

Основы векторного анализа цепей

Michael Hiebel

Глава 8
Измерения смесителей

2-е издание, исправленное и дополненное

Москва
Издательский дом МЭИ
2018



ROHDE & SCHWARZ

8	Измерения смесителей	388
8.1	Сигналы и параметры смесителей	388
8.1.1	Входные и выходные сигналы смесителя	388
8.1.2	Продукты смешивания высокого порядка	391
8.1.3	Важные параметры смесителя	392
8.2	Особенности измерения смесителей	397
8.2.1	Режим измерения смесителей	397
8.2.2	Присоединение опорного смесителя	399
8.3	Пример 1: Измерение смесителя	400
8.4	Пример 2: Измерения модуля преобразования частоты вниз	404
8.5	Расширение диапазона частот	407

8 Измерения смесителей

Смесители это компоненты, которые используются, главным образом, для обеспечения преобразования частоты. Следующая дискуссия будет ограничена этим главным применением.

8.1 Сигналы и параметры смесителей

Этот раздел обсуждает базовый принцип смесителей вместе с соответствующими сигналами и их параметрами. Это должно облегчить понимание раздела 8.2 и последующих разделов. Мы не будем обсуждать возможные практические реализации смесителей и их функционирование.

8.1.1 Входные и выходные сигналы смесителя

Смеситель возбуждается от двух сигналов на его входах: **радиочастотного сигнала** (ВЧ сигнал) и сигнала **гетеродина** (ЛО сигнала). Эти два сигнала характеризуются величинами падающих волн $a_{\text{ВЧ}}$ и $a_{\text{гет}}$. Выходной сигнал смесителя это **сигнал промежуточной частоты** (ПЧ сигнал) и он характеризуется волновой величиной $b_{\text{ПЧ}}$.

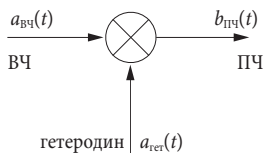


Рис. 8.1.1
Графический символ для смесителя с его входными и выходными сигналами.

Смесители это нелинейные компоненты, которые характеризуются в первом приближении во временной области как **перемножители**.

$$b_{\text{ПЧ}}(t) = M a_{\text{ВЧ}}(t) \cdot a_{\text{гет}}(t) \quad (8.1-1)$$

Давайте предположим, что **коэффициент преобразования смесителя** имеет значение $M = 1/\sqrt{W}$. Для входных сигналов косинусоидальной формы во временной области $a_{\text{ВЧ}}(t) = \hat{A}_{\text{ВЧ}} \cos(2\pi f_{\text{ВЧ}} t + \varphi_{\text{ВЧ}})$ и $a_{\text{гет}}(t) = \hat{A}_{\text{гет}} \cos(2\pi f_{\text{гет}} t + \varphi_{\text{гет}})$ формула (8.1-1) приводит к следующему ПЧ сигналу:

$$b_{\text{ПЧ}}(t) = M\hat{A}_{\text{ВЧ}}\hat{A}_{\text{гет}}\cos(2\pi f_{\text{гет}}t + \varphi_{\text{гет}})\cos(2\pi f_{\text{ВЧ}}t + \varphi_{\text{ВЧ}}) \quad (8.1-2)$$

Рисунок ниже показывает пример сигнала $b_{\text{ПЧ}}(t)$. Он был выработан, используя две входных частоты $f_{\text{ВЧ}} \neq f_{\text{гет}}$.

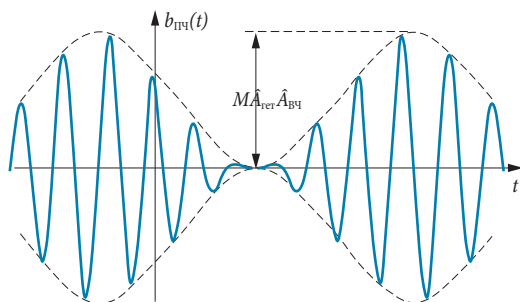


Рис. 8.1.2
Пример ПЧ сигнала в функции от времени.

Переписывая $\cos\alpha \cdot \cos\beta = \frac{1}{2}[\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$, мы получим следующие уравнения из формулы (8.1-2):

$$b_{\text{ПЧ}}(t) = \frac{M}{2} \hat{A}_{\text{ВЧ}}\hat{A}_{\text{гет}}[\cos(2\pi(f_{\text{гет}} - f_{\text{ВЧ}})t + \varphi_{\text{гет}} - \varphi_{\text{ВЧ}}) + \cos(2\pi(f_{\text{ВЧ}} + f_{\text{гет}})t + \varphi_{\text{гет}} + \varphi_{\text{ВЧ}})] \quad (8.1-3)$$

или

$$b_{\text{ПЧ}}(t) = \frac{M}{2} \hat{A}_{\text{ВЧ}}\hat{A}_{\text{гет}}[\cos(2\pi(f_{\text{ВЧ}} - f_{\text{гет}})t + \varphi_{\text{ВЧ}} - \varphi_{\text{гет}}) + \cos(2\pi(f_{\text{ВЧ}} + f_{\text{гет}})t + \varphi_{\text{гет}} + \varphi_{\text{ВЧ}})] \quad (8.1-4)$$

Благодаря симметрии косинусоидальной функции, две формулы (8.1-3) и (8.1-4) являются эквивалентными. Для частоты ПЧ сигнала мы имеем следующие уравнения:

$$f_{\text{ПЧ}} = |f_{\text{ВЧ}} - f_{\text{гет}}| \quad (8.1-5)$$

$$f_{\text{ПЧ}} = f_{\text{ВЧ}} + f_{\text{гет}} \quad (8.1-6)$$

Следующие три рисунка иллюстрируют частотные соотношения. Пунктирная линия представляет частоту гетеродина. Вместо частоты $f_{\text{ВЧ}}$ предполагается частотная полоса, которая показана как пунктирный треугольник. Сплошные треугольники символизируют результирующие ПЧ полосы. Если ориентация треугольников

для ВЧ и ПЧ полос оказывается одинаковой, мы используем термин **неинвертированный случай**. Если ориентация различна, мы используем термин **инвертированный случай**. Сигнал ПЧ имеет две полосы в каждом случае. Более высокая частотная полоса известна как **верхняя боковая полоса (ВБП)**, а более низкая частотная полоса известна как **нижняя боковая полоса (НБП)**.

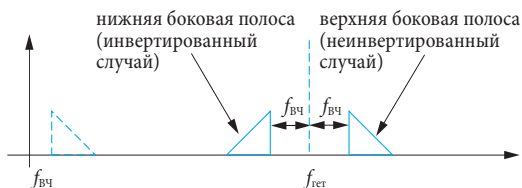


Рис. 8.1.3
Преобразование вверх в инвертированном и неинвертированном случае.

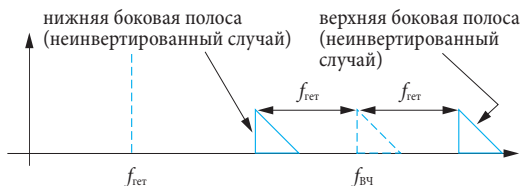


Рис. 8.1.4
Преобразование вверх и вниз в неинвертированном случае.

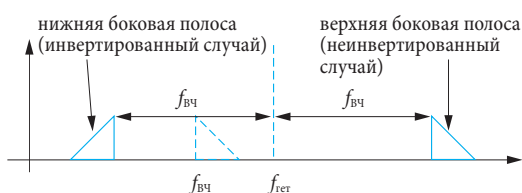


Рис. 8.1.5
Инвертированный случай преобразования вниз и неинвертированный случай преобразования вверх.

Используя подходящие фильтры, можно выбрать одну из боковых полос. Если ПЧ сигнал имеет более высокую частоту, чем ВЧ сигнал, т.е. $f_{ПЧ} > f_{ВЧ}$, то мы используем термин **преобразование вверх**. Наоборот, случай, где $f_{ПЧ} < f_{ВЧ}$ известен как **преобразование вниз**. Если выбрана боковая полоса в инвертированном случае, то мы говорим об **инвертированном преобразовании**. Существует боковая полоса в инвертированном случае для $f_{гет} > 2f_{ВЧ}$ (преобразование вверх) и для $f_{гет}/2 < f_{ВЧ} < f_{гет}$ (преобразование вниз). В оставшихся случаях мы говорим о **неинвертированном преобразовании**.

Если мы используем смеситель в приемнике, мы должны держать в памяти, что процесс смешивания не является недвусмысленным.

Предположим, что мы хотели бы принять частоту $f_{\text{ВЧ}} = 200$ МГц и что наша частота ПЧ равна 5 МГц. Частота гетеродина может быть найдена с помощью формулы (8.1-5) как $f_{\text{гет}} = 200$ МГц – 5 МГц, т.е. 195 МГц. В дополнение к частоте $f_{\text{ВЧ}} = 200$ МГц, однако, мы будем также принимать частоту $f_{\text{ВЧ}} = 200$ МГц – 10 МГц. Эта ситуация становится ясной, если мы вставим рассчитанную частоту $f_{\text{гет}}$ в формулу (8.1-6). Вообще говоря, две различные частоты $f_{\text{ВЧ}}$ будут смешиваться в одну и ту же $f_{\text{ПЧ}}$ частоту для данной частоты гетеродина. Это явление известно как **прием по зеркальному каналу**.

8.1.2 Продукты смешивания высокого порядка

При анализе смесителей мы можем наблюдать компоненты сигнала, которые не могут быть объяснены в рамках модели перемножителя. Чтобы понять это, нам просто нужно вспомнить, что смесители также включают нелинейные компоненты, такие как полевые транзисторы (FET) и полупроводниковые диоды. Эти компоненты схем подвержены действию двухчастотного сигнала, который происходит от ВЧ частоты и частоты гетеродина. Результат оказывается сравнимым с компонентами, перечисленными в таблице 7.5.1. В отличие от раздела 7.5, полезный сигнал теперь дается продуктом интермодуляции второго порядка. Этот сигнал соответствует ПЧ сигналу, полученному от простой модели смесителя по формуле (8.1-1). Остальные спектральные компоненты являются нежелательными, но они остаются в сигнале, хотя проектирование хорошего смесителя вовлекает частотно селективные компоненты для уменьшения их уровня. Для более общего подхода мы можем использовать следующие уравнения вместо формул (8.1-5) и (8.1-6):

$$f_{\text{ПЧ}} = |m \cdot f_{\text{ВЧ}} - n \cdot f_{\text{гет}}| \quad (8.1-7)$$

$$f_{\text{ПЧ}} = m \cdot f_{\text{ВЧ}} + n \cdot f_{\text{гет}} \quad (8.1-8)$$

где

$$n, m = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots\} \quad (8.1-9)$$

Следующие измерения подтверждают формулы (8.1-7) и (8.1-8). Спектр выходного сигнала смесителя был измерен с помощью фиксированных частот ВЧ сигнала и сигнала гетеродина.

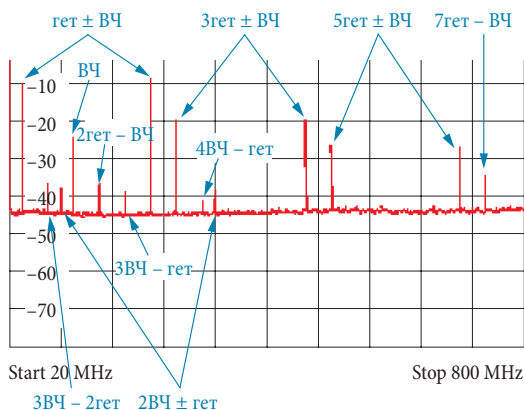


Рис. 8.1.6
Спектр ПЧ сигнала, измеренный при фиксированных частотах $f_{ВЧ}$ и $f_{гет}$.

Продукты смешивания высокого порядка из рис. 8.1.6 могут вызывать проблемы, например, в приемнике. Если мы разрешим формулы (8.1-7) и (8.1-8) относительно $f_{ВЧ}$, мы найдем численные частоты приема $f'_{ВЧ}$ для конкретных частот $f_{ПЧ}$ и $f_{гет}$.

$$f'_{ВЧ} = \left| \frac{1}{m} \cdot f_{ПЧ} \pm \frac{n}{m} \cdot f_{гет} \right| \quad n, m \text{ см. (8.1-9)} \quad (8.1-10)$$

Эти ВЧ частоты $f'_{ВЧ}$, на которых прием нежелателен, известны как **паразитные отклики**. Типичным для них является то, что они могут быть приняты, только если ВЧ сигнал присутствует на $f'_{ВЧ}$. В отличие от этого, **внутренний паразитный отклик** возникают даже, если ВЧ сигнал не приложен.

8.1.3 Важные параметры смесителя

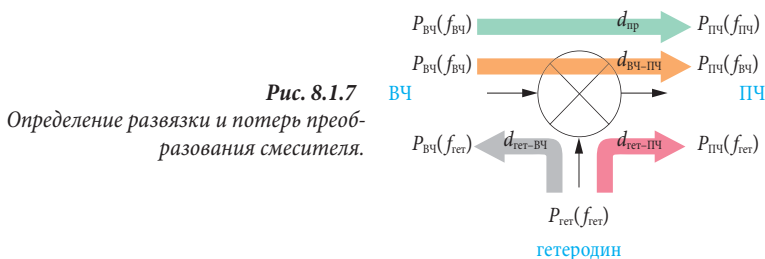
Диапазон частот

Трудно реализовать смесители для широкого частотного диапазона. Вот почему мы приписываем конкретные диапазоны частотам $f_{ВЧ}$, $f_{гет}$ и $f_{ПЧ}$. Если существует достаточный промежуток между этими разными частотными диапазонами, мы сможем развязать ВЧ, ПЧ и гетеродинный порты, используя частотно-селективные компо-

ненты. В некоторых случаях, однако, необходимо иметь **перекры- тие** между различными частотными диапазонами (особенно для сигналов ВЧ и гетеродина). Это влечет за собой дополнительные сложности, если мы хотим гарантировать достаточную развязку между сигналами. Чтобы достичь желаемой развязки (например, между сигналами ВЧ и гетеродина), симметричная (балансная) установка обычно используется внутри смесителя.

Развязка

Рис. 8.1.7 показывает **просачивание гетеродин-ПЧ** (красный цвет), **ВЧ-ПЧ просачивание** (оранжевый) и **просачивание гетеродин-ВЧ** (серый). Мы определяем изоляцию (развязку) $d_{\text{гет-ПЧ}}$, $d_{\text{ВЧ-ПЧ}}$ и $d_{\text{гет-ВЧ}}$, чтобы характеризовать эти нежелательные перекрестные процессы.



Возьмем **изоляцию гетеродин-ПЧ** $d_{\text{гет-ПЧ}}$ как пример. Она описывает перекрестные помехи между портом гетеродина и ПЧ портом. Определение основано на мощности гетеродина $P_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})$, которая измеряется на частоте гетеродина $f_{\text{гет}}$, и на части мощности $P_{\text{ПЧ}}(f_{\text{гет}})$, которая передается в ПЧ порт из-за перекрестного процесса. Мощность $P_{\text{ПЧ}}(f_{\text{гет}})$ измеряется на ПЧ порту при частоте $f_{\text{гет}}$, предполагая, что нет частотного преобразования внутри этих перекрестных помех. Основываясь на мощностях $P_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})$ и $P_{\text{ПЧ}}(f_{\text{гет}})$, мы можем формировать отношение мощностей, которое обычно указывается в шкале дБ. Если мы предполагаем, что смеситель правильно подключен с требуемым опорным импедансом, мы можем также рассчитать развязку гетеродин-ПЧ, базируясь на волновых величинах $a_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})$ и $b_{\text{ПЧ}}(f_{\text{гет}})$. **Изоляция ВЧ-ПЧ** $d_{\text{ВЧ-ПЧ}}$ и **изоляция гетеродин-ВЧ** $d_{\text{гет-ВЧ}}$ определяются в схожей манере. Они тоже основываются на отношении мощностей с обеими мощностями, формирующими отношение, которые измеряются на одной и той же частоте $f_{\text{ВЧ}}$ или $f_{\text{гет}}$, соответственно.

$$d_{\text{гет-ПЧ}} = -10 \lg \frac{P_{\text{ПЧ}}(f_{\text{гет}})}{P_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})} \text{ дБ} = -20 \lg \frac{|b_{\text{ПЧ}}(f_{\text{гет}})|}{|a_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})|} \text{ дБ} \quad (8.1-11)$$

$$d_{\text{ВЧ-ПЧ}} = -10 \lg \frac{P_{\text{ПЧ}}(f_{\text{ВЧ}})}{P_{\text{ВЧ}}(f_{\text{ВЧ}})} \text{ дБ} = -20 \lg \frac{|b_{\text{ПЧ}}(f_{\text{ВЧ}})|}{|a_{\text{ВЧ}}(f_{\text{ВЧ}})|} \text{ дБ} \quad (8.1-12)$$

$$d_{\text{гет-ВЧ}} = -10 \lg \frac{P_{\text{ВЧ}}(f_{\text{гет}})}{P_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})} \text{ дБ} = -20 \lg \frac{|b_{\text{ВЧ}}(f_{\text{гет}})|}{|a_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})|} \text{ дБ} \quad (8.1-13)$$

Потери преобразования

Потери преобразования это мера потерь, которые возникают для желательных частотных компонентов. Эта величина есть отношение мощности в ВЧ порту на частоте $f_{\text{ВЧ}}$ к мощности на ПЧ порту на частоте $f_{\text{ПЧ}}$. Потери преобразования обычно указываются в дБ и типовые значения равны от 6 дБ до 7 дБ.

$$d_{\text{пр}} = -10 \lg \frac{P_{\text{ПЧ}}(f_{\text{ПЧ}})}{P_{\text{ВЧ}}(f_{\text{ВЧ}})} \text{ дБ} = -20 \lg \frac{|b_{\text{ПЧ}}(f_{\text{ПЧ}})|}{|a_{\text{ВЧ}}(f_{\text{ВЧ}})|} \text{ дБ} \quad (8.1-14)$$

Потери преобразования обычно зависят от частоты. При недостаточной мощности гетеродина могут наблюдаться ненормально высокие потери преобразования, означая, что смеситель не работает так, как он предназначался.

Возвратные потери

Как и в случае с другими трех-портовыми цепями, мы можем также определить три вида возвратных потерь для смесителя. Мы имеем возвратные потери $d_{\text{ВЧ}}$ в ВЧ порту, $d_{\text{ПЧ}}$ в ПЧ порту и $d_{\text{гет}}$ на порту гетеродина.

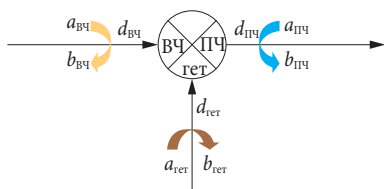


Рис. 8.1.8
Три типа возвратных потерь смесителя.

Возвратные потери, которые возникают, являются частотно-зависимыми в своей значительной части. В дополнение к этому, уровень гетеродина имеет главное влияние на возвратные потери.

Это будет проиллюстрировано позже в показанном примере в разделе 8.3.

$$d_{\text{ПЧ}} = -20\lg \frac{b_{\text{ПЧ}}(f_{\text{ПЧ}})}{a_{\text{ПЧ}}(f_{\text{ПЧ}})} \quad (8.1-15)$$

$$d_{\text{ВЧ}} = -20\lg \frac{b_{\text{ВЧ}}(f_{\text{ВЧ}})}{a_{\text{ВЧ}}(f_{\text{ВЧ}})} \quad (8.1-16)$$

$$d_{\text{гет}} = -20\lg \frac{b_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})}{a_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})} \quad (8.1-17)$$

По сравнению с другими компонентами, порты смесителя имеют тенденцию быть плохо согласованными. Это означает, что цепи вокруг смесителя должны иметь наилучшее из возможных согласование, чтобы предотвратить многократные отражения. Это особенно критично для ПЧ и ВЧ портов! Изготовители часто рекомендуют минимальное согласование, которое может иногда быть отнесенным к импедансу Z_0 , отличающемуся от 50 Ω . Для ПЧ порта согласование должно быть обеспечено не только для полного ПЧ частотного диапазона, но также для проникновения сигналов гетеродина и ВЧ.

Точка компрессии 1 дБ

Входная мощность, требуемая для этой величины, измеряется на ВЧ порту на частоте $f_{\text{ВЧ}}$. Соответствующая выходная мощность определяется на ПЧ порту на соответствующей частоте ПЧ $f_{\text{ПЧ}}$. Существуют смесители для различных уровней гетеродина. Смесители, которые предназначены для работы с высокими уровнями сигнала гетеродина, имеют более высокую точку компрессии по уровню 1 дБ.

Интермодуляционное искажение, точки пересечения

Чтобы измерить точку пересечения, нам необходимо приложить двухчастотный сигнал с частотами $f_{\text{ВЧ}1}$ и $f_{\text{ВЧ}2}$ к ВЧ входу смесителя. Частотный промежуток $f_{\text{ВЧ}2} - f_{\text{ВЧ}1}$ и соответствующие ВЧ уровни мощности $P(f_{\text{ВЧ}1})$ и $P(f_{\text{ВЧ}2})$ должны быть выбраны в соответствии с инструкциями, описанными в разделе 7.5.1. В соответствии с преобразованием частоты, желаемым для смесителя, выходные частоты $f_{\text{ПЧ}1}$ и $f_{\text{ПЧ}2}$ на ПЧ порту связаны с частотами $f_{\text{ВЧ}1}$ и $f_{\text{ВЧ}2}$. Сле-

довательно, продукты интермодуляции второго и третьего порядков ожидаются на $f_{\text{ПЧ2}} \pm f_{\text{ПЧ1}}$ и на $2f_{\text{ПЧ2}} - f_{\text{ПЧ1}}$ или $2f_{\text{ПЧ1}} - f_{\text{ПЧ2}}$. Точки пересечения рассчитаны в соответствии с описанием в разделе 7.5.

Уровень гетеродина

Изготовители смесителя обычно рекомендуют оптимальный уровень сигнала гетеродина $P_{\text{гет}}(f_{\text{гет}})$ и относят их характеристики для потерь преобразования, изоляции и т.д. к этому уровню. Типовые уровни гетеродина находятся в диапазоне от 6 дБм до 20 дБм.

Уровень ВЧ сигнала

Уровень ВЧ сигнала обычно на 3 дБ до 10 дБ меньше, чем уровень гетеродина. При очень малых ВЧ уровнях (обычно < -50 дБм) мы будем, как правило, наблюдать плохое отношение сигнал/шум на ПЧ выходе. Используя подходящий ПЧ фильтр (полосно-пропускающий фильтр), мы можем подавить широкополосные компоненты шума вне полосы пропускания вокруг $f_{\text{ПЧ}}$, улучшая тем самым отношение сигнал/шум (см. рис. 2.8.5). Если мы хотим указать минимальный ВЧ уровень, нам нужно принять во внимание полную цепочку обработки сигнала, в которую вставлен смеситель. Важная величина в этом контексте это коэффициент шума смесителя. Он имеет грубо такое же численное значение, как и потери преобразования. Максимальный уровень ВЧ сигнала определяется по точке 1 дБ компрессии, точке пересечения и по требованиям на спектральную чистоту для конкретного применения. Кроме того, существует максимальный уровень ВЧ сигнала для каждого смесителя, известный как **предел выгорания смесителя**. Типовые значения расположены в диапазоне от 20 дБм до 30 дБм. Для импульсных применений, в которых мощность ВЧ сигнала включается только для определенного интервала времени, привычным является указание **максимального уровня импульса**.

Линейные искажения, групповое время запаздывания

Кроме нелинейных искажений мы интересуемся также линейными искажениями смесителя. Они включают частотную характеристику потерь преобразования и групповое время запаздывания. Для определения и интерпретации группового времени запаздывания $\tau_{\text{гр}}$ смотри раздел 4.5. Частоты $f_{\text{ВЧ}}$ и $f_{\text{гет}}$ определяют выходную частоту $f_{\text{ПЧ}}$ смесителя. Как можно видеть из формул (8.1-3) и (8.1-4), эта зависимость применима также к фазам $\varphi_{\text{ПЧ}}$, $\varphi_{\text{ВЧ}}$ и $\varphi_{\text{гет}}$. Напри-

мер, мы можем рассчитать $\varphi_{ПЧ} = \varphi_{ВЧ} - \varphi_{гет}$, что приводит к постоянному групповому времени запаздывания $\tau_{гр}$. Заметьте, что формулы (8.1-3) и (8.1-4) основаны на модели идеального перемножителя, в то время как действующая измеренная групповая задержка может демонстрировать различное поведение.

При измерении смесителей вы иногда будете сталкиваться с некоторыми специальными типами смесителей. Существуют некоторые специальные смесители, которые используют **ток смещения**, который обычно меньше нескольких миллиампер. Используя этот ток, смеситель может нормально функционировать при сниженном уровне сигнала гетеродина. Некоторые из таких смесителей являются даже **активными смесителями**, что означает, что они демонстрируют усиление при преобразовании, т.е. показывая $d_{пр} < 0$. **Гармонический смеситель** (также называемый **субгармоническим смесителем**) использует продукт смешивания высшего порядка, например, $f_{ПЧ} = 8f_{гет} - f_{ВЧ}$, обеспечивая преимущество, что частота гетеродина может быть снижена до доли его нормального значения. Но этот тип смесителей демонстрирует высокие потери преобразования. **Смеситель с выделением боковой полосы** или **смеситель с подавлением зеркального канала** предлагает целенаправленный доступ к нижней или верхней боковой полосе. **Синфазно-квадратурный (I/O) смеситель** используется обычно с нулевой промежуточной частотой. Он имеет два ПЧ порта для синфазной и квадратурной компонент.

8.2 Особенности измерения смесителей

8.2.1 Режим измерения смесителей

В принципе, мы можем выполнять измерения смесителей, используя произвольный режим. Однако специальный **режим смесителя** существенно упрощает процесс. Он должен включать следующее:

- ◆ Характеристику частотных соотношений в смесителе
- ◆ Определение уровней мощности на ВЧ и гетеродинном портах
- ◆ Выполнение калибровки мощности смесителя

Чаще всего используются режимы частотного качания и качания мощности. Теперь мы внимательно взглянем на них.

Частотное качание

Если частота в ВЧ порту указана как интервал и используется фиксированная частота гетеродина, мы можем определить частотный диапазон в ПЧ порту, используя формулы (8.1-5) и (8.1-6). Однако привычным также является выбор фиксированной ПЧ. Анализатор цепей должен тогда отрегулировать частоту сигнала гетеродина подходящим образом. В диалоговом ящике для режима смесителя на рис. 8.2.1 необходимые вычисления проводятся автоматически. Он даже поддерживает фиксированную ВЧ частоту, хотя это не типичный случай. Частотный диапазон, конкретизированный пользователем как „Swept“ (свиписываемый), определяет ось воздействия. Частотный диапазон, указываемый как „Auto“ (автоматический), вычисляется анализатором цепей на основе частот „Swept“ и „Fixed“ (фиксированная).

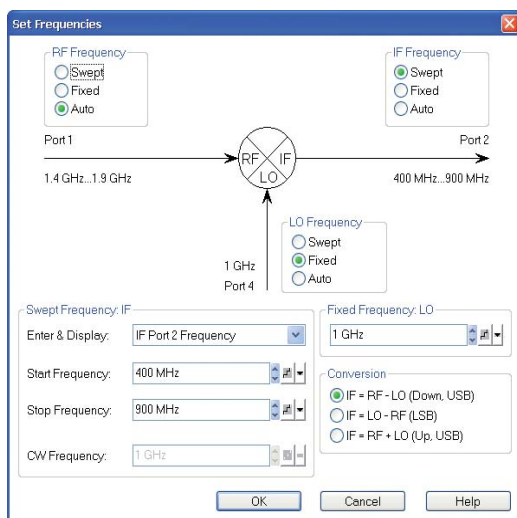
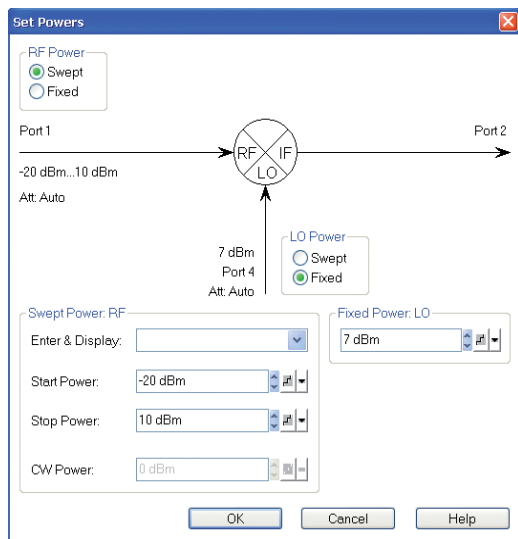


Рис. 8.2.1
Конфигурация частотных диапазонов для частотного качания с фиксированной ПЧ.

Качание мощности

Уровень может качаться на одном из входных портов смесителя. Фиксированный уровень указывается для другого входного порта. ПЧ порт смесителя, главным образом, работает как **пассивный тестовый порт** (исключение: измерение возвратных потерь в ПЧ порта).

Рис. 8.2.2
 Конфигурация диапазонов уровня для
 качания мощности с
 фиксированным уровнем
 гетеродина.



8.2.2 Присоединение опорного смесителя

Не все анализаторы цепей разработаны согласно рис. 2.6.3а, привлекая общий опорный сигнал. Простые приборы обычно не могут обеспечивать частотную отстройку между приемниками и генератором (или они отрабатывают только очень ограниченную отстройку). Чтобы выполнить измерения смесителя, такие анализаторы требуют внешний опорный смеситель, который преобразует опорный канал тестового порта, приписанный к ВЧ порту ИУ (см. следующий рисунок). Использование опорного смесителя также является обычным, когда выполняются измерения группового времени запаздывания для смесителей. Групповое время запаздывания опорного смесителя должно быть известно (или пренебрежимо мало). Следующий рисунок показывает, как мы можем объединять опорный смеситель, используя подраздел „Прямой доступ к генератору и приемнику“ в разделе 7.1.7. Тестовый порт 4 используется для генерации сигнала гетеродина для опорного смесителя и для ИУ.

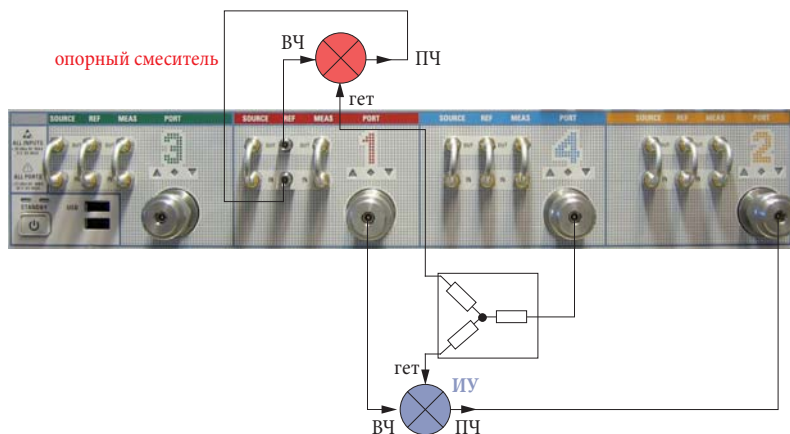


Рис. 8.2.3 Присоединение опорного смесителя.

8.3 Пример 1: Измерение смесителя

В следующем примере мы будем анализировать смеситель с частотным диапазоном по ВЧ от 1,4 ГГц до 1,9 ГГц при фиксированной частоте гетеродина 1 ГГц. Этот смеситель используется как преобразователь частоты вниз с $f_{ПЧ} = f_{ВЧ} - f_{гет}$. Уровень сигнала гетеродина установлен на 7 дБм. Испытательная установка показана на рис. 8.3.1. Сначала мы рассмотрим потери преобразования смесителя. В качестве режима качания используется частотное качание.

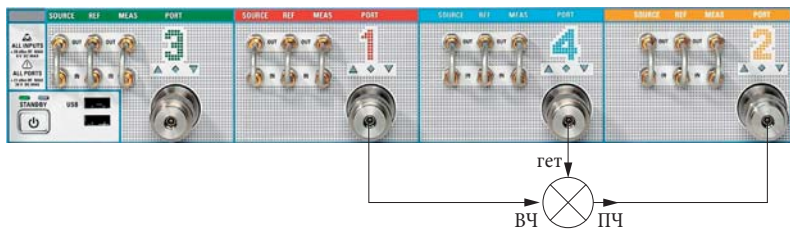


Рис. 8.3.1 Испытательная установка для скалярного измерения смесителя.

Диапазоны частот определяются с помощью режима смесителя, показанного на рис. 8.2.1. После установки его на „Swert“, промежуточная частота обеспечивает частотную ось для измерений. Она конфигурирована на 400 МГц до 900 МГц. ВЧ частота вычисляется автоматически, когда выбирается режим „Auto“. Гетеродин устанавливается на „Fixed“ на 1 ГГц. Используя основной диалог при измерении смесителя (не показан), мы выбираем тестовый порт 4, чтобы

был он нашим портом гетеродина. Меню на рис. 8.2.2 используется для установки мощностей гетеродина и ВЧ сигнала. Обе эти величины конфигурируются как „Fixed“ (фиксированные) мощности.

Чтобы измерить поведение при компрессии, мы должны создать новый отклик в отдельной области диаграммы. Отклик приписывается каналу Ch2 и для этого канала включается режим качания мощности. В меню на рис. 8.2.2 указывается диапазон качания мощности от -20 дБм до 10 дБм. Уровень ВЧ свипируется. Уровень гетеродина имеет фиксированное значение 7 дБм. Чтобы получить самый высокий возможный уровень точности, выполняется калибровка мощности смесителя по обоим каналам Ch1 и Ch2, используя меню на рис. 8.3.2.

Чтобы выполнить калибровку мощности смесителя, сначала к анализатору цепей подсоединяется измеритель мощности вместо ВЧ порта смесителя. В этом порту выполняется калибровка мощности смесителя, которая включает также ПЧ диапазон. Меню, показанное на рис. 8.3.2, автоматически объединяет диапазон частот ПЧ сигнала с калибровкой мощности источника, приводя к облегчению работы. На втором шаге выполняется калибровка мощности приемника в тестовом порту, который позже будет соединен с портом ПЧ смесителей. Эта калибровка мощности приемника основана на предварительной калибровке мощности источника, поэтому тестовые порты, которые нормально присоединены к ВЧ и ПЧ портам смесителя, теперь соединяются проходным соединением с низкими потерями. Третья и последняя стадия это калибровка мощности источника тестового порта, который будет обеспечивать сигнал гетеродина для измерения смесителя. Чтобы выполнить эту калибровку, измеритель мощности подсоединяется к тестовому порту вместо гетеродинного порта смесителя.

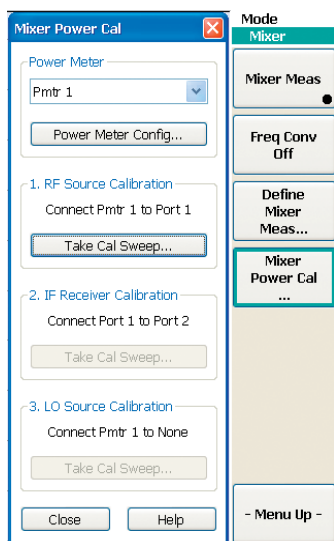


Рис. 8.3.2
 Меню ящик для калибровки
 мощности смесителя.

Рис. 8.3.3 показывает результаты измерений. Если необходимо, диаграмме может быть дано название. Входное поле показано дополнительно на рис. 8.3.3. Точка компрессии может быть вычислена автоматически с помощью статистических функций. Для деталей обратитесь к разделу 7.2.

Комплексный коэффициент отражения в трех портах смесителя может быть измерен без каких-то специальных усилий. На рис. 8.3.4 S-параметры s_{11} и s_{22} показаны ради примера. Как видно из рис. 8.3.1, они соответствуют коэффициентам отражения на ВЧ и ПЧ портах смесителя. После этого одно-портовые измеренные значения могут быть скорректированы по системной ошибке. Когда эти S-параметры измеряются, важно для гетеродинного порта иметь соответствующий уровень гетеродинного сигнала. Это должно быть обеспечено или использованием внешнего генератора, или подходящей конфигурацией анализатора цепей. Каждая из диаграмм на рис. 8.3.4 включает измерение без гетеродинного сигнала в виде красного отклика, чтобы показать важные отличия.

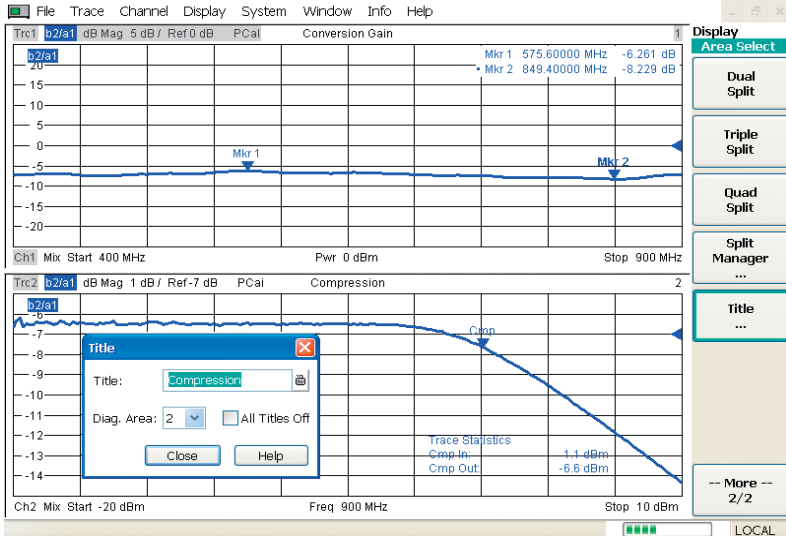


Рис. 8.3.3 Потери преобразования и точка компрессии смесителя.

Чтобы измерить ВЧ-ПЧ развязку, мы можем выполнить измерение s_{21} . Используя частотное качание, измеряется передача в ВЧ диапазоне частот без преобразования частоты. Для этого измерения возможна коррекция системной ошибки. Она выполняется как двухпортовая калибровка, например, используя калибрационную процедуру ТОМ, между тестовыми портами 1 и 2. В процессе измерения необходимый уровень сигнала гетеродина должен быть приложен к гетеродинному порту смесителя. Поскольку частота гетеродина 1 ГГц лежит внутри диапазона частот ВЧ сигнала, просачивание сигнала гетеродина появляется как выброс в отклике (см. нижнюю часть рис. 8.3.4). Для целей иллюстрации было также выполнено измерение развязки без сигнала гетеродина для рис. 8.3.4 (красный отклик).

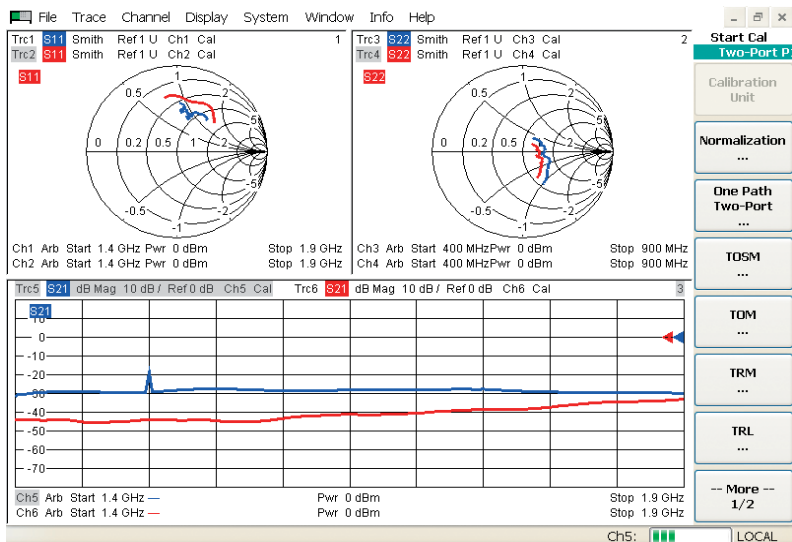


Рис. 8.3.4 Комплексный коэффициент отражения и изоляции смесителя.

8.4 Пример 2: Измерения модуля преобразования частоты ВНИЗ

В главе 1 был введен модуль ВЧ РАСШИРЕНИЯ (рис. 1.4.1). Мы хотели бы исследовать его характеристики передачи с преобразованием частоты для диапазона частот ВЧ сигнала от 3,9 ГГц до 4,1 ГГц. Результат измерений получен на ПЧ порту в диапазоне от 304,4 МГц до 504,4 МГц. Рис. 8.4.1 показывает поведение модуля в полосе пропускания. Отклик подобен одному на рис. 1.4.3, в котором был проанализирован только полосно-пропускающий фильтр. Используя показанные предельные линии, мы можем проконтролировать, соответствует ли поведение модуля необходимым требованиям. Результат контроля допустимого отклонения для отклика Trc1 будет либо зеленым „PASS Trd“ (проходит), либо красным „FAIL Trd“ (не проходит) в случае нарушения допустимого отклонения. Полное измерение автоматически конфигурируется с прогоном прибора в режиме дистанционного управления. Результат контроля допустимого отклонения доступен, как цифровой сигнал, или через команды дистанционного управления. Используя клавишу „Go to Local“ (перейти к местному управлению), вы можете отключить работу в режиме дистанционного управления и выполнить ручные вводы.

При текущих измерениях внешний генератор обеспечивает сигнал гетеродина для модуля. Общая опорная частота 10 МГц (синхронизация подобна рис. 7.1.11) обеспечивает необходимую стабильность частоты между анализатором цепей и внешним генератором. Во многих модулях преобразования частоты соответствующий сигнал гетеродина генерируется внутренне в модуле. Если модуль имеет вход внешней синхронизации, он определенно должен быть использован. Сигнал синхронизации может вырабатываться с подходящим уровнем и частотой, например, используя второй внутренний генератор анализатора цепей.

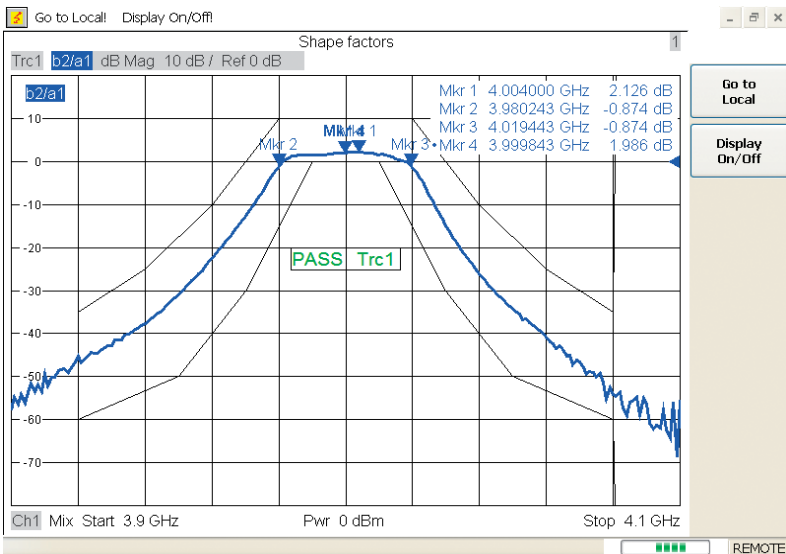


Рис. 8.4.1 Измерения, вовлекающие преобразование частоты на модуле ВЧ РАСШИРЕНИЯ из рис. 1.4.1.

Если синхронизация невозможна, то мы должны столкнуться с частотной отстройкой между анализатором цепей и ИУ. Абсолютная частотная ошибка ИУ должна контролироваться с использованием начального измерения. Приложите входной сигнал с фиксированной частотой в соответствии с требованиями ИУ на частоту модуля и уровень сигнала. Теперь исследуем выходной сигнал, используя частотное качение. Ожидаемая выходная частота должна быть использована как центральная частота. Размах величиной $f_{\text{раз}} = 10$ МГц обычно является адекватным. Число точек N и полоса пропускания $B_{\text{ПЧ}}$ по ПЧ анализатора должна быть выбрана так, чтобы условие $f_{\text{раз}} < N \cdot B_{\text{ПЧ}}$ выполнялось, например, $B_{\text{ПЧ}} = 100$ кГц,

$N = 201$. Частотная ошибка может быть считана сравнением действуюющей и ожидаемой выходной частоты. Это следует принять во внимание в процессе последующих измерений. При конфигурировании частотной оси с включением частотной ошибки мы можем пренебречь условием $f_{\text{раз}} < N \cdot B_{\text{ПЧ}}$ для оставшихся измерений. Кратковременная стабильность ИУ не является, как правило, проблемой, поскольку генераторы, которые обычно используются в настоящее время, связаны с опорным кварцевым генератором через систему фазовой автоподстройки частоты. Для полос пропускания по ПЧ вплоть до 1 кГц, паразитная частотная модуляция, которая связана с кратковременной стабильностью, является обычно пренебрежимо малой.

Точка пересечения IP3 также измеряется обычным образом на смесителе или, как в рассматриваемом случае, на модуле, который выполняет преобразование частоты. Для этого необходим дополнительный источник сигнала и элемент комбинирования (раздел 7.1.10). Рис. 8.4.2 показывает измерение интермодуляции на модуле ВЧ РАСШИРЕНИЯ с использованием частотного промежутка $f_{\text{ВЧ}2} - f_{\text{ВЧ}1}$ величиной 2 МГц. Кроме полезных сигналов при $f_{\text{ПЧ}1}$ и $f_{\text{ПЧ}2}$ рисунок также показывает уровень интермодуляционных продуктов $2f_{\text{ПЧ}2} - f_{\text{ПЧ}1}$ и $2f_{\text{ПЧ}1} - f_{\text{ПЧ}2}$. Подобно примеру 3 измерения в разделе 7.5.2, мы должны сконфигурировать частотное качание так, чтобы измерительный приемник точно измерял частотные выборки $f_{\text{ПЧ}1}$, $f_{\text{ПЧ}2}$, $2f_{\text{ПЧ}2} - f_{\text{ПЧ}1}$ и $2f_{\text{ПЧ}1} - f_{\text{ПЧ}2}$.

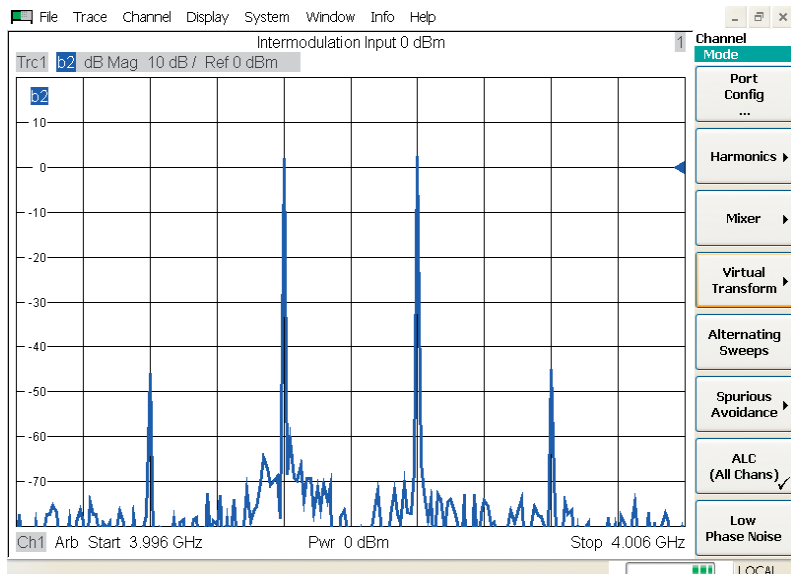


Рис. 8.4.2 Интермодуляционные измерения на модуле ВЧ РАСШИРЕНИЯ из рис. 1.4.1.

8.5 Расширение диапазона частот

Комбинация измерений, вовлекающих преобразование частоты и внешнюю испытательную установку, известно как **расширение частотного диапазона**. Это является способом расширения подходящего векторного анализатора цепей до максимальной рабочей частоты в несколько сотен ГГц. Тестовые порты **модулей частотного расширения** и направляющий элемент, интегрированный в них, реализуются обычно с использованием прямоугольных волноводов. Диапазон рабочих частот модуля тогда, главным образом, определяется частотным диапазоном моды H_{10} волноводов. Следующая таблица дает общий взгляд на этот типичный диапазон частот и связанные размеры волноводов.

рабочая частота в ГГц ¹⁾	диапазон волновода ²⁾	частота отсечки в ГГц	обозначение волновода		внутренние размеры	
			EIA (США) ³⁾	RCSR (UK)	в мм	в дюймах
50–75	V	39,8616	WR-15	WG-25	3,7592 × 1,8796	0,148 × 0,074
60–90	E	48,3567	WR-12	WG-26	3,0988 × 1,5494	0,122 × 0,061
75–110	W	58,9951	WR-10	WG-27	2,5400 × 1,2700	0,100 × 0,050
90–140	F	73,7439	WR-8	WG-28	2,0320 × 1,0160	0,080 × 0,040
110–170	D	90,7617	WR-6	WG-29	1,6510 × 0,8255	0,065 × 0,0325
140–220	G	115,6767	WR-5	WG-30	1,2954 × 0,6477	0,051 × 0,0255
170–260	(Y)	137,1980	WR-4	WG-31	1,0922 × 0,5461	0,043 × 0,0215
220–325	J(H)	173,5151	WR-3	WG-32	0,8636 × 0,4318	0,0340 × 0,0170
325–500	Y	268,1596	WR-2.2	–/–	0,5588 × 0,2794	0,0220 × 0,0110
500–750		393,3008	WR-1.5	–/–	0,3810 × 0,1910	0,0150 × 0,0075
750–1100		589,9512	WR-1	–/–	0,2540 × 0,1270	0,0100 × 0,0050

Таблица 8.5.1 Важные частотные диапазоны волноводов в соответствии со стандартами Великобритании и США.

Модули частотного расширения вырабатывают сигнал воздействия путем использования умножения частоты сигнала генератора от анализатора цепей. Вместо умножения частоты сигнал воздействия может быть также выработан с использованием подходящих процессов смешивания. Опорный и измерительный каналы, разделенные направляющим элементом (например, двойным направленным ответвителем), смешиваются на фиксированную промежуточную частоту, которая обычно выбирается в диапазоне от 15 МГц до 300 МГц. Модули включают подходящие гармонические смесители

- 1) Если мы обратимся к прессе, то коммерчески доступные модули частотного расширения имеются вплоть до частот 500 ГГц.
- 2) Приведенные буквы применимы исключительно к волноводам! Кроме того, различные отличающиеся обозначения частотных диапазонов обычно используются в радиолокационных технологиях и в стандартах различных американских компаний. Буквы, перечисленные здесь, начиная с WR4, не используются в однотипной манере. Индикации в () выполнены по номенклатуре, использованной, например, Oleson Microwave Labs.
- 3) Обозначения волноводов WR-2.2, WR-1.5 и WR-1 использованы только как логическое продолжение стандарта. Если обратиться к прессе, то финальной спецификации пока не существует.

для этой цели. Необходимый сигнал гетеродина вырабатывается либо внешним генератором, либо вторым генератором анализатора цепей. На следующих рисунках применен последний вариант.

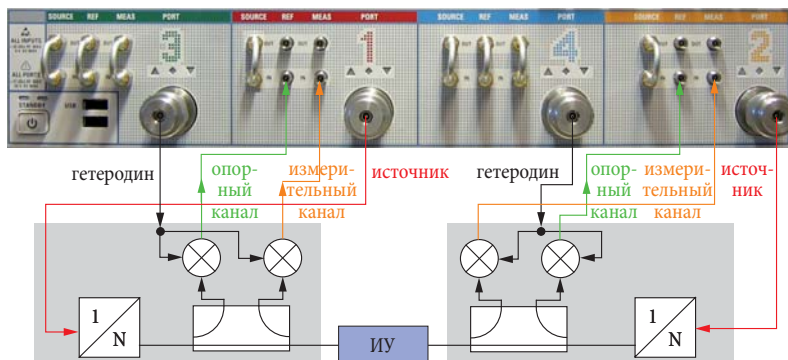


Рис. 8.5.1 Частотное расширение на R&S®ZVA24.

Конфигурация, показанная на рис. 8.5.1, обеспечивает как прямое, так и обратное измерения. Чтобы снизить технические сложности, используют также однонаправленные испытательные установки. В этом случае модуль, расположенный на выходе ИУ, включает только гармонический смеситель для регистрации измерительного канала (см. рис. 8.5.2). Волноводный направленный элемент связи, смеситель для опорного канала и обработка сигнала воздействия для этого модуля не являются больше необходимыми. Однако, полная коррекция системной ошибки невозможна при этих обстоятельствах. Если мы хотим скорректировать влияние согласования нагрузки, нам необходимо измерить значения параметров s_{12} и s_{22} . Однако, упрощенный модуль не измеряет эти величины. Чтобы получить достаточную точность измерений, упрощенный модуль и его соединение с опорной плоскостью должны быть сконфигурированы так чтобы сформировать согласование с ИУ, которое гарантирует настолько малое отражение, как это возможно. Прецизионный фиксированный аттенюатор может быть встроен в упрощенный модуль для этой цели.

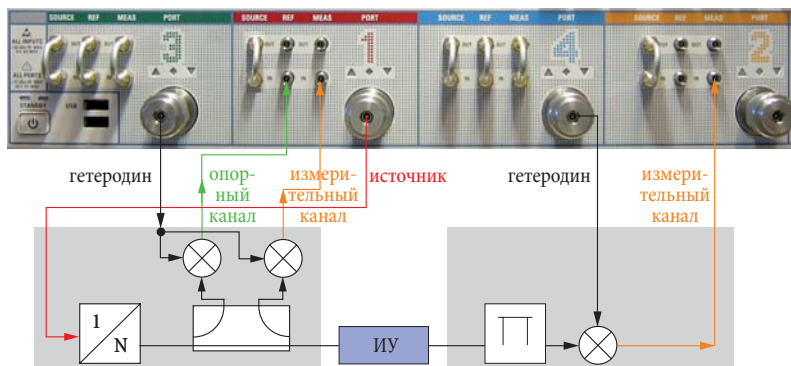


Рис. 8.5.2 Однонаправленное частотное расширение на R&S®ZVA24.

Пример 1 измерений. Мы будем исследовать отрезок волновода длиной 1 дюйм типа WR03 в его частотном диапазоне от 220 ГГц до 325 ГГц. Наши модули частотного расширения это модули типа V03VNA2-T/R от Oleson Microwave Labs. Векторный анализатор цепей должен включать опцию „External generator and receiver access“ (Доступ к внешнему генератору и приемнику), чтобы позволить выполнение схемы, показанной на рис. 8.5.1. Анализатор цепей может быть сконфигурирован, используя произвольный режим. В настоящем случае мы выбрали фиксированную приемную частоту 25,44 МГц в тестовом порту. Модули, которые используются, имеют коэффициент умножения 18 для выработки сигнала воздействия. Частота воздействия на тестовых портах 1 и 2 анализатора цепей равна поэтому $f_b/18$. Смесители в модулях работают в гармоническом режиме и используют 18-ю гармонику сигнала, обозначенного как „LO“ (сигнал гетеродина) на рис. 8.5.1. Частота воздействия в тестовых портах 3 и 4 должна быть указана как $f_b/18 = 25,44$ МГц. Эти тестовые порты работают как активные порты независимо от направления измерения. После конфигурирования произвольного режима ось частот устанавливается на $f_b = 220$ ГГц – 325 ГГц. На анализаторе цепей мы выбираем режим никого фазового шума и выходную мощность, подходящую под модули. Полоса пропускания по ПЧ снижается, как это требуется. Для целей калибровки мы используем волноводный калибровочный набор и TRL процедуру калибровки. Следующий рисунок показывает полную испытательную установку.



Рис. 8.5.3 Испытательная установка для векторного анализа цепей в частотном диапазоне от 220 ГГц до 325 ГГц.

Поперечное сечение волновода WR-03, используемого здесь, является высоко филигранным с размерами меньше одного миллиметра. На рис. 8.5.4 это можно видеть в центре волноводного фланца. Фланец типа MIL-F-3922/67B-M03 продлевается двумя дополнительными регулировочными штырями, которые можно увидеть прямо выше и ниже поперечного сечения волновода.



Рис. 8.5.4 MIL-F-3922/67B-M03 волноводный фланец с монетой для сравнения размеров.

Как измеряемые величины мы выбираем передачу и отражение.

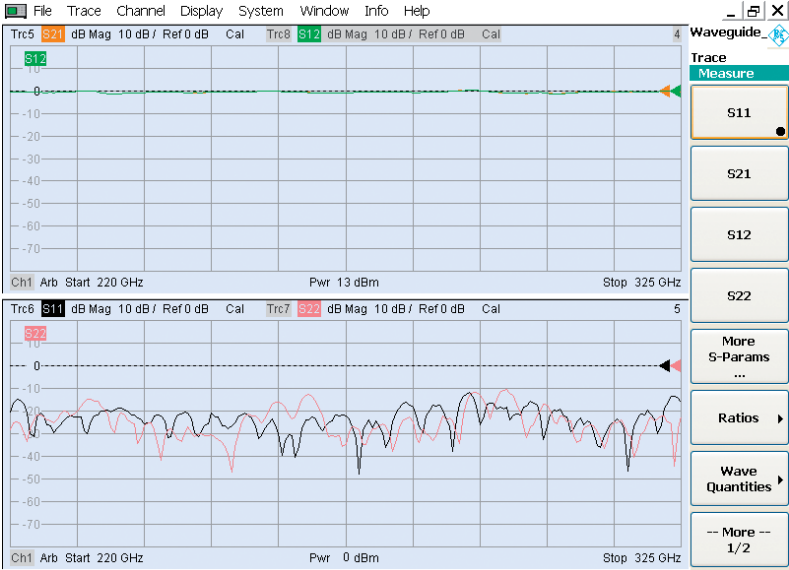


Рис. 8.5.5 Результаты измерений для отрезка волновода.

Пример 2 измерений. Используя ту же самую конфигурацию, мы будем теперь исследовать усилитель миллиметрового диапазона. Усилитель конфигурируется на центральную частоту 215 ГГц, и вот почему его передача существенно уменьшается выше 230 ГГц.



Рис. 8.5.6 Исследование усилителя миллиметрового диапазона.

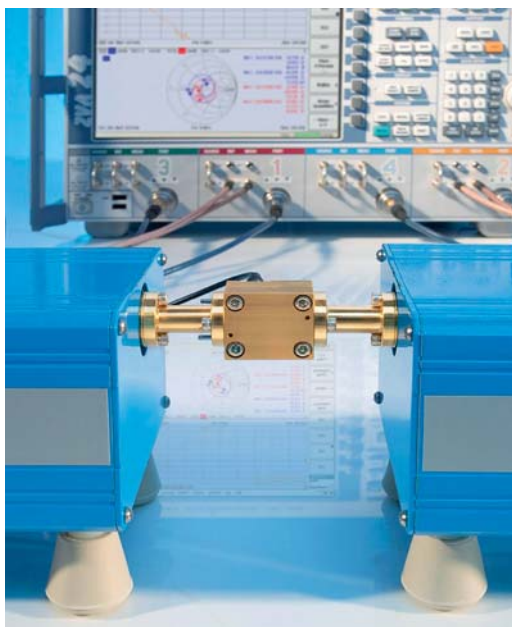


Рис. 8.5.7
Усилитель миллиметрового диапазона (Фраунгоферовский институт) как ИУ на модулях частотного расширения Oleson V03VNA2-T/R.

A8 Индекс (Русский – English)

Символы (Symbols)

- GPIB (шина интерфейса общего применения – General Purpose Interface Bus) 84
- GSG-измерительная головка (GSG probe) 127
- I/Q (синфазно-квадратурная) демодуляция (I/Q-demodulator) 63
- LAN интерфейс (LAN interface) 85
- LRL техника (LRL technique) 141
- LTI система (linear time invariant system) 249
- MEAS WIZARD (МАСТЕР ИЗМЕРЕНИЙ) 70
- N-портовая переключающая матрица (N-port switching matrix) 93
- N-портовое устройство (N-port device) 19
- OSM техника (OSM technique) 134
- PI контроллер (PI controller) 332
- SI префикс (SI prefixes) 182
- S-матрица смешанного режима (mixed-mode S-matrix) 223
- TNA техника (TNA technique) 141
- TOM техника (TOM technique) 140
- TOSM техника (TOSM technique) 147
- TRL техника (TRL technique) 141
- TRM техника (TRM technique) 140
- T-контроллер (T-check) 160
- UNDO (отмена действия) 70
- UOSM техника (UOSM technique) 141
- USB интерфейсов (USB interface) 86
- USB-хаб (USB hub) 86

A

- автоматическая длина (auto length) 207
- автоматическая регулировка мощности (APM) (automatic level control (ALC)) 332
- автоматическая регулировка усиления (APU) (automatic gain control (AGC)) 62
- аккредитованный (accredited) 185
- активная тестовая установка (active test set) 59
- активный смеситель (active mixer) 397
- активный тестовый порт (active test port) 27
- амплитудный дисбаланс (amplitude imbalance) 235

анализатор цепей (network analyzer) 14
 анализатор цепей с $N + 1$ приемниками ($N+1$ receiver network analyzer) 91
 анализатор цепей с N -портовой переключаемой матрицей (network analyzer with N -port switching matrix) 92
 анализ во временной области (time-domain analysis) 249
 антенна (antenna) 415
 антенная решетка (array antenna) 414
 апертура (aperture) 202

Б

базовая единица SI (SI base unit) 181
 безусловно устойчивой (unconditionally stable) 209
 безэховая камера (anechoic chamber) 419
 ближнее поле (near field) 417
 блок постоянного тока (DC block) 59
 боковой лепесток (side lobe) 425
 более емкостный (more capacitive) 117
 более индуктивный (more inductive) 117

В

векторный анализатор цепей (vector network analyzer) 20
 величина ослабления по мощности (power attenuation figure) 183
 величина усиления по мощности (power gain figure) 183
 верхняя боковая полоса (upper sideband) 390
 взаимность (reciprocity) 416
 взятие выборок (sampling) 265
 вилка (штыревой) (male (M)) 189
 виртуальная трансформирующая цепь (virtual transformation network) 210
 виртуальный трансформатор импеданса (virtual impedance transformer) 215
 вистатический радиолокатор (bistatic radar) 427
 внедрение виртуальных цепей (embedding) 210
 внешняя тестовая установка (external test set) 377
 внешний запуск (external trigger) 237
 внешний проводник (outer conductor) 106
 внутренний паразитный отклик (inherent spurious response) 392
 воздействие (response) 251
 воздушная линия (air line) 117

волновая величина (wave quantity) 16
 волновод (waveguide) 119
 волновой фронт (wavefront) 415
 вращающееся сочленение (rotary joint) 415
 временное качание (time sweep) 71
 время выборки (sample time) 264
 встроенная программа (firmware) 27
 вторая гармоника (second harmonic) 351
 вход с внешним триггером (external trigger) 83
 ВЧ-ПЧ просачивание (RF-IF feedthrough) 393
 выборка во временной области (time-domain samples) 264
 высокоскоростной осциллограф (high-speed oscilloscope) 253

Г

гармоника (harmonic) 351
 гармоническая настройка (harmonic tuning) 384
 гармоническая сетка (harmonic grid) 264
 гармонический смеситель (harmonic mixer) 397
 гармонический уровень (harmonic level) 352
 генератор (generator) 27
 генератор на железо-иттриевом гранате (ЖИГ) (Yttrium-Iron-Garnet (YIG) oscillator) 61
 генератор ступенчатого сигнала ((YIG) oscillator step generator) 253
 генератор с числовым управлением (ГЧУ) (numerically controlled oscillator (NCO)) 62
 генератор управляемых напряжением (ГУН) (voltage-controlled oscillator (VCO)) 61
 генерация графика отклика (trace generation) 68
 гетеродин (local oscillator) 388
 гетеродинный принцип (heterodyne principle) 61
 гистерезисные эффекты (hysteresis effect) 61
 главный лепесток (main lobe) 425
 глубиномер для коаксиальных соединителей (pin depth gage) 100
 головка (probe) 127
 гомодинный принцип (homodyne prinziple) 21

Д

двойной направленный ответвитель (dual directional coupler) 50

двухзеркальный компактный антенный полигон (dual-reflector compact test range) 420

двух портовое устройство (четырёхполюснике) (two-port device) 17

двухтональный сигнал (two-tone signal) 362

декартова диаграмма (cartesian diagram) 77

делитель мощности (power divider) 347

диаграмма направленности (radiation diagram) 424

диаграмма направленности излучения (radiation pattern) 423

диаграмма Смита (Smith chart) 77

диапазон качания (sweep range) 73

динамометрический ключ (torque wrench) 100

дисбаланс (imbalance) 235

дифференциальный режим (differential mode) 221

дифференциальный тон (differential tone) 363

доступная мощность (available power) 381

Е

единичная ступенька (unit step) 251

Ж

желаемый уровень (desired level) 332

З

задержка запуска (trigger delay) 238, 243

запросы (queries) 89

зондовая станция (wafer prober) 127

И

измерение эффективной площади рассеяния (radar cross section measurement) 427

измерительный вход по постоянному току (DC measurement input) 246

измерительный приемник (measurement receiver) 28

изоляция ВЧ-ПЧ (RF-IF isolation) 393

изоляция гетеродин-ВЧ (LO-RF isolation) 393

изоляция гетеродин-ПЧ (LO-IF isolation) 393

изоляция (развязка) (isolation) 171

изопропиловый спирт (isopropyl alcohol) 100

импеданс свободного пространства (free-space impedance) 417

импульс Дирака (Dirac impulse) 250
 импульсная характеристика (impulse response) 251
 импульсный рабочий режим (pulsed operating mode) 243
 инвертированная диаграмма Смита (inverted Smith chart) 77
 инвертированное преобразование (inverting conversion) 390
 инжектирование (biasing) 58
 интерфейс (interface) 90
 искажающая цепь (error network) 104
 испытательное приспособление (test fixture) 124
 источник постоянного тока (DC supply) 59
 исходные (raw) 27
 исходные измеренные значения (raw measured values) 106
 исходные системные данные (raw system data) 105
 исходные численные измеренные значения (raw numerical measured values) 67

К

калибрационный набор (calibration kit) 107
 калибрационный сертификат (calibration certificate) 185
 калибровка (calibration) 105
 калибровка мощности (power calibration) 334
 калибровка мощности источника (source power calibration) 335
 калибровка мощности приемника (receiver power calibration) 337
 калибровка пользователя (user calibration) 67
 калибровочный стандарт (calibration standard) 105
 канал (channel) 71
 каузальный (causal) 250
 качание по мощности (power sweep) 73
 качание частоты (frequency sweep) 71
 клавиша мощности (HELP) 70
 клавиши ввода данных (data entry keys) 70
 клавиши навигации (navigation keys) 70
 когерентность (coherence) 414
 команды (commands) 88
 команды предустановки (setting commands) 89
 компактный антенный полигон (compact antenna test range (CATR)) 420
 компенсированный компактный антенный полигон (compensated compact test range (CCTR)) 420
 компоненты ошибки (error term) 105

- компьютер (PC, computer) 27
 конечная частота (stop frequency) 73
 константа Джозефсона (Josephson constant) 182
 константа фон Клитцинга (von Klitzing constant) 182
 контроллер (controller) 332
 концепция множественного источника (multiple source concept) 340
 копланарный волновод (coplanar waveguide) 127
 коррекция системной ошибки (system error correction) 105
 коэффициент замедления волны (velocity factor) 311
 коэффициент ответвления (coupling coefficient) 28
 коэффициент отражения (reflection coefficient) 16
 коэффициент подавления синфазного режима (КПСР) (common-mode rejection ratio (CMRR)) 236
 коэффициент преобразования смесителя (mixer constant) 388
 коэффициент стоячей волны (КСВ) (standing wave ratio (SWR)) 198
 коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) (voltage standing wave ratio (VSWR)) 198
 коэффициент усиления антенны (antenna gain) 426
 коэффициент усиления по мощности дифференциального режима (differential-mode power gain) 236
 коэффициент усиления по мощности синфазного режима (common-mode power gain) 236
 коэффициент чувствительности (sensitivity coefficient) 174
 коэффициент шума (noise factor) 101
 краевая емкость (fringing capacitance) 111
 кросс модуляция (cross modulation) 363
 кросс-поляризация (cross-polarization) 420

Л

- линейная ошибка (linear error) 103
 линейная цепь (linear network) 249
 линейное качание частоты (linear frequency sweep) 71
 линейное усреднение (linear average) 172
 линейный стандарт (line standard (L)) 117
 линия передачи типа витая пара (twisted pair transmission line) 221
 логарифмическое частотное качание (logarithmic frequency sweep) 71

М

- максимальный уровень импульса (maximum impulse level) 396
- матрица S-параметров (S-матрица, или матрица рассеяния) (S-parameter matrix) 19
- международная система единиц (International System of Units) 181
- метод замещения мощностью постоянного тока (DC power substitution method) 186
- многократные отражения (multiple reflection) 36, 257
- многолучевое распространение (multipath propagation) 297
- модальная декомпозиция (modal decomposition) 222
- мод объемного распространения (bulk propagation mode) 318
- модуль частотного расширения (frequency extension modules) 407
- монолитной интегральной схемой СВЧ (microwave monolithic integrated circuit (MMIC)) 216
- моностатический радиолокатор (mono-static radar) 427
- мост (bridge) 40
- мост для измерения КСВН (VSWR-bridge) 41

Н

- нагрузка короткого замыкания (K3) (Short (S)) 109
- нагрузка холостого хода (XX) (Open (O)) 110
- направленный ответвитель (directional coupler) 44
- настройка графиков (trace setting) 76
- настройка каналов (channel setting) 71
- национальные и интернациональные стандарты (national and international standards) 185
- начальная частота 73
- не вставляемое устройство (noninsertable device) 151
- независимость от времени (time invariance) 250
- неинвертированное преобразование (noninverting conversion) 390
- неинвертированный случай (noninverted case) 390
- нелинейная ошибка (nonlinear error) 103
- неопределенность измерения (measurement uncertainty) 96
- непрерывное преобразование Фурье (НПФ) (continuous Fourier transform) 261
- несимметричные S-параметры (single-ended S-parameter) 222
- нижняя боковая полоса (lower sideband) 390
- низкочастотное пропускание (lowpass mode) 279

О

- область дальней зоны (far-field region) 416
область определенности (ambiguity range) 270
облучатель (feed) 420
оборудование для автоматической калибровки (automatic calibration equipment) 108
обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ) (inverse fast Fourier transform (IFFT)) 283
обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ) (inverse discrete Fourier transform (IDFT)) 264
обратное непрерывное преобразование Фурье (ОНПФ) (inverse continuous Fourier transform (IFTC)) 261
обратные потери (return loss) 184
однозеркальный компактный антенный полигон (single-reflector compact test range (SCR)) 420
одно-портовое устройство (one-port device) 16
однотонный сигнал (single-tone signal) 351
оконная функция в частотной области (Window function) 268
опорная плоскость (reference plane) 106
опорный импеданс (reference impedance) 16
опорный приемник (reference receiver) 29
опция измерений во временной области (time-domain option) 284
основной отражатель (main reflector) 420
отклик (response) 251
отклики прибора (device responses) 88
отклик на ступенчатое воздействие (step response) 251
относительная ширина импульса (relative impulse width) 277
отражение (reflection) 184
отраженная волна (reflected wave) 16
отсчеты в частотной области (frequency samples) 264
оцененное значение (estimated value) 172
ошибка стационарного состояния (steady state error) 332

П

- падающая волна (incident wave) 16
пакетный сигнал (burst signal) 281
паразитные отклики (spurious response) 392
параметр контроллера (controller parameter) 333
параметр Т-контроллера (T-check parameter) 161

- параметры рассеяния (S-параметры) (scattering parameter (S-parameter)) 17
- парциальное измерение (partial measurement) 66
- пассивная тестовая установка (passive test set) 60
- пассивный тестовый порт (passive test port) 398
- первая гармоника (first harmonic) 351
- первичные стандарты (primary standards) 185
- первоначальный метр (original meter) 181
- передача (transmission) 184
- перекрестные потери на ближнем конце (near-end crosstalk loss (NEXT)) 227
- перекрывание (overlap) 393
- перемножители (multipliers) 388
- пересечение второго порядка (SOI) (second order intercept (SOI)) 365
- пересечение третьего порядка (TOI) (third order intercept (TOI)) 365
- пересчет ближнего поля (near-field transformation) 417
- переходное затухание на дальнем конце кабеля 228
- периодический спектр (periodical spectrum) 265
- петля фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) (phase locked loop (PLL)) 60
- печатные платы (printed circuit boards (PCBs)) 123
- пирамидальный поглотитель (pyramidal absorber) 419
- планарность (planarity) 129
- плоский волновой фронт (plane wavefront) 416
- повторяемости (repeatability) 97
- подавление боковых лепестков (side-lobe suppression) 296, 425
- подавление гармоник (harmonic suppression) 352
- подача сигнала (signal feeding) 415
- подложка (substrates) 123
- позиционер (positioner) 415
- полевые транзисторы (field effect transistors (FETs)) 353
- полная верификация (full verification) 164
- полоса пропускания ПЧ тракта (полоса измерений) (measurement bandwidth) 75
- полоса частот (center frequency) 73
- полосно-пропускающий режим (bandpass mode) 279
- полярная диаграмма (polar diagram) 77

- поперечное радиолокационное сечение (radar cross section (RCS)) 428
- поправка на направленность (directivity) 31
- поправка на отражение (reflection tracking) 30
- постоянная времени (time constant) 257
- потери кабеля (cable loss) 229
- потери передачи (transmission loss) 184
- предварительный усилитель (preamplifier) 101
- предел выгорания смесителя (mixer burnout limit) 396
- предельная линия (limit line) 83
- преобразование вверх (up-conversion) 390
- преобразование вниз (down-conversion) 390
- преобразование частоты на гармонике (harmonic mixing) 65
- прецизионный резистор (precision resistor) 246
- приемника (receiver) 27
- прием по зеркальному каналу (image reception) 391
- прием сигнала (signal retransmission) 415
- признание (recognition) 159
- программно-назначаемые клавиши (soft keys) 69
- продукт интермодуляции (intermodulation product) 363
- продукт интермодуляций (intermodulation product) 363
- продукты смешивания высокого порядка (higher order mixing products) 392
- произвольный режим (arbitrary mode) 341
- просачивание гетеродин-ВЧ (LO-RF feedthrough) 393
- просачивание гетеродин-ПЧ (LO-IF feedthrough) 393
- противонаправленный ответвитель (reverse coupler) 347
- проходной переход (Through (T)) 115, 122
- процедуры обработки ошибок (error handling) 89
- прямая электромагнитная связь (direct electromagnetic coupling) 318
- прямой доступ к генератору и приемнику (direct generator and receiver access) 343
- прямоугольное окно (rectangle window) 268

Р

- равномерное распределение (прямоугольное распределение) (uniform distribution (rectangular distribution)) 173
- радиолокатор с инверсной синтезированной апертурой (inverse synthetic aperture radar (ISAR)) 429

радиочастотный сигнал (radio frequency signal) 388
 разрешение по времени (time resolution) 266
 распространение в свободном пространстве (free-space propagation) 415
 рассогласование (mismatch) 164
 рассогласование измерительного порта 35
 рассогласование источника (source match) 138
 расстояние дальней зоны (far-field distance) 415
 расширение частотного диапазона (frequency extension) 407
 режим прерывания (chopping mode) 67
 режим смесителя (mixer mode) 397
 режим чередования (alternating mode) 67
 рефлектометрия во временной области (time domain reflectometry) 253
 розетка (гнездовой) (female (f)) 189
 ряд Тэйлора (Taylor series) 350

С

самонаведенное напряжение (self-induced voltage) 237
 свертка (convolution) 251
 сервисные клавиши (support keys) 70
 сигнал промежуточной частоты (intermediate frequency signal (IFS)) 388
 симметричная (балансная) линия передачи (balanced transmission line) 221
 симметричная линия (balanced line) 221
 синфазная (inphase) 63
 синфазно-квадратурный смеситель (I/Q mixer) 397
 синфазный режим (common-mode) 221
 система единиц (system of units) 181
 систематические ошибки измерений (systematic measurement errors) 96
 система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) (phase locked loop (PLL)) 64
 скалярный анализатор цепей (scalar network analyzer) 20
 скользящая нагрузка (sliding match) 112, 122
 случайные ошибки измерений (random measurement error) 96
 смеситель с выделением боковой полосы (sideband separation mixer) 397

смеситель с подавлением зеркального канала (image rejection mixer) 397
 смещение (offset) 129
 смещение длины (length offset) 215
 смещенная нагрузка короткого замыкания (КЗ) (от англ. offset short) 121
 согласование мощности (power matching) 381
 согласованная нагрузка (match (M) (or load)) 111, 122
 спокойная зона (quiet zone) 421
 стандарт LXI (LXI standard) 90
 стандарт SCPI (SCPI standard) 87
 стандарт аттенюатора (attenuator standard (A)) 118
 стандарт Битти (Beatty standard) 162
 стандарт неизвестного проходного перехода (unknown through (U)) 118
 стандартное отклонение (standard deviation) 172
 стандарт отражения (reflect standard (R)) 117
 стандарт симметричной цепи (symmetrical network (N)) 118
 стробирование по дальности (hardgating) 422
 ступенчатый аттенюатор генератора (generator step attenuators) 56
 ступенчатый аттенюатор приемника (receiver step attenuator) 56
 субгармонический смеситель (subharmonic mixer) 397
 субрефлектор (subreflector) 420
 сумматор (combiner) 346
 сферический волновой фронт (spherical wavefront) 415

Т

таймслот (timeslot) 243
 тепловое равновесие (thermal equilibrium) 97
 тепловой шум (thermal noise) 101
 термо-компенсированный кварцевый генератор (ТККВ) (temperature-compensated crystal oscillator (TCXO)) 60
 термостатированный кварцевый генератор (ТСКВ) (oven controlled temperature crystal oscillator (OCXO)) 60
 тестирование на открытом антенном полигоне (open site testing) 417
 тестовая установка (test set) 26
 тестовой порт (test port) 26
 тест точности измерения (measurement accuracy test) 160

- техника самокалибровки (self-calibration techniques) 117
- ток смещения (biasing current) 397
- точечный запуск (point trigger) 243
- точка 1 дБ компрессии усиления (1 dB gain compression point) 348
- точка 1-дБ компрессии (1 dB compression point) 347
- точка короткого замыкания (short-circuit point) 17
- точка пересечения n-го порядка (n-th order intercept point) 364
- точка пересечения по второй гармонике (second harmonic intercept point) 353
- точка пересечения по третьей гармонике (third harmonic intercept point) 354
- точка согласования (matching point) 17
- точка холостого хода (open-circuit point) 17
- трех-портовая цепь (three-port network) 19
- тройный сигнал передачи (triple transit signal) 318

У

- угол азимута (azimuth angle) 424
- угол места (elevation angle) 424
- удаление виртуальных цепей (deembedding) 216
- уравнение дальности радиолокатора (radar range equation) 428
- уровень (level) 184
- уровень мощности (power level) 184
- усилитель высокой мощности (high power amplifier) 376
- усилитель мощности (boosted source) 376
- условно устойчивый (unconditionally stable) 210
- установочные клавиши (setup keys) 70

Ф

- Фазовое запаздывание (phase delay) 205
- фазовый дисбаланс (phase imbalance) 235
- фактический уровень (actual level) 332
- фактор формы (shape factor) 101
- формула Эйлера для комплексных чисел (Euler's formula for complex numbers) 434
- фундаментальная (основная) частота (fundamental frequency) 351

X

- характеризация (characterization) 107
характеристические данные (characteristic data) 106

Ц

- центральная частота (center frequency) 73
цепочка калибровки (calibration chain) 185
цепочка обработки данных (processing chain) 67
цепь инжектора постоянного тока (bias T) 58
цифровая обработка сигналов (ЦОС) (digital signal processing (DSP)) 62
цифровое управление (digital control) 333
цифровой интерфейс (digital interface) 83

Ч

- частичный запуск (partial trigger) 245
частная производная (partial derivatives) 174

Ш

- шина IEC/IEEE (IEC bus/IEEE bus) 84
ширина лепестка по уровню половинной мощности (half power beam width (HPBW)) 425
ширина шага апертуры (aperture step width) 202

Э

- эквивалентное фокусное расстояние (equivalent focus length) 420
экспериментальное стандартное отклонение (experimental standard deviation) 172
электрическая длина (electrical length) 206
эффективная направленность (effective directivity) 164
эффективная поправка на отражение (effective reflection tracking) 170
эффективное согласование источника (effective source match) 168
эффективное согласование нагрузки (effective load match) 171
эффективность (efficiency) 245
эффективность приращения мощности (power added efficiency) 245
эффективные системные данные (effective system data) 105
эффект компрессии (compression effects) 103

A9 Текущие модели анализаторов цепей компании Роде и Шварц¹⁾

СВЧ электроника ставит перед измерительным оборудованием непрерывно усложняющиеся задачи. Измерения на печатных платах и полупроводниковых подложках, антенные и многопортовые измерения, возрастающие требования к динамическому диапазону и скорости. Анализаторы цепей Роде и Шварц созданы для решения самых сложных измерительных задач. Благодаря широкой номенклатуре пользователь может подобрать наиболее подходящий измерительной задаче прибор, в то же время не переплачивая за неиспользуемые функции.

Поддержка описываемых в этой книге функций сочетается в приборах с рядом возможностей, облегчающих работу пользователя:

- ◆ диапазон частот от 5 кГц до 750 ГГц;
- ◆ модели с количеством портов от 1 до 24, коммутационные матрицы для увеличения количества измерительных портов;
- ◆ поддержка режима анализа спектра и внешних измерителей мощности (R&S®NRP).
- ◆ удалённое управление прибором по интерфейсам USB, Ethernet, GPIB;
- ◆ эмуляция команд удалённого управления различных приборов, в том числе других производителей;
- ◆ исполнения и аксессуары для полевых условий;
- ◆ модели с аккумуляторным питанием;
- ◆ сенсорный экран;
- ◆ множество функций обработки измеренных данных, маркерных функций, помощников;
- ◆ экспорт результатов в виде протоколов и снимков экрана.

Более детальное обсуждение моделей следует далее. Если у Вас возникают какие-либо вопросы, пожалуйста, обратитесь в ближайший офис продаж компании Роде и Шварц. Для получения спецификаций, а также другой информации о приборах, вы можете посетить сайт компании в сети интернет по адресу www.rohde-schwarz.com/ru. Не забывайте, что информация является предметом постоянного обновления.

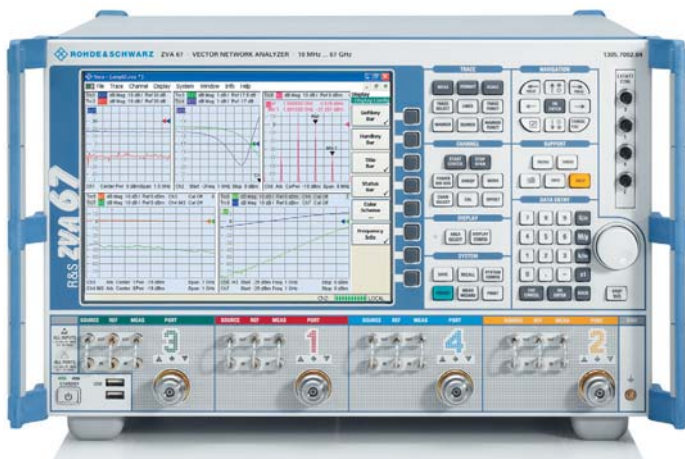
1) На декабрь 2017 года.

Сравнение некоторых характеристик анализаторов цепей

Характеристики	ZVA / T	ZNB (T)	ZND	ZNL	ZVL / ZPH	ZVH
Количество СВЧ источников	до 4	до 2	1	1	1	1
Режим реальных дифференциальных измерений (контроль фазы внутренних генераторов)	•					
Режим измерения смесителей	•	•				
Режим измерения гармоник и ИМЗ	•	•				
Измерение горячих S-параметров	•	•				
Режим произвольного конфигурирования частот	•	•				
Аттенюаторы генераторов	•	•				
Аттенюаторы приёмников	•	•		•		
Встроенные цепи подачи напряжения смещения (Bias tees)	•	•				•
Анализ во временной области	•	•	•	•	•	•
Калибровка мощности (измерителями мощности)	•	•	•			
Поддержка автоматических калибровочных модулей	•	•	•	•		
Поддержка проходных калибровочных модулей	•	•				
Входы для измерения постоянного напряжения	•	•				
Возможность автономной работы				•	•	•

Наличие значка • означает, что данная функция доступна в базовой конфигурации прибора или в виде опции. Некоторые функции требуют наличия по крайней мере трех измерительных портов. В отдельных случаях это возможно при использовании внешнего генератора.

R&S®ZVA: приборы для наиболее требовательных задач



Приборы R&S®ZVA обладают самыми большими возможностями в семействе векторных анализаторов цепей компании Rohde&Schwarz. Эти инструменты доступны в двух- и четырехпортовых вариантах для различных частотных диапазонов (до 8, 24, 40, 50, 67 и 110 ГГц). При динамическом диапазоне до 145 дБ и скорости измерений от 3,5 мкс на одну точку этот прибор обеспечивает низкую погрешность измерений и широкий выбор аппаратных и программных возможностей, встроенных и опциональных. Перечислим несколько уникальных характеристик линейки:

- ◆ цифровая система АРУ с настраиваемой полосой пропускания;
- ◆ два полнофункциональных приёмных тракта в каждом порту (опорный и измерительный);
- ◆ два цифровых приёмника в каждом физическом приёмном тракте (с возможностью разноса частот).

Прямой доступ к трактам генераторов и приёмников повышает гибкость прибора, позволяет настраивать конфигурации для измерений:

- ◆ с высокой мощностью;
- ◆ с антеннами;
- ◆ с изменяемым импедансом нагрузки;
- ◆ характеристик и моделирования цепей в нелинейном режиме.

Конфигурация прибора с 4 встроенными источниками СВЧ сигнала повышает гибкость при измерении нелинейных цепей и конвертеров с несколькими каскадами преобразования.

Блок расширения R&S®ZVAX-TRM



Дополнительный модуль предназначен для контроля сигналов при измерении характеристик активных радиочастотных компонентов.

Мощные направленные ответвители позволяют работать с уровнями сигнала до 40 дБм, три встроенных импульсных модулятора обеспечивают время нарастания/спада радиоимпульсов от 5 нс.

Модуль может быть снабжён сумматорами сигналов для измерения интермодуляционных искажений и измерения ГВЗ преобразователей двухтоновым методом, усилителями выходного сигнала для увеличения выходной мощности, а также малошумящими усилителями для измерения коэффициента шума устройств (внесено в реестр СИ РФ).

Прямой доступ к трактам передачи и приёма даёт возможность использования внешних компонентов (усилителей, аттенюаторов и т.п.) и делает модуль пригодным для тестирования «за одно подключение» даже таких сложных изделий, как ППМ АФАР.

R&S®ZNB – высокая скорость измерений и удобство использования



Анализатор цепей R&S®ZNB олицетворяет современный подход Rohde&Schwarz к приборам: превосходные технические характеристики сочетаются с высокой скоростью измерений и удобным, продуманным интерфейсом с сенсорным экраном.

Основные технические характеристики:

- ◆ 2 или 4 измерительных порта;
- ◆ 2-й внутренний источник (опция) для 4-портовых моделей;
- ◆ Полосы ПЧ: от 1 Гц до 1 МГц (опционально до 10 МГц);
- ◆ Динамический диапазон до 140 дБ (тип. 150 дБ);
- ◆ Широкий диапазон мощности: от –85 дБм до +13 дБм;
- ◆ Высокая скорость измерений: < 5 мс;
- ◆ Анализ во временной области (опция);
- ◆ Измерения с преобразованием частоты (опция);
- ◆ Интермодуляционные измерения (опция);
- ◆ Большой сенсорный дисплей диагональю 30,7 см (12,1");

Линейка анализаторов R&S®ZNB перекрывает диапазон частот от 9 кГц до 40 ГГц и предназначена главным образом для измерения пассивных устройств и базового анализа усилителей и преобразователей.

Преобразователи частот R&S®ZVA-Zxxx и R&S®ZCxxx – анализ цепей выше 67 ГГц



Преобразователи частот (конверторы) Rohde&Schwarz обеспечивают проведение анализа электрических цепей в диапазоне частот от 50 до 750 ГГц с использованием анализаторов цепей R&S®ZVA24/40/50/67 или R&S®ZVT20. Большой динамический диапазон и высокая выходная мощность позволяют решать множество задач в миллиметровом диапазоне длин волн. Они легко монтируются и автоматически конфигурируются в интерфейсе анализаторов, очень удобны в работе и обеспечивают быстрое проведение измерений.

Для российских пользователей могут быть также интересны волноводные конвертеры и волноводные калибровочные наборы с отечественными сечениями.

Многопортовые решения Rohde&Schwarz

У нас есть столько портов, сколько вам нужно.

Анализатор цепей R&S®ZNB с коммутационными матрицами R&S®ZN-Z84/-Z85



- ◆ От 10 МГц до 8,5 / 20 ГГц
- ◆ Время переключения: LAN < 2 мс, USB < 1 мс, DC < 0,1 мс
- ◆ Конфигурации матриц на 6, 12, 18, 24 порта
- ◆ Возможность подключения нескольких матриц
- ◆ Автоматическое конфигурирование подключенных матриц
- ◆ Алгоритмы калибровки с уменьшенным количеством подключений

Векторный анализатор цепей R&S®ZNBТ8/ZNBТ20: множество портов без ухудшения характеристик



- ◆ Частотный диапазон от 9 кГц до 8,5 / 20 ГГц
- ◆ Конфигурации от 4 до 24 портов (с шагом в 4)
- ◆ Возможность подключения коммутационных матриц (конфигурации с более чем 100 портами)

- ◆ Выходная мощность +13 дБм @ 1 ГГц, +8 дБм @ 10 ГГц
- ◆ Полоса фильтра ПЧ от 1 Гц до 10 МГц
- ◆ Возможность управления внешними устройствами (управление на производственных линиях)
- ◆ Алгоритмы калибровки с уменьшенным количеством подключений

Автоматические калибровочные модули



- ◆ Частотный диапазон от 100 кГц до 8,5 ГГц
 - R&S®ZN-Z51: 2/4 порта N /sma/ 7/16”
 - R&S®ZN-Z151: 2 порта, N (гнездо)
 - R&S®ZN-Z152: 6 портов, SMA (гнездо)
 - R&S®ZN-Z153: 4 порта, SMA (гнездо)
 - R&S®ZN-Z154: от 4 до 24 портов, sma (гнездо)
- ◆ R&S®ZV-Z58, до 8 ГГц, 8 портов, N (гнездо) / 3,5 мм
- ◆ R&S®ZV-Z59, до 20 ГГц, 6 портов, 3,5 мм

Эта книга является идеальной для специалистов, начинающих работать в области анализа цепей, и дополняет специализированную информацию, содержащуюся в рабочих инструкциях, рекомендациях по применению, или в академических статьях. Книга может также служить полезным справочником для специалистов.

«Основы векторного анализа цепей»

Автор Michael Hiebel

2-е издание, исправленное
и дополненное

Для получения экземпляра книги обратитесь
в Представительство ROHDE & SCHWARZ В РОССИИ

г. Москва

117335, Нахимовский проспект, 58
Тел.: +7(495) 981 35 60
Факс: +7 (495) 981 35 65
e-mail: sales.russia@rohde-schwarz.com

г. Санкт-Петербург

197101, ул. Дивенская, д. 1, офисы 606 и 604
тел.: +7 (812) 448 65 08
e-mail: sales.petersburg@rohde-schwarz.com

г. Новосибирск

630132, ул. Красноярская, д. 35, офис 1603
тел.: +7 (383) 230 39 91
e-mail: sales.novosibirsk@rohde-schwarz.com

г. Красноярск

660135, ул. Весны За, БЦ «Весна», офис 410
тел.: +7 (391) 276 16 53
e-mail: sales.novosibirsk@rohde-schwarz.com

г. Нижний Новгород

603000, ул. Максима Горького, д. 117, офис 509
тел.: +7 (831) 233 03 00
тел.: +7 (831) 233 03 01
e-mail: sales.nnovgorod@rohde-schwarz.com

Филиал г. Ростов-на-Дону

344018, г. Ростов-на-Дону,
ул. Текучева, д. 139/94,
Clover House, офис 434
тел. +7 (863) 206-57-10
e-mail: sales.rostov@rohde-schwarz.com

г. Екатеринбург

620142, ул. 8 марта, д. 51, офис 702
тел.: +7 (343) 311 00 72
e-mail: sales.ekaterinburg@rohde-schwarz.com

г. Казань

420034, ул. Декабристов, д. 856, офис 712
тел.: +7 (843) 567 27 51
e-mail: sales.kazan@rohde-schwarz.com

г. Воронеж

394030, ул. Комиссаржевской, д. 10, офис 1213
тел.: +7 (473) 206 55 78
e-mail: sales.voronezh@rohde-schwarz.com

www.rohde-schwarz.com/ru