

# Keysight Technologies

Выбор генератора сигналов для  
тестирования с учетом требований  
к фазовому шуму

Рекомендации  
по применению

## Введение

Характеристики уровня фазового шума генератора ВЧ или СВЧ сигналов часто является решающим фактором при определении соответствия генератора требованиям приложения. Например, она имеет важное значение при тестировании сложных систем, таких как доплеровские РЛС или программно-определяемые радиостанции (SDR). Низкие значения фазового шума также очень важны при использовании генератора сигналов вместо гетеродина или при тестировании АЦП.

При оценке возможности использования генератора сигналов в таких приложениях следует обратить особое внимание на паразитные сигналы, гармоники, широкополосный шум, амплитудный шум и фазовый шум. Отметим, что на характеристики уровня фазовых шумов влияет не только внутренняя архитектура прибора, но и его дополнительные функции и возможности. В этой статье рассмотрены самые распространенные схемы генераторов — с одноконтурной и многоконтурной ФАПЧ. На характеристики уровня фазовых шумов могут влиять цифровая модуляция, импульсный режим работы и синхронизация нескольких приборов.

При проектировании и оценке генератора сигналов производительность по фазовым шумам выбирается исходя из компромисса между стоимостью, скоростью переключения и оптимизацией параметров при разных отстройках от несущей. Для соответствия различным требованиям, в некоторых генераторах сигналов используются не менее двух профилей фазового шума (например, для стандартного и расширенного набора возможностей). В других генераторах характеристика уровня фазового шума оптимизируется для больших или малых отстроек от несущей. Кроме того, предусмотрена возможность избирательного ухудшения характеристики фазового шума и наблюдения за влиянием этого ухудшения на работу тестируемого устройства (ТУ).

Сначала мы обсудим основные причины появления фазового шума и его влияние на результаты тестирования, и только после этого перейдем к выбору архитектуры генератора и оценке альтернативных решений. Затем мы вкратце рассмотрим генераторы сигналов компании Keysight и их встроенные функции, позволяющие улучшить или избирательно ухудшить характеристику фазового шума.

## Основные характеристики: стабильность и шум

При любом обсуждении фазового шума, как правило, рассматривается стабильность частоты сигнала. Долгосрочная стабильность, например, опорного генератора, указывается в часах, днях, месяцах и даже годах. Краткосрочная стабильность связана с изменениями частоты в течение интервалов, не превышающих нескольких секунд. Изменения частоты в течение коротких интервалов существенно влияют на работу систем, выполняющих сложную обработку для извлечения информации из сигнала. В связи с этим особое внимание мы уделим краткосрочной стабильности.

Для описания краткосрочной стабильности чаще всего используют фазовый шум в одной боковой полосе (SSB). Национальный институт стандартов и технологии США (NIST) определяет фазовый шум SSB как отношение плотности мощности при определенной отстройке от несущей к общей мощности сигнала несущей. Этот шум обычно измеряют в полосе шириной 1 Гц, отстоящей от несущей. Единица измерения — дБн/Гц или «децибел к мощности несущей в полосе 1 Гц».

При каждом удвоении частоты несущей уровень фазового шума увеличивается на 6 дБ. При определении характеристик компонентов современных РЛС и систем связи фазовый шум, измеренный на частоте несущей 1 ГГц, может изменяться от -40 дБн/Гц (отстройка не более 1 Гц) до -150 дБн/Гц (отстройка не менее 10 кГц). На частоте несущей 8 ГГц фазовый шум увеличивается на 18 дБ. При таком небольшом фазовом шуме на уровень собственных шумов влияют создаваемый пассивными устройствами широкополосный тепловой шум с плоской характеристикой (белый шум), и фликкер-шум с характеристикой  $1/f$  (розовый шум), который создается активными устройствами и возникает из-за теплового шума при меньших отстройках от несущей. Шумы обоих типов неизбежны, поскольку они присутствуют вдоль всего сигнального тракта, состоящего из измерительного прибора и источника тестируемого сигнала (SUT), и даже в кабелях, соединяющих прибор с этим устройством.

Иногда упускается из вида то, что источником шума может быть усилитель любого типа, используемый в сигнальной цепи. Например, усилитель мощности слабого сигнала несущей добавляет собственный шум к входному сигналу и усиливает входной шум. Шум усилителя, тепловой шум и фликкер-шум определяют форму характеристики фазового шума и теоретический нижний предел измерения фазового шума (рис. 1). Уменьшив эти составляющие, можно уменьшить этот предел.



Рис. 1. Три основных составляющих шума определяют теоретический нижний предел измерения фазового шума.

## Основные характеристики: стабильность и шум (продолжение)

Все указанные факторы влияют на характеристику фазового шума высококачественного генератора сигналов. В качестве главных источников шума можно рассматривать основные элементы блок-схемы прибора (рис. 2). Для отстроек менее 1 ГГц фазовый шум зависит от характеристик опорного генератора, при умножении частоты которого получают частоту несущей. Свой вклад в фазовый шум вносят синтезатор частот, ЖИГ генератор и выходной усилитель при отстройках частоты, соответственно, от 1 до 100 кГц, от 100 кГц до 2 МГц и выше 2 МГц. Четкое понимание влияния каждого источника фазового шума позволит минимизировать и оптимизировать его значение в проектируемой системе, чтобы максимально улучшить ее характеристики.

Фазовый шум SSB аналогового генератора сигналов Keysight E8257D на частоте 10 ГГц

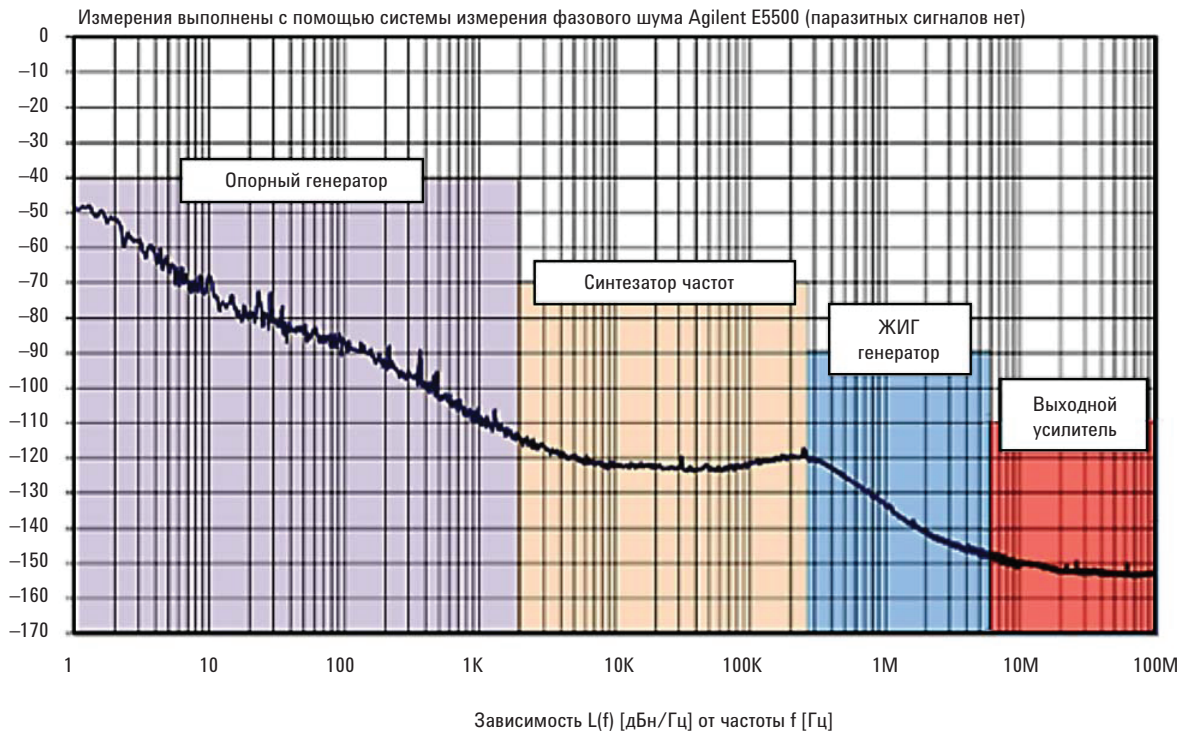


Рис. 2. Вклад основных компонентов блок-схемы генератора внутренней архитектуры генератора сигналов в характеристику фазового шума.

Приведенная выше зависимость показывает, что фазовый шум возрастает при увеличении частоты. Это особенно видно при умножении частоты с помощью внутреннего синтезатора или внешнего устройства. Во многих случаях на характеристику фазового шума влияют небольшие изменения частоты или полосы.

## Схемы генераторов сигналов

Общераспространенными являются две схемы генераторов сигналов: с одноконтурной и многоконтурной ФАПЧ. Применение менее сложной одноконтурной ФАПЧ упрощает проектирование и оптимизацию генератора. Но эта недорогая архитектура требует оптимизации, так как при очень хорошем относительном уровне мощности в соседнем канале (ACPR) одноконтурные синтезаторы частот имеют средние характеристики фазового шума.

Генераторы многоконтурной архитектуры сложнее и дороже. В число дополнительных элементов этих генераторов входят контур точной настройки, контур отстройки или ступенчатого изменения частоты и контур суммирования, каждый из которых снижает уровни паразитных сигналов и значительно улучшает характеристику фазового шума (рис. 3). При наличии определенных органов управления, доступных для пользователя, гибкость регулировки многоконтурного синтезатора частот увеличивается, что облегчает оптимизацию характеристики фазового шума с учетом требований конкретного приложения.

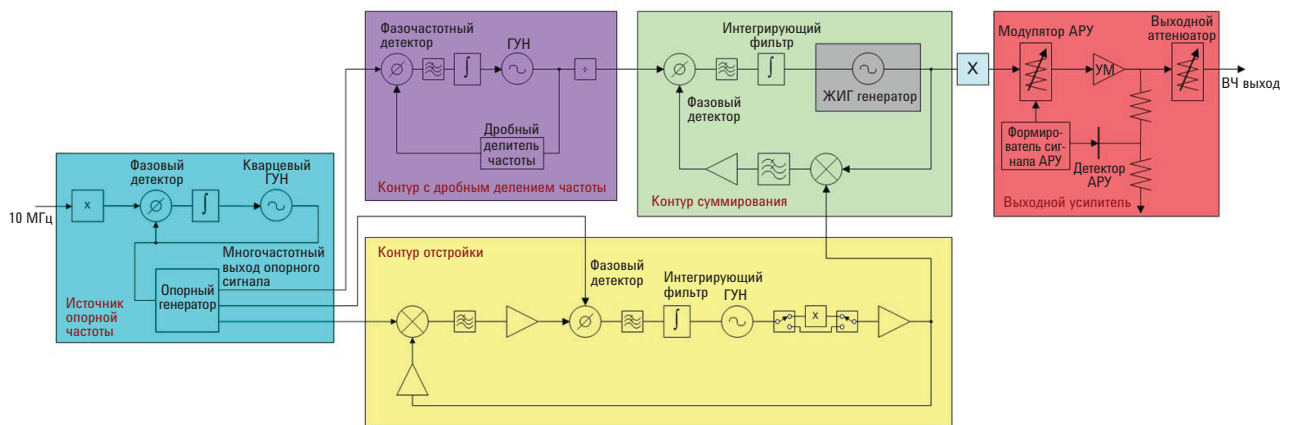


Рис. 3. Трехконтурная архитектура, используемая в генераторах Keysight PSG и MXG, позволяет значительно улучшить характеристику фазового шума.

## Схемы генераторов сигналов (продолжение)

На рис. 4 показаны зависимости фазового шума от частоты отстройки, полученные для трех генераторов сигналов Keysight серии X: EXG, стандартного MXG и MXG с опцией снижения фазового шума UNY. На рисунке видны четкие различия характеристик для одноконтурного генератора серии EXG и многоконтурного генератора серии MXG с опцией снижения фазового шума или без нее.

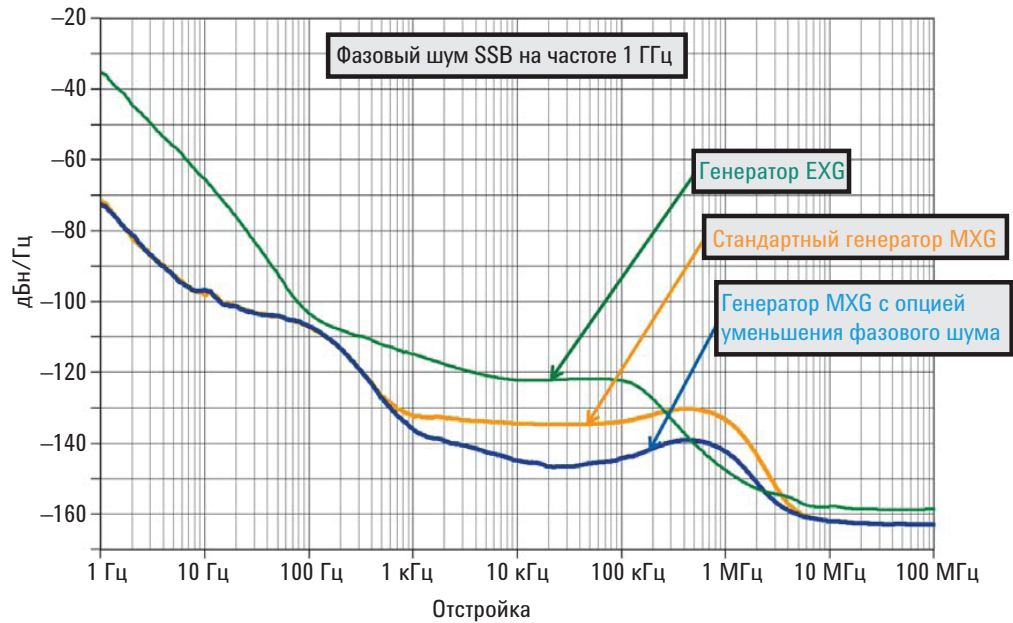


Рис. 4. Одноконтурный генератор EXG подходит для многих приложений, а многоконтурный генератор MXG можно эффективно использовать для более точных измерений.

## Схемы генераторов сигналов (продолжение)

Рассматривая любую архитектуру на более низком уровне, можно оценивать влияние типа гетеродина на характеристики по фазовым шумам. Например, если в синтезаторе частот используется ГУН, а не ЖИГ генератор, то значения фазового шума часто ухудшаются (рис. 5). Это заставляет искать компромисс, поскольку использование в синтезаторах частот ЖИГ генераторов приводит к снижению скоростей переключения по сравнению с синтезаторами на основе ГУН.

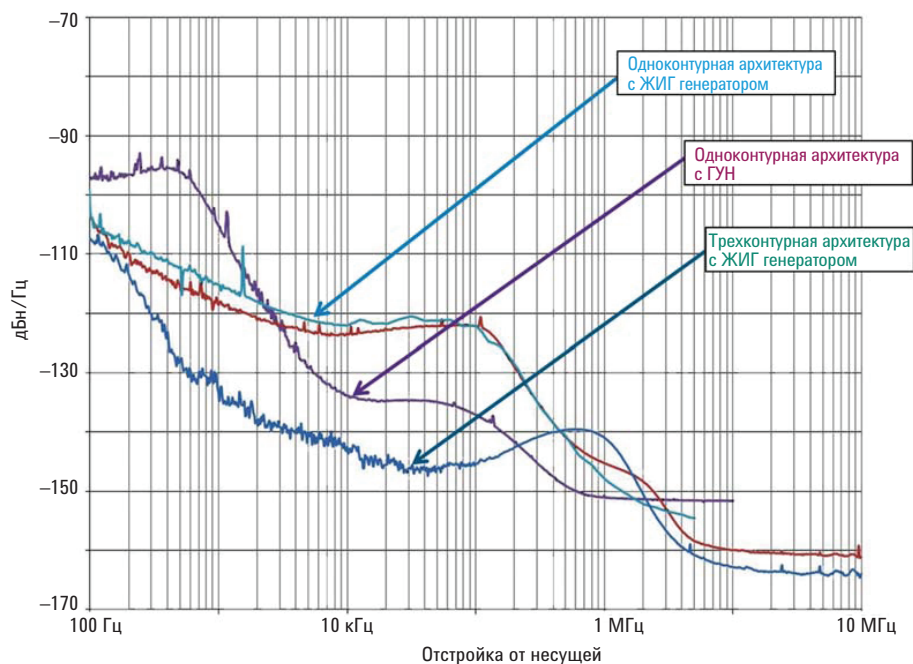


Рис. 5. Комбинация архитектуры и типа гетеродина влияет на общее значение фазового шума, а также на зависимость фазового шума от отстройки и частоты.

Следует особо отметить еще один элемент архитектуры — внутренний или внешний опорный генератор. В генераторе сигналов основное влияние на фазовый шум оказывает шумовая характеристика опорного генератора. Большинство ВЧ и СВЧ генераторов, выбираемых разработчиками схем, имеют стабильный внутренний опорный генератор 10 МГц и предлагают высокостабильный опорный генератор 10 МГц в качестве опции. Большинство генераторов, наиболее распространенных среди пользователей, имеют вход для внешнего опорного генератора 10 МГц.

В генераторах сигналов PSG имеется вход для внешнего опорного генератора 1 ГГц. В режиме работы с внешней опорной частотой 1 ГГц внутренний опорный генератор не используется, чтобы исключить вносимый им фазовый шум.

## Функциональные возможности генераторов сигналов

Современные генераторы ВЧ и СВЧ сигналов имеют множество функциональных возможностей. На базовом уровне выбор делается между генераторами немодулированных (CW) или аналоговых сигналов (возможна аналоговая модуляция) и векторными генераторами сигналов (VSG), в которых может выполняться аналоговая или векторная модуляция. В лаборатории в качестве источника опорного сигнала часто используют высококачественный генератор немодулированных или аналоговых сигналов. Расширенные функциональные возможности векторного генератора сигналов, выполняющего векторную или цифровую модуляцию (например, модуляцию сигналов I и Q), позволяют имитировать сигналы доплеровской РЛС.

VSG может генерировать модулирующие сигналы произвольной формы (AWG) и имеет глубокую внутреннюю память для хранения данных. Некоторые генераторы, такие как векторный генератор сигналов N5182B, также поддерживают симуляцию распространенных сигналов в режиме реального времени. Обычно симуляция выполняется с помощью ПО Signal Studio компании Keysight, которое поддерживает множество приложений:

- Сотовая связь, включая LTE-TDD, LTE-FDD, HSPA, W-CDMA, GSM, EDGE и CDMA2000
- ГНСС — до 32 спутников GPS и ГЛОНАСС в зоне прямой видимости
- DVB-T/H с непрерывной входной последовательностью PN23 и временем воспроизведения видеоданных до 2 часов
- Специальные приложения, такие как AWGN или модуляция 1024QAM
- Изучение влияния аддитивного белого гауссовского шума (AWGN) и фазового шума

На характеристики по фазовым шумам могут влиять цифровые режимы генератора сигналов. При этом характер взаимодействий изменяется и может быть достаточно сложным. Важно иметь подробную информацию о характеристиках любого генератора сигналов и сравнивать значения характеристик с полным набором требований приложения.

## Генераторы сигналов Keysight

В мае 2012 года компания Keysight выпустила четыре новых генератора сигналов серии X с улучшенными характеристиками в области фазового шума, выходной мощностью, относительным уровнем мощности в соседнем канале (ACPR), амплитудой вектора ошибок (EVM) и полосой пропускания. Аналоговые генераторы сигналов EXG N5171B и векторные генераторы сигналов N5172B представляют собой бюджетные решения с синтезатором с одноконтурной ФАПЧ. В аналоговых генераторах сигналов N5181B и векторных генераторах сигналов N5182B используются трехконтурные схемы ФАПЧ (рис. 3), обеспечивающие лучшие в отрасли характеристики фазового шума и ослабление паразитных сигналов.

Фазовый шум в генераторе сигналов MXG снижается за счет использования сетки частот, оптимизированной для трехконтурной топологии. Эта сетка позволяет решать несколько задач: выбор частоты гетеродина и опорной частоты в контурах отстройки и суммирования синтезатора частот, преобразование частоты (смесители и умножители) и фильтрация.

Трехконтурная схема позволяет оптимизировать сетку частот, чтобы гарантировать эффективную фильтрацию нелинейных искажений (например, зеркальный канал) посредством перемещения их за пределы полосы пропускания схем синтезатора частот. В генераторе MXG опорная частота и частота преобразования выбраны так, что нелинейные составляющие высокого уровня отстроены от



## Генераторы сигналов Keysight (продолжение)

желаемых частот, поэтому оставшиеся паразитные сигналы могут быть ослаблены с применением относительно несложной фильтрации. Переход к большим нелинейностям, позволяющий повысить уровни внутренних сигналов, приводит к уменьшению широкополосного шума и увеличению динамического диапазона.

Наличие этих возможностей позволяет использовать генератор MXG при проектировании компонентов и приемников для коммерческих и военных систем связи и РЛС, в которых требуется уменьшить помехи, повысить скорость передачи данных и качество сигналов.

В частности, в современных аэрокосмических и военных системах улучшение характеристик РЛС позволяет обнаруживать слабые сигналы на больших расстояниях. Высококачественные и прецизионные сигналы, необходимые для тестирования проектируемых систем, формируются генератором MXG, имеющим фазовый шум  $-146$  дБн/Гц на частоте  $1$  ГГц при отстройке  $20$  кГц с опцией уменьшения фазового шума UNY (рис. 6). Опция UNY рекомендуется в приложениях для генерации сигналов, например, внешнего гетеродина или сигналов, которые должны быть спектрально чистыми или иметь высокую точность модуляции. При разработке компонентов РЛС, таких как смесители и АЦП, можно использовать генератор MXG, подавляющий паразитные сигналы до уровня  $-96$  дБн на частоте  $1$  ГГц.

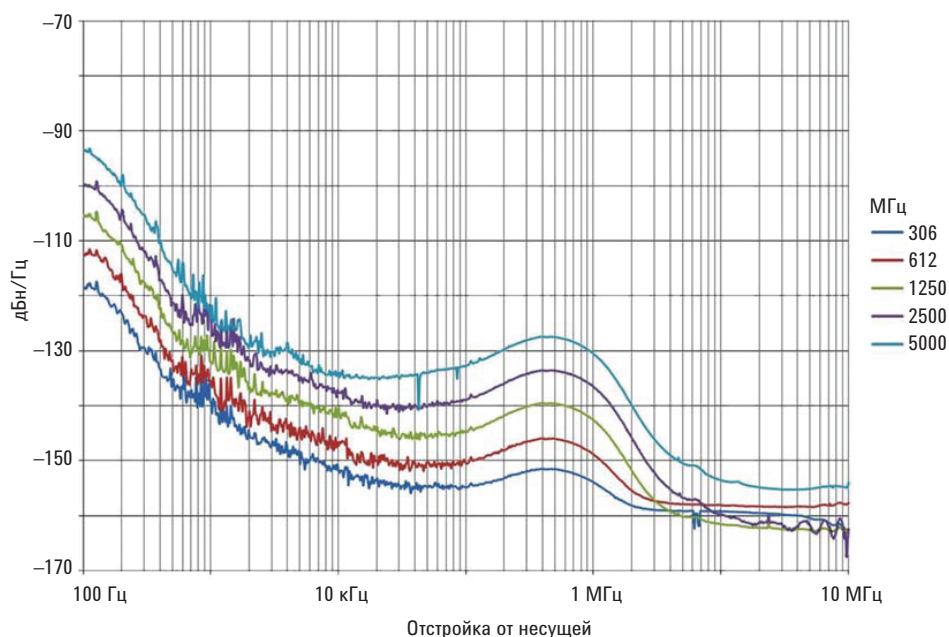


Рис. 6. Опция UNY добавляет в генератор MXG усовершенствованный контур ФАПЧ вместе с малошумящим внутренним опорным генератором. Это снижает фазовый шум при большой и малой отстройках от несущей и обеспечивает превосходные показатели фазовых шумов.

Необходимость передачи большого количества данных и увеличения зон покрытия в приложениях беспроводной связи стимулируют проектирование пользовательских устройств и сетевого оборудования с улучшенными характеристиками. Если вы занимаетесь вопросами повышения скорости потоковой передачи данных в устройствах стандарта 802.11ac и других современных стандартах беспроводной связи, то генератор MXG с установленной на заводе полосой пропускания  $160$  МГц и коррекцией неравномерности АЧХ в режиме реального времени  $\pm 0,2$  дБ — единственное решение для тестирования проектируемых устройств. Для расширения диапазона, ослабления помех и улучшения характеристик компонентов разработчики могут использовать генераторы MXG и EXG, обладающие тремя лучшими в отрасли показателями: низкой амплитудой вектора ошибок (EVM), выходной мощностью до  $+27$  дБм и относительным уровнем мощности в соседнем канале (ACPR) до  $-73$  дБн (тестовая модель 1, W-CDMA, 64 DPCH).

## Оптимизация характеристик уровней фазового шума

Рассмотрим несколько вариантов оптимизации характеристик по фазовым шумам генератора сигналов. Некоторые из них, как показано выше, основаны на выборе архитектуры генератора. Правильное понимание влияния схемотехнического решения очень важно при выборе лучшего генератора для вашего приложения. Также можно выбирать разные методики измерений, настройки приборов, внешние источники опорной частоты и измерительные схемы.

Другая возможность оптимизации основана на использовании доступных для пользователя встроенных регулировок генератора сигналов. Например, приборы Keysight текущего поколения с опцией снижения фазового шума UNY (см. выше) или UNX, позволяют регулировать полосу опорного генератора (иногда называемой полосой пропускания контура). Регулировка полосы пропускания контура выполняется с фиксированными шагами 25, 55, 125, 300 и 650 Гц для внутреннего или внешнего опорного генератора 10 МГц. Опыт показывает, что чем шире полоса пропускания, тем меньше фазовый шум при небольших отстройках от несущей, особенно меньших 100 Гц.

Используя такую регулировку для оптимизации характеристик уровней фазового шума в конкретном приложении, можно гарантировать стабильность частоты и низкий фазовый шум внутреннего или внешнего опорного генератора с учетом функционирования синтезатора частот и изменения отстройки. Внутренний или внешний опорный генератор определяет стабильность и фазовый шум при отстройках, меньших 1 кГц, а синтезатор частот — при отстройках, больших 1 кГц.

Опция UNY включает встроенные делители частоты, позволяющие получать частоты несущей ниже 250 МГц. В этом случае фазовый шум уменьшается на 20 дБ/декада или 6 дБ/октава при всех отстройках для данных частот, а максимальная девиация ЧМ и ФМ уменьшается в соответствии с коэффициентом деления.

После выключения делителей генератор сигналов возвращается в стандартный режим выдачи низких частот с помощью гетеродина. При задании модуляций типа ЧМ или ФМ использование гетеродина позволяет точно регулировать частоту с сохранением полной полосы пропускания. Отметим, что применение смесителя для снижения частоты не приводит к уменьшению фазового шума.

## Введение точных искажений

Очень низкий фазовый шум генератора MXG требуется не всегда. В некоторых приложениях можно вносить фазовый шум, чтобы обеспечить избирательную и точную деградацию сигнала. При проектировании генераторы сигналов часто используются для генерации сложных модулированных ВЧ сигналов или в качестве замены гетеродинов и синтезаторов частот.

В реально используемых устройствах повышение стабильности частоты приводит к удорожанию, увеличению габаритов и потребляемой мощности. Именно поэтому многие схемы создаются по принципу разумной достаточности. Разумной достаточности проще и легче достичь, если обеспечена точная регулировка фазового шума и испытательного сигнала.

В генераторе MXG специализированная ИС, обрабатывающая сигналы в режиме реального времени, изменяет уровни фазовых шумов для немодулированных и модулированных сигналов. Важной инновацией является возможность регулировки фазового шума при различных отстройках от несущей, включая крутую АЧХ шума при малой отстройке, плоскую АЧХ шума при большой отстройке и пологую АЧХ шума при очень большой отстройке.

Возможность введения точно заданного шума позволяет избежать избыточности или недостаточности характеристик проектируемых гетеродинов и синтезаторов. Избыточные характеристики увеличивают стоимость и время проектирования, снижая конкурентоспособность изделий. Недостаточные характеристики могут привести к необходимости повторного проектирования и задержке выпуска изделий.

Рассмотрим для примера сигналы OFDM. Из-за небольшого разноса поднесущие в сигнале OFDM очень чувствительны к фазовому шуму. Это приводит к уменьшению ортогональности (независимости) поднесущих и увеличению коэффициента ошибок модуляции. Следовательно, передатчики и приемники OFDM должны иметь хорошую характеристику фазового шума. Генератор MXG, который избирательно добавляет фазовый шум в соответствии с отстройкой от несущей, используется вместо синтезаторов, а также передатчиков и приемников OFDM, и позволяет оценить возможности использования проектируемого приемника с реальным передатчиком. В результате достигается быстрая и надежная оптимизация характеристик и стоимости проектируемого изделия.





## Выводы

Производительность в области фазового шума часто является решающим фактором при определении соответствия генератора сигналов требованиям приложения. Улучшение характеристики фазового шума зависит от внутренней архитектуры, типа гетеродина, наличия внутреннего и внешнего опорного генераторов и влияния дополнительных встроенных функций. Оптимальное решение выбирается с учетом скорости переключения, цены, а также оптимизации влияния малых и больших отстройек от несущей.

В результате появляется множество вариантов оптимизации значений фазового шума — не меньше, чем способов анализа поведения устройства. Эта концепция — одна из основных идей, реализованных в генераторах сигналов Keysight серии X. С их помощью можно получать различные сигналы — простые и сложные, спектрально чистые и искаженные. Это позволяет выполнять тестирование в номинальном и предельном режимах. Расширенные функциональные возможности генераторов MXG обеспечивают максимально эффективное тестирование различных устройств.

## Литература

- Рекомендации по применению: *Уменьшение фазового шума на ВЧ и СВЧ*, номер документа 5990-7529EN
- Описание изделия: *Генераторы сигналов MXG и EXG серии X*, номер документа 5990-9957EN
- Техническое описание: *Генераторы сигналов MXG и EXG серии X, аналоговый генератор сигналов N5181B и векторный генератор сигналов N5182B*, номер документа 5991-0038EN
- Техническое описание: *Генераторы сигналов MXG и EXG серии X, аналоговый генератор сигналов N5181B и векторный генератор сигналов N5182B*, номер документа 5991-0039EN
- Описание изделия: *Генераторы сигналов PSG*, номер документа 5989-1324EN
- Техническое описание: *Аналоговый генератор СВЧ сигналов PSG E8257D*, номер документа 5989-0698EN
- Техническое описание: *Векторный генератор сигналов PSG E8267D*, номер документа 5989-0697EN
- Техническое описание: *Аналоговый генератор ВЧ сигналов PSG E8663D*, номер документа 5989-4136EN

	<p>myKeysight <a href="http://www.keysight.com/find/mykeysight">www.keysight.com/find/mykeysight</a> Персонализированное представление наиболее важной для Вас информации.</p>	<p>Российское отделение</p>
	<p>Трехлетняя гарантия <a href="http://www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty">www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty</a> Сочетание надежности приборов Keysight с трехлетней гарантией поможет вам в достижении ваших целей: повысит уверенность в безотказной работе, сократит эксплуатационные расходы и предоставит дополнительные удобства.</p>	<p><b>Keysight Technologies</b> 115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3 Тел.: +7 (495) 7973954 8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)</p>
	<p>Планы страхования Keysight <a href="http://www.Keysight.com/find/AssurancePlans">www.Keysight.com/find/AssurancePlans</a> Пятилетняя страховка защитит вас от внеплановых расходов, связанных с ремонтом приборов.</p>	<p>Факс: +7 (495) 7973902 e-mail: <a href="mailto:tmo_russia@keysight.com">tmo_russia@keysight.com</a>  <a href="http://www.keysight.ru">www.keysight.ru</a></p>
	<p><a href="http://www.keysight.com/quality">www.keysight.com/quality</a> Система управления качеством Keysight Electronic Measurement Group сертифицирована DEKRA по ISO 9001:2008</p>	<p>Сервисный Центр Keysight Technologies в России 115054, Москва, Космодамианская наб, 52, стр. 3 Тел.: +7 (495) 7973930 Факс: +7 (495) 7973901 e-mail: <a href="mailto:tmo_russia@keysight.com">tmo_russia@keysight.com</a></p>
	<p>Торговые партнеры компании Keysight <a href="http://www.keysight.com/find/channelpartners">www.keysight.com/find/channelpartners</a> Получите двойную выгоду: богатый опыт и широкий выбор продуктов Keysight в сочетании с удобствами, предлагаемыми торговыми партнерами.</p>	<p>(BP-09-23-14)</p>

[www.keysight.com/find/sa](http://www.keysight.com/find/sa)