- Компенсирует старение детектора и ухудшение параметров датчика (временные небольшие перегрузки, электростатический разряд или механические воздействия могут стать причиной небольших изменений для функций преобразования детектора)
- Компенсирует изменение потерь, обусловленных физическим износом соединителей

### 5.3 Способы калибровки линейности в условиях эксплуатации

Все рассмотренные до этого способы калибровки линейности в условиях эксплуатации выполняются на основе подачи известного эталонного значения уровня ВЧ-мощности на вход датчика для того, чтобы комбинация «датчик уровня мощности/измеритель» могла выдать максимально точные показания. Однако при анализе источников потенциальной погрешности измерений и дрейфа параметров совершенно очевидно, что существует много каскадов между входным ВЧ-сигналом и оцифрованным значением детектора и при калибровке системы необходимо учитывать вклад каждого из этих компонентов.

Базовые блоки измерителя уровня мощности и датчики обычно калибруются отдельно, см. описание в разделе 5.1 выше, и затем выполняется калибровка в условиях эксплуатации (регулировка нуля, фиксированная калибровка или ступенчатая калибровка) для компенсации малых ошибок, возникающих при согласовании датчика с измерителем уровня мощности, см. описание в разделе 5.2. Основной функцией датчика мощности обычно является преобразование мощности ВЧ-сигнала в напряжение постоянного тока, а функцией измерителя уровня мощности – преобразование этого напряжения постоянного тока в значащее показание уровня мощности.

Датчик мощности поступает с предприятия-изготовителя с одной или с несколькими таблицами данных линейности, в которых описывается его функция преобразования, либо – в некоторых случаях – отклонения от сохраненной функции преобразования «по умолчанию». В этих таблицах (в зависимости от датчиков) может содержаться большое число данных для температурной и частотной компенсации – компонентов, которые могут оказывать сильное воздействие на форму кривой. Но во всех случаях в таблицах калибровки датчика описывается, каким образом его выход постоянного тока (иногда сигнал постоянного тока, прерываемый сигналом переменного тока) соотносится с его входным ДХ-сигналом.

Назначение измерителя уровня мощности является достаточно простым: измерение выходного сигнала постоянного тока датчика и использование соответствующей функции преобразования для линеаризации или «формирования» значения в милливаттах или дБм. Для этого требуется, чтобы измеритель уровня мощности точно знал, какое напряжение выводит датчик и в каких случаях требуется калибровка базового блока измерителя уровня мощности. Обычно эта калибровка выполняется посредством подключения прецизионного источника напряжения постоянного тока к входу датчика измерителя и калибровкой в одной или нескольких точках напряжения. Таким образом, после подключения датчика вся система будет откалибрована.

Однако этот процесс не является совершенным – могут существовать потери в кабелях и соединителях между датчиком и измерителем уровня мощности, смещение собственных шумов, а также дрейф параметров в аналоговых каскадах измерителя уровня мощности. Этот дрейф параметров и погрешность измерений обычно называются «погрешность контрольно-измерительной аппаратуры» (см. главу 9 данного руководства) и добавляется к дрейфу параметров и погрешности измерений самого детектора.

Эта погрешность измерений может быть уменьшена любым из трех способов:

- Калибровка в условиях эксплуатации «с обратной связью» путем подачи известного уровня ВЧ-сигнала на вход детектора (входной соединитель датчика) (см. Рис. 5.3.1)
- Калибровка в условиях эксплуатации путем подачи известного уровня постоянного тока сразу же после детектора (см. Рис. 5.3.2)
- Оцифровка сигнала сразу же после детектора и передача цифровых данных в базовый блок

Первый способ рассматривался в предыдущих разделах. Обычно используется прецизионное эталонное значение уровня ВЧ-мощности или калибратор, встроенный в измеритель уровня мощности. При использовании этого способа весь тракт измерения находится в цепи калибровки, и общая точность зависит от точности ВЧ-калибратора. Преимущество ВЧ-калибровки заключается в том, что выполняется компенсация изменений соединителей и детектора и сразу же будет обнаружен неисправный или сгоревший датчик. В случае ступенчатой калибровки в условиях эксплуатации может быть полностью откалиброван весь динамический диапазон датчика. Этот способ, как правило, обеспечивает максимально возможную точность измерений. Главный недостаток заключается в том, что при каждой калибровке в условиях эксплуатации датчик необходимо отключать от источника и подключать к калибратору. Это может быть неудобно в автоматизированных системах.

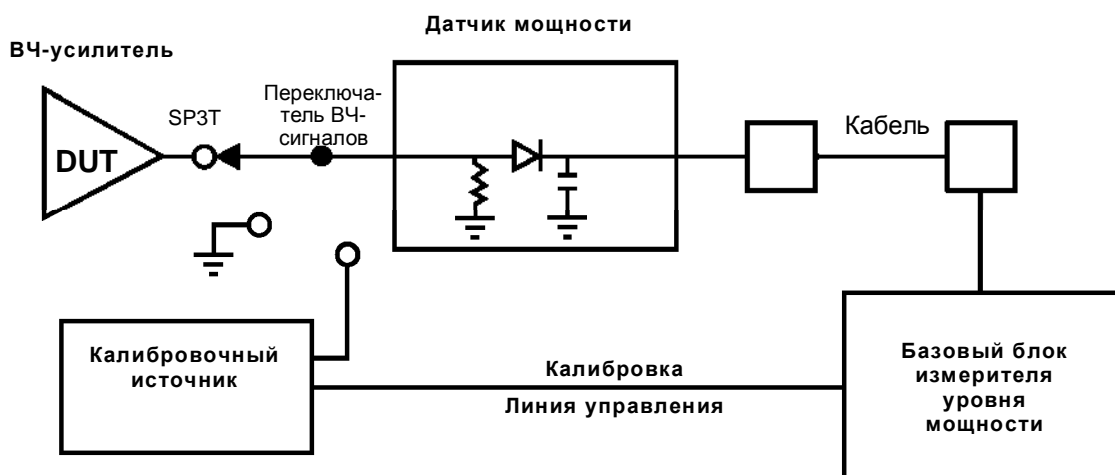


Рис. 5.3.1. Блок-схема способа с использованием калибратора



При втором способе детектор обходится и отключается, и вместо выхода детектора в сигнальную цепь вводится прецизионный уровень постоянного тока. При этом входной соединитель и сам детектор остаются за пределами контура калибровки. Однако из-за того, что стабильное прецизионное напряжение постоянного тока проще генерировать, чем в равной степени стабильный прецизионный уровень ВЧ-мощности, часть погрешности, обусловленная отсутствием калибровки всей сигнальной цепи, компенсируется уменьшением погрешности источника калибровки. Основное преимущество такого способа заключается в том, что во время калибровки датчик может оставаться подключенным к тестируемому устройству. Недостатком такого способа является то, что не учитывается дрейф параметров или неправильное функционирование из-за воздействия старения или повреждения соединителей или детектора. Поскольку сгенерированные на предприятии-изготовителе данные линейности должны использоваться для коррекции формы сигнала, изменения линейности детектора компенсировать нельзя. Из-за этого в некоторой степени уменьшается точность по сравнению с калибровкой ВЧ-сигналов с обратной связью.

Третий метод используется для большинства USB-датчиков и уменьшает необходимость выполнения калибровки в условиях эксплуатации, поскольку между детектором и аналого-цифровым преобразователем имеется относительно немного аналоговых каскадов. Когда датчик оцифровки откалиброван на предприятии-изготовителе, представлена вся цепочка аналоговых сигналов, эта схема находится в этом же корпусе и на выходе датчика представлены цифровые данные, это можно более точно охарактеризовать систему на предприятии-изготовителе. Существует возможность неожиданного возникновения ошибок – не все USB-порты подают одно и то же напряжение питания на датчик, многие из портов характеризуются внесением больших уровней электромагнитных помех (EMI), которые могут стать причиной неправильных показаний, и также существуют описанные выше проблемы (воздействие старения или повреждения соединителей или детектора).

Можно объединять эти способы и выполнить калибровку линейности в эксплуатационных условиях на датчике оцифровки. В большинстве случаев поддерживается (или требуется) по крайней мере регулировка нуля. Системное программное обеспечение, как правило, поддерживает фиксированную калибровку с использованием известного источника опорных ВЧ-сигналов. По состоянию на дату публикации данного руководства не существует датчиков оцифровки, которые разрешают калибровку с полным качанием уровня мощности в условиях эксплуатации, и во всех из них используются сохраненные на предприятии-изготовителе данные линейности.

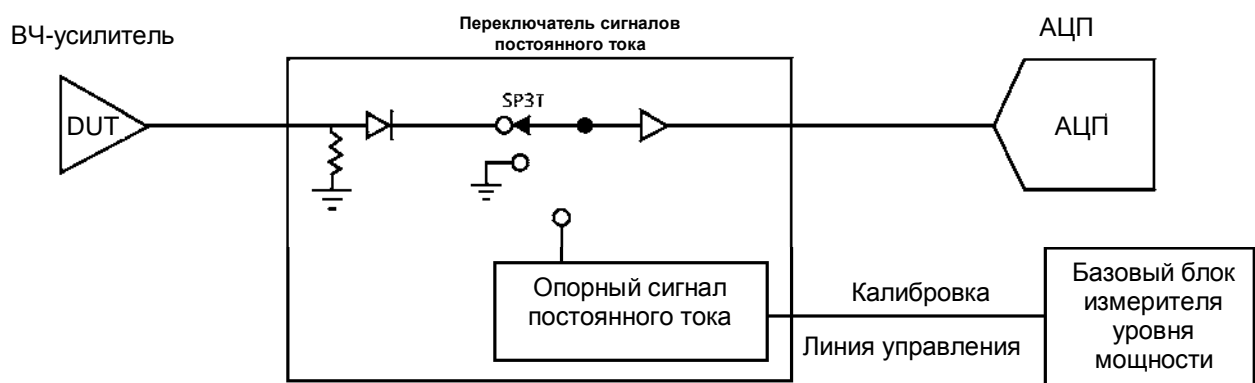
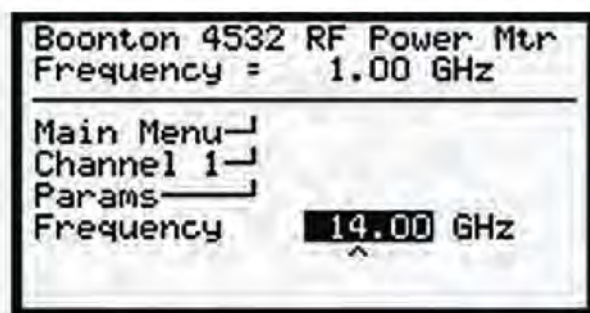


Рис. 5.3.2. Блок-схема способа с использованием сигналов постоянного тока

## 5.4 Корректировка амплитудно-частотной характеристики

Задача датчика мощности является достаточно простой: преобразование ВЧ-сигнала в измеряемый и известный уровень постоянного тока в широком диапазоне частот несущей. Однако детекторы не являются совершенными устройствами, и всегда существуют незначительные изменения на выходе датчика из-за изменения частоты. У большинства датчиков практически плоская характеристика на низких частотах, при повышении частоты возрастает нелинейность характеристики. Все большее воздействие начинает оказывать согласование входного ВЧ-соединителя и детектора датчика, из-за чего уменьшается выходной сигнал самого детектора.

Это изменение обычно является маленьким (как правило, несколько децибел). Если частота известна, то отклонения амплитудно-частотной характеристики можно компенсировать. Для выполнения этой задачи датчики мощности калибруются на предприятии-изготовителе на различных частотах для генерации таблицы корректировочных значений. Эти значения обычно называются значениями «эффективного КПД» («Effective Efficiency») (в процентах) или «коэффициентами калибровки» («Calibration Factors») (в дБ) и предоставляются пользователю.



*При установке частоты автоматически вычисляется корректный коэффициент калибровки на основе данных из таблицы датчика*

В современных датчиках эта таблица записывается в память EEPROM датчика, и измеритель уровня мощности может автоматически загрузить и применить соответствующий коэффициент на основе частоты, установленной пользователем. Если рабочая частота точно не совпадает со значениями в таблице, то используется интерполяция или аппроксимация кривой. В некоторых датчиках данные частотной коррекции являются частью многомерной таблицы, которая используется для одновременной компенсации линейности, частотной компенсации и температурной компенсации.

Используется два общепринятых способа генерации базовых коэффициентов калибровки. Первый способ заключается в непосредственном сопоставлении с датчиком мощности так называемого «золотого стандарта» («gold standard») с отслеживаемой калибровкой частоты в соответствии с требованиями NIST (Национальный институт стандартов и технологии США). При использовании этого способа сначала выполняется качание по определенным уровням мощности источника по всем требуемым частотам калибровки, и затем уровень мощности из датчика мощности, соответствующего требованиям NIST, записывается для каждой частоты калибровки. Затем этот эталонный датчик заменяется калибруемым датчиком, и качание уровня мощности повторяется. Отношение в каждой точке частоты между результирующим значением и соответствующим значением качания эталонного уровня мощности собственно и является коэффициентом калибровки (см. Рис. 5.4.1).

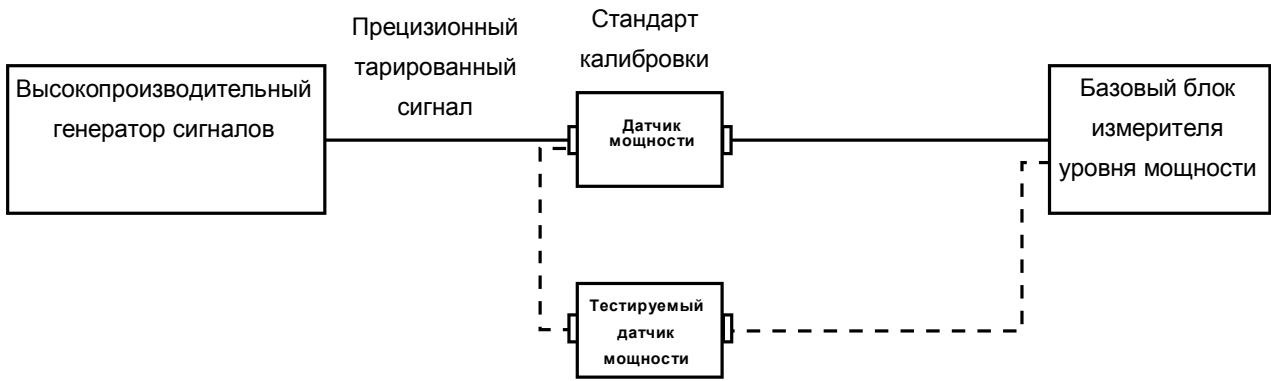


Рис. 5.4.1. Схема, показывающая источник, подающий тарированные сигналы сначала на "стандартный" датчик и затем на тестируемый датчик

Во втором способе используется согласованный датчик средней мощности с термистором (эталонный), прецизионный делитель мощности и источник сигналов. Генератор подает непрерывный сигнал на определенной частоте на прецизионный делитель мощности, и значение эталонного измерителя уровня мощности используется для коррекции для изменений уровня из источника сигналов или делителя (см. Рис. 5.4.2)

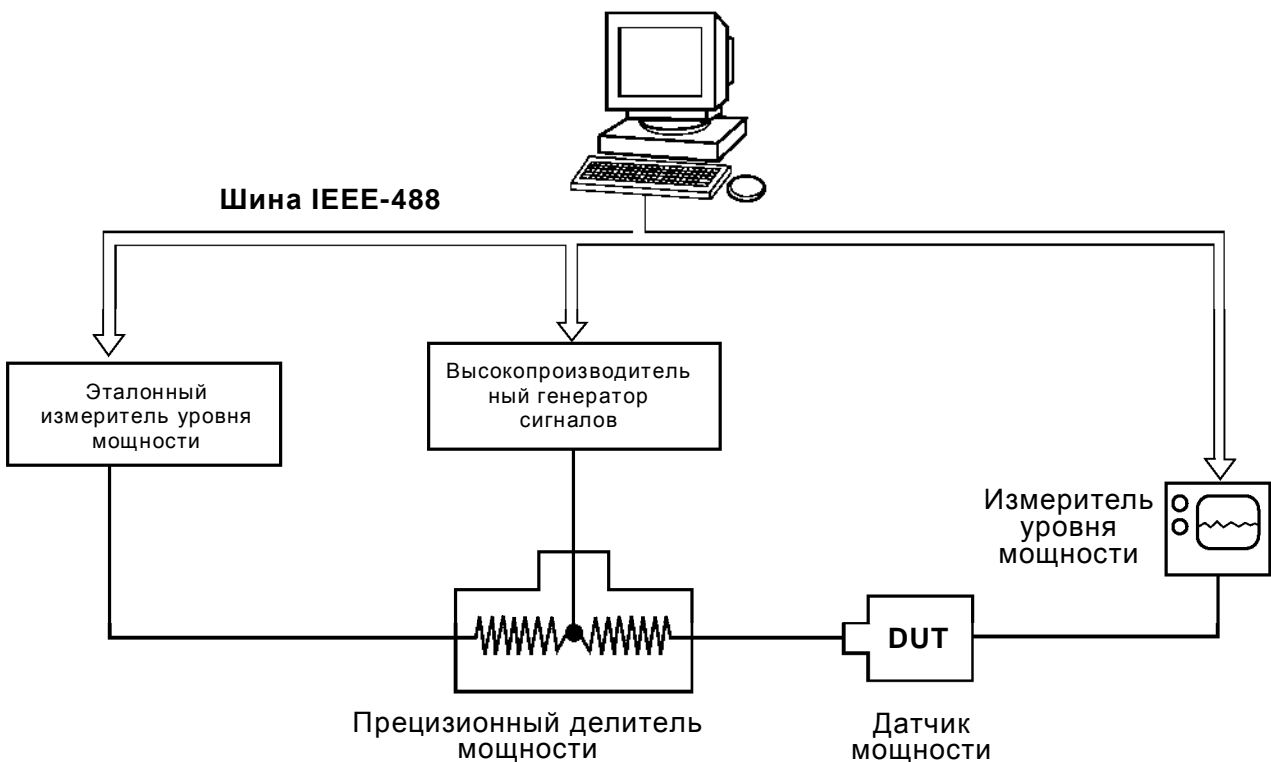


Рис. 5.4.2. Схема калибровки частоты датчика с использованием делителя мощности

Центральная точка делителя представляет собой точку постоянного напряжения, а КСВ на выходном порту делителя определяется КСВ боковой стороны делителя. При низком КСВ делителя минимизируются ошибки из-за рассогласования при передаче данных калибровки. Кроме того, высокая стабильность термисторного болометра означает, что эта комбинация может быть точно откалибрована и будет надлежащим образом функционировать в широком диапазоне характеристик генератора. В диапазоне частот системы обеспечивается точность коэффициента калибровки передачи  $1,2\% - 2,5\%$  (квадратный корень из суммы квадратов).

Ошибка, которую часто совершают пользователи при попытке выполнения калибровки передачи, обусловлена их уверенностью в том, что уровень выходного сигнала генератора сигналов является точным, а его КСВН – очень хорошим. Точность установки уровня сигналов для большинства генераторов составляет  $\pm 1$  дБ, а КСВН в редких случаях бывает лучше 1,35:1 в широком диапазоне частот. Точность установки уровня сигналов устройств с качанием частоты еще хуже – до  $\pm 3$  дБ. Из-за этого коэффициенты калибровки невозможно проверить, используя только выход генератора. Коэффициенты калибровки необходимо проверить с использованием одного из описанных выше способов. В настоящее время сборка и обслуживание терминалов отслеживаемой автоматизированной калибровки датчиков на основе способа с использованием делителя мощности может выполняться во многих поверочных лабораториях благодаря системам, произведенным компанией Tegam.

## Глава 6: Анализ ВЧ-мощности

Измерения уровня ВЧ-мощности можно разделить на несколько широких категорий:

- **Измерение уровня мощности непрерывных сигналов.** Процесс измерения является непрерывным или автономным, нет пауз в сборе данных, и результаты предоставляются сразу же после измерений. Почти во всех случаях первичным измерением является простое измерение средней мощности. Также могут измеряться другие параметры, например, пиковая мощность.
- **Сбор данных, запускаемый импульсом или пакетом.** Обычно процесс измерения является прерывистым и каким-либо образом синхронизируется сигналом. После инициирования сбор данных выполняется в течение некоторого периода времени, затем останавливается и после этого выводится результат. Результатом измерения обычно является представление сигнала в виде «мощность от времени» и может содержать результат всестороннего анализа времени и мощности.
- **Статистический анализ мощности.** Это относительно новый метод анализа мощности, при выполнении которого для определения частоты появления определенного уровня мощности или диапазона уровней мощности собирается и анализируется большой объем выборок уровня мощности. Сбор этих выборок может выполняться непрерывно (автономно), либо может каким-либо образом синхронизироваться сигналом (запускается или пропускаяется).

Ниже подробно рассматривается каждый из этих режимов измерения уровня мощности. Все измерители уровня мощности поддерживают по крайней мере один из этих способов, а наиболее совершенные измерителя пикового уровня мощности – все способы. Надлежащий режим зависит, прежде всего, от измеряемого сигнала и также от того, значения каких параметров требуется знать пользователю.



Типовые экраны для режима измерения модулированных сигналов (Modulated)

## 6.1 Измерение уровня мощности непрерывных сигналов

Это наиболее распространенный метод измерения уровня мощности и его выполнение можно уподобить работе цифрового мультиметра. В базовом режиме измерения непрерывных сигналов на датчик подается непрерывный или модулированный сигнал, и измеритель уровня мощности просто отображает среднюю мощность этого сигнала. Отображение может быть либо числовым (с выбираемым разрешением), либо графическим (чаще всего в виде гистограммы или в виде шкалы измерительного устройства). В качестве единиц измерения чаще всего используются дБм или ватты.

Все диодные датчиков непрерывных сигналов и диодные датчики средней мощности, тепловые датчики и другие типы узкополосных датчиков действительного среднего уровня мощности работают в непрерывном режиме, часто называемом «режимом измерения непрерывных сигналов» («CW Mode») для этих типов датчика, поскольку предусмотрена обработка непрерывных сигналов. Также могут обрабатываться модулированные сигналы, но если используется диодный датчик непрерывных сигналов, то необходимо, чтобы эти сигналы оставались в области квадратичного детектирования. Современные измерительные устройства выполняют измерения в непрерывном режиме с использованием маломощного, узкополосного аналогового канала с высоким разрешением для обработки выходного сигнала датчика, а все операции формирования и коррекции выполняются микропроцессором для указания точного уровня мощности.

Датчики пикового уровня мощности также могут использоваться в непрерывном режиме, иногда называемом «режимом измерения модулированных сигналов» («Modulated Mode»), поскольку датчики пикового уровня мощности обеспечивают большую гибкость и возможности по обработке модулированных сигналов. Схема измерения немного отличается – широкополосный усилитель и высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь устанавливаются за детектором, а оцифрованные выборки линеаризуются и затем усредняются вместе для указания средней мощности. Также может выполняться необходимая обработка дополнительных параметров (например, пиковой и минимальной мощности). Но базовый рабочий режим остается таким же – непрерывно измеряется и отображается уровень мощности.

Устройства в непрерывном режиме обычно измеряют мощность с относительно низкой периодичностью – примерно от 10 Гц до нескольких килогерц – и затем применяют фильтр интегрирования по времени для уменьшения помех при низких уровнях сигналов. Этот фильтр также может использоваться для уменьшения отображаемых флуктуаций уровня мощности, обусловленных модуляцией. Для периодических сигналов целесообразно установить время усреднения, равное целому числу циклов модуляции. В главе 8 данного руководства рассматривается воздействие и преимущества фильтрации сигналов.

В дополнение к числовому отображению уровня мощности результаты измерений в непрерывном режиме также могут быть представлены в графической форме зависимости мощности от времени с соблюдением ограничений по скорости измерений. Самым полезным является отображение в виде «ленточной диаграммы», на котором уровень мощности указывается как строка прокрутки. В некоторых измерительных устройствах это отображение может охватывать от нескольких секунд до нескольких часов, что может быть очень полезно для наблюдения дрейфа, особенно при совместном использовании с соответствующей фильтрацией сигналов.

Другой общей чертой измерений в непрерывном режиме является поддержка выполнения логометрических измерений. Большинство измерителей уровня мощности предоставляют пользователю возможность сохранения «опорный уровень», по отношению к которому вычисляется и отображается отношение уровней мощности.

В большинстве случаев результаты измерений отображаются в dBv (децибел относительно опорного уровня); 0,00 dBv соответствует опорному уровню. В случае двухканальных измерителей уровня мощности также может отображаться отношение между двумя каналами. Это может быть полезно для вычисления усиления или затухания. При использовании направленного соединителя отношение между каналами равно обратным потерям сигнала, проходящего через соединитель.

Первичным отображением может быть отображение фактической амплитуды сигнала датчика, амплитуды смещения или математической функции (отношение, сумма или разница) сигнала датчика и сигнала второго датчика или сохраненного опорного значения.

## 6.2 Запускаемый и импульсный анализ.

Для периодических или импульсных сигналов зачастую требуется проанализировать уровень мощности для части формы сигнала, либо для определенной области импульса или пакета импульсов. Ниже приводится краткий обзор основных положений по измерениям уровня мощности:

**Мощность немодулированной несущей.** Средняя мощность немодулированной несущей, состоящей из непрерывного синусоидального сигнала с постоянной амплитудой, также называется «мощностью непрерывного сигнала». При известном значении импеданса нагрузки  $Z_{\text{нагрузки}}$  и действующем значении подаваемого напряжения  $V_{\text{RMS}}$ , средняя мощность определяется по следующей формуле:

$$P = V_{\text{RMS}}^2 / Z_{\text{нагрузки}} \text{ (Вт)}$$

В измерителях уровня мощности, предназначенных для измерения уровня мощности непрерывных сигналов, могут использоваться термоэлектрические детекторы, которые реагируют на нагрев детектора сигнала или диодных детекторов, которые реагируют на действующее значение напряжения (RMS) сигнала. При тщательном выполнении калибровки точные измерения могут быть обеспечены в широком диапазоне уровней входной мощности.

**Мощность модулированной несущей.** Средняя мощность модулированной несущей с изменяемой амплитудой может быть точно измерена измерителем среднего уровня мощности или измерителем уровня мощности непрерывных сигналов с термоэлектрическим детектором, но недостаток чувствительности этого детектора ограничивает измеряемый диапазон. Диодные детекторы могут использоваться на малых уровнях мощности в области квадратичного детектирования (пики не выше -20 дБм). В более высоких уровнях мощности диод пропорционально реагирует на напряжение, а не на уровень мощности, что приводит к значительным ошибкам измерения уровня мощности.

**Импульсная мощность.** Импульсная мощность относится к мощности, измеренной во время импульсных ВЧ-сигналов (см. Рис. 6.2.1). По традиции эти сигналы измеряются в два этапа: (1) датчики, реагирующие на среднюю мощность, (термоэлектрические датчики или диодные датчики, работающие в области квадратичного детектирования) измеряют среднюю мощность сигнала; (2) после этого среднее значение делится для определения импульсной мощности  $P_{\text{импульса}}$ :

$$P_{\text{импульса}} = P_{\text{средняя}} / \text{Скважность},$$

где **Скважность = Длительность импульса / Период импульса**

Импульсная мощность, вычисленная таким образом, является достоверной только в случае идеальной периодической прямоугольной формы импульса, и совершенно неточна в случае формы импульса с искажениями (например, выбросами или срезами), либо при непостоянном периоде и длительности импульсов (см. Рис. 6.2.1).

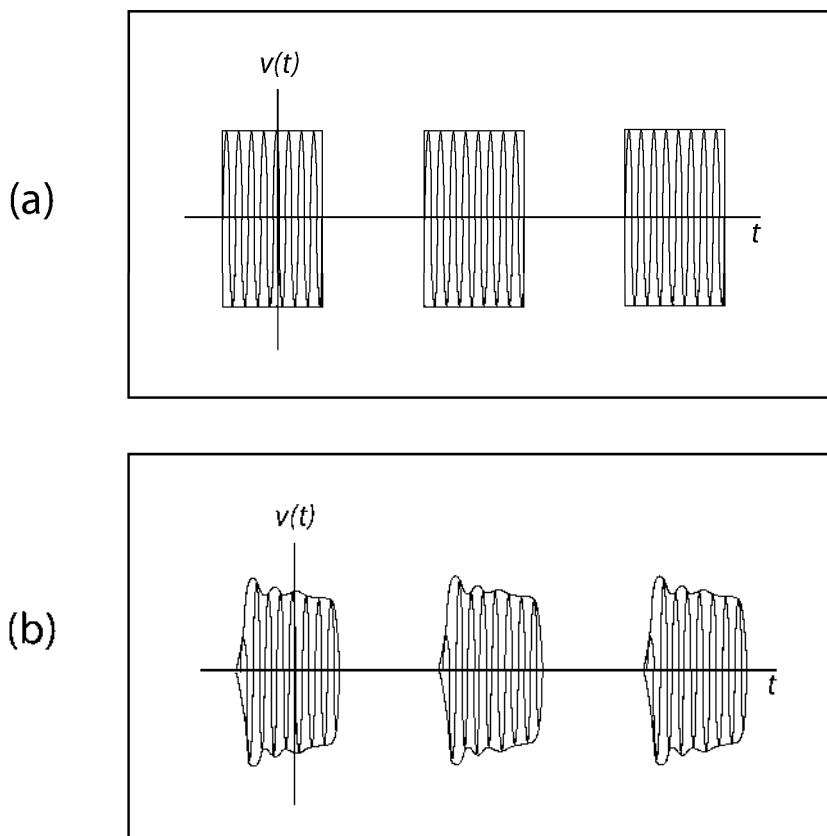


Рис. 6.2.1. Идеальный (а) и искаженный (b) импульсные ВЧ-сигналы

**Пиковая мощность.** Измерители пикового уровня мощности выполняют измерения уровня мощности таким способом, при котором преодолеваются ограничения измерения импульсной мощности и который указывает и пиковую мощность, и среднюю мощность для всех типов модулированных несущих. Быстрореагирующие диодные детекторы отслеживают огибающую ВЧ-сигнала для формирования широкополосного видеосигнала, выборки которого выполняются с большой шириной полосы частот и высокой скоростью передачи данных измерителем пикового уровня мощности. Выбранные детектором точки индивидуально преобразуются в мгновенную мощность в ваттах с использованием сохраненной информации калибровки.

После преобразования выборочных данных в линейную мощность среднее значение из всех или только части точек может быть вычислено для указания истинного среднего уровня мощности без ограничения, обусловленного областью квадратичного детектирования диодного детектора. Временная реконструкция огибающей сигнала может быть выполнена путем последовательной трансляции выборок в дисплейный буфер. В случае повторяющихся сигналов для этого процесса могут использоваться способы выборок с эквивалентным временем или способы перемежающихся выборок для вывода временных разрешений, значительно превышающих частоту выборки при синхронизации внутренним или внешним сигналом запуска. Повторяющиеся сигналы также разрешают выполнение синхронной фильтрации (трасса прохождения сигнала или «видеочастотная» фильтрация) результирующей формы сигнала – более подробно рассматривается ниже.

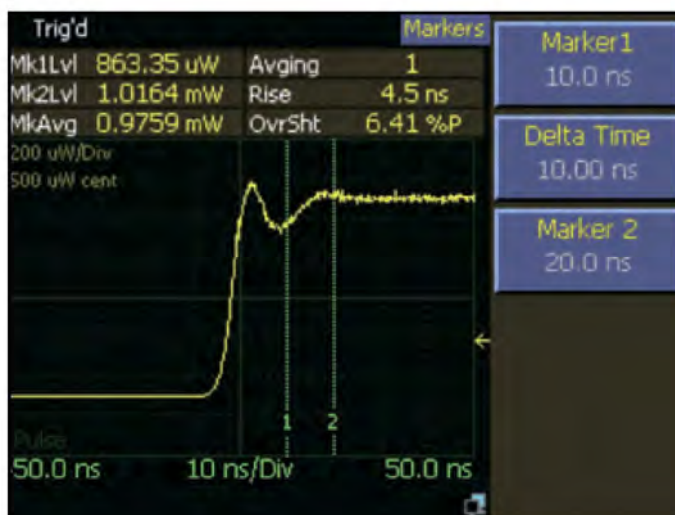
Измерители пикового уровня мощности часто рассматривают этот режим измерения как «Запускаемый» («Triggered Mode») или «Импульсный режим» («Pulse Mode»). Функционирование подобно функционированию современного запоминающего цифрового осциллографа – выборки уровня мощности сохраняются в кольцевом буфере памяти, пока не будет принят сигнал запуска. После этого выборки с требуемым соотношением к сигналу запуска выбираются и обрабатываются для формирования графика «мощность от времени».



Сигналом запуска может быть либо отдельно подаваемый «внешний» импульс, либо он может генерироваться при пересечении определенного порогового значения амплитудой ВЧ-сигнала в любом направлении. Источник, уровень и полярность сигналов запуска программируются и в большинстве случаев являются доступными, подобно установкам осциллографа (например, время задержки запуска и удержание запуска).

Ранние измерители пикового уровня мощности не имели памяти – они использовали генератор переменной задержки и выполняли выборку входного сигнала в определенный период после того, как устройство запуска выдавало сигнал «power at a time offset» («уровень мощности со смещением времени»). Для восстановления формы сигнала время задержки инкрементировалось с маленькими шагами в каждом последующем устройстве запуска, и результирующий массив из точек уровней мощности транслировался в определенном порядке на дисплей. Этот способ обеспечивал большую ширину полосы частот для измерения с использованием медленных аналого-цифровых преобразователей того времени.

Современные измерители пикового уровня мощности получают сигнал на очень высоких скоростях преобразования – обычно много МГц – и большие буферы сбора разрешают отображение частей формы сигнала и перед, и после запуска. Для каждого запускаемого качания уровня мощности перезапускается сбор данных в кольцевой буфер, и он выполняется на высокой скорости до тех пор, пока не будет обнаружен фронт запуска и не будут собраны все выборки после запуска. В этой точке сбор данных останавливается, и данные из буфера обрабатываются и отображаются перед запуском другой трассы прохождения сигнала.



Передний фронт огибающей пиковой мощности

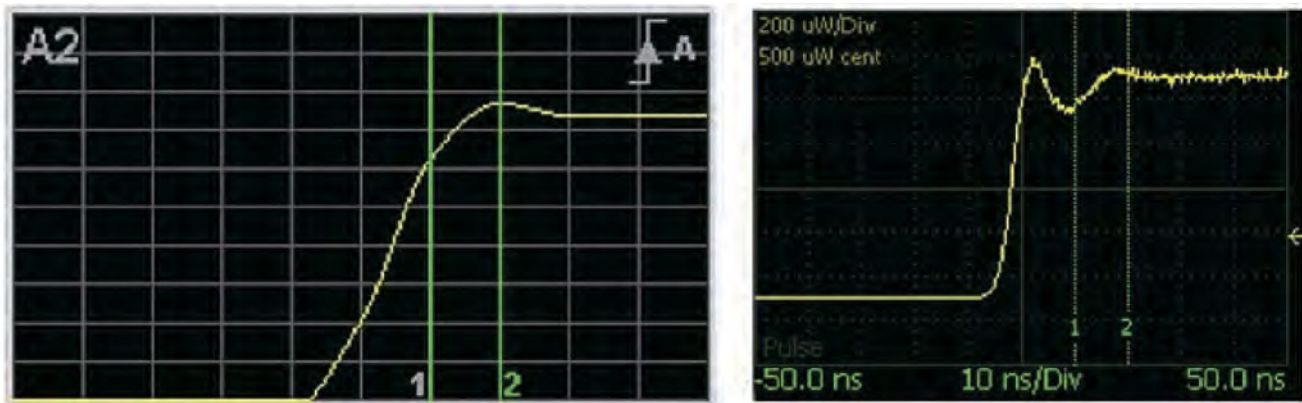


Рис. 6.2.2. Снимок экрана переднего фронта перед выборкой на левой стороне и переднего фронта после выборки на правой стороне

**Запуск.** Как и для цифрового запоминающего осциллографа (DSO), существует много вариантов запуска. В режиме автоматического запуска принудительно устанавливается устройство запуска, когда фронты не обнаружены, и выполняется синхронизация с сигналом после появления фронтов. Режим запуска «от пика к пику» может быть выбран для автоматической установки уровня запуска на основе входного сигнала. Самые совершенные измерители пикового уровня мощности содержат генераторы комплексных сигналов запуска, которые могут активизировать и квалифицировать запуск по подсчитанным событиям сигнала или по временным задержкам. У некоторых измерителей также реализована программируемая «заграждающая метка» («fence») и интервалы исключений, используемые при запуске в случае пакетных сигналов.

Время отображения ограничено несколькими наносекундами на деление и обычно ограничено шириной полосы частот видеосигнала и временным разрешением измерительного устройства. Для самых быстрых измерителей пикового уровня мощности временное разрешение может быть 200 пс или лучше, это время критично для точного восстановления формы сигнала и измерения импульсных сигналов (см. Рис. 6.2.2).

Часто поддерживается использование программируемых временных маркеров (курсоров). Эти маркеры могут устанавливаться в любой части отображаемой трассы прохождения сигнала для обозначения необходимых областей для подробного анализа мощности. При измерениях с использованием курсоров обычно измеряется уровень мощности для каждого маркера, а также параметры для интервала, определенного этими двумя маркерами – обычно средняя и пиковая мощность. Это очень полезно для анализа уровня мощности во время импульса радиолокационной системы или пакета системы цифровой связи, когда представляет интерес только центральная часть импульса. За счет регулировки задержки запуска и других параметров можно измерять мощность конкретных временных интервалов сигналов TDMA (множественный доступ с временным разделением каналов) – например, GSM и EDGE.

Удержание запуска обеспечивает пакетную синхронизацию даже при наличии нескольких фронтов в пакете, соответствующих уровню запуска. Просто установите для времени удержания значение чуть меньше интервала повторения пакетов для того, чтобы запуск выполнялся в одной и той же точке в каждом пакете.

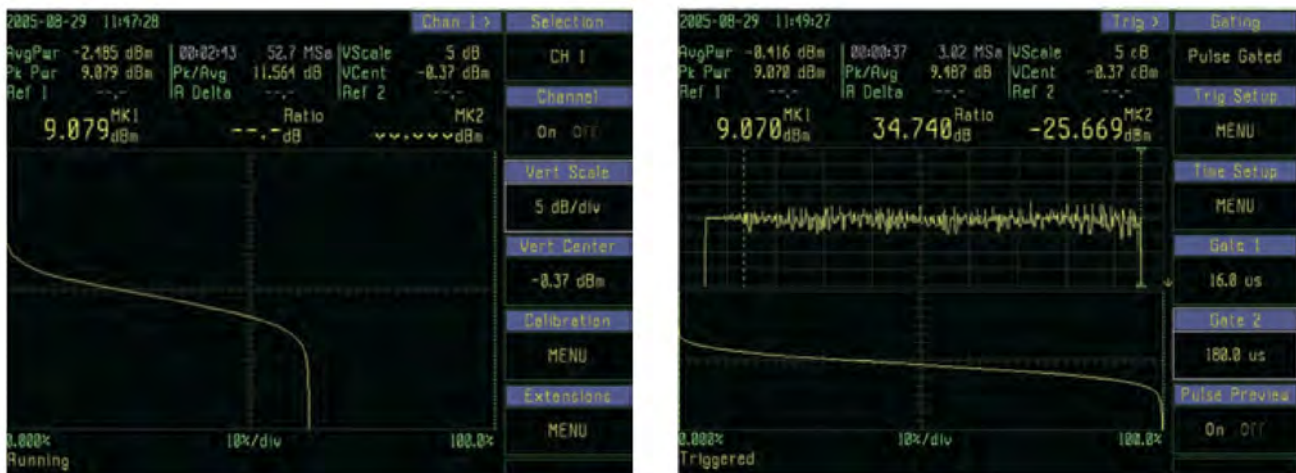


Рис. 6.2.3. Снимки экрана, показывающие измерения с использованием курсоров и статистическое распределение

Для периодических сигналов автоматическое измерение параметров формы сигнала может выполняться в импульсном режиме. После обнаружения стабильного периодического сигнала измерительное устройство автоматически определяет расположение фронтов сигнала и вычисляет ряд параметров импульсного сигнала (например, частоту импульсов, длительность импульса, скважность, времена нарастания и спада, максимальный и минимальный уровни мощности, мощность в импульсе, выброс и среднюю мощность в периоде).

Усреднение трассы прохождения сигнала может быть выполнено и, как правило, требуется для выполнения низкоуровневых измерений из-за широкополосного шума датчиков пикового уровня мощности. В отличие от режима измерения непрерывных сигналов (Continuous Mode), в котором ширина полосы частот просто уменьшается за счет усреднения большего числа выборок, в режиме измерения импульсных сигналов (Pulse Mode) используется синхронное усреднение или «усреднение видеосигнала» («Video Averaging»). При этом усредняется каждая выборка сбора данных с другими выборками с точно таким же смещением по времени относительно запуска, эффективное усреднение каждой трассы прохождения сигнала с предыдущими трассами выполняется при обеспечении временной синхронизации. Усреднение видеосигналов наилучшим образом выполняется для периодических сигналов. Подробное описание этого процесса и его преимуществ рассматривается в главе 8 данного руководства.

Режим измерения импульсных сигналов наиболее совершенных измерителей пикового уровня мощности зачастую поддерживает выполнение функций, поддерживаемых современными цифровыми осциллографами, включая большую память, масштабирование формы сигнала, сохранение и повторный вызов трассы прохождения сигнала и выполнение математических функций между трассами.

### 6.3 Статистический анализ мощности

Для импульсных и периодических форм сигналов огибающая мощности сигнала может быть восстановлена и проанализирована во временном интервале для предоставления большого объема полезной информации. Однако для непрерывно модулированных сигналов или периодических сигналов с шумоподобной модуляцией в пачках или пакетах, довольно трудно или невозможно выполнить запуск из самого сигнала или извлечь полезную информацию во временном интервале. При обработке в простом режиме измерения непрерывных сигналов может быть выведена средняя мощность и иногда пиковая мощность, но зачастую существует дополнительная информация, которую необходимо получить альтернативными методами сбора и обработки данных.

Многие сигналы современных систем связи относятся к этой категории, из-за своих шумоподобных форматов данных с цифровой модуляцией – например, CDMA (множественный доступ с кодовым разделением каналов), OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов) и различные формы QAM (квадратурная амплитудная модуляция). Для этих сигналов статистический анализ мощности зачастую более предпочтителен, чем анализ во временном интервале. При выполнении статистического анализа собираются выборки уровней мощности и анализируется то, насколько часто появляется каждый уровень мощности, а не то, когда он появляется. Либо синхронно, либо асинхронно собирается большой объем выборок уровней мощности, который затем сортируется по уровню в различные «интервалы значений» (в данном случае – столбцы гистограммы) для формирования гистограммы. Чем больше выборок собрано, тем точнее разрешение гистограммы.

Статистический анализ мощности наилучшим образом выполняется для сигналов со следующими характеристиками:

- Умеренный уровень сигнала выше -40 дБм.
- Сигналы с цифровой модуляцией, особенно «шумоподобные» форматы (например, CDMA (и его разновидности) или OFDM), когда для анализа сигнала полезна вероятностная информация.
- Любой сигнал со случайными редкими пиками, когда требуется знать вероятностную информацию о пиках.

**Статистические представления.** Для просмотра результатов статистических измерений уровня мощности используется несколько общих представлений: В качестве опций просмотра используются гистограммы, PDF, CDF и CCDF.

- **Гистограмма уровня мощности** является самой простой опцией просмотра – выборки сортируются по интервалам значений (столбцам гистограммы) любого удобного размера. Для интервалов значений чаще всего применяется логарифмическое разделение по уровню мощности, для каждого интервала значений выделяется диапазон из равного числа дБм. Глубина интервалов значений (максимальное значение подсчета) может достигать или даже превышать 32 бита (4 миллиарда).
- PDF (**функция плотности вероятности**) по существу является непрерывной функцией, которая подобна гистограмме с неограниченным разрешением (нулевая ширина интервала значений). Функция PDF не может напрямую указывать абсолютные результаты измерения сигналов, но ее форма является качественной индикацией распределения мощности. Многоуровневый сигнал, например сигнал с квадратурной амплитудной модуляцией (QAM), отображается как «горб» (максимум кривой) на каждом уровне мощности и может быть полезен для отображения линейности системы.
- CDF (**интегральная функция распределения**) является интегралом функции PDF. Ее значение является монотонным и увеличивается от 0,0 до 1,0 и указывает вероятность того, что уровень мощности находится в этой точке или ниже этой точки. Представления в руководстве характеризуются независимой переменной (в данном случае – уровень мощности) на оси X и вероятностью на оси Y. Значение 0,0 функции CDF соответствует минимальному уровню мощности, а значение 1,0 – максимальному уровню мощности (абсолютному пиковому значению).

- **CCDF (комплементарная интегральная функция распределения)** (иногда называется как «1-CDF») является простой арифметической инверсией функции CDF и указывает вероятность того, что уровень мощности находится в этой точке или выше этой точки. Значение 0,0 функции CCDF соответствует максимальному уровню мощности, а значение 1,0 – минимальному уровню мощности. Представление функции CCDF чаще всего используется для анализа уровня мощности, поскольку пиковая мощность обычно представляет больший интерес, чем минимальный уровень мощности, и это более удобно для описания источника.

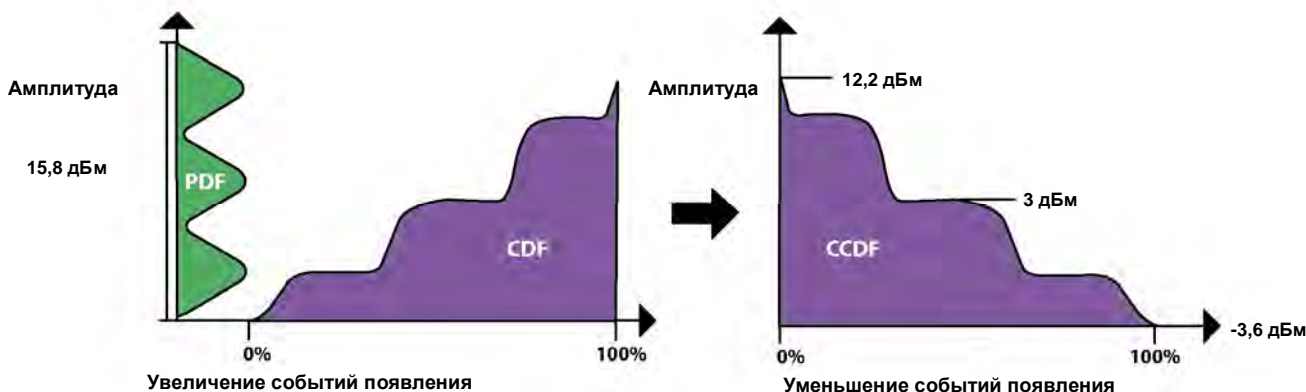
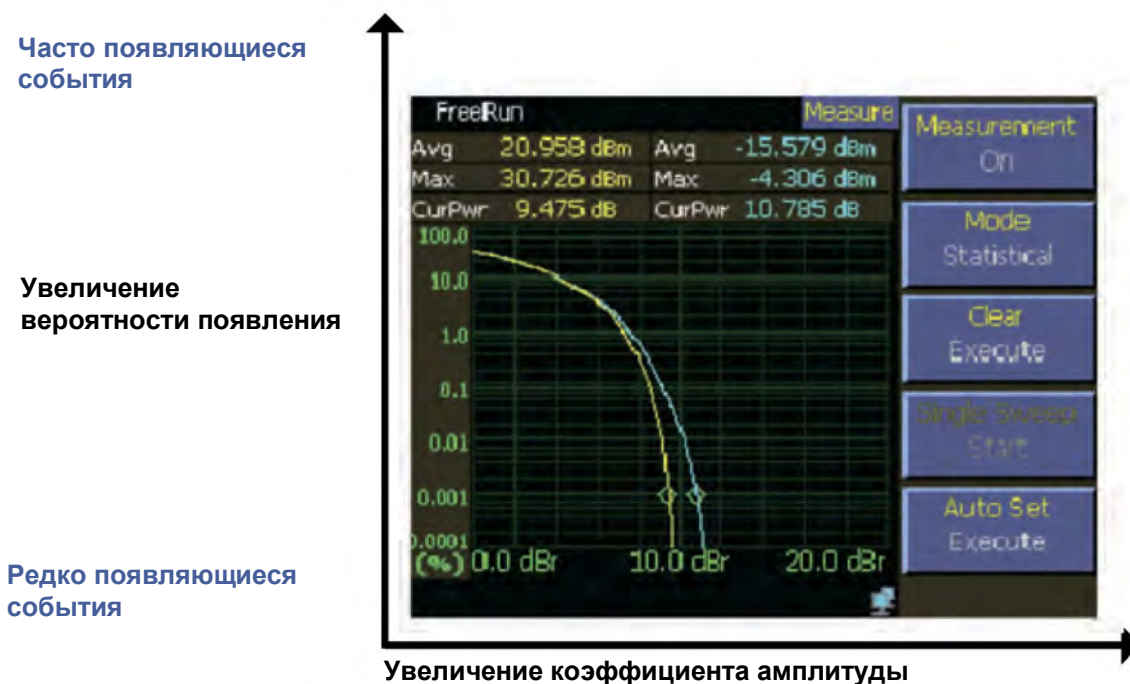
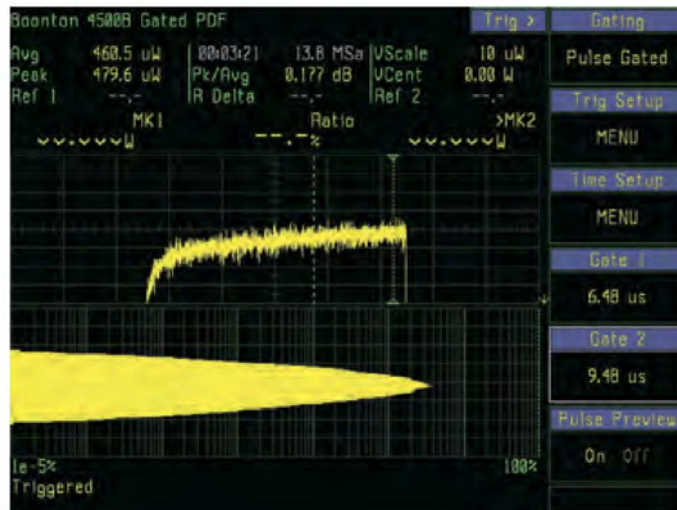


Рис. 7.2.3. Общие статистические диаграммы, содержащие PDF, CDF и CCDF



Нормализованный график CCDF, указывающий вероятность на оси Y в зависимости от нормализованного уровня мощности на оси X (перекрытие двух каналов)



Гистограмма 4500В с временной селекцией с уровнем мощности на оси Y. Форма импульса в верхних окнах, указывающих курсоры временной селекцией, и функция PDF (гистограмма с высоким разрешением) с временной селекцией в нижнем окне. В этом случае более эффективным является представления уровня мощности на оси Y с использованием одного и того же масштаба в обоих окнах.

	Channel 1	Channel 2
10%	2.815 dB	4.291 dB
1%	2.856 dB	4.515 dB
0.1%	2.883 dB	4.867 dB
0.01%	2.905 dB	4.886 dB
0.001%	3.651 dB	4.896 dB
0.0001%	3.698 dB	4.905 dB
CurPwr	2.877 dB	2.877 dB
CurPct	0.18284 %	36.762 %

Up/down to toggle view. Pg 1 of 2

Рис. 6.3.1. Табличный вид представления функции CCDF

Функция CCDF чаще всего представляется в графической форме в виде формата с логарифмическим масштабом по обеим осям – с уровнем мощности (дБм) на оси X и вероятности по оси Y. Для анализа сигналов систем связи может быть полезна нормализация уровня мощности по отношению к средней мощности – таким образом, на оси X представляется число в дБ выше или ниже среднего уровня мощности (теперь масштабируется в относительных дБ или в dBv (дБ относительно средней мощности)). Это полезно, поскольку в некоторых случаях важна форма CCDF, а не абсолютное значение мощности. В данном случае уровень мощности 0 dBv является средним уровнем мощности, а значение 0,0 функции представляет отношение пикового к среднему уровню мощности.

В некоторых измерителях уровня мощности выполняется инвертирование осей X и Y для отображения амплитуды на оси Y при выполнении измерений уровня мощности. Это может быть особенно полезным при представлении гистограммы или функции PDF вместе с соответствующей временной трассой прохождения сигнала. Обе ориентации осей представляют одну и ту же информацию.

Табличные или одноточечные значения CCDF также являются общими видами представления, и часто уровень мощности (либо относительный, либо абсолютный) обрабатывается в качестве зависимой переменной (см. Рис. 6.3.1). Например, «уровень мощности 0,01 % функции CCDF» указывает предельное значение отношения пикового к среднему значению, при котором только для 0,01 % выборок уровня мощности (с вероятностью  $1e-4$ ) уровень мощности будет выше этого среднего значения. Типовой сигнал CDMA может иметь значение 0,01 % функции CCDF для уровня 8,7 дBr, то есть только одна из каждых 10 000 точек будет иметь уровень выше среднего уровня мощности на 8,7 дБ.

Эти измерения являются весьма полезными, поскольку ожидаемая форма функции CCDF может быть легко вычислена на основе шаблонов данных и формата модуляции, либо функция CCDF может быть получена, проанализирована и сохранена для неискаженного «эталонного» («gold») сигнала. Затем функция CCDF сигнала может быть измерена в различных точках в цепи прохождения сигнала (например, сразу же после усилителя мощности). Когда кривые перекрываются, искажение сигнала сразу будет заметно по разнице в формах. Например, умеренное сжатие пикового уровня показано на Рис. 6.3.2, на котором из-за увеличения отношения пикового к среднему уровню мощности выход CCDF (желтая кривая) уменьшается значительно быстрее, чем вход CCDF (синяя кривая).



Рис. 6.3.2. Двойная CCDF: вход усилителя на канале 2 (синяя кривая справа) и выход усилителя на канале 1 (желтая кривая слева)

Курсоры в данном примере расположены на значении вероятности в 0,001 % (или  $1e-5$ ) и указывают отношение 10,862 дБ функции CCDF на входе и отношение 9,540 дБ функции CCDF на выходе. Показанные две кривые нормализованы к каждому среднему уровню мощности, то есть разница в этих двух значениях CCDF (1,332 дБ) указывает степень сжатия пиковых уровней, которые появляются только один раз на каждые 100 000 выборок. Для более часто возникающих пиковых уровней применяется меньшее сжатие (кривые CCDF находятся ближе в точках с более высоким процентом CCDF), а для более редко возникающих пиковых уровней и для пиков с более высокой амплитудой применяется даже большее сжатие. Абсолютное ограничение (отсечение) было бы показано вертикальной кривой CCDF. Использование статистического анализа мощности для проверки усилителей более подробно рассматривается в разделе 8.3.

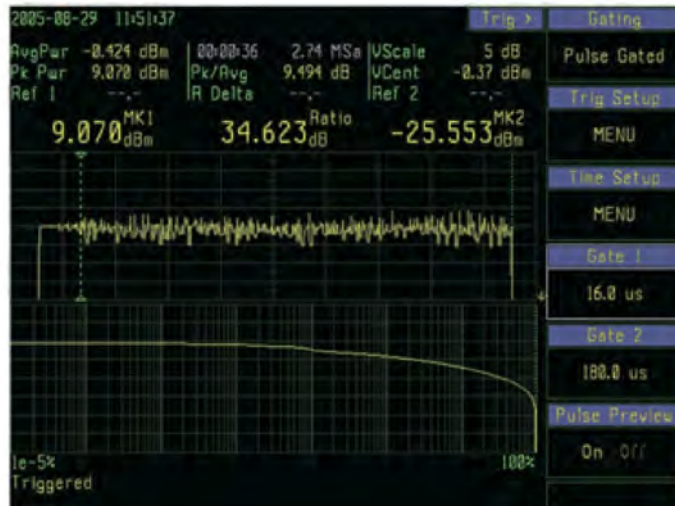


Рис. 6.3.3. Снимок экрана измерителя 4500В комплементарной интегральной функции распределения (CCDF) с временной селекцией, указывающий форму импульса кадра WLAN и временные селекторы в верхнем окне, и кривую CCDF сигнала в нижнем окне. Временные селекторы в данном примере были установлены для включения только полезной нагрузки кадра данных и для исключения интервала, в течение которого импульс выключен, а также его начальной обучающей последовательности.

**Статистика с временной селекцией.** Многие сигналы современных систем передаются в пакетах или во временных интервалах, но также используют шумоподобные форматы цифровой модуляции, для которых используются преимущества статистического анализа. Для этих протоколов требуется синхронное получение статистической информации, которое запускается или выполняется с временной селекцией внешним оборудованием или сигналом таким образом, чтобы собираемые выборки представляли только определенные интервалы времени. GSM-EDGE является только одним примером: необходимо получить данные только полезной нагрузки временного интервала. Сигналы WiFi и другие сигналы имеют подобные требования – часто пакет начинается со своего рода последовательности обучения, которая будет искажать распределение нежелательным образом, если выборки из этого интервала будут включены в собираемые данные (см. Рис. 6.3.3).

Высококачественные анализаторы пикового уровня мощности поддерживают возможность работы в двух режимах одновременно. Для измерительного устройства выполнена установка для сбора данных в базовом режиме измерения импульсных сигналов для того, чтобы была видна запускаемая форма сигнала. Могут использоваться все функции запуска измерителя уровня мощности. После этого курсоры устанавливаются на форме сигнала для указания интервала, в котором необходимо выполнение статистического анализа. Собираются данные выборки уровня мощности только в пределах этого интервала. Все выборки за пределами этого интервала: например, время интервала «пакет выключен», нарастающие и убывающие фронты сигнала и ссылочные данные (такие как пилотные и обучающие последовательности) отбрасываются, и искажение распределения отсутствует.

**Размер собираемых статистических данных.** Слабое место статистического анализа мощности заключается в том, что интервалы значений, используемые для сбора данных, не имеют бесконечной глубины. Чем быстрее выполняется сбор точек данных, тем быстрее заполняются интервалы значений и быстрее достигается максимальное предельное значение подсчета, после чего сбор данных не может быть продолжен. На этом этапе необходимо принять решение об обработке этой ситуации (см. Рис. 6.3.4).



Самым простым способом является «завершение» сбора данных и прекращение добавления новых выборок к уже собранным данным. Более подходящим может быть очистка собранных данных и перезапуск сбора новых данных, это зависит от того, потребуются ли сразу результаты статистических измерений или нет. Обратной стороной этого способа «очистки и перезапуска» является наличие короткого периода в начале каждого процесса сбора, когда объем собранных данных будет маленьким, а статистическое разрешение будет чрезмерно низкой. Если требуется измерение CCDF с очень маленькой вероятностью, то числа выборок может быть недостаточно для статистически действительного возвращаемого значения.

Для устранения этой ситуации часть распределения может быть отброшена. Все интервалы значений выборок масштабируются на равное значение (например, на 0,5). С точки зрения вычислений эта простая и быстрая операция – двоичные значения подсчета в каждом интервале значений сдвигаются вправо на один бит. После деления пополам всех интервалов значений, сбор данных может быть возобновлен. Преимущество этого способа заключается в том, что форма статистического распределения не изменяется, за исключением крайне редких значений уровня мощности, для которых где двоичная ошибка округления или усечения становится значительной.

Этот процесс можно рассматривать как «фильтрацию» CCDF, при котором на распределение наибольшее воздействие оказывают самые последние события, а более старые события отбрасываются. Требуемое для этого время пропорционально отбрасываемым значениям и обратно пропорционально частоте выборки.

Для большого числа сигналов могут выдаваться значащие результаты CCDF от нескольких миллионов до нескольких десятков миллионов выборок; таким образом, этот процесс отбрасывания данных можно использовать для «незаполненных» интервалов значений. Измерители пикового уровня мощности могут поддерживать опцию завершения, перезапуска или отбрасывания собранных статистических данных при достижении определенного пользователем объема собираемых данных («Terminal Count») или интервала сбора данных («Terminal Time») (см. Рис. 6.3.4).

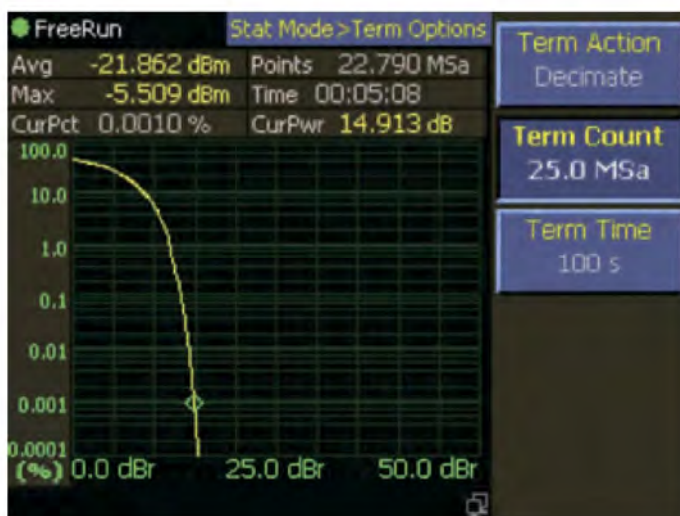


Рис. 6.3.4. Опции объема собираемых данных (Terminal Count)

## Глава 7: Варианты измерений уровня мощности:

В данной главе рассматриваются некоторые общие варианты измерений уровня мощности:

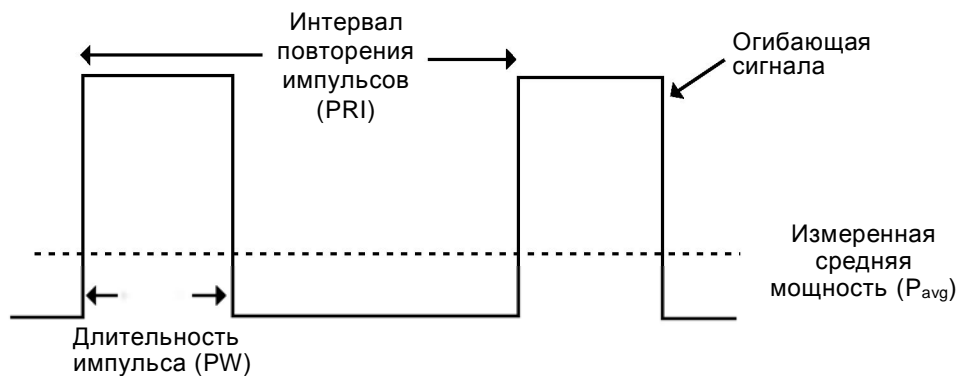
- **Измерения с большой скважностью** – обсуждение того, почему традиционный способ измерения средней мощности / скважности для вычисления импульсной мощности является неточным для сигналов с большой скважностью, и обсуждение преимуществ использования способов измерения пиковой мощности (см. Рис. 7.1.4).
- **Измерение сигналов современных систем связи** – рассматриваются специальные требования при измерении сигналов с цифровой модуляцией современных беспроводных сетей связи. Для часто используемых форматов модуляции требуются специальные способы для выдачи точных и значащих результатов.
- **Использование измерителей уровня мощности для выполнения проверки на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости (EMC)** – проверке соответствия требованиям по электромагнитной совместимости придается все большее значение. Воздействию высокочастотного излучения всегда уделялось большое внимание, но в настоящее время делается упор на устойчивость оборудования на воздействие различных типов помех. Поскольку сигналы, используемые при проверке на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости, стали более сложными, традиционные способы инструментального измерения условий испытаний и анализа результатов тестирования уступили место новым способам, для реализации которых требуется использование измерений пиковой мощности.

### 7.1 Измерения импульсов с большой скважностью

Почему недостаточно измерений среднего уровня мощности? Основной проблемой для специализированных ламповых усилителей, таких как усилители на лампах бегущей волны (TWTA), магнетронные усилители и клистронные усилители, является амплитуда, качество и стабильность выходной мощности усилителей. Эти устройства предназначены для высокомошных радиолокационных систем, ускорителей частиц и устройств получения изображений с использованием ядерного магнитного резонанса (MRI). Эти устройства должны подавать импульсную линейную мощность либо на большую антенну с низкими обратными потерями, либо на мощные магниты, характеризующимися подобными проблемами передачи мощности. Для этих усилителей требуются точные измерения пиковой мощности для обеспечения безопасности и достижения оптимальных рабочих параметров. Общим для этих вариантов применения является использование импульсов высокой скважности для измерения объектов небольшого размера на большом расстоянии для радиолокационных систем, либо точное управление позицией частиц размером с атом для физических исследований.

До появления измерителей пикового уровня мощности импульсная мощность вычислялась косвенным образом на основе измерения среднего уровня мощности, выполняемого с использованием измерителя уровня мощности, реагирующего на среднюю мощность. Импульсная мощность вычислялась делением средней мощности (PAVG) на скважность. Скважность в большинстве случаев является известной характеристикой и определяется делением длительности импульса огибающей мощности на период повторения импульсов (см. Рис. 7.1.1).

При этом вычислении предполагается постоянная пиковая мощность и не учитываются выбросы и переходные процессы в виде затухающих колебаний (т. н. «звон»). Поэтому это значение называется «импульсной мощностью», а не «пиковой импульсной мощностью» (см. Рис. 7.1.2). Для выполнения точных вычислений создания импульсы должны быть повторяемыми, прямоугольными и с постоянной скважностью. Дополнительную информацию см. в разделе 4.5.



**Скважность =  $PW / PRI$**   
**Импульсная мощность =  $P_{avg} / \text{Скважность}$**

Рис. 7.1.1. Вычисление импульсной мощности

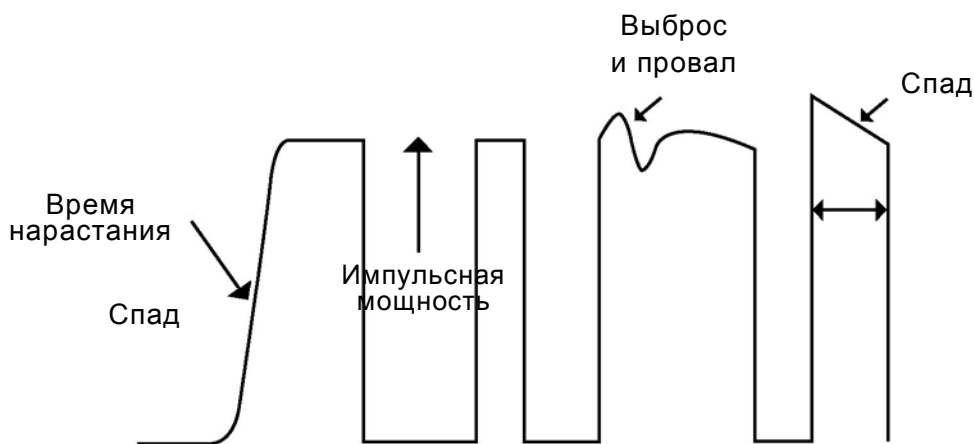


Рис. 7.1.2. Общие искажения формы импульса сигнала, которые могут оказывать воздействие на точность вычисления импульсной мощности:

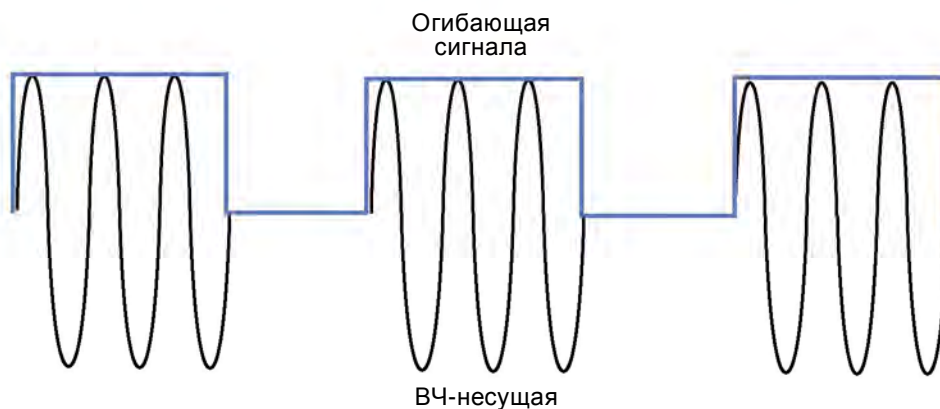


Рис. 7.1.3. Огибающую формы импульса с малой скважностью просто измерить с использованием большинства измерителей уровня мощности, реагирующих на среднюю мощность

Одним из преимуществ использования измерителей среднего уровня мощности является возможность измерений в более широком динамическом диапазоне по сравнению с измерителями пикового уровня мощности; но в этом случае предполагается, что огибающая сигнала является совершенно прямоугольной. Это преимущество исчезает в случае сигналов с высокой скважностью (см. Рис. 7.1.3).

В радиолокационных системах или в системах получения изображений с использованием ядерного магнитного резонанса (MRI) ВЧ- или СВЧ-несущая передается в коротких пакетах в течение длительных периодов для предоставления сигнала для измерений на больших расстояниях и объектов малого размера. В простых радиолокационных дальномерах используется импульсная модуляция, а в некоторых доплеровских радиолокационных системах используется непрерывный сигнал. Для импульсной модуляции требуется включение и выключение несущей синхронно с внешним импульсным сигналом, и не модуляция, как для сигнала связи. Огибающая импульса выделяется из демодулированной несущей в приемнике (см. Рис. 7.1.3).

Непрерывный сигнал характеризуется одинаковым значением средней и пиковой мощности и может быть измерен, если это значение находится в пределах динамического диапазона датчиков. Импульсный сигнал с высокой скважностью может иметь значительно более низкое среднее значение за пределами динамического диапазона датчиков, пиковое значение которых находится в пределах этого диапазона.

Для выполнения точного измерения импульсной мощности с использованием способа с учетом скважности необходимо точно измерить среднюю мощность сигнала. Для этого требуется поддержание средней мощности, намного превышающей уровень собственных шумов датчика. Одновременно с этим датчик мощности должен поддерживать обработку максимальных пиков во время включения импульса, либо датчик выдаст ошибочные данные или сгорит.

Большинство датчиков средней мощности может обрабатывать пики с уровнями на 10 дБ – 20 дБ выше их максимально допустимого значения средней мощности; по этой причине измерения импульсных сигналов с относительно малой скважностью могут выполняться без каких-либо проблем (см. Рис. 7.1.3). Но для сигналов со скважностью менее 1% динамический диапазон датчика мощности, реагирующего на среднюю мощность, не обеспечивает измерения и пиковой мощности, и средней мощности в пределах рабочего диапазона измерений датчика.

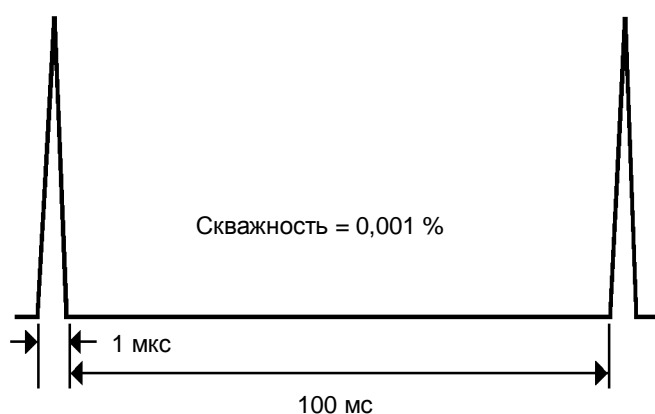


Рис. 7.1.4. Огибающая сигнала с высокой скважностью

Проще говоря: Как только скважность огибающей сигнала уменьшается (обычно ниже 1%), средняя мощность становится значительно меньше фактической пиковой мощности и требуется датчики с большим динамическим диапазоном (см. Рис. 7.1.4).

В следующем примере показано вычисление на основе скважности и динамического диапазона для периодического сигнала с одним импульсом длительностью в одну микросекунду, повторяющимся с частотой 10 Гц.

$$\text{Вычисление скважности: } (1,0e-6 / 0.1) = 0,00001 \text{ или } 0,001 \%$$

$$\text{Преобразование в дБ} = 10 \times \text{Log}_{10}(0,00001) = -50 \text{ дБ}$$

По этой причине для измерения импульсной мощности этого сигнала требуется измеритель уровня мощности с динамическим диапазоном, равным по крайней мере 50 дБ. Для типового теплового датчика с разностью между номинальным и максимально допустимым значением 22 дБ (+42 дБм) это означает, что средняя мощность сигнала должна быть по крайней мере на 50 дБ меньше пиковой мощности -8 дБм. Эти типы датчиков имеют уровень собственных шумов около -25 дБм; то есть сигнал может измениться не более чем на 17 дБ перед выходом датчика из строя, либо его среднее значение упадет ниже уровня собственных шумов. Для точных измерений сигнал должен быть на 6 – 10 дБ выше уровня собственных шумов, последующее уменьшение сигнала приведет к ухудшению динамического диапазона.

Датчик пиковой мощности с его широким динамическим диапазоном зачастую является лучшим решением для измерения этого типа сигналов по нескольким причинам:

1. Форма импульса не всегда является прямоугольной, что является причиной внесения ошибок при вычислении импульсной мощности с использованием измерений с помощью датчика средней мощности.
2. Динамический диапазон датчика средней мощности уменьшается пропорционально увеличению скважности, поскольку уменьшается точность измерений при длинном PRI и короткой длительностью импульсов.
3. Полностью откалиброванные высококачественные датчики пиковой мощности имеют динамический диапазон 70 дБ и могут выполнять измерения с отношением пикового к среднему уровню мощности 50 дБ без воздействия на измерения.

На Рис. 7.1.5 показано сравнение скважности в зависимости от пиковой импульсной мощности для трех наиболее распространенных типов датчиков мощности. Для этого сравнения использовался реагирующий на среднюю мощность термопарный датчик, реагирующий на среднюю мощность диодный датчик (работающий в области квадратичного детектирования диода ниже -20 дБм) и диодный датчик пикового уровня мощности. Максимальный и минимальный уровни мощности для каждого датчика представляют общий динамический диапазон.

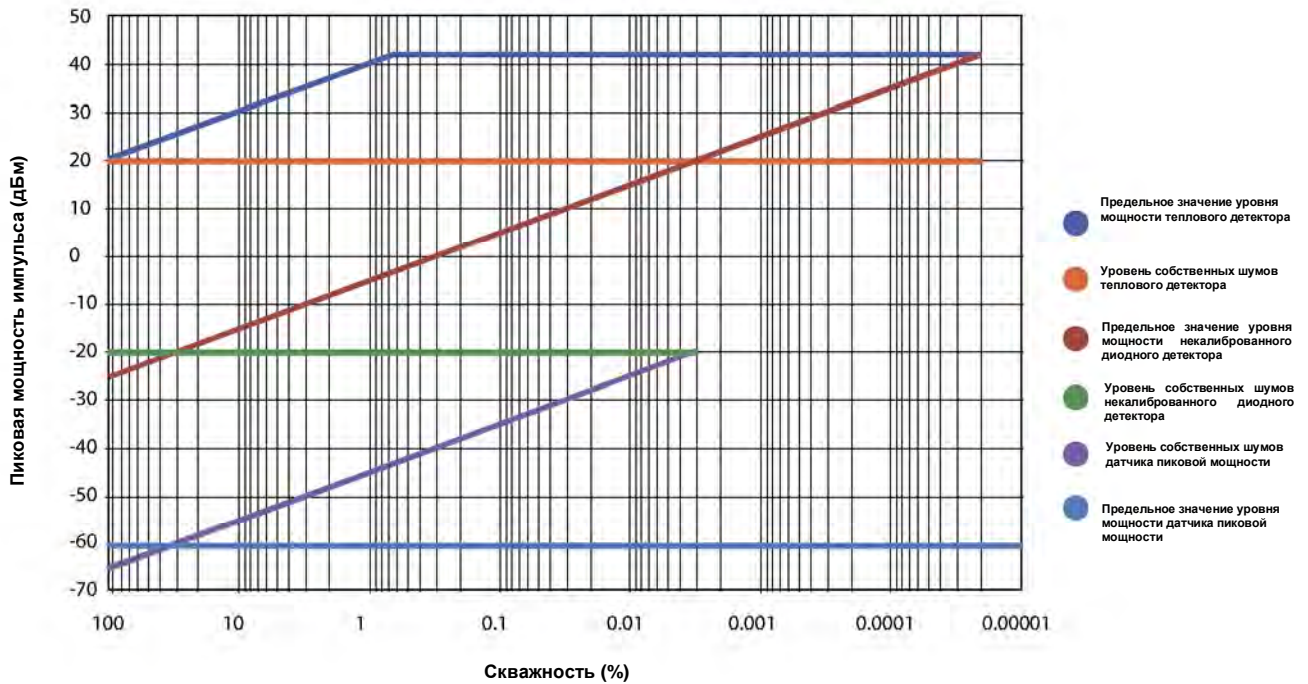


Рис. 7.1.5. Сравнение теплового датчика, диодного датчика средней мощности и диодного датчика пиковой мощности

Для двух реагирующих на среднюю мощность датчиков необходимо отметить, что при увеличении скважности используемый динамический диапазон уменьшается. Однако датчика пиковой мощности дело обстоит по-другому. Несмотря на то, что этот датчик может обрабатывать короткие пики на 10 дБ выше своего номинального значения средней мощности +20 дБм, его номинальное значение измеряемой мощности не повышается при увеличении скважности из-за верхнего предельного значения +20 дБм его откалиброванного диапазона измерений. Но с другой стороны, при увеличении скважности уровень собственных шумов не увеличивается, поскольку датчик пиковой мощности может выполнять измерения только во время «включенного» импульса и отбрасывать результаты измерений для всех других моментов времени.

Это означает, что используемый динамический диапазон датчика пиковой мощности остается постоянным при изменении скважности в отличие от ситуации с реагирующими на среднюю мощность датчиками. Форма импульса в примере выше может быть измерена, пока сигнал изменяется в динамическом диапазоне 60 дБ, и его уровень все еще остается существенно больше уровня собственных шумов датчика для выполнения устойчивых и точных измерений.

Затенение на Рис. 7.1.5 дает дополнительное понимание того, как поддерживаемый динамический диапазон реагирующих на среднюю мощность датчиков уменьшается при измерении импульсов с высокой скважностью. Это показано на Рис. 7.1.6.

Необходимо отметить, что в случае для скважности менее 0,003 % и тепловые датчики, и диодные датчики средней мощности выходят за пределы динамического диапазона. Рабочая область теплового датчика может быть расширена в некоторых вариантах применения за счет его возможности обработки пиковых значений, значительно превышающих номинальное значение средней мощности.

Однако это является опасным, поскольку источник может сгенерировать сигнал, уровень которого значительно больше уровня мощности, который может быть безопасно обработан датчиком. Пользователь должен рассчитать скважность сигнала, необходимую для ограничения средней мощности безопасным значением. Если скважность сигнала уменьшится, то средняя мощность увеличится соответствующим образом.

Датчик пиковой мощности не ограничен по скважности, и его рабочий динамический диапазон является широким и не зависит от скважности сигнала. Истинная пиковая мощность сигнала измеряется напрямую, могут быть легко измерены даже одиночные импульсы.

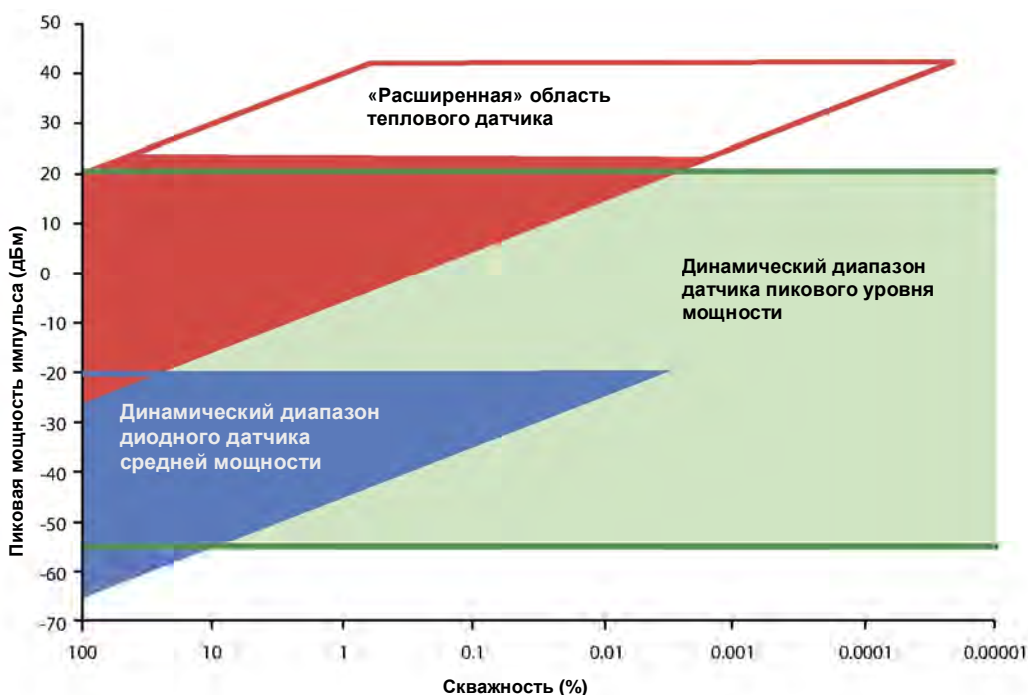


Рис. 7.1.6. Динамический диапазон теплового датчика, датчика средней мощности и датчика пиковой мощности в зависимости от скважности

## 7.2 Статистический анализ сигналов современных систем связи

В самых последних форматах беспроводной связи, подобных DVB, DAB, WiMax, WLAN и LTE, используются схемы модуляции OFDM с несколькими несущими для передачи цифровой информации. OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов) представляет собой схему модуляции с несколькими несущими с высоким коэффициентом амплитуды для передачи больших объемов данных. Введение технологии цифровой передачи привело к необходимости использования пиков мощности, которые превышают среднюю мощность на 20 дБ. Для обработки ожидаемых пиков напряжения и предотвращения возникновения повреждений или дугового разряда ВЧ-компоненты должны быть указаны соответствующим образом. Для корректного указания этих компонентов должен быть определен коэффициент амплитуды (или пик-фактор), то есть отношение пикового к среднему значению или к среднеквадратичному значению. Пиковая мощность нескольких сопряженных передатчиков может превышать уровень тепловой или средней мощности в сто и более раз. Выбор ВЧ-компонентов для системы передачи (антенные комбинаторы, коаксиальные линии и антенны) не может выполняться исключительно на основе уровня тепловой или средней мощности. Редко возникающие кратковременные выбросы напряжения являются критическими при определении требуемого размера и возможности обработки мощности ВЧ-компонентов.

Измерения коэффициента амплитуды выше 12 дБ ( $P_{\text{PEP}}/P_{\text{avg}}$ ) трудно выполнять с повторяемыми результатами. Для надлежащего определения этих высоких коэффициентов амплитуды одного измерения пикового значения не достаточно, и необходимо использовать статистический анализ. Сигналы систем связи низкой амплитуды с высоким коэффициентом амплитуды, хотя и важны при учете коэффициента битовых ошибок (BER), имеют большее значение с точки зрения их содействия повреждению системы. Высокое напряжение, ассоциированное с большими пиками мощности, может привести к возникновению дугового разряда в системе передатчиков и может повредить компоненты оборудования. Статистика является важным инструментом для анализа этих редких случаев с точки зрения повреждения оборудования и травм обслуживающего персонала. Поскольку мгновенные значения уровня мощности сортируются по амплитуде, а не по их времени возникновения, они подсчитываются и не усредняются. Этот процесс может выполняться в течение длительного времени и ограничен только размером доступной памяти, либо может работать бесконечно долго при применении так называемой «децимации». Этот процесс не имеет никакой ценности для характеристики событий, поскольку максимальная пиковая мощность сигнала OFDM может возникнуть один раз в день. Сбор импульсных данных с использованием статистики дает дополнительное понимание того, что нелегко наблюдать при сборе результатов измерений амплитуды в зависимости от времени.

На Рис. 7.2.1 показана реальная картина комплементарной интегральной функции распределения (CCDF) сигнала с модуляцией HDTV (телевидение высокой четкости), OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов). Кривая А указывает синусоидальный сигнал со 100 %-ой амплитудной модуляцией, которая характеризуется «прямоугольной» функцией CCDF, указывающей отношение пикового к среднему уровню мощности 3 дБ и с низкой, и с высокой вероятностью. Это обусловлено периодической формой сигнала с высокой степенью предсказуемости. Сигнал OFDM, показанный кривой В, имеет отношение пикового к среднему уровню мощности около 15 дБ, и характеризуется шаблоном рэлеевского распределения. Кривая С для справки указывает белый гауссовский шум, который имеет теоретически бесконечно большое отношение пикового к среднему уровню мощности, которое, как здесь показано, составляет около 17 дБ с уровнем вероятности  $10^{12}$ .

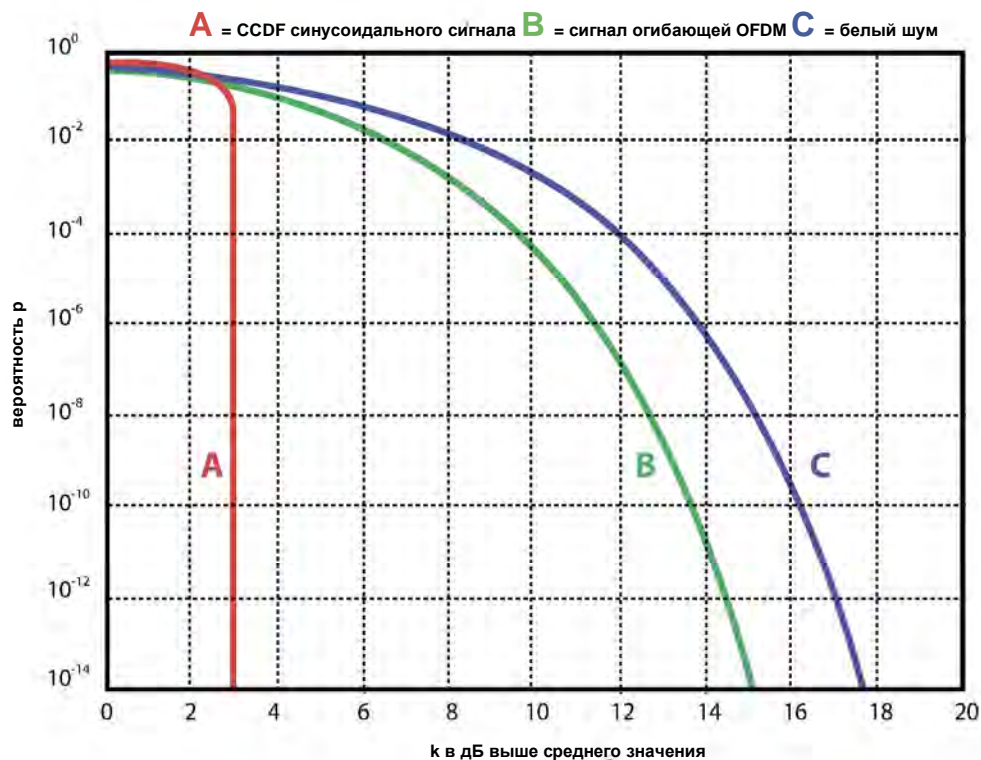


Рис. 7.2.1. CCDF синусоидального сигнала (с частотой несущей), сигнал огибающей OFDM и белый шум



В случае сигнала с амплитудной модуляцией очевидно, что для измерения пиковой мощности сигнала необходимо только несколько выборок; в то время как цифровой сигнал OFDM характеризуется высоким отношением пикового к среднему уровню мощности и редко возникающими пиками. В случае этих типов сигналов измеритель уровня мощности должен собрать большое число выборок для точной характеристики распределения мощности сигналов.

В следующем разделе объясняются статистические распределения, и каким образом они могут использоваться в современных измерителях пикового уровня мощности. На Рис. 7.2.2 показана функция плотности вероятности (PDF) цифрового сигнала с модуляцией 16-QAM (16-позиционная квадратурная амплитудная модуляция). Уровни 1, 2 и 3 представляют три различных уровня мощности сигналов 16-QAM.

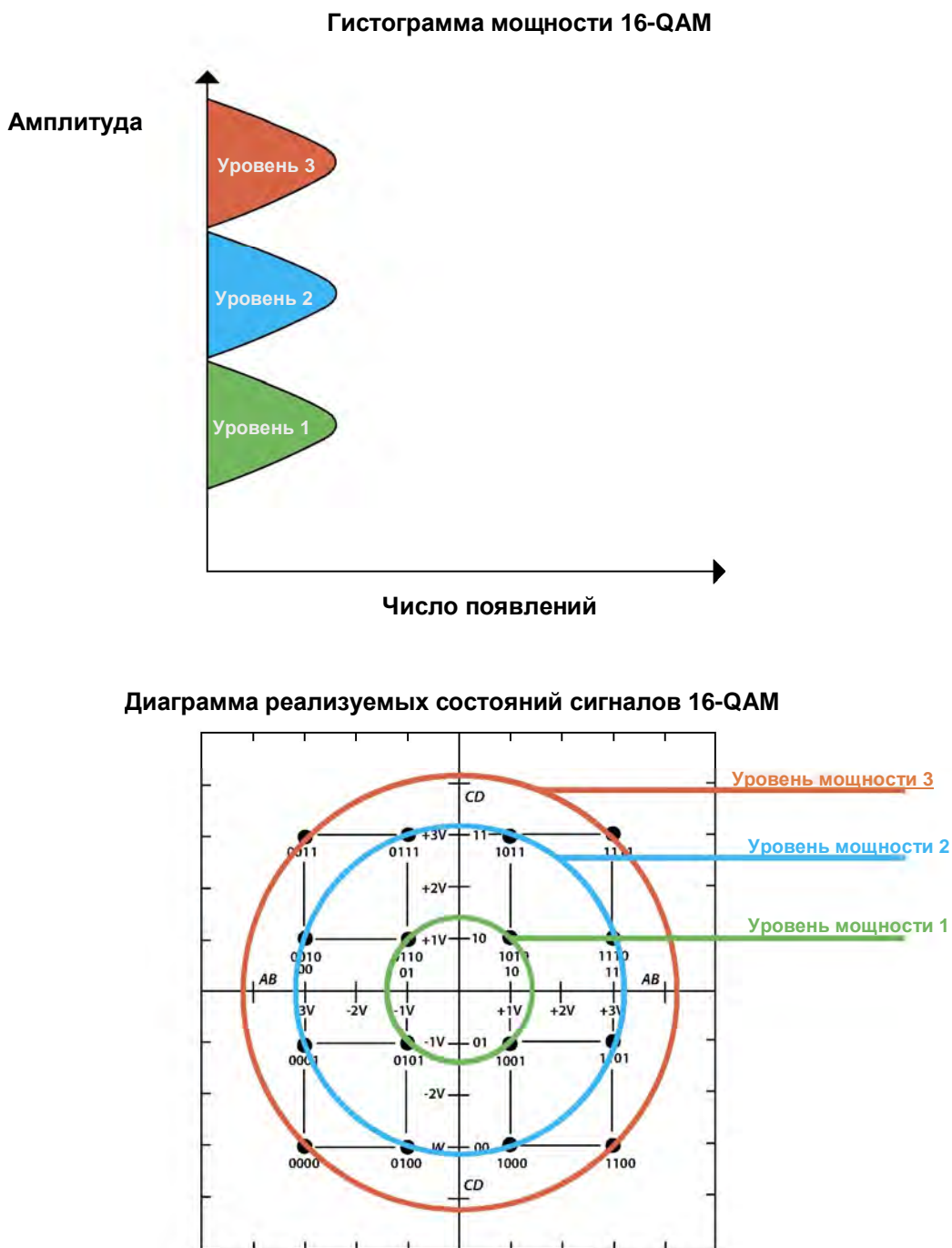


Рис. 7.2.2.

Для установления связи часто желательно знать максимальный уровень комплементарной интегральной функции распределения (CCDF). Это выполняется путем интегрирования функции плотности вероятности (PDF) для создания интегральной функции распределения (CDF), как показано на Рис.7.2.3. Окончательная комплементарная интегральная функция распределения (CCDF) вычисляется путем вычитания функции CDF из единицы. ( $1 - CDF = CCDF$ ). В этом распределении имеются максимальные пиковые значения (с самой низкой вероятностью появления), отображаемые в левом верхнем углу графика.

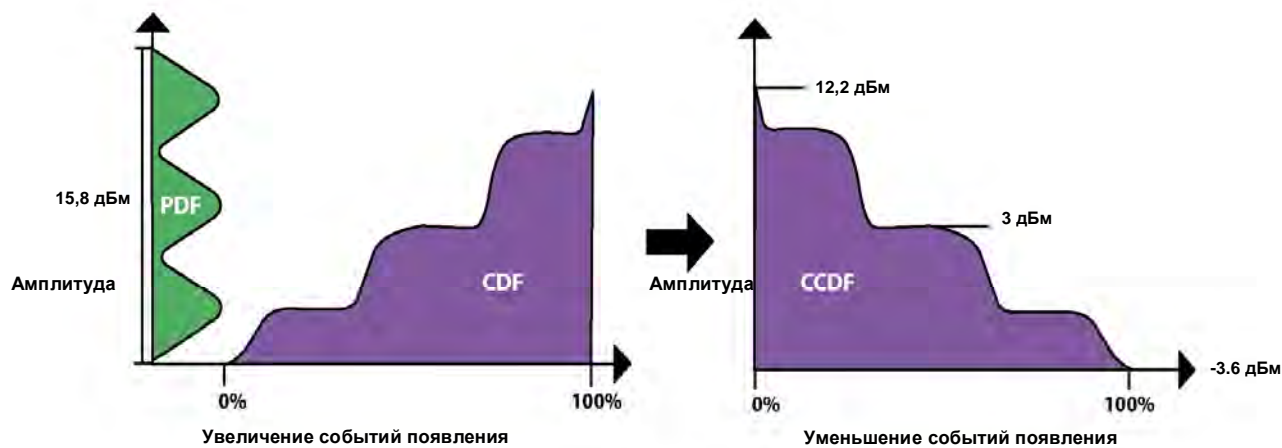


Рис. 7.2.3. Диаграмма PDF, CDF и CCDF

Представления функции CCDF на Рис. 7.2.4 указывают вероятность на оси X и абсолютное значение мощности в дБм на оси Y. Необходимо отметить, что на оси X используется линейное масштабирование, поэтому увеличивается так называемый "хвост" (область больших отклонений), отображаемый на максимальных уровнях мощности, которые происходят крайне редко.

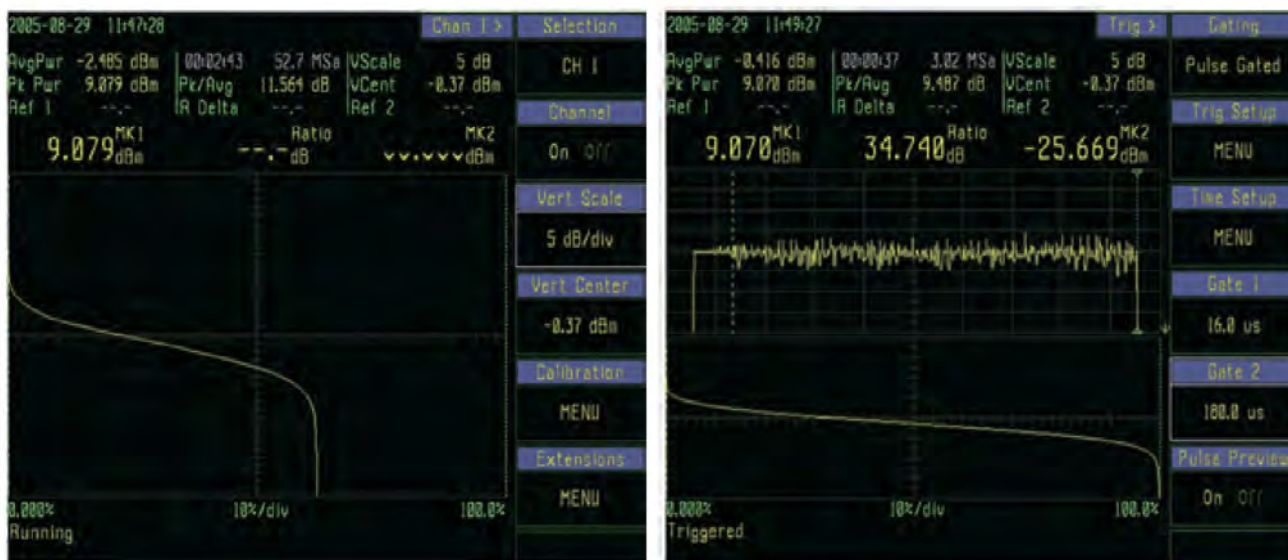


Рис. 7.2.4. Две функции CCDF сигнала WLAN, указывающие преимущества сбора данных с временной селекцией (справа) по сравнению с автономным сбором данных (слева). CCDF с временной селекцией исключает интервал импульса "выключено" с малым уровнем мощности и вступительную часть с низким коэффициентом амплитуды.

В первом примере непрерывный автономный процесс сбора данных собирает выборки во время активного (сигнал включен) и неактивного (сигнал выключен) интервалов, что приводит к искажению функции CCDF. Необходимо отметить, что уровень мощности быстро падает ниже значения вероятности 62 %, что указывает на то, что больше 1/3 времени сигнала приходится на низкие уровни мощности или на уровни мощности интервала «выключено». Это ожидается для сигналов временных интервалов или для пакетных сигналов, например WLAN, поскольку между пакетами сигналов передатчик выключается.

Для предоставления более значащей функции CCDF для синхронизированных по времени сигналов наиболее совершенные измерители пикового уровня мощности – например, Boonton 4500B – поддерживают реализацию статистического режима с временной селекцией, что обеспечивает сбор статических данных только во время выбранных частей формы сигнала. Этот режим предоставляет возможность исключения интервала «сигнал выключен» и вступительной части, и за счет этого режима функция CCDF точно отражает распределение мощности во время более случайной части «полезной нагрузки» кадра. Во втором примере на Рис. 7.2.4 показан тот же самый пакет WLAN во временной интервале в верхнем окне с курсорами временной селекции, используемыми для определения интересующей области для анализа функции CCDF. Функция CCDF в нижнем окне вычисляется только для полезной нагрузки WLAN и больше не искажается вступительной частью с низким коэффициентом амплитуды и интервалами «сигнал выключен» между пакетами.

Необходимо отметить, что на оси X в обоих примерах используется линейное масштабирование вероятности, что приводит к увеличению так называемого «хвоста», поскольку кривая функции CCDF приближается к нулевой вероятности (абсолютная пиковая мощность). Этот «хвост» представляет собой область наибольшего интереса для специалистов по ВЧ-оборудованию, и для него используется логарифмическое масштабирование для того, чтобы функция CCDF корректировала этот «хвост» при его приближении к оси. Это часто является более полезным форматом отображения, поскольку при этом расширяется область интересующих событий с очень малой вероятностью. Имеются в виду области, где сжатие сигнала может начать воздействовать на интенсивность битовых ошибок сигналов систем связи с цифровой модуляцией. На двух снимках экрана ниже на Рис. 7.2.5 используется логарифмическое масштабирование на оси X.

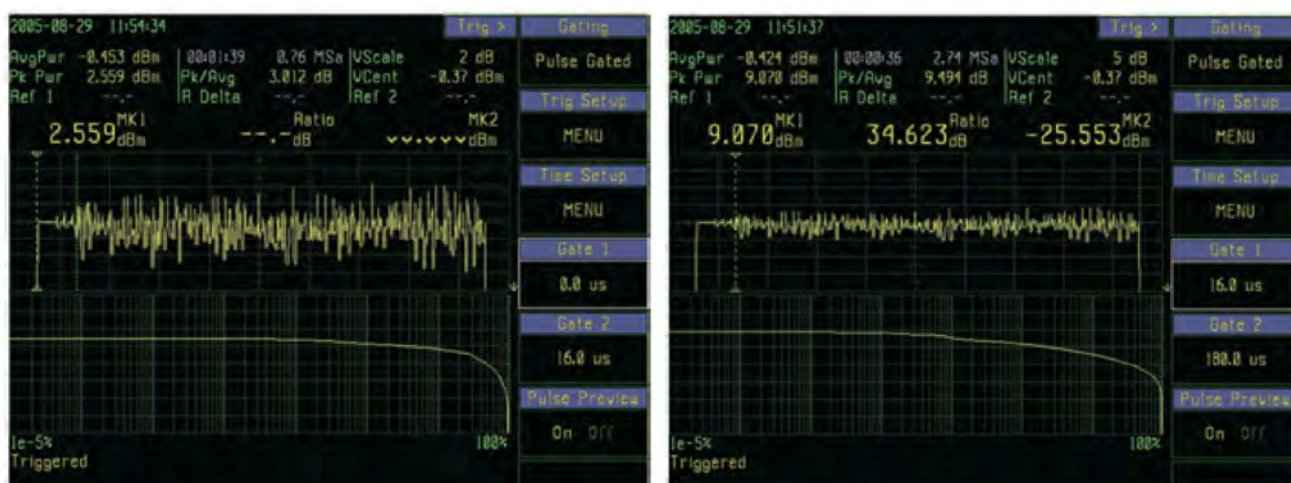


Рис. 7.2.5. Временная селекция полезной нагрузки сигнала улучшает точность статических измерений пиковой мощности за счет исключения интервала «сигнал выключен» между кадрами благодаря использованию синхронного запуска и курсоров временной селекции. На левом экране показана функция CCDF для вступительной части, которая имеет низкое отношение пикового к среднему уровню мощности (3 дБ), и имеет относительно плоскую функцию CCDF. На правом экране показана функция CCDF только для полезной нагрузки, которая имеет намного более высокое отношение пикового к среднему уровню мощности (9,5 дБ), что приводит к намного большему напряжению в цепи прохождения сигнала.

Ограничение с помощью временной селекции вступительной частью указывается низкими значениями пиковой мощности и постоянной огибающей сигнала. Это выполняется в отличие от области данных сигнала и обеспечивает качественный вид погрешности. Статистика имеет большое значение при измерении параметров сигналов современных систем связи из-за их высокого отношения пикового к среднему уровню мощности или коэффициента амплитуды. Коэффициент амплитуды (пик-фактор) является важным параметром сигнала и может быть вычислен и отображен в функции CCDF. Статистика мощности во временном интервале идеально подходит для шумоподобных сигналов, например для LTE и WLAN. Непериодические характеристики этих сигналов трудно анализировать в частотной области с использованием анализатора спектра или во временном интервале с использованием осциллографа.

Функция CCDF часто представляется в нормализованном формате отображения с логарифмическим масштабом по обеим осям с уровнями мощности в дБ относительно среднего уровня мощности сигнала. Это полезно для сравнения функции CCDF в различных точках в цепи прохождения сигнала, поскольку конкретный сигнал должен иметь четко определенную функцию CCDF независимо от своего абсолютного уровня мощности. В то время как контрольно-измерительная аппаратура часто отображает амплитуду сигнала на оси Y, функция CCDF в руководствах обычно указывается с логарифмической вероятностью на оси Y и нормализованной мощностью на оси X. Это поворачиваемое нормализованное представление в настоящее время также приобрело широкое распространение в измерителях уровня мощности.

На следующем примере на Рис. 7.2.6 показана функция CCDF сигнала WCDMA, отображаемая на измерителе пикового уровня мощности Boonton 4542. Функция CCDF отображается с использованием поворачиваемого и нормализованного формата представления – с логарифмической вероятностью на оси Y и коэффициентом амплитуды (нормализованной пиковой мощностью) на оси X. Левый конец оси Y соответствует значению 0 dB<sub>r</sub> (децибел относительно опорного уровня), долговременной средней мощности сигнала. Теоретический максимальный пик возникает с вероятностью 0 %, которая на логарифмическом представлении не определена. Кривая пересекает ось X (с вероятностью 0,0001 % или  $10^{-6}$ ) с коэффициентом амплитуды 15 dB<sub>r</sub>. Это означает, что ожидается, что только одна выборка из каждого миллиона превысит среднюю мощность больше чем на 15 дБ. Поскольку далее вероятность будет уменьшаться, совершенно очевидно, что коэффициент амплитуды будет увеличиваться на ничтожно малое значение, но от фронта функции CCDF рядом с нижней частью экрана; при этом окажется, что еще несколько декад добавят не более 1 дБ.

Измерители пикового уровня мощности серии Boonton 4540 реализуют двойную функцию CCDF, которая обеспечивает сравнение распределения мощности входных и выходных сигналов ВЧ-устройства, например усилителя мощности. Это сравнение на Рис. 7.2.7 показывает отклонение коэффициента амплитуды между входом (канал 2, синяя кривая справа) и выходом (канал 1, желтая кривая слева) усилителя сигналов. Поскольку усиливаемый сигнал является фактическим сигналом системы связи, он содержит все представляющие интерес частоты и уровни мощности и эксплуатирует усилитель во всем его динамическом диапазоне. Функция CCDF более полезна, чем простое измерение коэффициента амплитуды, поскольку она определяет уровень сжатия с различными уровнями вероятности.

Это предоставляет разработчикам возможность анализа характеристик усилителя с помощью установленного типа сигнала, а с помощью непрерывного сигнала для анализа характеристик с помощью показателя качества, подобной точке компрессии 1 дБ. Если усилитель был встроен в приемник и известно базовое значение BER для операционной системы, то BER и CCDF могут быть скоррелированы на физическом уровне перед сборкой приемника. В разделе 8.3 данного руководства рассматривается использование двухканального измерителя уровня мощности, поддерживающего статистический режим, для проверки ВЧ-усилителей.

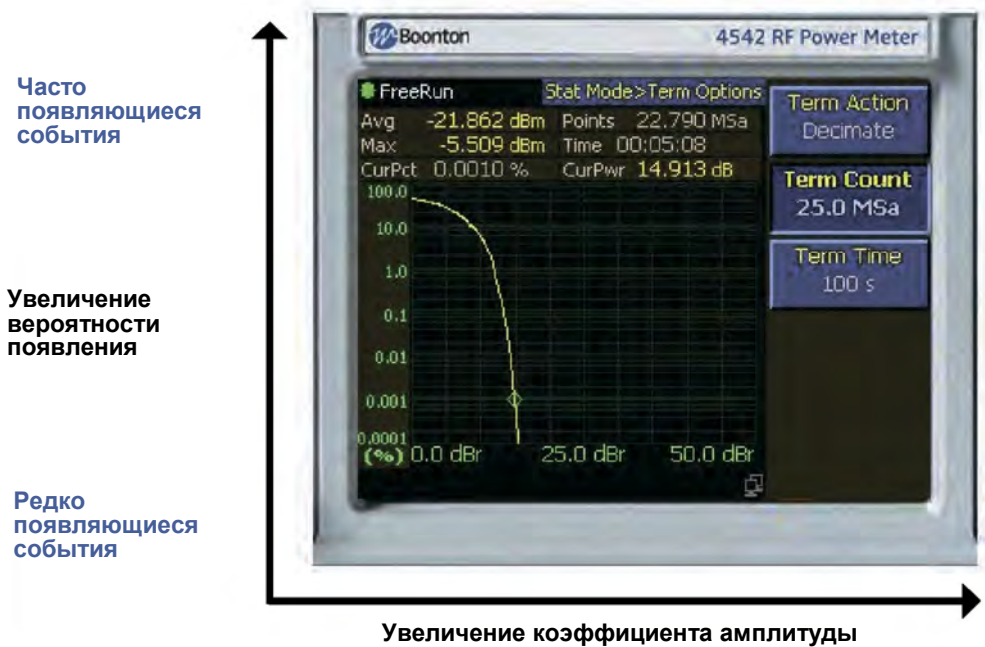


Рис. 7.2.6. Поворачиваемое и нормализованное отображение функции CCDF с логарифмическим масштабом по обеим осям



Рис. 7.2.7. Отображение "входной/выходной" функции CCDF показывает, что выход имеет уменьшенный коэффициент амплитуды, что указывает на сжатие сигнала

### 7.3 Использование измерителей уровня мощности для выполнения проверки на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости (EMC)

Сложность современного цифрового оборудования привела к тому, что проверка на соответствие требованиям по электромагнитным помехам (EMI) / электромагнитной совместимости (EMC) принимает все более важное значение. Создано большое число стандартов по электромагнитной совместимости, включая MIL-STD-461, IEC 61000, ISO 11451, EN 50 и часть 15 нормативов Федеральной комиссии связи США (FCC), которые обеспечивают конкретные директивы для выполнения проверки на соответствие требованиям по электромагнитным помехам (EMI) / электромагнитной совместимости (EMC). В предыдущих стандартах в качестве тестового сигнала помехи рассматривалась непрерывная несущая или одиночный тональный сигнал с постоянной модуляцией. В январе 2010 г. Международная электротехническая комиссия (МЭК) одобрила принятие изменения стандарта 61000-4-4 (редакция 2), разрешающее использование пакетных сигналов для проверки устройств. В Изменении 1 этого стандарта определяется импульс (частота повторения пиков) 100 кГц, а в Редакции 2 рекомендуется проверять устройства либо с использованием традиционной частоты повторения пиков 5 кГц, либо с использованием новой частоты повторения пиков 100 кГц. При выполнении проверки с использованием пакетных сигналов имитируются реальные электромагнитные помехи, излучаемые усилителями базовых станций систем связи и наземными антеннами радиолокационных систем. В данном разделе показано, каким образом датчик пиковой мощности может заменить одиночный диодный детектор в датчике напряженности электромагнитного поля для измерения импульсной мощности, улучшения повторяемости измерений и увеличения динамического диапазона измерений уровня мощности.

**Историческая справка.** До конца 19 века основными источниками электромагнитных помех были молнии и солнечное излучение, но растущая популярность электрического и радиооборудования в начале 20 века стала причиной первых искусственных помех от электрооборудования и радиобашен с передатчиками во всем мире. Это стало причиной созданию международных регулирующих органов, подобно Федеральной комиссии связи США (FCC). Эта тенденция продолжилась в 40-х годах прошлого века с вводом в строй высокоомощных промышленных переключающих устройств, которые стали причиной взрывов в угольных шахтах, возгорания автомобильных и самолетных заправочных станций и выходов из электрических сетей. В течение 50-х и 60-х годов прошлого века нелицензируемые диапазоны ISM (диапазоны частот для промышленных, научных и медицинских организаций) были распределены Федеральной комиссией связи США, которая разрешила генерацию относительно мощных ВЧ-сигналов. Поскольку излучение в этих диапазонах было неконтролируемым, создавалось множество помех из-за гармонических составляющих в боковых полосах частот и широкополосного излучения. Воздействие этих помех привело к необходимости создания новых стандартов и законов для регулирования этих излучений. С появлением цифровых схем в 70-х годах прошлого века более высокие скорости переключения увеличили излучения, а более низкие требования к напряжению в цепях увеличили восприимчивость оборудования к помехам. С 80-х годов прошлого века постоянно увеличивается использование средств мобильной связи и каналов СМТ, что создает помехи во всем доступном спектре сигналов. Для соблюдения обязательных требований по распределению меньших диапазонов требовались все более сложные способы соблюдения требований по электромагнитной совместимости (EMC). Несмотря на то, что цифровые системы зачастую менее восприимчивы к помехам, чем аналоговые системы, их эксплуатация на меньших уровнях мощности нарушает эту устойчивость. Эти проблемы привели к необходимости все более тестирования на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости (EMC) / электромагнитным помехам (EMI).

**Электромагнитная совместимость (EMC)** является областью науки, которая изучает непреднамеренную генерацию, распространение и принятие электромагнитной энергии из электромагнитных помех (EMI). Излучение является намеренной или нежелательной электромагнитной энергией, сформированной источником, которая может проникнуть в другие устройства. Чувствительностью или устойчивостью называется неспособность или способность электронного оборудования, называемого «жертвой», работать надлежащим образом при наличии каких-либо излучений или сигналов электромагнитных помех. Электромагнитная совместимость достигается путем четкого определения и аспектов излучения, и аспектов чувствительности электронного устройства.

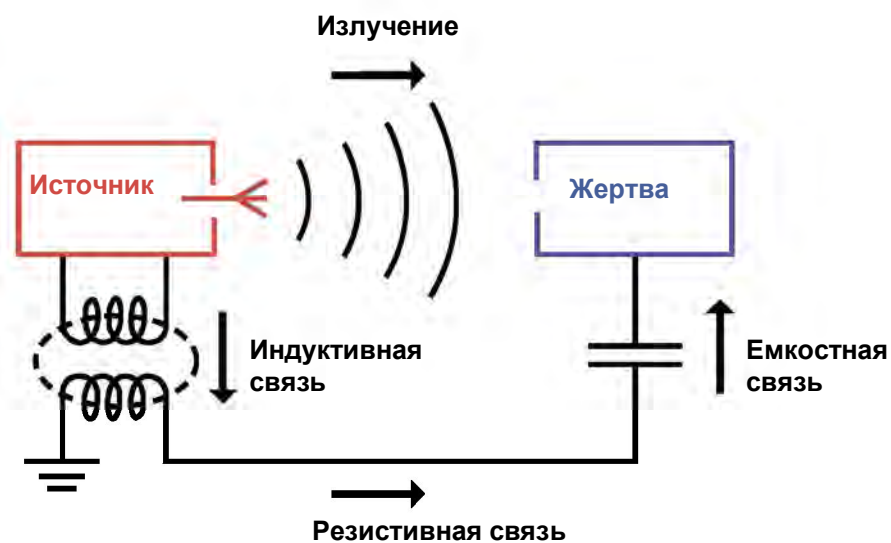


Рис. 7.3.1. Виды электромагнитной связи

На Рис. 7.3.1 показывается четыре различных типа электромагнитной связи: излучение, индуктивная связь, емкостная связь и резистивная связь. В данном примечании первым рассматривается излучение. При этом типе связи сигнал проходит через пространство в виде электромагнитных волн без физического соединения или связи между источником и «жертвой».

Целью проверки на устойчивость является имитация воздействия реальной ВЧ-помехи на электронное устройство или систему. В качестве примера можно привести автомобильную систему CANBUS, используемую для проводной цифровой связи между электронными подсистемами в автомобиле. Эти системы часто используются для контроля и управления важными рабочими параметрами и параметрами обеспечения безопасности автомобиля, включая систему управления двигателем, систему управления разгоном и торможением и системы рулевого управления/стабилизации. По этой причине их возможность надлежащего функционирования при всех предвидимых условиях воздействия электрических помех является определяющей для безопасности водителя и пассажиров. Обеспечение устойчивости к ВЧ-помехам стала обязательной частью процесса проектирования автомобилей, а также большинства других систем, в которых любой вид отказа может привести к повреждению автомобиля или человеческим травмам.

Проверка на устойчивость к воздействию помех выполняется в большой безэховой камере для изоляции от воздействия внешних ВЧ-помех при проверке тестируемого оборудования (EUT). Одним из важных требований для выполнения тестов является подача имитированного сигнала помехи с точно известной амплитудой. Напряженность электромагнитного поля обычно измеряется и характеризуется во время или до тестирования с использованием одного из двух способов: способ с обратной связью и способ замещения. Каждый способ имеет свои преимущества, в стандарте IEC, согласно которому выполняется тестирование, часто определяет способ, который необходимо использовать для определения амплитуды сигнала.

Для реализации **способа с обратной связью** требуется датчик напряженности электромагнитного поля, установленный перед или над тестируемым оборудованием во время проверки чувствительности (см. блок-схему на Рис. 7.3.2). Выходная мощность генератора сигналов регулируется на каждой из указанных частот в диапазоне тестирования для достижения требуемой напряженности электромагнитного поля в безэховой камере. Термин «датчик» может иметь два значения: датчик напряженности электромагнитного поля в тестовой камере и термин, обычно используемый для обозначения схемы диодного детектора средней мощности. Диодный детектор средней мощности представляет собой датчик напряженности электромагнитного поля и измеряет ВЧ-мощность через коаксиальный кабель в рамках данного обсуждения.

Диодный детектор средней мощности в датчике напряженности электромагнитного поля не может точно измерять напряженность поля модулированного ВЧ-сигнала, по этой причине для учета динамической характеристики сигнала для показаний датчика необходимо использовать поправочные коэффициенты. Для оценки подаваемого уровня мощности может применяться непрерывный сигнал, но для учета модуляции, используемой во время фактического тестирования, необходимо использовать дополнительный поправочный коэффициент. Этой коррекции достаточно для простой амплитудной модуляции, но очень часто недостаточно для пиков с высокой скважностью, которые требуются сегодняшними стандартами на проведение тестирования.

Простой диодный детектор может быть заменен датчиком пиковой мощности для точного измерения истинной амплитуды сигнала помехи даже при наличии модуляции. Датчик пиковой мощности может отслеживать огибающую сигнала и может выдавать истинную среднюю и пиковую мощность, если ширина полосы частот огибающей остается в пределах максимально допустимой ширины полосы частот видеосигналов датчика и измерителя уровня мощности. Хороший датчик пиковой мощности откалиброван для увеличенного динамического диапазона и содержит модуль температурной компенсации. Использование датчика пиковой мощности устраняет необходимости применения коррекции модуляции, когда подается импульсный или модулированный сигнал помехи, а не непрерывный сигнал. В случаях комплексного модулирующего сигнала или импульсов с высокой скважностью необходимо использовать датчик пиковой мощности, поскольку невозможно точно скорректировать нелинейность этих сигналов из-за модуляции при использовании стандартного диодного датчика или датчика напряженности электромагнитного поля. Эти ограничения подробно рассматриваются в главе 3 данного руководства.

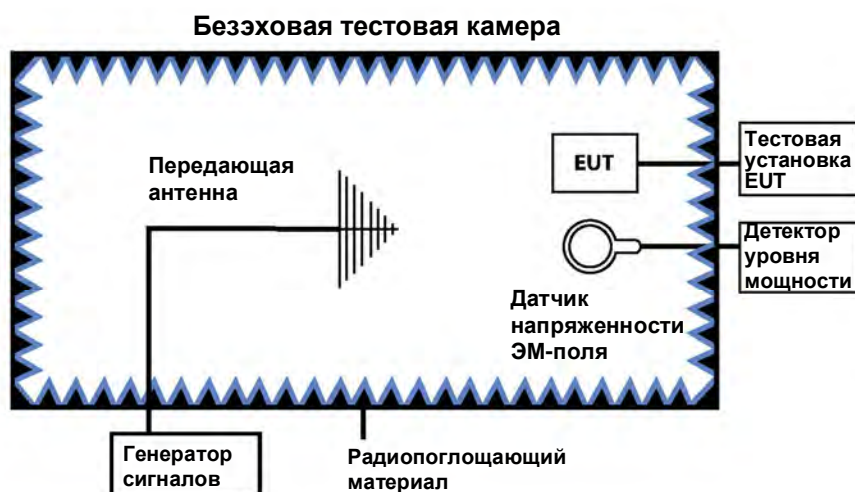


Рис. 7.3.2. Схема реализации способа «с обратной связью»



При реализации **способа замещения** для определения и калибровки напряженности электромагнитного поля в безэховой камере перед установкой в нее тестируемого оборудования используется датчик напряженности электромагнитного поля (см. блок-схему на Рис. 7.3.3). Напряженность поля регулируется для каждой частоты в диапазоне, и тестируемое оборудование (EUT) устанавливается в среду тестирования. При реализации этого способа не требуется мониторинг напряженности электромагнитного поля во время тестирования. Этот способ указывается в некоторых стандартах на проведение проверок на соответствие требованиям по электромагнитной совместимости (EMC). Несмотря на то, что датчик напряженности электромагнитного поля при использовании этого способа не требуется, он часто используется во время тестирования для мониторинга напряженности электромагнитного поля. Такая прямая обратная связь обеспечивает оптимальные рабочие характеристики системы.

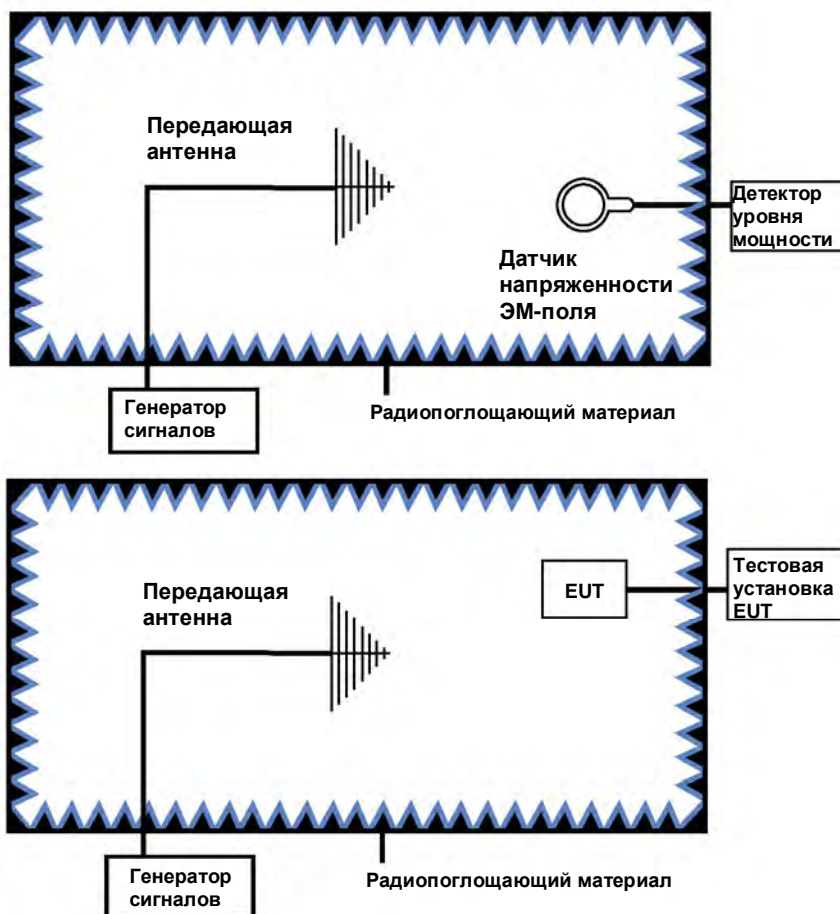


Рис. 7.3.3. Схема реализации способа замещения

И в способе с обратной связью, и в способе замещения используется генератор сигналов высокой мощности, подключаемый к передающей антенне для передачи ВЧ-сигнала с высокой повторяемостью при тестировании EUT. При выполнении способа с обратной связью во время тестирования требуется датчик напряженности электромагнитного поля, а при выполнении способа замещения этот датчик не требуется, но только устанавливается и может использоваться для улучшения качества измерений. В любом случае в большинстве датчиков напряженности электромагнитного поля предпочтительнее использовать калиброванный датчик пиковой мощности, а не диодный детектор средней мощности. При этом устраняется необходимость выполнения многочисленных калибровок, необходимость использования поправочных коэффициентов модуляции и необходимость температурной компенсации, ассоциируемой с диодным детектором средней мощности, и также предоставляется пиковые и средние значения характеристик поля помех. Без знания этих значений невозможно быть уверенным в том, что EUT функционирует в условиях воздействия помех.

## Глава 8: Примечания по рабочим характеристикам

Непосредственное измерение уровня мощности при «хороших» условиях обычно не вызывает затруднений – просто подключите измеритель уровня мощности и считайте результаты. Однако большое число проблем, связанных с вариантами применения измерительного оборудования, может сделать процесс измерения более затруднительным. В данной главе рассматриваются вопросы оптимизации выполнения измерений уровня мощности:

- **Уменьшение уровня помех при выполнении измерений** – обсуждение помех при измерении уровня мощности и общие способы уменьшения уровня помех за счет простой фильтрации и синхронного усреднения.
- **Оптимизация рабочих характеристик автоматического тестового оборудования (ATE)** – обзор управляемого компьютером тестирования и того, каким образом вся система может быть автоматизирована для увеличения производительности. Описывается общий подход «последовательного выполнения», реализуемый автоматическим тестовым оборудованием, при котором контроллер многократно выполняет одну и ту же последовательность шагов для реализации многоточечных измерений. После этого рассматривается современный альтернативный вариант с использованием предварительно запрограммированного управления качанием уровня мощности источника и буферизованного сбора в измерителе уровня мощности для значительного уменьшения длительности тестирования.
- **Статистические способы тестирования усилителей** – рассматривается новый способ проверки линейности характеристики ВЧ-усилителя с использованием статистического анализа результатов качания модулированной мощности, а не традиционного способа с применением последовательности непрерывных сигналов для измерения IP1 и IM3. Новый способ метод обеспечивает и увеличенную скорость тестирования и расширенную характеризацию сжатия для анализа внутрисистемной производительности усилителя.

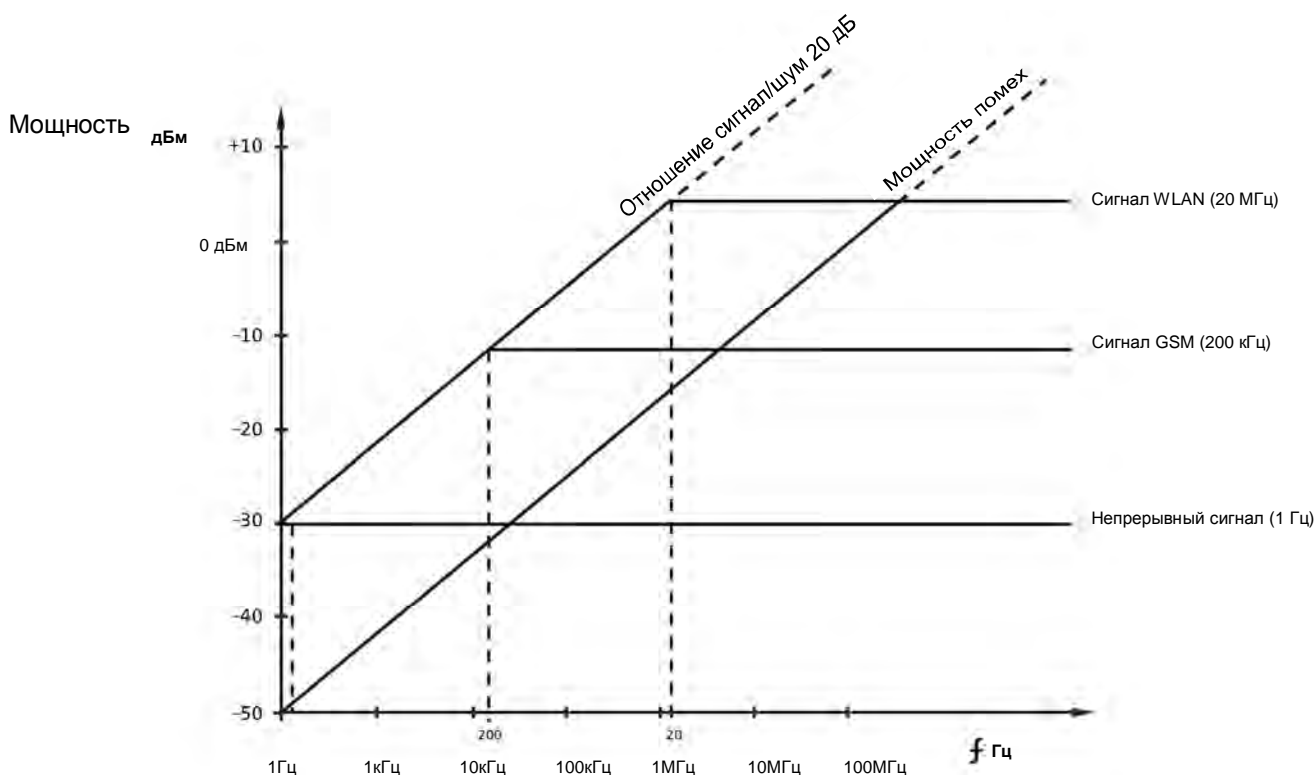
### 8.1 Уменьшение уровня помех при выполнении измерений

Зачастую требуется выполнение измерений уровня мощности в широком динамическом диапазоне, в этом случае датчики могут стать источниками помех на обоих предельных значениях уровня мощности. Как сказано в главе 3, верхняя часть диапазона обычно имеет жесткие ограничения – и средняя мощность, и пиковая мощность должны оставаться в пределах безопасного (для датчика) и откалиброванного диапазона измерений. Нижнее значение диапазона определить труднее.

Все измерения выполняются при наличии помех – это является частью каждого электрического измерения, включая измерения уровня ВЧ-мощность. Если амплитуда измеряемого сигнала не будет значительно выше амплитуды помехи, то эта помеха будет добавлена к измеренному сигналу и может стать причиной значительной погрешности измерения, как сказано в главе 9.

Одним удобным аспектом помех является то, что помеха является случайной. Более подробным анализом помех занимается компания Noisecom, дочерняя компания Boonton Electronics, которая специализируется на компонентах и устройствах, предназначенных для генерации или анализа различных типов электрических помех. По причине случайного характера возникновения помех и гауссовского распределения уровня помех, воздействие помех на характеристики измеряемых сигналов можно уменьшить.

Помехи, генерируемые при выполнении измерений уровня мощности, имеют в грубом приближении «белую» характеристику (постоянный уровень мощности) в довольно широком диапазоне. Если ширину полосы частот уменьшить в два раза, то таким же образом изменится средняя мощность помех. Когда ширина полосы частот помех больше ширины полосы частот измеряемого сигнала, то ширину полосы частот помех возможно отфильтровать, что уменьшит общий уровень помех.



*Зависимость средней мощности помех от ширины полосы частот помех, показывающая, как может быть уменьшена ширины полосы частот для увеличения отношения сигнал/шум*

Непрерывные сигналы CW представляют экстремальную ситуацию. Ширина полосы частот непрерывного сигнала составляет 0 Гц, по этой причине можно совместно отфильтровать сигнал и помехи до ширины полосы частот ниже 1 Гц без воздействия на точность измерений. Большинство измерителей уровня мощности содержат усредняющий (сглаживающий) фильтр, который усредняет ряд данных за определенный интервал времени для выдачи отфильтрованного результата. Увеличение времени усреднения приводит к уменьшению уровня помех при выполнении измерений за счет времени установления изменений уровня сигнала.

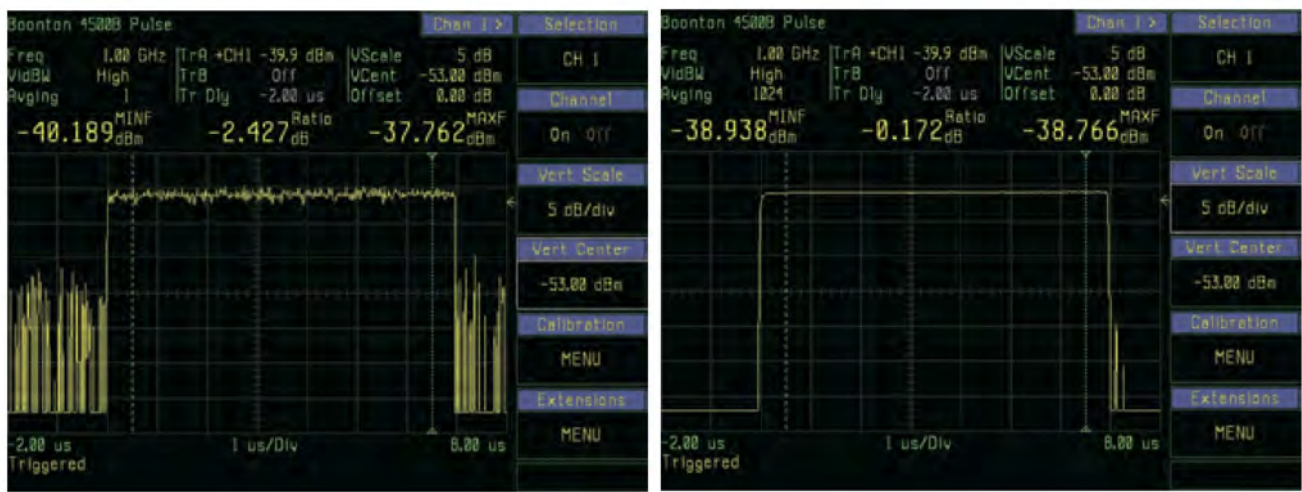
К сожалению, существуют другие типы помех, помимо помех с гауссовским распределением, которые становятся причиной увеличенной фильтрации для достижения точки убывающего обратного воздействия. Постоянная времени фильтра, равная одной секунде, обычно соответствует уровню -60 дБм для диодного датчика непрерывных сигналов, но увеличение постоянной времени фильтра до десяти секунд не приводит к уменьшению помех в десять раз и не обеспечивает такую же точность на уровне -70 дБм.

В большей части измерителей уровня мощности непрерывных сигналов и измерителей среднего уровня мощности реализована «автоматическая фильтрация», при которой измерительное устройство постоянную времени фильтра на основе измеренного уровня мощности. Это может привести к увеличению времени установления при изменении уровня мощности, поэтому, если известен ожидаемый уровень мощности, рекомендуется установить фильтр вручную для достижения оптимальных рабочих характеристик.

Усредняющий (сглаживающий) фильтр большей части измерителей уровня мощности непрерывных сигналов и измерителей среднего уровня мощности, а также измерителей пикового уровня мощности, работающих в непрерывном автономном или «модулированном» режиме, чаще всего является фильтром скользящих выборок или «оконным» фильтром, в котором показания мощности выполняются с относительно высокой скоростью и затем усредняются вместе надлежащим образом. Отфильтрованное показание мощности в любой момент времени является просто средним значением из последних «n» выборок, где «n» – это постоянная времени фильтра, разделенная на внутреннюю скорость сбора данных. Невзвешенные (простые) средние значения являются наиболее распространенными результатами, но иногда используются другие типы взвешиваний для распределения флуктуирующих сигналов (например, импульсных сигналов). Выход фильтра может повторно вычисляться и обновляться с частотой сбора данных за счет непрерывного добавления новых и отбрасывания старых выборок.

При измерении широкополосного сигнала с помощью измерителя пикового уровня мощности отфильтровывание помех может стать затруднительным. В измерителях пикового уровня мощности часто требуется поддержание ширины полосы частот при выполнении измерения, равную десяткам или более мегагерц. Совершенно очевидно, что невозможно использовать фильтры с временной константой из миллисекунд или секунд без сопутствующей фильтрации требуемых характеристик сигнала.

Пользуйтесь преимуществом дублирования повторяющихся сигналов. Любой периодический сигнал может быть синхронно отфильтрован посредством совместного усреднения по нескольким периодам сигнала. До тех пор, пока отдельные периоды или события форм сигнала могут синхронизироваться по времени, возможно совместное усреднение сотен или даже тысяч отдельных циклов или периодов качания и формирование отфильтрованной формы сигнала с менее видимыми помехами и без ухудшения амплитуды и профиля формы сигнала.



Воздействие процесса усреднения на уменьшение уровня помех в периодическом импульсном сигнале. На обоих этих снимках экрана представлен один низкоуровневый (-39 дБм) импульс периодического сигнала. На левом снимке экрана показана ситуация, когда усреднение не выполняется и отношение минимального к максимальному значению, представляющее уровень помех с двойной амплитудой при выполнении измерений, составляет около 2,4 дБ. На правом снимке экрана показана ситуация, когда при увеличении усреднения до 1024 уровень помех с двойной амплитудой во время импульса уменьшается до 0,2 дБ, а уровень собственных шумов снижается с -53 дБм до -70 дБм.

Синхронное усреднение сигнала часто называется «усреднением трассы прохождения сигнала» или просто «усреднением» в измерителях пикового уровня мощности, работающих в запускаемом или «импульсном» режиме. Иногда используется термин «усреднение видеосигнала», поскольку он знаком пользователям анализаторов спектра, но этот термин можно неправильно понять по отношению к измерителям уровня мощности.

Источником такой путаницы является то, что в некоторых измерителях пикового уровня мощности предлагается дополнительный способ уменьшения помех – возможно уменьшение ширины полосы частот видеосигналов входной схемы датчика или измерителя уровня мощности. При использовании этого способа ошибки не вводятся до тех пор, пока ширина полосы частот видеосигналов измерения остается выше ширины полосы частот видеосигналов сигнала. В большинстве случаев это уменьшение ширины полосы частот обеспечивает весьма скромное уменьшение уровня помех, но возможна дифференциация сигналов, которые могут быть измерены, и сигналов, которые не могут быть измерены, и это может использоваться совместно с фильтрацией или усреднением.

Еще одним способом, который может понизить уровень помех измерителей пикового уровня мощности, является более быстрое выполнение выборок. Если измеритель уровня мощности уже выбирает данные на частоте Найквиста или на более высокой частоте, то использование этого способа не обеспечивает существенного улучшения. Если же выборка данных выполняется с меньшей частотой и ширина полосы частот является избыточной, то более высокая частота выборок отфильтрует помехи без воздействия на сигнал.

## 8.2 Оптимизация рабочих характеристик автоматического тестового оборудования (ATE)

Как и большинство современных измерительных устройств, современные измерители пикового уровня мощности содержат средства высокоскоростной связи (например, интерфейсы GPIB, LAN и/или USB) для дистанционного управления с помощью персонального компьютера (ПК) или контроллера системы и интеграции в системы автоматического тестирования (ATE). Эта функция значительно расширяет возможности устройств по сравнению с ручным управлением с лицевой панели, поскольку с измерителем уровня мощности могут быть объединены другие устройства для обеспечения не только централизованного управления, но и для сбора и отображения из различных устройств. Целью является предоставление обзора дополнительных функциональных возможностей, которые могут быть предоставлены из приложения автоматических измерений измерителей уровня мощности и предоставление обзора инструментальных средств ПК, облегчающих программирование измерительных устройств.

'Связующий элемент', который подключает измерительные устройства к ПК, состоит из интерфейса ввода/вывода ПК (например, библиотеки ввода/вывода VISA). VISA – это сокращение от «VXIplug&play Systems Alliance», эта группа в настоящее время является частью IVI Foundation. С помощью VISA физический интерфейс, используемый в ПК, может использоваться в качестве встроенного последовательного интерфейса, интерфейса LAN Ethernet или USB-интерфейса, интерфейсной платы GPIB на шине PCI, интерфейсного кабеля USB-GPIB или в качестве комбинации из этих интерфейсов ввода/вывода. В библиотеке VISA содержатся все низкоуровневые драйверы и функции, требующиеся для использования любого из этих интерфейсов для управления измерительными устройствами. Это обеспечивает портативную и независимую от шины модель программирования, которая освобождает разработчика от той необходимости реализации низкоуровневого канала связи для каждого устройства и шины в системе.

Последнее, что должен выбрать разработчик – это среда проектирования для создания программного обеспечения автоматического управления и контроля. IDE (интегрированная среда разработки) в архитектуре .NET обеспечивает выбор из Visual Basic, C Sharp или C++ для разработки кода программного обеспечения автоматизации. Также существуют также среды образного программирования, например Agilent VEE или National Instruments LabView, которые предоставляют пользователям возможность создания приложений автоматизации измерений без большого опыта программирования. Эти среды, вместе с дополнительными библиотеками, утилитами и примерами программ, могут помочь специалистам без большого опыта программирования разработать программное обеспечение автоматизации в соответствии с предъявляемыми требованиями.

**Связь «измерительное устройство – главный компьютер».** Большинство современных измерительных устройств выполняют требования стандарта программного обеспечения SCPI (стандартные команды для программируемых измерительных устройств), который определяет язык общего интерфейса для связи между измерительными устройствами и компьютерами. Команды SCPI состоят из текстовых сообщений в формате ASCII в определенном синтаксисе и могут быть реализованы в любой среде программирования главного ПК. Конечный результат соответствия этому стандарту заключается в том, что измерительные устройства подобными функциями принимают одни и те же команды для выполнения этих функций, что минимизирует или устраняет изменения программного обеспечения при замене измерительных устройств в тестовых системах.

По определению все команды SCPI посылаются в виде текстовых строк в формате ASCII, однако результаты измерений, возвращаемые измерительными устройствами, могут передаваться либо в виде текста в формате ASCII (по умолчанию), либо в двоичном формате, который является более компактным способом передачи данных. Режим передачи двоичных данных конфигурируется главным компьютером и является самым эффективным способом передачи данных, когда и главный компьютер, и измерительное устройство используют формат IEEE с плавающей запятой по трем причинам:

- Устраняется время обработки для преобразования «двоичный формат-формат ASCII» на стороне измерительного устройства
- Устраняется время обработки для преобразования «формат ASCII-двоичный формат» на стороне главного компьютера
- Число байтов на значение уменьшается вследствие более эффективной упаковки и удаления разделителей

Стандартный режим передачи данных в формате ASCII является самым простым для реализации, поскольку все форматирование выполняется библиотекой VISA в прозрачном режиме. Кроме того, этот режим является самым простым для поиска и устранения неисправностей, поскольку транзакции шины можно легко контролировать и регистрировать с использованием легкодоступных инструментальных средств и утилит. В случаях уменьшения трафика ввода/вывода или уменьшения скорости передачи данных режим передачи двоичных данных может улучшить эффективность системы с небольшим увеличением времени на программирование.

**Автоматизация измерений.** Существует несколько веских оснований для автоматизации процесса тестирования:

- Обеспечивает стабильность результатов путем удаления возможных ошибок ручного управления с лицевой панели
- Возможна полностью совместимая синхронизация системных событий и измерений
- Более высокая производительность измерений обеспечивает либо уменьшенный период тестирования, либо возможность сбора большего объема данных за такой же интервал времени
- Автоматизация облегчает тестирование большого объема продукции, при котором время и точность тестирования являются важнейшими параметрами
- Сбор результатов из большого числа устройства для обработки и отображения на ПК обеспечивает новые способы отображения информации по сравнению с возможностями каждого автономного устройства
- Измерительные устройства могут собирать данные с частотой выше своей частоты обновления отображения, эта частота может быть установлена с помощью ПК
- Упрощены процессы записи и архивирования результатов измерений для контроля качества или управления

Исторически измерение уровня ВЧ-мощности в системах АТЕ выполнялось с использованием протокола «запрос-ответ». Передача команд и данных в формате ASCII использовалась в обоих направлениях либо с использованием протокола SCPI, либо с использованием собственных протоколов. Однако последние достижения в области измерения уровня мощности, вместе с увеличенными требованиями пользователей в настоящее время привели к необходимости исследования новых решений для увеличения производительности систем измерения. Современные измерители уровня мощности, в частности измерители пикового уровня мощности, могут иметь очень широкие полосы частот и высокие скорости измерения, а их производительность может намного превосходить возможности ручного управления или возможности процесса «запрос-ответ» для записи и просмотра результатов измерений.

В типовой системе АТЕ с несколькими измерительными приборами, подключенными к главному компьютеру, существует возможность того, что общая скорость и эффективность процесса измерения будет ухудшена из-за объема трафика ввода/вывода при взаимодействии устройств в системе. Это особенно актуально в том случае, когда системы АТЕ попытаются подражать способу ручного тестирования 'измерить и затем записать'. Этот способ все еще применяется для наиболее автоматизированных приложений и все еще является более быстрым и более совместимым при управлении персональным компьютером, но его быстродействие определяется только всем циклом последовательного измерения. Цикл автоматических последовательных измерений обычно содержит следующие шаги для каждого выполняемого измерения:

## Один цикл последовательных измерений

### Шаг 1 **Конфигурирование источника сигналов**

Контроллер выполняет конфигурирование источника сигналов для следующего шага качания уровня мощности: устанавливает уровень мощности, частоту, затухание и т. д.

### Шаг 2 **Конфигурирование измерителя уровня мощности**

Контроллер выполняет конфигурирование измерителя уровня мощности с учетом ожидаемых изменений в сигнале источника: устанавливает частоту, диапазон, фильтрацию и т. д.

### Шаг 3 **Задержка установления сигнала**

В течение предварительно запрограммированной или адаптивной временной задержки контроллер ожидает, пока источник не установит сигнал перед запуском процесса сбора результатов измерений.

### Шаг 4 **Инициирование нового измерения**

Контроллер передает в измеритель уровня мощности команду на сброс последнего показания и начало сбора новых результатов измерений.

### Шаг 5 **Сбор результатов измерений**

Измеритель уровня мощности собирает результаты измерений и выполняет останов после сбора данных. Этот шаг может выполняться (или может не выполняться) одновременно со следующим шагом (обработка данных).

### Шаг 6 **Обработка результатов измерений**

Измеритель уровня мощности обрабатывает собранные данные для выдачи одного результата измерения. Может выполняться одновременно с предыдущим шагом (сбор результатов измерений).

### Шаг 7 **Уведомление о состоянии «результат измерения готов»**

Измеритель уровня мощности уведомляет главный компьютер, что новое показание готово либо посредством однонаправленного уведомления, либо с помощью двунаправленного процесса опроса.

### Шаг 8 **Возвращение результата измерения**

Контроллер считывает новый результат измерения из измерительного устройства и сохраняет результат.

### Шаг 9 **Следующее измерение в последовательности**

Повторите шаги 1–8 для каждой измеряемой точки.



Шаг 7, «Результат измерения готов», может содержать либо действие опроса, в котором главный компьютер непрерывно опрашивает измеритель уровня мощности для получения текущего состояния измерения, либо может выполняться с помощью процесса уведомления, например прерывания «измеритель уровня мощности – главный компьютер», которое передается в главный компьютер в случае, когда результат измерения готов. В протоколе IEEE-488 для этой цели используется сигнал «Service ReQuest» (SRQ), и большое число более новых протоколов дистанционного управления поддерживают или эмулируют эту функцию. После того как главный компьютер получил подтверждение о том, что новый результат готов, он может считать и записать результат (при необходимости). Для процесса разработки программного обеспечения системы АТЕ необходимо осознавать и пользоваться преимуществом этой встроенной функциональной возможности текущих измерительных устройств для оптимизации их эксплуатации в режиме дистанционного управления.

Во многих системах некоторые шаги последовательности измерений могут быть объединены для уменьшения объема трафика, передаваемого по шине. Например, шаги 4 – 8 часто заменяются одним циклом «запрос-ответ», в котором измерителю уровня мощности передаются команды «запустить новое измерение, выполнить останов при выполнении, обработать данные и вернуть результат». После выдачи команды контроллер просто ожидает, когда измеритель уровня мощности возвратит конечный результат. Язык SCPI разрешает эту сортировку управления с помощью запроса READ. Это избавляет от необходимости в схеме, управляемой опросом или прерыванием, для получения состояния измерения за счет установления связи по шине дистанционного управления, пока главный компьютер ожидает ответа измерителя уровня мощности.

**Современный подход.** Сегодняшние измерительные устройства обладают достаточным встроенным интеллектом для последовательной обработки шагов этого цикла без вмешательства контроллера. Например, генератор сигналов обычно может быть запрограммирован для выполнения предварительно сконфигурированного качания уровня мощности или частоты по одной команде. Таким же образом, измерителю уровня мощности может быть передана команда на сбор и занесения в буфер последовательности показаний и возвращения всех этих значения одновременно в виде списка с разделителями или в виде блока двоичных данных. Передача большого числа значений с помощью одной транзакции шины значительно более эффективна, чем их передача по отдельности. В некоторых случаях даже тестируемое устройство может выполнить «самоконтроль», иногда с помощью встроенного тестового или диагностического режима. В качестве примера можно привести тестирование сотового телефона, при котором сотовый телефон выполняет запрограммированную последовательность шагов изменения уровня мощности передачи для проверки своей подсистемы управления мощностью.

## Полный цикл измерения с качанием уровня мощности с буферизацией результатов

### Шаг 1 Конфигурирование и активизация измерителя уровня мощности

Контроллер выполняет конфигурирование измерителя уровня мощности для сбора и занесения последовательности результатов измерений в соответствии с ожидаемым качанием уровня мощности.

### Шаг 2 Конфигурирование и инициирование качания уровня мощности источника сигналов

Контроллер выполняет конфигурирование источника сигналов для выполнения полного качания уровня мощности: устанавливает начальный и конечный уровень мощности, частоту, затухание, скорость/длительность качания уровня мощности и т. д., а затем иницирует качание уровня мощности (см. Рис. 8.2.1).

### Шаг 3 Сбор результатов измерения с качанием уровня мощности в буфер измерителя уровня мощности

Измеритель уровня мощности собирает результаты измерений за весь цикл качания уровня мощности и выполняет останов после сбора данных.

### Шаг 4 Уведомление о состоянии «результат качания уровня мощности готов»

Измеритель уровня мощности уведомляет главный компьютер, что результат качания уровня мощности готов либо посредством однонаправленного уведомления, либо с помощью двунаправленного процесса опроса.

### Шаг 5 Возвращение результата измерения с качанием уровня мощности

Контроллер считывает все занесенные в буфер результаты качания уровня мощности и сохраняет результат.

Если доступна надлежащая буферизация управления источником и результатов измерений, то весь процесс измерения может состоять из одной последовательности транзакций главного компьютера для инициирования процесса и конечного шага главного компьютера для считывания всех результатов. Управление и синхронизация всех других шагов выполняется в источнике и в измерителе уровня мощности, и они могут выполняться без вмешательства контроллера. Такой подход характеризуется трудностью синхронизации собранных результатов измерений с выполнением качания уровня мощности сигнала источника. Без прямой связи между источником и измерителем уровня мощности может быть трудно определить, какой шаг изменения уровня мощности выполняется источником.

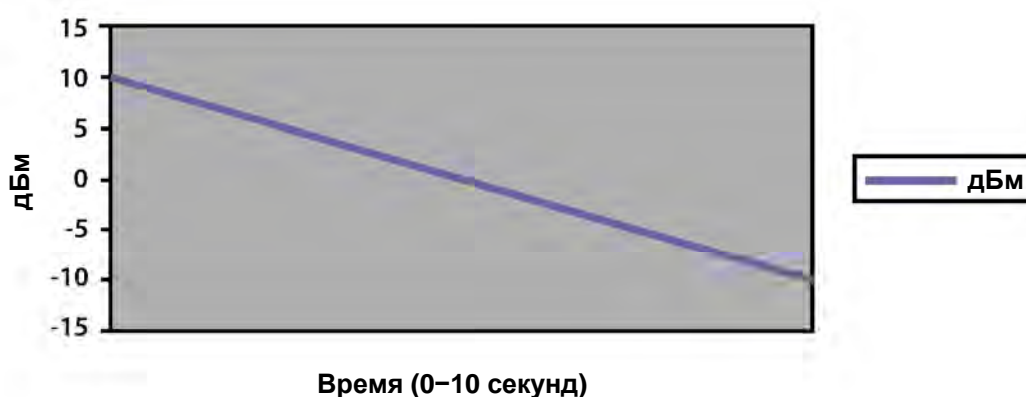
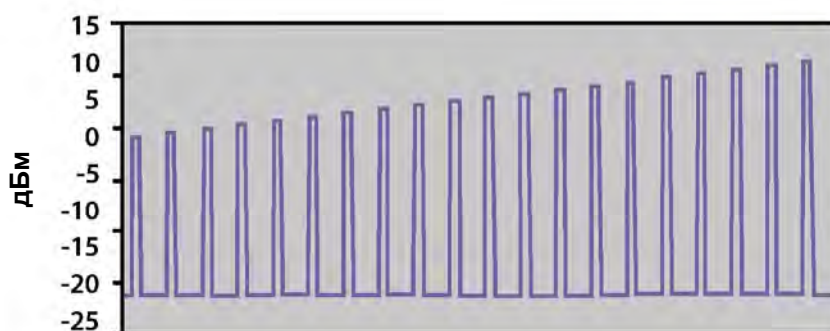


Рис. 8.2.1. Линейное изменение уровня мощности / Временное качание уровня мощности

Самым простым способом синхронизации источника и измерителя уровня мощности является временная синхронизация. Источник запрограммирован для выполнения линейного качания уровня мощности в известном интервале времени или с известной скорости качания уровня мощности, а измеритель уровня мощности запрограммирован для сбора данных точно в этом интервале времени. Если оба процесса начинаются синхронно и точно известна и скорость качания уровня мощности источника, и скорость регистрации данных измерителя уровня мощности, то нетрудно предположить, что состояние качания уровня мощности источника определяется позицией показания в массиве возвращаемых измерений. Этот способ хорош при непрерывном качании уровня мощности и качании уровня мощности непрерывного сигнала.

Другой способ синхронизации заключается в использовании запускаемого сбора данных (например, при аппаратном соединении между источником сигналов и измерителем уровня мощности). Многие генераторы сигналов имеют выход синхронизации, для которого устанавливается то или иное логическое состояние для указания того, когда выполняется каждый шаг в предварительно запрограммированном качании уровня мощности. Обычно этот сигнал не утверждается, пока источник не перейдет в стабильное состояние, что помогает определить необходимость программирования задержки установления сигнала. В этом случае этот синхроимпульс из генератора сигналов затем может использоваться в качестве команды запуска для измерителя уровня мощности, по этой команде измеритель должен записывать показание при каждом получении этого импульса. Необходимо обратить особое внимание на синхронизацию и полярность – качание уровня мощности источника должно быть запрограммировано для выполнения со скоростью, соответствующей тому, каким образом измеритель уровня мощности выполняет измерения в каждой требуемой точке (см. Рис. 8.2.2).



Время (20 событий запуска)

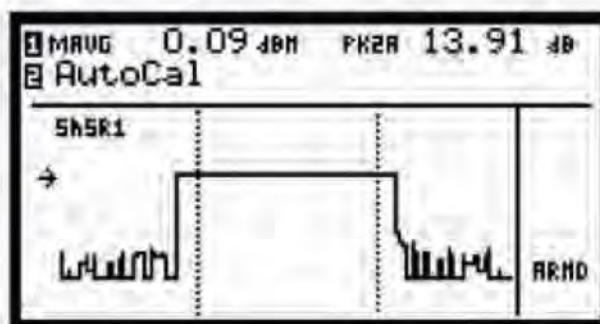


Рис. 8.2.2. Качание уровня мощности и измерение одного импульса в пределах диапазона качания измерителем уровня мощности

Иногда может быть полезно внешнее управление качанием уровня мощности. В этом случае внешний импульсный генератор или заказные аппаратные средства генерируют синхроимпульсы, которые передаются и в источник, и в измеритель уровня мощности. При каждом принятии импульса источник выполняет определенный шаг качания уровня мощности и измеритель уровня мощности выполняет сбор нового показания. Необходимые временные задержки для установления и сбора обычно могут программироваться в измерителе уровня мощности. Также можно использовать импульсный генератор таким образом, чтобы источник выполнял шаг качания уровня мощности по нарастающему фронту синхроимпульса, а сбор нового результата измерения выполнялся по убывающему фронту синхроимпульса.

Измерители пикового уровня мощности для синхронизации также могут использовать сам источник сигналов. Когда измеряемый сигнал является периодическим или импульсным, может использоваться внутренняя система запуска измерителя уровня мощности. Измеритель уровня мощности сконфигурирован для инициирования качания уровня мощности по нарастающему (переднему) фронту каждого импульса. С использованием соответствующих установок задержки запуска для разрешения сбора данных перед запуском может быть принят и обработан весь импульс, и в качестве показания сохраняется его средняя мощность. Схема управления источника сигналов может обеспечить и синхронизацию «запуска качания уровня мощности», и сигнал «сбора нового показания» (см. Рис. 8.2.3).

Например, сотовый телефон стандарта GSM может быть запрограммирован для передачи с качанием уровня мощности для проверки каждого уровня ее внутреннего аттенюатора управления уровнем мощности. Этот аттенюатор может иметь 128 уровней, и значение уровня затухания инкрементируется для каждого кадра GSM, причем сотовый телефон передает один временной интервал в кадре. В стандарте GSM временной интервал составляет 577 микросекунд, кадр из восьми временных интервалов составляет 4615 миллисекунд; таким образом, сотовый телефон передает импульсный сигнал с частотой 217 Гц.

Измеритель уровня мощности запускается по нарастающему фронту для каждого временного интервала, выполняет измерение и записывает результат измерения средней мощности в течение активной части временного интервала (обычно 550 микросекунд в импульсе). Для того чтобы измеритель уровня мощности повторно не запустился до начала следующего временного интервала, необходимо установить для удержания запуска значение около 4,5 мс. Для уровня запуска должно быть установлено достаточно низкое значение для того, чтобы даже минимальная амплитуда импульса не запустила качание уровня мощности.

Измеритель уровня мощности сконфигурирован и активизирован для инициирования качания уровня мощности, а источник сконфигурирован для запуска качания из 128 кадров. Это качание уровня мощности занимает 128 кадров / 217 Гц = 590 миллисекунд, а в конце качания контроллер просто посылает запрос в измеритель уровня мощности для выборки всех 128 показаний из буфера результатов измерения. Если весь процесс оптимизирован, то он занимает менее одной секунды.

Это возможно за счет реализации быстрых «режимов измерений с буферизацией» в современных измерителях уровня мощности. В этих режимах измерительное устройство собирает последовательность результатов измерений в свой буфер памяти с минимальной обработкой. При необходимости эти данные могут быть обработаны после завершения цикла сбора данных. Установка и реализация этого режима сбора с буферизацией выполняется под управлением персональным компьютером. Эти результаты могут собираться в автономном режиме или по событию запуска.

```
M5475EVB_19200 - HyperTerminal
File Edit View Call Transfer Help
[Icons]
SENSE1:MBUF:SIZE 128
SENSE1:MBUF:COUNt 128
SENSE1:MBUF:DATA?
-43.960,-43.471,-42.973,-42.490,-41.983,-41.468,-40.999,-40.468,-39.986,-39.490,
-38.967,-38.469,-37.960,-37.477,-36.983,-36.464,-35.961,-35.485,-34.980,-34.481,
-33.966,-33.463,-32.973,-32.467,-31.990,-31.479,-30.995,-30.479,-29.988,-29.481,
-28.971,-28.477,-27.977,-27.480,-26.976,-26.478,-25.990,-25.494,-24.982,-24.480,
-23.997,-23.477,-22.967,-22.473,-21.975,-21.460,-20.965,-20.488,-19.989,-19.470,
-18.972,-18.496,-18.000,-17.489,-16.994,-16.491,-15.982,-15.485,-14.989,-14.470,
-14.000,-13.466,-12.970,-12.494,-11.975,-11.482,-10.997,-10.483,-9.981,-9.492,-8
.993,-8.485,-7.973,-7.473,-6.998,-6.485,-5.979,-5.469,-4.961,-4.479,-3.965,-3.49
9,-2.976,-2.469,-1.961,-1.490,-0.962,-0.498,0.033,0.523,1.033,1.503,2.018,2.521,
3.017,3.540,4.013,4.519,5.004,5.509,6.029,6.516,7.001,7.510,8.039,8.504,9.038,9.
503,10.021,10.526,11.013,11.513,12.028,12.527,13.008,13.537,14.026,14.530,15.012
,15.536,16.004,16.503,17.026,17.540,18.030,18.509,19.027,19.534
Connected 0:02:46 ANSIW 19200 8-N-1 [SCROLL] [CAPS] NUM Capture Print
```

Рис. 8.2.3. Последовательность команд для установки и считывания содержимого буфера результатов измерений для всего качания уровня мощности из 128 уровней амплитуды импульса

В автономном режиме типовой является скорость передачи данных до 1000 показаний в секунду, но в запускаемом режиме скорость может быть меньше из-за времени задержки для повторной активизации для следующего события запуска. Типовым является размер буфера 1 миллион показаний на канал. Для буферов с алгоритмом обработки FIFO (первым пришел/первым обслужен) этот способ сбора данных может продолжаться по истечении времени, требующегося для заполнения буфера, поскольку содержимое буфера FIFO может считываться и передаваться на главный компьютер во время процесса заполнения. Например, считывание наполовину заполненного буфера в большинстве случаев обеспечивает непрерывный сбор результатов измерений, поскольку указатели чтения и записи обновляются при получении доступа к буферу FIFO. Это выполняется до тех пор, пока время считывания какой-либо части буфера (при котором эта область буфера освобождается) меньше времени заполнения всего буфера. При необходимости, передача двоичных данных может использоваться для уменьшения числа сеансов передачи данных.

В случае режима измерения непрерывных сигналов (CW) до 1 миллиона показаний (типовое значение) может быть сохранено с предварительно запрограммированными скоростями (до 1000 показаний в секунду) для конкретного числа показаний (и, следовательно, известного интервала времени). Затем данные могут быть переданы на главный компьютер после сохранения всех данных в буфере. Это предоставляет пользователю возможность выбора оптимального решения между временным разрешением, длительностью измерения и размером набора данных. Этот режим наилучшим образом подходит для форматов с непрерывной модуляцией, в которых уровень мощности изменяется через определенные интервалы времени. В этом режиме измеритель уровня мощности работает в автономном режиме, и показания сохраняются в буфере через заданные интервалы времени.

В случае линейного изменения уровня мощности состояние тестирования является следующим – уровень мощности линейно увеличивается в диапазоне от -10 дБм до +10 дБм в течение десяти секунд со скоростью измерения 20 показаний в секунду; всего 200 показаний, которые сохраняются каждые 0,5 секунды. Результаты считываются главным компьютером каждый раз, когда в буфере сохраняется 20 показаний. Процесс сбора данных останавливается после сбора 200 показаний.

Скорость считывания персональным компьютером занесенных в буфер результатов намного выше скорости записи данных в буфер – это означает, что этот режим может использоваться для долговременного контроля качания уровня мощности в большом числе циклов качания уровня мощности либо со временем ожидания для сброса уровня мощности, либо с непрерывным качанием «вверх» и «вниз». Другими словами, число собираемых показаний может быть равно максимальному размеру буфера, и измеритель уровня мощности будет непрерывно обновлять ячейки буфера для чтения и записи во время процесса измерения.

Результаты запускаемых измерений импульсных сигналов также могут заноситься в буфер – например, при качании уровня мощности для прерывистых форматов, подобных GSM или TDMA. При каждом запуске импульса в буфер записывается показание, обычно являющееся средним значением между двумя значениями, указанными экранными курсорами. В современных измерителях уровня мощности реализованы мощные функции запуска, которые обеспечивают синхронизацию с большинством типов форматов импульсной и пакетной модуляции, включая внешние события запуска. Буферизованные измерения в импульсном режиме также могут использоваться с непрерывным качанием уровня мощности в случае, когда событие запуска используется для указания того, когда изменение уровня мощности в тестируемом устройстве было установлено надлежащим образом. Непрерывное качание уровня мощности также может использоваться для устройств, которые принимают непрерывный сигнал и выводят импульсный сигнал. В этих случаях абсолютное таймирование синхроимпульсов не является критическим, единственное что требуется – чтобы они были повторяемыми. В системах GSM периоды повторения импульсов обычно больше 3 миллисекунд, что не должно приводить к каким-либо проблемам. В случае сигналов с периодами повторения импульсов менее 3 – 4 миллисекунд возможно пропускание импульсов, это обусловлено временем повторной активизации запуска, которое может быть в диапазоне от 1 до 15 миллисекунд в зависимости от времени качания уровня мощности и установок запуска.

В указанных выше случаях данные могут отображаться в графической форме либо в виде зависимости выходной мощности от входной мощности, либо в виде зависимости мощности от времени, где время определяется скоростью считывания или скоростью запуска. В случае внешнего события запуска на горизонтальной оси графика может указываться ступенчатое изменение любого параметра, используемого для запуска, например температуры или расстояния.

Также системы АТЕ могут использоваться для тестирования усилителей с высоким коэффициентом усиления, в частности импульсные выходные усилители. Типовая система АТЕ для этого варианта применения обычно состоит из двухканального измерителя пикового уровня мощности, генератора сигналов (или устройства качания уровня мощности), также в состав этой системы может входить импульсный генератор для сбора и отображения импульсной входной мощности, выходной мощности и усиление для данного диапазона частот. В такой конфигурации ПК управляет частотой и уровнем мощности генератора сигналов и собирает показания уровня мощности для отображения уровня мощности или усиления в зависимости от частоты. Ось частоты формируется либо по событиям запуска, которые переключают выходную частоту устройства качания уровня мощности, либо посредством измерения частоты выходного напряжения устройства качания уровня мощности на каждом уровне мощности во время качания частоты. Эта конфигурация АТЕ очень похожа на конфигурацию скалярного анализатора. Если событие запуска, при котором выдается частота, может быть ассоциировано с другими событиями (например, со временем, с угловой или линейной позицией, с температурой и т. п.), то измеренный уровень мощности может быть отображен в графической форме или скоррелирован с этим событием.

Пример высокоскоростного сбора результатов измерителя уровня мощности показан на Рис. 8.2.4 – выполняется таймированное качание уровня мощности по 200 точкам в диапазоне от -10 дБм до +10 дБм для усилителя с номинальным усилением 15 дБ и сжатием выше +12 дБм.

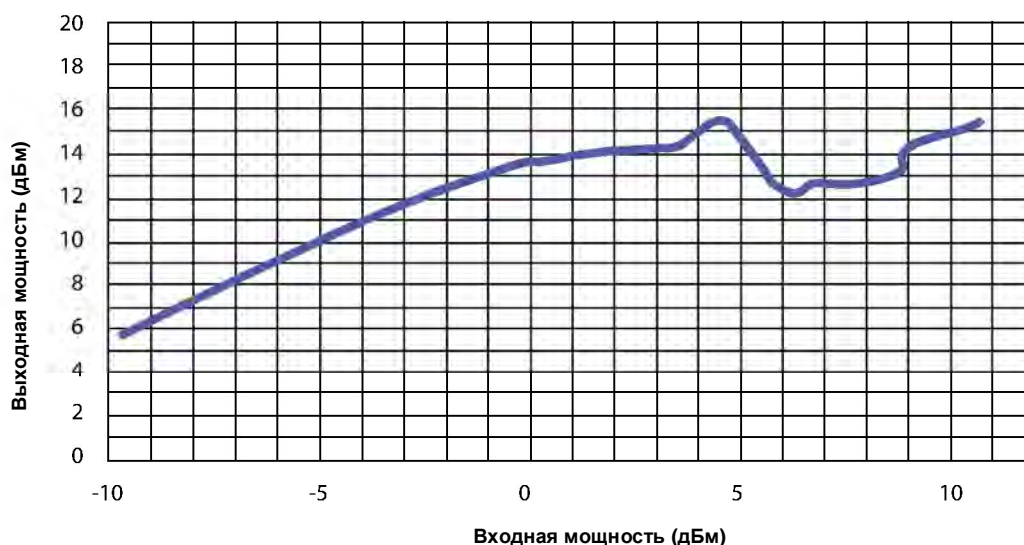


Рис. 8.2.4. Типовое качание уровня мощности для определения усиления усилителя

### 8.3 Тестирование усилителей систем связи

Для усилителей систем цифровой связи, обрабатывающих сигналы LTE и WiMAX, требуется широкая полоса частот и широкий динамический диапазон с поддержанием схем комплексной модуляции. Традиционных показателей качества, подобных начальной точке компрессии 1 дБ и пересечению третьего порядка для проверки линейности, недостаточно для учета отношений пикового к среднему уровню мощности выше 15 дБ. Измерители пикового уровня мощности, подобные измерителям серии Boonton 4500, предоставляют разработчикам систем связи с усилителями альтернативный способ проверки линейности усилителей. В данном разделе объясняется значение статистических данных при измерении отношения пикового к среднему уровню мощности этих комплексных цифровых сигналов.

**Начальная точка компрессии 1 дБ** усилителя определяется как выходная мощность, на которой усиление устройства понижается на 1 дБ по отношению к усилению при малом уровне сигнала. Обычно это указывается как P1dB или CP1. Для измерения начальной точки компрессии одиночный непрерывный сигнал (несущая) из генератора ВЧ-сигналов подается на вход усилителя, и для определения коэффициента усиления усилителя при малом уровне сигнала измеряется отношение выходной к входной мощности. Затем входная амплитуда постепенно увеличивается до тех пор, пока измеряемое отношение выходной к входной мощности не уменьшится на 1 дБ, эта ситуация представляет собой компрессию динамического диапазона усиления на 1 дБ. Это значение обычно используется в качестве точки отсчета начала нелинейности усилителя, и оно приблизительно равно максимально используемой пиковой выходной мощности для усилителя.

На Рис. 8.3.1 показаны два исторических способа для анализа линейности усилителя с входным непрерывным сигналом. Начальная точка компрессии 1 дБ и пересечения третьего порядка представляют собой показатели качества, по которым разработчики могут оценить характеристики усилителя. Ранее для измерений характеристик узкополосного усилителя использовался непрерывный сигнал, но для современных широкополосных устройств это является излишним ограничением.

Многотональные сигналы могут быть заменены непрерывным тестовым сигналом; может использоваться либо модулированный, либо шумоподобный сигнал с частотными составляющими (гармониками) из всего рабочего диапазона усилителя. В случае усилителей систем связи, которые обычно усиливают сигналы с большим отношением пикового к среднему уровню мощности (с большим коэффициентом амплитуды), средняя входная мощность должна быть уменьшена таким образом, чтобы ожидаемые пики редко или никогда не насыщали устройство. В зависимости от целевого применения усилителя разработчики обычно определяют, будет ли максимальная средняя выходная мощность усилителя ниже на 6 – 12 дБ по отношению к начальной точке компрессии 1 дБ. Этот анализ выполняется для насыщения усилителя цифровыми сигналами с высоким коэффициентом амплитуды только в редких случаях для обеспечения приемлемого коэффициента битовых ошибок (BER).

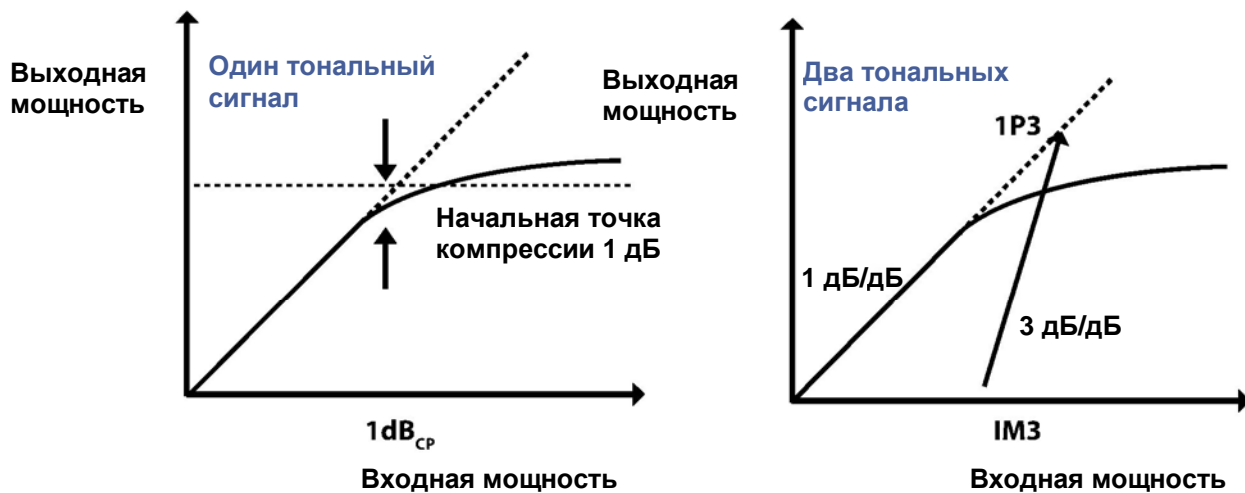


Рис. 8.3.1. 1 Показатели качества «начальная точка компрессии 1 дБ» и «пересечение третьего порядка»

**Точка пересечение третьего порядка** является дополнительным показателем качества, для которого используется гармоника третьего порядка двух смешанных тональных сигналов. Обычно этот показатель указывается как IP3 (сокращение от «third order intercept»). Гармоника третьего порядка двух смешанных тональных сигналов указывается как IM3, или интермодуляционная составляющая третьего порядка. Этот показатель – это началом линии с фронтом 3:1, который пересекается с фронтом 1:1 входного сигнала в зависимости от выходной мощности в IP3 (точке пересечения третьего порядка). Эти значения показаны на Рис. 8.3.1.

Начальная точка компрессии 1 дБ и IP3 представляют собой два показателя качества, используемые для оценки динамического диапазона без паразитных составляющих (SFDR) усилителя. Для вычисления SFDR выбирается точка, координата которой по оси Y на 1/3 меньше координаты пересечения третьего порядка с учетом предельного уровня тепловых шумов 50-омного резистора, равного -174 дБм/Гц. Полезный динамический диапазон сигнала (UDR) равен SFDR минус измеренный уровень собственных шумов (NF) усилителя. Для вычисления UDR выбирается точка, координата которой по оси Y в дБ равна 1/3 расстояния от точки P3 до уровня собственных шумов усилителя, благодаря чему IM3 будет ниже этого уровня собственных шумов. Уровень собственных шумов можно оценить или измерить с использованием коэффициента шума. Эти предположения могут искусственно ограничить динамический диапазон системы (см. Рис. 8.3.2).



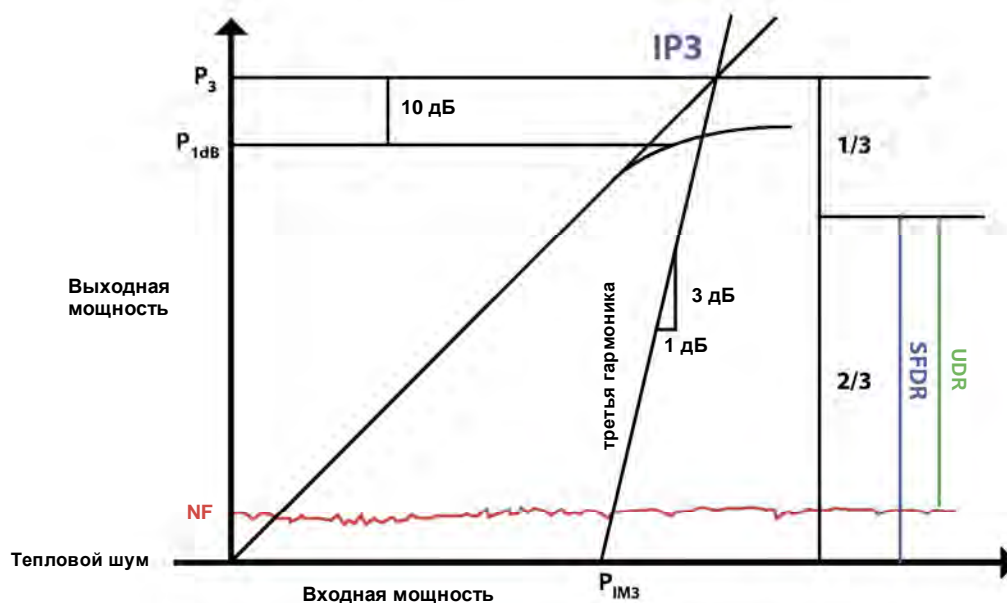


Рис. 8.3.2. Показатели качества  $IP_3$  и  $IM_3$ , и SFDR усилителя

**Система проверки компрессии усилителя.** На Рис. 8.3.3 ниже показан простой тест измерения начальной точки компрессии 1 дБ. Требуется следующее оборудование: источник непрерывных сигналов, двухканальный измеритель уровня мощности, два подходящих датчика мощности, направленный соединитель, тестируемый усилитель, источник питания и все необходимые кабельные соединения. В случае систем высокой мощности может потребоваться дополнительное ослабление сигналов для того, чтобы уровни сигнала не выходили за пределы диапазона, в котором могут выполняться измерения с использованием датчиков мощности.

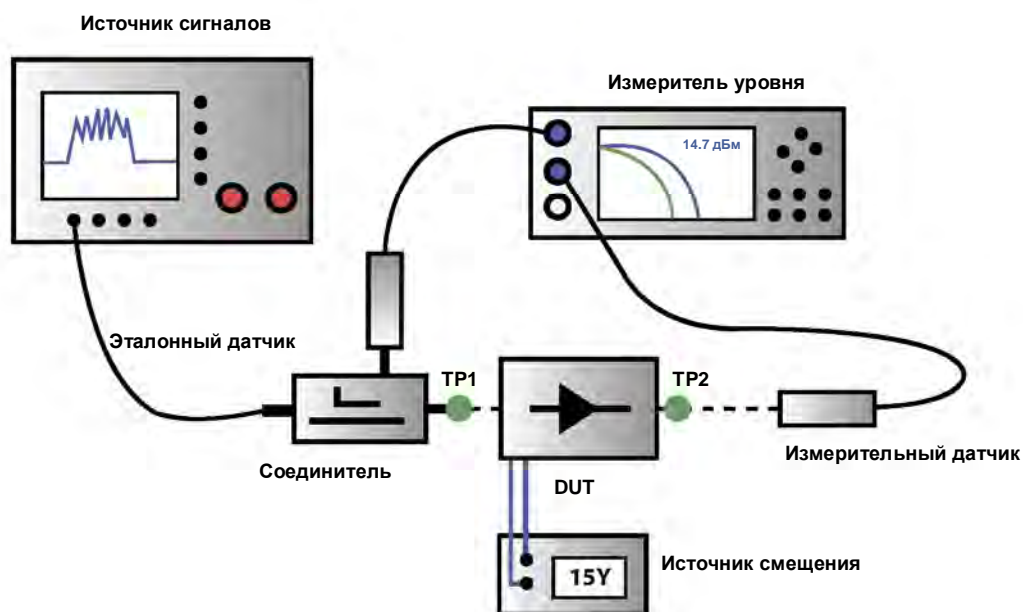


Рис. 8.3.3. Блок-схема системы проверки компрессии усилителя

## Часть 1: Измерение начальной точки компрессии 1 дБ тестируемого оборудования

Измерение начальной точки компрессии 1 дБ усилителя также может быть выполнено с помощью измерителя пикового уровня мощности в режиме измерения средних значений, как показано на Рис. 8.3.4. Одновременно измерьте входной и выходной уровни усилителя при низкой или средней выходной мощности и после этого вычислите усиление при малом уровне сигнала. На левом снимке экрана показана входная мощность на канале 1 и выходная мощность на канале 2. Усиление представляет собой отношение уровня мощности в канале 2 к уровню мощности в канале 1 и показано в нижнем правом углу нижнего окна. При этом рабочем уровне (выходная мощность 2 дБм) измеренное усиление составляет 20,026 дБ.

На правой стороне на Рис. 8.3.4 показано, что входная мощность повышалась до тех пор, пока автоматически вычисляемое значение усиления в нижнем окне не упало на 1 дБ относительно своего значения при малом уровне сигнала на левой стороне. Измеренная выходная мощность в этом точке равна 15 дБм, что является показателем качества P1dB для этого усилителя.



Рис. 8.3.4. Двухканальные измерения, показывающие падение усиления усилителя (отношение уровня на канале 2 к уровню на канале 1) на 1 дБ

**Использование статистических данных для измерения отношения пикового к среднему уровню мощности.** В отличие от простых измерений среднего уровня мощности с использованием непрерывных сигналов, статистический анализ может использоваться для сравнения отношения пикового к среднему уровню мощности сигнала в процентах относительно общего времени сигнала. Значения пиковой мощности сортируются в соответствии со своей амплитудой. Эти значения могут быть разделены на среднюю мощность и могут отображаться на графике с логарифмическим масштабом по обеим осям в dBv в виде коэффициента амплитуды. Для систем связи наиболее распространенным является отображение комплементарной интегральной функции распределения (CCDF). CCDF на Рис. 8.3.5 показывает, сколько времени определенный коэффициент амплитуды передается в виде процент от общего времени сигнала. 0 dBv соответствует средней мощности, а время 0 % соответствует максимальному коэффициенту амплитуды. В этом примере вероятность коэффициента амплитуды 0,0001 % возникает с уровнем 15 dBv относительно среднего значения.

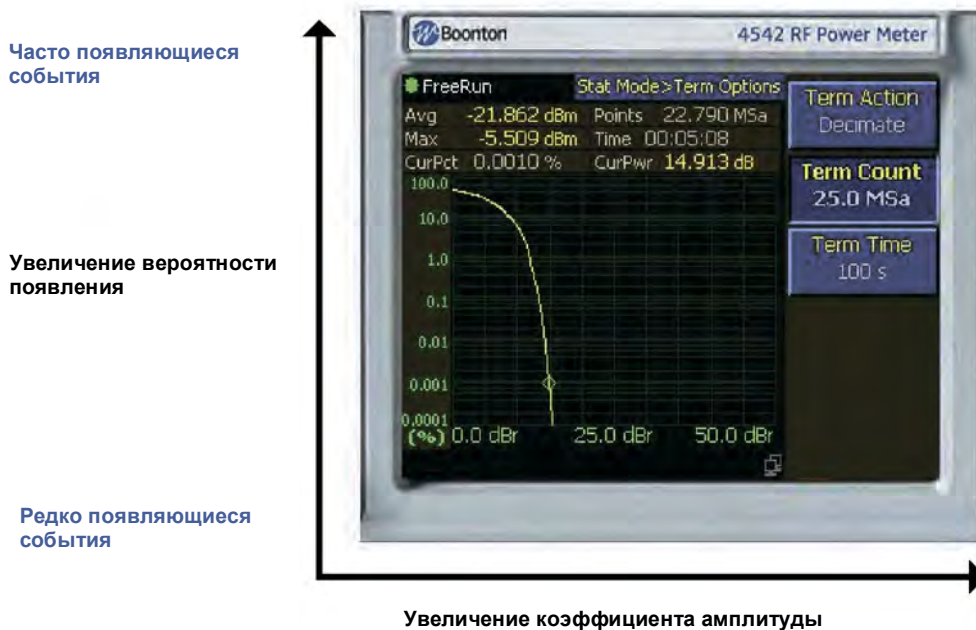


Рис. 8.3.5 Функция CCDF модулированного сигнала системы связи

**Демонстрационный сигнал.** Входной сигнал во временном интервале, показанный на Рис. 8.3.6 ниже, представляет собой шумоподобный сигнал системы беспроводной связи, который трудно измерить с использованием анализатора спектра или осциллографа. Измеритель уровня мощности является эффективным инструментальным средством для измерения коэффициента амплитуды этих сигналов с использованием статистического анализа, однако отображение во временном интервале не предоставляет достаточной информации об очень редко возникающих событиях пиковой мощности. Статистический анализ является намного более полезным способом, который обеспечивает возможность определения вероятности появления редко возникающих событий пиковой мощности (с высоким коэффициентом амплитуды). Поскольку усилители и другие устройства больше всего перегружаются этими пиками, возникающее при этом сжатие и отсечение сигналов вероятнее всего приведет к потере данных. Для обеспечения значащего статистического измерения требуется большое число выборок. Измерители уровня мощности Boonton могут собирать миллионы результатов измерений пиковой мощности в секунду.

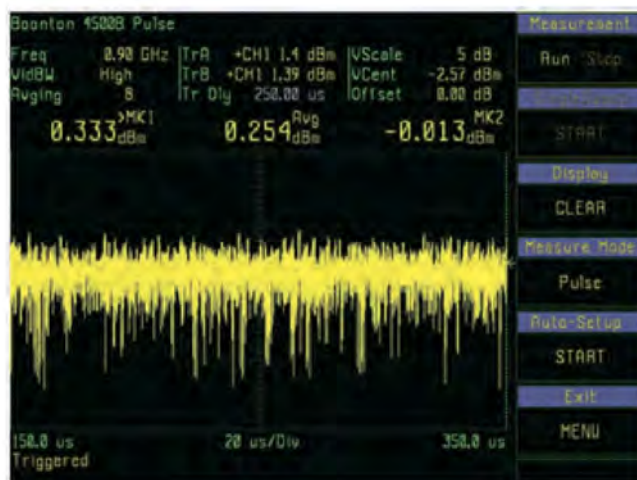


Рис. 8.3.6. Шумоподобный шуму сигнал CDMA системы связи, отображаемый во временном интервале

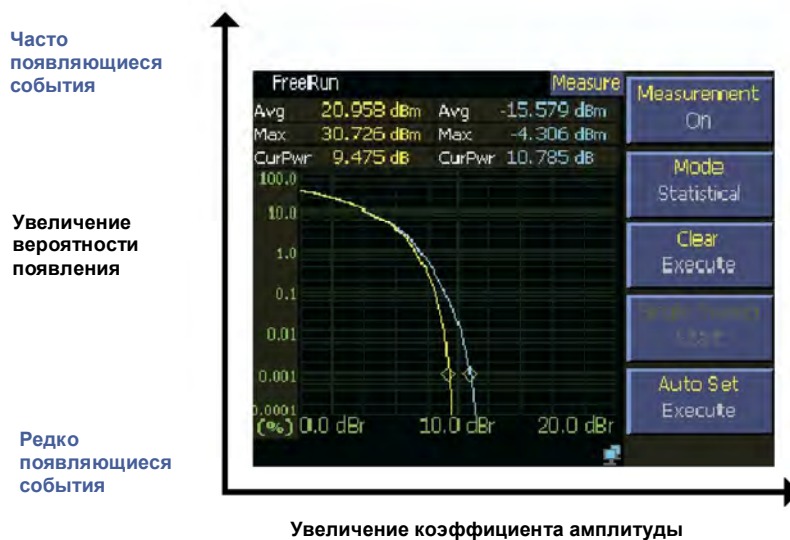


Рис. 8.3.7. Двойная функция CCDF типового сигнала CDMA

**Использование распределения CCDF для сравнения сигналов на входе и выходе усилителя.** На снимке экрана на Рис. 8.3.7 показаны два распределения функции CCDF. Сигнал передатчика синего цвета является опорным сигналом или входным каналом, а желтый сигнал представляет собой выходной сигнал тестируемого оборудования. Это предоставляет возможность прямого сравнения входа с выходом с использованием нормализованной функции CCDF отношений пикового к среднему уровню мощности. Этот вид разрешает сравнению сигнала во всем динамическом диапазоне усилителя с использованием конкретного формата модуляции и представляющих интерес частот.

Кнопка на графике на экране измерителя Voontop 4540 предоставляет пользователю возможность переключения между отображением начальной точки сжатия 1 дБ и двойной функции CCDF. Разница между узкополосным показателем качества и статистическим отображением проиллюстрирована отклонением отношения пикового к среднему уровню мощности задолго до достижения начальной точки сжатия 1 дБ. Коэффициент амплитуды не измеряется с использованием показателей качества «начальная точка сжатия 1 дБ» и «пересечения третьего порядка». Это четко показано на Рис. 8.3.8.

Статистические методы, используемые в данном обсуждении, могут предположительно определить коэффициент битовых ошибок (BER) до монтажа всей схемы приемника. Это может сэкономить время разработки и время проверки на соответствие требованиям стандартов.



Рис. 8.3.8. Разница между стандартным анализом (пиковых и средних значений) и статистическим анализом с использованием функции CCDF

## Глава 9: Точность измерений

Измерители уровня ВЧ-мощности в течение длительного времени считались эталонами точных измерений, но насколько точны выдаваемые ими результаты измерений уровня мощности? Для вычисления точности измерители средней и пиковой ВЧ-мощности требуются больше, чем просто просмотр спецификаций. В то время как многие пользователи спрашивают: «Насколько точен измеритель?», метрологи более правильно спрашивают: «Какой является погрешность этого конкретного измерения?» Погрешность является точным количественным показателем того, где имеются ошибки измерения и, что еще более важно, где они быть.

В данной главе рассматриваются различные источники погрешности измерений, описывается, каким образом эти погрешности объединяются для выдачи одного значения погрешности, и показаны два типовых вычисления погрешности для типовых сценариев измерения уровня мощности.

### 9.1 Ввод понятия погрешности

Точность измерений уровня ВЧ-мощности зависит от множества факторов, определяемых измерительным устройством, тестируемым устройством («DUT»), характеристик измеряемого сигнала, установок измерительного устройства и воздействием окружающей среды. Все важно для определения общей погрешности – калибровка, частота сигнала, уровень и модуляция, рассогласование с источником и нагрузкой, и уровень помех.

Каждый из этих факторов вносит свой вклад в погрешность: некоторые факторы оказывают большое воздействие, а некоторые – совершенно незначительное. Эти «составляющие элементы погрешности» могут быть математически объединены для выдачи одного значения погрешности для определенного типа измерения уровня мощности. Однако многие из этих значений могут существенно различаться для различных типов измерений, даже при использовании идентичного оборудования, то есть нет одного «справочного значения» для точности измерений уровня мощности.

**Значения погрешности.** При объединении значений погрешности важно, чтобы все значения были указаны в одних и тех же единицах измерения. Погрешность обычно указывается в виде доли или процента, где 0,0 % указывает на то, что ошибки в результат измерения не вносятся. В некоторых случаях значения погрешности предоставлены в виде логарифмических значений, часто в форме «± x,xx дБ». Для преобразования погрешности в процентах (%) в допуск в децибелах (дБ), и наоборот, могут использоваться следующие формулы:

$$U \% = (10^{(U_{дБ}/10)} - 1) \times 100 \text{ и } U_{дБ} = 10 \times \text{Log}_{10}(1 + (U \% / 100))$$

**Погрешность в наихудшем случае.** Значения погрешности для каждого составляющего элемента обычно указываются как значения «в наихудшем случае», то есть погрешность измерения из-за какого-либо составляющего элемента не может быть больше, чем указано в спецификациях. В некоторых случаях также указываются «типовые» значения, и эти значения могут использоваться для лучшего понимания характеристик того или иного составляющего элемента погрешности.

Способ «суммарной погрешности в наихудшем случае» является самым консервативным способом вычисления точности, в котором суммируются значения каждого отдельного составляющего элемента погрешности в наихудшем случае. Формула для вычисления погрешности измерений в наихудшем случае:

$$U_{\text{наихудшего случая}} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + \dots + U_N$$

Как правило, многие составляющие элементы погрешности не зависят друг от друга и, таким образом, вероятность одновременного существования их максимальных значений (значений в наихудшем случае) чрезвычайно мала. По этой причине для объединения составляющих элементов погрешности для выдачи одного ожидаемого значения погрешности обычно используется более реалистичный способ, называемый способом «вычисления суммарной величины как квадратного корня из суммы квадратов составляющих» (RSS). Для вычисления суммарной погрешности с использованием способа RSS каждый составляющие элементы погрешности возводится в квадрат, все квадраты составляющих элементов суммируются и затем вычисляется квадратный корень из полученной суммы.

$$U_{\text{RSS}} = \sqrt{(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_N^2)}$$

Распределения погрешностей. Недостатком базового способа RSS является то, что он не учитывает того, что распределение ошибок для каждого составляющего элемента погрешности может иметь различные формы в пределах границ погрешности в наихудшем случае. Определенные типы ошибок характеризуются нормальным или гауссовским распределением с наибольшей плотностью распределения в узком диапазоне и малым числом ошибок с большими значениями. Предельные значения в наихудшем случае обычно выходят за пределы среднеквадратичных отклонений, и зачастую существуют способы подтверждения такого распределения. Некоторые ошибки могут линейно изменяться в пределах установленных границ и характеризуются равномерным распределением с равной вероятностью любой ошибки (большой или маленькой) в диапазоне предельных значений. Также возможны другие формы распределения (например, «U-образное» распределение), в большинстве случаев являющиеся производными нормальных распределений, которые «отключены» или принудительно установлены в пределах того или иного диапазона каким-либо процессом регулировки.

Для учета изменяющихся вероятностей этих распределений ошибок значения погрешностей в наихудшем случае для каждого составляющего элемента погрешности могут быть масштабированы или нормализованы с использованием соответствующих констант с целью регулирования распределения вероятностей составляющих элементов погрешности. После подобной нормализации значений в наихудшем случае процесс RSS может выдать более значащий результат.

Форма распределения представляет собой статистическое описание того, каким образом фактические значения ошибок могут отличаться от идеальных значений. Основными типами распределений является нормальное (гауссовское) распределение, равномерное распределение и U-образное распределение. Для каждого типа распределения используются свои коэффициенты «K»:

Коэффициент распределения	K
Нормальное распределение	$\sqrt{(1/4)} = 0.500$
Равномерное распределение	$\sqrt{(1/3)} = 0.577$
U-образное распределение	$\sqrt{(1/2)} = 0.707$

Формула для вычисления погрешности измерения RSS из значений в наихудшем случае и масштабных коэффициентов формы распределения является следующей:

$$U_{RSS} = \sqrt{[(U_1K_1)^2 + (U_2K_2)^2 + (U_3K_3)^2 + (U_4K_4)^2 + \dots + (U_NK_N)^2]}$$

где значения  $U_1 - U_N$  представляют составляющие элементы погрешности в наихудшем случае, а значения  $K_1 - K_N$  представляют нормализующие коэффициенты для каждого составляющего элемента погрешности на основе его формы распределения.

Результатом этого вычисления является так называемая «суммарная стандартная погрешность» ( $U_C$ ) с уровнем достоверности около 68 %. Для получения более высоких уровней достоверности часто используется так называемая «расширенная погрешность». Использование коэффициента статистического покрытия со значением 2 обеспечивает расширенную погрешность с уровнем достоверности около 95 %:

$$U_{EXPANDED} = 2 \times U_C$$

Это является общепринятым способом в области измерений ВЧ-мощности.

## 9.2 Вклад различных компонентов в погрешность измерений уровня мощности

Как сказано выше, существует много факторов, которые вносят свой вклад в погрешность измерений пикового уровня ВЧ-мощности. В данном разделе определяются основные факторы. Необходимо отметить, что не существует стандартного набора определенных составляющих элементов погрешности, и разные производители контрольно-измерительной аппаратуры могут по-разному группировать или назвать составляющие элементы погрешности. В приведенном ниже списке описываются составляющие элементы погрешности, которые используются для вычисления погрешности измерений уровня мощности, выполняемых с использованием измерителей и датчиков пиковой мощности и мощности непрерывных сигналов компании Boonton.

**Погрешность измерительного устройства.** Этот составляющий элемент погрешности представляет собой погрешность усиления и оцифровки в измерителе уровня мощности, а также погрешность из-за ухода параметров внутренних компонентов под воздействием температуры. В этот составляющий элемент погрешности также могут быть включены погрешности из-за потери в кабелях и соединителях между датчиком и измерителем уровня мощности. В большинстве случаев значение этого составляющего элемента погрешности очень мало, поскольку абсолютные погрешности в схеме устройства устранены выполнением калибровки в условиях эксплуатации (например, установкой на нуль датчиков и фиксированной калибровкой датчиков или ступенчатой калибровкой датчиков («AutoCal»)) и остаются только ошибки относительной линеаризации. Погрешность измерительного устройства является типовой спецификацией.

**Погрешность уровня выходного сигнала калибратора.** Этот составляющий элемент погрешности представляет собой погрешность уровня выходного сигнала калибратора для заданной установки калибратора, для которого поддерживается откалиброванное состояние. Значение этого составляющего элемента погрешности обычно является одиночной спецификацией для калибраторов с фиксированным эталонным значением уровня мощности (0 дБм) и изменяется в зависимости от уровня для калибраторов с переменным значением уровня мощности.

Значение, используемое для погрешности уровня выходного сигнала калибратора, зависит от используемого способа калибровки датчиков. Если была выполнена автоматическая калибровка (AutoCal), то необходимо использовать погрешность калибратора на уровне мощности измерения. Для датчиков, откалиброванных с использованием способа «FixedCal», калибратор используется только в качестве источника одного уровня и необходимо использовать значение погрешности калибратора на уровне FixedCal, 0 дБм для большинства датчиков.

Может показаться, что способ FixedCal точнее способа AutoCal на некоторых уровнях, но это обычно обусловлено смещением из-за ошибки формирования сигнала в способе AutoCal.

В случае датчиков, которые не калибруются в условиях эксплуатации, этим составляющим элементом погрешности можно пренебречь.

**Погрешность из-за рассогласования с калибратором.** Этот составляющий элемент погрешности представляет собой ошибку рассогласования, обусловленную разницей импеданса между выходом калибратора и входом датчика. Эта погрешность вычисляется на основе коэффициентов отражения калибратора ( $\rho_{CAL}$ ) и ( $\rho_{SNSR}$ ) на частоте калибровки по следующей формуле:

$$\text{Погрешность из-за рассогласования с калибратором} = \pm 2 \times \rho_{CAL} \times \rho_{SNSR} \times 100 \%$$

Коэффициент отражения калибратора обычно является спецификацией выхода калибратора или выхода устройства эталонного уровня ВЧ-мощности и может быть указан как КСВН. В этом случае соответствующий коэффициент отражения может быть найден в справочной таблице в разделе 10.2 данного руководства, либо вычислен по следующей формуле:

$$\text{Коэффициент отражения } (\rho_{CAL}) = (VSWR - 1) / (VSWR + 1)$$

Коэффициент отражения датчика ( $\rho_{SNSR}$ ) зависит от частоты и обычно указывается как спецификация датчика. Если этот коэффициент указан как значение КСВН, то для преобразования может использоваться указанная выше формула.

**Погрешность из-за рассогласования с источником.** Этот составляющий элемент погрешности представляет собой ошибку рассогласования, обусловленную разницей импеданса между выходом источника сигналов измерения и входом датчика. Для большинства измерений этот элемент имеет самое большое значение и поэтому необходимо уделить особое внимание для обеспечения наилучшего согласования между источником и датчиком. В этот составляющий элемент погрешности вносит свой вклад и датчик, тестируемое устройство, поскольку соединяются два соединителя. Значение погрешности из-за рассогласования с источником вычисляется на основе коэффициентов отражения источника ( $\rho_{SRCE}$ ) и датчика ( $\rho_{SNSR}$ ) на частоте измерения по следующей формуле:

$$\text{Погрешность из-за рассогласования с источником калибратором} = \pm 2 \times \rho_{SRCE} \times \rho_{SNSR} \times 100 \%$$

Коэффициент отражения источника является характеристикой тестируемого источника ВЧ-сигналов и обычно зависит от частоты и иногда от уровня. Этот коэффициент необходимо измерено или оценить.

Коэффициент отражения датчика ( $\rho_{SNSR}$ ) зависит от частоты и обычно указывается как спецификация датчика.



При необходимости коэффициенты отражения источника и датчика могут быть вычислены на основе соответствующих значений КСВН по указанной выше формуле.

**Ошибка формирования сигнала датчика.** Этот составляющий элемент погрешности иногда называется «ошибкой линеаризации» и представляет собой остаточную нелинейность измерения после того, как выход датчика был линеаризован и масштабирован по уровню мощности процессами калибровки и формирования сигнала.

Калибровка обычно выполняется на шагах с дискретными уровнями и расширяется до всех уровней с использованием способа интерпретации кривых. Ошибка формирования сигнала датчика в этих точках калибровки близка к нулю и увеличивается между ними из-за ошибок алгоритма интерпретации кривых.

Кроме того, этот компонент ошибки формирования сигнала датчика обусловлен тем, что функция преобразования датчика не является идентичной на всех частотах. Опубликованная ошибка формирования сигнала содержит составляющие элементы погрешности для учета этих отклонений.

Если частота измерения близка к частоте калибровки в условиях эксплуатации и измерения выполняются на уровне, близком к одной из точек калибровки линейности в условиях эксплуатации, то для вычислений можно использовать значение ниже опубликованной погрешности.

**Температурный коэффициент датчика.** Этот составляющий элемент погрешности представляет собой ошибку, возникающую при значительном отклонении температуры датчика от температуры, при которой была выполнена калибровка датчика. Эта ошибка обычно указывается в «дБ/градус Цельсия» или в подобных единицах измерения, и может быть одиночным значением или зависеть от уровня. В этом случае значение этого составляющего элемента погрешности должно быть вычислено на основе разницы между текущей температурой, на которой выполняется измерение, и температурой, на которой была выполнена калибровка и затем должно быть масштабировано по погрешности в процентах.

Необходимо отметить, что если измерение выполняется точно при той же температуре, при которой была выполнена калибровка в условиях эксплуатации, то значение этого составляющего элемента погрешности равно нулю.

**Уровень собственных шумов датчика.** Этот составляющий элемент погрешности представляет собой погрешность, вносимую собственными шумами датчика, и оказывает воздействие на все измерения уровня мощности. Этот шум не обязательно генерируется непосредственно в самом датчике, а является шумом всей цепи измерения. Однако для удобства помехи при выполнении измерений обычно указываются как «справочный уровень помех на входе» и представляет собой уровень мощности (обычно в децибелах на милливатт или в нановаттах), который представлен на входе датчика.

Уровень собственных шумов датчика является наглядным качественным параметром мощности и может быть уменьшен путем фильтрации или усреднения согласно описанию, приведенному в разделе 8.1 данного руководства. Этот шум обычно соответствует белому гауссовскому шуму с ограниченной полосой и поэтому его амплитуда (и вклад в погрешность измерений) может быть уменьшена путем сужения ширины полосы частот измерений.

В спецификациях датчика часто указывается эффективный уровень шума с определенным уровнем фильтрации. Для измерений в непрерывном режиме степень фильтрации может быть указана как время интегрирования или коэффициент усреднения показаний. Для измерений в импульсном режиме часто используется коэффициент усреднения видеосигнала. Независимо от используемого способа важно понимать взаимосвязи между режимом сбора данных, частотой выборки и фильтрацией для проверки того, что используется корректное значение мощности шума.

Погрешность из-за собственных шумов датчика зависит от коэффициента шума измеряемого уровня мощности сигнала:

$$\text{Погрешность из-за собственных шумов} = \pm \frac{\text{Собственные шумы датчика (в ваттах)}}{\text{Мощность сигнала (в ваттах)}} \times 100 \%$$

Коэффициент шума конкретного датчика мощности указывается в спецификациях датчика. Может потребоваться регулировка шума датчика для установки большей или меньшей фильтрации или усреднения в зависимости от варианта применения. Как правило, (в пределах диапазона до десяти значений спецификации) уровень шума обратно пропорционален используемой постоянной фильтрации или усреднению. Ошибка из-за собственных шумов обычно не имеет существенного значения при измерении на высоких уровнях (на 25 дБ выше минимальной номинальной мощности датчика).

**Дрейф нуля датчика.** Этот составляющий элемент погрешности представляет собой погрешность показания из-за долговременного изменения показания при нулевом уровне мощности. Увеличение фильтрации или усреднения не уменьшает дрейф нуля. В случае измерений на низких уровнях этим значением можно управлять путем установки нуля измерителя перед выполнением измерений.

Погрешность из-за дрейфа нуля датчика зависит от коэффициента дрейфа измеряемого уровня мощности сигнала:

$$\text{Погрешность из-за дрейфа нуля} = \pm \frac{\text{Дрейф нуля датчика (в ваттах)}}{\text{Мощность сигнала (в ваттах)}} \times 100 \%$$

Подобно ошибке из-за собственных шумов датчика, ошибка из-за дрейфа нуля обычно не имеет существенного значения при измерении на уровнях на 25 дБ выше минимальной номинальной мощности датчика. В спецификации дрейфа нуля иногда указывается интервал времени (например, один час). Если прошло мало времени с момента выполнения установки на нуль или автоматической калибровки датчика, то дрейф нуля не имеет существенного значения.

**Коэффициенты частотной калибровки датчика.** Коэффициенты частотной калибровки датчика («коэффициенты калибровки») используются для коррекции отклонений амплитудно-частотной характеристики датчика. Эти коэффициенты калибровки определяются при выполнении заводской калибровки каждого датчика путем измерения на частотах из полного рабочего диапазона и сохранения отношения фактически подаваемого уровня мощности к измеренному уровню мощности на каждой частоте. Во время процедуры измерения результаты измерений умножаются на коэффициент калибровки для текущей частоты измерения для коррекции показания с целью получения плоской амплитудно-частотной характеристики.

Коэффициенты калибровки также называются «коэффициентами эффективности» и могут указывать значение коррекции либо в процентах, либо в децибелах. Коэффициенты калибровки обычно определяются на предприятии-изготовителе, но, как любая калибровка, содержат разные типы погрешностей. Эти погрешности обусловлены как погрешностями эталонных устройств, так и погрешностями измерений при выполнении процесса калибровки, и имеют разные значения для каждой калибруемой частоты. В спецификациях датчиков и в *руководстве на датчики мощности компании Boonton Electronics* указываются погрешности в наихудшем случае и погрешности RSS (квадратный корень из суммы составляющих) для диапазона частот каждого датчика.

Если частота измерения находится между значениями с указанными коэффициентами калибровки датчика, то консервативный подход заключается в использовании большего значения погрешности. Также возможно использование линейной интерполяции.

Если частота измерения идентична частоте калибровки в условиях эксплуатации, то может использоваться нулевое значение погрешности из-за коэффициента калибровки, поскольку любая абсолютная погрешность в коэффициенте калибровки нейтрализуется при выполнении калибровки в условиях эксплуатации. На частотах, близких к частоте калибровки, погрешность из-за коэффициента калибровки только частично нейтрализуется при выполнении калибровки, поэтому обычно используется погрешность для следующей ближайшей частоты и ее последующей обработкой.

### 9.3 Типовые вычисления погрешности измерений

На следующих примерах показаны вычисления для двух сценариев измерения с использованием помощью измерителя уровня ВЧ-мощности модели 4540 компании Boonton. В первом примере показано измерение непрерывного сигнала с использованием датчика непрерывных сигналов 51075, универсального датчика уровня мощности непрерывного сигнала 18 ГГц с двумя диодами. Во втором примере показано то же самое измерительное устройство с датчиком мощности 57518, типовым датчиком для модулированных сигналов со средней шириной полосы частот (например, для сигналов CDMA). Дополнительная информация об этих изделиях компании Boonton приводится в главе 11 данного руководства.

Приведенные значения показаны только для примера и не относятся к каждому варианту применения. Необходимо отметить, что вычисления погрешности не являются абсолютно точными и требуется понимание конкретных условий выполнения измерений. Это соотносится с вычислением суммарной погрешности с использованием способа RSS, являющимся самостоятельным способом оценки погрешности.

#### Типовой пример #1: Измеритель уровня ВЧ-мощности Boonton 4540 с датчиком мощности непрерывных сигналов Boonton 51075

Условия выполнения измерений	
Частота источника	10,3 ГГц
Уровень мощности источника	- 55 дБм (3,16 нВт)
КСВН источника	1,50 (коэффициент отражения = 0,20) на 10,3 ГГц
Источник автоматической калибровки	Внутренний калибратор 50 МГц
Температура при автоматической калибровке	25 °С
Текущая температура	25 °С

В этом примере предполагается, то автоматическая калибровка датчика была выполнена непосредственно перед измерением. При этом уменьшаются значения некоторые составляющие элементы погрешности, см. обсуждение ниже.

**Шаг 1:** Погрешность измерителей серии 4540 составляет  $\pm 0,20\%$ . Поскольку в это значение входит погрешность из-за дрейфа температуры, собственно погрешность измерителя составляет  $\pm 0,10\%$ , или половину опубликованного значения.

$$U_{\text{измерителя}} = \pm 0.10\%$$

**Шаг 2:** Погрешность уровня для внутреннего калибратора 50 МГц измерителя уровня мощности указывается в спецификациях калибратора. Эта погрешность составляет  $\pm 0,105$  дБ, или  $\pm 2,45\%$  на уровне -55 дБм.

$$U_{\text{уровня калибратора}} = \pm 2.45\%$$

**Шаг 3:** Погрешность из-за рассогласования с калибратором вычисляется по формуле, указанной в предыдущем разделе, с использованием опубликованного значения внутреннего калибратора 50 МГц для  $\rho_{\text{CAL}}$  и вычислением значения  $\rho_{\text{SNSR}}$  на основе значения КСВН в спецификациях датчика 51075.

$$\rho_{\text{CAL}} = 0,024 \text{ (коэффициент отражения внутреннего калибратора на 50 МГц)}$$

$$\rho_{\text{SNSR}} = (1.15 - 1) / (1.15 + 1) = 0.070$$

(вычислите коэффициент отражения датчика 51075, максимальный КСВН = 1,15 на 50 МГц)

$$\begin{aligned} U_{\text{рассогласования с калибратором}} &= \pm 2 \times \rho_{\text{CAL}} \times \rho_{\text{SNSR}} \times 100 \% \\ &= \pm 2 \times 0.024 \times 0.070 \times 100 \% \\ &= \pm 0.34\% \end{aligned}$$

**Шаг 4:** Погрешность из-за рассогласования с источником вычисляется по формуле, указанной в предыдущем разделе, с использованием спецификации тестируемого устройства для  $\rho_{\text{SRCE}}$  и вычислением значения  $\rho_{\text{SNSR}}$  на основе значения КСВН в спецификациях датчика 51075.

$$\rho_{\text{SRCE}} = 0,2 \text{ (коэффициент отражения источника тестируемого устройства на 10,3 ГГц)}$$

$$\rho_{\text{SNSR}} = (1.40 - 1) / (1.40 + 1) = 0.167$$

(вычислите коэффициент отражения датчика 51075, максимальный КСВН = 1,40 на 10,3 ГГц)

$$\begin{aligned} U_{\text{рассогласования с источником}} &= \pm 2 \times \rho_{\text{SRCE}} \times \rho_{\text{SNSR}} \times 100 \% \\ &= \pm 2 \times 0.20 \times 0.167 \times 100 \% \\ &= \pm 6.68\% \end{aligned}$$

**Шаг 5:** В соответствии с обсуждением в предыдущем разделе погрешность, обусловленная ошибкой формирования сигнала датчика для датчика непрерывных сигналов 51075, для которого была выполнена автоматическая калибровка, равна 1,0 %.

$$U_{\text{формирования сигнала}} = \pm 1,0 \%$$

**Шаг 6:** Ошибка из-за дрейфа температуры датчика зависит от разницы между текущей температурой и температурой, при которой была выполнена калибровка датчика, и от температурного коэффициента датчика. В этом примере автоматическая калибровка датчика была только что выполнена, и температура совсем не изменилась – таким образом, можно предположить нулевое значение погрешности из-за дрейфа температуры датчика.

$$U_{\text{дрейфа температуры датчика}} = \pm 0,0 \%$$

**Шаг 7:** Это измерение выполняется на относительно низких уровнях, поэтому при вычислениях погрешности необходимо учитывать уровень собственных шумов датчика. Предположим, что выполняется фильтрация по умолчанию. Уровень сигнала составляет -55 дБм, или 3,16 нВт. В спецификациях датчика указано, что значение среднеквадратичного (RMS) шума для датчика 51075 составляет 30 пВт. Погрешность из-за собственных шумов представляет собой отношение этих двух значений в процентах.

$$\begin{aligned} U_{\text{собственных шумов}} &= \pm \text{Собственные шумы датчика (в ваттах)} / \text{Мощность сигнала (в ваттах)} \\ &= \pm (30,0e^{-12} / 3,16e^{-9}) \times 100 \% \\ &= \pm 0,95 \% \end{aligned}$$

**Шаг 8:** Вычисление погрешности из-за дрейфа нуля датчика очень похоже на вычисление погрешности из-за собственных шумов. В спецификациях датчика 51075 указано, что дрейф нуля датчика составляет 100 пВт. Это значение можно сократить в два раза (до 50 пВт), поскольку только что была выполнена автоматическая калибровка и, скорее всего, дрейф нуля датчик минимален.

$$\begin{aligned} U_{\text{дрейфа нуля}} &= \pm \text{Дрейф нуля датчика (в ваттах)} / \text{Мощность сигнала (в ваттах)} \\ &= \pm (50,0e^{-12} / 3,16e^{-9}) \times 100 \% \\ &= \pm 1,58 \% \end{aligned}$$

**Шаг 9:** Погрешность из-за коэффициента калибровки датчика вычисляется на основе значений погрешностей в руководстве на датчики мощности компании Boonton Electronics. Нет значения для частоты 10,3 ГГц, поэтому анализируем два ближайших значения. На 10 ГГц погрешность из-за коэффициента калибровки составляет 4,0 %, а на 11 ГГц – 4,3 %. Эти два значения довольно близки друг другу, поэтому выполним линейную интерполяцию для анализа погрешности на 10,3 ГГц:

$$\begin{aligned} U_{\text{коэффициента калибровки}} &= [ ( F - F1 ) \times (( CF2 - CF1 ) / ( F2 - F1 )) ] + CF1 \\ &= [ ( 10.3 - 10.0 ) \times (( 4.3 - 4.0 ) / ( 11.0 - 10.0 )) ] + 4.0 \\ &= 4.09\% \end{aligned}$$

**Шаг 10:** Теперь, после определения каждого отдельного составляющего элемента погрешности, отдельные составляющие можно объединить для вычисления погрешности в наихудшем случае и погрешности RSS (квадратный корень из суммы составляющих):  $U (\pm \%)$ ,  $(UxK)^2 (\%^2)$

Составляющий элемент погрешности	$U_{\text{наихудшего случая}} (\pm \%)$	«К» Коэффициент распределения	$(UxK)^2 (\%^2)$	RSS
1. измерительное устройство	0,10	0,500	0,0025	
2. уровень калибратора	2,45	0,577	1,9984	
3. рассогласование с калибратором	0,34	0,707	0,0578	
4. рассогласование с источником	6,68	0,707	22,305	
5. ошибка формирования сигнала датчика	1,00	0,577	0,3333	
6. дрейф температуры датчика	0,00	0,577	0,0000	
7. уровень собственных шумов датчика	0,95	0,500	0,2256	
8. дрейф нуля датчика	1,58	0,577	0,8311	
9. коэффициент калибровки датчика	4,09	0,500	4,1820	
<b>Общая погрешность в наихудшем случае</b>	<b><math>\pm 17,19 \%</math></b>			
Общая сумма квадратов			29,936 $\%^2$	
<b>Суммарная стандартная среднеквадратичная погрешность <math>U_c</math></b>				<b><math>\pm 5,47 \%</math></b>
Расширенная среднеквадратичная погрешность $U$ (коэффициент покрытия $k = 2$ )				<b><math>\pm 10,94 \%</math> (<math>\pm 0,45</math> дБ)</b>

В этом примере самый большой вклад в суммарную погрешность вносят два компонента – рассогласование с источником и коэффициент калибровки датчика. Также необходимо отметить, что расширенная погрешность составляет примерно половину погрешности в наихудшем случае. Это не является неожиданностью, поскольку основная часть погрешности состоит всего из двух компонентов. Если частота измерения была бы ниже, то эти два составляющих элемента погрешности были бы меньше и расширенная погрешность, вероятнее всего, составляла бы меньше половины погрешности в наихудшем случае. И наоборот, если бы доминировал один составляющий элемент погрешности (например, если измерение выполнялось бы на очень низких уровнях и погрешность из-за собственных шумов составляла бы 30 %), то значение расширенной погрешности, скорее всего, приблизилось бы к значению погрешности в наихудшем случае. Расширенная погрешность составляет 0,45 дБ.

**Типовой пример #2: Измеритель уровня ВЧ-мощности Boonton 4540 с датчиком пиковой мощности Boonton 57518**

Условия выполнения измерений	
Частота источника	900 МГц
Уровень мощности источника	13 дБм (20 мВт)
КСВН источника	1,12 (коэффициент отражения = 0,057) на 900 МГц
Источник автоматической калибровки	Калибратор 1 ГГц модели 2530 компании Boonton
Температура при автоматической калибровке	38 °С
Текущая температура	49 °С

В этом примере предполагается, то автоматическая калибровка датчика была выполнена днем раньше, то есть необходимо учитывать дрейф нуля и дрейф температуры.

**Шаг 1:** Погрешность измерителей серии 4540 составляет  $\pm 0,20\%$ . Поскольку автоматическая калибровка была выполнена некоторое время назад, необходимо использовать опубликованные спецификации.

$$U_{\text{ИЗМЕРИТЕЛЯ}} = \pm 0,20\%$$

**Шаг 2:** Погрешность уровня для внешнего калибратора 1 ГГц измерителя модели 2530 может быть вычислена на основе спецификаций калибратора. Погрешность на уровне 0 дБм составляет 0,065 дБ, или 1,51%. К этому значению необходимо добавить 0,03 дБ или 0,69% на каждый шаг 5 дБ от уровня 0 дБм. 13 дБм – это 2,6 шага по 5 дБ (13/5) от уровня 0 дБм. Любая часть всегда округляется до следующего целого числа – таким образом, всего 3 шага.

$$U_{\text{уровня калибратора}} = \pm (1,51\% + (3 \times 0,69\%)) \\ = \pm 3,11\%$$

**Шаг 3:** Погрешность из-за рассогласования с калибратором вычисляется по формуле, указанной в предыдущем разделе, с использованием опубликованного значения калибратора 1 ГГц для  $\rho_{\text{CAL}}$  и вычислением значения  $\rho_{\text{SNSR}}$  на основе значения КСВН в спецификациях датчика 57518.

$$\rho_{\text{CAL}} = 0,091 \text{ (коэффициент отражения внутреннего калибратора 1 ГГц)}$$

$$\rho_{\text{SNSR}} = (1,15 - 1) / (1,15 + 1) = 0,070 \\ \text{(вычислите коэффициент отражения датчика 57518, максимальный КСВН = 1,15 на 1 ГГц)}$$

$$U_{\text{рассогласования с калибратором}} = \pm 2 \times \rho_{\text{CAL}} \times \rho_{\text{SNSR}} \times 100\% \\ = \pm 2 \times 0,091 \times 0,070 \times 100\% \\ = \pm 1,27\%$$

**Шаг 4:** Погрешность из-за рассогласования с источником вычисляется по формуле, указанной в предыдущем разделе, с использованием спецификации тестируемого устройства для  $\rho_{SRCE}$  и вычислением значения  $\rho_{SNSR}$  на основе значения КСВН в спецификациях датчика 57518.

$$\rho_{SRCE} = 0,057 \text{ (коэффициент отражения источника тестируемого устройства на 900 МГц)}$$

$$\rho_{SNSR} = (1,15 - 1) / (1,15 + 1) = 0,070$$

(вычислите коэффициент отражения датчика 57518, максимальный КСВН = 1,15 на 0,9 ГГц)

$$\begin{aligned} U_{\text{рассогласования с источником}} &= \pm 2 \times \rho_{SRCE} \times \rho_{SNSR} \times 100 \% \\ &= \pm 2 \times 0,057 \times 0,070 \times 100 \% \\ &= \pm 0,80 \% \end{aligned}$$

**Шаг 5:** В соответствии со спецификациями датчика погрешность, обусловленная ошибкой формирования сигнала датчика для датчика пиковой мощности 57518, составляет 4 % на всех уровнях. Из-за того что измерение выполняется на частоте 900 МГц, близкой к частоте автоматической калибровки 1 ГГц, можно предположить, что зависящая от частоты доля ошибки формирования сигнала становится очень маленькой, и установить для этой погрешности значение 2 %.

$$U_{\text{формирования сигнала}} = \pm 2,0 \%$$

**Шаг 6:** Ошибка из-за дрейфа температуры датчика зависит от разницы между текущей температурой и температурой, при которой была выполнена калибровка датчика, и от температурного коэффициента датчика. В данном случае используется датчик с компенсацией температурных воздействий, и разница между текущей температурой и температурой, при которой была выполнена калибровка датчика, составляет 11 градусов Цельсия (49 °C – 38 °C). Для вычисления погрешности из-за дрейфа температуры датчика необходимо использовать формулу из предыдущего раздела.

$$\begin{aligned} U_{\text{дрейфа температуры датчика}} &= \pm 0,93 \% + 0,069 \% / ^\circ\text{C} \\ &= \pm (0,93 + (0,069 / 11,0)) \% \\ &= \pm 1,69 \% \end{aligned}$$

**Шаг 7:** Это измерение выполняется на высоких уровнях, и вклад в суммарную погрешность уровня собственных шумов датчика является незначительным, но в любом случае его необходимо вычислить. Используйте измеритель в модулированном режиме с фильтрацией по умолчанию. Уровень сигнала составляет 13 дБм, или 20 мВт. В спецификациях датчика указано, что значение «собственных шумов и дрейфа нуля» для датчика 57518 составляет 50 нВт. Погрешность из-за собственных шумов представляет собой отношение этих двух значений в процентах.

$$\begin{aligned} U_{\text{собственных шумов и дрейфа нуля}} &= \pm \text{Собственные шумы датчика (в ваттах)} / \text{Мощность сигнала (в ваттах)} \\ &= \pm (50,0\text{e} - 9 / 20,0\text{e} - 3) \times 100 \% \\ &= \pm 0,0003 \% \end{aligned}$$



**Шаг 8:** Отдельное вычисление дрейфа нуля датчика для датчиков пиковой мощности выполнять не требуется, поскольку погрешность «собственных шумов и дрейфа нуля» объединены в одну спецификацию. Поэтому этот шаг пропускается.

**Шаг 9:** Погрешность из-за коэффициента калибровки датчика необходимо на основе интерполяции значений погрешностей в *руководстве на датчики мощности компании Boonton Electronics*. На 1 ГГц погрешность из-за коэффициента калибровки датчика составляет 2,23 %, а на 0,5 ГГц – 1,99 %. Однако необходимо отметить, что автоматическая калибровка выполняется на частоте 1 ГГц, близкой к частоте измерения. Это означает, что в соответствии с обсуждением в предыдущем разделе погрешность из-за коэффициента калибровки становится равной нулю на частоте 1 ГГц. Для оценки значения погрешности необходимо использовать линейную интерполяцию между частотами 0,5 ГГц и 1 ГГц. 900 МГц – это частота ниже частоты 1 ГГц только на 20 % (одна пятая) в диапазоне от 1 ГГц до 500 МГц, поэтому значение погрешности на частоте 0,5 ГГц может быть приравнено к одной пятой.

$$\begin{aligned}
 U_{\text{КОЭФФИЦИЕНТА КАЛИБРОВКИ}} &= 1,99 \% \times (900 - 1000) / (500 - 1000) \\
 &= 1,99 \% \times 0,2 \\
 &= \pm 0,40 \%
 \end{aligned}$$

**Шаг 10:** Теперь, после определения каждого отдельного составляющего элемента погрешности, отдельные составляющие можно объединить для вычисления погрешности в наихудшем случае и погрешности RSS (квадратный корень из суммы составляющих):

Составляющий элемент погрешности	$U_{\text{наихудшего случая}} (\pm \%)$	«К» Коэффициент распределения	$(U_{\text{К}})^2$ (% <sup>2</sup> )	RSS
1. измерительное устройство	0,20	0,500	0,0025	
2. уровень калибратора	3,11	0,577	3,2201	
3. рассогласование с калибратором	1,27	0,707	0,8062	
4. рассогласование с источником	0,80	0,707	0,3199	
5. ошибка формирования сигнала датчика	2,00	0,577	1,3333	
6. дрейф температуры датчика	1,69	0,577	0,9509	
7. уровень собственных шумов и дрейф нуля датчика	0,00	0,500	0,0000	
8. коэффициент калибровки датчика	0,40	0,500	0,0400	
<b>Общая погрешность в наихудшем случае</b>	<b>± 18,43 %</b>			
Общая сумма квадратов			6,6729 % <sup>2</sup>	
<b>Суммарная стандартная среднеквадратичная погрешность <math>U_c</math></b>				<b>± 2,58 %</b>
<b>Расширенная среднеквадратичная погрешность <math>U</math> (коэффициент покрытия <math>k = 2</math>)</b>				<b>± 5,17 % (± 0,22 дБ)</b>

В этом примере большой вклад в суммарную погрешность вносят различные компоненты. Поскольку измерение выполняется на частоте, близкой к частоте калибровки, и обеспечено достаточно хорошее согласование с источником и калибратором, самый большой вклад в суммарную погрешность вносят ошибки формирования сигнала датчика и ошибки уровня. Расширенная погрешность 5,17 % преобразуется в погрешность около 0,22 дБ в результатах измерения.

Необходимо отметить, что вычисление погрешности измерения является очень сложным процессом, и представленные здесь способы в некоторой степени упрощены для облегчения вычислений. Для получения полной информации ознакомьтесь со следующими публикациями:

- 
1. «*ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*»  
©1995, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland ISBN 92-67-10188-9
  2. «*U.S. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*»  
©1996, National Conference of Standards Laboratories, Boulder, CO 80301 ANSI/NCSL Z540-2-1996



### Раздел 3

## ***Справочная информация по измерениям уровня мощности***

В данном разделе приводятся справочные материалы для специалистов по высокочастотному и сверхвысокочастотному оборудованию. В первой части приводится информация по преобразованию различных единиц измерения, справочные таблицы по обратным потерям, коэффициентам отражения, преобразованию КСВН и уровням мощности в прямом и обратном направлениях. Во второй части приводится список измерителей пиковой и средней мощности, включая используемые датчики.

## Глава 10: Справочные таблицы

### 10.1 Преобразование единиц измерения амплитуды

Ниже приводится таблицы преобразования обычно используемых единиц измерения амплитуды ВЧ-сигналов (дБм, ватты, вольты и т. д.), включая формулы преобразования.

дБм	дБВт	Ватты	Вольты	Амперы	дБВ	дБмВ
			на 50 Ом	на 50 Ом	на 50 Ом	на 50 Ом
90,00	60,00	1,00 мВт	7,07 кВ	141 А	76,99	136,99
80,00	50,00	100 кВт	2,24 кВ	44,7 А	66,99	126,99
70,00	40,00	10,00 кВт	707 В	14,1 А	56,99	116,99
60,00	30,00	1,00 кВт	224 В	4,47 А	46,99	106,99
50,00	20,00	100 Вт	70,7 В	1,41 А	36,99	96,99
40,00	10,00	10,0 Вт	22,4 В	447 мА	26,99	86,99
30,00	0,00	1,00 Вт	7,07 В	141 мА	16,99	76,99
29,00	-1,00	794 мВт	6,30 В	126 мА	15,99	75,99
28,00	-2,00	631 мВт	5,62 В	112 мА	14,99	74,99
27,00	-3,00	501 мВт	5,01 В	100 мА	13,99	73,99
26,00	-4,00	398 мВт	4,46 В	89,2 мА	12,99	72,99
25,00	-5,00	316 мВт	3,98 В	79,5 мА	11,99	71,99
24,00	-6,00	251 мВт	3,54 В	70,9 мА	10,99	70,99
23,00	-7,00	200 мВт	3,16 В	63,2 мА	9,99	69,99
22,00	-8,00	158 мВт	2,82 В	56,3 мА	8,99	68,99
21,00	-9,00	126 мВт	2,51 В	50,2 мА	7,99	67,99
20,00	-10,00	100 мВт	2,24 В	44,7 мА	6,99	66,99
19,00	-11,00	79,4 мВт	1,99 В	39,9 мА	5,99	65,99
18,00	-12,00	63,1 мВт	1,78 В	35,5 мА	4,99	64,99
17,00	-13,00	50,1 мВт	1,58 В	31,7 мА	3,99	63,99
16,00	-14,00	39,8 мВт	1,41 В	28,2 мА	2,99	62,99
15,00	-15,00	31,6 мВт	1,26 В	25,1 мА	1,99	61,99
14,00	-16,00	25,1 мВт	1,12 В	22,4 мА	0,99	60,99
13,00	-17,00	20,0 мВт	999 мВ	20,0 мА	-0,01	59,99
12,00	-18,00	15,8 мВт	890 мВ	17,8 мА	-1,01	58,99
11,00	-19,00	12,6 мВт	793 мВ	15,9 мА	-2,01	57,99
10,00	-20,00	10,0 мВт	707 мВ	14,1 мА	-3,01	56,99
9,00	-21,00	7,94 мВт	630 мВ	12,6 мА	-4,01	55,99
8,00	-22,00	6,31 мВт	562 мВ	11,2 мА	-5,01	54,99
7,00	-23,00	5,01 мВт	501 мВ	10,0 мА	-6,01	53,99
6,00	-24,00	3,98 мВт	446 мВ	8,92 мА	-7,01	52,99

дБм	дБВт	Ватты	Вольты на 50 Ом	Амперы на 50 Ом	дБВ на 50 Ом	дБмВ на 50 Ом
5,00	-25,00	3,16 мВт	398 мВ	7,95 мА	-8,01	51,99
4,00	-26,00	2,51 мВт	354 мВ	7,09 мА	-9,01	50,99
3,00	-27,00	2,00 мВт	316 мВ	6,32 мА	-10,01	49,99
2,00	-28,00	1,58 мВт	282 мВ	5,63 мА	-11,01	48,99
1,00	-29,00	1,26 мВт	251 мВ	5,02 мА	-12,01	47,99
0,00	-30,00	1,00 мВт	224 мВ	4,47 мА	-13,01	46,99
-10,00	-40,00	100 мкВт	70,7 мВ	1,41 мА	-23,01	36,99
-20,00	-50,00	10,0 мкВт	22,4 мВ	447 мкА	-33,01	26,99
-30,00	-60,00	1,00 мкВт	7,07 мВ	141 мкА	-43,01	16,99
-40,00	-70,00	100 нВт	2,24 мВ	44,7 мкА	-53,01	6,99
-50,00	-80,00	10,0 нВт	707 мкВ	14,1 мкА	-63,01	-3,01
-60,00	-90,00	1,00 нВт	224 мкВ	4,47 мкА	-73,01	-13,01
-70,00	-100,00	100 пВт	70,7 мкВ	1,41 мкА	-83,01	-23,01
-80,00	-110,00	10,0 пВт	22,4 мкВ	447 нА	-93,01	-33,01
-90,00	-120,00	1,00 пВт	7,07 мкВ	141 нА	-103,01	-43,01

## 10.2 Обратные потери / Коэффициенты отражения / Преобразование КСВН / Уровни мощности в прямом и обратном направлениях

Обратные потери (дБ)	КСВН	Коэффициент отражения	Уровень мощности в прямом направлении (%)	Уровень отраженной мощности (%)
0,0	Бесконечно большое значение	1,000	0,00	100,00
1,0	17,391	0,891	20,57	79,43
2,0	8,724	0,794	36,90	63,10
3,0	5,848	0,708	49,88	50,12
4,0	4,419	0,631	60,19	39,81
5,0	3,570	0,562	68,38	31,62
6,0	3,010	0,501	74,88	25,12
7,0	2,615	0,447	80,05	19,95
8,0	2,323	0,398	84,15	15,85
9,0	2,100	0,355	87,41	12,59
10,0	1,925	0,316	90,00	10,00
11,0	1,785	0,282	92,06	7,94
12,0	1,671	0,251	93,69	6,31
13,0	1,577	0,224	94,99	5,01
14,0	1,499	0,200	96,02	3,98
15,0	1,433	0,178	96,84	3,16
16,0	1,377	0,158	97,49	2,51

Обратные потери (дБ)	КСВН	Коэффициент отражения	Уровень мощности в прямом направлении (%)	Уровень отраженной мощности (%)
17,0	1,329	0,141	98,00	2,00
18,0	1,288	0,126	98,42	1,58
19,0	1,253	0,112	98,74	1,26
20,0	1,222	0,100	99,00	1,00
21,0	1,196	0,089	99,21	0,79
22,0	1,173	0,079	99,37	0,63
23,0	1,152	0,071	99,50	0,50
24,0	1,135	0,063	99,60	0,40
25,0	1,119	0,056	99,68	0,32
26,0	1,106	0,050	99,75	0,25
27,0	1,094	0,045	99,80	0,20
28,0	1,083	0,040	99,84	0,16
29,0	1,074	0,035	99,87	0,13
30,00	1,065	0,032	99,90	0,10
31,00	1,058	0,028	99,92	0,08
32,00	1,052	0,025	99,94	0,06
33,00	1,046	0,022	99,95	0,05
34,00	1,041	0,020	99,96	0,04
35,00	1,036	0,018	99,97	0,03
36,00	1,032	0,016	99,97	0,03
37,00	1,029	0,014	99,98	0,02
38,00	1,025	0,013	99,98	0,02
39,00	1,023	0,011	99,99	0,01
40,00	1,020	0,010	99,99	0,01

### 10.3 Системы беспроводной связи и радиолокационные системы/СВЧ-диапазоны

Частота	Диапазон	Волновод
3–30 МГц	HF	Не используется
30–300 МГц	VHF	Не используется
300–1000 МГц	UHF	WR-2300, WR-2100, WR-1500, WR-1150
1–2 ГГц	L	WR-1000, WR-770, WR-650, WR-430
2–4 ГГц	S	WR-430, WR-340, WR-284, WR-229
4–8 ГГц	C	WR-229, WR-187, WR-159, WR-137
8–12 ГГц	X	WR-112, WR-90
12–18 ГГц	Ku	WR-62
18–26.5 ГГц	K	WR-51, WR-42
26.5–40 ГГц	Ka	WR-28
30–50 ГГц	Q	WR-22
40–60 ГГц	U	WR-19
50–75 ГГц	V	WR-15
60–90 ГГц	E	WR-12
75–110 ГГц	W	WR-10
90–140 ГГц	F	WR-8
110–170 ГГц	D	WR-6

Число «WR» указывает внутреннюю ширину волновода в сотых частях дюйма (мил/10). Внутренняя высота волновода является обычно составляет половину этого размера.

Пример: Внутренний размер волновода WR-15 – 0,150 (ширина) x 0,075 (высота)

### 10.4 Воздействие длины кабеля датчика

Когда широкополосные датчики пиковой мощности используются с длинными кабелями датчика, на ширину полосы частот и время нарастания сигнала оказывается воздействие из-за потерь в кабелях на высоких частотах. Обычно при увеличении длины кабелей время нарастания сигнала в кабелях существенно ухудшается на высоких частотах. Входные цепи измерителя уровня мощности могут уменьшить этот эффект использования длинных кабелей.

Эта компенсация поддерживается для некоторых моделей измерителей пиковой мощности компании Boonton, и она настоятельно рекомендуется при использовании кабелей увеличенной длины. Использование кабелей стандартной длины с каналом, для которого выполняется компенсация, приведет к значительным выбросам на границах импульсам и увеличению отношения пикового к среднему уровню мощности.



Для вычисления новой спецификации времени нарастания сигнала для датчика введите комбинацию платы и кабеля; используется квадратный корень из суммы квадратов кабеля и датчика, как показано в формуле ниже.

$$\text{Risetime} = \sqrt{(\text{Cable Risetime}^2 + \text{Sensor Risetime}^2)}$$

В следующей таблице показано воздействие на время нарастания сигнала различных стандартных длин кабелей. Для вычисления составного времени нарастания сигнала с определенным датчиком используйте показанную выше формулу. Необходимо отметить, что в эту таблицу включены столбцы, указывающие воздействие использования кабелей увеличенной длины на входные каналы без компенсации (стандартная конфигурация) измерителей уровня мощности и на входы с компенсацией воздействия длины кабелей (специальный заказ) измерителей уровня мощности.

Например, если датчик 59318 используется с 10-футовым кабелем на модели 4500В с входным каналом с компенсацией длины 10 футов, то результирующее время нарастания сигнала будет вычисляться следующим образом:

время нарастания сигнала при использовании датчика 59318: 10 нс

Длина кабеля	Время нарастания сигнала в кабеле (без компенсации воздействия длины кабеля)	Время нарастания сигнала в кабеле (вход с компенсацией воздействия длины кабеля)
5 футов (1,5 м)	(стандартный кабель: без воздействия)	(стандартный кабель: без воздействия)
10 футов (3,0 м)	55 нс	15 нс
20 футов (6,1 м)	140 нс	40 нс
25 футов (7,6 м)	180 нс	50 нс
50 футов (15,2 м)	400 нс	75 нс

Время нарастания сигнала в кабеле длиной 10 футов: 15 нс

$$\begin{aligned} \text{Общее время} &= \sqrt{(10^2 + 15^2)} \\ \text{нарастания сигнала} &= \sqrt{325} \\ &= 18 \text{ нс} \end{aligned}$$

## Глава 11: Решения компании Boonton

Компания Boonton Electronics является лидером в области измерений уровня ВЧ-мощности более 30 лет. В данной главе приводится описание наиболее популярных решений компании Boonton Electronics для измерения уровня мощности.

### 11.1 Измерители уровня ВЧ-мощности серии 4240



Измерители уровня ВЧ-мощности непрерывных сигналов серии 4240 просты в эксплуатации и предназначены для выполнения высокоскоростных измерений, необходимых в условиях производства. Эти измерители обеспечивают выполнение точных измерений в диапазоне от -70 дБм до +44 дБм (в зависимости от используемого датчика) и характеризуются высокой частотой обновления данных на дисплее. На удобном жидкокристаллическом дисплее одновременно отображается два канала с числовой и графической информацией. Измерители серии 4240 имеют 5-разрядное разрешение и могут отображать значения либо в логарифмических, либо в линейных единицах измерения. Двухканальная модель 4242 предоставляет возможность одновременного сравнения нескольких входов во время тестирования и при выполнении дифференциальных и относительных измерений. Измерители серии 4240 могут использоваться со всеми типами диодных датчиков непрерывных сигналов, термопарных датчиков и датчиков с волноводными соединителями компании Boonton в диапазоне частот от 10 кГц до 40 ГГц. Стандартные порты IEEE-488 GPIB и RS232 обеспечивают удобное подключение к системам автоматического тестирования (ATE). Поддержка набора команд SCPI и драйвер LABVIEW обеспечивают простую интеграцию с существующими системами автоматического тестирования.

Основные характеристики:

- Диапазон от -70 дБм до +44 дБм, в зависимости от используемого датчика
- Динамический диапазон 90 дБ, в зависимости от используемого датчика
- Диапазон измерений от 10 кГц до 40 ГГц
- Одноканальное или двух канальное отображение
- Более 200 измерений в секунду
- Эмуляция HP437, HP438 и Boonton 4220A/4230A
- Автоматическая загрузка данных датчиков
- Простое программное управление с использованием языка SCPI
- Ступенчатый калибратор 50 МГц
- Интерфейсы стандартов IEEE-488 и RS-232

## 11.2 Измерители уровня ВЧ-мощности серии 4530



Измерители пикового уровня ВЧ-мощности серии 4530 могут выполнять высокоскоростные измерения пиковой мощности, мощности непрерывных сигналов и ВЧ-напряжений в диапазоне от 10 Гц до 40 ГГц (в зависимости от используемого датчика). Измерители пикового уровня ВЧ-мощности серии 4530 объединяют в себе точность лабораторного оборудования со скоростью, требующейся для производственных испытаний. В этих измерителях используются собственные методики измерений, которые обеспечивают точное измерение сигналов с цифровой модуляцией. Независимо от того, требуется ли измерение уровня мощности непрерывных сигналов или пиковой мощности сигналов WCDMA или HDTV, одноканальная модель Boonton 4531 и двухканальная модель 4532 являются логичным выбором для производственных испытаний с большим объемом измерений. Измерители 4530 обеспечивают выполнение измерений уровня мощности непрерывных сигналов в широком динамическом диапазоне без каких-либо прерываний и нелинейностей, обусловленных применением измерителей уровня мощности с меньшим динамическим диапазоном. Для тепловых датчиков и датчиков пиковой мощности компании Boonton никогда не требуется переключение диапазонов, и даже в диодных датчиках непрерывных сигналов компании Boonton с динамическим диапазоном 90 дБ используется только два широко перекрывающихся диапазона. Измерители серии 4530 отображают периодические и импульсные сигналы в графической форме, а временные параметры и профили мощности импульсов определяет главный компьютер системы автоматических измерений. Во всех режимах измерений на графическом дисплее поддерживаются все функциональные возможности по панорамированию и масштабированию, а данные могут быть представлены в виде интегральной функции распределения (CDF), комплементарной интегральной функции распределения (CCDF) или в виде распределения (гистограммы).

Основные характеристики:

- Диапазон частот: 10 кГц ... 40 ГГц
- Динамический диапазон: в режиме измерения пиковой мощности – более 60 дБ, в режиме измерения непрерывных сигналов – 90 дБ
- Синхронный/асинхронный запуск
- Эффективные частоты выборки – до 50 миллионов выборок в секунду
- Двухканальные статистические измерения (CDF/PDF)
- Ширина полосы частот модуляции – до 20 МГц
- Интерфейсы стандартов GPIB и RS232 с командами SCPI / RS232
- Поддержка драйверов LABVIEW

### 11.3 Измерители уровня ВЧ-мощности серии 4540



Измерители уровня ВЧ-мощности серии 4540 являются предпочтительным вариантом выбора для сбора, отображения и анализа уровня ВЧ-мощности при выполнении временного и статистического анализа. Эти измерители могут обрабатывать различные импульсные ВЧ-сигналы: в частности, сигналы радиолокационных систем, сигналы TDMA и GSM, псевдослучайные или шумоподобные сигналы (например, CDMA, WLAN и WiMAX). Измерители серии 4540 представляют собой одноканальные или двухканальные измерители уровня ВЧ-мощности, которые могут измерять модулированные или непрерывные сигналы с использованием датчиков пиковой и средней мощности компании Boonton. Измерители серии 4540 обеспечивают выполнение режима измерения импульсных сигналов, режима измерения модулированных/непрерывных сигналов и статистического анализа, благодаря чему они идеально подходят для применения в научно-исследовательских, опытно-конструкторских отделах и на производстве. Представлены как одноканальные версии (4541), так и двухканальные версии (4542). Измерители уровня ВЧ-мощности серии 4540 обеспечивают впечатляющее подробное представление измеренных сигналов. В данных измерительных устройствах реализована функция автоматической установки параметров («Auto set»). Эта функция анализирует входящие сигналы и выполняет предварительную установку параметров синхронизации и запуска для немедленного выполнения измерений.

Основные характеристики:

- Три рабочих режима: измерение импульсных сигналов, измерение модулированных/непрерывных сигналов и статистический анализ
- Высокоскоростные датчики с широким динамическим диапазоном
- Интуитивно понятный интерфейс пользователя
- Цветной жидкокристаллический дисплей с диагональю 4 дюйма
- Временное разрешение – 200 пс
- Время нарастания сигнала – 7 нс
- Ширина полосы частот видеосигналов – до 70 МГц
- 17 предустановок по умолчанию плюс возможность сохранения 25-ти определяемых пользователем предустановок
- Статистический анализ, включая комплементарную интегральную функцию распределения (CCDF)
- Возможность одновременного просмотра в текстовом режиме до 14 из 28 параметров на канал (уровень мощности / напряжение, время, статистика, канал результатов математических вычислений)
- Эффективная частота выборок – до 5 миллиардов выборок в секунду для повторяющихся сигналов
- Поддержка интерфейсов GPIB, USB и LAN

## 11.4 Анализатор пикового уровня ВЧ-мощности Boonton 4500B



Анализатор пикового уровня ВЧ-мощности Boonton 4500B представляет собой анализатор пиковой мощности нового поколения и изменяет сам подход к просмотру и анализу параметров высокочастотных сигналов. Измеритель модели Boonton 4500B является предпочтительным вариантом выбора для сбора, отображения и анализа уровня ВЧ-мощности при выполнении временного и статистического анализа. Этот анализатор может обрабатывать различные импульсные ВЧ-сигналы: в частности, сигналы радиолокационных систем, сигналы TDMA и GSM, псевдослучайные или шумоподобные сигналы (например, CDMA и WiMAX) и модулированные по временным интервалам сигналы (например, GSM-EDGE и TD-SCDMA). Совместно с этими анализаторами могут использоваться датчики пиковой мощности со временем нарастания сигнала менее 7 нс (типичная ширина полосы частот видеосигналов до 65 МГц) и с динамическим диапазоном до 70 дБ (импульсный режим) или до 80 дБ (модулированный режим). Эти датчики оптимизированы для использования с измерителями серии 4500B и идеально подходят для измерений в радиолокационных системах, системе беспроводной связи 3G и будущей системе беспроводной связи нового поколения G4, в которых используется комплексная модуляция (например, OFDM). Измеритель 4500B поддерживает выполнение функции плотности вероятности (PDF), интегральной функции распределения (CDF) и комплементарной интегральной функции распределения (CCDF) для точной характеристики шумоподобных ВЧ-сигналов (например, CDMA, HDTV и WLAN). Эти статистические функции непрерывно формируют и анализируют очень большой объем выборок уровней мощности с частотой до 25 МГц, либо запускаются с частотой до 50 МГц одновременно на двух каналах. Эти функции обеспечивают быстрое и точное измерение редко возникающих пиков мощности для определяемого пользователем объема выборок или интервала сбора.

Основные характеристики:

- Цветной жидкокристаллический дисплей с диагональю 8,4 дюйма
- Возможность одновременного отображения до четырех каналов измерений, двух каналов памяти и одного канала результатов математических вычислений
- Временное разрешение – 100 пс, эффективная частота выборки – 10 миллиардов выборок в секунду
- Ширина полосы частот видеосигналов – более 70 МГц, типовое время нарастания сигнала – 5 нс (в зависимости от используемого датчика)
- Автоматическое измерение двойной амплитуды, запуск с задержкой по времени и запуск с задержкой по событию
- Гибкие возможности запуска и динамический диапазон более 80 дБ (в зависимости от используемого датчика)
- Поддержка интерфейсов GPIB, USB и LAN
- Возможность просмотра в текстовом режиме 15 временных измерений и измерений уровня мощности на канал
- Отображение огибающей сигнала, продолжительный и прокручивающийся режим
- Поддержка функций CCDF и PDF с временной селекцией с отображением зарегистрированных данных (опционально) на скоростях сбора данных до 50 миллионов выборок в секунду
- Непрерывный статистический анализ уровней мощности (опционально) на скоростях сбора данных до 25 миллионов выборок в секунду
- Интуитивно понятный интерфейс пользователя
- Могут использоваться датчики пиковой мощности с широкой полосой частот видеосигналов, малым временем нарастания сигнала и широким динамическим диапазоном

## 115 Датчики непрерывных сигналов и датчики пиковой мощности компании Boonton

Таблица датчиков непрерывных сигналов:

Модель Импеданс Соединитель	Диапазон частот	Динамический диапазон <sup>1</sup>	Номинальное значение перегрузки Импульсный / непрерывный сигнал	Максимальный КСВ	
				Частота	КСВ при 0 дБм
<b>Датчики с двумя диодами с широким динамическим диапазоном</b>					
<b>51075A</b> 50 Ом N (вилка)	500 кГц -	-70 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс	500 кГц – 2 ГГц	1,15
	18 ГГц		300 мВт	2 ГГц – 6 ГГц	1,20
				6 ГГц – 18 ГГц	1,40
<b>51077A</b> 50 Ом N (вилка)	500 кГц -	-60 – +30 дБм	10 Вт в течение 1 мкс	500 кГц – 2 ГГц	1,15
	18 ГГц		3 Вт	2 ГГц – 6 ГГц	1,20
				6 кГц – 18 ГГц	1,40
<b>51079A</b> 50 Ом N (вилка)	500 кГц -	-50 – +40 дБм	100 Вт в течение 1 мкс	500 кГц – 2 ГГц	1,15
	18 ГГц		25 Вт	2 ГГц – 6 ГГц	1,20
				6 ГГц – 18 ГГц	1,40
<b>51071A</b> 50 Ом K (вилка)	10 МГц -	-70 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс	10 МГц – 2 ГГц	1,15
	26,5 ГГц		300 мВт	2 ГГц – 4 ГГц	1,20
				4 ГГц – 18 ГГц	1,45
				18 ГГц – 26,5 ГГц	1,50
<b>51072A</b> 50 Ом K (вилка)	30 МГц -	-70 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс	30 МГц – 4 ГГц	1,25
	40 ГГц		300 мВт	4 ГГц – 38 ГГц	1,65
				38 ГГц – 40 ГГц	2,00
<b>Термопарные датчики</b>					
<b>51100(9E)</b> 50 Ом N (вилка)	10 МГц -	-20 – +20 дБм	15 Вт в течение 1 мкс	10 МГц – 30 МГц	1,25
	18 ГГц		300 мВт	30 МГц – 16 ГГц	1,18
				16 ГГц – 18 ГГц	1,28
<b>51200</b> 50 Ом N (вилка)	10 МГц -	0 – +37 дБм	150 Вт в течение 1 мкс	10 МГц – 2 ГГц	1,10
	18 ГГц		10 Вт	2 ГГц – 12,4 ГГц	1,18
				12,4 кГц – 18 ГГц	1,28

<b>Датчики с двумя диодами специального назначения</b>					
<b>51011 (EMC)</b> 50 Ом N (вилка)	10 кГц – 8 ГГц	-60 -	1 Вт в течение 1 мкс	10 кГц – 2 ГГц	1,12
		+20 дБм	200 мВт	2 ГГц – 4 ГГц	1,20
				4 ГГц – 8 ГГц	1,40
<b>51011 (4B)</b> 50 Ом N (вилка)	100 кГц – 12.4 ГГц	-60 -	1 Вт в течение 1 мкс	100 кГц – 2 ГГц	1,12
		+20 дБм	300 мВт	2 ГГц – 4 ГГц	1,20
				4 ГГц – 11 ГГц	1,40
				11 ГГц – 12.4 ГГц	1,60
<b>51013 (4E)</b> 50 Ом N (вилка)	100 кГц – 18 ГГц	-60 -	1 Вт в течение 1 мкс	100 кГц – 4 ГГц	1,30
		+20 дБм	300 мВт	4 ГГц – 10 ГГц	1,50
				10 ГГц – 18 ГГц	1,70
<b>51015 (5E)</b> 50 Ом N (вилка)	100 кГц – 18 ГГц	-50 -	10 Вт в течение 1 мкс	100 кГц – 1 ГГц	1,07
		+30 дБм	2 Вт	1 ГГц – 2 ГГц	1,10
				2 ГГц – 4 ГГц	1,12
				4 ГГц – 12.4 ГГц	1,18
				12.4 ГГц – 18 ГГц	1,28
<b>51033 (6E)</b> 50 Ом N (вилка)	100 кГц – 18 ГГц	-40 -	10 Вт в течение 1 мкс	100 кГц – 1 ГГц	1,07
		+33 дБм	2 Вт	1 ГГц – 2 ГГц	1,10
				2 ГГц – 4 ГГц	1,12
				4 ГГц – 12.4 ГГц	1,18
				12.4 ГГц – 18 ГГц	1,28
<b>51078</b> 50 Ом N (вилка)	100 кГц – 18 ГГц	-20 -	100 Вт в течение 1 мкс	100 кГц – 4 ГГц	1,15
		+37 дБм	7 Вт	4 ГГц – 12 ГГц	1,25
				12 ГГц – 18 ГГц	1,40
<b>Диодные датчики средней мощности (для использования с моделями 4530, 5230, 4230, 4240, 4540**)</b>					
<b>51085</b> 50 Ом N (вилка)	500 кГц – 18 ГГц	-30 -	100 Вт в течение 1 мкс	500 кГц – 4 ГГц	1,15
		+20 дБм	5 Вт (*)	4 ГГц – 12.4 ГГц	1,20
				12.4 ГГц – 18 ГГц	1,25

**Таблица датчиков пиковой мощности**

Модель	Диапазон частот	Номинальное значение динамического диапазона	Номинальное значение перегрузки	Быстродействие датчика		Максимальный КСВ	
				Малое время нарастания сигнала (Ширина полосы частот)	Большое время нарастания сигнала (Ширина полосы частот)	Частота	КСВ при 0 дБм
Импеданс Соединитель	(Узкая полоса частот)	Диапазон пиковой мощности Диапазон мощности непрерывных сигналов Диапазон внутреннего запуска	Импульсный / непрерывный сигнал				
<b>Для использования с моделями 4500В и 4540</b>							
57006 50 Ом N (вилка)	0,5 – 6 ГГц (0,05 – 6 ГГц)	-50 – +20 дБм -60 – +20 дБм -40 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 7 нс (70 МГц, типовое значение)	<10 мкс (350 кГц)	0,05 – 6 ГГц	1,25
59318 50 Ом N (вилка)	0,5 – 18 ГГц (0,05 – 18 ГГц)	-24 – +20 дБм -34 – +20 дБм -10 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 10 нс (50 МГц, типовое значение)	<10 мкс (350 кГц)	0,05 – 2 ГГц 2 – 16 ГГц 16 – 18 ГГц	1,15 1,28 1,34
59340 50 Ом K (вилка)	0,5 – 40 ГГц (0,05 – 40 ГГц)	-24 – +20 дБм -34 – +20 дБм -10 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 10 нс (50 МГц, типовое значение)	<10 мкс (350 кГц)	0,05 – 4 ГГц 4 – 38 ГГц 38 – 40 ГГц	1,25 1,65 2,00
<b>Для использования с моделями 4400, 4500, 4400А и 4500А. Модель 4530 с калибратором 1 ГГц модели 2530</b>							
56318 50 Ом N (вилка)	0,5 – 18 ГГц	-24 – +20 дБм -34 – +20 дБм -10 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 15 нс (35 МГц, типовое значение)	<200 нс (1,75 МГц)	0,05 – 2 ГГц 2 – 16 ГГц 16 – 18 ГГц	1,15 1,28 1,34
56326 50 Ом K (вилка)	0,5 – 26,5 ГГц	-24 – +20 дБм -34 – +20 дБм -10 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 15 нс (35 МГц)	<200 нс (1,75 МГц)	0,05 – 2 ГГц 2 – 4 ГГц 4 – 18 ГГц 18 – 26,5 ГГц	1,15 1,20 1,45 1,50
56518 50 Ом N (вилка)	0,5 – 18 ГГц	-40 – +20 дБм -50 – +20 дБм -27 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 100 нс (6 МГц)	<300 нс (1,16 МГц)	0,05 – 2 ГГц 2 – 6 ГГц 6 – 16 ГГц 16 – 18 ГГц	1,15 1,20 1,28 1,34
<b>Для использования с моделями 4400, 4500, 4400А и 4500А. Модель 4530</b>							
57518 50 Ом N (вилка)	0,1 – 18 ГГц (0,05 – 18 ГГц)	-40 – +20 дБм -50 – +20 дБм -27 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 100 нс (6 МГц)	< 10 мкс (350 кГц)	0,05 – 2 ГГц 2 – 16 ГГц 16 – 18 ГГц	1,15 1,28 1,34
57540 50 Ом K (вилка)	0,1 – 40 ГГц (0,05 – 40 ГГц)	-40 – +20 дБм -50 – +20 дБм -27 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 100 нс (6 МГц)	< 10 мкс (350 кГц)	0,05 – 4 ГГц 4 – 38 ГГц 38 – 40 ГГц	1,25 1,65 2,00
<b>Для использования с моделями 4500, 4400 и 4530</b>							
56218 50 Ом N (вилка)	30 МГц – 18 ГГц	-24 – +20 дБм -34 – +20 дБм -10 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 150 нс (3 МГц)	< 500 нс (700 кГц)	0,03 – 2 ГГц 2 – 6 ГГц 6 – 18 ГГц	1,15 1,20 1,25



Для использования с моделями 4500 и 4400							
56526	500 МГц - 26,5 ГГц	-40 – +20 дБм -50 – +20 дБм -27 – +20 дБм	1 Вт в течение 1 мкс 200 мВт	< 100 нс (6 МГц)	< 300 нс (1,16 МГц)	0,03–2 ГГц 2–4 ГГц 4–18 ГГц 18–26,5 ГГц	1,15 1,20 1,45 1,50

## 11.6 Самые популярные датчики пиковой мощности

Компания Boonton производит несколько пользующихся популярностью датчиков пиковой мощности, ниже указываются три самых популярных и широко используемых датчика:



### Датчик пиковой мощности 59340:

Компания Boonton предлагает быстродействующие датчики пиковой мощности 59340 для частот до 40 ГГц. Беспроводные технологии все в большей степени проникают в область тестового и измерительного оборудования. В настоящее время требуются точные измерения быстроменяющихся сигналов, зачастую сигналов с шумоподобными характеристиками, быстро переключающихся несущих и импульсных сигналов. По этой причине разработчикам и инженерам требуются надежные средства измерения для анализа таких сложных форм сигналов. Датчик Boonton 59340 представляет собой новейший и самый быстродействующий датчик пиковой мощности, работающий на частотах до 40 ГГц.

Основные характеристики:

- Оптимизирован для использования с высокопроизводительными измерителями пикового уровня мощности серий 4500В и 4540 компании Boonton
- Динамический диапазон входных сигналов от -24 дБм до +20 дБм в режиме измерения пиковой мощности и от -34 дБм до +20 дБм в режиме измерения непрерывных сигналов
- Частоты до 40 ГГц
- Время нарастания сигнала менее 10 нс
- Ширина полосы частот до 50 МГц

### **Датчик пиковой мощности 57006:**

Компания Boonton также предлагает другой популярный и быстродействующий датчик пиковой мощности 57006 для частот до 6 ГГц. Этот датчик пиковой мощности оптимизирован для использования с измерителями уровня мощности серий 4500В и 4540 компании Boonton и обеспечивает динамический диапазон входных сигналов от -50 дБм до +20 дБм в режиме измерения пиковой мощности и от -60 дБм до +20 дБм в режиме измерения непрерывных сигналов. При измерении частот несущих до 6 ГГц этот датчик характеризуется малым временем нарастания сигнала 7 нс и шириной полосы частот видеосигналов 70 МГц. Этот датчик также идеально подходит для выполнения статистического анализа сигналов с большим динамическим диапазоном благодаря своему высокому быстродействию. Диапазон частот датчика зависит от установленной ширины полосы частот. Диапазон составляет от 0,5 ГГц до 6 ГГц в режиме с широкой полосой частот и от 50 МГц до 6 ГГц в режиме с узкой полосой частот.

Основные характеристики:

- Частоты до 6 ГГц
- Возможность использования в низкочастотных радиолокационных системах
- Возможность использования в системах связи
- Ширина полосы частот до 65 МГц
- Высокий динамический диапазон (от -60 дБм до +20 дБм)
- Время нарастания сигнала – 7 нс (типичное значение 5 нс)
- Возможность использования с измерителями серий 4500В и 4540 компании Boonton

### **Датчик пиковой мощности 59318:**

Датчик пиковой мощности 59318 предназначен для частот до 18 ГГц. Этот датчик пиковой мощности также оптимизирован для использования с измерителями уровня мощности серий 4500В и 4540 компании Boonton и обеспечивает динамический диапазон входных сигналов от -24 дБм до +20 дБм в режиме измерения пиковой мощности и от -34 дБм до +20 дБм в режиме измерения непрерывных сигналов. На частотах до 18 ГГц время нарастания сигнала составляет 10 нс, а ширина полосы частот – до 50 МГц. Диапазон частот датчика зависит от установленной ширины полосы частот. Обычно диапазон составляет от 0,5 ГГц до 18 ГГц в режиме с широкой полосой частот и от 50 МГц до 18 ГГц в режиме с узкой полосой частот.

Основные характеристики:

- Частоты до 18 ГГц
- Возможность использования в высокочастотных системах связи и радиолокационных системах и в системах тестирования усилителя
- Время нарастания сигнала – 10 нс (типичное значение 8 нс)
- Динамический диапазон 44 дБ в режиме измерения пиковой мощности
- Ширина полосы частот до 50 МГц
- Возможность использования с измерителями серий 4500В и 4540 компании Boonton





# 4TEST

ООО "4ТЕСТ"


Телефон: +7 (499) 685 44 44

Электронная почта: 4test@4test.ru


25 Eastmans Rd  
Parsippany, NJ  
United States  
Телефон: +1 973 386 9696  
Факс: +1 973 386 9191

[www.boonton.com](http://www.boonton.com)

Следите за новостями на следующих ресурсах:

 WTGinnovation

 Wireless Telecom Group

 [blog.wtcom.com](http://blog.wtcom.com)

 WTGinnovation

V/REFGUIDE/1111/EN

Примечание. Технические характеристики, термины и условия могут быть изменены без предварительного уведомления.

Авторское право 2011.  
Все права защищены.

Отсканируйте этот код  
для загрузки цифровой  
копии документа

