

Измерение группового времени задержки с помощью анализаторов спектра и сигналов

Указания по применению

Изделия:

- I R&S®FSW
- I R&S®FSW-K17

Фазовые искажения в канале передачи определяются путем измерения группового времени задержки (ГВЗ). Чтобы обеспечивалось хорошее качество сигнала, ГВЗ должны быть как можно ниже. Обычно для анализа непостоянства ГВЗ (в качестве меры фазовых искажений) используются векторные анализаторы цепей.

В настоящих указаниях по применению содержится базовая информация о концепции измерения группового времени задержки с помощью анализаторов спектра и генераторов сигналов, а также о том, как этот метод упрощает измерительную установку и увеличивает скорость измерений.

В примерах измерений показаны лимитирующие факторы такого подхода, помогая пользователю понять и избежать некоторых ограничений этого метода. Кроме того, проведено сравнение результатов измерений с результатами, полученными с помощью векторных анализаторов цепей.

Содержание

1	Введение.....	3
2	Процесс измерения ГВЗ	3
2.1	Теоретические основы.....	3
2.2	Измерение с помощью векторного анализатора цепей	4
2.3	Многотональное измерение ГВЗ	5
2.3.1	Абсолютное и относительное ГВЗ	6
3	Сравнение методов измерений.....	8
3.1	Сравнение результатов измерений	9
3.2	Преимущество в скорости измерения	10
4	Недостатки измерения.....	11
4.1	Уровень и шум многотонального сигнала	11
4.2	Многотональный сигнал и интермодуляция	13
4.2.1	Определение интермодуляции при измерениях ГВЗ	15
5	Заключение	16
5.1	Многотональный сигнал или перестраиваемая частота.....	16
6	Информация для заказа	16

1 Введение

Определение неравномерности АЧХ и фазовых искажений имеет решающее значение при анализе качества канала передачи, поскольку они ограничивают качество сигнала на стороне приемника. В большинстве случаев полезная полоса пропускания канала связи должна быть максимальной, чтобы обеспечить максимальную пропускную способность при минимальных искажениях сигнала. Доступная полоса пропускания радиоканала обычно ограничена полосовой характеристикой фильтров, усилителей и смесителей. Характеристика полосы пропускания легко просматривается на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) канала: неравномерность АЧХ в пределах используемой полосы частот может оказывать влияние на качество сигнала. Наиболее важной характеристикой, ограничивающей полосу пропускания тракта ВЧ-сигнала, является фазовое искажение или непостоянство группового времени задержки (ГВЗ), поскольку этот параметр приводит к искажению сигнала, проходящего через радиоканал. Знания о фазовых искажениях необходимы для обеспечения низких коэффициентов битовых ошибок при передаче данных.

Как правило, измерения неравномерности АЧХ и фазовых искажений выполняют с помощью векторных анализаторов цепей (ВАЦ). Принцип действия ВАЦ ограничивает измерение одной частотной точкой за раз, и ВАЦ выполняет измерения в интересующем частотном диапазоне по заданному (пользователем) количеству точек измерения. Базовое описание такого измерения приведено в следующем разделе.

В настоящих указаниях по применению описаны различные методы измерений ГВЗ. Приложение для многотонального измерения ГВЗ R&S®FSW-K17 позволяет выполнить это измерение с помощью анализатора спектра и сигналов.

Данная программная опция использует метод с несколькими несущими, и, помимо оценки ГВЗ, она также отображает неравномерность АЧХ. Ключевым в этом методе измерения является генератор сигналов, который подает на испытуемое устройство (ИУ) сигнал с несколькими несущими с использованием полной пропускной способности канала. Анализатор спектра и сигналов захватывает всю полосу частот выходного сигнала от устройства и использует цифровую обработку сигнала для определения амплитуды и фазы каждого тона сигнала с несколькими несущими. Вычисляя разности фаз между двумя соседними несущими, анализатор спектра вычисляет фазочастотную характеристику или групповое время задержки испытуемого устройства. Более подробная информация приведена в следующих разделах.

2 Процесс измерения ГВЗ

2.1 Теоретические основы

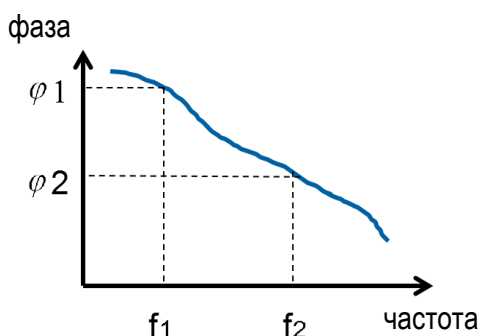
Измерения группового времени задержки обычно основаны на фазовых измерениях. Процедура измерения соответствует определению ГВЗ $\tau_{\text{гр}}$ как отрицательной производной от фазы φ (в радианах) по частоте f :

Уравнение 2-1 – Определение группового времени задержки

$$\tau_{\text{гр}}(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{df}$$

2.2 Измерение с помощью векторного анализатора цепей

По практическим соображениям ВАЦ вместо дифференциального коэффициента измеряют разностный коэффициент параметра передачи S_{21} , что дает хорошее приближение к искомому ГВЗ $\tau_{гр}$, если изменение фазы φ почти линейно в наблюдаемом частотном диапазоне Δf , который также называется апертурой.



$$\tau_{гр}(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\varphi}{\Delta f}$$

Рисунок 2-2 – Определение разности фаз и апертуры

На рисунке 2.2 показаны определения $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ и $\Delta f = f_2 - f_1$ для линейно спадающей ФЧХ, например, кабеля.

Для устройств без преобразования частоты, таких как кабели, фильтры или усилители, измерения параметра S_{21} на двух разных частотах могут происходить последовательно. ВАЦ подает тестовый сигнал с известной амплитудой и фазой, и затем принятый сигнал сравнивается с задающим сигналом.

Ключевым измерением для повышающих или понижающих преобразователей частоты является относительное и/или абсолютное значение ГВЗ. Для таких преобразователей частоты, как смесители, фаза между входным и выходным сигналами не может быть измерена напрямую, так как их частоты различаются. На фазу влияет не только сам компонент, но и фаза гетеродина. Одно из возможных решений состоит в использовании так называемого метода опорного смесителя, в котором дополнительный смеситель использует тот же гетеродин в качестве ИУ для возврата к ВЧ- или ПЧ-сигналу, чтобы получить одинаковые частоты в опорном и измерительном приемнике ВАЦ.

Если сигнал гетеродина ИУ недоступен, провести измерение ГВЗ с помощью опорного смесителя невозможно. В этом случае очень распространенным методом в прошлом было использование АМ- или ЧМ-модулированных сигналов и измерение задержки сигнала модуляции. Другие методы пытаются восстановить сигнал гетеродина. Они используют внешний генератор сигналов в качестве гетеродина для опорного смесителя и пытаются подстраивать частоту генератора до тех пор, пока не будет минимизирована зависимость фазового дрейфа сигнала ПЧ от времени. Эти методы имеют ограничения по динамическому диапазону, точности и скорости измерения.

Другой метод состоит в возбуждении испытуемого устройства двухтональным сигналом. Измеряя разности фаз между двумя сигналами на входе и выходе, анализатор цепей вычисляет фазочастотную характеристику (ФЧХ) или групповое время задержки испытуемого устройства. Точность измерения не зависит от стабильности частоты встроенного гетеродина при условии, что отклонение находится в пределах полосы измерения приемников анализатора цепей. Чтобы измерить разность фаз двух несущих, ВАЦ должен содержать двухтональный источник и два приемника, которые будут измерять оба сигнала одновременно.

2.3 Многотональное измерение ГВЗ

В настоящее время большинство измерений ГВЗ выполняются с помощью синусоидальных сигналов, частоты которых изменяются (ступенчато) в интересующем частотном диапазоне. Для получения полной характеристики необходимо измерить реакцию цепи во множестве частотных точек. Для каждой точки измерения частота источника и приемника должна изменяться ступенчато, а переходные процессы на измерительных фильтрах должны завершиться до считывания показаний. Кроме того, необходимо учитывать задержку на ИУ, которая может достигать 230 мс (для спутника на орбите).

В отличие от одиночной синусоиды, сигнал с несколькими несущими содержит несколько синусоид, каждая из которых имеет свою частоту и фазу. Такой подход может иметь значительные преимущества по сравнению со ступенчатой перестройкой частоты, особенно если он характеризуется большими задержками или множеством контрольных точек. Сигнал с несколькими несущими (многотональный сигнал) чаще всего формируется с целым числом периодов каждой отдельной синусоиды, эти сигналы также называются ортогональными сигналами. Простой пример такого сигнала показан на следующем рисунке.

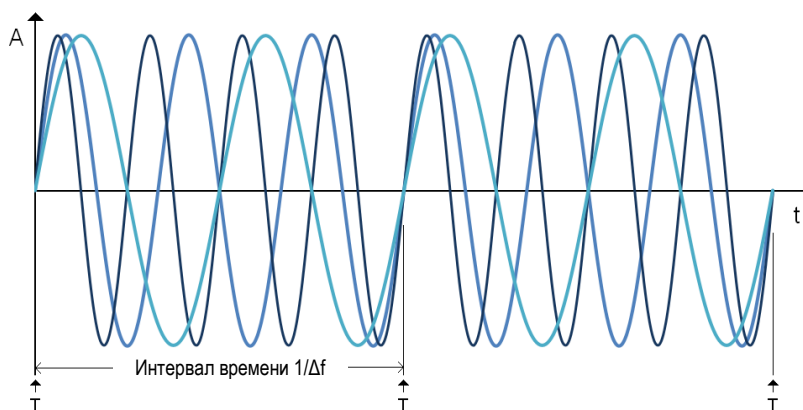


Рисунок 2.3-1 – Осциллограмма сигнала с несколькими ортогональными синусоидальными несущими и точками запуска

В данном примере для иллюстрации наиболее важных критериев для ортогонального сигнала с несколькими несущими используются три синусоидальных сигнала. Частоты одиночных тонов выбираются таким образом, чтобы между ними сохранялся одинаковый частотный интервал Δf . За счет этого одинакового интервала каждая синусоида в объединенном сигнале представлена целым числом периодов в наблюдаемом временном интервале $1/\Delta f$. В приведенном выше примере отмечен общий временной интервал для трех синусоид, и можно видеть целое число периодов для каждой синусоидальной волны. Следует отметить, что относительная фаза каждой синусоиды может быть отрегулирована с целью оптимизации коэффициента амплитуды общего сигнала. В приведенном выше примере, в котором все несущие начинаются с нуля градусов, сигнал становится импульсом с очень высоким коэффициентом амплитуды. Коэффициент амплитуды можно понизить, используя произвольные фазы или специальные правила для каждого тона, например, квадратичное изменение фазы от тона к тону.

Векторный генератор сигналов R&S®SMW200A со встроенным широкополосным генератором произвольных сигналов и I/Q-модулятором обеспечивает удобное решение по формированию тестовых сигналов такого вида. Генератор сигналов формирует тестовый сигнал с полосой частот до 2 ГГц и с тысячами несущих, охватывающих весь интересующий диапазон.

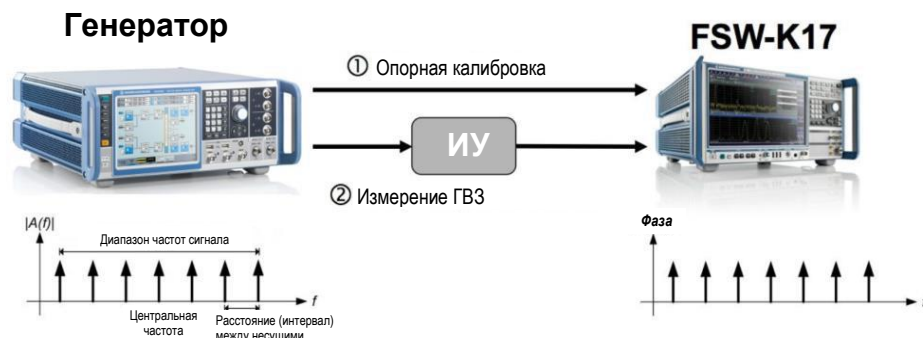


Рисунок 2.3-2 – Установка для измерения группового времени задержки

Анализатор спектра и сигналов R&S®FSW позволяет захватывать такие широкополосные сигналы в I/Q-память с мгновенной полосой пропускания до 512 МГц или даже больше. Последующая обработка сигналов, основанная на алгоритмах БПФ, позволяет восстановить амплитуду и фазу каждого отдельного тона подаваемого многотонального сигнала.

На рисунке 2-3 показана измерительная установка для определения ГВЗ: генератор сигналов формирует многотональный сигнал, который задается центральной частотой, расстоянием между несущими и количеством несущих. Использование широкополосных сигналов с несколькими несущими позволяет быстро определить ГВЗ во всем интересующем диапазоне частот.

На первом этапе выполняется калибровка (1) без испытуемого устройства (ИУ), чтобы определить опорную фазу и амплитуду отдельных несущих. Во время калибровки сигнал подается непосредственно на анализатор R&S®FSW без задействования ИУ. Данные калибровки могут быть легко и просто сохранены в файл, а затем в любое время восстановлены. Это экономит время при проведении последующих измерений и позволяет быстро переключаться между различными измерениями.

Затем, чтобы определить групповое время задержки, многотональный сигнал измеряется на выходе испытуемого устройства (2). Опция R&S®FSW-K17 может определять ГВЗ в диапазоне частот несущих по разности фаз между результатами опорного и текущего измерения.

Поскольку фазовое соотношение между опорной калибровкой и измерением является единственной вещью, которая важна для анализа, можно поработать с оптимизацией коэффициента амплитуды на генераторе. Многотональный сигнал с низким коэффициентом амплитуды улучшает отношение сигнал-шум для анализа ГВЗ и защищает ИУ.

2.3.1 Абсолютное и относительное ГВЗ

При прохождении через среду передачи электрические сигналы испытывают задержку. В лучшем случае задержка одинакова для каждой частоты. В реальных ВЧ-цепях, например, в кабелях, скорость распространения сигнала ниже, чем в вакууме, а задержка, связанная с электрической длиной, выше, чем можно было бы ожидать для

данной длины кабеля. Измерение этой задержки может быть выполнено путем вычисления производной от фазы по частоте, как описано ранее. Эта задержка называется абсолютным групповым временем задержки и относится к группе сигналов (по меньшей мере двух), которые использовались для расчета задержки. На практике абсолютное ГВЗ важно для задач определения дальности, в которых должно измеряться расстояние между двумя точками. Для ВЧ-сигналов, используемых в области связи, более важно непостоянство ГВЗ.

Электрическая задержка ВЧ-цепи часто изменяется в зависимости от частоты. В реальных задачах большинство сигналов занимают известную ограниченную полосу частот или состоят из группы спектральных линий, как для несущей с импульсной модуляцией. Если компоненты такого сигнала имеют разные задержки, их комбинация приводит к искажению сигнала. Именно по этой причине измерение непостоянства ГВЗ очень важно для любой ВЧ-цепи. Это измерение иногда также называют искажением ГВЗ или относительным ГВЗ. При измерении относительного ГВЗ постоянная задержка, вызванная испытываемым устройством, игнорируется. Эта задержка влияет на все частотные компоненты одинаковым образом и не приводит к изменению формы сигнала. Однако абсолютное ГВЗ при этом может быть значительным.

Многотональное измерение ГВЗ позволяет определить относительное и абсолютное ГВЗ. В случае относительных измерений между генератором и анализатором спектра или ИУ подключается только ВЧ-сигнал. Расчет относительного ГВЗ выполняется только между двумя соседними тонами. В то время как оба тона могут иметь большую абсолютную задержку, разница в задержке является единственным ограничением и должна оставаться в пределах инверсии половины тонального интервала. Это то же ограничение, что и для ВАЦ, оно более известно как недостаточность выборки для устройств с большой электрической длиной.

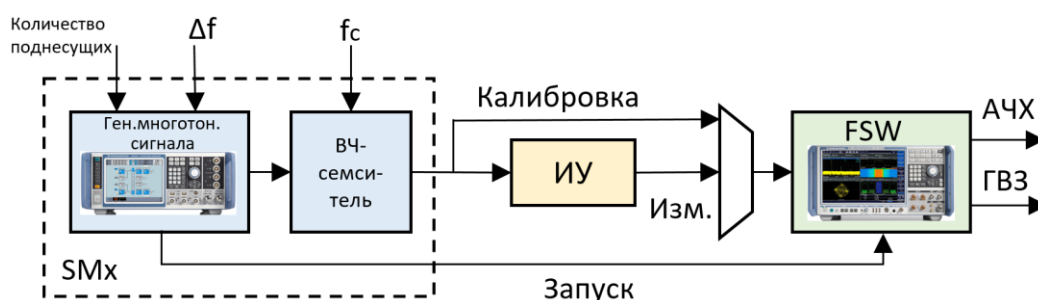


Рисунок 2.3.1 – Подключение сигнала запуска для измерения абсолютного ГВЗ

При измерении абсолютного ГВЗ используется дополнительный сигнал запуска или синхронизирующий сигнал. Многотональный сигнал состоит из конечного числа одно-тональных сигналов с равным интервалом. Интервал определяет длительность сигнала, которая в случае ортогональных сигналов составляет 1/интервал. Сигнал синхронизации отмечает начало каждого сигнального сегмента и используется в качестве сигнала запуска для анализатора спектра. При таком подходе ограничивающим фактором является повторяющееся поведение сигнала. Структура сигнала повторяется с периодом $1/\Delta f$ и создает неоднозначность в вычислении ГВЗ. Это повторение ограничивает измерение абсолютного ГВЗ максимальным значением 1/интервал между несущими.

3 Сравнение методов измерений

В данной главе приведено сравнение результатов измерения абсолютного ГВЗ с помощью ВАЦ и с помощью анализатора сигналов многотональным методом.

Для отражения наиболее типичного сценария измерения канала передачи в качестве ИУ используется полосовой фильтр. Типичной характеристикой полосового фильтра является подходящий диапазон частот с плоской характеристикой ГВЗ в полосе пропускания и резкие изменения потерь (в полосе пропускания) и ГВЗ на краях полосы.

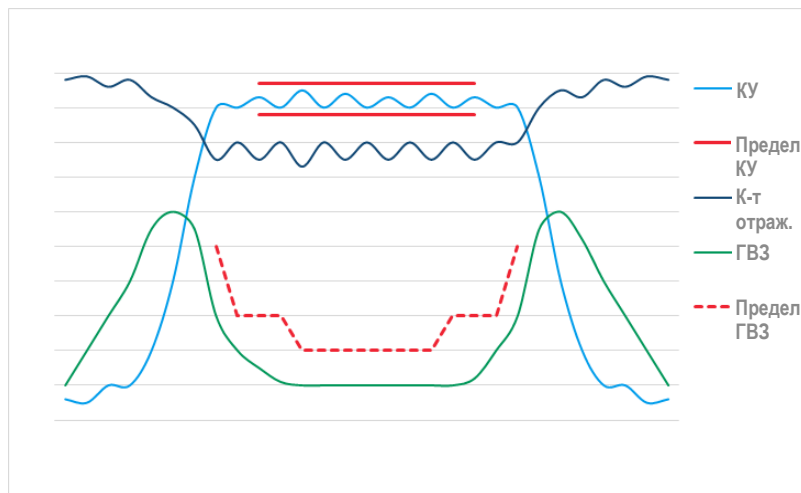


Рисунок 3-1 – Типичная характеристика полосового фильтра с пределами тестирования

В реальном сценарии тестирования важно проверить равномерность коэффициента передачи и ГВЗ в полосе пропускания. Чаще всего диапазон частот сигнала в полосе РЧ-трафика ограничивается изменениями ГВЗ на краях полосы. Важно иметь возможность выполнять точные измерения с достаточным частотным разрешением для определения доступной пропускной способности ИУ.

Сравнение методов измерения ГВЗ выполняется с помощью анализатора цепей R&S ZNB (обычный ВАЦ) и комбинации генератора сигналов R&S SMW с анализатором спектра R&S FSW (с использованием многотонального метода).

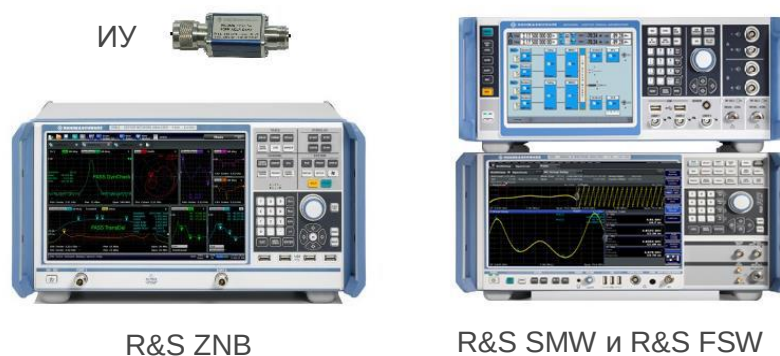


Рисунок 3-2 – Приборы, используемые для сравнения методов измерения ГВЗ

3.1 Сравнение результатов измерений

Испытание проводится на полосовом фильтре с центральной частотой 950 МГц, полосой пропускания 50 МГц и ослаблением в полосе режекции около 20 дБ по полосе 80 МГц. Испытание проводилось в 1000 точках в полосе 100 МГц, что соответствует апертуре или разрешению по частоте 100 кГц.

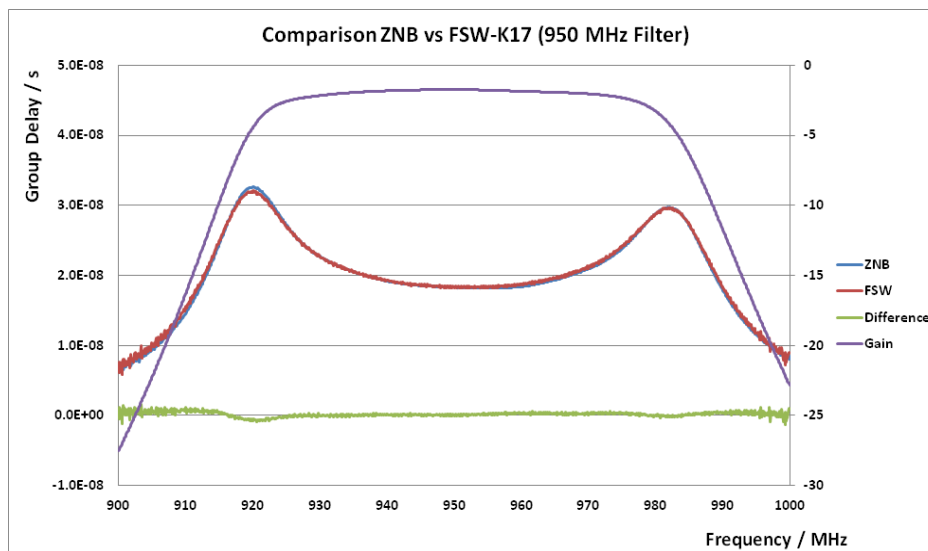


Рисунок 3.1-1 – Результаты измерения ГВЗ для ВАЦ и анализатора спектра (АС)

На рисунке 3-3 показаны результаты измерения ГВЗ обеих измерительных установок в виде графиков наложенных на одной диаграмме. Полосовая характеристика фильтра представлена кривой вносимого затухания (показана фиолетовым цветом, масштабируется на правой оси в дБ).

Результаты измерения абсолютного ГВЗ для ВАЦ (синяя кривая) и измерение с помощью анализатора спектра (красная кривая) прекрасно согласуются друг с другом. Для большей ясности зеленая кривая показывает разницу между двумя результатами измерения ГВЗ. Кривая находится вблизи нуля для всей полосы пропускания и полосы задерживания.

Небольшое различие между результатами проявляется на краях полосы, где ГВЗ имеет свой максимум. Не смотря на то, что полоса пропускания фильтра хорошо согласуется с измерительным прибором, в этом частотном диапазоне появляется высокий уровень отражения. Так как согласование на измерительных портах прибора также неполное, отраженные сигналы добавляются к тестовому сигналу, вызывая, таким образом, погрешность измерения. Этот эффект в данном испытании был минимизирован за счет использования коротких кабелей хорошего качества и добавления подходящих согласующих устройств к источнику и анализатору спектра (аттенюатор 10 дБ). Согласующие устройства не требуются для ВАЦ, поскольку он обеспечивает лучшее согласование портов, чем анализатор спектра или источник сигнала, а также дополнительно улучшает измерение путем применения полной модели коррекции ошибок.

Это краткое сравнение показывает похожие результаты измерений ГВЗ, выполненных с помощью анализатора спектра, а не ВАЦ. В случае ИУ с высоким уровнем отражения на входе или выходе важно обеспечить согласование с измерительными приборами путем добавления фиксированных аттенюаторов, при необходимости потери могут быть компенсированы увеличением уровней мощности.

3.2 Преимущество в скорости измерения

Скорость измерения играет важную роль в любой испытательной ВЧ-системе. Время измерения ГВЗ зависит от большого числа параметров, таких как количество контрольных точек или требуемая точность. Существует одна важная область, которая оказывает прямое и огромное влияние на время измерения ГВЗ, т.е. абсолютное значение задержки прохождения сигнала через ИУ.

Влияние ИУ на время измерения легко понять, зная процесс измерения. Для ИУ с большой задержкой измерительный прибор должен дожидаться прохождения сигнала через него, прежде чем выполнять измерения. Во многих случаях это не представляет интереса, так как ИУ напрямую подключено к измерительному прибору и содержит типовые ВЧ-цепи, такие как фильтры, усилители и смесители с временами задержки в районе от нескольких нс до нескольких сотен мкс. Измерение также может проводиться на длинной линии связи, например, для спутника на орбите, где задержка может достигать 240-280 мс (в зависимости от местоположения). Когда измерение ГВЗ выполняется последовательно как в обычном ВАЦ (частота за частотой), эта задержка будет иметь огромное влияние и может составить несколько минут на испытание, так как прибору после каждого шага по частоте необходимо подождать, пока сигнал пройдет через ИУ и вернется обратно.

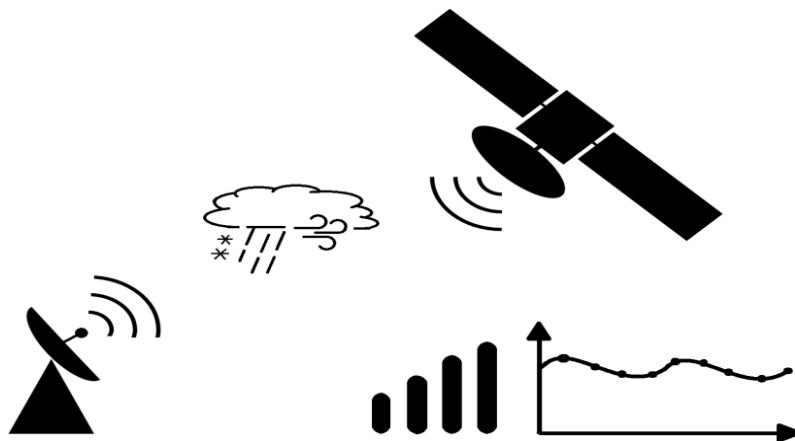


Рисунок 3.2-1 – Влияние пути прохождения сигнала на измерение

В случае длительного измерения неравномерности коэффициента передачи и ГВЗ (например, для дальней связи или спутника на орбите) результаты измерений будут зависеть от изменения пути прохождения сигнала. Типичным примером является изменение значения потерь из-за движущихся облаков, которое накладывается на характеристику коэффициента передачи и может привести к получению неправильных результатов. Измерение искажений ГВЗ сильно затруднено, так как изменения расстояния (для движущегося спутника) влияют на измерение относительного ГВЗ и усложняют измерение.

Опция многотонального измерения ГВЗ, доступная для анализаторов спектра R&S®FSW, имеет важное преимущество в этом сценарии тестирования: поскольку тестовый сигнал охватывает всю полосу пропускания канала одновременно, для получения всех точек измерения требуется только одно измерение. Для выполнения широкополосного анализа относительного ГВЗ в полосе 160 МГц с интервалом между несущими 200 кГц (800 несущих) опции требуется всего 350 мс и всего 80 мс с интервалом между несущими 1 МГц (160 несущих). Помимо результата измерения ГВЗ опция также отображает неравномерность амплитуды в рамках того же времени измерения.

4 Недостатки измерения

В предыдущих разделах документа были обсуждены основные принципы и различные концепции измерения группового времени задержки.

Измерение с использованием многотонального задающего воздействия, генераторов сигналов и анализаторов спектра обеспечивает получение результатов, аналогичных традиционному методу с использованием ВАЦ и измерения со ступенчатой перестройкой частоты. Не смотря на то, что измерение с помощью анализатора спектра в некоторых случаях (для ИУ с большой задержкой) обеспечивает преимущество в скорости, необходимо знать некоторые ограничения, которым подвержен этот метод.

4.1 Уровень и шум многотонального сигнала

Как и в большинстве других измерений, на точность измерения ГВЗ влияет отношение сигнал-шум (SNR) на стороне приемника. В традиционных измерениях ГВЗ с помощью ВАЦ тестовый сигнал состоит из одной немодулированной несущей, которая ступенчато перестраивается по всему интересующему частотному диапазону. Уровень несущей либо известен, либо очень легко измеряется с помощью анализатора цепей. В случае многотонального метода измерения ГВЗ уровень каждого отдельного тона может быть неизвестен. Мощность несущей чаще всего устанавливается на генераторе как средняя мощность всего сигнала. Мощность несущей для каждого тона может быть рассчитана как средняя мощность, деленная на количество тонов. Важно ограничить количество тонов до приемлемого значения, которое требуется для получения достаточного частотного разрешения, поскольку получающееся отношение SNR уменьшается с ростом числа несущих. Влияние отношения SNR на измерение фазы лучше всего понять с помощью данного упрощенного рисунка:

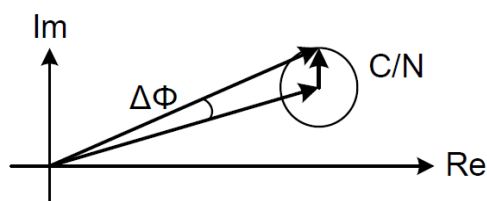


Рисунок 4.1-1 – Оценка характеристик измерения

Для каждой точки измерения ГВЗ рассчитывается фаза между двумя соседними тонами. Точность измерения фазы напрямую зависит от соотношения уровня тона и уровня шума. Результирующая погрешность измерения ГВЗ для каждой точки измерения в сигнале с несколькими несущими может быть рассчитана по следующей формуле:

Уравнение 4.1 – Расчет погрешности измерения ГВЗ из-за отношения сигнал-шум (SNR)

$$\text{std}(\tau) = \frac{1}{2\pi\Delta f} \cdot 10^{\frac{C/N(\text{дБ})}{20}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{количество усреднений}}}$$

где

Δf – частотный интервал;

C/N – отношение несущая/шум в дБ.

Как видно из приведенной выше формулы, помимо отношения сигнал-шум имеются два других важных параметра, которые оказывают непосредственное влияние на точность измерения. Частотный интервал между тонами оказывает прямое влияние на точность измерения ГВЗ. Причина заключается в определении ГВЗ как производной изменения фазы по наблюдаемому частотному интервалу, что объяснялось в начале этого документа. Для заданного отношения сигнал-шум стабильность считывания ГВЗ может быть улучшена за счет использования более широкого тонального интервала (т.е. большей апертуры).

В тех случаях, когда интервал между тонами увеличить невозможно, лучшим способом улучшить качество измерения является последовательное выполнение нескольких измерений с усреднением результатов. В случае многотонального измерения ГВЗ это очень эффективный способ, так как каждое отдельное измерение чрезвычайно короткое и обычно занимает всего лишь несколько мкс ($1/\Delta f$, см. раздел с теоретическими основами в начале документа). Измерительное приложение на анализаторе сигналов R&S FSW выполняет 5000 усреднений (по умолчанию). Процесс усреднения реализуется как часть обработки сигналов и увеличивает время захвата сигнала. Такое увеличение захваченных данных и последующее усреднение лучше всего понимать как выигрыш в отношении сигнал-шум при обработке сигналов, в этом случае оно фактически возрастает на 37 дБ.

В то время как среднее значение сигнала влияет на уровень шума измерения, существует один важный аспект на уровне несущей, который здесь следует упомянуть. Для измерения искажений ГВЗ важно соотношение относительной фазы соседних тонов в сигнале с несколькими несущими между опорной калибровкой и измерением. Чтобы улучшить характеристики измерения можно поработать над оптимизацией коэффициента амплитуды, поскольку абсолютная фаза каждого тона не важна. Коэффициент амплитуды определяется как отношение пикового уровня к среднему уровню всего тестового сигнала. На коэффициент амплитуды многотонального сигнала может влиять фаза составляющих его тонов. Сигнал с высоким коэффициентом амплитуды снизит общую мощность и энергию в каждом тоне, так как пиковая мощность чаще всего ограничивается испытываемым устройством. Чтобы избежать сжатия, максимальный уровень многотонального сигнала должен оставаться в пределах возможностей испытываемого оборудования. Многотональный сигнал с низким коэффициентом шума улучшает отношение SNR для анализа ГВЗ и защищает ИУ. При правильном выборе фаз для каждого тона коэффициент амплитуды может быть минимизирован. Генераторы сигналов R&S SMBV и R&S SMW оснащены встроенными функциями для формирования сигналов с несколькими несущими с минимальным или выбираемым коэффициентом амплитуды для заданного количества тонов.

Чтобы суммировать описанные выше влияющие факторы, приведем пример влияния отношения SNR на точность типичного измерения ГВЗ:

Таблица 4.1 – Влияние отношения SNR на погрешность измерения ГВЗ

Результаты измерений для различных значений SNR и $\Delta f = 250$ кГц	
Отношение SNR	СКО
10 дБ	2,8 нс
20 дБ	0,90 нс
30 дБ	0,28 нс
40 дБ	0,09 нс

Таблица рассчитана для апертуры 250 кГц. Уменьшение отношения SNR на 20 дБ ухудшает точность измерения ГВЗ в 10 раз. Для достижения требуемого отношения SNR вместо увеличения уровня сигнала может использоваться увеличение времени измерения, т.е. процедура усреднения.

4.2 Многотональный сигнал и интермодуляция

Очень важным аспектом помимо влияния шума является искажение многотонального сигнала на этапе формирования, анализа и воздействия на ИУ.

В обычном способе измерения ГВЗ с помощью ступенчато перестраиваемого одиночного немодулированного тона, поскольку оно выполняется с помощью анализатора цепей, интермодуляционное искажение ИУ интереса не представляет. Для каждого испытания используется только один тон, а приемник настроен на основную частоту этого сигнала.

При измерении с помощью многотонального сигнала и анализа в широкой полосе картина другая. Все нелинейные составляющие в сигнальном тракте будут приводить к появлению некоторой степени интермодуляции, которая оказывает прямое влияние на измерение фазы и, следовательно, ГВЗ. Следующий упрощенный рисунок поможет понять этот эффект.

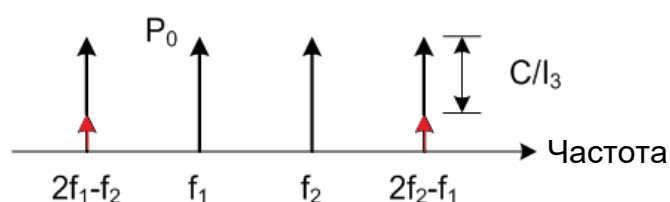


Рисунок 4.2-1 – Интермодуляция третьего порядка для двух несущих

Сигнал с несколькими несущими (многотональный сигнал) состоит из нескольких тонов с одинаковым интервалом между ними. Когда сигналы проходят через нелинейную цепь, интермодуляция двух соседних тонов (f_1 и f_2) создает дополнительные сигналы с обеих сторон этих пар (интермодуляционные составляющие, $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$) на таком же расстоянии, что и интервал между несущими. В полном многотональном сигнале на этих частотах также имеются несущие.

Эти дополнительные сигналы интермодуляции приведут к изменению фазы соседних несущих. Для лучшего понимания на следующем графике показан данный эффект для одного тона:

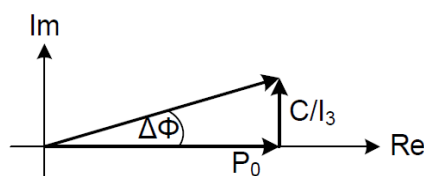


Рисунок 4.2-2 – Фазовые искажения из-за интермодуляции

Для каждого тона многотонального сигнала имеется, по меньшей мере, два соседних тона, которые создают интермодуляционные тоны на той же частоте. Чтобы рассчитать максимальное влияние этой интермодуляции на измерение ГВЗ, следует рассчитать влияние на фазовый сдвиг двух соседних линий в спектре. Наихудший случай влияния будет иметь место, если интермодуляционный сигнал ортогонален (90 градусов) по фазе наблюдаемой спектральной линии. Влияние на ГВЗ можно рассчитать по следующей формуле:

Уравнение 4.2-1 – Расчет наихудшего значения погрешности измерения ГВЗ

$$\tau = \frac{1}{2\pi\Delta f} \cdot 2 \cdot \Delta\Phi = \frac{1}{2\pi\Delta f} \cdot 2 \cdot 10^{\frac{-C/I_3 \text{ (дБ)}}{20}}$$

где

Δf – частотный интервал;

C/I_3 – уровень интермодуляционных искажений в дБ.

Используя пример с интервалом между несущими 250 кГц и полагая уровень интермодуляционных искажений равным 47 дБ, вычисление максимального влияния даст погрешность измерения ГВЗ 5,8 нс. Одним из наших предположений было наихудшее фазовое соотношение между соседними несущими, и исследовалась только одна пара несущих.

В реальном сценарии используются сотни несущих, которые генерируют накладывающиеся интермодуляционные составляющие. Фазы отдельных несущих могут быть установлены таким образом, чтобы оптимизировать коэффициент амплитуды многотонального сигнала. Это положительно влияет на отношение сигнал-шум (см. предыдущую главу) и приводит к вариации фаз между несущими, например, по методу фаз Ньюмана. ($\Phi(k) = (\pi \cdot k^2)/N$).

Аналитическое решение такого сценария с сотнями накладывающихся несущих и их интермодуляционных составляющих трудно себе представить, но можно смоделировать с помощью современных программных инструментов. Расчет погрешности измерения ГВЗ из-за интермодуляционных искажений при использовании многотонального сигнала с оптимизированным коэффициентом амплитуды приводит к следующей формуле:

Уравнение 4.2-2 – Расчет типичной погрешности измерения ГВЗ из-за интермодуляции

$$\max_k \tau(k) \approx \frac{1}{2\pi\Delta f} \cdot 0,16 \cdot 10^{\frac{-C/I_3 \text{ (дБ)}}{20}}$$

По сравнению с наихудшим сценарием видно, что влияние на ГВЗ примерно в 10 раз ниже для рекомендуемого тестового сигнала с низким коэффициентом амплитуды. В следующей таблице приведен обзор погрешности измерения ГВЗ для разных уровней интермодуляционных искажений:

Таблица 4-2 – Влияние интермодуляции на погрешность измерения ГВЗ

Влияние интермодуляции на погрешность измерения ГВЗ, для $\Delta f = 250$ кГц	
Интермодуляционные искажения	Макс. погрешность измерения ГВЗ
30 дБн	3,2 нс
40 дБн	1,0 нс
47 дБн	0,46 нс
50 дБн	0,32 нс
60 дБн	0,1 нс

4.2.1 Определение интермодуляции при измерениях ГВЗ

Как объяснялось в предыдущих разделах, наряду с определенными преимуществами в скорости, двумя основными ограничениями при многотональном измерении ГВЗ являются шум и искажения. В то время как влияние шума очень легко определить по результатам измерения как нестабильные или колеблющиеся показания в частотном диапазоне и по времени, влияние интермодуляции определить труднее, и степень таких искажений может быть не ясна.

Используя вышеупомянутое моделирование сигнала с множеством несущих и добавляя к сигналу известный уровень интермодуляционных искажений третьего порядка, можно выявить влияние интермодуляции на идеальный линейный сигнал без какого-либо искажения ГВЗ.

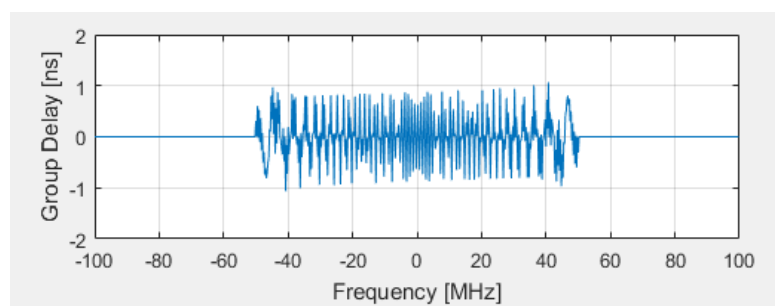


Рисунок 4.2-1 – Смоделированный результат измерения ГВЗ с интермодуляционными искажениями

Приведенный выше результат моделирования показывает расчет ГВЗ с интермодуляционными искажениями 40 дБн. Искажение ГВЗ периодически изменяется между (резонансными) значениями +1 и -1 нс во всей полосе частот сигнала. Можно видеть, что частота этих резонансов возрастает к центру сигнала. Причина этого эффекта – распределение фаз по тонам внутри сигнала, что приводит к такому показательному результату.

Для проверки приведенных выше расчетов было проведено реальное испытание. В качестве ИУ взят широкополосный усилитель, на который подаются уровни мощности, формирующие интермодуляционные искажения 40 дБн в случае двухтонального сигнала.

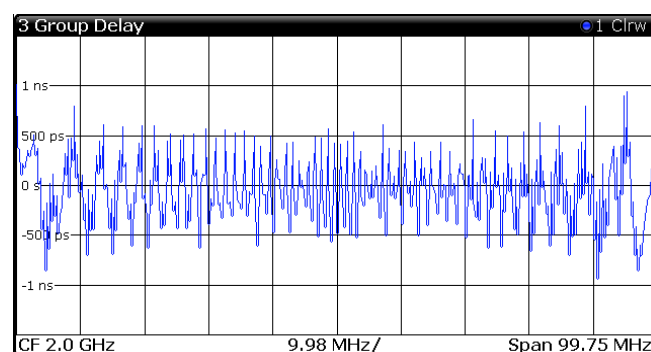


Рисунок 4.2-1 – Результат измерения ГВЗ с интермодуляционными искажениями

Как указано выше, периодические изменения ГВЗ легко распознаются в полученном результате измерения. Значение искажения ГВЗ приближается к прогнозируемой погрешности 1 нс с обеих сторон полосы частот.

5 Заключение

Опция многотонального измерения ГВЗ R&S®FSW-K17 обеспечивает широкий диапазон измерений характеристик искажения систем передачи. Групповое время задержки как мера фазовых искажений может измеряться как в относительном, так и в абсолютном виде. Из-за чрезвычайной простоты работы, быстрой процедуры измерения и высокой степени точности, опция может иметь успех в практическом применении. Она также расширяет и без того широкие измерительные возможности высококлассного анализатора спектра и сигналов R&S®FSW. В комплексе с генераторами сигналов, такими как R&S®SMW и R&S®SMBV, компания Rohde & Schwarz предлагает полноценное решение для измерения ГВЗ.

В отличие от хорошо известного однотонового измерения ГВЗ с помощью ВАЦ, подход к измерению ГВЗ с помощью многотональных сигналов мог быть неизвестен. Как только мы поняли основные принципы этого метода, он оказался таким же простым, как и традиционный способ измерения. Измерение с помощью многотональных сигналов имеет свои ограничения, но в то же время и некоторые очень важные преимущества в скорости по сравнению с обычным подходом с его единственным синусоидальным задающим воздействием.

5.1 Многотональный сигнал или перестраиваемая частота

В этой короткой таблице сравнивается традиционный метод с многотональным методом измерения ГВЗ. Хотя ВАЦ имеет преимущество в точности измерения и интерпретации его результатов, метод с несколькими несущими дает преимущества в скорости проведения испытаний.

Таблица 5.1 – Сравнение методов измерения ГВЗ

Сравнение методов измерения ГВЗ		
Пункт	Перестраиваемая частота	Многотональный сигнал
Характеристики сигнала	Очень простые	Требуют знания
Сходство с реальным сигналом	Не очень хорошее	Хорошее
Время измерения	Растет с числом точек измерения	Короткое и постоянное по числу точек
Интерпретация результатов	Очень проста	Требует знания

6 Информация для заказа

Наименование	Тип устройства	Код заказа
Анализатор спектра и сигналов	R&S®FSW8	1312.8000.08
Многотональное измерение ГВЗ	R&S®FSW-K17	1313.4150.02
Полоса анализа	R&S®FSW-B28/40/80/160/320/512	¹⁾

- 1) Для анализатора R&S®FSW доступны несколько опций расширения полосы анализа. К конфигурации прибора следует добавить необходимую опцию расширения полосы пропускания. Подробности узнавайте у торговых представителей компании Rohde & Schwarz.

О компании Rohde & Schwarz

Группа компаний Rohde & Schwarz, специализирующаяся на производстве электронного оборудования, предлагает инновационные решения в следующих направлениях: контрольно-измерительное оборудование, теле- и радиовещание, защищенная связь, кибербезопасность, радиомониторинг и радиолокация. Основанная более 80 лет назад эта независимая компания имеет широкую торгово-сервисную сеть и представлена более чем в 70 странах.

Группа компаний Rohde & Schwarz – один из мировых лидеров в своей области. Штаб-квартира компании расположена в г. Мюнхен (Германия). Компания имеет региональные штаб-квартиры в Сингапуре и Колумбии (шт. Мэриленд, США) для управления операциями в этих регионах.

Представительство в Москве:

117335 Москва, Нахимовский пр-т, 58
тел. +7 (495) 981 35 60, факс +7 (495) 981 35 65
info.russia@rohde-schwarz.com

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

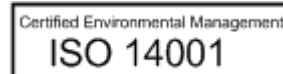
Китай

+86-800-810-8228 / +86-400-650-5896

customersupport.china@rohde-schwarz.com

Обязательства по охране окружающей среды

- Экологическая безопасность и экологический след
- Энергоэффективность и низкий уровень выбросов
- Долгий срок службы и оптимизированные производственные расходы



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

Mühlendorfstraße 15 | D - 81671 München

Тел. + 49 89 4129 - 0 | Факс + 49 89 4129 - 13777

www.rohde-schwarz.com