

Шумовая головоломка.

Методы измерения фазового шума

Ричард ОВЕРДОРФ (Richard OVERDORF)
Уолт ШУЛЬТ (Walt SCHULTE)

Перевод: Артем ВАХИТОВ
temcat@mail.ru

Процесс отделения полезного сигнала от шумов представляет собой серьезную проблему, с которой сталкиваются многие инженеры, работающие с ВЧ- и СВЧ-оборудованием. Разработчики новейших РЛС и коммуникационных систем часто используют сложную обработку для извлечения максимума информации из слабых или искаженных сигналов.

И основным врагом здесь является, как правило, фазовый шум, ограничивающий характеристики приемной системы. Он, например, уменьшает возможность обработки доплеровского смещения в импульсных РЛС и увеличивает амплитуду вектора ошибки (EVM) в коммуникационных системах с цифровой модуляцией.

Измерение фазового шума часто напоминает головоломку, состоящую из множества хитроумных деталей, которые очень трудно соединить между собой. Даже при наличии современного оборудования и передовых технологий процесс измерения и интерпретации результатов остается до некоторой степени неоднозначным. Чтобы помочь в решении этой головоломки, авторы статьи дают общее представление об источниках фазового шума, а потом описывают три самых распространенных метода измерения и рассказывают, где они применяются.

Основы: стабильность и шумы

В сущности, любой фазовый шум порождается нестабильностью частоты сигнала. Долговременная нестабильность, например, задающего генератора может определяться за часы, дни, месяцы и даже годы. Кратковременная нестабильность определяется изменениями частоты за несколько секунд и менее. Такие кратковременные изменения значительно сильнее влияют на системы, которые используют сложную обработку

для извлечения информации из сигнала. Поэтому мы сосредоточимся на кратковременной нестабильности.

Кратковременную нестабильность можно описать многими способами, но самым распространенным показателем является фазовый шум в одной боковой полосе (SSB). Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) определил фазовый шум SSB как отношение двух показателей мощности: плотности мощности при определенной отстройке по частоте от несущей

и суммарной мощности несущей. Как правило, это измерение выполняется в полосе 1 Гц при отстройке на «f Гц» от несущей и выражается в дБн/Гц или в «децибелах по отношению к мощности несущей в полосе 1 Гц».

Уровень фазового шума однозначно связан с несущей частотой и повышается на 6 дБ при каждом удвоении частоты. В результате при измерении параметров компонентов РЛС и коммуникационных систем фазовый шум несущей 1 ГГц может лежать в диапазоне примерно от -40 дБн/Гц «вблизи несущей» (отстройка 1 Гц и менее) и до -150 дБн/Гц «вдали от несущей» (отстройка 10 кГц и более). При столь низких уровнях большое влияние начинают оказывать два микроскопических физических эффекта: тепловой шум пассивных устройств, который является широкополосным и равномерным (белый шум), и фликкер-шум активных устройств, который имеет форму $1/f$ (розовый шум) и становится больше теплового шума при меньших отстройках от несущей. Оба эти эффекта неизбежны и присутствуют во всем тракте прохождения сигнала: в измерительном приборе, в источнике измеряемого сигнала и даже в кабелях, которые их соединяют.

Другим источником шумов, о котором часто забывают, являются имеющиеся в сигнальном тракте усилители. Хотя основная их задача — повышение мощности слабых сигналов, они добавляют собственные шумы и усиливают входной шум. В результате шум

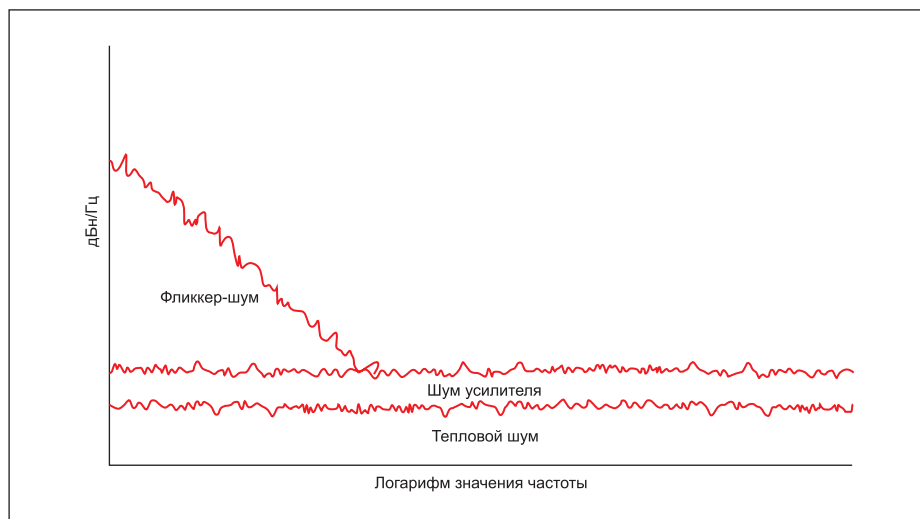


Рис. 1. Три основных компонента шума, определяющие теоретический нижний предел измерения фазового шума

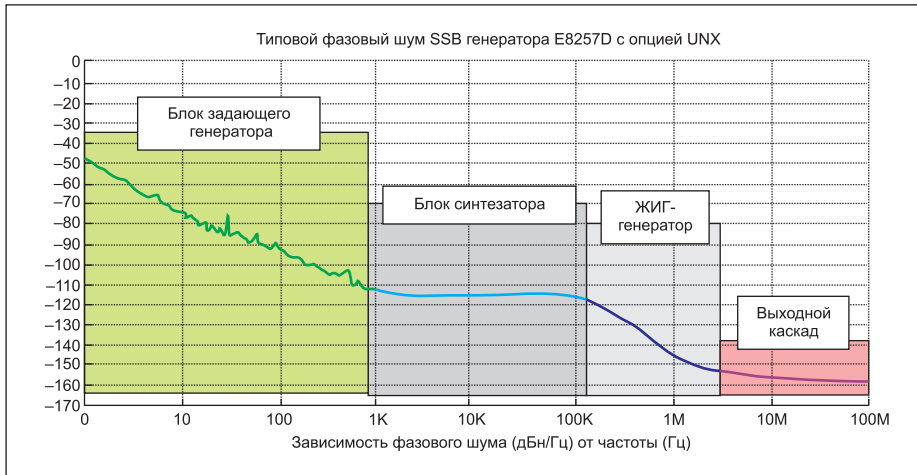


Рис. 2. Составляющие фазового шума генератора сигналов можно проследить до его основных функциональных блоков

усилителя, тепловой шум и фликкер-шум объединяются и придают графику фазового шума характерную форму, а также, что еще важнее, снижают теоретический предел любого измерения фазового шума (рис. 1).

Все эти эффекты присутствуют в фазовом шуме высококачественных генераторов сигналов. Например, источники шумов можно проследить до основных функциональных блоков на структурной схеме прибора (рис. 2). При отстройке менее 1 кГц преобладает шум задающего генератора, частота которого умножается до частоты несущей. Другими основными «вкладчиками» являются: синтезатор при отстройках примерно от 1 до 100 кГц, задающий генератор на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) в диапазоне от 100 кГц до 2 МГц и выходной усилитель при отстройках более 2 МГц. Если правильно учитывать эти эффекты, их можно минимизировать, добившись наилучших характеристик.

Измерения: три подхода

Методы измерения фазового шума эволюционировали с развитием анализаторов спектра. В этом разделе статьи мы рассмотрим три метода, сложность которых простирается от базовой до средней: прямое измерение спектра, метод фазового детектора, перекрестная корреляция двух каналов. В следующем разделе сравниваются измерительные решения, способные реализовать один или несколько из этих методов.

Метод прямого измерения спектра

Это самый старый и, возможно, самый простой метод измерения фазового шума. Источник измеряемого сигнала или тестируемое устройство просто подключают к входу анализатора спектра или сигналов, который настраивают на частоту несущей. Затем измеряют два параметра: спектральную плотность мощности (PSD) шума задающего

генератора при указанной отстройке по частоте и мощность несущей, после чего определяют отношение этих двух значений.

Для получения точных результатов по этому методу приходится применять всевозможные поправки, что вообще характерно для всех простых методов измерения. Например, может потребоваться поправка на шумовую полосу фильтров ПЧ анализатора (RBW). Кроме того, может понадобиться поправка на особенности поведения пикового детектора анализатора, который может показывать заниженное значение мощности шума.

В былые времена все эти поправки делались вручную, и полезную информацию об этом можно почерпнуть из рекомендаций по применению Agilent № 150. Сегодня эти дополнительные шаги уже не нужны, если воспользоваться анализатором сигналов, оснащенным функцией маркера интервала-полосы/интервала-плотности (для измерения PSD), или встроенным приложением для измерения фазового шума.

Впрочем, время и опыт вскрыли потенциальные ограничения этого метода. Большинство из них связано с недостатком качества или несовершенством характеристик анализатора спектра: на результаты измерения может повлиять остаточная ЧМ гетеродина анализатора, боковые полосы шума или фазовый шум анализатора и собственные шумы анализатора. Кроме того, большинство анализаторов спектра измеряют только скалярную амплитуду боковых полос шума источника сигнала. В результате анализатор не может отличить амплитудный шум от фазового. И наконец, процесс усложняется необходимостью измерения шума при каждой интересующей вас отстройке частоты, а на это может уйти очень много времени.

Метод фазового детектора

Для отделения фазового шума от амплитудного можно использовать фазовый детек-

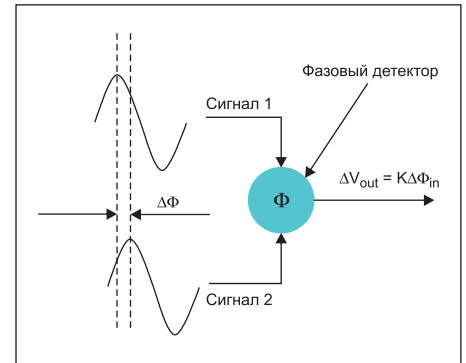


Рис. 3. Базовая концепция фазового детектора, которую можно реализовать многими способами

тор. Как показано на рис. 3, фазовый детектор преобразует разность фаз двух входных сигналов в напряжение на выходе детектора. Если разность фаз равна 90°, напряжение будет равно нулю. Любое отклонение разности фаз от этого значения вызовет соответствующие флуктуации выходного напряжения.

Эта концепция лежит в основе многих распространенных методов измерения фазового шума. Наиболее интересны для нас три из них: метод опорного источника/фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), метод частотного дискриминатора и метод гетеродинного цифрового дискриминатора.

Метод опорного источника/ФАПЧ

Это адаптация метода фазового детектора. В качестве детектора используется кольцевой балансный смеситель, на входы которого подаются опорный и измеряемый сигналы (рис. 4). Опорным сигналом управляют так, чтобы он соответствовал по частоте измеряемому сигналу, но имел сдвиг фаз на 90°. Чтобы обеспечить точное измерение, нужно либо точно знать фазовый шум опорного сигнала, либо он должен быть пренебрежимо малым.

Суммарная частота смесителя подавляется фильтром нижних частот, а разностная частота равна 0 Гц со средним значением амплитуды 0 В (постоянное напряжение). Поверх постоянного напряжения расположены флуктуации, пропорциональные суммарному шуму двух входных сигналов. Этот демодулированный сигнал обычно усиливают малошумящим усилителем и подают на анализатор спектра.

Этот метод обладает наилучшей чувствительностью и самым широким диапазоном отстройки частоты: от 0,1 Гц до 100 МГц. Кроме того, он не чувствителен к шуму АМ, и с его помощью можно отслеживать дрейфующие источники.

Однако при его применении возникают две потенциальные проблемы. Во-первых, источник опорного сигнала должен быть малошумящим и его нужно настраивать электронным способом. Во-вторых, если измеряемый сигнал имеет большую скорость дрейфа,

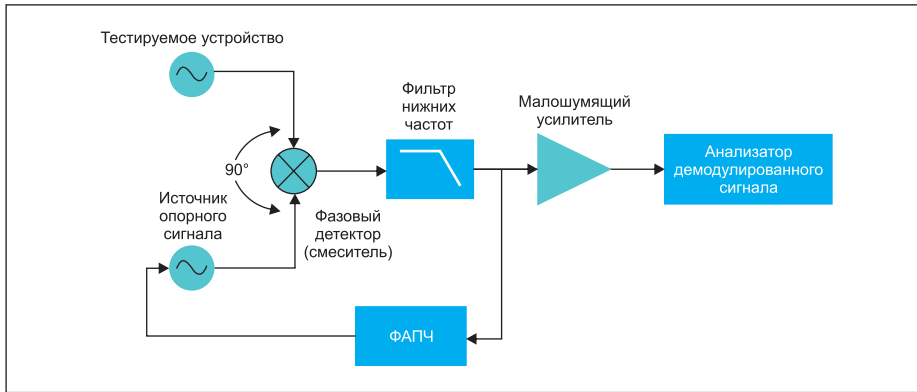


Рис. 4. Метод, в основе которого использование источника опорного сигнала и фазового детектора на кольцевом балансном смесителе

то опорный источник должен иметь возможность перестраиваться в широком диапазоне.

Метод частотного дискриминатора

Чтобы упростить измерительную схему и процесс измерения, в этом методе исключено применение источника опорного сигнала, его заменяют аналоговой линией задержки. Как показано на рис. 5, измеряемый сигнал разделяется на два канала. В одном канале сигнал задерживается по отношению к другому, и линия задержки преобразует изменения частоты в изменения фазы. Настройка линии задержки позволяет добиться сдвига фазы

между двумя входами смесителя на 90°. Далее фазовый детектор преобразует флуктуации фазы в колебания напряжения, которые измеряются как частотный шум анализатором спектра. Затем частотный шум преобразуется в фазовый шум измеряемого сигнала.

Один из недостатков этого метода заключается в пониженной чувствительности измерений, особенно при малых отстройках частоты. Увеличение линии задержки улучшило бы чувствительность, но это может снизить отношение сигнал/шум и ограничить максимальную измеряемую отстройку по частоте. Кроме того, потери, вносимые линией

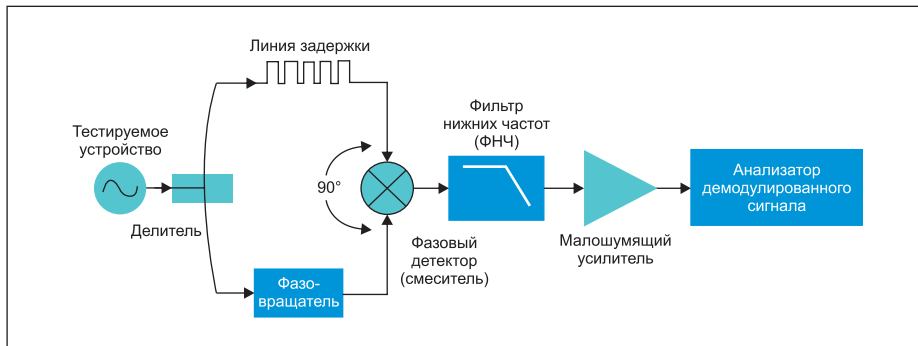


Рис. 5. Разделение измеряемого сигнала и управление им с помощью линии задержки и фазовращателя позволяет обойтись без источника опорного сигнала

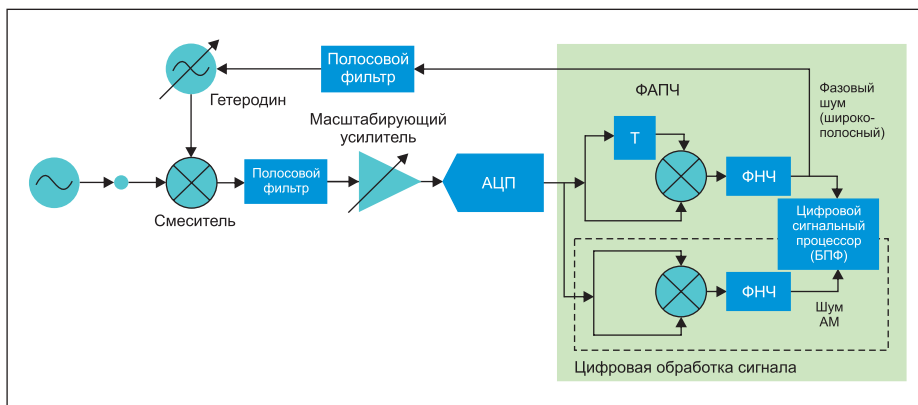


Рис. 6. Цифровые технологии позволяют имитировать аналоговую линию задержки и выполнять точные измерения фазового шума

задержки, могут быть слишком велики при небольшом уровне измеряемого сигнала.

В результате этот метод хорошо работает с несинхронными источниками, такими как LC-генераторы и генераторы с объемным резонатором. Как правило, эти источники создают зашумленные сигналы высокого уровня с низкочастотными фазовыми шумами или с большим уровнем паразитных составляющих вблизи несущей, что может ограничить возможности метода ФАПЧ.

Метод гетеродинного цифрового дискриминатора

Современные технологии позволяют заменить аналоговую линию задержки гетеродинным цифровым дискриминатором. В схеме на рис. 6 измеряемый сигнал преобразуется смесителем и синхронизированным по частоте гетеродином в сигнал промежуточной частоты (ПЧ). Сигнал ПЧ сначала усиливается и оцифровывается, а затем разделяется и задерживается с помощью цифрового сигнального процессора (DSP). Как и в предыдущем методе, задержанная версия сигнала сравнивается с незадержанной версией с помощью цифрового смесителя, а задержку настраивают так, чтобы добиться сдвига фазы на 90°. Выход смесителя фильтруется, чтобы удалить суммарную составляющую и оставить только низкочастотную составляющую, которая обрабатывается для получения значения фазового шума.

Этот метод хорошо подходит для измерения сравнительно больших фазовых шумов, свойственных задающим генераторам и нестабильным источникам сигналов. Он обладает более широким диапазоном измерения, чем метод ФАПЧ, и позволяет обойтись без коммутации линии задержки, используемой в методе частотного дискриминатора. Кроме того, при установке задержки в ноль с помощью гетеродинного метода можно просто и точно измерять шум АМ, не меняя схемы и ВЧ-соединений.

К недостаткам гетеродинного цифрового дискриминатора относится то, что динамический диапазон измерения ограничен малошумящим усилителем и аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Эту проблему решает следующий метод.

Метод перекрестной корреляции двух каналов

При этом подходе используют два дублирующихся канала опорного источника/ФАПЧ внутри измерительного прибора и рассчитывают перекрестную корреляцию между двумя результирующими выходами (рис. 7). Поскольку шум измеряемого сигнала в обоих каналах является когерентным, расчет перекрестной корреляции на него не влияет. В отличие от этого внутренний шум самих каналов не когерентен, поэтому операция перекрестной корреляции уменьшает его в корень квадратный из числа корреляций.

Число корреляций непосредственно определяет время измерения. Как правило, число корреляций выбирает пользователь. Увеличение числа корреляций снижает вклад шума каналов (таблица), но увеличивает время измерения.

Таблица. Снижение уровня некогерентного шума в зависимости от увеличения числа корреляций

Число корреляций	10	100	1000	10 000
Снижение шума, дБ	-5	-10	-15	-20

Поскольку двухканальная методика снижает шум измерения, она обеспечивает превосходную чувствительность, а благодаря применению цифровой обработки сигнала для этого не требуется исключительных характеристик от контрольно-измерительного оборудования. Кроме того, этот метод обладает большим динамическим диапазоном по сравнению с описанным выше методом цифрового дискриминатора.

Благодаря этим преимуществам метод перекрестной корреляции двух каналов особенно удобен для измерения несинхронизируемых задающих генераторов. В общем случае он обеспечивает высокую точность измерения фазовых шумов для многих типов источников сигнала и задающих генераторов.

Сравнение решений для измерения фазового шума

В настоящее время к имеющимся измерительным решениям относятся универсальные анализаторы спектра, специализированные приборы и модульные системы на основе ПК. Основная разница заключается в их возможностях, гибкости и характеристиках, которые определяют минимальную и максимальную отстройку частоты, доступную для данного решения.

Универсальный анализатор спектра или анализатор сигналов, оснащенный опциональным приложением для измерения фазового шума, позволяют реализовать метод прямого измерения спектра. В большинстве случаев приложение автоматически выполняет необходимые измерения шума и несущей, а затем вносит необходимые поправки. Результаты могут быть представлены в виде графика шума в логарифмическом масштабе (зависимость дБн/Гц от логарифма частоты) и в табличной форме, содержащей значения фазового шума при определенных значениях отстройки по частоте. Обычно это решение хорошо работает с малыми отстройками, такими как 10 или 100 Гц, и с большими отстройками порядка 10 МГц.

Реализация более сложных методов фазового детектора или перекрестной корреляции обычно требует применения специализированных автономных или модульных решений. Например, прибор, получивший название анализатора источников сигнала,

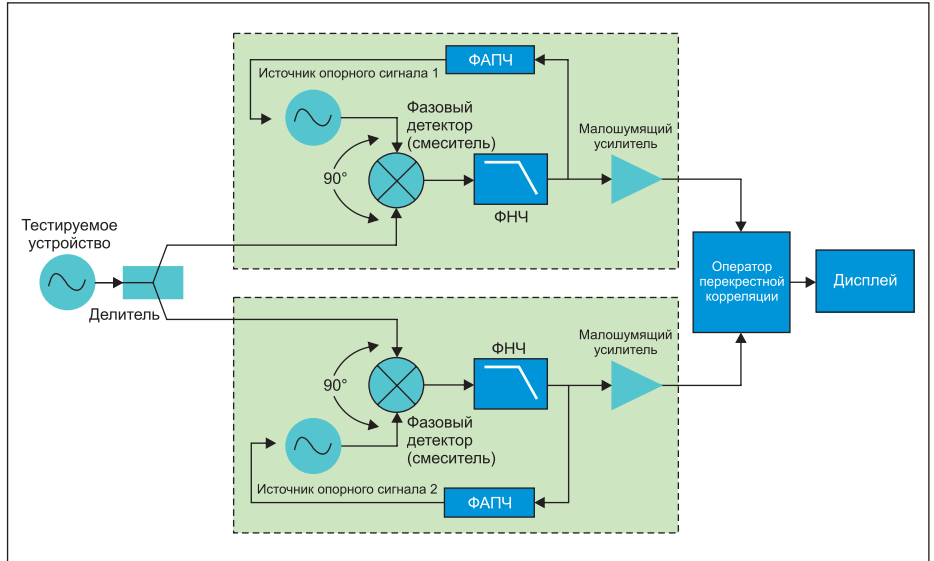


Рис. 7. В методе перекрестной корреляции двух каналов используется два фазовых детектора

представляет собой специализированный автономный прибор, предназначенный для измерения фазового шума и других параметров источника. Уникальный анализатор источников сигнала (SSA) содержит малошумящие опорные источники, обладает чрезвычайно низким уровнем собственных шумов и имеет цифровой сигнальный процессор, необходимый для реализации методов гетеродинного цифрового дискриминатора и перекрестной корреляции двух каналов. Он хорошо справляется с измерениями при таких малых отстройках частоты, как 1 Гц, и таких больших, как 1 ГГц. Кроме того, специализированная направленность прибора означает простоту управления, настройки и калибровки.

Некоторые модульные решения на базе ПК можно настроить на выполнение изме-

рений по методу фазового детектора, например по методу опорного источника/ФАПЧ или методу частотного дискриминатора с аналоговой линией задержки. В конфигурацию включен опорный источник/ФАПЧ, и при использовании высококачественного гетеродина такое решение часто обладает характеристиками и возможностями, необходимыми для измерения очень малых фазовых шумов при отстройке частоты порядка 0,01 Гц. В режиме частотного дискриминатора система может измерять очень малые фазовые шумы при больших отстройках. Впрочем, несмотря на ее гибкость, имеются и некоторые недостатки: настройку и калибровку выполнять сложнее, чем в решениях на основе анализаторов источников сигнала или анализаторов сигналов.

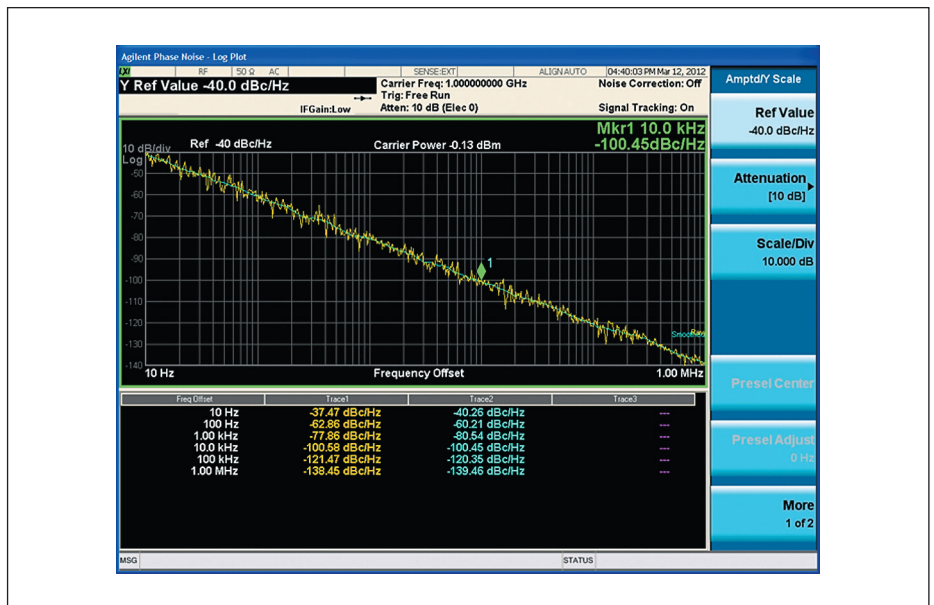


Рис. 8. Однородный испытательный сигнал, который можно использовать для проверки характеристик собственных решений для измерения фазового шума

Проверка собственных решений

Для проверки измерительных схем можно использовать калиброванный сигнал фазового шума. Например, образцовый сигнал пригодится вам — особенно при разработке решений для прямого измерения спектра, которые включают самостоятельно написанные программы, вносящие необходимые поправки. Описанный здесь подход применим к любому методу измерения фазового шума.

Надежный испытательный сигнал можно создать, подавая однородный шум на ЧМ-вход генератора сигналов. Спад боковых

полос шума будет постоянным и равным -20 дБ на декаду. Нужный уровень боковых полос можно получить, меняя девиацию сигнала ЧМ.

Пример, показанный на рис. 8, получен с помощью однородного шума, модулированного с частотой 500 Гц. Это позволило получить фазовый шум -100 дБн/Гц при отстройке частоты на 10 кГц.

Важные уточнения

Фазовый шум является одним из наиболее важных показателей качества ВЧ- и СВЧ-

генераторов. Особенности конструкции этих устройств помогают определить, какие методы и решения лучше всего подходят для точного измерения их фазового шума.

Представленные здесь методы и решения допускают определенные упрощения и наиболее экономически эффективны. И хотя инженеры, не специализирующиеся на измерениях фазового шума, могут получить превосходные результаты на основе этих подходов, возможно, что в некоторых случаях потребуется помощь эксперта для интерпретации результатов, которые могут оказаться весьма неоднозначными. ■