



# Источники сигналов для когерентных и фазо-стабильных многоканальных систем

Руководство по применению



Agilent Technologies

# Содержание

Введение	3
Определение и пояснение понятия когерентности	4
Когерентные и фазо-стабильные сигналы	4
Причины, по которым необходимы когерентные многоканальные системы	5
Применения многоканальных систем	5
Пространственно разнесённые системы	5
Системы MIMO	6
Формирование луча	7
Определение направления	8
Проблемы испытаний	9
Согласование по фазе	10
Гетеродины с низким уровнем шума	11
Нелинейные эффекты в когерентных многоканальных системах	12
Имитация	12
Многоканальные генераторы когерентных сигналов	13
Разногласия, касающиеся использования нескольких источников	13
Синхронизация опорным сигналом с частотой 10 МГц	13
Запуск генератора модулирующих сигналов произвольной формы	17
Подходы к решению проблем когерентности	17
Решения для фазо-стабильных сигналов	17
Решения для фазо-когерентных сигналов	18
Решения, предлагаемые компанией Agilent	19
Генераторы MXG и PSG с синхронизацией опорным сигналом 10 МГц	19
Фазо-стабильный генератор PSG, синхронизированный опорным сигналом с частотой 1 ГГц (опции H1S и H1G)	20
Когерентные генераторы MXG с общим гетеродином (опция 012)	22
Когерентные генераторы PSG с общим гетеродином (опция HCC)	25
Когерентные генераторы серии PSG с общим гетеродином (опции HCC, 016) и синхронизированным внешним ГСПФ (N8241A)	27
Одноканальный или многоканальный когерентный имитатор сигнала Z2090B-3xx	28
Модификация файла генератора модулирующего сигнала произвольной формы для добавления фазового сдвига	29
Выбор системы, наиболее полно отвечающей требованиям пользователя	30
Заключение	31

## Введение

Многоканальные когерентные системы обладают уникальными свойствами, обеспечивающими формирование диаграммы направленности антенны, определение направления и улучшение приёма в дисперсионном канале. По мере того, как технология, обеспечивающая эти функции, достигает зрелости и появляются требования расширения этих возможностей, эффективность испытания и контроля работы таких систем приобретает всё более важное значение.

Для определения характеристик системы необходимо иметь возможность имитировать специальные сигналы, чтобы точно воссоздать рабочую среду. То есть, для имитации реального поведения эти сигналы должны создаваться таким образом, чтобы они были когерентными. В данном руководстве по применению обсуждаются требования к испытательным сигналам, предназначенным для оценки многоканальных ВЧ-систем, приведены примеры испытательных конфигураций с различной степенью когерентности, пример требований к испытательному сигналу и оценка ошибок и погрешностей, ограничивающих степень когерентности.

# Определение и пояснение понятия когерентности

## Когерентные и фазо-стабильные сигналы

Два сигнала считаются когерентными, если они имеют постоянный относительный фазовый сдвиг в любые моменты времени. Они представляют интерес, поскольку будучи представлены вместе, взаимодействуют друг с другом либо конструктивно (суммируются), либо деструктивно (вычитаются) в зависимости от их фазовых соотношений.

Равенство частот ещё не означает фазовой когерентности сигналов, даже если частоты точно совпадают. Это связано с тем, что некоррелированные фазовые шумы и дрейф фазы между сигналами приводят к изменению фазовых соотношений во времени. Если эти случайные вариации фазы имеют сколько-нибудь значительную величину, сигналы не будут правильно суммироваться или вычитаться.

Следует заметить, что когерентность не означает отсутствие фазовых искажений. Напротив, два когерентных сигнала могут иметь даже большую величину фазового шума и дрейфа фазы, пока эти шумы и дрейф являются общими для обоих сигналов, и их фазы изменяются точно одинаковым образом. Когерентные и некогерентные сигналы различаются между собой не как чёрное и белое. Сигналы можно считать допустимо когерентными, если нестабильность относительной фазы настолько мала, что сигналы ещё обнаруживают некоторую конструктивную или деструктивную комбинируемость будучи представлены вместе. Когерентность в этом случае характеризует статистические соотношения между сигналами и может быть вычислена по формуле:

$$\rho_{XY} = \frac{E\{(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)\}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

где:

$\rho$  - когерентность

$E$  - оператор математического ожидания

$\mu$  - среднее значение

$\sigma$  - стандартное отклонение

$\sigma_{xy}$  - ковариация сигналов X и Y

X - сигнал X

Y - сигнал Y

Результат имеет значение между нулем и единицей. Сигналы с когерентностью, равной единице, считаются полностью когерентными, а сигналы с когерентностью, равной нулю, - полностью некогерентными. Для определённости термин "фазо-стабильный" будет использоваться в этих заметках по применению для обозначения сигналов и систем, которые частично когерентны, чтобы отличить их от полностью когерентных.

В дополнение к способности генерировать когерентные и фазо-стабильные сигналы, часто бывает необходимо изменить фазовые соотношения между сигналами. Системы, обладающие такой способностью, будут рассматриваться как когерентные системы с управляемой фазой.

Ниже приведена краткая сводка терминов и определений, которые будут использоваться в этих заметках по применению.

**Фазо-стабильные сигналы** - сигналы с когерентностью больше 0, но меньше 1 на данном интервале наблюдения

**Фазо-когерентные сигналы** - сигналы с когерентностью, близкой к 1 на данном интервале наблюдения

**Управление фазой** - способность изменять фазовые соотношения между каждым из множества сигналов

## Причины, по которым необходимы когерентные многоканальные системы

Многоканальные системы используют несколько пространственно разнесённых антенн, чтобы обеспечить дополнительные возможности. Эти возможности включают борьбу с многолучевостью и замираниями в дисперсионном канале, концентрацию излучаемой энергии в определённом направлении средствами формирования луча, улучшение пропускной способности данных за счёт использования техники оценки качества инверсного канала или определение направления на источник сигнала. Важным для реализации этих возможностей является способность когерентно устанавливать и изменять фазовые соотношения между сигналами. Ниже дан более строгий взгляд на некоторые многоканальные технологии.

### Применения многоканальных систем

#### Пространственно разнесённые системы

Пространственно разнесённые антенны решают проблемы многолучевого распространения сигнала. Сигнал, передаваемый антенной, излучается во внешнее пространство в направлении к приёмнику. Некоторая часть энергии этого сигнала распространяется в направлении прямой видимости к антенне приёмника. Но какая-то часть энергии сигнала может отражаться от близлежащих объектов или распространяться по атмосферному волноводу, выбирая менее прямой путь к приёмной антенне. В зависимости от фазы прихода электромагнитной волны прямого или отраженного луча, эти волны могут вычитаться или складываться. Если волны вычитаются, энергия на входе основного приёмника будет недостаточной для обнаружения сигнала (рисунок 1). Однако, если используется вторая из разнесённых антенн, установленная на надлежащем расстоянии от основной антенны, волны будут складываться, и много больше энергии будет доступно приёмнику для обнаружения сигнала. При правильном выборе расстояния между антеннами отнесённая антенна будет давать максимум мощности сигнала, тогда как мощность от основной антенны будет близка к нулевой. И наоборот, если отнесённая антенна окажется при нулевом уровне пространственного сигнала, основная антенна даст максимальную мощность сигнала.

Разнесённые системы могут различаться по своим принципам. Одни системы могут просто выбирать и переключаться на антенну с максимальной мощностью сигнала. Однако, переключение может быть затруднено для объектов с высокой подвижностью, где эффекты многолучевости быстро меняются. Другие системы получают выигрыш в виде дополнительной энергии за счёт когерентного суммирования сигналов от каждой антенны.

Переключение или комбинирование сигналов может иметь место либо на ВЧ, ПЧ или в модуляционной полосе цифрового сигнала. Выполнение этих операций в модуляционной полосе более привлекательно, поскольку цифровая обработка может применяться эффективно, обычно с использованием автоматического цифрового выравнивателя задержки (DADE) для непрерывной настройки сигналов, имеющих большую задержку и объединяемых конструктивно (суммированием). Это требует нескольких ВЧ и ПЧ трактов, которые должны быть фазо-стабильными по отношению друг к другу, если не полностью когерентными.

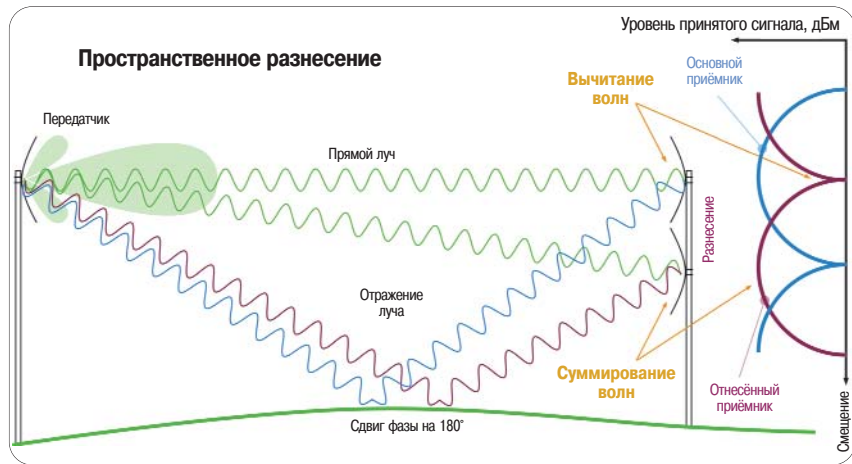
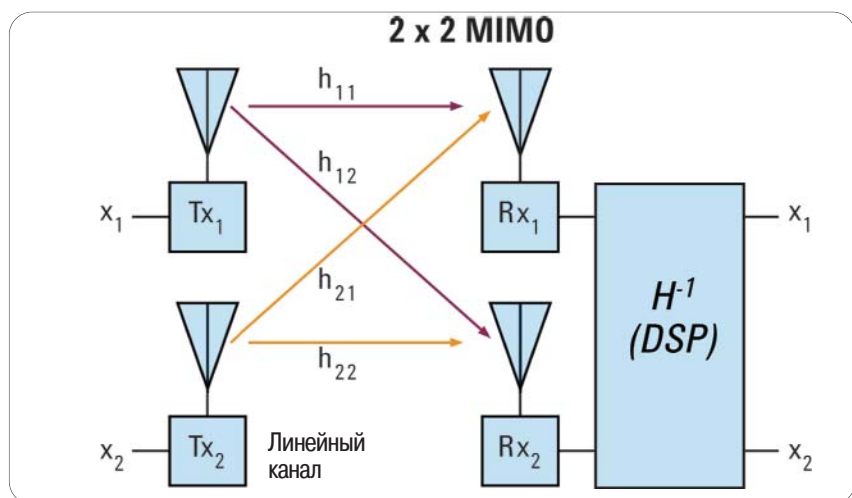


Рисунок 1а - Когерентный характер многолучевых сигналов заставляет их комбинироваться конструктивно (суммированием) или деструктивно (вычитанием). Хороший приём в условиях многолучевого распространения обеспечивается благодаря использованию пространственно разнесённых антенн.

### Системы MIMO

Системы с многими входами и многими выходами (MIMO) - следующий шаг по сравнению с пространственно разнесёнными системами. Вместо того, чтобы переключать или комбинировать сигналы от пространственно разнесённых каналов для преодоления явлений многолучёвости, система MIMO использует эффекты многолучевого распространения для своих преимуществ. Это достигается благодаря использованию пространственно-временного кодирования. По-существу, система MIMO кодирует передаваемые данные таким образом, что приёмник может обрабатывать и разделять многолучевые каналы на несколько пространственных каналов, которые могут однозначно передавать данные<sup>1</sup>. Для этого системы MIMO обычно используют математически строгие алгоритмы оценки характеристик инверсного канала, реализуемые процессором обработки сигналов (рисунок 1в). Для этого требуются системы с несколькими фазо-стабильными или фазо-когерентными передающими и приёмными ВЧ и ПЧ трактами в передатчике и приёмнике. Чтобы избежать межсимвольных искажений в радиоканале, обусловленных многолучёвостью, системы MIMO обычно используют виды модуляции с большой длительностью символа, такие как OFDM. Теоретически система MIMO может увеличить ёмкость полосы частот канала данных пропорционально числу пар передающих и приёмных антенн. Современные системы MIMO обладают также некоторыми преимуществами в части защиты данных благодаря использованию пространственно-разнесённых передающих источников.



1. Durgin, Gregory D., *Space-Time Wireless Channels*, pg 15, Pearson Education Inc., 2003

Рисунок 1в - Системы MIMO используют несколько антенн, пространственно-временное кодирование и алгоритмы оценки характеристик канала для создания нескольких пространственных каналов данных, передающих одинаковую информацию.

### Формирование луча

Другой важной особенностью использования апертур нескольких антенн является формирование узкого антенного луча или плоского излучателя. Когерентно возбуждаемые антенны с надлежащим фазовым сдвигом между антенными элементами позволяют формировать радиолучи (рисунок 1с). Фазированная антенная решётка использует задержки, создаваемые в цепи формирования луча (BFN) для создания равномерного волнового фронта, распространяющегося в заданном направлении. Равномерный волновой фронт позволяет группе антенн с низкой направленностью, собранных в одно целое, действовать подобно высоконаправленной передающей или приёмной антенне.

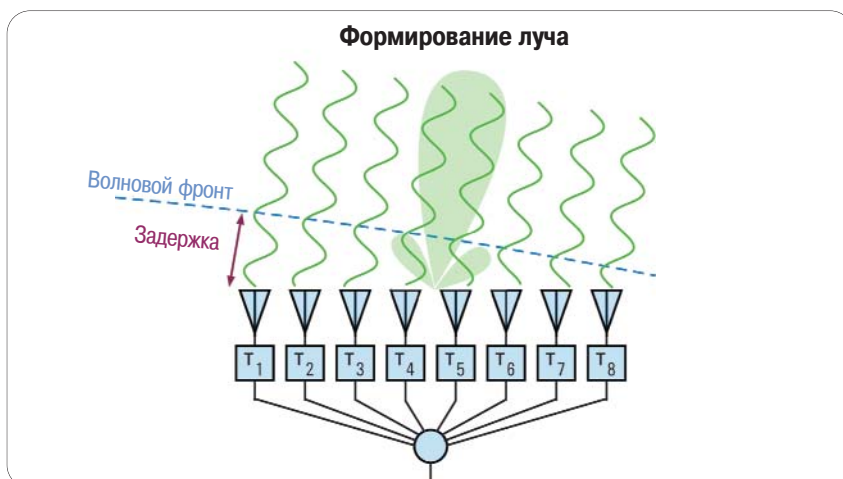


Рисунок 1с - Фазированная антенная решётка формирует луч путём настройки фазовых соотношений между когерентными антеннами таким образом, что сигналы объединяются конструктивно (суммируются) в нужном направлении и деструктивно (вычитаются) в других направлениях.

Использование нескольких антенных апертур вместо одной большой апертуры, такой как параболическая антенна, требующая механического управления направлением луча, имеет ключевое преимущество в том, что фазированная антенная решётка обеспечивает электронное управление задержками, позволяющее очень быстро изменять направление луча антенны с одной точки пространства на другую, что очень важно для применений в РЛС.

Электронное управление лучом фазированной антенной решётки обеспечивается матрицей, представляющей набор взвешивающих коэффициентов, которая управляет задержками в цепи формирования луча. Изменение задержки или взвешивание фазовых сдвигов между антенными элементами позволяет лучу быстро сканировать пространство или наводиться на определённую позицию. Однако управление фазой каждого элемента фазированной антенной решётки требует строгой когерентности всех сигнальных трактов.

*ВЧ сенсор Agilent N6841A  
с программным обеспечением  
ВЧ геолокации N6854A*



Геолокация представляет альтернативный метод использования сигналов для определения местоположения, который отличается от традиционных методов определения направления. Программное обеспечение геолокации Agilent N6854A расширяет возможности ВЧ сенсоров N6841A, включая возможность оценки местоположения на основе измерения временной разности прихода сигналов (TDOA). Более подробную информацию можно найти в заметках по применению компании Agilent *“Techniques and Trends in Signal Monitoring, Frequency Management and Geolocation of Wireless Emitters”* (Методы и тенденции в области мониторинга сигналов, управления частотой и геолокации с использованием беспроводных излучателей), номер публикации 5990-3861EN или на сайте [www.agilent.com/find/surveillance](http://www.agilent.com/find/surveillance).

Кроме РЛС, фазированные антенные решётки используются в системах многостанционного доступа с пространственным разделением каналов (SDMA). В этих системах для установления связи радиолуч направлен только на нужный приёмник (рисунок 1d). Таким образом все приёмники могут использовать одну частоту канала данных, но принимать сигнал может только тот приёмник, на который направлен радиолуч. Системы SDMA особенно интересны для тех, кто пытается создать системы с малой вероятностью перехвата сигнала.

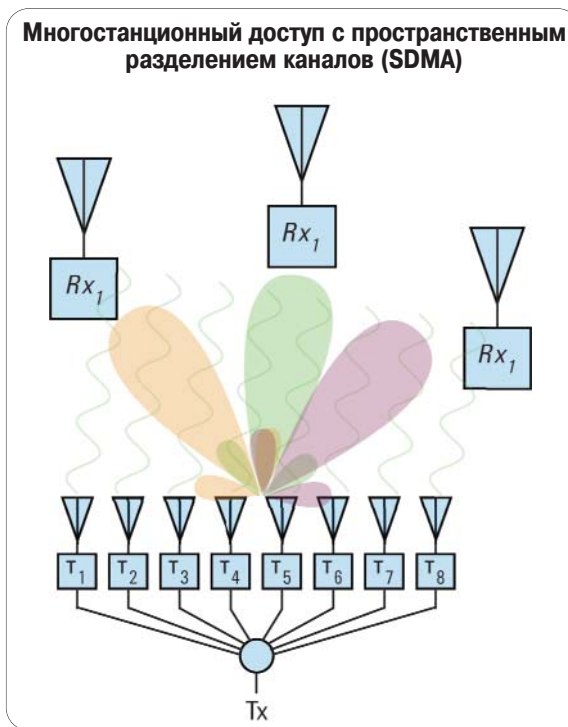


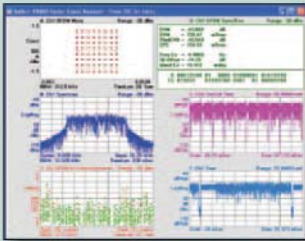
Рисунок 1d - Система SDMA использует формирование луча для передачи или приёма сигнала только от одного определённого передатчика или к одному определённому приёмнику.

### Определение направления

Многоканальные когерентные системы полезны также для определения местоположения излучателя сигнала. Они позволяют определить направление на источник сигнала.

Существует несколько методов определения местоположения излучателя сигнала, использующих различные типы радиооборудования для определения направления (DF) на источник сигнала. Самый простой метод состоит в использовании управляемой антенны с узким лучом. Такой луч может быть сформирован с помощью электронно управляемой фазированной антенной решётки, как описано выше. Угол прихода волны (AoA) может затем определён путём сканирования антенны и обнаружения направления, с которого принимается самый высокий уровень сигнала. Точность этой системы может быть повышена выполнением нескольких измерений от различных позиций или от нескольких антенн и триангуляции.

## Программное обеспечение векторного анализа сигналов Agilent 89601B



Программное обеспечение векторного анализа сигналов (VSA) Agilent 89601B представляет собой гибкое инструментальное средство анализа широкого круга видов модуляции. Программное обеспечение VSA поддерживается рядом аппаратных платформ, включающих многоканальные осциллографы, многоканальные векторные анализаторы сигналов, и большинством анализаторов спектра/сигналов компании Agilent. Это программное обеспечение может выполнять множество многоканальных измерений, включая встроенные измерения взаимной корреляции, функции когерентности и взаимного спектра.

- Анализ спектра с высоким разрешением
- Усовершенствованный анализ видов модуляции общего применения: AM, ЧМ, ФМ, от 2FSK до 1024QAM
- Анализ обширного круга сигналов в стандартных форматах, включая LTE (MIMO), WiMAX™ (MIMO), WLAN (MIMO), 3GPP, RFID и UWB
- Совместимость с более чем 30 моделями анализаторов сигналов, осциллографов и логических анализаторов компании Agilent

Фазовая интерферометрия представляет другой подход к измерению угла прихода волны (AoA). Интерферометры могут обеспечить очень высокое угловое разрешение, но требуют многоканальных приёмников с низким уровнем фазового шума и полностью когерентных. Фазовый интерферометр сравнивает фазовый сдвиг между антеннами, создаваемый фронтом волны, приходящей с различных направлений (рисунок 1e). Этот фазовый сдвиг,  $\phi$ , связан с углом прихода волны AoA. Поскольку фазовый сдвиг после  $360^\circ$  становится неоднозначным, часто бывает необходимо иметь дополнительные антенны и когерентные приёмники, чтобы перекрыть полные  $360^\circ$  по углу направления.

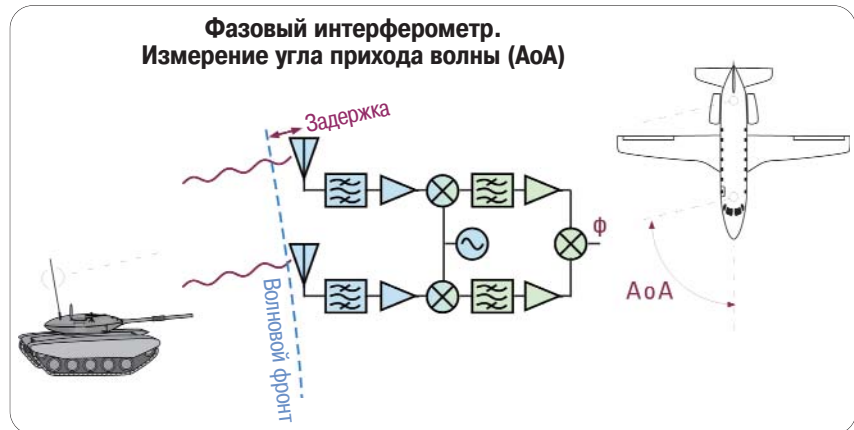
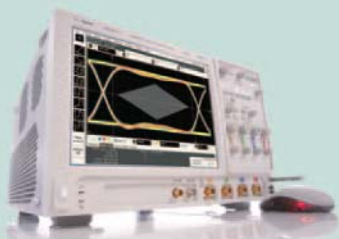


Рисунок 1e - Система определения направления может определять угол прихода волны передаваемого сигнала путём измерения фазовой задержки между двумя пространственно-разнесёнными приёмниками.

## Проблемы испытаний

Обсуждавшиеся выше приложения требуют нескольких каналов со статическими фазовыми соотношениями между ними. Поскольку работа таких систем требует управления фазовыми соотношениями между сигналами или их обнаружения, их испытание также требует, по меньшей мере, фазо-стабильных или даже полностью когерентных сигналов. Во многих случаях эти сигналы должны быть когерентны и иметь известные или определяемые фазовые соотношения и, следовательно, требуют генераторов когерентных испытательных сигналов с возможностью управления фазой. В этом подразделе будут более подробно рассмотрены некоторые особые проблемы испытаний и причины, по которым требуются фазо-стабильные или когерентные сигналы.

**Четырехканальный  
осциллограф серии 90000  
компании Agilent  
с ПО 89601B**



- Высокочастотный осциллограф с широкой полосой пропускания - это отличный инструмент для анализа ВЧ сигналов одновременно во временной и частотной областях с помощью программного обеспечения Agilent 89601B VSA. Более того, четыре когерентных измерительных канала делают его очень полезным для измерений когерентных сигналов в многоканальных системах.
- Полоса пропускания 13 ГГц
- Частота дискретизации 40 Гвыб/с по каждому из четырех аналоговых каналов
- Память в стандартной конфигурации 10 Мвыб на канал с возможностью расширения до передовой в отрасли глубины 1 Гвыб

**Векторный анализатор цепей  
серии PNA компании Agilent  
с многопортовым  
измерительным блоком U3022A**



- Многопортовый испытательный блок U3022AE10 компании Agilent в комбинации с 2-портовым анализатором цепей серий PNA, PNA-L или PNA-X и опцией 551 предлагает полные перекрёстно коммутационные и комбинированные измерения до 12 портов.
- Испытательный блок на основе ответвителя для самой высокой точности и стабильности
  - Внешний ПК и программное обеспечение не требуются
  - Полная 12-портовая калибровка

**Согласование по фазе**

Рассмотренные выше системы требуют определения фазовых соотношений между каналами. Однако даже небольшая разница в длинах кабелей и фазовых характеристиках усилителей и фильтров может создать задержки или фазовые сдвиги, которые нарушают нужные фазовые соотношения. Кроме того, фаза часто зависит от частоты и температуры. Например, групповая задержка является общеизвестным свойством таких компонентов, как фильтры.

Эти задержки могут создавать большие трудности в достижении прецизионного выравнивания задержек между каналами в многоканальной когерентной системе. Компоненты системы должны быть настроены не только для получения определённой формы полосы пропускания, но и характеристики групповой задержки относительно других компонентов системы. Это может оказаться ещё более трудной задачей, если согласование групповой задержки и амплитуды должно поддерживаться в определённом диапазоне температур. Даже небольшие различия задержек на промежуточных частотах могут привести к большим фазовым ошибкам на высоких частотах сигнала (рисунок 2).

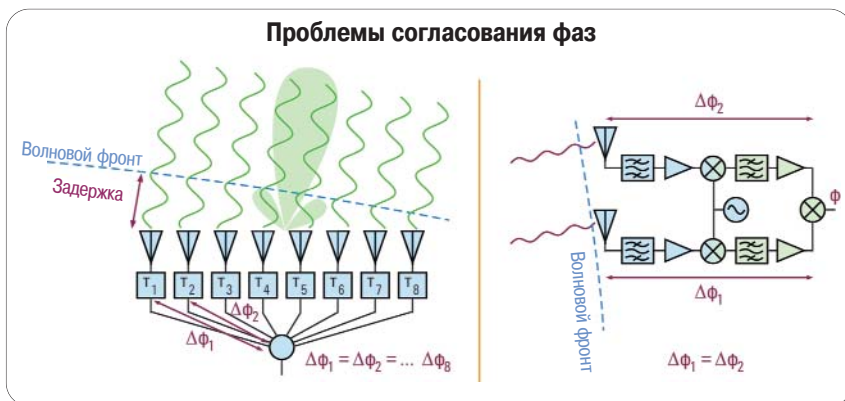


Рисунок 2 - Когерентные многоканальные системы часто требуют согласования фаз между каналами.

Многопортовый векторный анализатор цепей (VNA) представляет, вероятно, наилучшее решение для измерения с самой высокой точностью задержки или разности фаз между компонентами или между каналами. Однако для сценариев, требующих сложных стимулов, может быть выбран векторный генератор сигналов (VSG). Одного генератора и разветвителя сигнала может быть достаточно для имитации нескольких когерентных портов сигнала. Различие в фазовых характеристиках может быть непосредственно измерено с помощью когерентного многоканального анализатора, такого как высокочастотный осциллограф или многоканальный векторный анализатор сигналов (VSA).

Однако, использование нескольких когерентных источников с управляемой фазой имеет то преимущество, что они дают возможность легко изменять фазовые соотношения между стимулирующими сигналами.

### Векторный генератор сигналов E8267D серии PSG компании Agilent



Векторный генератор сигналов E8267D серии PSG компании Agilent - это первый среди промышленных образцов микроволновый генератор векторных сигналов с квадратурной (I/Q) модуляцией до 44 ГГц. Для него характерно наличие усовершенствованного широкополосного внутреннего генератора модулирующего сигнала, обладающего возможностью гибкого воспроизведения сигналов произвольной формы или генерации сложного сигнала в реальном времени. Генератор сигналов E8267D серии PSG имеет также встроенный широкополосный I/Q модулятор, который обеспечивает полосу модуляции до 2 ГГц и является идеальным дополнением к автономному широкополосному генератору сигналов произвольной формы N6030A компании Agilent для имитации I/Q сигналов с полосой до 1 ГГц.

- Векторный генератор сигналов до 44 ГГц с полосой модуляции до 2 ГГц
- Мощность выходного сигнала +22 дБм на частоте 20 ГГц и +18 дБм на частоте 40 ГГц (тип.)
- С помощью опций поддерживает когерентную многоканальную конфигурацию
- Совместим с программным обеспечением создания форм сигналов Signal Studio компании Agilent

### Гетеродины с низким уровнем шума

Другой проблемой, связанной с когерентными системами, является сложность получения сигнала гетеродина (LO) для испытательной системы. Часто в процессе разработки может потребоваться использовать гетеродин испытательной системы для возбуждения повышающего или понижающего преобразователя частоты. Для одноканальной некогерентной системы в продаже имеется много источников сигналов, таких как векторный генератор сигналов PSG компании Agilent, пригодных в качестве гетеродина для испытательных целей. Когерентные многоканальные системы требуют, по меньшей мере, двух фазо-когерентных гетеродинов для возбуждения каждого канала. Простой делитель мощности и генератор сигналов с высокой выходной мощностью, такой как PSG, могут выполнять эту функцию для одночастотного преобразования частоты в многоканальной системе.

Однако, для систем с многочастотным преобразованием необходимо поддерживать фазо-стабильное соотношение между всеми синтезаторами, участвующими в преобразовании, в сочетании с низким уровнем фазового шума. Более низкочастотные гетеродины должны иметь строго фиксированное соотношение частот с частотами более высокочастотных гетеродинов. Генераторы испытательного сигнала должны быть фазо-стабильными по отношению друг к другу и работать от общего опорного источника. Единый опорный источник обязателен.

Это может показаться простым, но на практике взаимная синхронизация двух источников сигналов общего применения для получения высокочастотных фазо-стабильных гетеродинов может оказаться трудной задачей. Хотя большинство источников сигналов имеют привычный вход опорного сигнала с частотой 10 МГц для облегчения генерации фазо-стабильного сигнала гетеродина, для многих современных систем результаты могут оказаться плохими или неприемлемыми. Поскольку большинство генераторов тест-сигналов имеют очень малый шаг перестройки частоты, частота опорного сигнала 10 МГц иногда делится до более низкой тактовой частоты прежде, чем быть умноженной до более высоких частот. Обычно это требует большого коэффициента умножения для получения частот в микроволновом диапазоне. В результате фазовый шум увеличивается на хорошо известную величину  $20 \lg(N)$  (где  $N$  - коэффициент умножения). Чем больше коэффициент умножения, тем выше уровень фазового шума. Чем выше уровень фазового шума фазо-стабильных гетеродинов, тем ниже коэффициент когерентности между каналами. Это ограничивает возможности многоканальных когерентных систем, которые используют механизм когерентного подавления шума на детекторах системы. Эта проблема ещё более усугубляется из-за дрейфа или дисперсии Аллена, обусловленных сравнительно длительным периодом обновления при сравнительно низкочастотном опорном сигнале (частота которого, возможно, поделена внутри прибора до ещё более низкой частоты).

Фазо-стабильный или с низким фазовым шумом гетеродин требует очень сложных синтезаторов частоты. Более того, большинство имеющихся в продаже генераторов сигналов, использующих внешний источник опорного сигнала, часто не могут обеспечить фазовую стабильность на различных частотах, необходимую для испытательных гетеродинов в многоканальных системах. Как будет показано ниже, генератор сигналов, такой как PSG, имеет специальные опции для улучшения фазовой стабильности между несколькими источниками.

### Нелинейные эффекты в когерентных многоканальных системах

Другой сложной проблемой для разработчиков когерентной системы является необычное поведение когерентных сигналов под влиянием нелинейных эффектов. Для иллюстрации этого мысленно подадим на вход усилителя синусоидальный сигнал одной частоты, который введёт усилитель в режим насыщения. Когда мощность сигнала достигнет уровня насыщения усилителя, дальнейшее усиление сигнала прекращается.

Теперь мысленно подадим на вход такого же усилителя набор когерентных частот с гребенчатой структурой спектра. Выходной сигнал будет не просто клиппирован. Вместо этого окажется, что гармоника, когерентно связанная с более низкочастотными гармониками, будет объединяться с ними конструктивно (суммированием) и деструктивно (вычитанием). В результате этого амплитуды гармоник гребенчатого спектра приобретут случайный характер (рисунок 3).

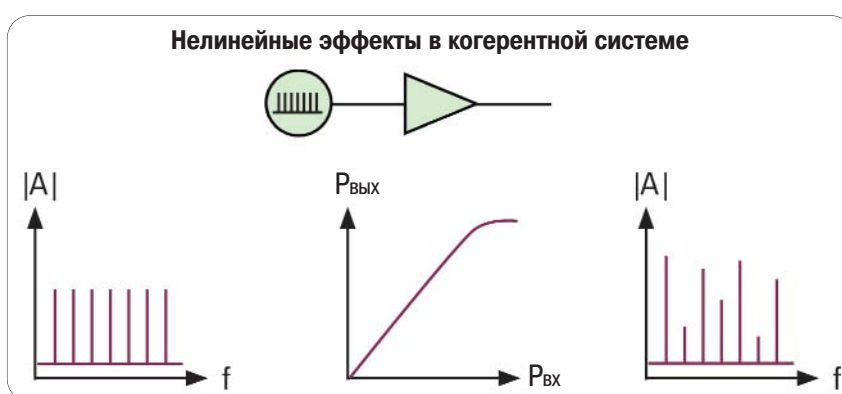


Рисунок 3 - В когерентных системах продукты нелинейности могут комбинироваться непредсказуемым образом.

Поскольку сигналы в когерентных системах могут создавать в результате когерентно связанные продукты искажений, нелинейные эффекты потенциально могут давать сомнительные результаты, которые трудно диагностировать. Испытания с использованием некогерентного сигнала могут быть недостаточными для предсказания нелинейного поведения системы в присутствии когерентного сигнала. Это особенно проявляется, если имеют место межканальные нелинейные эффекты.

Следовательно, всеобъемлющий анализ нелинейного поведения когерентных систем требует специальных средств для испытания в условиях когерентно связанных сигналов.

### Имитация

И наконец, значительная проблема для разработчиков многоканальных и когерентных систем состоит в создании испытательных стимулов, гарантирующих правильное функционирование системы. Возможно, это может быть натурное испытание; однако, использование реальных платформ и излучателей, которые предназначены для работы в составе реальной системы, часто недопустимо дорого или нелегко доступно. Например, полёты нескольких самолётов, каждый из которых обходится в несколько тысяч долларов за час, в течение дней или недель испытаний, может очень быстро превысить стоимость даже сложных испытательных установок. Создание различных типов стимулов, необходимых для эмуляции реальных рабочих условий, требует генераторов сигналов, способных генерировать фазо-стабильные и когерентно связанные стимулирующие сигналы. Кроме того, для имитации реальных условий может оказаться необходимыми управление и настройка фазовых соотношений между сигналами для воспроизведения волнового фронта, подходящего на антенные порты.

К счастью, как будет видно из следующего подраздела, компания Agilent предлагает разнообразные решения, которые могут удовлетворить этим требованиям.

# Многоканальные генераторы когерентных сигналов

## Разногласия, касающиеся использования нескольких источников

Имеется несколько спорных вопросов общего характера, касающихся популярных подходов, в которых делается попытка сделать источники сигналов фазо-когерентными. Эти вопросы следует осознавать и иметь в виду. Предметы этих споров существенно ограничивают возможность использования большинства источников сигналов в многоканальных когерентных системах.

### Синхронизация опорным сигналом с частотой 10 МГц

Как упоминалось ранее, простейший способ достижения высокой фазовой стабильности между приборами состоит в синхронизации нескольких источников одним опорным сигналом с частотой 10 МГц. Однако, хотя это решение и обеспечивает частотную когерентность, фазовая когерентность (или фазовая стабильность, как определено выше) будет ограниченной. Это можно понять, внимательно рассмотрев структурную схему источника сигналов на рисунке 4.

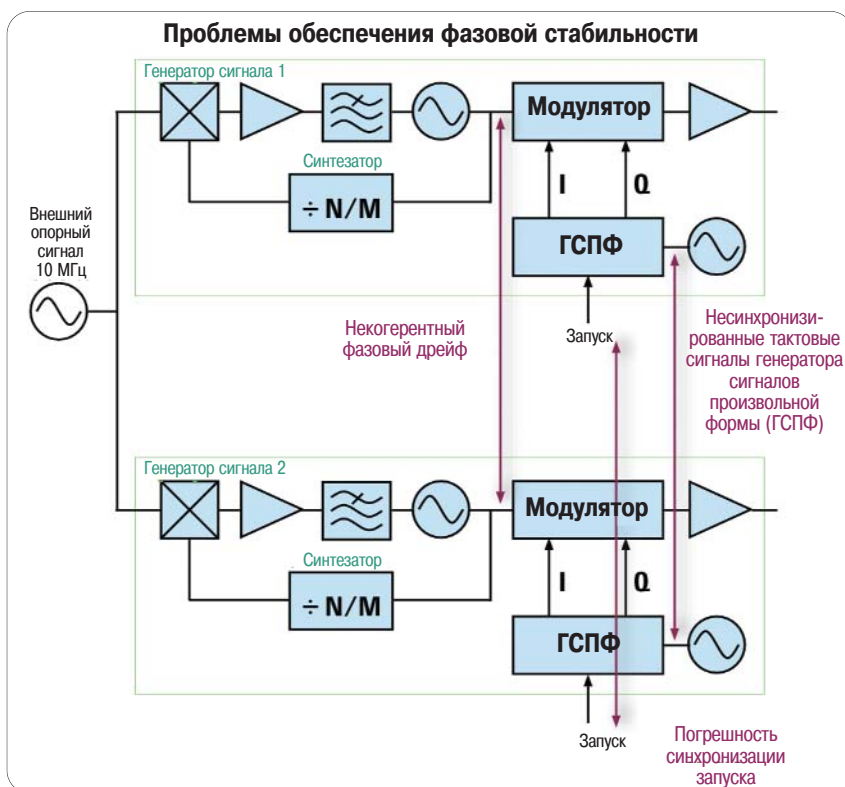


Рисунок 4 - Синхронизация нескольких источников общим опорным сигналом с частотой 10 МГц обеспечивает лишь ограниченную фазовую стабильность между приборами.

Во-первых, хотя синтезаторы генератора сигналов и синхронизированы общим опорным источником, они имеют отдельные внутренние генераторы, управляемые напряжением (ГУН), каждый со своим фазовым шумом, и отдельные аппаратные цепи фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), создающие независимые друг от друга сигналы ошибки, обусловленные дрейфом. Конечно, большая или меньшая из этих ошибок будет отслеживаться в пределах ограничений полосы пропускания кольца ФАПЧ, обеспечивая автоподстройку синтезаторов (рисунки 5 и 6).

Обычно на частотах в пределах полосы пропускания разомкнутое кольцо автоподстройки имеет высокий коэффициент усиления, что обеспечивает высокую точность слежения. Однако слежение оказывается несовершенным для эффектов более высокого порядка и они полностью не отслеживаются (рисунок 5). Более того, остаточные фазовые ошибки имеют тенденцию к значительному ухудшению работы системы на частотах за полосой пропускания кольца ФАПЧ, что приводит к некогерентным вариациям фазы (рисунок 6). Эти вариации фазы умножаются, поскольку опорная частота 10 МГц преобразуется на более высокие частоты, что в результате приводит к значительным ошибкам.

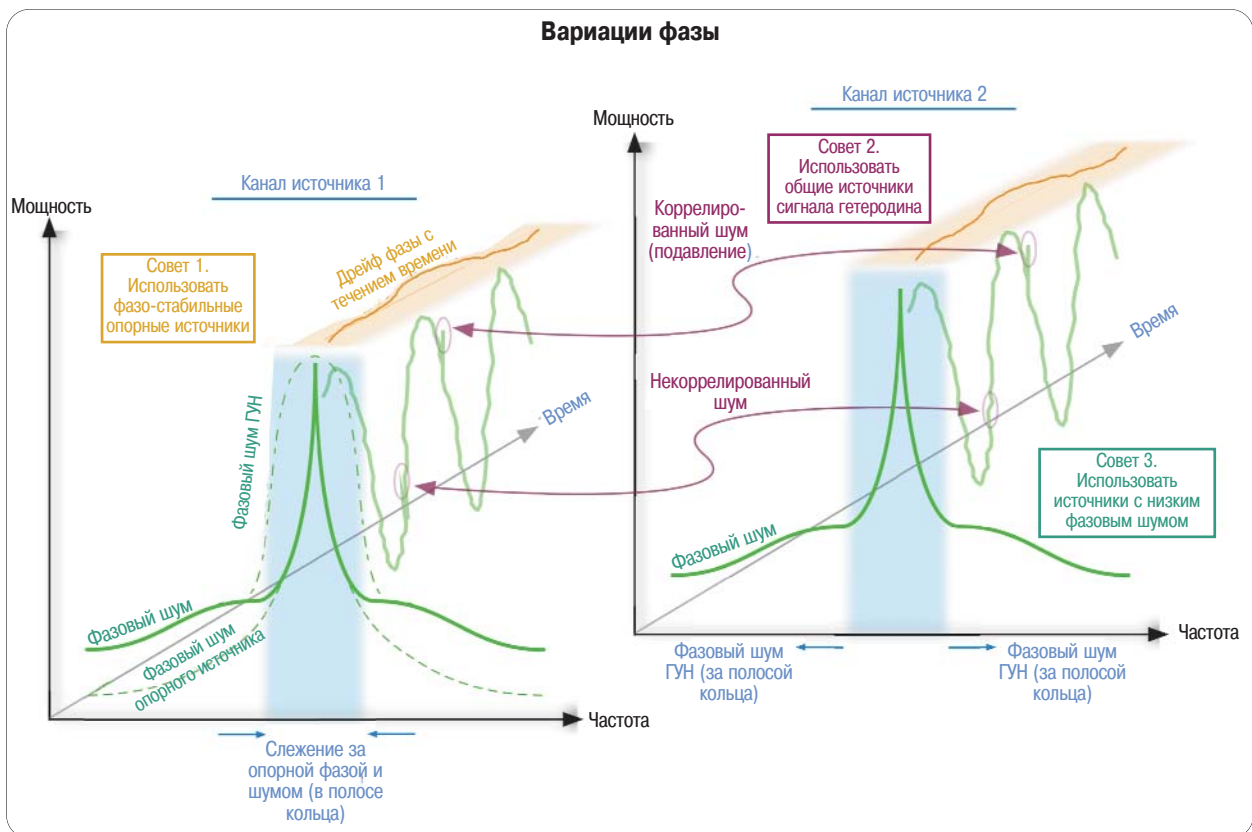


Рисунок 5 - Фазовые вариации между источниками, синхронизированными общим опорным генератором в пределах полос пропускания их колец ФАПЧ. Характеристики улучшаются при использовании высококачественного опорного источника и синхронизируемых приборов с низким уровнем фазового шума или при использовании для синхронизации более высокочастотного опорного источника или гетеродинов (LO).

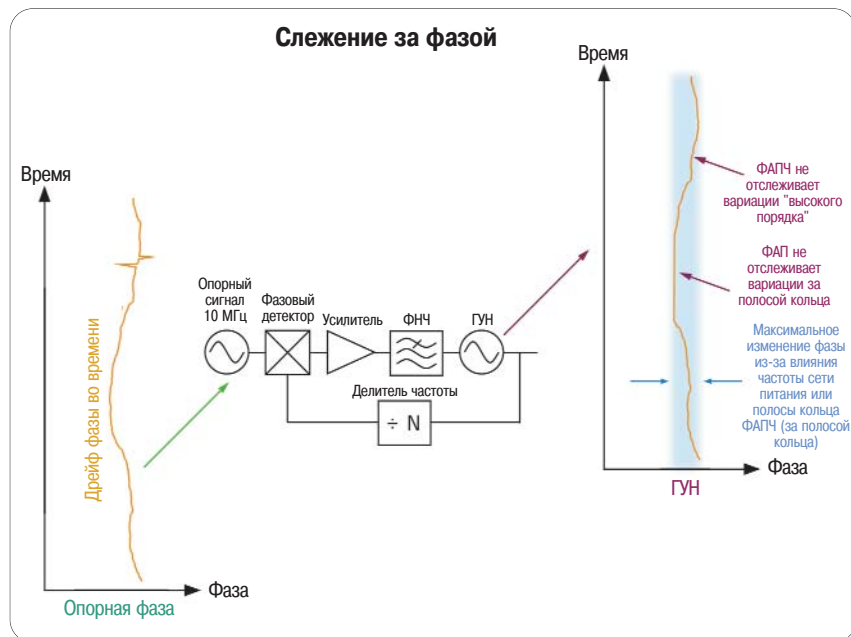
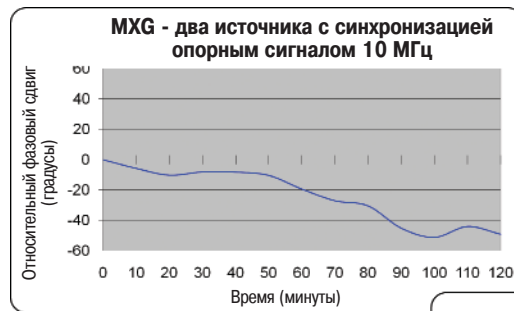


Рисунок 6 - Системы ФАПЧ обычно хорошо, но не совершенно отслеживают фазу источника сигнала, но не способны отслеживать вариации фазы более высокого порядка.

Некоррелированные шумовые компоненты синтезаторов источника сигнала вносят дополнительные погрешности. В пределах полосы кольца ФАПЧ фазовые шумы определяются опорным источником; однако, за пределами этой полосы фазовые шумы определяет ГУН синтезатора (рисунок 5). Эти некоррелированные фазовые шумы вносят фазовую погрешность между синхронизированными источниками сигнала.

Для иллюстрации, уровень фазовой стабильности двух синхронизированных источников может быть оценён путём измерения медленного дрейфа во времени (дисперсия Аллена) и интегрирования фазового шума. Например, на рисунке 7 показаны результаты измерения дрейфа фазы двух генераторов сигналов Agilent серии MXG, синхронизированных опорным сигналом с частотой 10 МГц, полученные с помощью двухканального высокочастотного осциллографа. За один час наблюдался дрейф фазы более 20 градусов по сравнению с менее чем 200 мград в случае правильного решения для генерации когерентного сигнала.

### Сравнение фазо-когерентной конфигурации и конфигурации с синхронизацией опорным сигналом



В фазо-когерентной конфигурации большая часть дрейфа фазы может принадлежать измерительному приёмнику (2-канальному осциллографу)

Обратите внимание на различие масштабов шкал времени и фазового сдвига

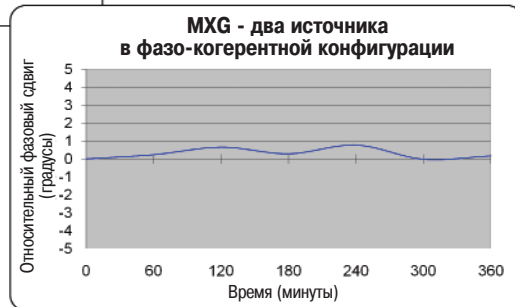


Рисунок 7 - Результаты измерения дрейфа фазы двух генераторов MXG, синхронизированных опорным сигналом 10 МГц, в сравнении с двумя когерентно синхронизированными генераторами MXG (использующими общий гетеродин).

Величина фазовой ошибки, обусловленная некогерентным фазовым шумом, определяется интегрированием фазового шума синтезатора при установке пределов интегрирования равными полосе сигналов, используемых в системе. На рисунке 8 показан пример измерения фазового шума анализатором спектра Agilent PSA. Маркеры полосы интегрирования облегчают выполнение измерения и могут представить значение полной фазовой ошибки в градусах.

### Измерение интегрированного фазового шума

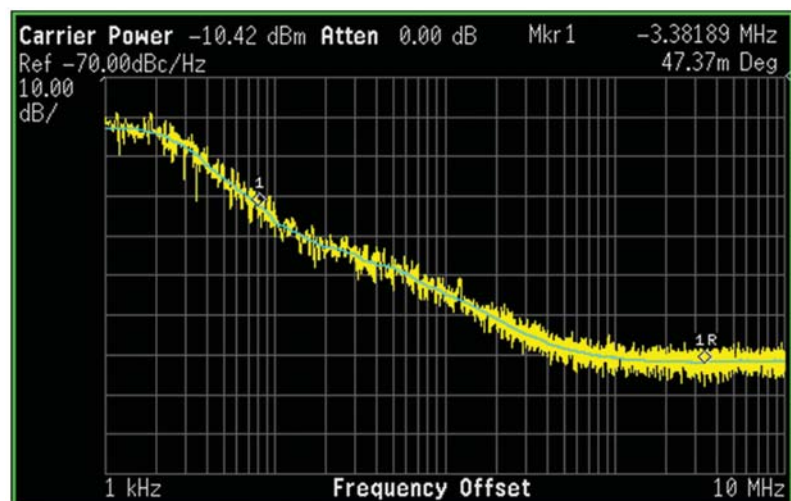


Рисунок 8 - Полная фазовая ошибка, обусловленная фазовым шумом между источниками сигнала, может быть определена интегрированием некоррелированного фазового шума в пределах интегрирования, равных полосе сигналов, используемых в системе.

### Запуск генератора модулирующих сигналов произвольной формы

Общий подход к выравниванию фаз генераторов модулирующих сигналов в нескольких векторных генераторах (VSG) основывается на использовании общего запуска, инициирующего начало воспроизведения сигнала (рисунок 4). Однако, если тактовые сигналы двух генераторов сигналов произвольной формы (ГСПФ) не синхронизированы, может появиться ошибка, равная временному интервалу между выборками, даже если запуск генераторов происходит одновременно. Это получается в результате того, что начальная выборка фиксируется по первому после запуска положительному перепаду тактового импульса. Например, при частоте дискретизации ГСПФ 50 МГц, интервал между выборками составляет 20 нс (1/50 МГц). Следовательно, ошибка выравнивания между сигналами двух ГСПФ из-за неправильной синхронизации может достигать 20 нс.

Следующая сложность возникает с генераторами сигналов произвольной формы, использующими режим передискретизации. Если, например, ГСПФ с частотой дискретизации 50 МГц использует передискретизацию с коэффициентом четыре, частота передискретизации будет 200 МГц. При этом каждая 50-мегагерцевая выборка интерполируется в четыре передискретизированных точки. Поэтому при передискретизации синхронизация должна обеспечивать согласованность между приборами в интерполяции каждой выборки. Чтобы преодолеть эти приборные проблемы, в следующем подразделе будут в общих чертах представлены варианты конфигураций, предлагаемых компанией Agilent. Эти конфигурации обладают специальными свойствами, предусмотренными для улучшения фазовой стабильности, уменьшения фазового шума и правильного фазирования генераторов модулирующих сигналов, чтобы избежать ограничений, с которыми приходится сталкиваться при генерации когерентных сигналов.

### Подходы к решению проблем когерентности

Имеющиеся решения могут быть разделены на две категории: решения для фазо-стабильных сигналов (коэффициент когерентности больше нуля, но меньше 1, как было определено ранее), и решения для фазо-когерентных сигналов. Решения для фазо-стабильных сигналов используют средства и варианты, позволяющие минимизировать ошибки, обусловленные дрейфом фазы и фазовым шумом. Решения для фазо-когерентных сигналов дают возможность совместно использовать общий гетеродин, так что нестабильности фазы оказываются общими для нескольких генераторов сигналов.

#### Решения для фазо-стабильных сигналов

Фазовая стабильность приборов, синхронизированных опорным генератором, зависит от характеристик используемого прибора. В общем случае фазовая стабильность между приборами высокого класса лучше, чем у приборов среднего или низкого класса из-за более высоких характеристик по уровню фазового шума, более низкой остаточной ЧМ и лучших характеристик по дрейфу. Поэтому выбор прибора является важным решением для получения самых высоких характеристик. В том или ином классе приборов могут быть варианты с улучшенными характеристиками или могут использоваться средства для повышения фазовой стабильности. Например, приборы часто имеют опции, обеспечивающие улучшенные характеристики фазового шума, повышенную стабильность опорного сигнала или позволяющие использовать высококачественный внешний опорный сигнал.

### Решения для фазо-когерентных сигналов

Другой подход к минимизации ошибки когерентности, обусловленной несовершенством синтезаторов и систем ФАПЧ, состоит в применении решений, обеспечивающих фазовую когерентность, которые эффективно исключают относительные фазовые ошибки, используя общий гетеродин для приборов (рисунок 9). Синтезатор по-прежнему имеет дрейф и фазовый шум, но поскольку и дрейф и фазовый шум в этом случае являются общими для обоих сигналов, относительная фазовая нестабильность между сигналами практически устраняется. Частоты сигналов гетеродина затем по отдельности умножаются до нужного значения и используются для раздельного возбуждения отдельных квадратурных (I/Q) модуляторов. Фазовая нестабильность, вносимая умножителями и I/Q модуляторами, пренебрежимо мала. Наличие отдельных генераторов модулирующих сигналов и отдельных I/Q модуляторов, возбуждаемых когерентным гетеродином, представляет очень гибкое решение. Это достигается тем, что в дополнение к возможности создавать несколько когерентных сложных сигналов, генератор модулирующего сигнала может изменять фазу каждого сигнала. Но при этом генераторы модулирующих сигналов должны быть синхронизированы.

На рисунке 9 сигнал гетеродина генератора сигнала, изображённого в верхней части рисунка, разветвляется и используется в качестве входного гетеродинного сигнала для обоих приборов. В другом варианте в качестве общего гетеродина для всех приборов может использоваться отдельный синтезатор. Из этой функциональной схемы видно также, как могут быть синхронизированы генераторы модулирующих сигналов общим сигналом запуска, инициирующим одновременное начало работы обоих генераторов сигналов произвольной формы. Генераторы модулирующих сигналов тоже используют общий внешний тактовый сигнал для выравнивания выборок сигнала.

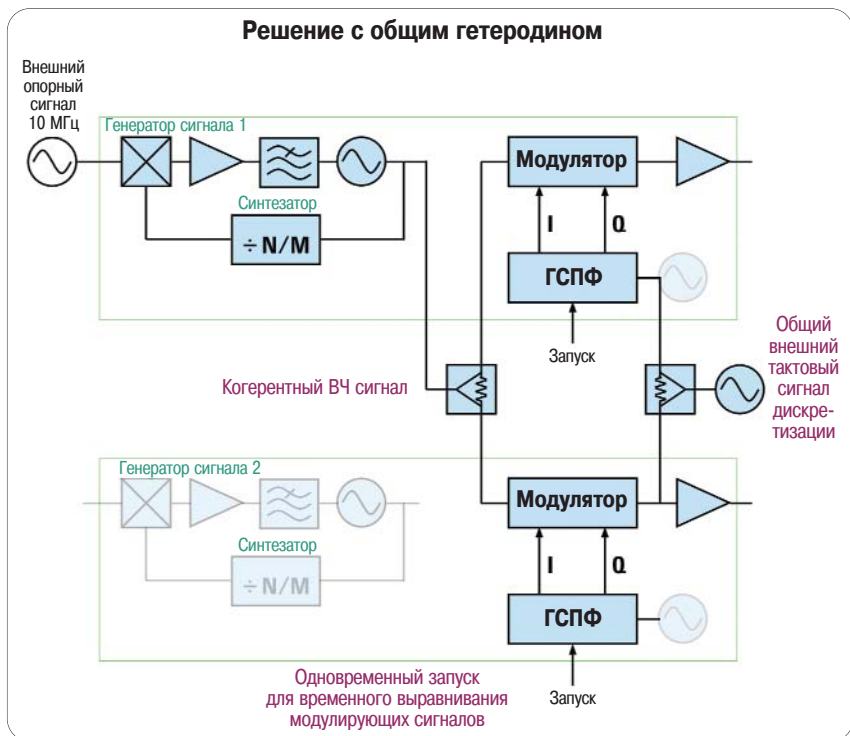


Рисунок 9 - Совместное использование общего гетеродина генераторами сигналов эффективно исключает фазовую ошибку между сигналами и обеспечивает полную фазовую когерентность. В качестве гетеродина может использоваться внешний источник или сигнал "ведущего гетеродина" одного из приборов, распределённый между другими приборами.

## Решения, предлагаемые компанией Agilent

В этом подразделе будут рассмотрены конкретные решения, предлагаемые компанией Agilent, для тестирования многоканальных когерентных систем.

### Генераторы MXG и PSG с синхронизацией опорным сигналом 10 МГц

Хотя фазовая когерентность не достигается с помощью простой конфигурации, использующей синхронизацию опорным сигналом с частотой 10 МГц, имеются доступные опции, специальные средства и хорошие практические методы, пригодные для повышения стабильности фазовых соотношений между приборами. Система с синхронизацией опорным сигналом имеет также и некоторые преимущества. Кроме простоты, такая система остаётся гибкой в настройке нескольких источников на различные частоты. Испытательные системы, синхронизированные более высокими частотами, могут терять эту гибкость.

Одним из первых вопросов, подлежащих обсуждению, являются характеристики прибора. Остаточный фазовый шум и дрейф фазы генераторного синтезатора непосредственно влияют на стабильность фазовых соотношений между приборами, синхронизированными опорным сигналом.

Генератор сигналов серии PSG имеет опцию UNX – сверхнизкий фазовый шум – которая улучшает его характеристики в части фазового шума и дрейфа фазы и настоятельно рекомендуется для повышения фазовой стабильности в конфигурациях с синхронизацией опорным сигналом. Опция UNX обеспечивает прекрасные характеристики по уровню фазового шума в имеющихся в продаже генераторах микроволновых сигналов.

Другим предметом обсуждения являются характеристики сигнала опорной частоты. Как и большинство генераторов сигналов, генераторы MXG и PSG могут использовать внутренний или внешний источник опорного сигнала. Использование в качестве основного самого высококачественного из доступных опорного источника позволит улучшить стабильность относительной фазы за счёт двух факторов: во-первых, высококачественный опорный источник имеет меньший дрейф; во-вторых, в фазовом шуме вблизи несущей при отстройках меньше 1 кГц доминирует фазовый шум опорного источника, поэтому уменьшение его фазового шума непосредственно уменьшает фазовый шум выходного сигнала генератора вблизи несущей и фазовую нестабильность (в пределах полосы удержания кольца ФАПЧ).

Обычно в качестве опорной используется частота 10 МГц. Однако, генераторы серии MXG компании Agilent имеют опцию 1ER, которая позволяет использовать опорную частоту от 1 до 50 МГц, расширяя тем самым возможность выбора внешнего опорного источника. Это особенно полезно для синхронизации внутренними сигналами устройств, не относящихся к испытательному и измерительному оборудованию, которые обычно имеют опорные источники с частотами, отличными от 10 МГц.

С помощью опции UNX генератор серии PSG имеет возможность установки дополнительной полосы пропускания сигнала опорного генератора, что может использоваться для оптимизации фазового шума при различных частотных отстройках. Эта установка распространяется как на внутренний, так и на внешний опорные источники <sup>1</sup>. По умолчанию полоса опорного канала 125 Гц для внутреннего источника и 650 Гц - для внешнего. Расширение полосы опорного канала (или полосы кольца ФАПЧ) делает характеристики фазового шума более зависимыми от опорного сигнала, а сужение полосы - более зависимыми от аппаратных средств синтезатора. Поэтому характеристики могут быть оптимизированы в зависимости от уверенности в стабильности и уровне фазового шума опорного сигнала по сравнению с аналогичными характеристиками аппаратных средств синтезатора для различных частотных отстроек от несущей. Для многоканального сценария обычно желательно расширить полосу кольца ФАПЧ до самой широкой, поскольку это увеличивает зависимость фазовой стабильности от опорного сигнала, который является общим для всех генераторов (рисунок 10). Другое преимущество расширения полосы кольца ФАПЧ заключается в увеличении общего коэффициента передачи кольца, что способствует более эффективному слежению за опорным сигналом вблизи несущей, обеспечивая дальнейшее улучшение кратковременной фазовой стабильности.

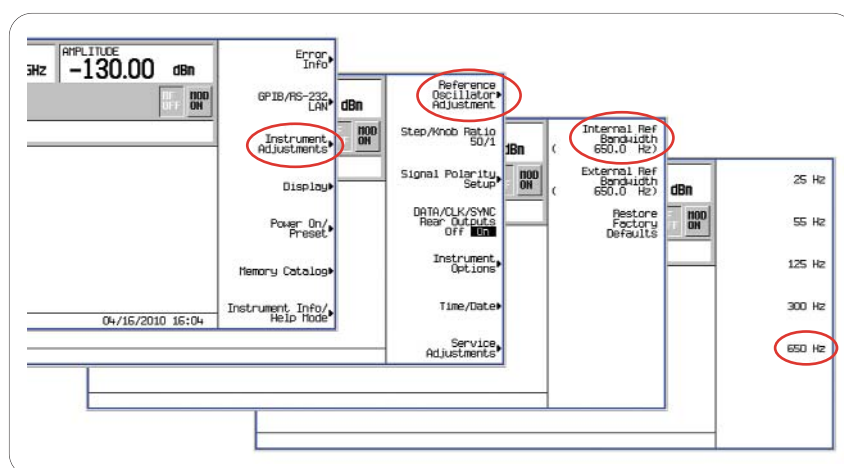


Рисунок 10 - Для наилучшей фазовой стабильности между приборами, синхронизированными опорным сигналом, полосу опорного канала в генераторе PSG следует установить самой широкой с помощью опции UNX.

## Фазо-стабильный генератор PSG, синхронизированный опорным сигналом с частотой 1 ГГц (опции H1S и H1G)

Опции H1S и H1G генератора PSG обеспечивают дальнейшее улучшение фазовой стабильности между источниками в фазо-стабильной системе. Чтобы пояснить это, необходимо дать некоторое описание аппаратного устройства опорного канала генератора PSG. Синтезатор генератора PSG не использует непосредственно опорный сигнал с частотой 10 МГц; он имеет узел, который преобразует опорную частоту 10 МГц в опорную частоту 1 ГГц, которая затем используется для синхронизации синтезатора в генераторе PSG, базирующегося на YIG-генераторе. Опции H1S и H1G имеют средства, позволяющие обойти весь внутренний тракт опорного сигнала и подключить внешний опорный сигнал с частотой 1 ГГц, исключая тем самым фазовую нестабильность между платами каждого генератора, формирующими внутренние опорные сигналы с частотой 1 ГГц. Поскольку внутри генератора PSG для различных частот имеются различные тракты, опция H1S используется для частот выше 250 МГц, а опция H1G для частот ниже 250 МГц (рисунок 16).

1. Можно найти, используя клавиши `Utility>Instrument Adjustments>Reference Oscillator Adjustment`.

С помощью опций H1S и H1G можно улучшить совокупные характеристики по фазовому шуму. Однако, поскольку внутренний опорный сигнал 1 ГГц уже обеспечивает отличные совокупные характеристики по фазовому шуму, внешний опорный сигнал был бы необходим для получения ещё более высоких характеристик. Нестабильность относительной фазы (то есть, дрейф) значительно уменьшается при совместном использовании общего опорного сигнала 1 ГГц (рисунок 12). Для этого удобнее всего использовать внутренний опорный сигнал 1 ГГц одного из генераторов PSG в качестве ведущего опорного сигнала. На рисунках 11a и 11b показаны две альтернативные конфигурации совместного использования общего опорного сигнала 1 ГГц. На рисунке 11b один PSG имеет опцию UNX, а другой - опцию H1S. Поскольку генератор с опцией UNX имеет выход опорного сигнала 1 ГГц, этот выход может быть подключён к входу опорного сигнала 1 ГГц второго генератора, имеющего опцию H1S. Если оба генератора имеют опцию H1S, как показано на рисунке 11a, опорный сигнал 1 ГГц ведущего PSG может быть разветвлён и совместно использован несколькими генераторами PSG. Хотя эти опции и улучшают фазовую стабильность между приборами, они не обеспечивают полной фазовой когерентности.

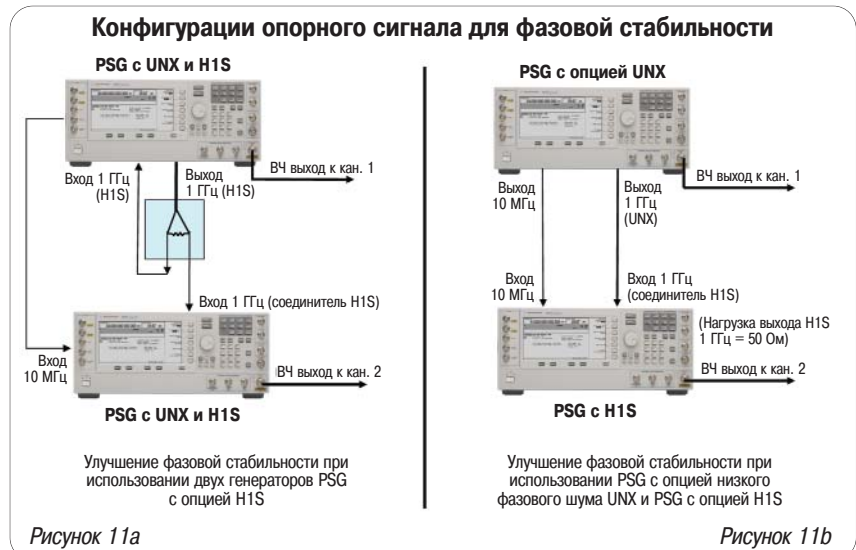


Рисунок 11 - Опции H1S, H1G и UNX генератора PSG позволяют улучшить фазовую стабильность между приборами с помощью синхронизации опорным сигналом с частотой 1 ГГц.



Рисунок 12 - Сравнение фазового дрейфа генераторов PSG с синхронизацией опорным сигналом с частотой 10 МГц и опорным сигналом с частотой 1 ГГц (опция H1S).

*ВЧ векторный генератор  
сигналов N5182A серии MXG  
компании Agilent*



Генератор N5182 отличается высокой скоростью переключения частоты, уровня мощности и формы сигнала; высокая мощность выходного сигнала, электронный аттенуатор, высокая надёжность и простота обслуживания – всё это в компактном стоечном корпусе (2RU). Обеспечивает более высокую отдачу от капиталовложений за счёт повышения производительности, объёма и улучшения результатов испытаний, увеличения времени работоспособного состояния и экономии стоечного пространства. Возможность масштабирования рабочих характеристик в ВЧ и модуляционной областях делает векторные генераторы сигналов серии MXG компании Agilent легко конфигурируемым для удовлетворения специфических требований к испытаниям.

- Диапазон частот от 100 кГц до 3 или 6 ГГц
- Время переключения в режиме SCPI  $\leq 1,2$  мс; время одновременного переключения частоты, уровня и формы сигнала в режиме свипирования по списку  $\leq 900$  мкс
- Внутренний генератор модулирующего сигнала (полоса 100 МГц, частота дискретизации до 125 Мвыб/с); только сигналы произвольной формы
- Поддержка когерентных многоканальных конфигураций с помощью опций

**Когерентные генераторы MXG с общим гетеродином (опция 012)**

Генератор серии MXG с опцией 012 представляет средство для когерентной синхронизации нескольких генераторов MXG общим, совместно используемым гетеродином, посредством переключек, расположенных на задней панели прибора. На рисунке 13а показана двухблочная конфигурация. Выход гетеродина ведущего генератора MXG подключается к разветвителю на два направления. Выходы разветвителя затем подключаются к гетеродиным входам каждого прибора. Однако, разветвление выхода гетеродина на более чем два прибора приведёт к слишком большим потерям на возбуждение гетеродиных входов. Для трёх или более MXG потребуется внешний ведущий гетеродин, обеспечивающий достаточный уровень мощности от 0 до 7 дБм (рисунок 13в). В этом сценарии генератор сигналов, используемый как ведущий гетеродин, должен управляться вручную с установкой его частоты эквивалентной желаемой выходной частоте системы. Поскольку генераторы MSG теперь совместно используют общий гетеродин, ВЧ тракты генераторов сигнала теперь полностью когерентны. Однако, необходимо также синхронизировать генераторы модулирующих сигналов в MXG. Здесь первым шагом должен быть запуск этих генераторов в каждом MXG для одновременного начала работы. Для этого используется вход запуска Pattern Trigger. Удобным источником запуска является сигнал Event 1 (рисунок 13). В состоянии по умолчанию генератор MXG посылает положительный перепад сигнала запуска Event 1 в момент начала воспроизведения сигнала. Один MXG должен быть выбран в качестве ведущего, а другие назначены ведомыми. Когда ведущий MXG начинает воспроизведение своего сигнала, он запускает другие MXG на воспроизведение их сигналов. Возможная при этом некоторая задержка запуска будет компенсирована с помощью функции Multi BBG Sync генератора MXG. Однако, для работы этой функции кабель BNC, подключающий выход сигнала запуска Event 1 к входу Pattern Trigger, должен быть не более 30 см длиной (рекомендуется 23 см). Опорный сигнал 10 МГц также должен быть подключён.

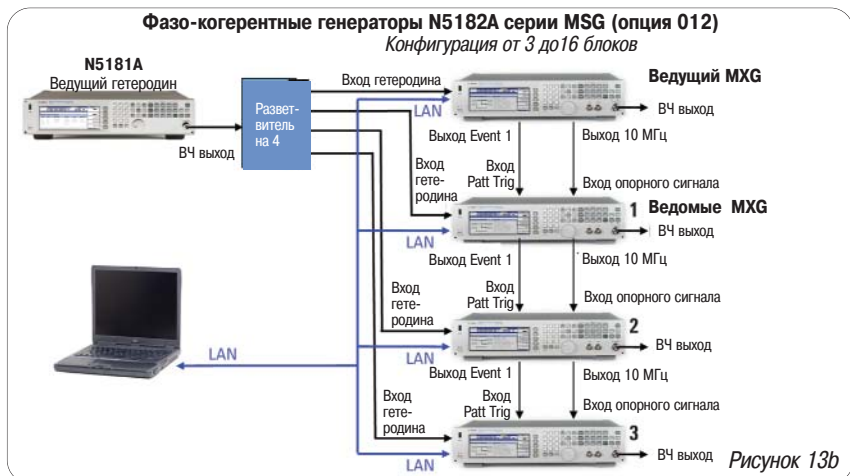
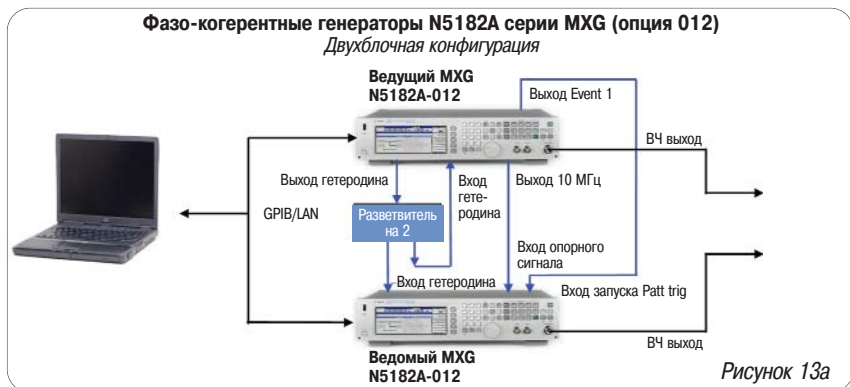


Рисунок 13 - Эти когерентные конфигурации с несколькими генераторами MSG совместно используют общие гетеродины (опция 012).

Когда генератор модулирующего сигнала получает сигнал запуска, он фиксирует его и начинает воспроизведение сигнала по следующему после запуска тактовому импульсу. Поскольку каждый генератор модулирующего сигнала имеет собственное тактирование, моменты начала генерации в каждом MXG будут несколько различаться даже при точном запуске. Это различие, так же как и любое различие, обусловленное задержкой запуска, корректируется с помощью имеющейся в генераторе N5182A серии MXG функции временного выравнивания модулирующего сигнала <sup>1</sup>. Экран установки позволяет сконфигурировать каждый прибор либо как ведущий (Master), либо как ведомый (Slave) (рисунок 14). Функция автоматического выравнивания поддерживает до 16 генераторов MSG – одного ведущего и 15 ведомых. Когда прибор назначается ведомым, запуск сигнала произвольной формы (Arb trigger) автоматически устанавливается внешним (External), а режим запуска – ждущим (Trigger&Run) для ожидания прихода сигнала запуска с выхода Event 1 ведущего MXG. Когда генератор MXG впервые назначается ведомым, может появиться сообщение об ошибке, уведомляющее пользователя об этом изменении; это нормально.

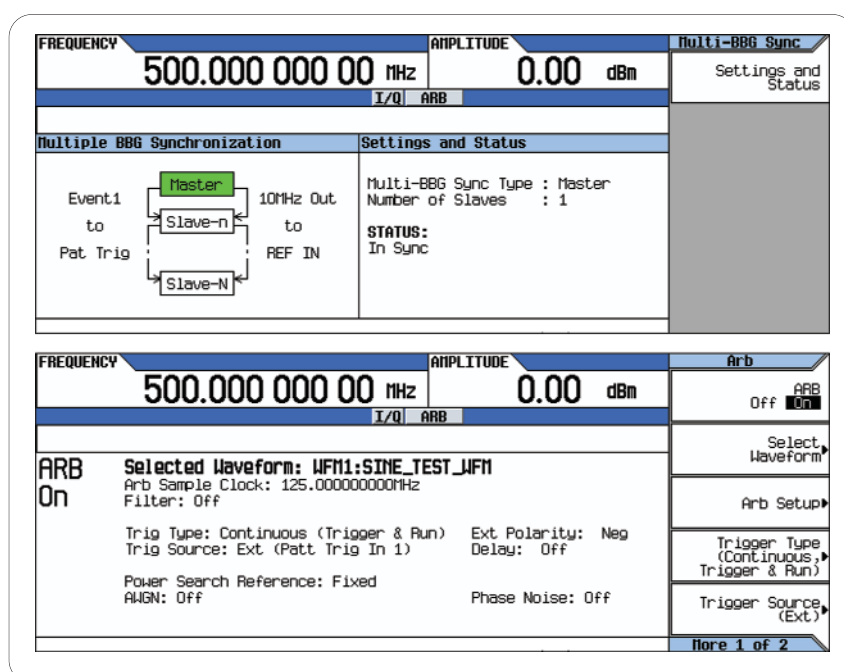


Рисунок 14 - Генератор MXG с опцией 012 имеет функцию синхронизации нескольких генераторов модулирующих сигналов (Multi-BBG Synchronization), которая используется для их временного выравнивания. Один прибор должен быть назначен ведущим, а другие - ведомыми.

1. Функция выравнивания включается выбором [Mode], Dual Arb > Arb Setup > More 1 of 2 > Multi BBG Sync Setup > On.
2. Синхронизация настраивается выбором [I/Q], I/Q Adjustments > Internal Baseband Adjustments > More > I/Q delay. Более подробно о регулировке задержки см. в разделе "I/Q Adjustments" руководства по эксплуатации генераторов сигналов сери MXG компании Agilent.

Функция синхронизации генератора модулирующего сигнала доводит ошибку выравнивания задержки до уровня  $\pm 8$  нс. Если необходимо, эта незначительная задержка может быть в дальнейшем уменьшена до пикосекундного разрешения путём измерения и настройки вручную задержки I/Q составляющих. На рисунке 15 показан пример измерения и выполнения настройки для точного выравнивания с использованием двухканального осциллографа для захвата момента начала двух сложных сигналов, генерируемых двумя когерентными MXG <sup>2</sup>.

Теперь, когда конфигурация с несколькими генераторами MXG полностью настроена и когерентна, может быть необходимо или желательно ввести сдвиг фазы каждого сигнала относительно другого. Например, может потребоваться установить относительную фазу каждого генератора сигналов для имитации проходящего волнового фронта. При наличии векторного генератора сигналов (VSG) это можно сделать с помощью генератора модулирующего сигнала путём модификации фазы генератора сигналов произвольной формы (ГСПФ). Подробности настройки фазирования с помощью сигнала ГСПФ можно найти в следующем подразделе. В генераторе MXG встроенная функция сдвига фазы I/Q составляющих может быть также использована для настройки фазы без изменения файла формы сигнала <sup>1</sup>. Использование этой функции позволяет независимо управлять фазой каждого прибора в системе относительно другого. (Эту функцию не следует путать с функцией настройки фазы аналоговым методом, вызываемой командами Freq > Mode > Adjust phase, которая предназначена для сдвига фазы сигнала MXG при его автономном использовании и не действует на фазовые соотношения между приборами).

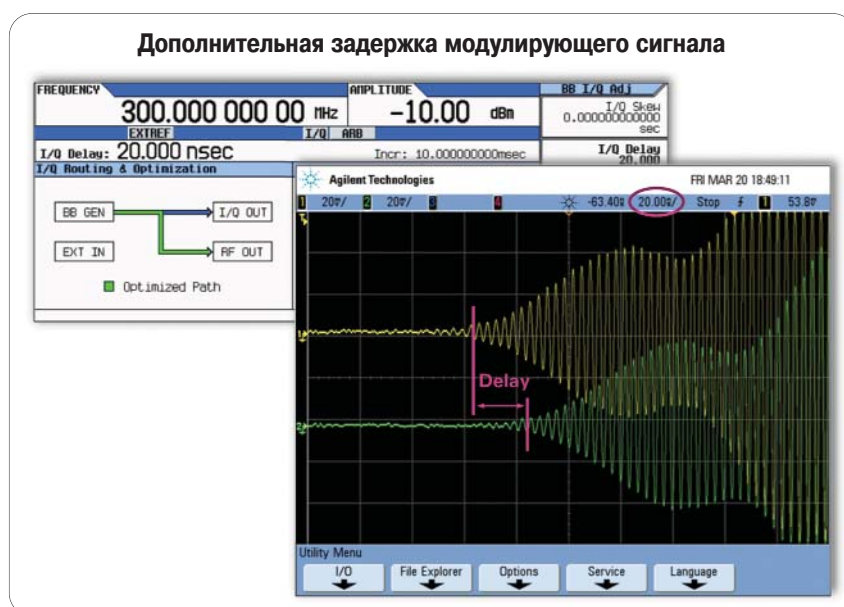


Рисунок 15 - Генератор MSG с опцией 012 имеет функцию синхронизации нескольких генераторов модулирующих сигналов, используемую для выравнивания задержки между ними. Каждый прибор должен быть назначен ведущим или ведомым.

1. Эта функция вызывается последовательностью операций [I/Q], I/Q adjustments > Internal Baseband Adjustments > I/Q phase. Необходимо убедиться, что операция I/Q adjustment включена.

## Когерентные генераторы PSG с общим гетеродином (опция HCC)

Генераторы серии PSG компании Agilent с опцией HCC имеют средства синхронизации нескольких генераторов сигналов серии PSG, для обеспечения фазовой когерентности путём совместного использования гетеродинов, подобно опции 012 в генераторе серии MXG. Опция HCC работает для сигналов с частотами выше 250 МГц и может использоваться на аналоговом (E8257D) и векторном (E8267D) генераторах PSG. Опция HCC закольцовывает тракты сигнала гетеродина, имеющие соединители на задней панели генератора PSG, используя для этого две пары соединителей: одна пара (вход и выход гетеродина) для низкочастотной полосы (от 250 МГц до 3,2 ГГц) и другая пара для высокочастотной полосы (свыше 3,2 ГГц) (рисунок 16).

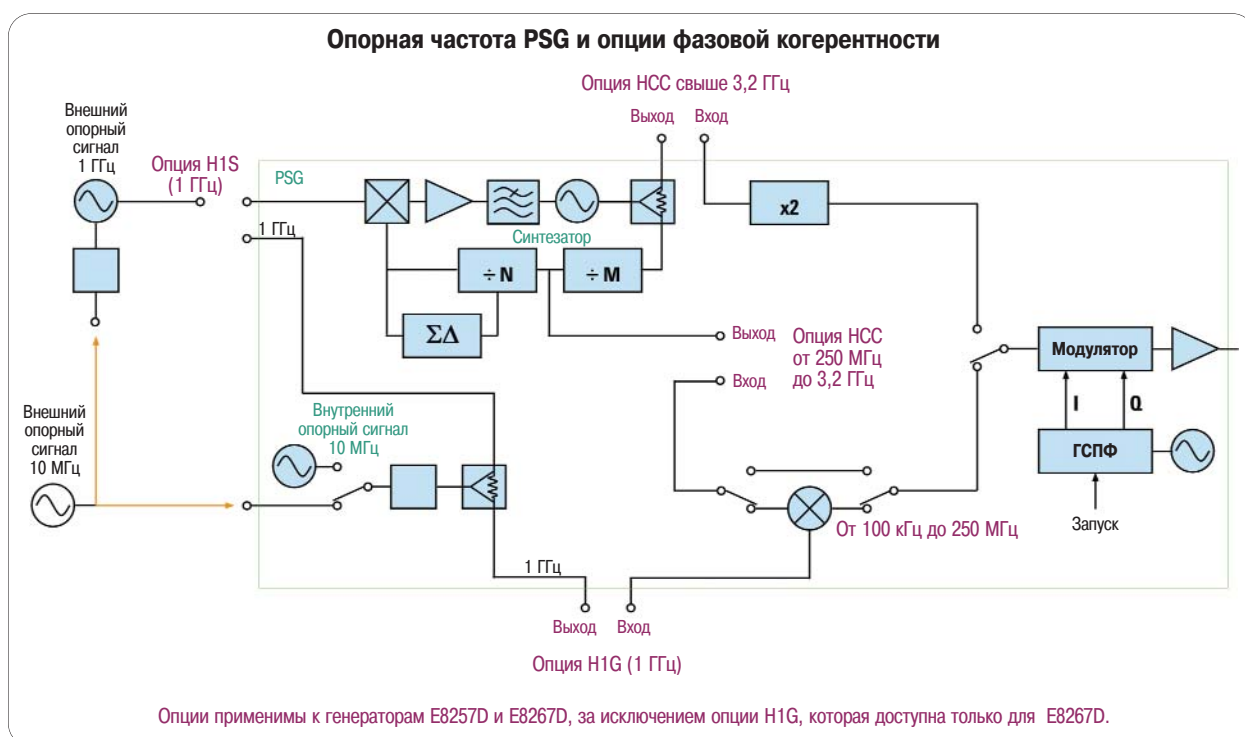


Рисунок 16 - Опция HCC обеспечивает доступ к гетеродинам генераторов PSG с задней панели для трактов низкочастотной и высокочастотной полос. Опции H1S и H1G дают возможность использовать опорный сигнал 1 ГГц.

Система конфигурируется подключением выходов гетеродина от ведущего генератора PSG к распределительному усилителю с последующим распределением сигналов гетеродинов обратно ко входам гетеродина всех генераторов PSG, включая ведущий (рисунок 17). Распределительный усилитель, упоминаемый как "блок синхронизации", необходим для когерентного разветвления и усиления сигналов гетеродина, чтобы обеспечить требуемую мощность на гетеродинных входах; он поставляется компанией Agilent под номером Z5623A. Этот блок может быть сконфигурирован по заказу для поддержки определённого числа приборов и трактов гетеродинных сигналов.

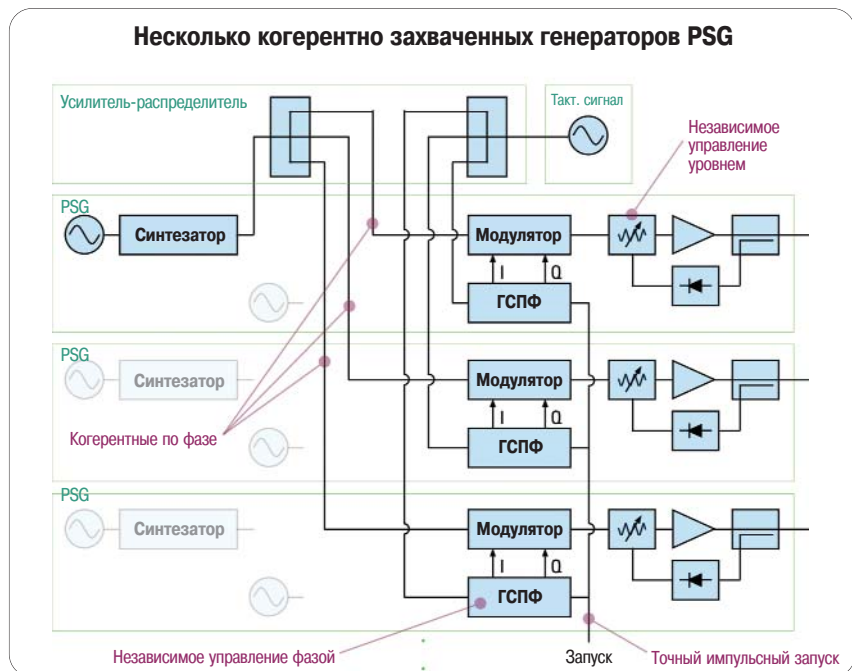


Рисунок 17 - Упрощенная структурная схема когерентно захваченных и синхронизированных векторных генераторов сигналов серии PSG.

Эта конфигурация обеспечивает когерентность генераторов PSG. Для аналогового генератора PSG (или векторного PSG, используемого в аналоговом режиме), сигналы будут когерентны со статическим сдвигом фазы или статической задержкой между ними, обусловленной различием задержек в трактах приборов. Здесь нет встроенных средств для корректировки фиксированной задержки или фазового сдвига между аналоговыми приборами. В векторном генераторе PSG генераторы модулирующего сигнала могут быть использованы для управления фазой и временной задержкой между приборами, так же как и для генерации сложных когерентных сигналов. Однако, прежде всего генераторы модулирующего сигнала должны быть выровнены по задержкам и синхронизированы. Векторные генераторы PSG синхронизированы благодаря одновременному запуску генераторов модулирующих сигналов по входу запуска Pattern Trigger, как было описано для генераторов серии MXG. Запуски генераторов модулирующих сигналов для всех ведомых приборов (и для ведущего, если для него используется отдельный источник запуска) должны быть установлены в ждущий режим ("trigger and run") и режим внешнего запуска ("ext"), так чтобы они начали воспроизведение сигналов по событию запуска <sup>1</sup>.

Для удобства сигнал запуска Event 1 ведущего PSG может использоваться как ведущий запуск для всех ведомых. По умолчанию выход запуска Event 1 будет выдавать сигнал запуска в момент начала воспроизведения сигнала. Следовательно, когда ведущий PSG начинает воспроизведение сигнала, выдаётся сигнал запуска Event 1 и одновременно запускаются ведомые генераторы PSG. Однако, из-за задержки сигнала запуска Event 1 (типично около 50 нс) воспроизводимые сигналы не будут полностью выровнены во времени без применения других коррекций. Генератор PSG не обладает свойством автоматической установки синхронизации нескольких генераторов модулирующих сигналов, как генератор MXG. Поэтому для одновременного запуска всех генераторов PSG рекомендуется использовать отдельный внешний источник запуска с одинаковыми длинами соединительных кабелей к каждому генератору.

1. Это может быть сделано следующей последовательностью установок: [Mode] Dual Arb > Trigger Type > Continuous > Trigger and Run; [Mode] Dual Arb > Trigger Source > Ext.

### Генератор сигналов произвольной формы N8241A компании Agilent



Генератор сигналов произвольной формы N8241A компании Agilent сочетает беспрецедентные рабочие характеристики генераторов этого типа компании Agilent с непревзойдённой гибкостью масштабируемых модулей. Высокие частоты дискретизации 1,25 Гвыб/с или 625 Мвыб/с и высокое разрешение по амплитуде позволяют создавать идеальные формы сигналов для точных испытаний РЛС, спутниковых систем, цифровых систем связи и систем с быстрой перестройкой частоты.

- Соответствие классу А стандарта LXI
- Разрешение по амплитуде 15 бит при частоте дискретизации 1,25 Гвыб/с
- Опциональные возможности динамического формирования последовательностей прямого цифрового синтеза (DDS)
- Двухканальный, несимметричный и дифференциальный выходы с аналоговой полосой пропускания каждого канала 500 или 250 МГц
- Совместимость с векторным генератором сигналов E8267D серии PSG для генерации сигналов с полосой 1 ГГц при несущей частоте до 44 ГГц

Хотя приборы запускаются одновременно, всё же остаётся некоторая ошибка выравнивания между генераторами модулирующих сигналов, если их тактовые частоты не синхронизированы. Объяснение этого было дано ранее в подразделах “Подходы к решению проблем когерентности” и “Когерентные генераторы серии MXG с общим гетеродином (опция 012)”. В отличие от MXG, генератор серии PSG не имеет функции синхронизации встроенного генератора модулирующего сигнала. Однако, этот генератор в PSG позволяет использовать внешний источник тактового сигнала, чтобы обеспечить возможность выравнивания моментов взятия выборок. Внешний тактовый сигнал должен быть непрерывным (CW) с частотой от 200 до 400 МГц и уровнем в пределах от 0 до 6 дБм. Генератор PSG для тактирования генератора модулирующего сигнала использует передискретизацию с коэффициентом 4. Например, при частоте тактового сигнала 400 МГц частота дискретизации будет 100 Мвыб/с.

Поскольку теперь генераторы PSG совместно используют общий тактовый сигнал для всех генераторов модулирующих сигналов, взятие выборок для них будет происходить одновременно по сигналу запуска и будет полностью синхронным и выровненным за одним исключением. Это исключение приходится делать из-за интерполяции выборочных точек сигнала в передискретизированные точки. Поскольку PSG использует четырёхкратную передискретизацию, каждая выборочная точка преобразуется в несколько передискретизированных точек. Это может происходить в каждом PSG не обязательно согласованно между приборами, в результате чего могут появляться небольшие ошибки выравнивания, равные периоду тактового сигнала (или периоду учетверённой частоты дискретизации). Так, при полной частоте дискретизации 100 Мвыб/с ошибка может достигать 2,5 нс. Эти ошибки будут изменять моменты начала генерации сигналов в каждом приборе. В настоящее время имеется только один способ скорректировать этот сдвиг во времени - метод проб и ошибок - используя неоднократный перезапуск сигнала или функцию “Align DACs”, пока сигналы не будут выровнены.

Теперь, когда конфигурация с несколькими PSG полностью выровнена и когерентна, может оказаться необходимым или желательным ввести сдвиг фазы сигналов относительно друг друга. Это можно сделать путём модификации файлов модулирующих сигналов. Описание этой процедуры приведено ниже.

### Когерентные генераторы серии PSG с общим гетеродином (опции HCC, 016) и синхронизированным внешним ГСПФ (N8241A)

Когерентный генератор серии PSG (E8267D) с внутренним генератором модулирующего сигнала произвольной формы обеспечивает полосу частот до 80 МГц. Если требуется более широкая полоса, генератор PSG может быть сконфигурирован с опцией 016 для работы с широкополосным ГСПФ N6030A или N8241A, что позволит получить ширину полосы до 1 ГГц на частотах от 3,2 до 44 ГГц. Для этого случая сигналы гетеродинов генератора PSG должны быть распределены и сконфигурированы, как описано выше. Временные задержки широкополосных ГСПФ тоже должны быть выровнены, а сами ГСПФ синхронизированы. Это делается путём использования выхода сигнала запуска Marker Out 2 одного из ГСПФ в качестве ведущего для одновременного запуска воспроизведения сигналов всеми ГСПФ, и совместного использования общего тактового сигнала для генераторов модулирующих сигналов. Поскольку каждый из генераторов N6030A и N8241A имеют два канала для квадратурных составляющих – один для I, другой для Q – тактовый сигнал для обоих каналов должен быть общим. В остальном система должна быть сконфигурирована таким же образом, как стандартный PSG с внешним широкополосным ГСПФ – подключением дифференциальных выходов каналов одного или двух ГСПФ к дифференциальным I и Q входам, расположенным на задней панели векторного генератора PSG с опцией 016. Полная схема соединений в конфигурации для двух генераторов PSG и двух широкополосных ГСПФ показана на рисунке 18.

Для сигналов с полосой 1 ГГц на частотах ниже 3,2 ГГц требуется опция H18 и дополнительный понижающий преобразователь частоты к генератору PSG для вторичного преобразования широкополосных сигналов на частоты ниже 3,2 ГГц. Однако, поскольку опция H18 понижающего преобразователя использует отдельный гетеродин, система не будет полностью когерентной, но будет фазо-стабильной.

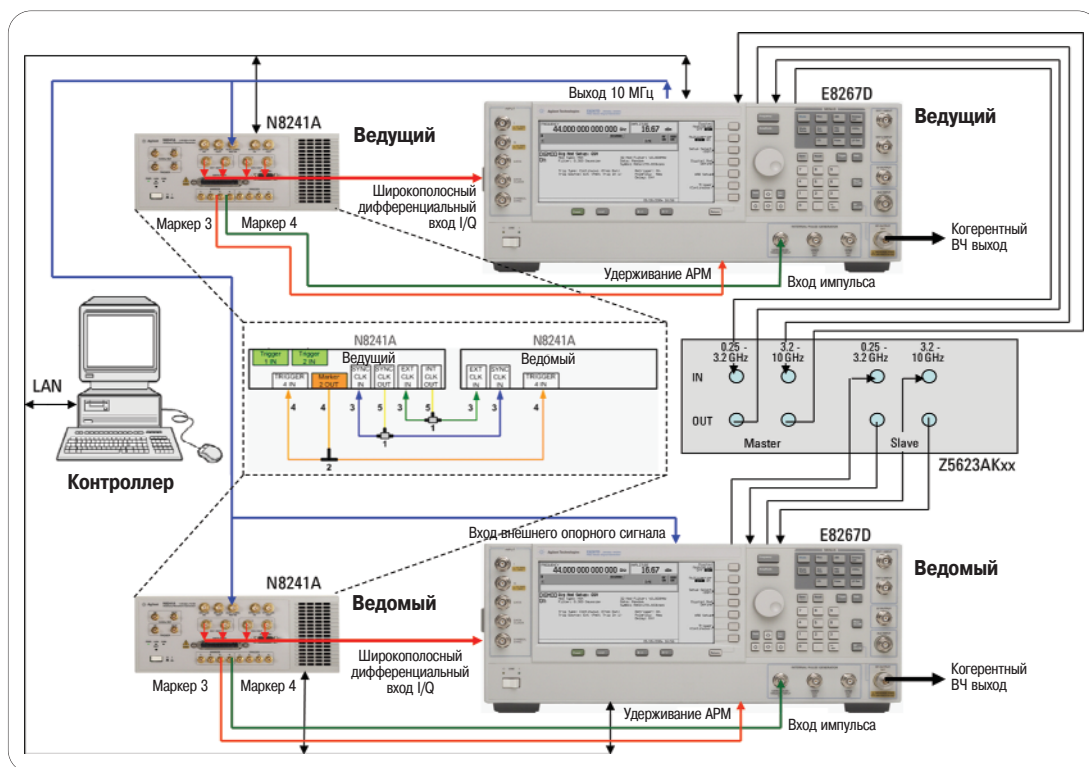


Рисунок 18 - Здесь показаны соединения для двух когерентных широкополосных векторных генераторов, где используются генераторы сигналов E8267D серии PSG и внешние генераторы сигналов произвольной формы N8241A.

### Одноканальный или многоканальный когерентный имитатор сигнала Z2090B-3xx

Система многоканального когерентного имитатора сигнала Z2090B поставляется компанией Agilent как готовое к использованию техническое решение. Z2090B разработана по заказу на основании требований заказчика и может быть сконфигурирована в вариантах с двумя или более генераторами сигналов серии PSG и широкополосными генераторами сигналов произвольной формы.

## Модификация файла генератора модулирующего сигнала произвольной формы для добавления фазового сдвига

Векторный генератор сигналов (VSG) – очень гибкое инструментальное средство для создания сигналов. В когерентных многоканальных системах гибкость генератора сигналов произвольной формы может быть использована для создания требуемого фазового сдвига между сигналами. В этом подразделе обсуждается модификация файла формы сигнала с целью получения фазового сдвига между двумя файлами сигналов.

Файл сигнала содержит пары данных квадратурных (I/Q) составляющих, которые представляют уровни напряжения действительной и мнимой частей сигнала в отсчётных точках временной области. Этот сигнал может быть представлен в комплексной форме:

$$A = I + jQ$$

Здесь I и Q – массивы уровней напряжения.

В этом случае модуль комплексного сигнала равен  $|A| = \sqrt{I^2 + Q^2}$

Фаза сигнала равна  $\theta = \arctg(I/Q)$

Сигнал может быть представлен в полярных координатах в виде:

$$A = |A| (\cos \theta + j \sin \theta)$$

Фазовый сдвиг  $\varphi$  может быть добавлен путём следующей модификации приведённого выше выражения:

$$A = |A| (\cos (\theta + \varphi) + j \sin (\theta + \varphi))$$

Математически это может быть сделано для всех I/Q точек путём умножения:

$$|A| (\cos (\theta + j \sin \theta) \times (\cos \varphi + j \sin \varphi))$$

Полученный в результате файл формы сигнала может быть затем преобразован обратно к виду  $A' = I' + jQ'$  по формулам:

$$I' = |A'| \cos \theta'$$

$$Q' = |A'| \sin \theta'$$

Если амплитуда  $|A'|$  должна оставаться равной исходному значению  $|A|$ , может потребоваться её масштабирование.

Полученные в результате значения пар I' и Q' могут быть загружены обратно в генератор модулирующего сигнала или в генератор сигнала произвольной формы. Эти вычисления могут быть легко выполнены с помощью такого средства как MATLAB®. Данные формы сигнала могут быть легко загружены в генератор MXG или PSG с помощью предоставляемой компанией Agilent вспомогательной загрузочной программы, доступной на сайте по ссылке: [www.agilent.com/find/psg](http://www.agilent.com/find/psg).

## Выбор системы, наиболее полно отвечающей требованиям пользователя

При выборе системы следует задаться вопросом: какая система достаточна для потребностей пользователя. Требуется ли когерентная система, система с регулируемой фазой или просто фазо-стабильная система? Необходима ли конфигурация на основе генератора серии PSG или достаточно более экономичной системы с генератором серии MXG?

Ответ на эти вопросы зависит от многих факторов, и не самым последним из них являются требования к характеристикам разрабатываемой и испытываемой системы. Другими факторами могут быть особенности технологии, с которой работает пользователь, и виды выполняемых испытаний или имитационных проверок. Если невозможно дать полный ответ на эти вопросы, ниже приводятся некоторые общие случаи применения и предлагаемые конфигурации системы.

Предполагаемое применение	Предлагаемая конфигурация
Простые стимулы для приёмника MIMO	Генераторы MXG с синхронизированным опорным сигналом 10 МГц
Верификация алгоритма оценки канала приёмника MIMO	Когерентные генераторы MXG с опцией 012
Имитация сигналов для оборудования определения направления	Когерентные генераторы PSG с опциями HCC и UNX
Гетеродины для испытания многокаскадных когерентных преобразователей в оборудовании военного назначения высокого класса	Генератор PSG с опциями H1S и UNX
Формирование диаграммы направленности РЛС	Когерентные генераторы PSG с опциями HCC и UNX
Формирование диаграммы направленности коммерческих систем SDMA	Когерентные генераторы MXG с опцией 012 или фазо-стабильные PSG с опцией H1S
Имитация сигналов коммерческих разнесённых коммутируемых систем	Генераторы MXG с синхронизированным опорным сигналом 10 МГц
Имитация сигналов разнесённых коммутируемых систем военного назначения	Генератор PSG с опциями H1S и UNX
Разработка алгоритма автоматического цифрового выравнивателя задержки (DADE) применительно к разнесённым системам	Генераторы MXG с опцией 012

## Заключение

В связи с тем, что многоканальные системы получают всё более широкое распространение, необходимость точного и эффективного создания испытательных сигналов для проведения экспериментов с такими системами приобретает всё более важное значение.

В этих заметках по применению обсуждались проблемы испытаний многоканальных систем и причины, по которым необходимы когерентные системы. В общих чертах были обрисованы основные различия между фазо-стабильными источниками, фазо-когерентными системами и когерентными системами с регулируемой фазой.

Здесь было представлено несколько технических решений, предлагаемых компанией Agilent, включая: генераторы сигналов с синхронизированным опорным сигналом с частотой 10 МГц и 1 ГГц; генераторы сигналов, совместно использующие общие гетеродины, и векторные генераторы сигналов, использующие синхронизированные генераторы модулирующих сигналов для управления фазой.

Было также предложено несколько конфигураций испытательных систем для различных применений.

Для получения более подробной информации о приборах, наиболее соответствующих потребностям пользователя, рекомендуется обратиться в местное представительство компании Agilent.



### Agilent Email Updates

[www.agilent.com/find/emailupdates](http://www.agilent.com/find/emailupdates)

По этому адресу Вы можете получить новейшую информацию по интересующим продуктам и особенностям их применения.



[www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

LXI является преемником шины GPIB. Построенная на базе стандарта локальной сети (LAN), LXI обеспечивает более высокое быстродействие и более эффективные возможности подключения. Компания Agilent является членом-учредителем консорциума LXI.



Услуги по техническому обслуживанию компании Agilent позволяют успешно эксплуатировать оборудование в течение всего срока службы. Мы делимся с Вами опытом измерений и обслуживания, помогая создавать продукты, изменяющие наш мир. Для поддержания Вашей конкурентоспособности мы постоянно совершенствуем инструменты и технологии, ускоряющие калибровку и ремонт, снижающие эксплуатационные расходы и позволяющие быть всегда впереди.

[www.agilent.com/find/advantageservices](http://www.agilent.com/find/advantageservices)

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

[www.agilent.com/find/AD](http://www.agilent.com/find/AD)

Для получения дополнительной информации по контрольно-измерительным решениям Agilent Technologies, пожалуйста, обращайтесь в Российское отделение компании Agilent Technologies по адресу:

**Россия, 115054, Москва,  
Космодамианская набережная,  
д. 52, стр. 1  
Тел: +7 (495) 7973954,  
8 800 500 9286 (звонок по России  
бесплатный)  
Факс: +7 (495) 7973902,  
+7 (495) 7973901**

**E-mail: [tmo\\_russia@agilent.com](mailto:tmo_russia@agilent.com)**

или посетите нашу страницу в сети Internet по адресу: [www.agilent.ru](http://www.agilent.ru)

**Сервисный Центр  
Agilent Technologies в России**

**Россия, 115054, Москва,  
Космодамианская набережная,  
д. 52, стр. 1  
Тел.: +7 (495) 7973930  
Факс: +7 (495) 7973901  
E-mail: [russia.ssu@agilent.com](mailto:russia.ssu@agilent.com)**

Технические характеристики и описания изделий, содержащиеся в данном документе, могут быть изменены без предварительного уведомления.

© Авторское право Agilent Technologies, Inc. 2010

Отпечатано в России в апреле 2012 года

**Номер публикации 5990-5442RURU**

MATLAB® является зарегистрированным в США товарным знаком компании The Math Works, Inc.



**Agilent Technologies**