

# Keysight Technologies

## Точные измерения интермодуляционных искажений с помощью анализатора цепей серии PNA-X, от 10 МГц до 26,5 ГГц

### Рекомендации по применению

#### Обзор

В данном документе рассматриваются методы обеспечения точности двухтональных измерений интермодуляционных искажений при использовании СВЧ-анализатора цепей серии PNA-X компании Keysight Technologies. Одним из уникальных свойств анализатора PNA-X является наличие в его архитектуре второго внутреннего источника и внутреннего сумматора<sup>1</sup>, что делает его идеальным инструментом для двухтональных измерений интермодуляционных искажений. При проведении данных измерений важно понимать, как свойства измерительной системы влияют на погрешность измерений и как наилучшим образом подготовить измерительную установку для проведения точных измерений искажений.

## Содержание

Обзор .....	3
Условные обозначения/символы .....	5
Особенности работы приемника .....	6
Случайный шум низкого уровня .....	6
Случайный шум высокого уровня .....	8
Интермодуляционные искажения, генерируемые приёмником .....	10
Суммирование ошибок приёмника, вычисление модуля вектора ошибки (EVM).....	12
Пример измерения .....	13
Установка аттенюатора приёмника .....	23
Особенности работы источника .....	25
Уровень мощности, доступный от источников в режиме суммирования ....	25
Влияние гармоник источника .....	26
Перекры́стная модуляция источника .....	28
Исключение паразитных сигналов при измерениях ИМИ .....	29
1. Протокол центральной частоты .....	32
2. Протокол частот тонов .....	32
Приложение А. Таблицы оптимизации ИМИ для анализаторов цепей серии PNA-X .....	33
Приложение В. Тестируемый усилитель имеет IP3, равную +38 дБм. Сможет ли анализатор цепей серии PNA-X измерить ИМИ этого усилителя? .....	34
Приложение С. Краткий контрольный перечень для настройки измерений интермодуляционных искажений с использованием двухтонального непрерывно генерируемого сигнала с помощью анализатора цепей серии PNA-X с двумя внутренними источниками .....	35

## Обзор

Интермодуляционные искажения (ИМИ) являются мерой нелинейности усилителя. При подаче на вход усилителя двух или более синусоидальных частот, любые нелинейные свойства усилителя будут создавать дополнительные частотные составляющие, называемые интермодуляционными составляющими. Если на усилитель подаются входные сигналы с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , его выход будет содержать сигналы со следующими частотами:  $nf_1 + mf_2$ , где  $n, m = 0, \pm 1, \pm 2$  и так далее. Составляющие третьего порядка,  $2f_2 - f_1$  и  $2f_1 - f_2$ , вызывают наибольшую сложность из-за их близости к частотам основных тонов, а также из-за того, что их уровни мощности увеличиваются в три раза относительно увеличения уровня мощности основных тонов. Кроме того, близость к основным частотам заранее исключает возможность их устранения посредством фильтрации. Термины “точка пересечения третьего порядка (IP3)” или “уровень точки пересечения третьего порядка (TOI)”, часто используемые как взаимозаменяемые, являются показателями качества для интермодуляционных искажений.

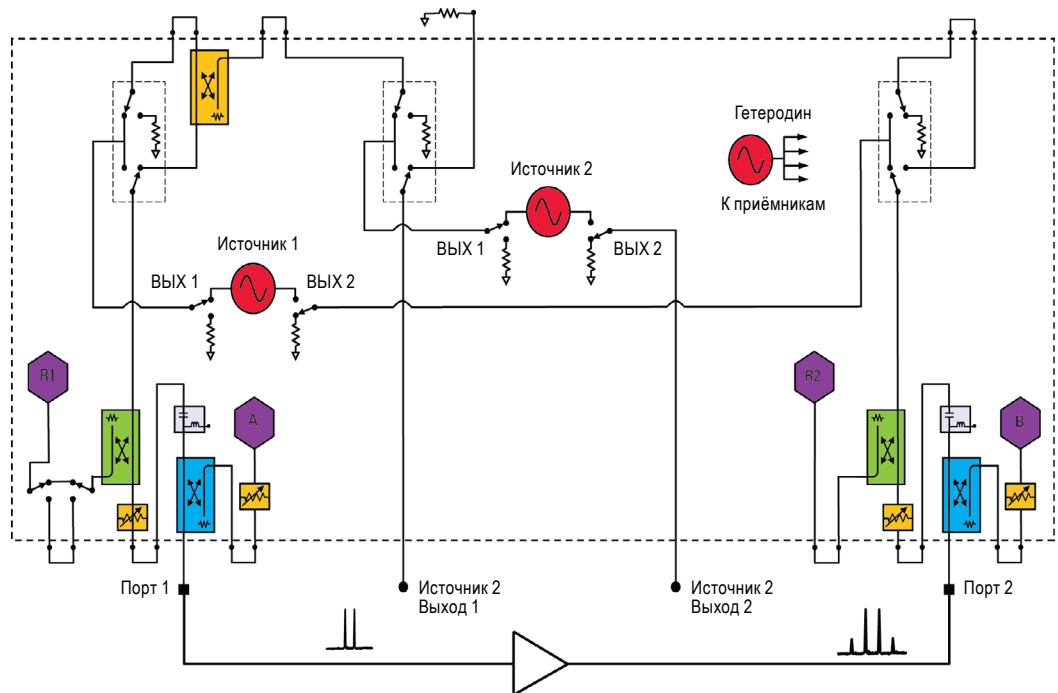


Рисунок 1. Структурная схема 2-портового анализатора цепей N5242A серии PNA-X с опцией 224.

1. Доступно в 2-портовых анализаторах цепей с опцией 224 (второй внутренний источник, сумматор и механические коммутаторы для 2-портового измерительного блока) и в 4-портовых анализаторах цепей с опцией 423 (сумматор и механические коммутаторы для 4-портового измерительного блока)

На рисунке 2 показана упрощенная установка для измерения ИМИ, отображающая области погрешностей измерений, которые мы обсудим в данном документе. В таблице 1 перечислены основные источники погрешностей при измерении ИМИ с помощью установки, показанной на рисунке 2.

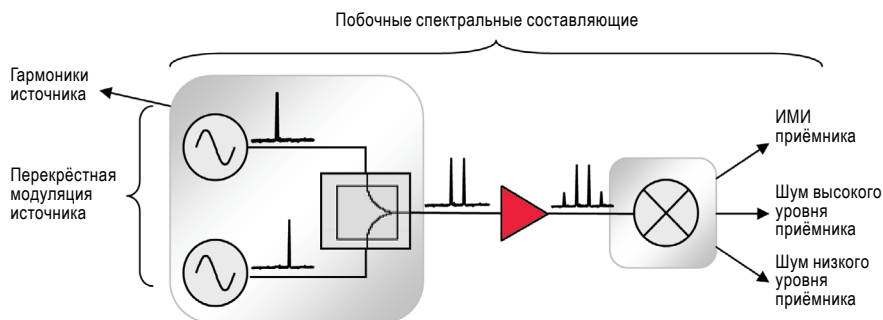


Рисунок 2. Упрощенная структурная схема двухтонального измерения, отображающая области погрешностей измерений, рассматриваемых в данном документе. Затененные области расположены внутри анализатора цепей PNA-X.

Таблица 1. Источники погрешностей при измерении ИМИ

## Особенности работы источника

**Гармоники источника:** вторая гармоника нижнего бокового тона может смешиваться с верхним боковым тоном внутри тестируемого устройства (ТУ), создавая сигнал на той же самой частоте, что и интермодуляционная составляющая, которая является нежелательной и генерируется внутри ТУ. Поскольку анализатор цепей PNA-X имеет превосходные характеристики гармоник источника ( $-60$  дБн при уровне мощности  $+10$  дБм), эта погрешность зачастую незначительна. Вы можете добавить внешние схемы фильтрации для дальнейшего уменьшения влияния гармоник источника.

**Перекрестная модуляция источника:** перекрестная модуляция источника PNA-X приблизительно равна  $-90$  дБн, что приемлемо для большинства измерений. Вы можете добавить внешние развязывающие усилители или циркуляторы для дальнейшего снижения перекрестной модуляции источника.

**Погрешность уровня мощности источника:** поскольку ИМИ устройства зависят от абсолютных уровней мощности, погрешности при отображении уровня мощности, подаваемой на вход ТУ, приводят к погрешностям измерений искажений устройства.

## Особенности работы приемника

**Шум низкого уровня или эффекты уровня собственных шумов:** для уменьшения ошибок, обусловленных шумом низкого уровня, можно уменьшить полосу ПЧ (полоса частот измерения) или величину коэффициента ослабления приемника.

**Шум высокого уровня или фазовый шум:** для уменьшения шума высокого уровня можно изменить уровень мощности, разнос частот между тонами или уменьшить полосу ПЧ.

**ИМИ приёмника:** точка пересечения третьего порядка (IP3) приемника анализатора цепей серии PNA-X приблизительно равна  $+25$  дБм для уровня входной мощности  $-5$  дБм. Для уменьшения ошибок, обусловленных IP3 приемника, можно использовать аттенюаторы приемника внутри анализатора цепей серии PNA-X.

## Побочные спектральные составляющие и ошибки рассогласования

**Побочные спектральные составляющие:** пользователь может идентифицировать побочные спектральные составляющие и попытаться устранить их посредством выбора соответствующих частот.

**Ошибки рассогласования:** ошибки рассогласования также вносят свой вклад в погрешность при проведении двухтональных измерений. В этих рекомендациях по применению ошибки рассогласования не исследуются.

## Условные обозначения/символы

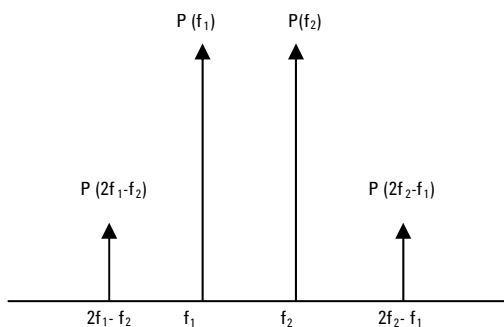


Рисунок 3. Частоты, используемые при двухтональных измерениях ИМИ.

$f_1$	Нижний боковой тон
$f_2$	Верхний боковой тон
$2f_1 - f_2$	Продукт искажений нижнего бокового тона
$2f_2 - f_1$	Продукт искажений верхнего бокового тона
$P(f_1)$	Уровень мощности нижнего бокового тона на выходе
$P(f_2)$	Уровень мощности верхнего бокового тона на выходе
$P(2f_1 - f_2)$	Уровень мощности продукта искажений нижнего бокового тона
$P(2f_2 - f_1)$	Уровень мощности продукта искажений верхнего бокового тона
$N_L$	Шум низкого уровня
$N_H$	Шум высокого уровня
EVM	Модуль вектора ошибки
IMD (ИМИ)	Интермодуляционное искажение
IP3	Точка пересечения третьего порядка
LO	Гетеродин

Все логарифмические уравнения ссылаются на логарифмы по основанию 10.

В этом документе термины “источник” и “синтезатор” являются взаимозаменяемыми. Оба этих термина относятся к внутренним синтезаторам анализатора цепей PNA-X.

В качестве примера в документе используется усилитель, который тестируется при следующих условиях:

$f_1$	= 5,00001 ГГц
$f_2$	= 5,00011 ГГц
$2f_1 - f_2$	= 4,99991 ГГц
$2f_2 - f_1$	= 5,00021 ГГц
$P(f_1)$ (вход)	= -20 дБм
$P(f_1)$ (выход)	= -10 дБм
Коэффициент усиления = 10 дБ	

Примечание: пошаговые процедуры, приведённые в данных рекомендациях по применению, были написаны для анализатора цепей N5242A серии PNA-X с версией A.07.22.01 встроенного программного обеспечения. Если используется анализатор цепей серии PNA-X с другой версией встроенного программного обеспечения, пошаговые процедуры или снимки экранов могут отличаться. Концепции и общие основные принципы остаются прежними.

## Особенности работы приёмника

Измерительный приёмник вносит свой вклад в три важных источника ошибок при проведении измерений ИМИ. Это случайный шум низкого уровня, случайный шум высокого уровня и интермодуляционные искажения, генерируемые приёмниками анализатора цепей. Путём определения индивидуальных характеристик этих трёх факторов ошибок можно вычислить суммарную ошибку приёмника. Ошибки, обусловленные шумом низкого уровня и шумом высокого уровня, можно уменьшить путём увеличения уровня мощности тона или уменьшения полосы ПЧ. Однако проблема заключается в том, что при увеличении уровня мощности тона возрастает ошибка, обусловленная искажениями приёмника, а при уменьшении полосы ПЧ скорость измерений уменьшается. Ключом к решению этой проблемы является нахождение оптимальной установки аттенюатора приёмника, при которой для данной полосы ПЧ минимальной является суммарная ошибка, а не только один из источников ошибок. В этом разделе приводится описание метода оптимизации измерений искажений и нахождения установок, которые обеспечивают самую высокую точность в кратчайший срок.

### Случайный шум низкого уровня

Случайный шум проявляется либо как шум низкого уровня, который не зависит от мощности сигнала, либо как шум высокого уровня, который связан с мощностью сигнала. Шум низкого уровня присутствует во всех измерениях с использованием приёмника. В документе, содержащем технические данные анализатора цепей PNA-X, можно найти технические характеристики уровня собственных шумов, которые являются отображением шума низкого уровня. Для удобства технические характеристики уровня собственных шумов анализатора цепей серии PNA-X воспроизведены в нижеследующей таблице.

Таблица 2. Уровень собственных шумов измерительного порта (дБм) анализатора цепей N5242A серии PNA-X, измеренный с использованием полосы пропускания 10 Гц,

Уровень собственных шумов измерительного порта (дБм)	Техническая характеристика (ТХ)	Типовое значение (тип.)
От 10 до 50 МГц	-80	-87
От 50 до 100 МГц	-90	-95
От 100 до 500 МГц	-104	-110
От 500 МГц до 2 ГГц	-114	-117
От 2 до 20 ГГц	-114	-117
От 20 до 24 ГГц	-110	-115
От 24 до 26,5 ГГц	-107	-113

Шум низкого уровня можно понизить путём уменьшения полосы частот измерения. Анализатор цепей серии PNA-X имеет диапазон полос ПЧ от 1 Гц до 600 кГц<sup>1</sup>. Полосы частот от 10 Гц до 1 кГц часто используются для измерений ИМИ. Шум низкого уровня не зависит от мощности тона или разности частот между тонами, но может зависеть от частоты, на которой проводится измерение. Шум низкого уровня может быть измерен путём исключения обоих основных тонов как низкой, так и высокой частоты, и измерения мощности шума на частоте продукта интермодуляционных искажений нижнего бокового тона. На рисунке 4 показан результат измерения шума низкого уровня. Поскольку шум низкого уровня ( $N_L$ ) пропорционален полосе частот, его можно определить по следующей формуле:

$$N_L \text{ (дБм/Гц)} = 10 * \log (N_L \text{ (мВт)}) - 10 * \log (\text{полоса частот измерения (Гц)})$$

$$N_L \text{ (дБм)} = N_L \text{ (дБм/Гц)} + 10 * \log (\text{полоса частот измерения (Гц)})$$

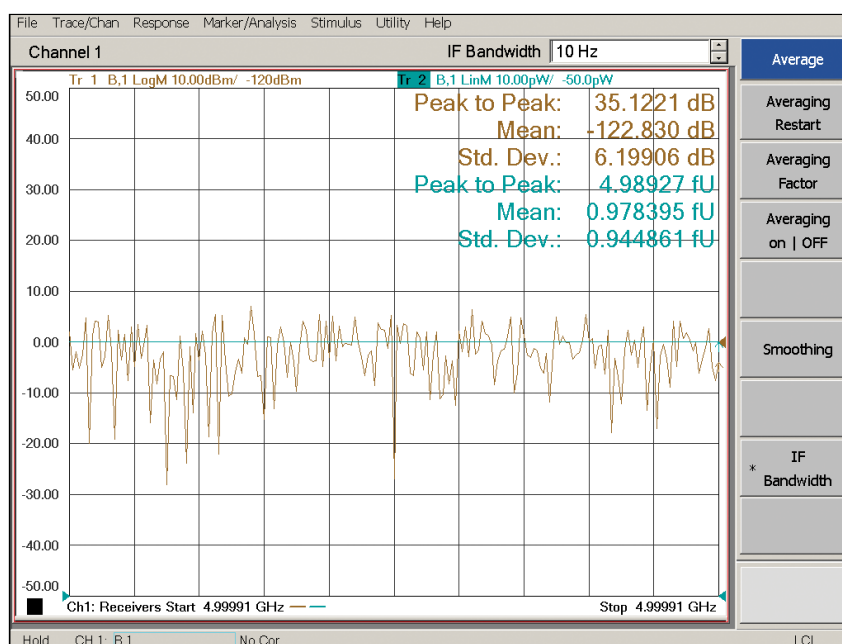


Рисунок 4. Характеристики шума низкого уровня приёмников анализаторов цепей серии PNA-X.

1. Анализатор цепей серии PNA-X позволяет устанавливать более широкие полосы частот измерения, вплоть до 5 МГц. Эти более широкие полосы частот измерения не рекомендуется использовать при измерении искажений.

## Случайный шум высокого уровня

Основными источниками шума высокого уровня являются фазовый шум в источнике ВЧ-сигнала и гетеродине источника. В случае двухтональных измерений шум высокого уровня в основном вызывается основным тоном, наиболее близко расположенным к частоте измеряемого продукта интермодуляционных искажений. Шум высокого уровня зависит от разности частот между тонами и частоты, на которой проводится измерение. Ошибка измерения, вносимая этим типом шума, может быть снижена путём уменьшения полосы частот измерения или уменьшения мощности тона. Значения для шума высокого уровня можно найти в документе, содержащем технические данные анализатора цепей PNA-X. Характеристики шума высокого уровня приведены в таблице фазового шума и для удобства воспроизведены в нижеследующей таблице.

Таблица 3. Характеристики фазового шума источников анализатора цепей N5242A серии PNA-X

<b>Порты 1, 2, 3, 4, выход 1 источника 2, выход 2 источника 2, типичные характеристики (дБн/Гц)</b>				
	Отстройка 1 кГц	Отстройка 10 кГц	Отстройка 100 кГц	Отстройка 1 МГц
От 10 до 500 МГц	-85	-85	-85	-120
От 500 МГц до 1 ГГц	-105	-115	-110	-127
От 1 до 2 ГГц	-100	-110	-105	-121
От 2 до 4 ГГц	-95	-105	-100	-115
От 4 до 8 ГГц	-89	-100	-94	-110
От 8 до 16 ГГц	-83	-94	-88	-105
От 16 до 26,5 ГГц	-78	-89	-82	-100

Шум высокого уровня может быть измерен путём исключения сигнала тона высокой частоты и измерения мощности шума на частоте продукта интермодуляционных искажений нижнего бокового тона. На рисунке 5 показан результат этого измерения.

Поскольку шум низкого уровня присутствует при измерении шума высокого уровня, мощность шума низкого уровня вычитается из наблюдаемого отсчёта мощности шума высокого уровня для получения действительной мощности шума высокого уровня.

$$N_H = N_H (\text{измеренная}) (\text{мВт}) - N_L (\text{измеренная}) (\text{мВт})$$



Заметим, что обе мощности шума  $N_H$  (измеренная) и  $N_L$  (измеренная) измеряются с использованием одной и той же полосы ПЧ. Кроме того,  $N_H$  не может быть меньше нуля. Поскольку шум высокого уровня пропорционален мощности сигнала, а также полосе ПЧ, шум высокого уровня ( $N_H$ ) в единицах дБн/Гц определяется следующим образом:

$$N_H \text{ (дБн/Гц)} = 10 * \log [N_H \text{ (мВт)}] - 10 * \log (\text{полоса частот измерения}) - T_L \text{ (дБм)},$$

где  $T_L$  - мощность тона, присутствующего при измерении шума высокого уровня.

$$N_H \text{ (дБм)} = N_H \text{ (дБн/Гц)} + \text{мощность ближайшего тона (в дБм)} + 10 * \log (\text{полоса частот измерения (Гц)})$$

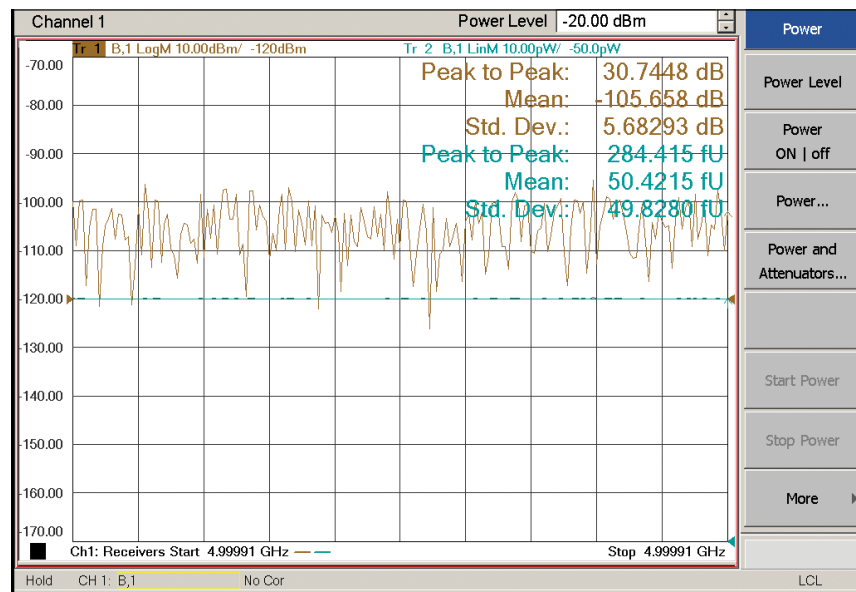


Рисунок 5. Определение характеристик шума высокого уровня приёмников анализатора цепей серии PNA-X.

## Интермодуляционные искажения, генерируемые приёмником

Интермодуляционные искажения, генерируемые в приёмнике, сходны с интермодуляционными искажениями тестируемого устройства (ТУ) и зависят от уровней мощности тонов, подаваемых на активные компоненты приёмника. Интермодуляционные искажения приёмника можно вычислить непосредственно из значений подаваемых уровней мощности тонов и точки пересечения третьего порядка приёмника. Точка пересечения третьего порядка приёмника может изменяться в зависимости от разноса частот между тонами и частоты измерения.

Хотя основными источниками интермодуляционных искажений приёмника обычно являются смеситель и усилители в анализаторе цепей, в некоторых ситуациях и другие активные устройства в анализаторе могут также вносить искажения, особенно если уровень мощности, подаваемой на анализатор, является высоким. В частности, коммутатор передачи, который позволяет анализатору быстро переключаться между источниками сигналов, подаваемых на различные порты, может генерировать интермодуляционные искажения. Чтобы исключить это, можно увеличить ослабление ступенчатого аттенюатора источника на выходе ТУ, насколько необходимо. Каждые 5 дБ ослабления уровня мощности источника уменьшают нежелательный сигнал интермодуляционных искажений, генерируемый коммутатором передачи, на 20 дБ. В оставшейся части этого обсуждения мы будем предполагать, что ошибка, обусловленная интермодуляционными искажениями, генерируемыми коммутатором передачи, является незначительной.

Интермодуляционные искажения (ИМИ) приёмника анализатора цепей серии PNA-X можно определить путём подачи двухтонального тестового сигнала с требуемыми значениями частоты и смещения на порт приёмника, и измерения уровней мощности обоих тонов и одного из продуктов интермодуляционных искажений третьего порядка. Если уровни мощности тонов недостаточны для создания достаточно больших продуктов интермодуляционных искажений в приёмнике, сигнал можно подать непосредственно на соединитель "RCVR B IN" (если порт 2 используется для измерения ИМИ). Следует убедиться в том, что измеряемый интермодуляционный сигнал не является результатом паразитных откликов и генерируется в приёмнике, а не в источниках или сумматоре. Точку пересечения третьего порядка (IP3) приёмника можно вычислить с помощью следующей формулы:

$$IP3 \text{ (дБм)} = P(f_1) + (P(f_2) - P(2f_1 - f_2)) / 2$$

Где IP3 - точка пересечения третьего порядка (IP3) приёмника в дБм;  $P(f_1)$  и  $P(f_2)$  - измеренные уровни мощности нижнего тона и верхнего тона в дБм, а  $P(2f_1 - f_2)$  - уровень продукта интермодуляционных искажений нижнего бокового тона в дБм. Можно также использовать продукт интермодуляционных искажений верхнего бокового тона. В этом случае формула приобретает следующий вид:

$$IP3 \text{ (дБм)} = P(f_2) + (P(f_1) - P(2f_2 - f_1)) / 2$$

На рисунке 6 показан результат этого измерения.

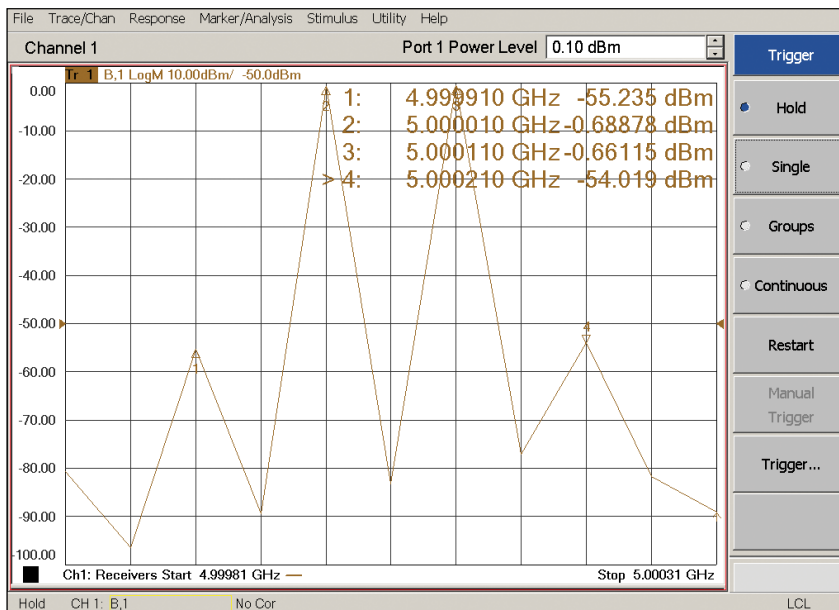


Рисунок 6. Определение характеристик интермодуляционных искажений приёмников PNA-X.

Уровень мощности каждого продукта интермодуляционных искажений приёмника можно вычислить, используя IP3 приёмника и уровни мощностей верхнего и нижнего боковых тонов:

Уровень мощности продукта интермодуляционных искажений верхнего бокового тона приёмника (дБм) =  $P(f_1) - 2 * (IP3 \text{ приёмника анализатора цепей серии PNA-X} - P(f_2))$

Уровень мощности продукта интермодуляционных искажений нижнего бокового тона приёмника (дБм) =  $P(f_2) - 2 * (IP3 \text{ приёмника анализатора цепей серии PNA-X} - P(f_1))$

## Суммирование ошибок приёмника, вычисление модуля вектора ошибки (EVM)

Как только эти три значения (шум низкого уровня, шум высокого уровня и IP3 приёмника) становятся известны, их вклад в ошибку при измерении интермодуляционных искажений может быть вычислен для любой данной полосы ПЧ и мощности тона. Векторы этих ошибок можно объединить в один вектор ошибки, который затем можно использовать при прогнозировании погрешности для данного измерения. Чтобы сделать это, уровни мощности шума нижнего уровня и шума высокого уровня складываются.

$$\text{Суммарная мощность шума (дБм)} = 10 * \log (10^{\text{шум низкого уровня (дБм)/10}} + 10^{\text{шум высокого уровня (дБм)/10}})$$

Поскольку шум является случайным сигналом, мы только с определённой достоверностью можем сказать, что погрешность, обусловленная шумом, будет ограничена некоторой величиной. Добавляя 6 дБ к суммарной мощности шума, мы получим пиковый сигнал ошибки шума, который можно использовать для прогнозирования погрешности измерения с достоверностью 99,7%.

Однако, сигнал интермодуляционных искажений, генерируемый приёмником, представляет собой вектор на той же самой частоте, что и сигнал, который мы хотим измерить. Наихудшую погрешность, вызванную этим вектором, можно вычислить, используя относительную амплитуду сигнала ошибки и измеряемый сигнал.

Пиковый сигнал шума и сигнал интермодуляционных искажений приёмника суммируются, чтобы получить сигнал вносимой ошибки, который может рассматриваться в качестве вектора ошибки для вычисления наихудших погрешностей измерения с достоверностью, приблизительно равной 99,7%. Мы будем называть это модулем вектора ошибки (EVM).

$$\text{EVM (дБм)} = 20 * \log (10^{\text{сигнал интермодуляционных искажений приёмника/20}} + 10^{(\text{суммарная мощность шума} + 6)/20})$$

Заметим, что это вычисление предполагает использование наихудшей фазы для ошибки, обусловленной интермодуляционными искажениями приёмника. Для фиксированной комбинации уровней мощности тонов часто удобно выразить модуль вектора ошибки относительно ближайшего тона:

**EVM (дБн) = EVM (дБм) - мощность тона (ближайший тон) (дБм)**  
(для данного сочетания уровней мощности тонов и полосы ПЧ)

В следующей таблице показаны погрешности измерений (с достоверностью 99,7%) для нескольких значений EVM и сигналов интермодуляционных искажений ТУ.

Таблица 4. Погрешности измерения, обусловленные EVM приёмника (дБ) (достоверность 99,7 %)

EVM приёмника (дБн)	Зависимость интермодуляционных искажений ТУ от уровней мощности тонов (дБн)					
	-30	-40	-50	-60	-70	-80
-60	0,28	0,90	3,2			
-70	0,09	0,28	0,9	3,2		
-80	0,027	0,09	0,28	0,9	3,2	
-90	0,009	0,027	0,09	0,28	0,9	3,2
-100		0,009	0,027	0,09	0,28	0,9

## Пример измерения

В качестве примера определения характеристик приёмника и вычисления EVM будут определяться характеристики анализатора цепей серии PNA-X для проведения измерений ИМИ приблизительно на частоте 5 ГГц с разносом частот между тонами 100 кГц. В процессе определения всех характеристик важно сохранять общую опорную точку для измеряемых уровней мощности. При определении характеристик анализатора цепей серии PNA-X рекомендуется, чтобы калибровка приёмника проводилась и использовалась с установкой ослабления аттенюатора приёмника, равной 0 дБ. В этом случае все отсчёты уровней мощности будут относиться к эквивалентному уровню мощности на входе калиброванного измерительного порта, даже если сигнал во время определения характеристик в действительности подаётся на вход приёмника.

Кроме того, во всех случаях при определении характеристик и проведении измерений следует устанавливать приёмники анализатора цепей серии PNA-X для использования тракта с кварцевым фильтром (узкополосного тракта) (NBF), а не стандартного широкополосного тракта (WBF). Чтобы выбрать тракт с кварцевым фильтром, используйте управление от ПК с операционной системой Window по интерфейсу GPIB и введите следующую команду на языке SCPI.

```
SENS:PATH:CONF:ELEM "IFSIGPATHALL","NBF"
```

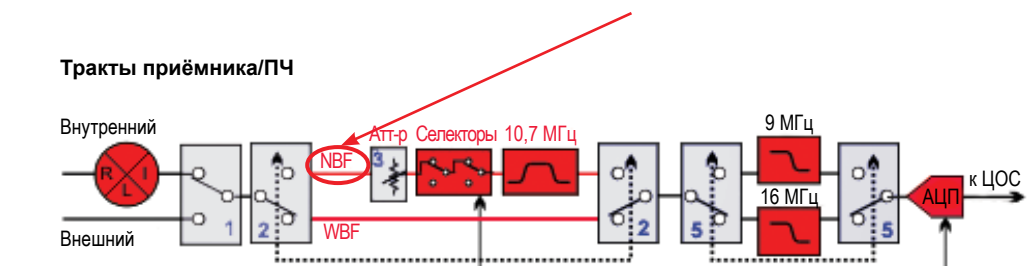


Рисунок 7. При проведении всех измерений искажений рекомендуется использовать тракт с кварцевым фильтром или узкополосный тракт анализатора цепей серии PNA-X, изображённый на этом рисунке как NBF.

Перед определением характеристик источника и приёмника мы подключаем ТУ, чтобы установить тестовые сигналы анализатора цепей в соответствии с заданными требованиями. Сконфигурируйте анализатор цепей для использования внутреннего сумматора и установите требуемые значения в диалоговых окнах Power and Attenuators (уровни мощности и аттенюаторы) и Frequency Offset (смещение частоты) (см. рисунки 8, 9 и 10). Измерьте уровни мощности, используя график В, или приёмник В, если ТУ подключено между портами 1 и 2. Уровни мощности тонов и продуктов интермодуляционных искажений могут быть считаны по показаниям маркеров, желательно, дискретных маркеров, чтобы быть уверенными в том, что измеряются действительно тоны.

Рассматриваемый здесь усилитель тестируется при следующих условиях:

$$f_1 = 5,00001 \text{ ГГц}$$

$$f_2 = 5,00011 \text{ ГГц}$$

$$2f_1 - f_2 = 4,99991 \text{ ГГц}$$

$$2f_2 - f_1 = 5,00021 \text{ ГГц}$$

$$P(f_1) = -10 \text{ дБм (входная мощность: } -20 \text{ дБм, коэффициент усиления: } 10 \text{ дБ)}$$

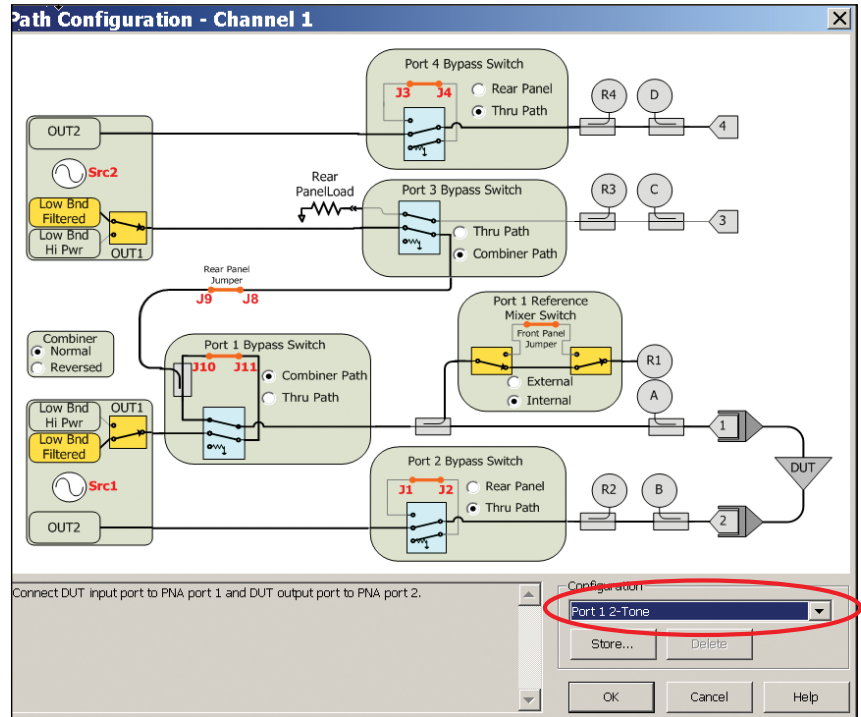


Рисунок 8. Установка конфигуратора трактов настроена для проведения двухтональных измерений.

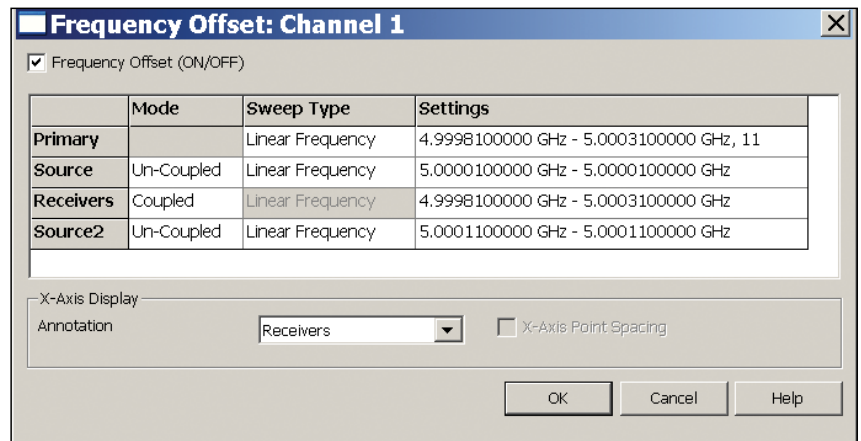


Рисунок 9. Меню смещения частоты сконфигурировано таким образом, что источник 1 (Source) установлен на значение частоты f1, равное 5,00001 ГГц, а источник 2 (Source2) - на значение частоты f2, равное 5,00011 ГГц, а приёмник - для свипирования в широком диапазоне, достаточном для охвата всех четырёх тонов.

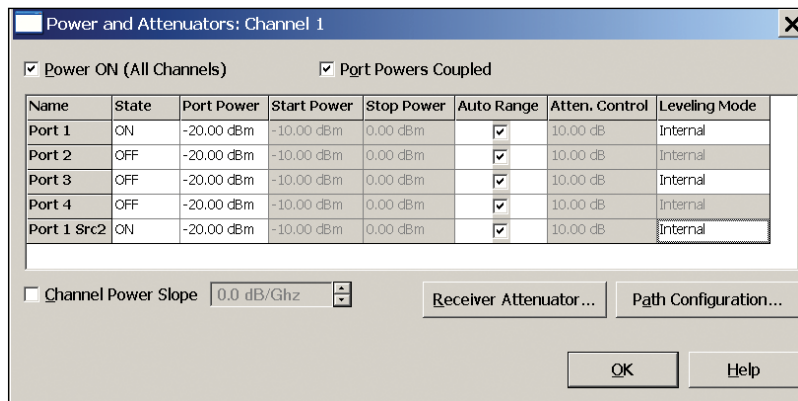


Рисунок 10. Установки уровней мощности в диалоговом окне Power and Attenuators (уровни мощности и аттенюаторы). Во время измерения ИМИ включены оба источника.

### Измерение шума низкого уровня

После калибровки приёмника измеряются шум низкого уровня, шум высокого уровня и IP3 приёмника. Выключив оба источника и установив приёмник для измерения нижнего бокового тона, мы измеряем шум низкого уровня (см. рисунки 11, 12 и 13).

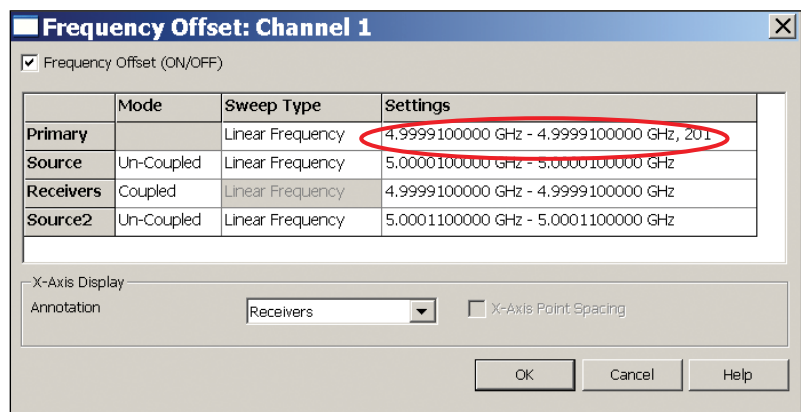


Рисунок 11. Меню Frequency Offset (смещение частоты) сконфигурировано таким образом, что приёмник измеряет продукт интермодуляционных искажений нижнего бокового тона. Установка частот для этих двух источников не имеет отношения к делу, так как оба источника выключены (см. рисунок 12, установки уровней мощности в диалоговом окне Power and Attenuators).

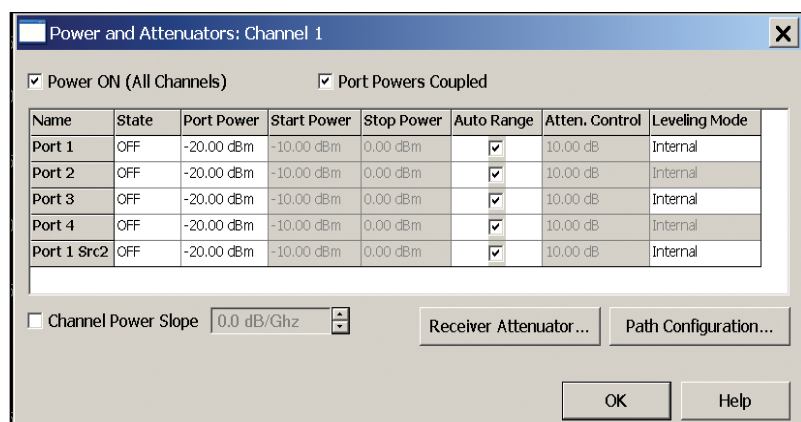


Рисунок 12. Установки уровней мощности в диалоговом окне Power and Attenuators (уровни мощности и аттенюаторы). Во время измерения шума низкого уровня оба источника выключены.

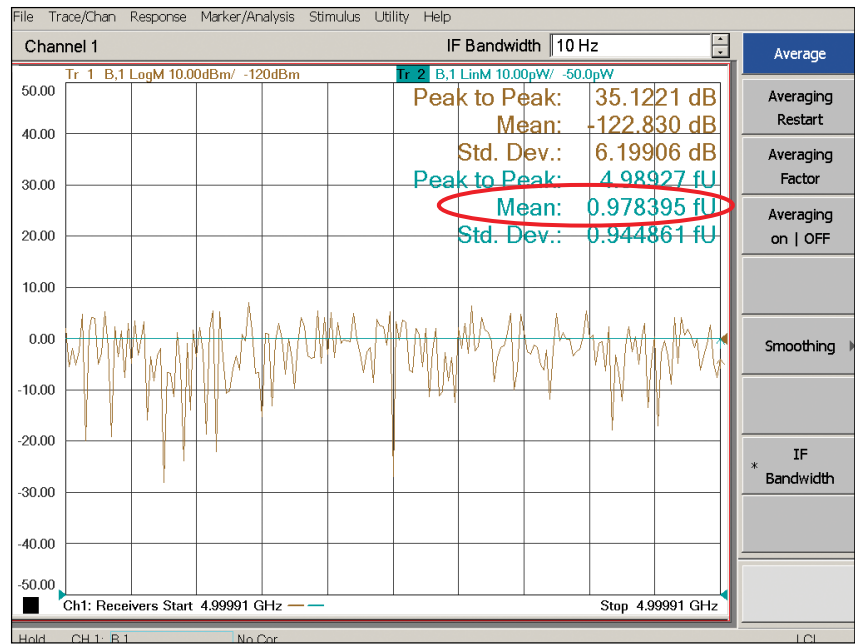


Рисунок 13. Результаты измерения шума низкого уровня.

Шум низкого уровня = 0,97 фВт

$$N_L \text{ (дБм/Гц)} = 10 * \log (N_L \text{ (мВт)}) - 10 * \log (\text{полоса частот измерения (Гц)})$$

$$N_L = 10 * \log (0,97 * 10^{-12}) - 10 = -120,1 - 10 = -130 \text{ дБм/Гц}$$

Примечание: для измерения шума мы используем среднее значение графика. Точный метод измерения среднего значения заключается в использовании формата линейной амплитуды. Если использовать среднее значение в формате логарифмической амплитуды, то обнаружится, что оно приблизительно на 2 дБ больше, чем среднее значение в формате линейной амплитуды. В этом примере 0,97 фВт соответствует значению -120 дБм, что приблизительно на 2 дБ больше, чем среднее значение в формате логарифмической амплитуды, равное -122 дБм. Точное измерение - это то, которое соответствует измерению в формате линейной амплитуды (Lin Mag) (показано как график 2 (Tr 2) на рисунке 13).

Значение шума низкого уровня можно также найти в документе, содержащем технические данные анализатора цепей PNA-X, в разделе, посвящённом уровню собственных шумов измерительного порта. Типовое значение для PNA-X составляет -117 дБм при полосе ПЧ 10 Гц, или -127 дБм/Гц. Оно является близким к нашему измеренному значению -130 дБм/Гц.



### Измерение шума высокого уровня

Шум высокого уровня на частоте продукта интермодуляционных искажений нижнего бокового тона измеряется путём выключения верхнего тона и установки частоты приёмника на частоту продукта интермодуляционных искажений нижнего бокового тона при использовании нулевой полосы обзора, 201 точки и полосы ПЧ 10 Гц. Можно использовать и более широкие полосы частот измерения и более высокие уровни мощности, поскольку они нормализуются в уравнении. Для описания шума высокого уровня используются единицы измерения дБн/Гц. При измерении мощности шума среднее значение отображается с помощью функции статистических данных графика, которая может использоваться с форматом отображения линейной амплитуды. Схема для этого измерения выполняется путём соединения источника и приёмника (порт 1 соединяется портом 2), без ТУ (см. рисунки 14, 15 и 16).

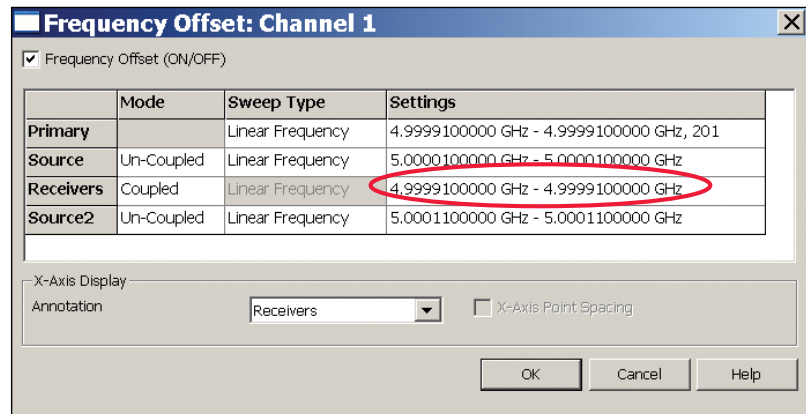


Рисунок 14. Меню Frequency Offset (смещение частоты) сконфигурировано таким образом, что источник (Source) устанавливается на частоту нижнего бокового тона  $f_1$ , а приёмник - для измерения продукта искажений нижнего бокового тона  $2f_1 - f_2$ .

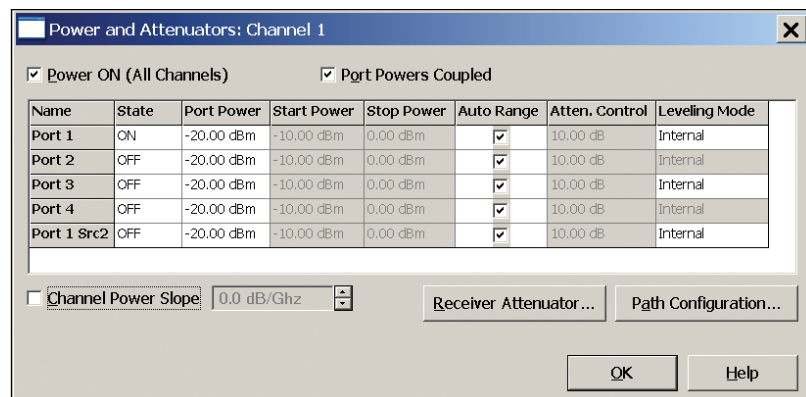


Рисунок 15. Установки уровней мощности в диалоговом окне Power and Attenuators (уровни мощности и аттенюаторы). Во время измерения шума высокого уровня верхний боковой тон выключен.

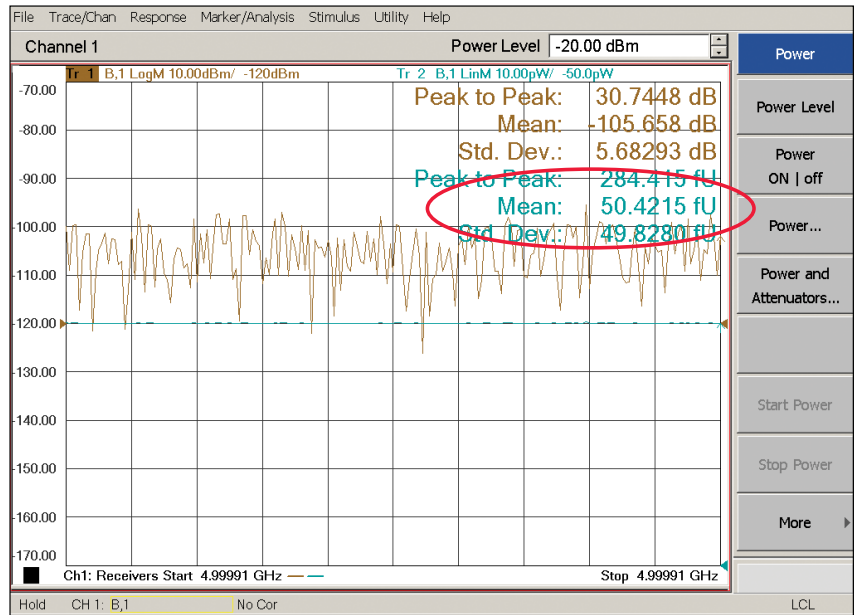


Рисунок 16. Результаты измерения шума высокого уровня.

Отображаемый шум высокого уровня = 50,4 фВт

$$N_H = N_H (\text{измеренная}) (\text{мВт}) - N_L (\text{измеренная}) (\text{мВт})$$

$$N_H = 50,4 \text{ фВт} - 0,97 \text{ фВт} = 49,4 \text{ фВт} = 49,4 \times 10^{-12} \text{ мВт}$$

$$N_H (\text{дБн/Гц}) = 10 \cdot \log(N_H (\text{мВт})) - 10 \cdot \log(\text{полоса частот измерения}) - T_L (\text{дБм})$$

$$N_H (\text{дБн/Гц}) = -103 - 10 - (-20) = -93 \text{ дБн/Гц}$$

Значение шума высокого уровня можно также найти в документе, содержащем технические данные анализатора цепей PNA-X, в разделе, посвящённом фазовому шуму. Типовое значение для PNA-X составляет -94 дБн/Гц. И в этом случае оно является близким к нашему измеренному значению -93 дБн/Гц.

### Измерение интермодуляционных искажений приёмника

Затем мы измеряем интермодуляционные искажения приёмника анализатора цепей серии PNA-X. Схема для этого измерения выполняется путём соединения источника и приёмника, а тестовые сигналы анализатора конфигурируются таким же способом, как и при установке параметров измерения ТУ, за исключением того, что ТУ не подключается. В этом примере мы должны были увеличить уровень мощности с  $-20$  до  $0$  дБм, чтобы можно было измерить продукты искажений. При уровне входной мощности  $-20$  дБм (требуемый уровень мощности, подаваемой на ТУ), продукты искажений приёмника были бы близки к уровню шума, и их трудно было бы измерить. Поэтому мы увеличили уровень мощности до  $0$  дБм.

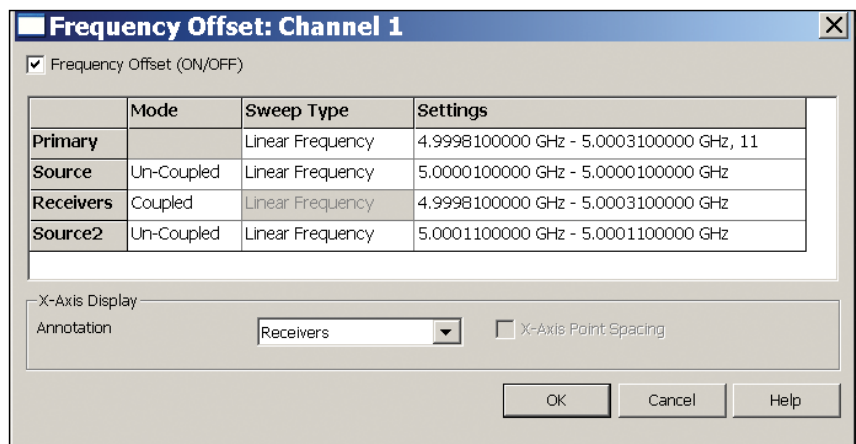


Рисунок 17. Установка параметров в меню Frequency Offset (смещение частоты) для измерения интермодуляционных искажений приёмника.

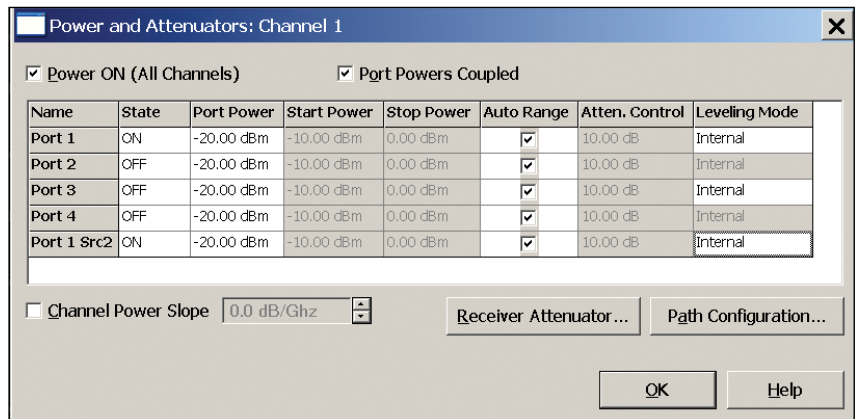


Рисунок 18. Установка уровней мощности для измерения интермодуляционных искажений приёмника. Оба источника включены, как и в проведении стандартного измерения ИМИ.

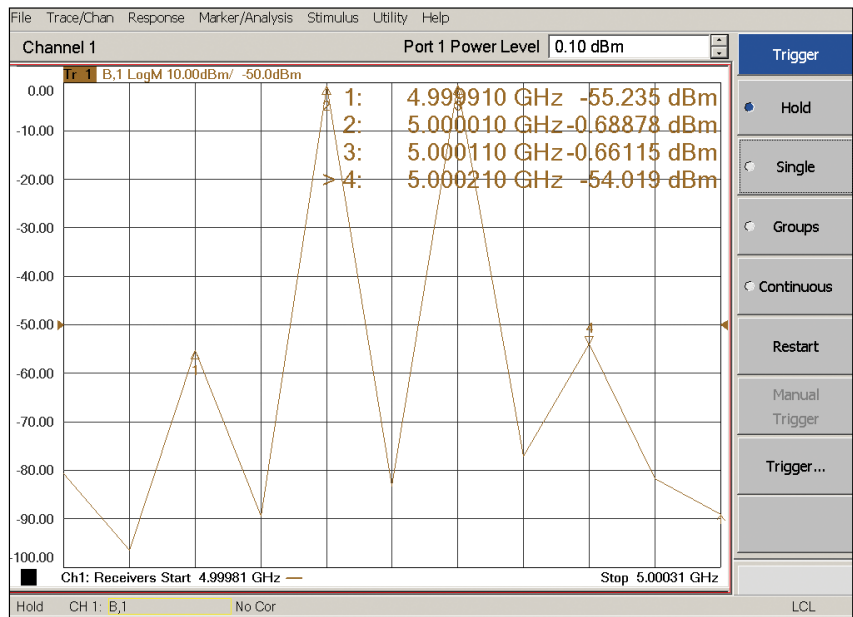


Рисунок 19. Результаты измерения интермодуляционных искажений приёмника.

$$\begin{aligned}
 P(2f_1 - f_2) &= -55,2 \text{ дБм} \\
 P(f_1) &= -0,6 \text{ дБм} \\
 P(f_2) &= -0,6 \text{ дБм} \\
 P(2f_2 - f_1) &= -54,0 \text{ дБм}
 \end{aligned}$$

Используя  $P(2f_2 - f_1)$ , получим значение IP3 приёмника:

$$\begin{aligned}
 \text{IP3 приёмника PNA-X (дБм)} &= P(f_2) + (P(f_1) - P(2f_2 - f_1)) / 2 \\
 &= -0,6 + (-0,6 - (-54,0)) / 2 \\
 &= \mathbf{26 \text{ дБм}} \text{ (относительно порта 2)}
 \end{aligned}$$

Во время публикации этих рекомендаций по применению в документе, содержащем технические данные анализатора цепей PNA-X, значения IP3 не были представлены.

### Вклад шума в ошибки во время измерения

Если измерения проводятся с полосой ПЧ 10 Гц, уровнем входной мощности –20 дБм для основных тонов (уровень выходной мощности –10 дБм для основных тонов), то ошибки могут вычислены следующим образом:

$$N_L \text{ (дБм)} = N_L \text{ (дБм/Гц)} + 10 * \log (\text{полоса частот измерения (Гц)})$$

$$N_L \text{ (дБм)} = -130 + 10 * \log (10) = \mathbf{-120 \text{ дБм}}$$

$$N_H \text{ (дБм)} = N_H \text{ (дБн/Гц)} + \text{мощность ближайшего тона (в дБм)} + 10 * \log (\text{полоса частот измерения (Гц)})$$

$$N_H \text{ (дБм)} = -93 + -10 + 10 \log (10) = \mathbf{-93 \text{ дБм}}$$

$$\text{Суммарная мощность шума (дБм)} = 10 * \log (10^{\text{шум низкого уровня (дБм)/10}} + 10^{\text{шум высокого уровня (дБм)/10}})$$

$$\text{Суммарная мощность шума (дБм)} = 10 * \log (10^{-120/10} + 10^{-93/10}) = \mathbf{-93 \text{ дБм}}$$

(фазовый шум или шум верхнего уровня - основной источник шума в этом измерении)

### Определение EVM:

После того как IP3 приёмника и суммарная мощность шума определены, можно рассчитать EVM для конкретного сочетания уровней мощности тонов, используемых в измерении, и, в свою очередь, использовать EVM для прогнозирования погрешности измерения.

$$\text{EVM (дБм)} = 20 * \log (10^{\text{IP3 приёмника} / 20} + 10^{(\text{суммарная мощность шума} + 6) / 20})$$

$$P(f_1) \text{ (ТУ)} = P(f_2) \text{ (ТУ)} = -10 \text{ дБм}$$

### IP3 приёмника PNA-X = +26,0 дБм

Напомним, что продукт интермодуляционных искажений верхнего бокового тона приёмника (дБм) =  $P(2f_2 - f_1) = P(f_1) - 2 * (\text{IP3 приёмника PNA-X} - P(f_2))$

$$P(2f_2 - f_1) = -10 - 2 * (26 - (-10)) = -82 \text{ дБм}$$

Таким образом, EVM будет равно:

$$\text{EVM (дБм)} = 20 * \log (10^{(-82/20)} + 10^{(-93+6)/20}) = \mathbf{-78 \text{ дБм}} \text{ или } \mathbf{-68 \text{ дБн}} \text{ относительно уровня мощности тона } \mathbf{-10 \text{ дБм}}.$$

### Зависимость EVM от уровней мощности тонов и полосы ПЧ

Из уравнений, приведённых ранее, ясно, что EVM будет преобладать в ИМИ приёмника при высоких уровнях мощности тонов, а шум низкого уровня - при низких уровнях мощности тонов. На рисунке 20 показана зависимость EVM в дБн от уровней мощности тонов для нескольких значений полосы ПЧ при частоте, на которой работает тестируемое устройство (ТУ), равной 5 ГГц, и разносе частот между тонами, равном 100 кГц. На рисунке 21 показан аналогичный график для ТУ, работающего на частоте 900 МГц, и разносе частот между тонами, равном 1 МГц.

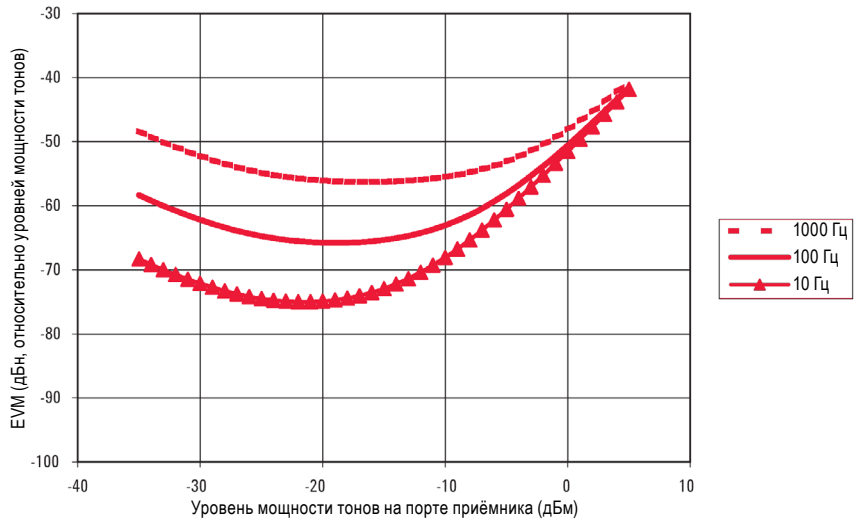


Рисунок 20. Зависимость модуля вектора ошибки (EVM) от уровней мощности тонов и полосы ПЧ; ТУ работает на частоте 5 ГГц.

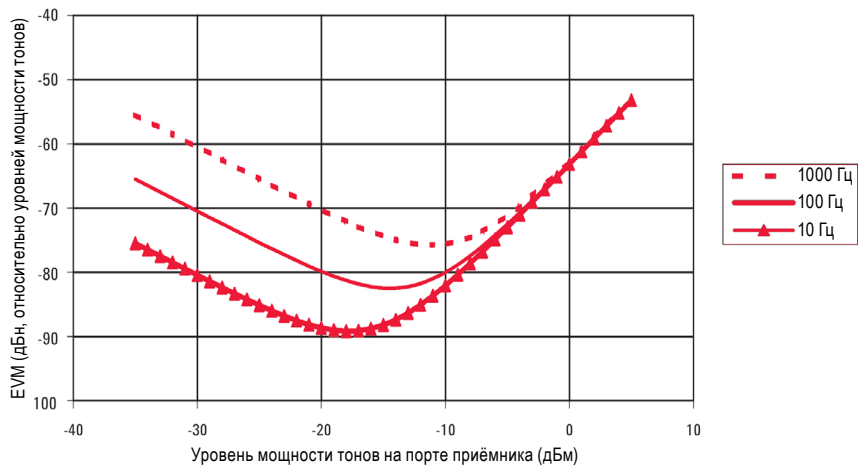


Рисунок 21. Зависимость модуля вектора ошибки (EVM) от уровней мощности тонов и полосы ПЧ; ТУ работает на частоте 900 МГц.

Анализируя вышеприведённые графики, нетрудно заметить, что для каждой полосы ПЧ имеется оптимальный уровень мощности тонов.

## Установка аттенюатора приёмника

При проведении двухтональных измерений пользователям необходимо измерить искажения, создаваемые ТУ, при заданных значениях уровней мощности и частоты тонов с максимально возможной скоростью и точностью. Как было показано ранее, ошибки приёмника являются функцией мощности двух тонов. Хотя у пользователя обычно нет возможности повысить точность измерений после того, как уровни мощности сигналов установлены на входе ТУ, можно настроить уровень мощности на входе приёмника путём изменения настроек аттенюатора приёмника.

Целью оптимизации ошибок приёмника является выбор установки аттенюатора приёмника, которая обеспечит максимально высокую точность при проведении ИМИ для заданных значений полосы ПЧ, разнеса частот между тонами и частоты. Эта оптимизация может быть достигнута путём вычисления EVM в дБн для каждой из установок аттенюатора приёмника и выбора такой установки, которая даёт наименьшее значение EVM (наименьшее значение в дБн).

Например, мы можем оптимизировать измерение ТУ, работающего на частоте 5 ГГц, используя рисунок 20. В этом примере мы хотим провести измерение с полосой ПЧ, равной 10 Гц. Уровни мощности тонов на выходе ТУ были равны –10 дБм. На графике мы видим, что оптимальные уровни мощности тонов для полосы ПЧ 10 Гц приблизительно равны –20 дБм (для относительной ошибки, равной –75 дБн). Поэтому для оптимизации ошибок при проведении этого измерения следует установить ослабление аттенюатора приёмника, равным 10 дБ<sup>1</sup>. За счёт этого уменьшается уровень мощности тонов на входе активных компонентов приёмника анализатора цепей серии PNA-X, таким образом уменьшая интермодуляционные искажения приёмника. Числовая модель выглядит следующим образом:

Уровни мощности тонов, подаваемых на приёмник =  $P(f_1)(ТУ) = P(f_2)(ТУ) = -20$  дБм

Поэтому уровень интермодуляционных искажений равен:

$$P(2f_2 - f_1) = -20 - 2 * (26 - (-20)) = -112 \text{ дБм}$$

Мощность шума высокого уровня также снижается.

$$\text{Шум высокого уровня} = N_H \text{ (дБм)} = -93 - 20 + 10 = -103 \text{ дБм}$$

Суммарная мощность шума определяется следующим образом:

$$\text{Суммарная мощность шума (дБм)} = 10 * \log(10^{-120/10} + 10^{-103/10}) = -103 \text{ дБм}$$

EVM вычисляется следующим образом:

$$\text{EVM (дБм)} = 20 * \log(10^{-112/20} + 10^{(-103+6)/20}) = -95 \text{ дБм или } -75 \text{ дБн относительно уровня мощности тона } -20 \text{ дБн.}$$

Это согласуется со значением графика и представляет улучшение в EVM по сравнению с первоначальной установкой.

Приложение А содержит ряд таблиц, в которых приведены оптимальные уровни входной мощности и EVM для ряда значений частот измерений и разнеса частот между тонами.

1. Аттенюаторы приёмников анализатора цепей серии PNA-X обеспечивают суммарное ослабление 35 дБ с шагом 5 дБ.

**Ускоренный метод:**

Предыдущее обсуждение предлагает способ определения EVM приёмника с высокой степенью достоверности для конкретной конфигурации измерения. Однако, изучение рисунков 20 и 21, а также опыт работы с анализатором цепей серии PNA-X, показывает, что в большинстве случаев хорошие результаты будут получены, если установка ослабления аттенюатора приёмника равна уровню мощности сигнала на измерительном порте плюс 20 дБ для полосы ПЧ, равной 10 Гц, как показано ниже.

<b>Уровень мощности сигнала на измерительном порте (уровень выходной мощности основного тона)</b>	<b>Полоса ПЧ</b>	<b>Рекомендуемая установка аттенюатора приёмника (значение в столбце 1 + 20 дБ)</b>
-20 дБм	10 Гц	0 дБ (без ослабления)
-10 дБм	10 Гц	10 дБ
0 дБм	10 Гц	20 дБ
+10 дБм	10 Гц	30 дБ
+20 дБм	10 Гц	40 дБ (но PNA-X обеспечивает максимальное ослабление внутреннего аттенюатора приёмника только 35 дБ; поэтому следует добавить внешний аттенюатор с ослаблением 3 или 6 дБ и использовать внутренний аттенюатор с ослаблением 35 дБ)

Кроме того, для определения оптимального уровня мощности порта в большинстве случаев можно использовать таблицу в приложении А.



## Особенности работы источника

Два встроенных источника и встроенный сумматор анализатора цепей серии PNA-X обеспечивают возможность проведения точных и эффективных измерений ИМИ. Чтобы понять вклад источника в обеспечение точности измерений ИМИ, мы будем исследовать следующие технические характеристики и установки источника: мощность измерительного порта, гармоники источника и перекрёстную модуляцию источника.

### Уровень мощности от источников в режиме суммирования

Значения уровней мощности на выходе измерительного порта в режиме суммирования можно найти в документе, содержащем технические данные, и воспроизводятся здесь для удобства:

Таблица 5. Макс. значение регулируемого уровня мощности (дБм), N5242A серии PNA-X с опцией 224 или 423 (тип.)

Диапазон частот	Источник 1, порт 1, режим суммирования, режим фильтрации <sup>1</sup>	Источник 1, порт 1, режим суммирования, режим высокой мощности <sup>1</sup>	Источник 2, порт 1, режим суммирования, режим фильтрации <sup>1</sup>	Источник 2, порт 1, режим суммирования, режим высокой мощности <sup>1</sup>
От 10 до 50 МГц	7	17	-7	3
От 50 до 500 МГц	9	17	-5	4
От 0,5 до 3,2 ГГц	9	10	-5	-4
От 3,2 до 10 ГГц		15		2
От 10 до 16 ГГц		11		-2
От 16 до 20 ГГц		8		-4
От 20 до 24 ГГц		6		-6
От 24 до 26,5 ГГц		2		-11

В зависимости от Ваших задач, Вы должны решить, какие уровни мощности Вам нужны. Если частоты двух тонов меньше, чем 3,2 ГГц, Вы должны определить, требуется ли использовать режим фильтрации ("Filtered Mode") или режим высокой мощности ("Hi Pwr Mode") анализатора цепей серии PNA-X. Как можно сделать вывод из самих названий, различия между этими двумя режимами заключаются в уровнях выходной мощности и характеристиках гармоник. В режиме фильтрации ("Filtered Mode") уровень гармоник будет не хуже -60 дБн при максимальном нормированном уровне выходной мощности. В режиме высокой мощности ("Hi Pwr Mode") уровень гармоник ухудшается на 23 дБн, но при этом максимальный гарантированный уровень выходной мощности увеличивается в пределах от 1 до 10 дБ, в зависимости от частоты. Для частот выше 3,2 ГГц есть только один режим. Для измерения ИМИ в общем случае предпочтительнее использовать режим фильтрации ("Filtered Mode"). Преимущество использования режима с меньшим уровнем гармоник объясняется в следующем разделе.

1. В режиме фильтрации (Filtered Mode) тракт сигнала проходит через фильтры для минимизации уровня гармоник на частотах ниже 3,2 ГГц. В режиме высокой мощности (Hi Power Mode) сигнал обходит фильтры для увеличения до максимума уровня выходной мощности.

## Влияние гармоник источника

Гармоники источника ухудшают точность измерения многотональных сигналов, когда они смешиваются с другими тонами в тестируемом устройстве (ТУ) и создают сигналы, представляющие собой помехи для измеряемых сигналов искажений. При проведении двухтональных измерений интермодуляционных искажений третьего порядка это происходит, если вторая гармоника одного источника ( $2f_1$ ) смешивается в ТУ с тоном другого источника ( $f_2$ ), создавая сигнал на той же самой частоте, что и сигнал интермодуляционных искажений третьего порядка ( $2f_1 - f_2$ ). Другими словами, сигнал интермодуляционных искажений третьего порядка, генерируемый ТУ при подаче двухтонального тестового сигнала, возникает на частотах ( $2f_1 - f_2$ ,  $2f_2 - f_1$ ), которые также являются частотами разностных составляющих, которые получаются в результате смешения одного тона и второй гармоники другого тона.

Поэтому если вторая гармоника одного из тонов подаётся на ТУ, это ТУ будет генерировать сигнал на частоте интермодуляции, который будет добавляться к тому сигналу, который мы пытаемся измерить, что в результате приводит к ошибке при измерении. Величина этой ошибки зависит от уровня подаваемого на вход ТУ гармонического сигнала и эффективности процесса смешения в ТУ. По этой причине на оптимизацию характеристик второй гармоники синтезаторов в анализаторах цепей серии PNA-X были направлены значительные усилия. Технические характеристики гармоник анализатора цепей серии PNA-X можно найти в документе, содержащем технические данные анализатора цепей PNA-X, и для удобства воспроизведены здесь.

Таблица 6. Уровень второй гармоники при максимальном нормированном уровне мощности (дБн), анализатор цепей N5242A серии PNA-X (тип.)

	<b>Порт 1 или 3, выход 1 источника 2</b>	<b>Порт 2 или 4, выход 2 источника 2</b>
От 10 до 50 МГц	-51	-13
От 50 до 500 МГц	-51	-13
От 500 МГц до 3,2 ГГц	-60	-21
От 3,2 до 10 ГГц	-60	-21
От 10 до 16 ГГц	-60	-21
От 16 до 20 ГГц	-60	-21
От 20 до 24 ГГц	-60	-21
От 24 до 26,5 ГГц	-60	-21

При проведении любого отдельного измерения уровень гармоник источника можно также измерить непосредственно, используя приёмник анализатора цепей серии PNA-X для измерения сигнала на частоте второй гармоники источника. Заметим, что для аттенюатора приёмника должен быть установлен достаточно высокий уровень ослабления, чтобы вторые гармоники, генерируемые самим приёмником, не имели значительных уровней. Как только уровень гармоник источника (от анализатора), поступающих на вход ТУ, будет определён (по результатам измерения или из таблицы технических характеристик), амплитуда нежелательного сигнала, генерируемого второй гармоникой источника, может быть точно определена с помощью следующих шагов:

1. Сконфигурировать анализатор цепей и ТУ для проведения требуемого измерения ИМИ.
2. Установить для одного из двух источников уровень мощности, который будет использоваться при проведении ИМИ (например: источник (Source) на частоте  $f_1$ , уровень мощности  $-20$  дБм).
3. Установить для другого источника значение частоты второго тона, в два раза превышающей значение  $f_1$ , которая будет использоваться при проведении измерения ИМИ (например: источник 2 (Source2) на частоте  $2f_2$ ).
4. Установить уровень мощности второго источника (Source2 в этом примере) равным предварительно заданному уровню мощности второй гармоники второго тона (установить уровень мощности источника на частоте  $2f_2$  примерно на 60 дБн меньше, или равным  $-80$  дБм). Для этого может потребоваться установить внешний аттенюатор в одну из внешних связей для уменьшения мощности до требуемого уровня, если ослабления, обеспечиваемого внутренним аттенюатором будет недостаточно.
5. Измерить уровень мощности результирующего сигнала смешения на выходе ТУ ( $2f_2 - f_1$ ).
6. Если сигнал имеет слишком малую величину для измерения, мощность сигнала на частоте второй гармоники можно увеличить. Поскольку процесс смешения характеризуется линейной зависимостью от мощности для малых уровней сигналов, уровень нежелательного сигнала смешения, присутствующего при измерении ИМИ, будет меньше, чем сигнал, измеренный с помощью этого метода, на эту же величину увеличения мощности.

Мощность сигнала, измеренная таким образом, представляет амплитуду составляющей ошибки, которая будет добавляться в виде вектора к сигналу искажения, генерируемого, когда присутствуют оба тона.

Другой способ оценки влияния гармоник источника на измерение ИМИ заключается в добавлении фильтрации на входе усилителя для уменьшения уровня гармоник источника. Если никаких изменений в результате двухтонального измерения не наблюдается, то можно предположить, что гармоники источника не внесли свой вклад в результат измерения. Однако, это возможно и из-за небольших изменений сигнала, происходящих в результате изменений уровня мощности или импеданса источника, вносимых фильтром, поэтому следует быть внимательным при интерпретации результатов. Фильтрация гармоник источника для узкополосных устройств довольно проста. Фильтр нижних частот с частотой отсечки, превышающей частоту второго тона, можно добавить в цепь источника анализатора цепей серии PNA-X. Для широкополосных устройств можно также использовать фильтр, правда, найти подходящий фильтр в этом случае намного сложнее, поскольку необходимо, чтобы он пропускал основные тоны и отфильтровывал вторую гармонику.

Для проведения комплекса измерений при одном подключении можно использовать фильтры во время измерения ИМИ, установив их только на каждом входе сумматора, и просто обходя сумматор при проведении измерений, где фильтрация не требуется. Этот метод можно также использовать для установки вентиля и усилителей специально для измерений ИМИ.

## Перекрёстная модуляция источника

Перекрёстная модуляция источника - это ошибка, которая может ухудшить точность измерений ИМИ. Перекрёстная модуляция источника - генерация сигналов на частотах ИМИ в источнике и сумматоре, но не в ТУ. Это происходит из-за действия системы стабилизации уровня мощности (если детектор реагирует на частоты обоих тонов) или из-за интермодуляционных искажений активных устройств внутри анализатора цепей, воздействующих на частоты обоих тонов. Внутренний сумматор анализатора цепей серии PNA-X уменьшает уровень перекрёстной модуляции источника до фактически незначительных уровней для заданных значений уровней мощности портов.

Для того чтобы получить приблизительное измерение чувствительности внутреннего источника к перекрёстной модуляции, мы вводим сигнал от одного источника на выход другого, обходя сумматор. Измеряя перекрёстную модуляцию на портах анализатора, мы можем сравнить эту характеристику для внутренних источников анализатора цепей серии PNA-X с другими источниками сигналов.

Точка пересечения третьего порядка (IP3) источника также может быть измерена с помощью анализатора спектра или собственных приёмников анализатора цепей серии PNA-X. Убедитесь, что Вы не измеряете IP3 приёмников; обычно это достигается применением достаточного ослабления аттенюатора приёмника. Вы можете сконфигурировать анализатор цепей серии PNA-X также, как для требуемого измерения ИМИ. Вместо подключения порта 1 к ТУ, его следует подключить к приёмнику (либо анализатора цепей серии PNA-X, либо анализатора спектра). Затем можно исследовать сигнал, присутствующий на частоте продукта интермодуляционных искажений, для определения уровня перекрёстной модуляции.

На рисунке 22 показан график IP3 источника для различных уровней мощности тонов и для двух различных частот (750 МГц и 23,5 ГГц). Источники с меньшими уровнями IP3 требуют большей изоляции между источниками для достижения такого же уровня искажений источника.

**Точка пересечения третьего порядка IP3 (вследствие перекрёстной модуляции источника анализатора цепей серии PNA-X) (измеренная на измерительном порте)**

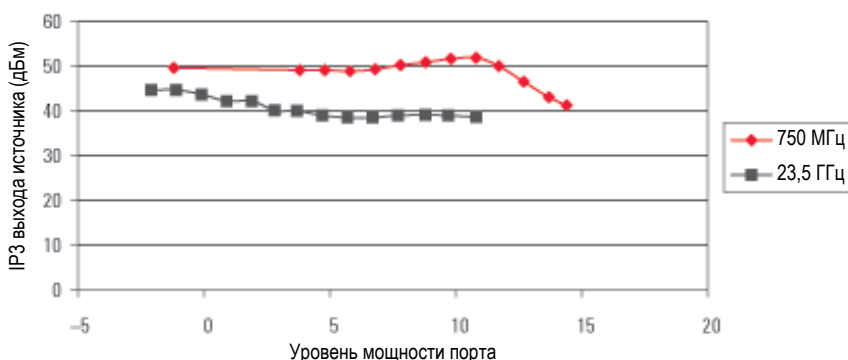


Рисунок 22. IP3 источника (вследствие перекрёстной модуляции источника) для анализатора цепей серии PNA-X.

## Исключение паразитных сигналов при измерениях ИМИ

Почти неизбежно синтезаторы генерируют паразитные сигналы низкого уровня на некоторых частотах. Обычно они не представляют проблемы при измерениях, так как большинство таких традиционных измерений являются линейными и выполняются на одной частоте как на входе, так и на выходе. Но эти паразитные сигналы могут привести к ошибкам при измерениях ИМИ, если они возникают на измеряемых частотах продуктов интермодуляционных искажений или вблизи них. К счастью, присутствие паразитных сигналов при измерении можно обнаружить и, соответственно, исключить их. Кроме того, мы можем использовать наши знания о генерации паразитных сигналов в источнике для планирования измерений, которые в меньшей степени подвержены воздействию этих нежелательных паразитных сигналов.

В этом разделе мы рассмотрим метод, который позволяет определить, что является источником сигнала, который выглядит как паразитный - измерительное оборудование (в данном случае, анализатор цепей) или ТУ. Для обеспечения наилучших результатов процедура, описанная ниже, выполняется каждый раз на одной частоте. Это позволяет обеспечить проверку присутствия паразитного сигнала с более высокой чувствительностью, чем при измерении в режиме свипирования частоты. Чтобы проверить присутствие паразитного сигнала при измерении ИМИ, пользователь должен начать с установки значений смещения частоты и уровней мощности источников, как и для измерения ТУ.

Ступенчатые аттенюаторы приёмников и аттенюаторы источника на порте приёмника также должны быть установлены для получения оптимальных уровней, как было описано в разделах, посвящённых особенностям работы источника и приёмника. Кроме того, полоса ПЧ должна быть не больше, чем полоса ПЧ, которая использовалась при измерении. Используя эти установки, проверьте четыре условия, чтобы определить, присутствует паразитный сигнал или нет.

Четыре условия, которые необходимо проверить: нижняя и верхняя частоты продуктов интермодуляционных искажений, когда присутствует только нижний боковой тон; нижняя и верхняя частоты продуктов интермодуляционных искажений, когда присутствует только верхний боковой тон. При каждом из этих условий выполняется непрерывное свипирование с измерением принятой мощности. Поскольку при отстройке от частоты измерения присутствует только один тон, любой сигнал, отличающийся от случайного шума и присутствующий в результатах измерения, будет паразитным откликом. Рассмотрим первый случай: нижняя частота продукта интермодуляционных искажений при присутствующем нижнем боковом тоне.

Сконфигурируйте анализатор цепей так, чтобы выход порта 1 представлял сигнал на частоте нижнего бокового тона или  $f_1$ . В анализаторе цепей серии PNA-X проще всего выключить второй источник, используя диалоговое окно Power and Attenuators (уровни мощности и аттенюаторы). В диалоговом окне Frequency Offset (смещение частоты) установите приёмник для измерения требуемого тона, установив для этого центральную частоту на частоту этого тона, которая равна частоте продукта интермодуляционных искажений нижнего бокового тона ( $2f_1 - f_2$ ), и нулевую полосу обзора. Теоретически на частоте  $2f_1 - f_2$  не должно быть сигнала, поскольку источник сигнала на частоте верхнего бокового тона  $f_2$  был выключен. Поэтому в этом случае любой сигнал на частоте  $2f_1 - f_2$  является паразитным сигналом. Для определения присутствия и уровня мощности паразитных сигналов особенно полезны два метода.

Первый метод для обнаружения присутствия паразитного сигнала в измеряемом сигнале представляет собой количественный подход, использующий статистические данные графика в формате линейной амплитуды ("Linear Magnitude") анализатора цепей. Этот подход использует тот факт, что для случайного шума, распределённого по нормальному закону, среднее значение и среднеквадратическое отклонение в формате линейной амплитуды равны. Любой паразитный сигнал, содержащийся в шуме, увеличит отношение среднего значения к среднеквадратическому отклонению.

Для того чтобы использовать этот метод, мы проводим измерения с помощью приёмника В и изучаем данные в формате линейной амплитуды. Поскольку погрешность определения среднего значения и среднеквадратического отклонения зависит от числа выборок, возможность обнаружения паразитных сигналов с использованием этого подхода повышается с увеличением числа точек графика. Если используется 201 точка, то отношение среднего значения к среднеквадратическому отклонению, равное 1,25 или больше, указывает на присутствие паразитного сигнала с высокой степенью достоверности. График 1 на рисунках 23 и 24 (верхние графики) отображает данные в формате линейной амплитуды. Отношение среднего значения к среднеквадратическому отклонению приведено для каждого графика, показывая, что на рисунке 24 паразитный сигнал присутствует, а на рисунке 23 - нет.

Второй метод представляет собой качественный подход, когда график результата измерения с помощью приёмника В отображается в полярной системе координат. На графике такого вида шум отображается случайно распределённым как по амплитуде, так и по фазе. Результирующий график представляет собой “гриб-дождевик”, центрированный относительно полюса, который имеет некоторое увеличение плотности по направлению к центру, и случайные выбросы на перепадах. Это показано на рисунке 23, график 2 (нижний график).

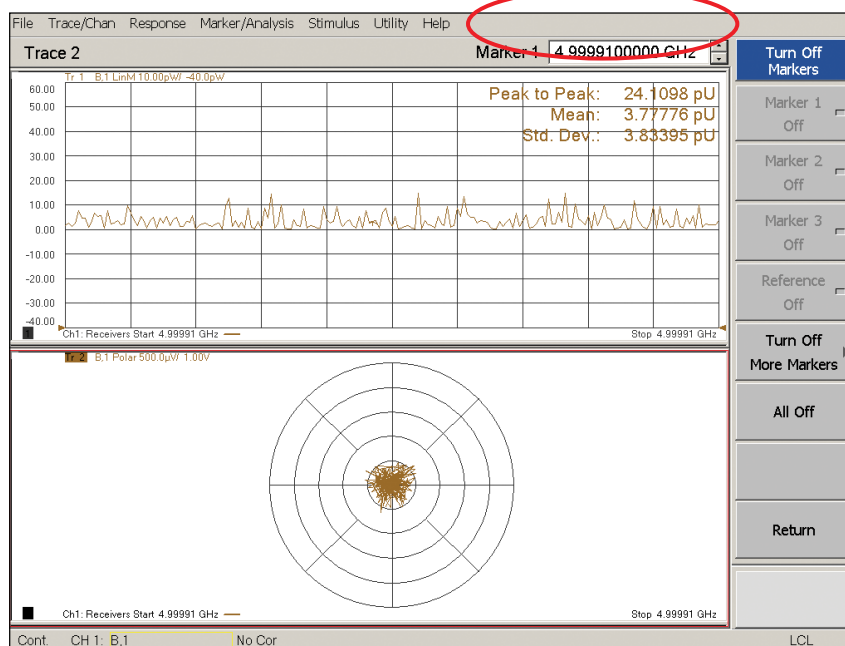


Рисунок 23. Шум при отсутствии паразитного сигнала. На графике 1 (верхний график) отношение среднего значения к среднеквадратическому отклонению меньше, чем 1,25, что указывает на шум и отсутствие паразитного сигнала. Подобным образом, на нижнем графике “гриб-дождевик”, центрированный вокруг полюса, указывает на отсутствие паразитных сигналов.

Паразитный отклик, точно совпадающий с частотой измерения и по уровню мощности близкий к уровню шума, приводит к смещению “гриба-дождевика” от полюса.

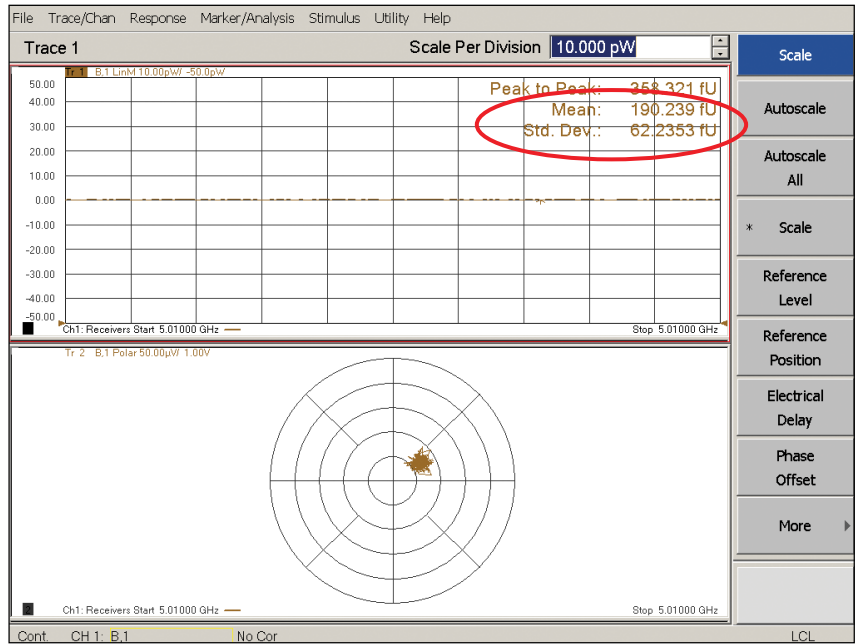


Рисунок 24. Шум в присутствии паразитного сигнала. На графике 1 (верхний график) отношение среднего значения к среднеквадратическому отклонению равно 3,4, то есть, больше, чем 1,25, что указывает на присутствие паразитного сигнала. Подобным образом, на нижнем графике "гриб-дождевик" смещается в сторону, показывая присутствие паразитного сигнала.

Если уровень мощности паразитного сигнала близок к уровню шума, но при этом паразитный сигнал возникает на частоте, несколько отличающейся от частоты измерения, результат может быть сходным с тем, который показан на следующем графике. Этот график отличается от графика шума в полярной системе координат тем, что плотность данных уменьшается вблизи полюса.

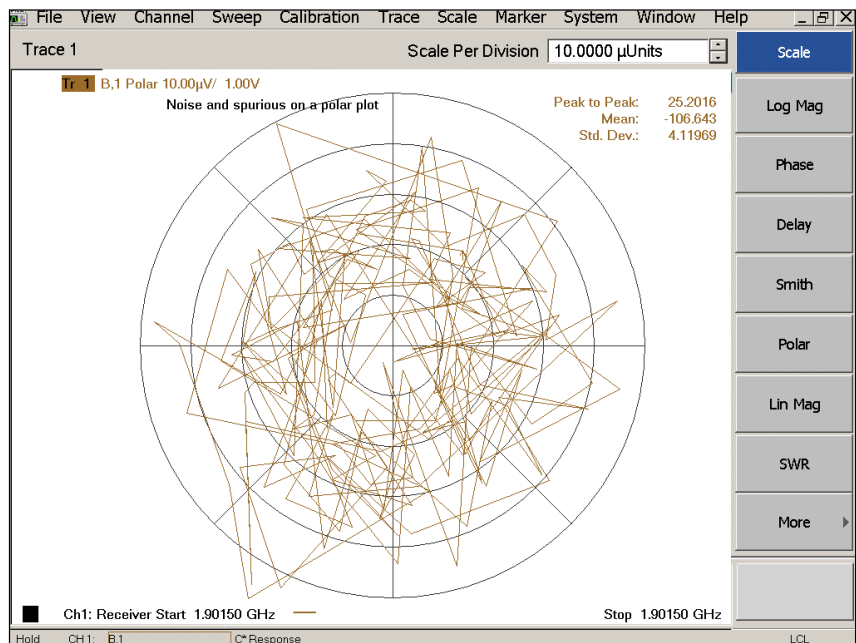


Рисунок 25. Паразитный сигнал на частоте, не совпадающей с частотой измерения.

Если при проведении конкретного измерения обнаруживается паразитный отклик, следует изменить частоты источника и/или приёмника так, чтобы паразитный сигнал не влиял на измерение. Это может быть сделано путём перемещения частот тонов при сохранении постоянным разноса частот между ними (поэтому все тоны и продукты интермодуляционных искажений смещаются на одну и ту же величину), или путём изменения разноса частот между тонами (и, следовательно, изменения частот верхнего бокового тона и продукта интермодуляционных искажений в противоположном направлении от частот нижнего бокового тона и продукта интермодуляционных искажений). В конкретных случаях один из этих методов может работать лучше, чем другой, в зависимости от механизма генерации паразитных сигналов в источнике. В любом случае, как правило, необходимо только переместить эти частоты на величину, равную нескольким значениям ширины полосы ПЧ.

Известно, что в анализаторах цепей серии PNA-X синтезаторы частоты генерируют паразитные сигналы низкого уровня на легко прогнозируемых частотах, когда частота источника выше 500 МГц. Частоты этих паразитных сигналов пропорциональны разности между частотой синтезатора и ближайшей частотой, чётно кратной 10 МГц. Для измерений ИМИ паразитные сигналы этого типа можно исключить, используя либо протокол центральной частоты, либо протокол частот тонов.

Если разнос частот между тонами является целым кратным от 50 МГц, то для исключения паразитных сигналов следует использовать протокол частот тонов. Использование протокола центральной частоты не позволит исключить паразитные сигналы на частоте 50 МГц.

## 1. Протокол центральной частоты

Выберите центральную частоту двух тонов таким образом, чтобы она была смещена от частот, чётно кратных 10 МГц, на величину, более чем в 10 раз превышающую ширину полосы ПЧ, которая будет использоваться. Пример:

Планируемая центральная частота: 1,9 ГГц  
 Планируемый разнос частот между тонами: 1 МГц  
 Планируемая полоса ПЧ: 100 Гц

Выбранная центральная частота = 1,900001 ГГц  
 Выбранный разнос частот между тонами = 1 МГц

## 2. Протокол частот тонов

Выберите частоту тона таким образом, чтобы она была смещена от частот, чётно кратных 10 МГц, на величину, в 10 раз превышающую ширину полосы ПЧ, которая будет использоваться. Пример:

Планируемая частота тона 1: 1,9 ГГц  
 Планируемая частота тона 2: 1,901 ГГц  
 Планируемая полоса ПЧ: 100 Гц

Выбранная частота тона 1: 1,900001 ГГц  
 Выбранная частота тона 2: 1,901000 ГГц

Паразитные сигналы, обнаруженные на частоте продукта интермодуляционных искажений, будут ухудшать точность измерения. Паразитные сигналы можно определить, имея данные об источнике, либо обнаружить, используя возможности векторных измерений анализатора цепей серии PNA-X. Эта информация может быть использована для выбора частот источника, исключающих паразитные отклики из измерения.



## Приложение А. Таблицы оптимизации ИМИ для анализаторов цепей серии PNA-X

Таблицы, представленные ниже, были составлены для конкретного PNA-X с типовыми характеристиками с использованием методов, описанных в данных рекомендациях по применению. В этих таблицах оптимальные уровни мощности показаны в виде диапазона 5 дБ, соответствующего разрешению 5 дБ аттенюаторов приёмника. Представленные значения EVM являются наихудшим случаем в пределах каждого окна мощности 5 дБ. В таблицах приведены значения модуля вектора ошибки (совокупное воздействие интермодуляционных искажений приёмника, шума низкого уровня и шума высокого уровня) для оптимального диапазона мощности порта (ослабление аттенюатора приёмника = 0 дБ), различных значений полосы ПЧ, разнеса частот между тонами и частоты ВЧ-сигнала.

**Значения модуля вектора ошибки (EVM), представленные в дБн, для перечисленных условий**

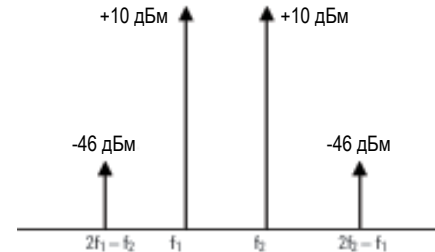
Частота ВЧ-сигнала	Полоса ПЧ (Гц)	Разнос частот между тонами			
		50 кГц	200 кГц	500 кГц	1-10 МГц
900 МГц	3	-90 дБн (от -15 до -20 дБм)			-91 дБн (от -15 до -20 дБм)
	10	-88 дБн (от -14 до -19 дБм)			-89 дБн (от -14 до -19 дБм)
	100	-80 дБн (от -11 до -16 дБм)			-82 дБн (от -11 до -16 дБм)
	1000	-73 дБн (от -8 до -13 дБм)			-75 дБн (от -7 до -12 дБм)
1,75 ГГц	3	-89 дБн (от -18 до -23 дБм)	-92 дБн (от -18 до -23 дБм)	-93 дБн (от -18 до -23 дБм)	-93 дБн (от -18 до -23 дБм)
	10	-86 дБн (от -16 до -21 дБм)	-90 дБн (от -16 до -21 дБм)	-91 дБн (от -16 до -21 дБм)	-91 дБн (от -16 до -21 дБм)
	100	-77 дБн (от -14 до -19 дБм)	-82 дБн (от -13 до -18 дБм)	-84 дБн (от -13 до -18 дБм)	-84 дБн (от -13 до -18 дБм)
	1000	-68 дБн (от -12 до -17 дБм)	-74 дБн (от -10 до -15 дБм)	-77 дБн (от -9 до -14 дБм)	-77 дБн (от -9 до -14 дБм)
7,5 ГГц	3	-79 дБн (от -23 до -28 дБм)	-83 дБн (от -22 до -27 дБм)	-84 дБн (от -21 до -26 дБм)	-85 дБн (от -21 до -26 дБм)
	10	-76 дБн (от -22 до -27 дБм)	-81 дБн (от -21 до -26 дБм)	-82 дБн (от -20 до -25 дБм)	-83 дБн (от -20 до -25 дБм)
	100	-67 дБн (от -20 до -25 дБм)	-72 дБн (от -18 до -23 дБм)	-75 дБн (от -17 до -22 дБм)	-76 дБн (от -17 до -22 дБм)
	1000	-55 дБн (от -15 до -25 дБм)	-64 дБн (от -15 до -20 дБм)	-68 дБн (от -14 до -19 дБм)	-69 дБн (от -14 до -19 дБм)
12,5 ГГц	3	-73 дБн (от -21 до -26 дБм)	-78 дБн (от -21 до -26 дБм)	-83 дБн (от -21 до -26 дБм)	-84 дБн (от -21 до -26 дБм)
	10	-71 дБн (от -23 до -28 дБм)	-76 дБн (от -21 до -26 дБм)	-81 дБн (от -20 до -25 дБм)	-82 дБн (от -20 до -25 дБм)
	100	-61 дБн (от -23 до -28 дБм)	-66 дБн (от -20 до -25 дБм)	-73 дБн (от -17 до -22 дБм)	-75 дБн (от -17 до -22 дБм)
	1000	-51 дБн (от -17 до -22 дБм)	-57 дБн (от -17 до -22 дБм)	-65 дБн (от -14 до -19 дБм)	-68 дБн (от -14 до -19 дБм)
26 ГГц	3	-68 дБн (от -21 до -26 дБм)	-71 дБн (от -21 до -26 дБм)	-74 дБн (от -19 до -24 дБм)	-74 дБн (от -19 до -24 дБм)
	10	-65 дБн (от -20 до -25 дБм)	-68 дБн (от -20 до -25 дБм)	-71 дБн (от -18 до -23 дБм)	-72 дБн (от -18 до -23 дБм)
	100	-55 дБн (от -18 до -23 дБм)	-59 дБн (от -17 до -22 дБм)	-64 дБн (от -15 до -20 дБм)	-65 дБн (от -15 до -20 дБм)
	1000	-46 дБн (от -16 до -21 дБм)	-50 дБн (от -14 до -19 дБм)	-56 дБн (от -12 до -17 дБм)	-58 дБн (от -12 до -17 дБм)

## Приложение В. Тестируемый усилитель имеет IP3, равную +38 дБм. Сможет ли анализатор цепей серии PNA-X измерить ИМИ этого усилителя?

10 дБн между ИМИ ТУ и EVM → погрешность 2,4 дБ  
20 дБн между ИМИ ТУ и EVM → погрешность 0,8 дБ  
30 дБн между ИМИ ТУ и EVM → погрешность 0,3 дБ  
40 дБн между ИМИ ТУ и EVM → погрешность 0,1 дБ

Часто задают такой вопрос: сможет ли анализатор цепей серии PNA-X измерить ИМИ ТУ, имеющего определённое значение IP3. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо знать несколько факторов: уровни мощности основного тона на входе и выходе, IP3 на выходе, коэффициент усиления ТУ, диапазон частот и разнос частот между тонами. В этом примере мы выполним процедуру до конца, чтобы определить применимость этого измерения.

Уровень мощности тона на входе: -10 дБм  
Коэффициент усиления ТУ: 20 дБ  
ТХ для IP3 на выходе (ОПІЗ): +38 дБм  
Частота измерения: 4 ГГц  
Разнос частот между тонами: 10 МГц  
Полоса ПЧ: 10 Гц



На основе вышеприведённых данных:

Уровень мощности тонов на выходе:  $-10 + 20 = +10$  дБм

Если уровень мощности тонов на выходе равен +10 дБм, а ТХ для IP3 на выходе равна +38 дБм, то уровень сигнала интермодуляционных искажений (ИМИ) будет равен -46 дБм, или -56 дБн относительно основного тона.

С точки зрения динамического диапазона, погрешность измерения будет зависеть от того, как это значение (-56 дБн) соотносится со значением модуля вектора ошибки (EVM). Чтобы иметь погрешность измерения сигнала ИМИ < 0,3 дБ с достоверностью 99,7%, EVM приёмника должен быть на 30 дБ ниже сигнала ИМИ ТУ, или -86 дБн.

Затем мы выясняем, что приёмник сможет сделать на этой частоте и при таком разноразносе частот между тонами. Из таблицы в приложении А этих рекомендаций по применению мы определяем, что значение EVM для разноразноса частот между тонами > 1 МГц и полосы ПЧ 10 Гц равно -91 дБн для 1,7 ГГц и -83 дБн для 7,5 ГГц (для 4 ГГц данных в таблице нет). В идеальном случае нам хотелось бы, чтобы EVM был равен -86 дБн для обеспечения погрешности 0,3 дБ. Но в реальности EVM может быть ближе к -83 дБн, если его значение на частоте 4 ГГц близко к значению на частоте 7,5 ГГц. Но если оно ближе к значению на частоте 1,7 ГГц, мы будем иметь намного лучшую точность. Даже если EVM равно -83 дБн, погрешность будет равна 0,4 дБ. Поэтому если величина погрешности, равная 0,4 дБ, является приемлемой, это измерение можно выполнить с помощью анализатора цепей серии PNA-X.

В обоих случаях, диапазон мощности для оптимального EVM включает значение -20 дБм, представляющее уровень мощности тонов, подаваемых на порт приёмника без ослабления. В рассматриваемом случае уровень мощности тонов равен +10 дБм, поэтому мы должны установить ослабление аттенюатора равным 30 дБ, чтобы на приёмники подавался уровень мощности -20 дБм.

### Дополнительные рекомендации для обеспечения точных измерений


Для обеспечения точности измерения необходимо определить разнос частот между тонами для исключения паразитных сигналов. Номинальная центральная частота равна 4 ГГц, а разнос частот между тонами 10 МГц. Используя протокол центральной частоты, мы выбираем центральную частоту двух тонов таким образом, чтобы она была смещена от частот, чётно кратных 10 МГц, на величину, более чем в 10 раз превышающую ширину полосы ПЧ, которая будет использоваться. В этом случае смещение от номинальной центральной частоты 4 ГГц будет больше, чем  $10 \text{ Гц} \cdot 10$  или 100 Гц. Таким образом, мы можем использовать центральную частоту 4000000100 и сохранить разнос частот между тонами  $\pm 10$  МГц.


Кроме того, мы должны учитывать аттенюатор источника на порте 2. Мы хотели бы гарантировать, что ИМИ, генерируемые коммутатором передачи измерительного порта, были бы меньше, чем -90 дБм, тогда они не будут иметь заметного влияния на погрешность. При уровне мощности на входе +10 дБм, требуется, чтобы IP3 была равна 60 дБм  $(10 + (10 - (-90))/2)$ . IP3 измерительного порта без ослабления > 30 дБм. Так как каждый 1 дБ ослабления источника добавляет 2 дБ к IP3, мы должны установить аттенюатор источника на порте 2 на 15 дБ.


**Приложение С.  
Краткий контрольный  
перечень для  
настройки измерений  
интермодуляционных  
искажений с  
использованием  
двухтонального  
непрерывно  
генерируемого  
сигнала с помощью  
анализатора цепей  
серии PNA-X с  
двумя внутренними  
источниками**


1. Установите график для измерения приёмником В (Trace, меню Meas).
2. Установите конфигурактор трактов для проведения двухтональных измерений (диалоговое окно "Power and Attenuators").
3. Включите источник (Source) и источник 2 (Source2) (диалоговое окно "Power and Attenuators"), и установите соответствующие уровни мощности.
4. Установите режим смещения частоты для двух основных тонов (Source и Source2), а также приёмник для измерения всех четырёх тонов (два основных и два продукта интермодуляционных искажений).
5. Избегайте использования круглых чисел или кратных 10 МГц. Вместо 2 ГГц используйте 2,00011 ГГц.
6. Убедитесь в том, что выбрали такую комбинацию числа точек и полосы обзора, что все требуемые тоны ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $2f_1 - f_2$ ,  $2f_2 - f_1$ ) будут точно измерены. Можно проверить, что эти точки фактически измеряются с использованием дискретных маркеров. Простой способ сделать это заключается в следующем:
  - **Primary** (основной канал): перекрывает диапазон частот от  $2f_1 - f_2$  до  $2f_2 - f_1$ . **Используйте 11 точек.** Установить центральную частоту, равной среднему значению от  $f_1$  и  $f_2$ . **Установите полосу обзора равной пяти разностям частот между тонами**
  - **Source** (источник): несвязанный (uncoupled):  $f_1$ , центральная частота, нулевая полоса обзора
  - **Source2** (источник 2): несвязанный (uncoupled):  $f_2$ , центральная частота, нулевая полоса обзора
  - **Receivers** (приёмники): связанные (coupled) (так же, как в основном канале)
7. Установите полосу ПЧ равной 10 Гц, 100 Гц или 1 кГц.
8. Выберите тракт с кварцевым фильтром (узкополосный тракт) (NBF) из меню System > Configure > SICL/GPIB > SCPI menu (меню как в DOS):  
sens:path:conf:elem "ifsigpathall", "nbf"
9. Примените ослабление приёмников. Проверьте, наблюдаются ли в результатах измерения какие-либо изменения. Если при использовании ослабления приёмников значения меняются, это, вероятно, свидетельствует о работе приёмников в режиме компрессии, либо с искажениями, поэтому следует применить ослабление.
10. Разместите на графике четыре отдельных маркера, по одному на каждую частоту ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $2f_1 - f_2$ ,  $2f_2 - f_1$ ).
11. Вычислите IP3 (вручную):  $IP3 \text{ (дБм)} = P(f_1) + (P(f_2) - P(2f_1 - f_2)) / 2$


Для достижения наивысшей точности потребуется выполнить различные калибровки.


 myKeysight [www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)  
Персонализированное представление наиболее важной для Вас информации.


 AXIe [www.axistandard.org](http://www.axistandard.org)  
AXIe представляет собой открытый стандарт, основанный на AdvancedTCA®, с расширениями для контрольно-измерительных приложений. Компания Keysight является членом-учредителем консорциума AXIe. ATCA®, AdvancedTCA® и логотип ATCA являются зарегистрированными в США товарными знаками PCI Industrial Computer Manufacturers Group.

 LXI [www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)  
LAN eXtensions for Instruments (расширения LAN для измерительных приборов) добавляет возможности локальной сети Ethernet и Web в измерительные системы. Компания Keysight является членом-учредителем консорциума LXI.

 PXI [www.pxisa.org](http://www.pxisa.org)  
PCI eXtensions for Instrumentation (PXI) (расширения PCI для измерительных систем) - формат модульных измерительных приборов для создания высокопроизводительных измерительных и автоматизированных систем на базе ПК для жёстких условий эксплуатации.

 **3** лет ГАРАНТИЯ  
Трёхлетняя гарантия  
[www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty](http://www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty)  
Приверженность компании Keysight традициям высочайшего качества продукции и снижения общей стоимости владения. Единственный производитель контрольно-измерительного оборудования, предлагающий стандартную трехлетнюю гарантию на все приборы по всему миру.

 **5** лет ГАРАНТИЯ  
Планы обслуживания компании Keysight  
[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)  
Гарантийные планы до пяти лет и отсутствие непредвиденных расходов обеспечивают, что Ваше измерительное оборудование будет работать в соответствии с заявленными техническими характеристиками, а Вы будете уверены в точности своих измерений.

 DEKRA Certified ISO 9001:2008  
[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)  
Подразделение электронных измерений компании Keysight Technologies, Inc. сертифицировано компанией DEKRA на соответствие требованиям системы менеджмента качества ISO 9001:2008

Торговые партнеры компании Keysight  
[www.keysight.com/find/channelpartners](http://www.keysight.com/find/channelpartners)  
Получите двойную выгоду: глубокие профессиональные знания в области измерительной техники и широкую номенклатуру выпускаемой продукции компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнёрами.

Этот документ раньше был известен как Рекомендации по применению 1408-17  
[www.keysight.com/find/pna](http://www.keysight.com/find/pna)

Российское отделение  
**Keysight Technologies**  
115054, Москва,  
Космодамианская наб., 52, стр. 3  
Тел.: +7 (495) 7973954  
8 800 500 9286  
(звонок по России бесплатный)  
Факс: +7 (495) 7973902  
e-mail: [tmo\\_russia@keysight.com](mailto:tmo_russia@keysight.com)  
[www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

**Сервисный Центр  
Keysight Technologies в России**  
115054, Москва,  
Космодамианская наб., 52, стр. 3  
Тел.: +7 (495) 7973930  
Факс: +7 (495) 7973901  
e-mail: [tmo\\_russia@keysight.com](mailto:tmo_russia@keysight.com)