Фазовая подстройка двух источников MIMO-сигналов с помощью опции B90 (фазовая когерентность)

Указания по применению

Изделия:

- R&S®SMATE200A
- R&S®SMU200A
- R&S®SMJ100A
- R&S®SMBV100A

Для формирования луча и других измерений, которые требуют использования более одного высокочастотного (ВЧ) выхода (например, измерение характеристик фазированной антенной решетки или дифференциальных ВЧ-сигналов) фазовая когерентность является крайне важным фактором. Для работы с ней с использованием приборов R&S®SMATE200A, R&S®SMU200A, R&S®SMJ100A или R&S®SMBV100A требуется наличие опции B90. Кроме того, для установки определенного значения разности фаз двух ВЧ-выходов требуется дополнительная подстройка.

В данных указаниях по применению описан процесс фазовой подстройки с использованием анализатора спектра.

Указания по применению

Thomas Braunstorfinger,
Январь 2009 - 1GP67_0E

ROHDE&SCHWARZ

Содержание

1 Введение 4

2 Влияние разности фаз между двумя ВЧ-разъемами 5

Что такое фазовая когерентность? 5

Схема генерации сигналов 5

Влияние частоты ВЧ-сигнала 6

Влияние изменения уровня ВЧ-сигнала 8

Влияние температурного дрейфа 9

Влияние времени 10

Влияние разности фаз синтезатора 10

Сдвиг фаз модулирующего сигнала: идеальный случай 10

3 Методы фазовых измерений 12

Использование осциллографа 12

Использование анализатора цепей 12

Использование смесителя и вольтметра 13

Использование сумматора и анализатора спектра 14

4 Подробное описание метода использования сумматора и анализатора спектра; немного теории 15

5 Ручная подстройка фазы 20

Установка для подстройки и тестирования 20

Выбор сумматора 21

Первая подстройка 21

Адаптация анализатора спектра к уровню сигнала и погрешности фазы 24

Ограничения и способы их преодоления 24

Подстройка уровня 24

Уровень шума анализатора 24

Модифицированный алгоритм для очень низких уровней сигнала 26

6 Использование программы PhaseTracker 27

Установка и запуск 27

Настройка соединения 27

Основные операции 28

Настройка SMx 29

Однофазные измерения 29

Подстройка уровня 30

Непрерывные измерения 30

Измерения в режиме развертки 31
Использование усреднения и чередования фаз 32

7 От измерения фазы к ее подстройке 33
Ручная фазовая подстройка 34
Постройка фазы с помощью PhaseTracker V1.4 34
Фазовая подстройка с помощью пользовательской программы управления системой 34

8 Заключение 37

9 Дополнительная информация 38

10 Информация для заказа 39

1 Введение

Данные указания по применению предназначены для использования в случае необходимости подстроить фазы двух или более выходов генератора сигналов. Точнее говоря, в данном документе объясняется, как достигнуть оптимальных результатов работы генераторов R&S®SMATE200A, R&S®SMU200A, R&S®SMJ100A и R&S®SMBV100A, оснащенных опцией B90, и анализатором спектра компании Rohde & Schwarz, используя компьютерное программное обеспечение PhaseTracker (которое может быть скачано с веб-сайта компании).

Глава 2: Объясняется, как происходит генерация ВЧ-сигнала, и какие факторы влияют на фазу. Показаны некоторые характеристики.

Глава 3: Описано четыре варианта измерительных установок для измерения разности фаз между двумя ВЧ-сигналами.

Глава 4: Объясняется общая теория метода использования сумматора и анализатора спектра.

Глава 5: Описание измерительной установки и процесса ручной подстройки фаз.

Глава 6: Инструкции по использованию программного обеспечения PhaseTracker, которое поддерживает работу с простыми фазовыми измерениями и регистрацию характеристик (зависимость фазы от температуры, уровня, частоты и времени).

Глава 7: Подстройка фазы в процессе работы.

Глава 8: Общие выводы о фазовой подстройке и несколько советов для получения оптимальных результатов.

Примечание

В данных указаниях по применению используются следующие сокращения:

- FSL – анализатор спектра R&S®FSL
- FSU – анализатор спектра R&S®FSU
- SMATE – векторный генератор сигналов R&S®SMATE100A
- SMBV – векторный генератор сигналов R&S®SMBV100A
- SMJ – векторный генератор сигналов R&S®SMJ200A
- SMU – векторный генератор сигналов R&S®SMU200A
- ZVM - векторный анализатор цепей R&S®ZVM

В данных указаниях по применению описывается использование двухпортовых генераторов сигналов (например, SMATE с двумя ВЧ-трактами) а также однопортовых генераторов сигналов (SMATE/SMU только с одним ВЧ-трактом или SMJ/SMBV). Описание измерительной установки всегда относится к двухпортовому генератору SMATE и может быть легко применено для других упомянутых выше приборов.

2 Влияние разности фаз между двумя ВЧ-разъемами

Что такое фазовая когерентность?

Фазовая когерентность двух ВЧ-сигналов означает, что существует определенное и стабильное фазовое соотношение между двумя ВЧ-несущими, то есть существует фиксированная разность фаз несущих. Строго говоря, когерентность фаз определена только для немодулированных несущих с одинаковой частотой (или для немодулированных несущих, частоты которых кратны друг другу).

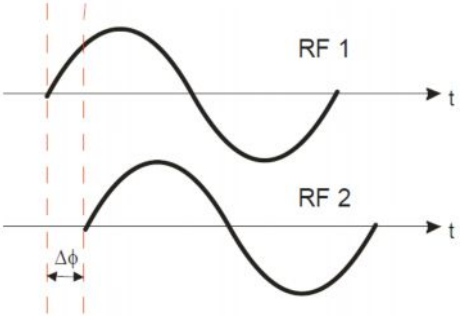


Схема генерации сигналов

На следующем рисунке показана блок-схема векторного генератора сигналов, включая все составляющее, которые имеют отношение к формированию фазы:

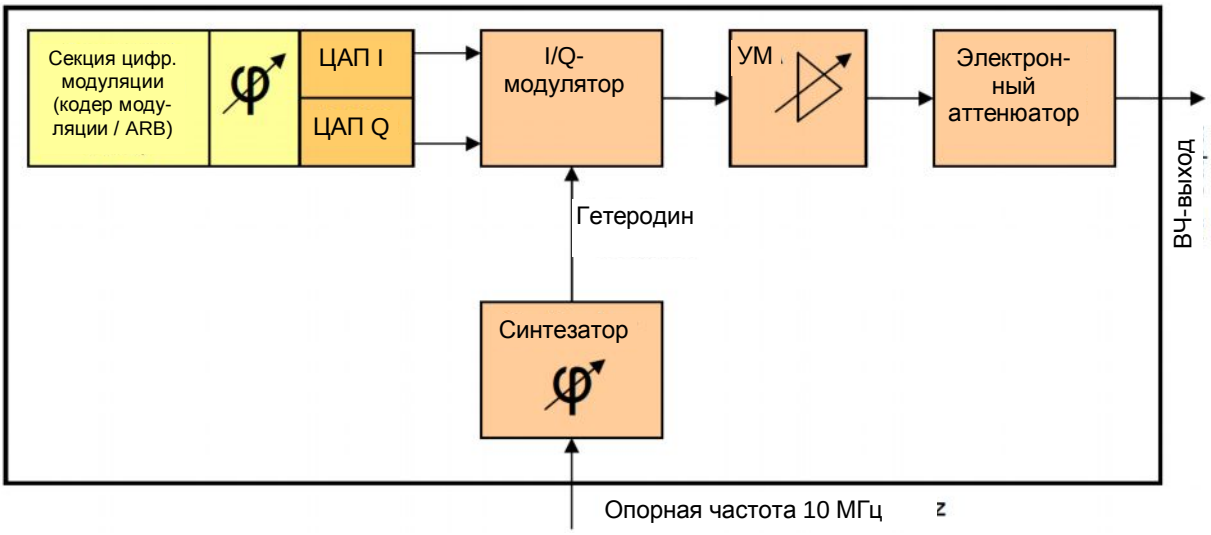


Рис. 2.1 – Схема формирования сигнала генератором

Кодер модуляции генерирует цифровой модулирующий сигнал, к которому может быть применен сдвиг фазы (сдвиг частоты также может быть применен, но для фазовой когерентности это менее важно).

С двух ЦАП аналоговый I/Q-сигнал передается в I/Q-модулятор, который смешивает комплексный входной сигнал с сигналом гетеродина в ВЧ диапазоне. Фаза сигнала гетеродина также может подстраиваться.

Выход I/Q-модулятора уже имеет нужную частоту, но уровень должен быть выровнен до желаемой величины. Это делается в два этапа: усиление и электронная ступенчатая аттенюация. Полученный в результате выходной сигнал, находящийся в диапазоне от -130 до 30 дБмВт (в зависимости от прибора, частоты и установленных опций) подается на выходной ВЧ-разъем.

Синтезатор частот имеет собственный встроенный опорный генератор, но может также использовать опорный сигнал от внешнего источника. В обоих случаях результирующий сигнал гетеродина (LO) генерируется в несколько этапов из исходного сигнала 10 МГц с помощью системы ФАПЧ.

Если два генератора сигналов работают от одной опорной частоты 10 МГц, они будут генерировать одинаковые частоты, но только в долгосрочной перспективе. Рассмотрев подробнее мгновенную разность фаз ("разность фаз" или просто "фазу") двух ВЧ-сигналов, увидим, что эта фаза достаточно нестабильна. Это обусловлено следующими факторами:

1. Фазовый шум двух синтезаторов частот.
2. "Слабая" связь на 10 МГц, требующая длинной цепочки синтеза в ВЧ-диапазоне. Если уход фазы опорной частоты составляет 0,1° (например, из-за дрейфа фазы фазового детектора), тогда уход фазы на частоте 1 ГГц составит 10°.
3. Другие изменения фазы, которые происходят в ЦАП, I/Q-модуляторе, усилителе мощности и электронном аттенюаторе.
4. Разница температур приводит к термальному расширению токопроводящих частей или кабелей, что изменяет электрическую длину тракта, по которому проходит сигнал. На частоте 6 ГГц длина волны λ составляет 3,3 см. В таком случае, при дополнительной длине тракта 1 мм, фазовый сдвиг составит около 11° (вычисления проведены для коаксиальных кабелей, где скорость распространения составляет примерно две третьих скорости распространения волн в свободном пространстве; следовательно, длина волны будет составлять около двух третей по сравнению с волной, распространяющейся в свободном пространстве, и электрическая длина будет в 1,5 раза больше физической длины волны).

Медь имеет коэффициент теплового расширения 16,4 10^{-6} K^{-1}. Таким образом, если используется медный кабель длиной 1 м и происходит изменение температуры на 10 К, то длина кабеля изменится на 164 мкм, что означает изменение фазы примерно на 2°.

Поскольку второй фактор является доминирующим (>95 %), есть только один способ эффективной стабилизации разницы фаз между двумя генераторам сигналов: использовать общий синтезатор/источник опорной частоты. Эта функция поддерживается опциями SMATE-B90, SMU-B90, SMJ-B90, SMBV-B90.

Необходимым условием для всех измерительных установок, описанных в данном документе, является наличие установленной опции B90. Если не указано иное, используется общий сигнал гетеродина LO (“совместный”).

Использование общего синтезатора также устраняет влияние фактора 1. Другие два фактора – 3 и 4 – в случае необходимости могут быть минимизированы посредством внутренней подстройки и термостабилизации.

Влияние частоты ВЧ-сигнала

Когда частота ВЧ-сигналов обоих генераторов изменяется, фаза, как правило, также существенно изменяется (в зависимости от используемой частоты). Несмотря на то, что использование общего гетеродина крайне важно для стабильности фазы, сама фаза главным образом определяется разностью электрических длин двух ВЧ-трактов – Δx.

На следующем рисунке показана простая модель распространения волн по двум ВЧ-трактам различной длины:

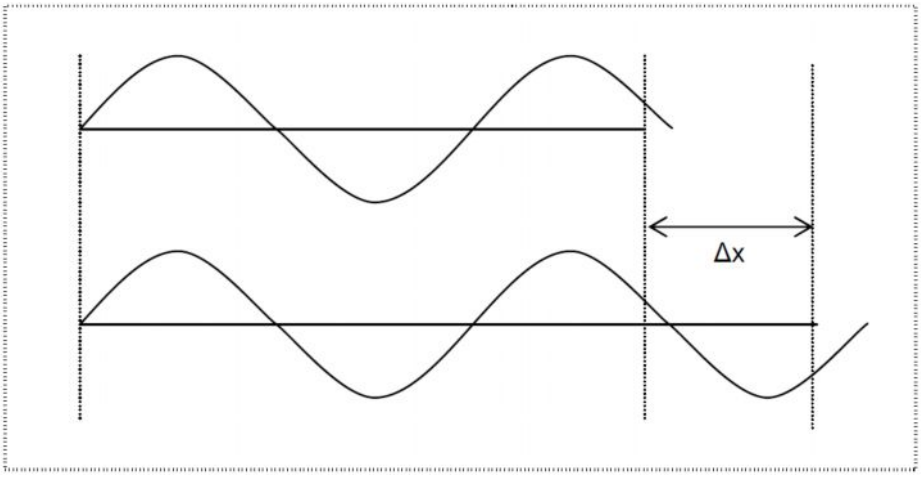


Рис. 2.2 – Распространение волны в двух ВЧ-трактах

Фаза зависит от Δx, λ (то есть, от частоты) и скорости распространения v:

$$\varphi = \frac{\Delta x}{\lambda} \bmod 2\pi = \frac{\Delta x \cdot f}{v} \bmod 2\pi$$

На рисунке представлен график изменения фазы, полученный с помощью программы PhaseTracker:

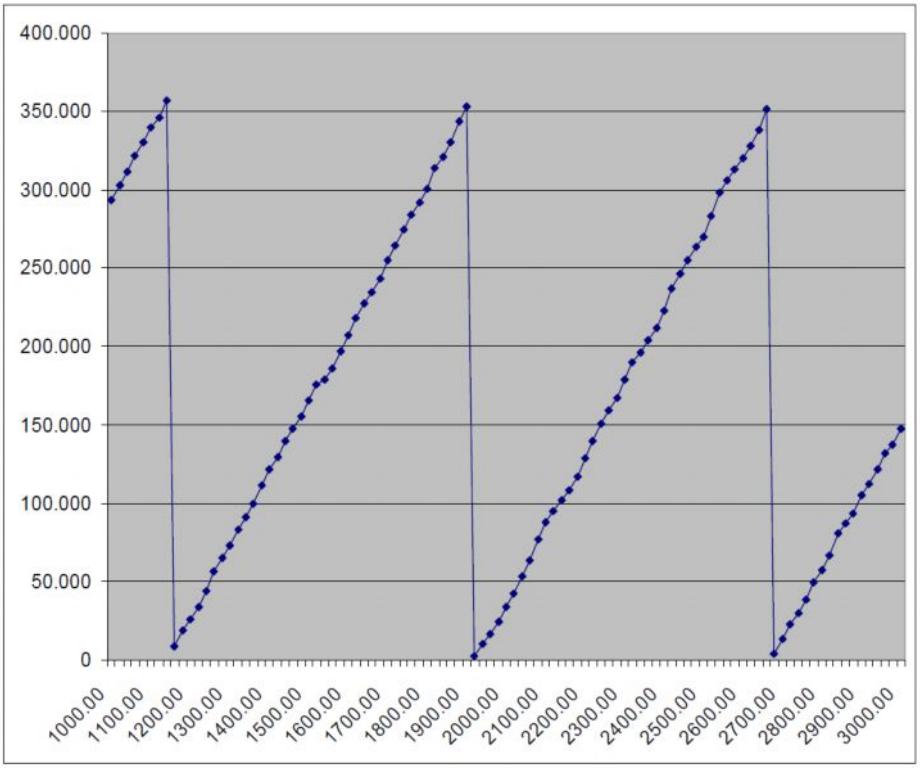


Рис 2.3 – Зависимость фазы от частоты

Исходя из периода характеристики (приблизительно 800 МГц), Δx можно примерно оценить как 25 см (полагая $v = 2 * 10^8$ м/с).

В общем, используемая частота является наиболее важным параметром, как при измерениях фазы, так и в отношении фазовой стабильности.

Влияние изменения уровня ВЧ-сигнала

Уровень ВЧ-сигналов генератора устанавливается с помощью возбуждения усилителя мощности и электронной ступенчатой регулировки коэффициента ослабления аттенюатора. Оба этих фактора оказывают сильное влияние на фазу:

- Фаза изменяется в зависимости от возбуждения усилителя. Типичное значение составляет 1°/дБ, но оно также зависит от используемого прибора (см. технические данные).
- Электронная ступенчатая регулировка коэффициента ослабления аттенюатора подразумевает использование нескольких трактов, длина которых может отличаться на несколько сантиметров. Очевидно, что этот фактор имеет очень сильное влияние на фазу.

Если необходимо установить уровень, то стратегия работы с векторными генераторами сигналов SMATE, SMU, SMJ и SMBV состоит в том, чтобы достигнуть оптимальных рабочих ВЧ-характеристик по отношению к шуму и гармоникам. Поэтому усилитель всегда работает в своей активной зоне, а аттенюатор довольно часто включается. В связи с этим, чтобы избежать скачков фазы, необходимо установить фиксированный режим работы аттенюатора “Fixed”:

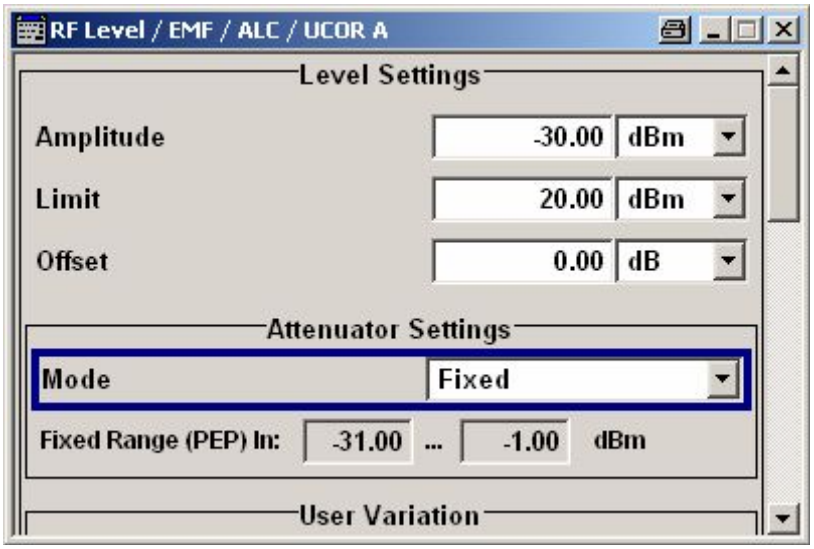


Рис. 2.4 – Как установить аттенюатор в фиксированный режим “Fixed”

Рассмотрим разницу фаз двух генераторов сигналов – в этом случае ситуация, как правило, менее критичная. В идеальном случае оба прибора должны работать, используя одинаковые рабочие точки и одинаковые режимы аттенюатора. В таком случае влияние изменений уровня на фазу будет очень небольшим, и разница фаз появится из-за различий индивидуальных характеристик компонентов.

В реальности, частотная характеристика прибора должна калиброваться на заводе, а точки возбуждения и точки переключения – индивидуальны для каждого прибора. Кроме того, при использовании режима автоматической регулировки уровня (ALC) возбуждение со временем будет изменяться.

На рисунке представлена характеристика, измеренная с помощью прибора SMBV:

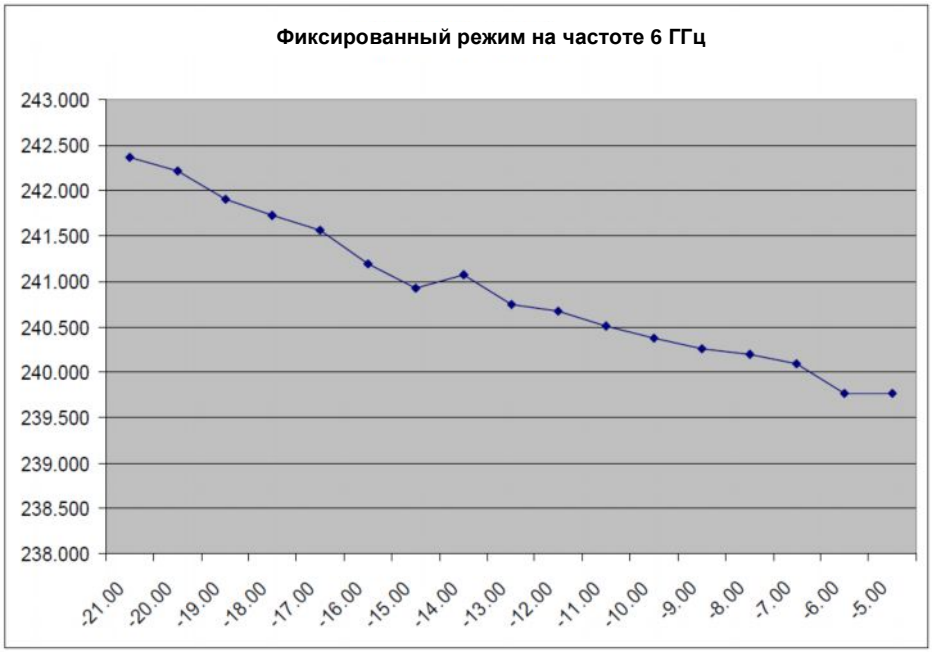


Рис. 2.5 – Зависимость фазы от уровня

В данном случае при изменении уровня на 20 дБ фаза изменяется на 3°.

Влияние температурного дрейфа

При изменении температуры генератора сигналов фазы сигналов также будут изменяться из-за дрейфа в электронных компонентах и изменения электрических длин (тепловое расширение) кабелей и проводящих трактов. Эти эффекты не очень сильны, их влияние обычно составляет менее 0,1°/K. **Однако в связи с этим рекомендуется прогревать прибор после включения как минимум в течение 30 минут.**

На следующем графике отображены результаты испытаний прибора SMATE – профиль температур от 15 до 25 °C с шагом 2,5 °C. Внутренняя температура отображена розовой кривой. Синяя кривая показывает измеренные фазы. Так как показания приборов содержат шумы, на график добавлена линия тренда (желтая линия). На данном графике можно видеть, что при изменении температуры на 2°C / 2K фаза изменяется на 0,05°.

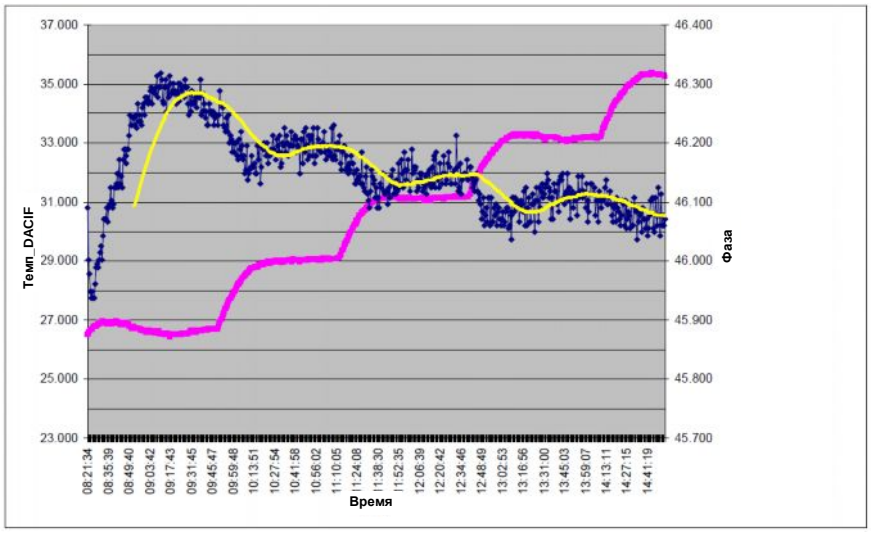


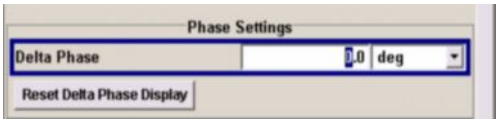
Рис. 2.6 – Зависимость фазы от температуры и времени

Влияние времени

Влияние времени также незначительно. Причиной изменения фазы являются дрейф и процесс старения, происходящий в приборе. Влияние этих факторов может быть уменьшено с помощью внутренней подстройки. Поэтому, как правило, это влияние даже не учитывают.

Влияние разности фаз синтезатора

Фаза синтезатора может быть установлена в диалоговом окне настройки частоты ВЧ-сигнала "RF frequency":



Как правило, для всех ВЧ-трактов используется общий синтезатор/гетеродин и данная фаза не влияет на их разность фаз.

Сдвиг фаз модулирующего сигнала: идеальный случай

Все векторные генераторы сигналов компании Rohde & Schwarz поддерживают изменение фазы сигнала в цифровом диапазоне модулирующих сигналов.

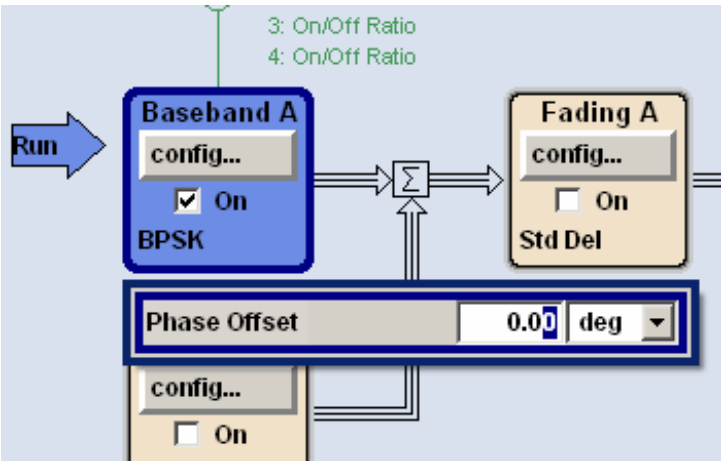


Рис. 2.7 – Изменение фазы в цифровом диапазоне модулирующих сигналов

Так как I/Q-модуляция представляет собой комплексное перемножение, фаза ВЧ-сигнала изменяется так же, как и сдвиг фаз модулирующего сигнала.

Данный сдвиг фазы четко определен и не зависит от температуры, времени или уровня. Единственным ограничением является то, что при генерации немодулированных сигналов должна использоваться секция цифровой модуляции.

Данный (псевдо-) немодулированный сигнал может быть сгенерирован с помощью сигналов постоянного тока для I и Q составляющих; наиболее простой способ – выбрать режим пользовательской цифровой модуляции Custom Digital Modulation и использовать следующие настройки: Data Source = All 0; Modulation Type = BPSK. Другой способ (например, если не требуется использование опций реального времени) – использовать генератор произвольного сигнала ARB и сформировать сигнал постоянного тока DC-Waveform с помощью ПО WinIQSIM.

3 Методы фазовых измерений

Проведение фазовой подстройки всегда означает, что необходимо измерить фазу между двумя ВЧ-трактами и полученное значение необходимо учесть при проведении дальнейших испытаний. В связи с этим подробнее рассмотрим несколько различных методов измерения фазы.

Использование осциллографа

Измерительная установка:

Необходимо подключить оба ВЧ-выхода SMATE200A к двум входным портам осциллографа. Включить отображение обоих сигналов во временной области и выбрать одинаковый масштаб для обоих графиков. Далее необходимо отрегулировать разность фаз немодулированного колебания для обеспечения взаимного соответствия обоих кривых.

Плюсы и минусы:

+ осциллографы широко распространены

+ измерительная установка очень проста

- плохое разрешение по времени/фазе. Для того чтобы получить погрешность менее одного градуса требуется избыточная дискретизация в 10 раз. Например, для сигнала 5 ГГц, рекомендуется осциллограф, работающий с частотой 70 ГГц.

- не подходит для сигналов с уровнем ниже -30 дБмВт

Использование анализатора цепей

Измерительная установка (например, на базе ZVM):

Открыть порт опорного сигнала 1 и подключить ВЧ-выход RF A генератора сигналов к входному порту опорного сигнала 1 IN прибора ZVM.

Подключить ВЧ-выход RF B к порту 2.

Запустить измерение S21 (повременная развертка) и измерить фазу

Плюсы и минусы:

+ скорость

- относительно дорогое и менее распространенное оборудование

- не подходит для сигналов с уровнем ниже -50 дБмВт

Использование смесителя и вольтметра

Измерительная установка (используются два прибора):

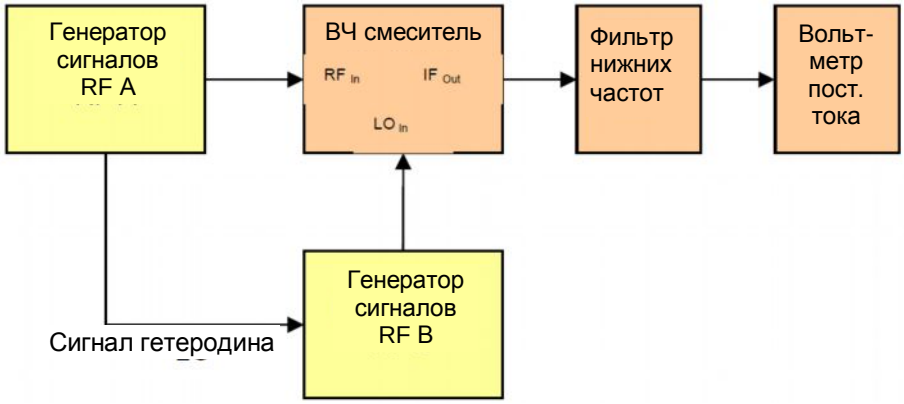


Рис. 3.1 – Измерительная установка с использованием смесителя и вольтметра постоянного тока

Сигнал IF_{Out} определяется как

$IF_{Out} = RF_{In} \cdot LO_{In}$

где

$RF_{In} = A\sin(\omega t)$ и $LO_{In} = B\sin(\omega t + \varphi)$

$$IF_{Out} = A\sin(\omega t) \cdot B\sin(\omega t + \varphi)$$

$$= \frac{A \cdot B}{2}\left(\cos(\omega t - \omega t - \varphi) - \cos(\omega t + \omega t + \varphi)\right)$$

$$= \frac{A \cdot B}{2}\left(\cos(-\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi)\right)$$

Вольтметр постоянного тока измеряет только постоянную составляющую, а напряжение пропорционально функции cos(φ). Для измерения фазы сначала необходимо найти максимальное, минимальное и нулевое напряжение. После этого фаза может быть вычислена с помощью функции *cos* в соответствии с измеренным напряжением.

Плюсы и минусы:

+ достаточно недорогая измерительная установка

- необходимость высокого уровня сигнала на смесителе (не подходит для сигналов с уровнем ниже +10 дБмВт)

- может быть измерено только абсолютное значение фазы, без знака (из-за особенности функции cos)

Использование сумматора и анализатора спектра

Измерительная установка (используются два прибора):

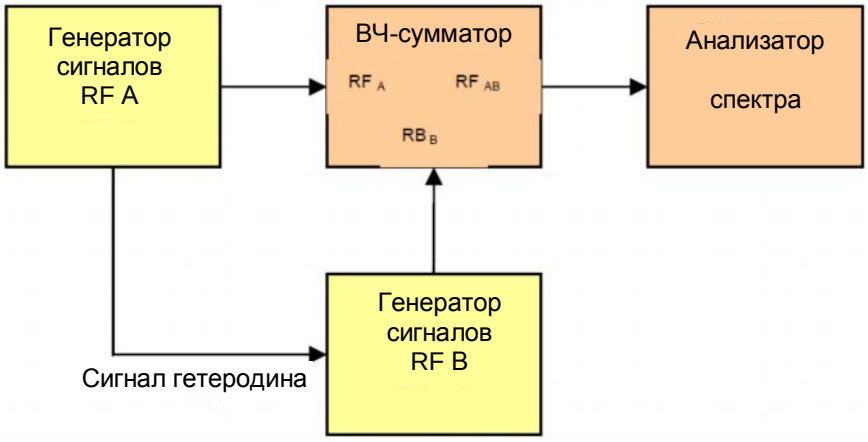


Рис. 3.2 – Измерительная установка с использованием сумматора и анализатора спектра

Фаза одного из генераторов сигналов сдвинута таким образом, что два сигнала отличаются по фазе на 180°. В таком случае (также называемом "полной интерференцией") выходная мощность RF_{AB} нулевая. Более подробно об этом можно прочитать в разделе 4.

Плюсы и минусы:

+ спектральные анализаторы очень популярны, особенно в среднем и профессиональном классе

+ небольшое количество оборудования – только делитель мощности/сумматор

+ хорошо подходит для сигналов с низким уровнем – ниже -80 дБмВт (в зависимости от чувствительности анализатора спектра)

Так как этот метод является наиболее предпочтительным для использования, рассмотрим его подробнее в следующем разделе.

4 Подробное описание метода использования сумматора и анализатора спектра; немного теории

Суммируются два немодулированных ВЧ-сигнала (также называемых "непрерывное колебание" или “CW”-сигнал), имеющих уровни A и B и разницу фаз φ. Результирующий сигнал RF_{AB} можно записать как

$$RF_{AB} = A\sin(\omega t) + B\sin(\omega t + \varphi)$$

Полагая, что уровни A и B равны (A=B=L), преобразуем выражение:

$$RF_{AB} = L(\sin(\omega t) + \sin(\omega t + \varphi))$$

Используем формулу сложения

$$\sin(x+y) = \sin(x)\cos(y) + \cos(x)\sin(y)$$

тогда результирующий ВЧ-сигнал может быть записан как

$$\begin{aligned} RF_{AB} &= L(\sin(\omega t) + \sin(\omega t)\cos(\varphi) + \cos(\omega t)\sin(\varphi)) \\ &= L(\sin(\omega t)(1+\cos(\varphi)) + \cos(\omega t)\sin(\varphi)) \end{aligned}$$

Данное выражение может быть представлено как сумма двух ортогональных вращающихся векторов, один из которых имеет длину 1+cos(φ), а второй – sin(φ).

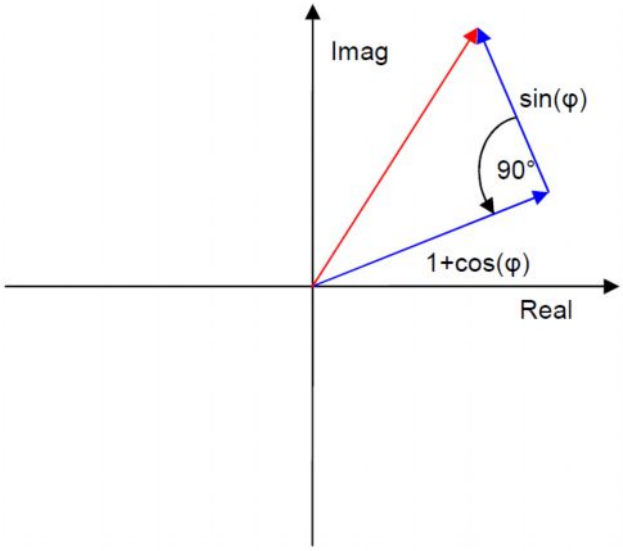


Рис. 4.1 – Графическое представление суммирования двух ВЧ-сигналов со сдвигом по фазе.

Результирующий модуль вектора

$$Mag = \sqrt{\left((1+\cos(\varphi))^2 + \sin(\varphi)^2\right)};$$

Уровень ВЧ-сигнала Level(RF_{AB}) задается как

Level(RF_{AB}) = L * Mag, таким образом, модуль может быть выражен с помощью коэффициента усиления (сумматора).

Для φ=0°, коэффициент равен 2, что следует из предположения о том, что оба сигнала одинаковы.

Также очевидно, что для φ=180° коэффициент будет равен 0, так как групповая фаза обоих сигналов соответствует полной интерференции.

На следующем графике показана логарифмическая зависимость коэффициента усиления от фазы:

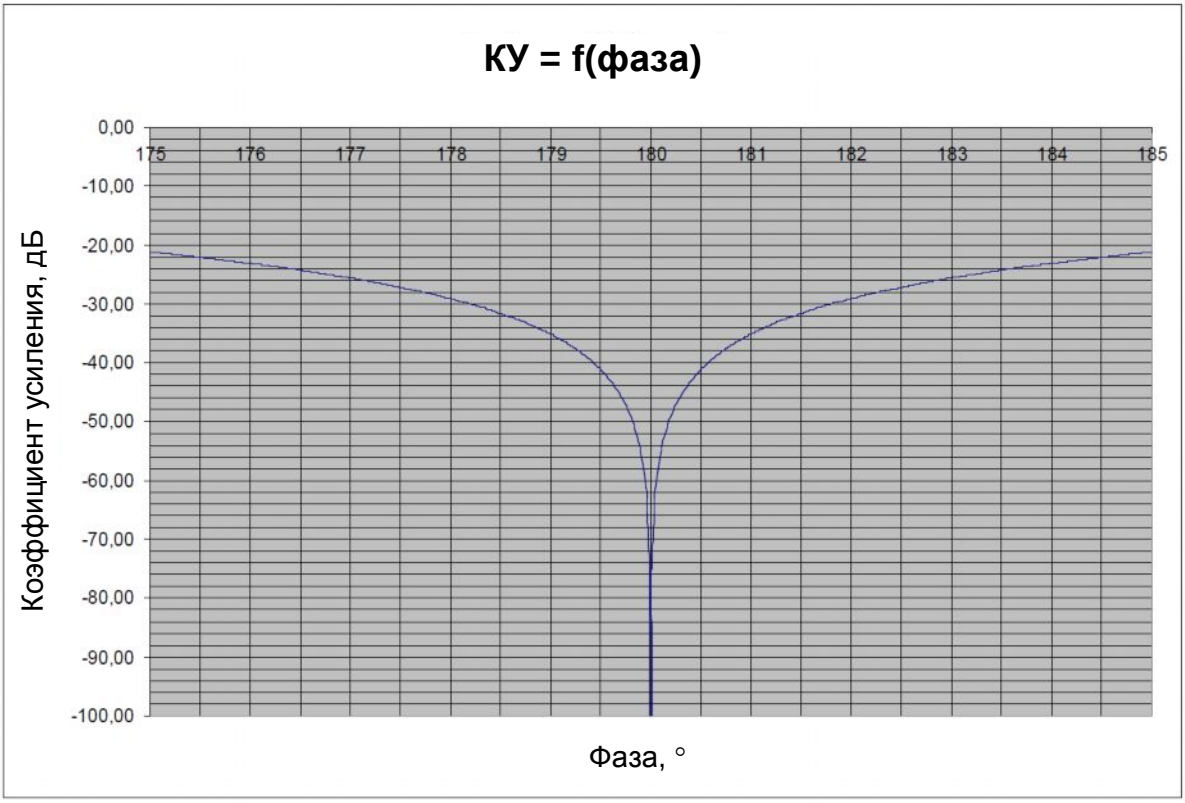


Рис 4.2 – Зависимость коэффициента усиления от фазы

Видно, что кривая симметрична относительно 180°. Следующая таблица показывает зависимость коэффициента в дБ от отклонения фазы от 180°. Так как определенная фаза ВЧ-выхода генератора сигналов может быть установлена цифровым способом без любой дополнительной погрешности, эта таблица также отображает фазовую погрешность установки фазы в виде зависимости от коэффициента усиления (эквивалентного измеренному подавлению несущей).

Таблица 4.3 – Зависимость коэффициента усиления от фазы

Отклонение фазы от 180°	Коэффициент усиления, дБ
10°	– 15,17
5°	– 21,19
2°	– 29,14
1°	– 35,16
0,5°	– 41,18
0,2°	– 49,14
0,1°	– 55,16
0,01°	– 75,16
0,001°	– 95,16
0,0001°	– 115,16

Таким образом, как показывает опыт, необходимо подавление несущей примерно на 40 дБ (включая несколько дБ на сумматор и относительно выходного уровня генератора сигналов) для фазовой подстройки на 1°.

Для уточнения этой подстройки в 10 раз нужно дополнительно подавить сигнал еще на 20 дБ.

Эту зависимость можно легко понять, изучив разложение в ряд Тейлора в окрестности φ=180°

$$RF_{AB} = L(\sin(\omega t)(1+\cos(\varphi)) + \cos(\omega t)\sin(\varphi))$$

$\sin(\varphi) \approx -\varphi$

$\cos(\varphi) \approx -1$

$$RF_{AB} \approx -\varphi\cos(\omega t))$$

Но что будет, если фазовая подстройка полностью проведена, а уровни обоих сигналов генераторов не равны?

Разница двух амплитуд будет ненулевой и может быть представлена в виде разностного сигнала. Для того чтобы вычислить его величину, необходимо сначала преобразовать логарифмическое значение уровня в вольты, рассчитать разницу и преобразовать обратно в логарифмический масштаб.

Пример:

Оба генератора сигналов установлены на уровень -30 дБмВт. Из-за погрешностей (в соответствии с техническими данными, менее 0,5 дБ), реальные уровни составляют:

Генератор сигналов A: -30,3 дБмВт

Генератор сигналов B: -29,8 дБмВт

Преобразуя дБмВт относительно 1 мВт, получим линейную мощность

Генератор сигналов A: $10^{-30,3/10}$ мВт = 0,933 мкВт

Генератор сигналов B: $10^{-29,8/10}$ мВт = 1,047 мкВт

Далее рассчитаем амплитуды $P = U^2 / R$, где R = 50 Ом

Генератор сигналов A: 6,83 мВ

Генератор сигналов B: 7,24 мВ

Таким образом, амплитуда разностного сигнала составляет 0,41 мВ, что соответствует 3,36 нВт или -54,7 дБмВт.

Чтобы получить общее выражение, легче всего провести расчеты напрямую с напряжениями и заданным сопротивлением R = 1.

$$residual / dBm = 20 * \log(abs(10^{A/dBm/20} - 10^{B/dBm/20})),$$

где A и B – выходные уровни обоих генераторов сигналов в дБмВт.

При условии равенства среднего значения L обоих источников и условии $\Delta>0$ получим выражение для разностного уровня

$$residual / dBm = 20 * \log(10^{(L+\Delta/2)/20} - 10^{(L-\Delta/2)/20})$$
$$= 20 * \log(10^{L/20} * 10^{\Delta/10} - 10^{L/20} : 10^{\Delta/10})$$
$$= 20 * \log(10^{L/20} * (10^{\Delta/10} - 10^{-\Delta/10}))$$
$$= L + 20 * \log(10^{\Delta/10} - 10^{-\Delta/10})$$

Таким образом, усиление является просто функцией разницы уровней обоих ВЧ-сигналов:

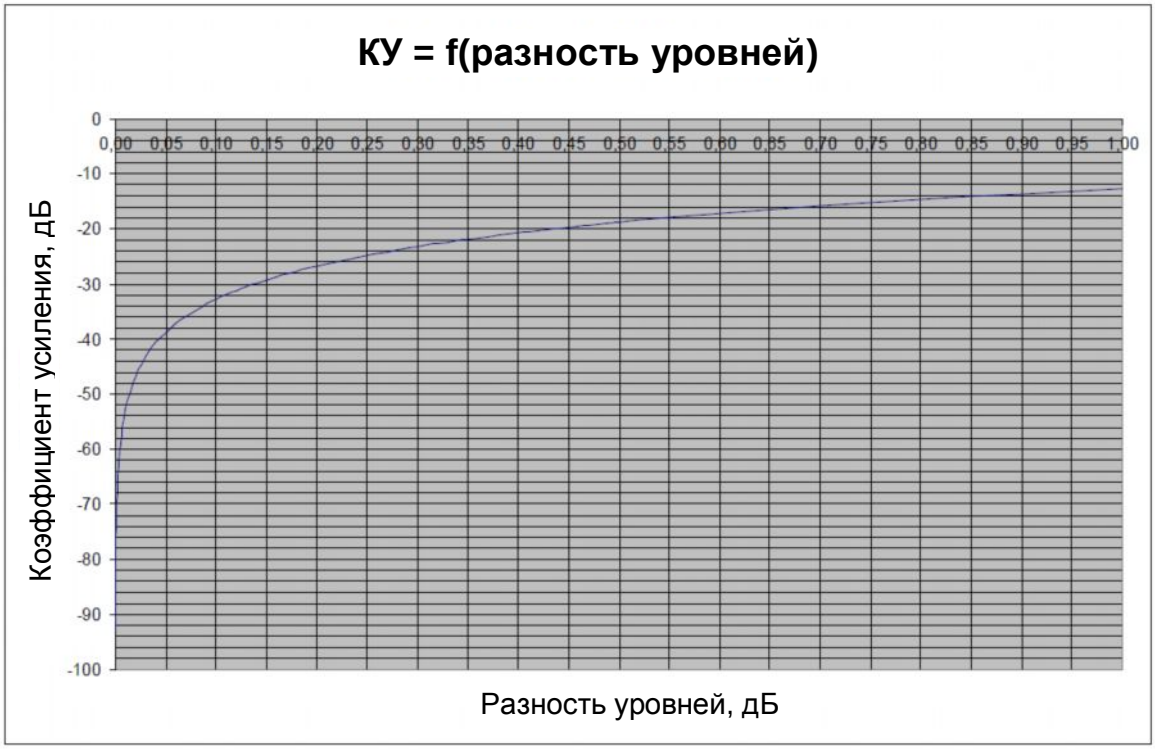


Рис. 4.4 – Зависимость коэффициента усиления от несоответствия уровней

Некоторые характерные значения:

Таблица 4.5 – Зависимость коэффициента усиления от несоответствия уровней

Разница уровней, дБ	Коэффициент усиления, дБ
1,0	– 12,74
0,5	–18,77
0,2	–26,73
0,1	–32,76
0,01	–52,75
0,001	–72,76
0,0001	–92,76

Таким образом, для точной подстройки фазы должна быть выполнена подстройка уровня. Остаточная несущая состоит из двух составляющих, одна из которых появляется из-за несоответствия уровней, а вторая – из-за несоответствия фаз. Если обе имеют одинаковое значение, то общий коэффициент усиления на 3 дБ больше чем значение, указанное в таблицах/характеристиках. При наличии двух генераторов сигналов с одинаковым установленным уровнем и внешним подключением, разница уровней обычно менее 0,2 дБ. Усиление, вызванное несоответствием уровней, составляет примерно -30 дБ, что соответствует 2° в фазовой области. Таким образом, как показывает опыт, подстройка уровня необходима, если погрешность фазы должна быть не выше 1°.

5 Ручная подстройка фазы

Теперь, после изучения теории, приступим непосредственно к процессу измерения. Кроме двух источников ВЧ-сигналов и анализатора спектра понадобятся кабели, разъемы и, конечно, сумматор.

Установка для подстройки и тестирования

На следующем рисунке показана установка со следующими приборами:

- SMATE200A
- FSU
- Резистивный делитель мощности/сумматор фирмы Weinschel, модель 1506A

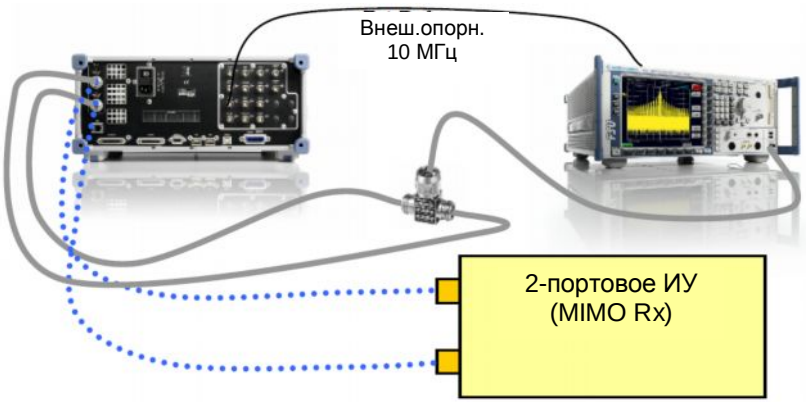


Рис. 5.1 – Измерительная установка для подстройки фазы

Во время подстройки фазы используются серые кабели. После подстройки эти же два кабеля между ВЧ-выходами и сумматором (теперь отображаемые как прерывистые синие линии) используются для подключения испытуемого устройства (ИУ), которое может быть приемником (MIMO-устройство), двумя антеннами или другими двухпортовыми устройствами.

Точкой подстройки является вход сумматора мощности. Поэтому:

- Кабели не обязательно должны быть одинаковой длины, но для подстройки и тестирования должны использоваться одни и те же кабели. Они должны обеспечивать хорошую фазовую стабильность по отношению к температуре и гибкость.
- Разъемы сумматора должны быть того же типа, что используются на испытуемом устройстве. В противном случае необходимо использовать высококачественные компактные переходники.

Выбор сумматора

Выбор сумматора также важен для достижения приемлемой фазовой погрешности. Строго говоря, необходимо использовать резистивный делитель мощности с превосходными характеристиками в части температурной стабильности и отслеживания фазы. Такой тип приборов имеет следующую структуру:

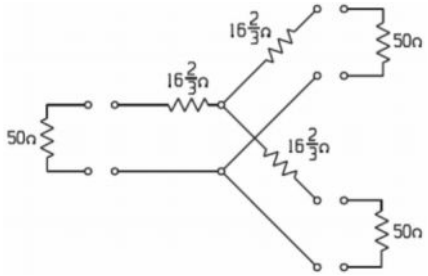


Рис. 5.2 – Модель резистивного делителя мощности (из технических данных Weinschel модели 1506A)

Благодаря симметричной конструкции устройство может использоваться в обоих направлениях – для деления электрической мощности и для ее суммирования.

Нерезистивный делитель мощности (как синоним часто используется ответвитель мощности) для данного применения не подходит, так как может быть использован только в одном направлении – для деления мощности.

Первая подстройка

- Подключить приборы как показано на рис. 5.1
- Подключить внешний дисплей к прибору SMATE или подключить его с помощью LAN/удаленного доступа к рабочему столу
- Нажать клавишу <Preset> на обоих приборах
- На приборе SMATE:

  Открыть диалоговое окно RF Frequency и установить параметры:
  External Reference Frequency Source = External
  LO Coupling Mode = Coupled A->B

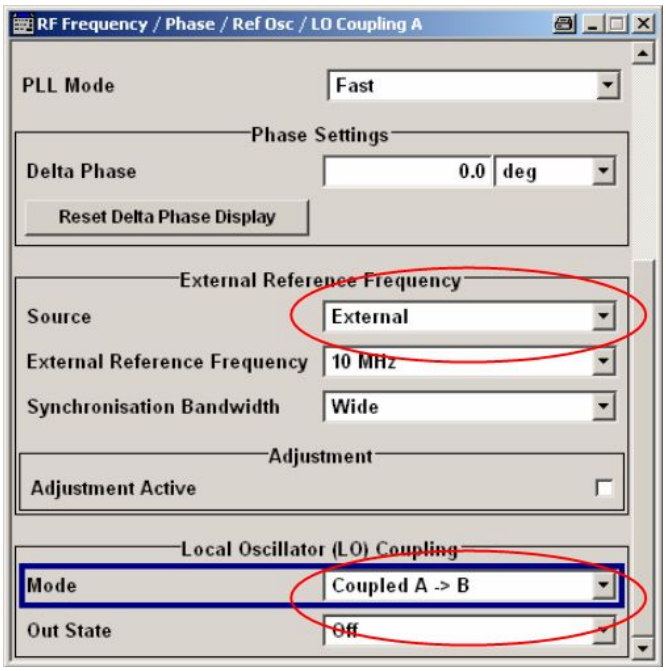


Рис 5.3 – Установка опорной частоты и связи с гетеродином

- Выбрать режим Custom Digital Modulation для обоих модулирующих сигналов и использовать следующие настройки:
  State = On
  Data Source = All 0
  Modulation Type = BPSK

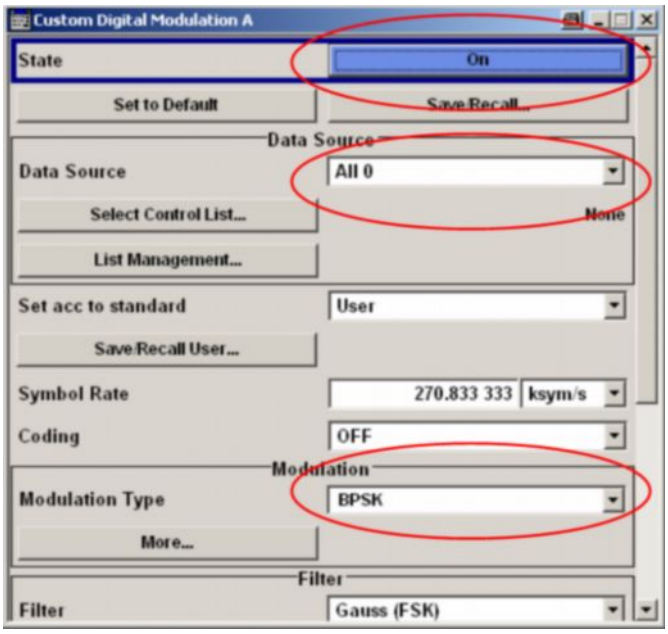


Рис 5.4 – Настройки в диалоговом окне Custom Digital Modulation

(или используйте ARB-генератор и сформируйте сигнал постоянной составляющей с помощью ПО WinIQSIM или PhaseTracker/”Setup SMx”)

- Активировать I/Q-модуляцию и ВЧ-выход RF для обоих трактов, установить уровень 0 дБмВт

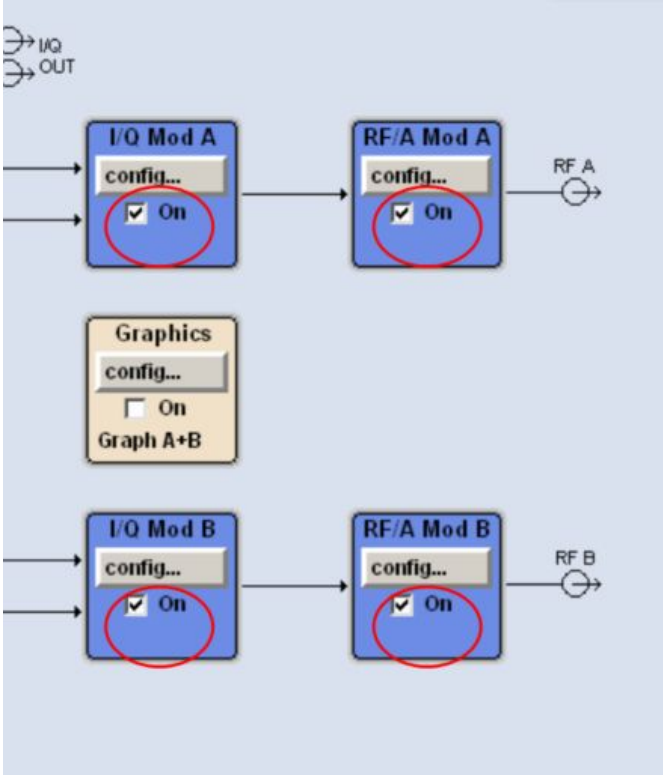


Рис 5.5 – Настройки на блок-схеме

- На приборе FSU:
  - Center Frequency = 1 GHz
  - Span = 100 Hz
  - Reference Level = 0 dBm
- Изменить фазу модулирующего сигнала 1 так, чтобы ВЧ-уровень был минимальным (обычно около -40 дБмВт)

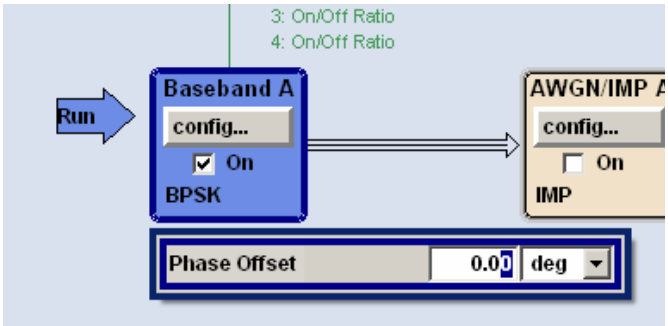


Рис 5.6 – Установка фазы модулирующего сигнала

- Изменять уровень тракта A или B (с шагом 0,01 дБ) так, чтобы добиться подавления несущей до уровня -60 дБмВт
- На последнем шаге провести точную настройку фазы (с шагом 0,01°); несущая должна подавляться до уровня -80 дБмВт.
- Текущая фаза должна быть такой, чтобы разность фаз между входами сумматора составляла 180°. Например, если сдвиг фазы составляет 64,38°, нужно установить фазу на 244,38°, чтобы на входе смесителя получилась нулевая фаза. В качестве альтернативы можно держать постоянной фазу модулирующего сигнала A и установить сдвиг фазы модулирующего сигнала B на 180°.

Адаптация анализатора спектра к уровню сигнала и погрешности фазы

Анализатор спектра должен быть адаптирован к используемому сигналу по следующим параметрам:

- Опорный уровень всегда должен быть установлен равным уровню сигнала с генератора сигналов
- Установленный диапазон должен быть фиксированным и составлять 80 дБ
- Полоса обзора должна быть фиксирована и составлять 100 Гц, время развертки и полоса видеофильтра установлены на “Auto”
- Полоса разрешения должна быть выбрана в соответствии с ожидаемым уровнем, который зависит от уровня сигнала генератора и допустимой погрешности фазы. В следующем списке показаны некоторые соответствующие настройки. Необходимо помнить, что не все спектральные анализаторы компании Rohde & Schwarz поддерживают работу со всеми полосами разрешения:

Таблица 5.7 – Предлагаемые полосы разрешения

Уровень сигнала генератора	Предлагаемая полоса разрешения анализатора спектра
>–40 дБмВт	1 кГц
от –40 до –60 дБмВт	100 Гц
<–60 дБмВт	10 Гц

Конечно, измерения при очень низких уровнях – это всегда компромисс между скоростью и точностью. Для уменьшения времени развертки возможно использование фильтров с более широкой полосой пропускания.

Ограничения и способы их преодоления

Если необходимо провести подстройку при очень низком уровне и/или очень малой погрешности фазы, можно использовать некоторые специфические приемы.

Подстройка уровня

Для постройки фазы с точностью до десятых градуса, уровень должен подстраиваться с точностью 0,001 дБ. Это не очень просто, так как интерфейс пользователя ограничен точностью 0,01 дБ. Один из способов работы в этом случае – включить диапазон мкВ, при этом будет разрешено меньшее приращение (при -80 дБмВт, 0,01 мкВ соответствует 0.003 дБмВт). Второй способ – использовать режим дистанционного управления; в этом режиме точность настройки практически не ограничена.

Уровень шума анализатора

Наиболее важным ограничивающим фактором является уровень шума анализатора спектра, точнее, средний уровень собственных шумов (DANL). Он обозначает уровень, измеренный при открытом ВЧ-входе. Он зависит от

используемого анализатора спектра. Для анализатора FSL он составляет -117 дБмВт при 300 Гц; для FSU: -158 дБмВт при 1 Гц, где указанные полосы пропускания – наименьшие из доступных полос разрешения приборов.

Если принять, что погрешность измерений уровня не должна превышать 1 дБ, то потребуется уровень примерно на 30 дБ выше уровня шума. При использовании FSL, сигнал на выходе сумматора должен иметь уровень как минимум -90 дБмВт, что соответствует минимальному уровню сигнала генератора -60 дБмВт, если принять усиление за -30 дБ (что означает фазовую погрешность около 1-2 градусов).

Если заменить FSL на FSU, мы получим меньший коэффициент шума. Уменьшение DANL на 30 дБ означает, что могут быть измерены сигналы на 30 дБ слабее. Таким образом, на входе сумматора должен быть уровень не менее -120 дБмВт, а на выходе генератора сигналов составлять -90 дБмВт.

Конечно, эти измерения могут быть улучшены за счет использования усреднения в случаях, когда усреднение фазы более эффективно, чем усреднение кривых.

Так как фазовые измерения являются стохастическим процессом, их погрешность/точность описывается среднеквадратическим отклонением, которое зависит от используемого анализатора спектра и его настроек, уровня сигнала генератора и усреднения.

Ниже приведены некоторые типичные результаты:

Таблица 5.8 – Точность фазовой подстройки

Уровень	СКО анализатора FSL без усреднения	СКО анализатора FSL с усред-нением 10	СКО анализатора FSU без усреднения	СКО анализатора FSU с усред-нением 10
0 дБмВт	<0,01°	<0,01°	<0,01°	<0,01°
–40 дБмВт	0,04°	0,02°	0,03°	0,01°
–60 дБмВт	0,13°	0,05°	0,05°	0,02°
–80 дБмВт	1,2°	0,4°	0,2°	0,03°
–90 дБмВт	5,2°	1,6°	0,46°	0,12°
–100 дБмВт	12,5°	4,7°	1,5°	0,53°
–110 дБмВт	~50°	~20°	5,7°	3,1°

Кроме усреднения и использования наилучшего имеющегося анализатора с наименьшей полосой разрешения, есть и другие способы увеличения динамического диапазона измерительной установки, например, использование малошумящих предусилителей или изменение алгоритма подстройки.

Модифицированный алгоритм для очень низких уровней сигнала

До этого момента мы применяли метод поиска минимального уровня и использования текущей фазы в качестве результата измерений. Может быть использован и другой способ. Посмотрим на зависимость уровня от фазы:

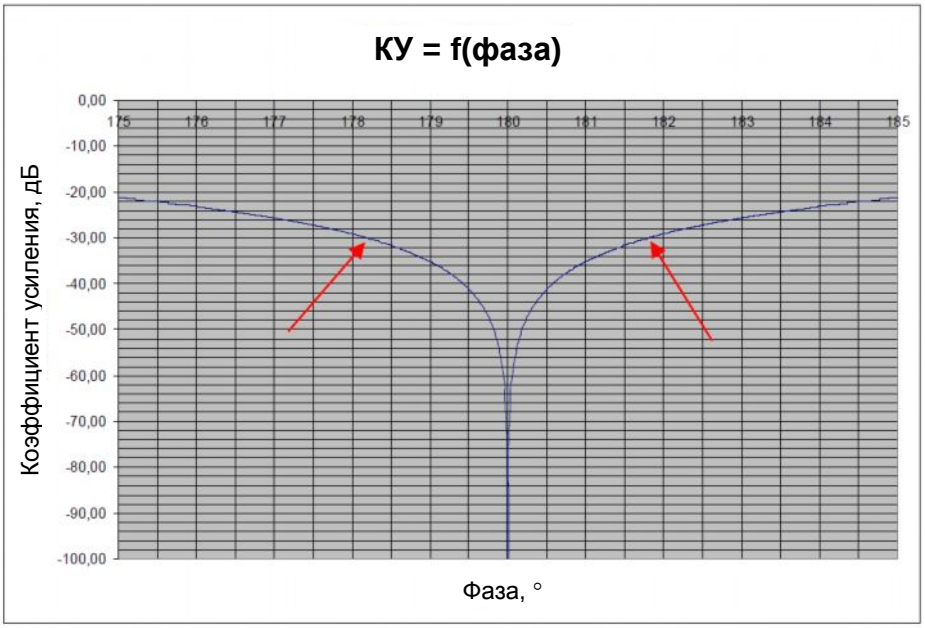


Рис. 5.9 – Модифицированный алгоритм поиска минимального уровня

Принцип данного метода состоит в следующем:

1. Найти приблизительный минимум (называемый "минимальной фазой)
2. Уменьшать фазу до получения уровня, например, на 20 дБ больше уровня DANL анализатора спектра, где можно проводить измерения с высокой точностью
3. Вернуться к минимальной фазе и увеличивать фазу до тех пор, пока уровень не достигнет значения, полученного в шаге 2
4. Использовать среднее значение обеих фаз в качестве минимальной фазы.

6 Использование программы PhaseTracker

Фазовая подстройка занимает некоторое время и должна быть сделана заново после изменений в следующих случаях:

- изменение в составе измерительной установки, например, замена кабелей
- изменение частоты и уровня
- изменение температуры окружающей среды

Для того чтобы упростить необходимые измерения, используется программное обеспечение “PhaseTracker” (Слежение за фазой).

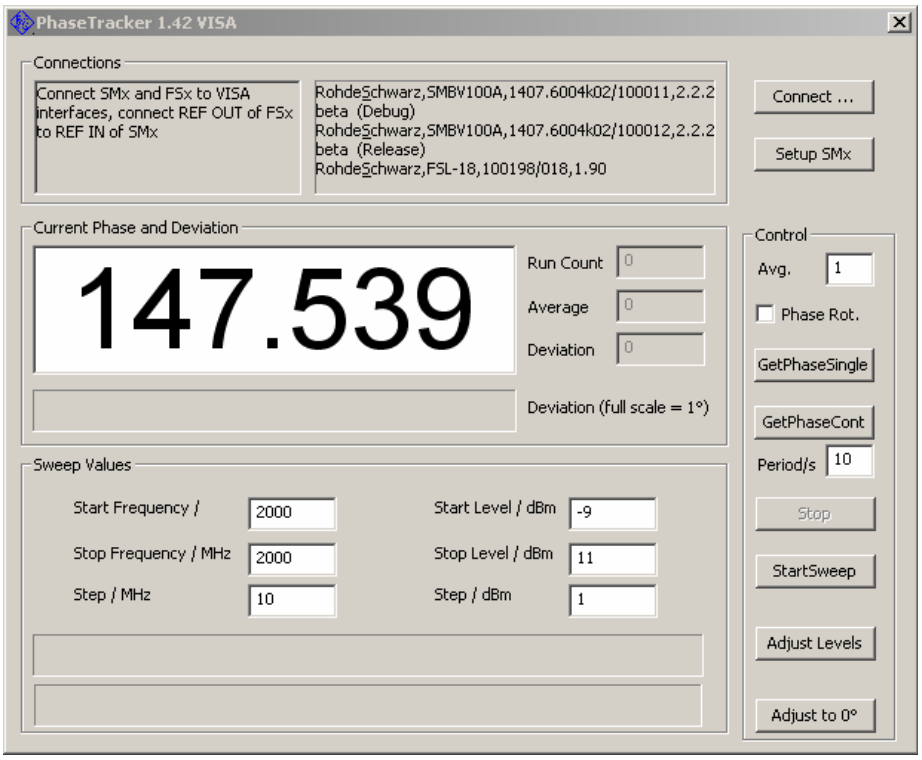


Рис 6.1 – Снимок экрана программы для фазовой подстройки PhaseTracker

Установка и запуск

Требуется установка VISA.

Для установки необходимо запустить файл PhaseTracker V1.4.exe. После окончания установки программа может быть запущена из стартового меню или с рабочего стола.

Настройка соединения

После запуска программы PhaseTracker пользователю будет предложено ввести удаленный адрес используемого прибора:

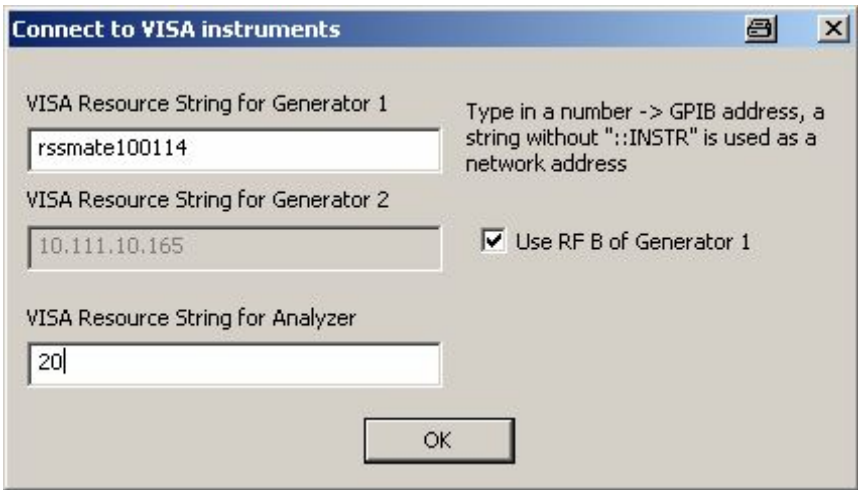


Рис. 6.2 – Снимок экрана программы PhaseTracker (выбор прибора)

Кроме стандартных нотаций VISA, оканчивающихся на “::INSTR”, также поддерживаются некоторые другие сокращения (см выше). Ели оба источника сигнала поступают от одного устройства с двумя трактами, нужно поставить отметку “Use RF B of Generator 1”. В противном случае необходимо будет ввести также адрес второго генератора сигналов.

Для перехода к главному диалоговому окну нужно нажать OK.

Основные операции

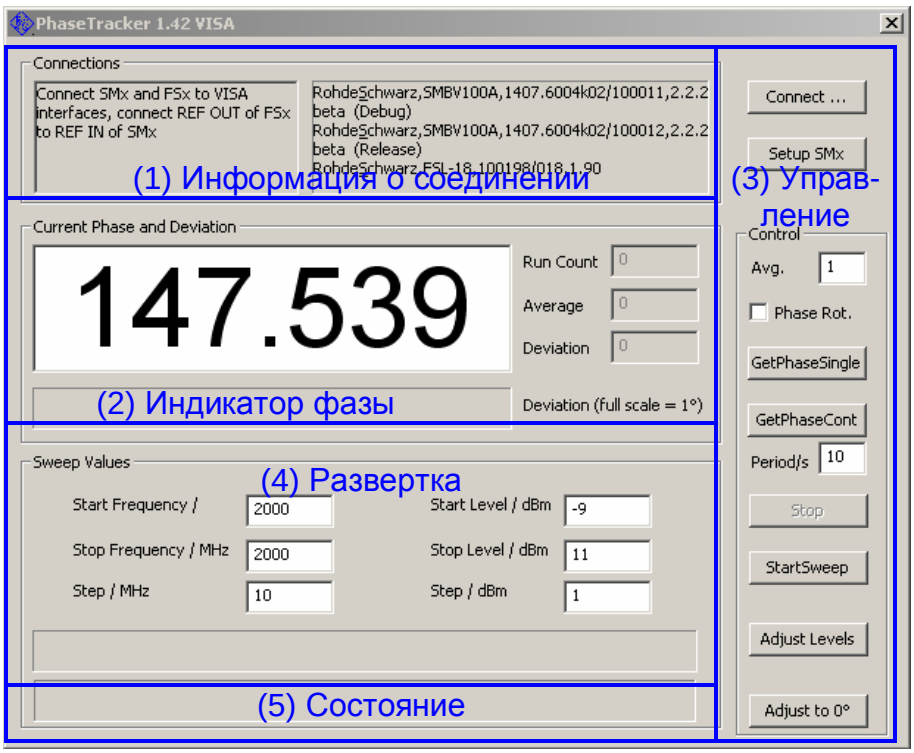


Рис. 6.3 – Снимок экрана программы для подстройки фазы PhaseTracker

(1) Информация о соединении

С левой стороны отображается некоторая основная информация о соединении. С правой стороны перечислены текущие соединения.

(2) Индикатор фазы

Крупное показание отображает значение фазы, которое обновляется после измерений (однократных, непрерывных или развертки) и после процедуры подстройки. Точнее, отображаемая фаза может иметь различные значения:

В процессе измерений: применяемый сдвиг фаз модулирующего сигнала генератора 1 для достижения 180° групповой фазы.

В процессе подстройки: фаза, которая используется в качестве фазового сдвига генератора 1 для достижения 0° групповой фазы.

После большого индикатора размещена некоторая статистическая информация, которая относится только к режиму непрерывных измерений. Под цифровым индикатором также графически отображается значение СКО.

(3) Управление

Эта область используется для установки новых соединений, настройки SMx для подготовки к стандартным измерениям, для запуска и управления измерениями и для окончательной подстройки фазы к значению 0°.

(4) Развертка

Для того чтобы записать характеристики фазы в зависимости от частоты и уровня, могут быть заданы пределы и размер шага развертки. Ниже отображается индикатор состояния развертки.

(5) Состояние

Данное поле используется для отображения информации о состоянии, главным образом о состоянии записи журнальных файлов.

Настройка SMx

Клавиша Setup SMx используется для установки стандартной конфигурации генератора сигналов, которая позволяет осуществлять измерение и подстройку фазы.

Тем не менее, нажатие этой клавиши необязательно, а настройка блока цифровой модуляции может быть также выполнена вручную.

Выполняются следующие настройки:

- *RST
- Активация связи с гетеродином (LO-Coupling)
- Передача файла сигнала dc.wv в прибор и запуск ARB-генерации.
- Активация I/Q-модулятора
- Активация ВЧ-выхода при 0 дБмВт

Однофазные измерения

Для выполнения нужно нажать клавишу Setup SMx или настроить генератор сигналов для ручных измерений в соответствии с описанием в главе 5 "Ручная подстройка фазы".

Во время выполнения однофазных измерений ПО PhaseTracker управляет только следующими параметрами:

- частотой ВЧ-сигнала второго генератора сигналов, если он используется
- фазой модулирующего сигнала первого генератора сигналов
- уровнем сигнала первого генератора сигналов

Анализатор спектра работает полностью в режиме дистанционного доступа, поэтому необходимость в ручных настройках отсутствует.

Далее следует нажать на кнопку GetPhaseSingle и подождать несколько секунд. Фаза модулирующего сигнала генератора сигналов 1 будет изменяться до обнаружения анализатором спектра минимального уровня. Обычно минимальное значение примерно на 40 дБ ниже уровня сигнала генератора.

Подстройка уровня

Измеренный уровень зависит от групповой фазы обоих ВЧ-несущих, а также и от несовпадения уровней.

Необходимо нажать на кнопку Adjust Levels и подождать несколько секунд. ВЧ-уровень генератора сигналов 1 будет изменяться до обнаружения анализатором спектра минимального уровня. Обычно минимальный уровень примерно на 10 дБ меньше уровня без подстройки фазы. Эффект от подстройки уровня определяется расстоянием до DANL анализатора спектра. Другими словами: чем выше уровень генератора сигналов, тем более эффективна подстройка уровня.

Непрерывные измерения

Часто необходимо измерять фазу в течение длительного времени без изменения частоты, уровня или остальных параметров. Например, в следующих случаях:

- измерение влияния температуры окружающей среды и/или времени
- накопление статистических данных, таких как среднее значение и среднеквадратическое отклонение
- наблюдение других эффектов, например, влияние смены кабелей, адаптеров и т.д.

В первую очередь необходимо задать период измерений. Значение 30 означает, что каждое новое измерение будет запускаться каждые 30 секунд. Это помогает уменьшить количество данных в случае долговременных измерений.

Нажать клавишу GetPhaseCont для запуска измерений. После выполнения второго измерения фазы, текущая фаза будет отображена вместе со статистической информацией.

Измерения будут остановлены (что может занять несколько секунд) после нажатия кнопки Stop.

После этого, вся записанная информация может быть найдена в файле PhaseLogCont.csv, который находится в текущем рабочем каталоге. Этот файл может быть легко отредактирован и обработан позже с помощью программы для работы с электронными таблицами. Таблица выглядит следующим образом:

	A	B	C	D	E
1	DeltaPhase Measurement Logfile versus Time				
2	Frequency/Hz = 1000000000 Level/dBm = 1				
3	DATE	TIME	TEMP Gen1	TEMP Gen2	PHASE
4	09/25/08	15:53:48	40.674	42.485	208.828
5	09/25/08	15:53:53	40.67	42.488	208.711
6	09/25/08	15:53:58	40.668	42.487	209.18
7	09/25/08	15:54:03	40.669	42.485	208.77
8	09/25/08	15:54:07	40.671	42.488	208.418
9	09/25/08	15:54:12	40.667	42.485	208.652
10	09/25/08	15:54:17	40.676	42.485	208.711
11	09/25/08	15:54:22	40.666	42.486	208.77
12	09/25/08	15:54:26	40.663	42.481	208.887

Рим. 6.4 – Вид электронной таблицы результатов подстройки (непрерывный режим)

Столбец A: дата записи в форме мм/дд/гг

Столбец B: время записи в форме чч:мм:сс.

Столбец C: внутренняя температура генератора сигналов 1 / градусы по Цельсию

Столбец D: внутренняя температура генератора сигналов 2 / градусы по Цельсию

Столбец E: относительная фаза в градусах

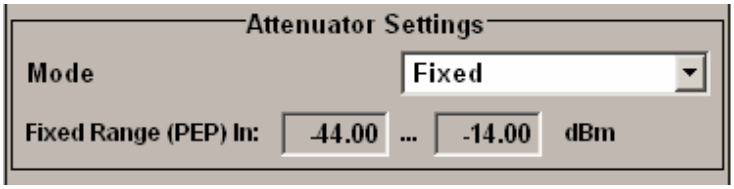
Измерения в режиме развертки

Этот режим позволяет пользователю записывать характеристики фазы в зависимости от частоты и/или от фазы, в случае двумерных измерений.

Необходимо установить пределы и размер шага развертки. Для выполнения одномерной развертки нужно выбрать одинаковое значение для верхнего и нижнего пределов параметра, который не должен изменятся.

Пример: Выполнение развертки по уровню в режиме аттенюатора "Fixed":

1. Выбрать режим аттенюатора (Attenuator Mode = Fixed) в меню ВЧ уровня генератора(ов) сигналов.
2. Установить одинаковое значение для начальной частоты (Start Frequency) и конечной частоты (Stop Frequency), которое необходимо измерить.
3. Установить начальный уровень (Start Level) и конечный уровень (Stop Level) на требуемые значения, которые должны попадать в фиксированный диапазон, отображаемый в диалоговом окне генератора сигналов



4. Установить шаг (Step) 1 дБ.
5. Нажать клавишу StartSweep для запуска измерений. Ниже будет отображен индикатор выполнения.

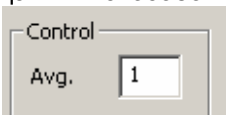
После окончания развертки, вся записанная информация может быть найдена в файле PhaseLogCont.csv, который находится в текущем рабочем каталоге. Этот

файл может быть легко отредактирован и обработан позже с помощью программы для работы с электронными таблицами. Таблица выглядит следующим образом:

	A	B	C
1	DeltaPhase Measurement		
2	Level	6000.00	
3	20.00	248.496	
4	19.00	248.320	
5	18.00	248.262	
6	17.00	248.027	
7	16.00	248.145	
8	15.00	247.910	
9	14.00	247.910	
10	13.00	247.793	
11	12.00	248.145	
12	11.00	248.262	
13	10.00	248.262	
14	9.00	247.793	
15	8.00	248.145	

Рис. 6.5 – Вид электронной таблицы результатов подстройки (режим развертки)

Использование усреднения и чередования фаз

Усреднение – способ снижения любого вида шума, влияющего на фазовые измерения. Данным способом уменьшается погрешность, но увеличивается время подстройки. 

Один из основных случаев дрейфа фазы с течением времени – это дрейф I/Q-сигналов ЦАП. Если используется чередование фаз, то этот дрейф компенсируется изменением фазы немодулированного группового сигнала при использовании усреднения.

7 От измерения фазы к ее подстройке

Выше было рассказано о том, как измерить разность фаз. Это первый и наиболее сложный этап. В данной главе объясняется, как использовать полученные результаты измерений для подстройки фаз между двумя ВЧ-портами (строго говоря, в измерительной плоскости входа сумматора, что должно быть эквивалентно плоскости входа ИУ) на требуемую величину.

Фаза зависит от частоты и уровня ВЧ-сигнала, температуры и времени:

Влияющий фактор	**Влияние, если не учитывать**
Частота	Очень сильное, вплоть до 360°
Уровень	Сильное, до 30° (в зависимости от используемого прибора)
Температура	Среднее, обычно менее 2°
Время	Несущественное

Влияние фактора времени очень мало и может быть исключено посредством внутренней подстройки. Так как это занимает некоторое время, рекомендуется использовать только функцию подстройки уровня, которая включает в себя подстройку всех значимых компонентов, имеющих отношение к дрейфу фазы.

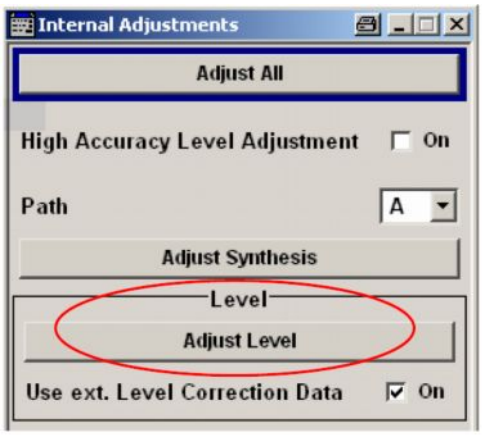


Рис. 7.1 – Использование внутренней подстройки для устранения дрейфа фазы

Эффект от трех основных факторов – частоты, уровня и температуры – повторяется с высокой степенью точности и поэтому может быть компенсирован фазовой подстройкой. Подстройку можно выполнить следующими способами:

- вручную
- с помощью программы PhaseTracker V1.4
- с помощью любой пользовательской программы управления системой

Но какой тип настройки необходимо применить в каждом конкретном случае? Это зависит от следующих факторов:

- используемый частотный диапазон
- используемый диапазон уровней
- возможность поддержания постоянной температуры
- требования к точности измерения фазы

Ручная фазовая подстройка

Фаза, измеряемая и отображаемая ПО PhaseTracker V1.4 “φ_m” является фазой, которую нужно установить для генератора 1, чтобы достигнуть фазового соотношения 180° между двумя портами, тогда как фаза генератора 2 фиксирована и равна 0°.

Чтобы установить произвольную разность фаз φ между сигналами генераторов 1 и 2 необходимо:

- установить значение сдвига фазы φ_{o1} генератора 1 равное φ_m +180°
- установить значение сдвига фазы φ_{o2} генератора 2 равное φ

Этот метод ручной подстройки применяется в случае, если частота и уровень сигналов генераторов изменяются очень редко или не изменяются совсем.

Постройка фазы с помощью PhaseTracker V1.4

С помощью ПО PhaseTracker V1.4 можно подстроить фазу до значения 0° используя характеристики, записанные в предыдущих развертках, точнее говоря, в файле PhaseLogSweep.csv в текущем рабочем каталоге.

Необходимо нажать клавишу Adjust to 0° для выполнения двумерной интерполяции, основанной на характеристиках, которые определяют наилучшую фазу при заданных значениях частоты и уровня. Эта фаза устанавливается для первого генератора сигналов и отображается на индикаторе фазы в ПО PhaseTracker. Фаза второго генератора сигналов остается неизменной и может быть использована для установки номинальной фазы, которая и будет являться действующей разницей фаз между двумя ВЧ-выходами.

Фазовая подстройка с помощью пользователь-ской программы управления системой

В некоторых случаях использование ПО PhaseTracker V1.4 является не лучшим выбором для подстройки фазы, а именно:

- если генераторы сигналов работают не в ручном режиме, а в режиме дистанционного управления, то данное ПО следует оснастить функцией для фазовой подстройки
- если необходимо скомпенсировать влияние температуры
- если установка состоит из более двух генераторов сигналов

Для MIMO или фазированной антенной решетки используется установка, включающая в себя несколько генераторов сигналов с идентичными настройками. В таком случае рекомендуется использовать режим удаленного доступа для установки одинаковой частоты или уровня или других изменений в секции цифровой модуляции.

Ниже приведен пример подстройки фазы в измерительной установке, включающей в себя четыре одноканальных генератора сигналов, например, генераторы SMBV:

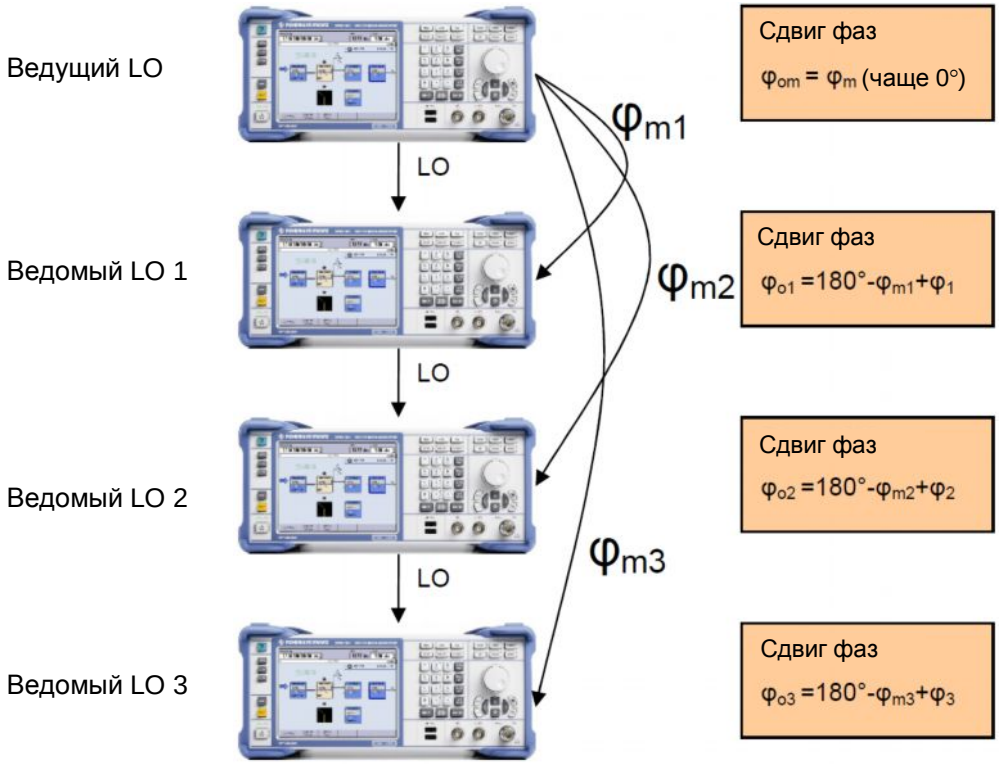


Рис. 7.2 – Фазовая подстройка четырех приборов SMBV

В первую очередь измеряется фаза φm1 между Ведущим LO и Ведомым 1. Эта фаза может быть как единственным определенным значением (измеренным с помощью GetPhaseSingle), так и результатом интерполяции характеристик, записанных с помощью GetPhaseCont (показывающим зависимость от температуры), или характеристик, записанных с помощью StartSweep (показывающих зависимость от частоты и уровня).

Эти интерполяции должны быть сделаны со стороны контроллера системы. Поэтому необходимо сохранить записанные файлы и переименовать их, например, так: PhaseLogSweep1.csv и PhaseLogCont1.csv.

Затем необходимо повторить те же самые измерения, но использовать генератор сигналов Ведомый LO 2 вместо генератора сигналов Ведомый LO 1. Для всех измерений должны использоваться одни и те же кабели. В диалоговом окне подключения должен быть выбран только генератор сигналов Ведомый LO 2, а второй вход сумматора должен быть включен.

Далее необходимо сохранить записанные файлы и переименовать их, например, так: PhaseLogSweep2.csv и PhaseLogCont2.csv.

Повторить то же самое для генератора сигналов Ведомый LO 3.

После измерения всех фаз отключить сумматор и подключить вместо него испытуемое устройство, например, входные разъемы приемника или антенны.

Для инициализации и после всех значимых изменений частоты, уровня или температуры, программное обеспечение системы должно установить сдвиг фазы φ_o в секции цифровой модуляции генератора сигналов:

1. Считать характеристики из файла DeltaPhase.csv и найти фазу для текущих значений частоты и уровня с помощью интерполяции.
2. Если это необходимо, применить поправочное значение для температуры:

   -Определить влияние разницы температуры на два генератора сигналов с помощью DeltaPhaseLog.csv

   - Перемножить это значение с отношением текущей частоты к частоте, при которой был записан файл DeltaPhaseLog.csv

   - Получить значение φ_m в текущей рабочей точке
3. Установить сдвиги фаз модулирующих сигналов φ_{om}, φ_{o1}, φ_{o2}, φ_{o2} в соответствии с формулами на рис. 7.2.

8 Заключение

Генераторы сигналов SMATE200A, SMU200A, SMJ100A и SMBV100A компании Rohde & Schwarz, оснащенные опцией B90 обеспечивают отличную фазовую стабильность по времени, по уровню и по температуре. Однако работа с когерентными ВЧ-сигналами всегда подразумевает затрату некоторых усилий на подстройку. Если используются сигналы с уровнем более -50 дБмВт, то хорошим выбором будет работа с анализатором цепей (благодаря его высокой скорости работы). Для сигналов с уровнем ниже -50 дБмВт рекомендуется использовать метод "сумматор и анализатор спектра", благодаря высокой чувствительности и простоте использования.

Программное обеспечение PhaseTracker позволяет осуществлять точное измерение фаз и имеет возможность сохранять характеристики в файле, что облегчает процесс подстройки.

9 Дополнительная информация

Данные указания по применению периодически обновляются. Для того чтобы скачать последнюю версию, посетите веб-сайт http://www.rohde-schwarz.com/appnotes/1GP67.

10 Информация для заказа

Генераторы сигналов

R&S®SMATE200A	Векторный генератор сигналов	1400.7005.02
R&S®SMATE-B103	ВЧ-тракт A от 100 кГц до 3 ГГц	1401.1000.02
R&S®SMATE-B106	ВЧ-тракт A от 100 кГц до 6 ГГц	1401.1200.02
R&S®SMATE-B203	ВЧ-тракт B от 100 кГц до 3 ГГц	1401.1400.02
R&S®SMATE-B206	ВЧ-тракт B от 100 кГц до 6 ГГц	1401.1600.02
R&S®SMATE-B9	ARB-генератор, 128 млн. отсчетов	1404.7500.02
R&S®SMATE-B10	ARB-генератор, 64 млн. отсчетов	1401.2707.02
R&S®SMATE-B11	ARB-генератор, 16 млн. отсчетов	1401.2807.02
R&S®SMATE-B13	Главный модуляционный модуль	1401.2907.02
R&S®SMATE-B90	Фазовая когерентность	1404.9531.02
R&S®SMU200A	Векторный генератор сигналов	1141.2005.02
R&S®SMU-B103	ВЧ-тракт A от 100 кГц до 3 ГГц	1141.8603.02
R&S®SMU-B106	ВЧ-тракт A от 100 кГц до 6 ГГц	1141.8803.02
R&S®SMU-B203	ВЧ-тракт B от 100 кГц до 3 ГГц	1141.9500.02
R&S®SMU-B9	ARB-генератор, 128 млн. отсчетов	1161.0766.02
R&S®SMU-B10	ARB-генератор, 64 млн. отсчетов	1141.7007.02
R&S®SMU-B11	ARB-генератор, 16 млн. отсчетов	1159.8411.02
R&S®SMU-B13	Главный модуляционный модуль	1141.8003.02
R&S®SMU-B90	Фазовая когерентность	1409.8604.02
R&S®SMJ100A	Векторный генератор сигналов	1403.4507.02
R&S®SMJ-B103	ВЧ-тракт от 100 кГц до 3 ГГц	1403.8502.02
R&S®SMJ-B106	ВЧ-тракт от 100 кГц до 6 ГГц	1403.8702.02
R&S®SMJ-B9	ARB-генератор, 128 млн. отсчетов (в реальном масштабе времени)	1404.1501.02
R&S®SMJ-B10	ARB-генератор, 64 млн. отсчетов (в реальном масштабе времени)	1403.8902.02
R&S®SMJ-B11	ARB-генератор, 16 млн. отсчетов (в реальном масштабе времени)	1403.9009.02
R&S®SMJ-B50	ARB-генератор, 64 млн. отсчетов	1410.5505.02
R&S®SMJ-B51	ARB-генератор, 16 млн. отсчетов	1410.5605.02
R&S®SMJ-B13	Главный модуляционный модуль	1403.9109.02
R&S®SMJ-B90	Фазовая когерентность	1410.5805.02
R&S®SMBV100A	Векторный генератор сигналов	1407.6004.02
R&S®SMBV-B103	ВЧ-тракт от 100 кГц до 3.2 ГГц	1407.9603.02
R&S®SMBV-B106	ВЧ-тракт от 100 кГц до 6 ГГц	1407.9703.02
R&S®SMBV-B10	ARB-генератор, 32 млн. отсчетов (120 МГц, в реальном масштабе времени)	1407.8607.02
R&S®SMBV-B50	ARB-генератор, 32 млн. отсчетов (120 МГц)	1407.8907.02
R&S®SMBV-B51	ARB-генератор, 32 млн. отсчетов (60 МГц)	1407.9003.02
R&S®SMBV-B90	Фазовая когерентность	1404.9531.02

Анализаторы спектра

R&S® FSPxx	от 9 кГц до 30 ГГц	1093.4495.xx
R&S® FSUxx	от 20 Гц до 26,5 ГГц	1129.9003.xx
R&S® FSQxx	от 20 Гц до 40 ГГц	1155.5001.xx
R&S® FSLx	от 9 кГц до 6 ГГц	1300.2502.xx
R&S® FSGxx	от 9 кГц до 13,6 ГГц	1309.0002.xx
R&S®FSVxx	от 9 кГц до 7 ГГц	1307.9002.xx

О компании Rohde & Schwarz

Rohde & Schwarz представляет собой независимую группу компаний, специализирующуюся на производстве электронного оборудования. Rohde & Schwarz является ведущим поставщиком контрольно-измерительных систем и приборов, оборудования для теле- и радиовещания, систем радиомониторинга и радиопеленгации, а также систем профессиональной радиосвязи специального назначения. Rohde & Schwarz успешно работает уже 75 лет, представительства и сервисные центры компании находятся в более чем 70 странах. Головной офис компании расположен в Мюнхене, Германия.

Обязательства по охране окружающей среды

- Энергосберегающие изделия
- Постоянное улучшение экологической устойчивости
- Сертифицированная система экологического менеджмента ISO 14001

Certified Quality System
ISO 9001

Контакты в регионах

Европа, Африка, Ближний Восток
+49 89 4129 12345
customersupport@rohde-schwarz.com

Северная Америка
1-888-TEST-RSA (1-888-837-8772)
customer.support@rsa.rohde-schwarz.com

Латинская Америка
+1-410-910-7988
customersupport.la@rohde-schwarz.com

Азия/Тихий океан
+65 65 13 04 88
customersupport.asia@rohde-schwarz.com

Китай
+86-800-810-8228 /+86-400-650-5896
customersupport.china@rohde-schwarz.com

Данный документ и поставляемые программы могут применяться только при соблюдении условий, изложенных в области загрузки веб-сайта Rohde & Schwarz.

R&S® является зарегистрированным товарным знаком компании Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Товарные знаки и торговые марки принадлежат соответствующим владельцам.

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG
Mühldorfstraße 15 | D - 81671 München
Тел. + 49 89 4129 - 0 | Факс + 49 89 4129 – 13777

www.rohde-schwarz.com