

# Методы измерения фазового шума

*Краткие рекомендации по применению*



Большинству инженеров, работающих в области РЧ- и СВЧ-техники, приходится сталкиваться с такой непростой задачей, как выделение сигналов из шумов. Разработчикам современных радиолокационных систем (РЛС) и систем связи зачастую приходится обрабатывать большие массивы данных, чтобы извлечь максимум информации из слабых или искаженных сигналов.

В результате довольно часто фазовый шум ограничивает рабочие характеристики приёмной системы. Например, фазовый шум снижает возможность обработки доплеровской информации в импульсных РЛС и ухудшает характеристики по модулю вектора ошибки в системах связи с цифровой модуляцией.

Измерение фазового шума часто напоминает пазл с фигурками странной формы, которые трудно соединить вместе. Даже при использовании современных аппаратных средств и усовершенствованных технических приёмов процесс проведения измерений и интерпретации результатов может по-прежнему содержать в себе некоторую загадку. Чтобы помочь разгадать этот пазл, в данных рекомендациях по применению сначала мы дадим базовую информацию по фазовому шуму, а затем опишем три наиболее распространённых метода его измерения и области их применения.



# Основные понятия

## Нестабильность и шум

Любое обсуждение проблемы фазового шума обычно связывается с нестабильностью частоты сигнала. Долговременная нестабильность частоты, предположительно генератора, может быть определена в таких единицах времени, как часы, сутки, месяцы или даже годы. Кратковременная нестабильность характеризует изменения частоты, которые происходят на протяжении нескольких секунд или ещё меньше. Такие изменения частоты с коротким циклом имеют намного большее влияние на системы, в задачу которых входит обработка большого массива данных для извлечения максимума информации из сигнала. Поэтому основное внимание при обсуждении будет посвящено кратковременной нестабильности.

Кратковременную нестабильность можно описать различными способами, но наиболее распространённым является однопослосный (SSB) фазовый шум. Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) определяет однопослосный фазовый

шум как отношение спектральной плотности мощности, измеренной при определённой частотной отстройке от несущей, к полной мощности сигнала несущей. Однополосный фазовый шум наиболее часто измеряется в полосе 1 Гц при частотной отстройке "f". Единицами измерения являются дБн/Гц (децибелы относительно мощности сигнала несущей частоты в полосе 1 Гц).

Уровень фазового шума детерминированно соотносится с несущей частотой, увеличиваясь на 6 дБ при каждом удвоении частоты. При определении характеристик компонентов, входящих в состав современных РЛС и систем связи, измерения фазового шума для несущей частоты 1 ГГц можно распространить от приблизительно -40 дБн/Гц при малых частотных отстройках "вблизи несущей" (1 кГц или меньше) до -150 дБн/Гц при больших отстройках от несущей (10 МГц и больше). Результаты этих измерений будут приблизительно на 18 дБ выше при использовании несущей частоты 8 ГГц.

При таких низких уровнях минимальный измеряемый уровень шума находится под влиянием двух микроскопических

электронных эффектов: теплового шума пассивных устройств, который является широкополосным и равномерным (белый шум), и фликкер-шума активных устройств, имеющего вид  $1/f$  (розовый шум), который возникает из теплового шума на малых отстройках. Присутствие обеих этих составляющих неизбежно, поскольку они всегда присутствуют в тракте сигнала: измерительном приборе, устройстве, которое создаёт испытуемый сигнал (ИС) и даже в кабелях, которые их соединяют.

Ещё одним источником шума, про который иногда забывают, является усилитель любого типа в тракте сигнала. Хотя основное назначение усилителя - это увеличение уровня мощности слабого сигнала несущей, он добавляет свой собственный шум и также усиливает любой шум на входе. В итоге шум усилителя, тепловой и фликкер-шум смешиваются, и график зависимости фазового шума приобретает характерную форму (см. рисунок 1), и, что наиболее важно, ухудшается минимальное теоретически достижимое значение фазового шума при измерениях.

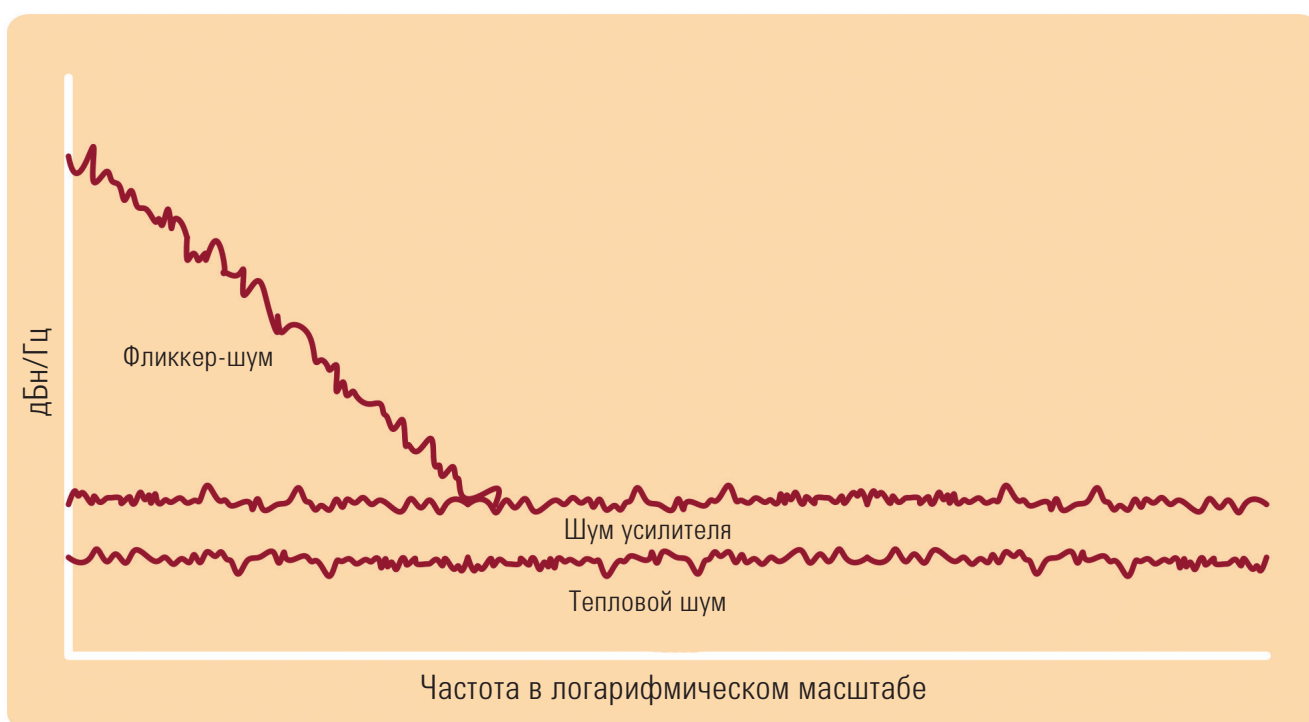


Рисунок 1 - Три основные составляющие образуют теоретический нижний предел измерения уровня фазового шума.

Все эти эффекты обнаруживаются в характеристиках фазового шума высокопроизводительного генератора сигналов. Например, можно выявить скрытые источники шума и сопоставить их с основными блоками структурной схемы прибора (рисунок 2). Для отстроек менее 1 кГц преобладает фазовый шум, определяемый характеристиками генератора опорной частоты, который умножается до несущей частоты.

Другими основными составляющими являются синтезатор при отстройках от 1 кГц до приблизительно 100 кГц, генератор на железо-иттриевом гранате (ЖИГ-генератор) - от 100 кГц до 2 МГц и выходной усилитель - при отстройках выше 2 МГц. Если природа этих эффектов хорошо понятна, их влияние может быть минимизировано в процессе разработки системы с целью достижения максимальных рабочих характеристик.

### Однополосный фазовый шум генератора сигналов E8257D компании Agilent на частоте 10 ГГц

Измерено с использованием системы измерения фазового шума E5500 компании Agilent (без негармонических составляющих)



Рисунок 2 - Составляющие характеристик фазового шума генератора сигналов могут быть отслежены и сопоставлены с основными блоками его внутренней архитектуры.

# Измерения

## Три метода

Методы измерения фазового шума развивались наряду с достижениями в анализе спектра. В данном разделе мы рассмотрим три метода - от простого к сложному: метод прямого измерения спектра, метод фазового детектора и метод двухканальной взаимной корреляции. В следующем разделе сравним технические решения, которые способны реализовать один или более из этих методов.

## Метод прямого измерения спектра

Метод прямого измерения спектра — самый старый и, возможно, самый простой метод измерения фазового шума. Испытуемый сигнал (ИС) или испытуемое устройство (ИУ) просто подключается ко входу анализатора сигналов, например, анализатора сигналов серии PXA компании Agilent, и анализатор затем настраивается на несущую частоту. Затем проводятся два измерения: измеряется мощность несущей и спектральная плотность мощности шума генератора при заданной частоте отстройки, отнесённая к мощности несущей.

Как это часто бывает при использовании простых методов, для обеспечения точности результата измерения требуется применить различные коррекции. Например, может потребоваться коррекция, касающаяся шумовой полосы фильтров, определяющих полосы пропускания анализатора. Кроме того, может потребоваться также коррекция характеристик пикового детектора анализатора, который может занижать фактический уровень мощности шума.

Когда-то такие коррекции необходимо было выполнять вручную. Подробную информацию можно найти в брошюре *Agilent Application Note 150, Spectrum Analyzer Basics (Рекомендации по применению 150 компании Agilent. Основы анализа спектра)*. В настоящее время эти дополнительные шаги уже не обязательны, если используется анализатор сигналов, снабжённый либо функцией маркера плотности мощности в полосе/интервале (Band/Interval Density) (для измерения спектральной плотности мощности), либо встроенными возможностями, такими как прикладная программа измерения фазового шума N9068A компании Agilent для анализаторов сигналов PXA, MXA и EXA.

Время и опыт выявили потенциальные ограничения метода прямого измерения спектра. Большинство из них связано с недостатками качества или рабочих характеристик некоторых анализаторов спектра. Остаточная ЧМ гетеродина анализатора, боковые полосы шума или фазовый шум гетеродина анализатора и уровень собственных шумов анализатора спектра могут в совокупности повлиять на результаты измерения. Кроме того, большинство анализаторов спектра измеряют только скалярную величину боковых полос шума испытуемого сигнала (ИС). В результате анализатор не в состоянии различать амплитудный и фазовый шумы. Наконец, процесс усложняется необходимостью проводить измерения шума на каждой интересующей частоте отстройки, а эта задача может потребовать значительных временных затрат при ручном выполнении.

## Метод фазового детектора

Фазовый детектор может быть использован для отделения фазового шума от амплитудного. Как показано на рисунке 3, фазовый детектор преобразует разность фаз двух входных сигналов в напряжение на его выходе. Когда разность фаз становится равной  $90^\circ$  (квадратура), выходное напряжение будет равно 0 В. Любые отклонения фазы от квадратуры вызовут соответствующие отклонения напряжения на выходе детектора.

Этот принцип лежит в основе нескольких широко применяемых методов измерения фазового шума. Особый интерес представляют три из них: метод опорного источника/ФАПЧ (фазовой автоподстройки частоты), метод частотного дискриминатора и метод гетеродинного цифрового дискриминатора.

## Метод опорного источника/ФАПЧ

Являясь усовершенствованием метода фазового детектора, метод опорного источника /ФАПЧ использует двойной балансный смеситель, используемый в качестве детектора, на входы которого подаются сигнал от опорного источника и испытуемого устройства (ИУ) (рисунок 4). Опорный источник, такой как генератор сигналов серии PSG или MXG компании Agilent, управляется таким образом, что его сигнал имеет такую же несущую частоту, что и сигнал ИУ, но с квадратурным сдвигом фазы (номинально  $90^\circ$ ). Для обеспечения точности измерения сигнала ИУ фазовый шум опорного источника должен быть либо пренебрежимо малым, либо точно известным.

Сигнал суммарной частоты смесителя отфильтровывается фильтром нижних частот (ФНЧ), а сигнал разностной частоты смесителя, равной 0 Гц, создаёт на выходе напряжение со средним значением 0 вольт. На это напряжение

постоянного тока накладываются любые переменные флуктуации напряжения, которые пропорциональны суммарному вкладу шумов двух входных сигналов. Этот выходной сигнал в модуляционной полосе обычно усиливается малошумящим усилителем (МШУ), прежде чем он поступит на вход анализатора сигналов.

Этот метод обеспечивает самую высокую чувствительность и самое широкое перекрытие полосы измерения (например, диапазон частот отстройки

от 0,1 Гц до 100 МГц). Кроме того, этот метод нечувствителен к амплитудному шуму и позволяет следить за сигналами дрейфующих источников.

Однако здесь имеются две потенциальные проблемы. Во-первых, опорный источник должен иметь низкий уровень фазового шума, наряду с тем обеспечивая также электронную перестройку. Во-вторых, если сигнал испытуемого устройства имеет большой дрейф частоты, то опорный источник должен обеспечивать перестройку в очень широком диапазоне.

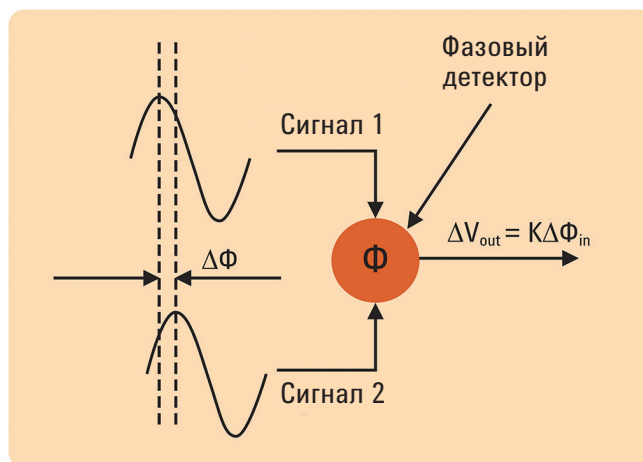


Рисунок 3 - Этот базовый принцип фазового детектора лежит в основе нескольких методов.

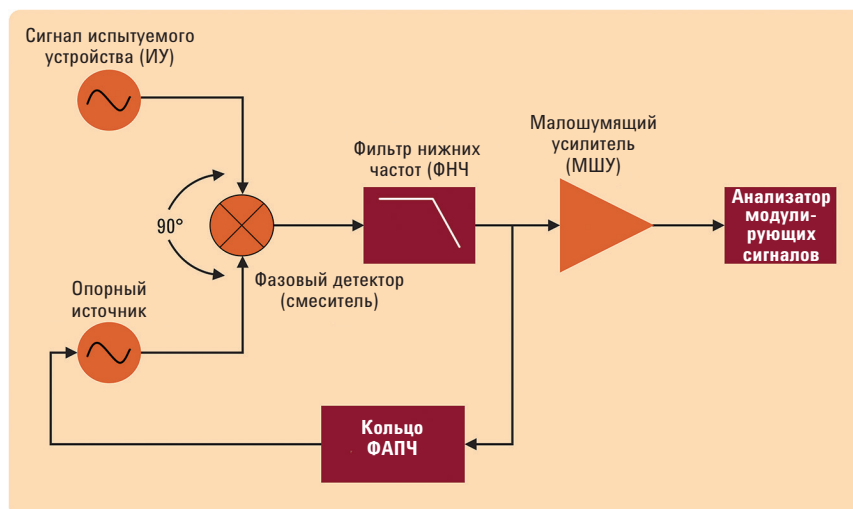


Рисунок 4 - В этом методе используются опорный источник и двойной балансный смеситель в качестве основы фазового детектора.

## Метод частотного дискриминатора

Чтобы упростить конфигурацию оборудования и процесс измерения, этот метод исключает опорный источник, заменяя его аналоговой линией задержки. Как показано на рисунке 5, сигнал испытуемого устройства (ИУ) разделяется на два канала. Сигнал одного канала задерживается относительно сигнала в другом канале, а линия задержки преобразует флуктуации частоты во флуктуации фазы. Настройка линии задержки определяет квадратурный сдвиг фазы между сигналами на двух входах смесителя. Затем фазовый детектор преобразует флуктуации фазы во флуктуации напряжения, которые анализатор сигналов измеряет как частотный шум. Частотный шум затем преобразуется в отсчёт фазового шума ИУ.

Одним из недостатков этого метода является ухудшение чувствительности, особенно при малых отстройках от несущей. Более длинная линия задержки повышает чувствительность, но ухудшает отношение сигнал/шум и ограничивает максимальную частоту отстройки, на которой могут проводиться измерения. Кроме того, вносимые потери линии задержки могут оказаться слишком большими, чтобы выходной уровень сигнала ИУ мог превзойти их.

Исходя из вышесказанного, этот метод лучше всего подходит при исследовании сигналов автогенераторов, таких как LC-генераторы и генераторы на объёмных резонаторах, имеющие склонность к генерации сигналов с шумами, которые имеют высокий уровень и медленный спад спектра фазового шума или высокий уровень дискретных составляющих в боковой полосе вблизи несущей, что может ограничить эффективность метода опорного источника/ФАПЧ

## Метод гетеродинного цифрового дискриминатора

Существующие технологии делают возможной замену аналоговой линии задержки гетеродинным цифровым дискриминатором. Как показано на рисунке 6, сигнал ИУ преобразуется на ПЧ с помощью смесителя и гетеродина

с автоподстройкой частоты. Сигнал ПЧ сначала усиливается и преобразуется в цифровую форму, а затем расщепляется и задерживается, используя блок цифровой обработки сигналов. Как и в предыдущем методе, задержанная копия сигнала сравнивается с незадержанной копией с помощью цифрового смесителя, а задержка устанавливается такой, чтобы обеспечить квадратурную разность фаз. Выходной сигнал смесителя фильтруется для устранения составляющей суммарной частоты, сохраняя компоненты модуляционной полосы, которые затем обрабатываются для определения фазового шума.

Этот метод хорошо подходит для измерения относительно высокого уровня фазового шума нестабильных источников сигнала и генераторов.

Этот метод обеспечивает более широкий динамический диапазон измерения фазового шума, чем метод ФАПЧ, и не требует переключения аналоговых линий задержки, используемых в методе частотного дискриминатора. Путём установки нулевого времени задержки метод гетеродинного цифрового дискриминатора также обеспечивает очень простые и точные измерения амплитудного шума с помощью той же установки и тех же РЧ-подключений.

Недостатком является то, что полный динамический диапазон измерения фазового шума ограничивается возможностями малошумящего усилителя (МШУ) и АЦП. Следующий метод решает эту проблему.

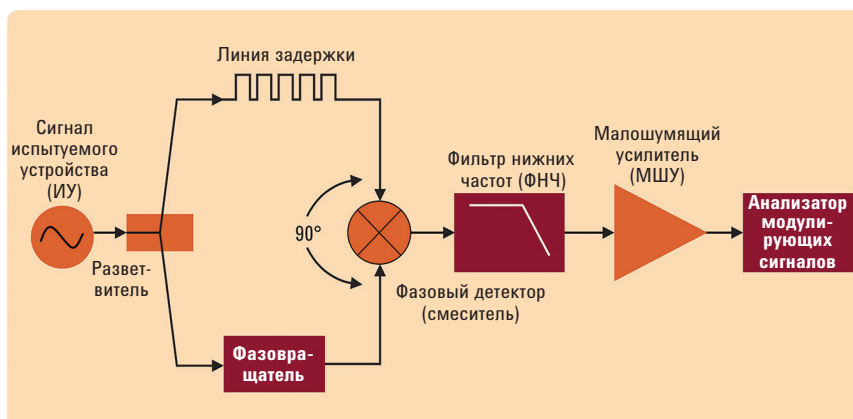


Рисунок 5 - Разветвление сигнала ИУ и манипулирование им с помощью линии задержки и фазовращателя исключает необходимость в опорном источнике.

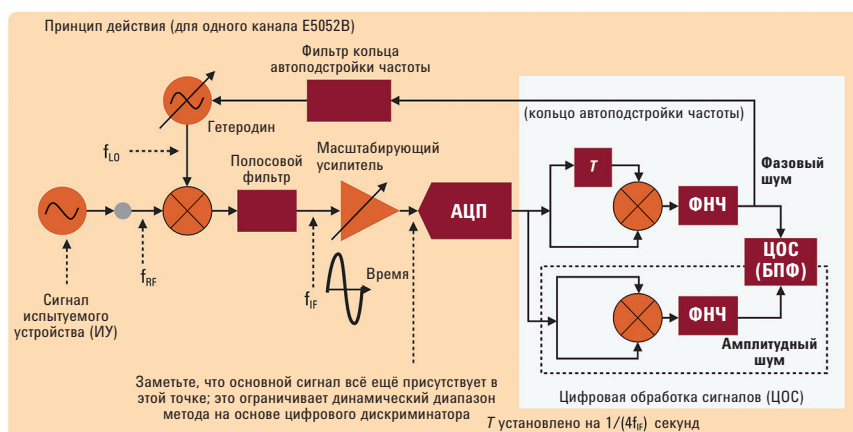


Рисунок 6 - Цифровые технологии позволяют имитировать поведение аналоговой линии задержки и проводить точные измерения фазового шума.



## Метод двухканальной взаимной корреляции

В измерительном приборе, таком как анализатор источников сигналов E5052B компании Agilent, данный метод использует комбинацию двух одинаковых одноканальных систем на основе опорного источника/ФАПЧ и выполняет операции взаимной корреляции между выходными сигналами каждого канала, как показано на рисунке 7. Поскольку любые шумы ИС, присутствующие в обоих каналах, когерентны, операция взаимной корреляции не влияет на их вклад в результат измерения. В противоположность этому, собственные шумы каждого канала не когерентны, и поэтому операция взаимной корреляции уменьшает их суммарный вклад в

результат измерения пропорционально корню квадратному из числа циклов корреляций. Число операций корреляции - ключевой фактор, от которого зависит общее время измерения. В анализаторе источников сигналов E5052B число операций корреляции выбирается пользователем. При увеличении числа корреляций уменьшается вклад шумов обоих каналов в результат измерения (таблица 1), но увеличивается время, требуемое для завершения измерения.

Поскольку метод двухканальной взаимной корреляции уменьшает уровень шума измерения, он обеспечивает превосходную чувствительность измерений. Но в связи с тем, что этот метод основан на цифровой обработке сигналов, он повышает чувствительность,

не требуя исключительно высоких характеристик аппаратных компонентов. Этот метод также обеспечивает больший динамический диапазон, чем метод гетеродинного цифрового дискриминатора, описанный выше.

С учётом этих преимуществ метод двухканальной взаимной корреляции хорошо подходит для измерения сигналов автогенераторов. В качестве средства исследования общего назначения этот метод обеспечивает превосходные характеристики измерения фазового шума многих типов источников сигналов и генераторов.

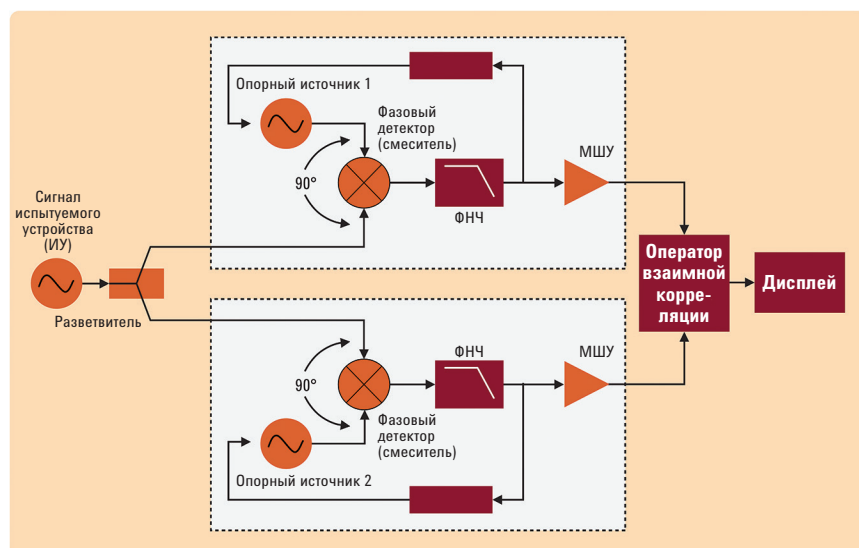


Рисунок 7 - Метод двухканальной взаимной корреляции использует два фазовых детектора.

Таблица 1 - Увеличение числа операций взаимной корреляции уменьшает уровень некогерентного шума.

Число корреляций	10	100	1,000	10,000
Уменьшение уровня шума	-5 дБ	-10 дБ	-15 дБ	-20 дБ

# Сравнение

## Технические решения для измерения фазового шума

В настоящее время диапазон доступных технических решений включает анализаторы спектра общего назначения, такие как PXA, специализированные измерительные приборы, такие как анализатор источников сигналов E5052B и система для измерения фазового шума на базе ПК серии E5500 компании Agilent. Ключевые отличия - в предлагаемых функциональных возможностях, гибкости и рабочих характеристиках, влияющих на минимальное и максимальное значения частоты отстройки, которые могут быть достигнуты с помощью конкретного технического решения.

Анализаторы сигналов серии X компании Agilent (PXA, MXA или EXA) снабжены опциональной прикладной программой измерения фазового шума N9068A, представляющей один из способов реализации метода прямого измерения спектра (рисунок 8). Это приложение автоматически выполняет требуемые измерения параметров сигнала несущей частоты и фазового шума и затем применяет необходимые корректирующие коэффициенты. Результаты могут быть представлены как в виде графика спектра фазового шума в логарифмическом масштабе (дБн/Гц в зависимости от частоты отстройки в логарифмическом масштабе), так и в виде таблицы уровней фазового шума при конкретных значениях частоты отстройки. Это техническое решение обычно хорошо работает при отстройках вблизи несущей, таких как 10 или 100 Гц, и при больших отстройках, таких как 10 МГц.

Анализатор источников сигналов E5052B реализует усложнённые методы фазового детектора и взаимной корреляции. E5052B включает малошумящие опорные источники, обеспечивает экстремально низкий уровень собственных шумов и возможности цифровой обработки

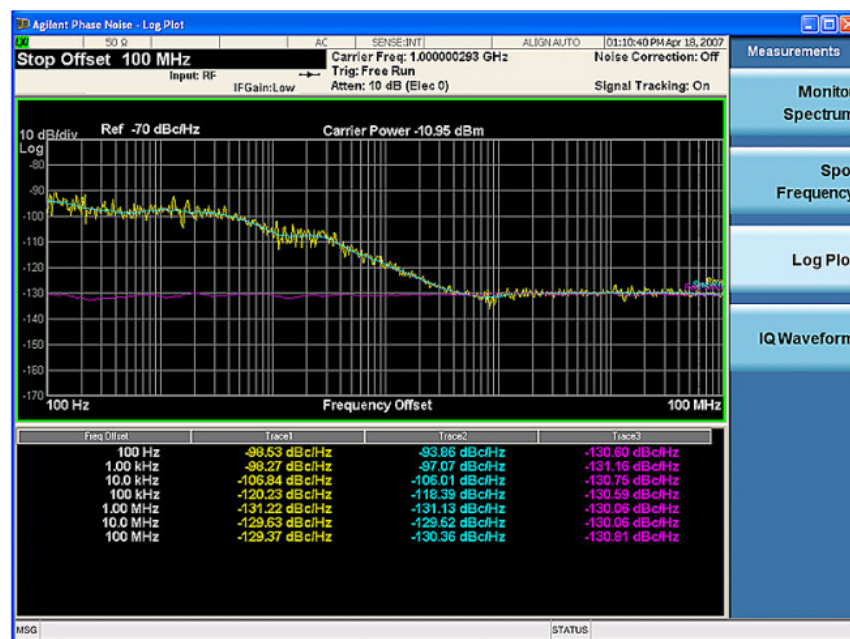


Рисунок 8 - Прикладная программа N9068A обеспечивает одноклавишные измерения фазового шума во временной и частотной областях.

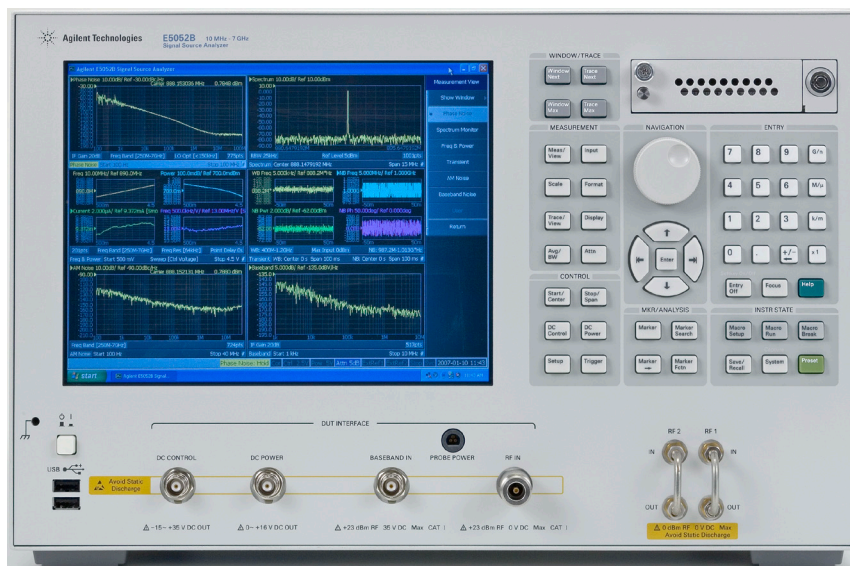


Рисунок 9 - Анализатор источников сигналов E5052B поддерживает измерения амплитудного и фазового шума без изменения РЧ-подключений.

сигналов, необходимые для реализации методов гетеродинного цифрового дискриминатора и двухканальной взаимной корреляции. Анализатор источников сигналов E5052B лучше всего подходит для измерений при отстройках вблизи несущей до 1 Гц и при больших

отстройках от несущей до 1 ГГц. Специализированные функциональные возможности E5052B обеспечивают удобство в работе и упрощенную установку параметров измерения и калибровку.



Модульное техническое решение E5500 может быть сконфигурировано для модификаций метода фазового детектора, таких как метод опорного источника/ФАПЧ, или метод частотного дискриминатора с аналоговой линией задержки. В конфигурации, реализующей метод опорного источника/ФАПЧ, система E5500 обеспечивает характеристики и возможности, необходимые для измерения очень низкого уровня фазового шума при отстройках до 0,01 Гц, если используется с гетеродином, имеющим высокие технические характеристики. В конфигурации, реализующей метод частотного дискриминатора, система E5500 способна измерять очень низкие уровни фазового шума при больших отстройках от несущей. Обратной стороной этой универсальности является то, что установка параметров измерения и калибровка E5500 значительно сложнее, чем при использовании анализатора источников сигналов E5052B или решений на основе анализаторов сигналов.

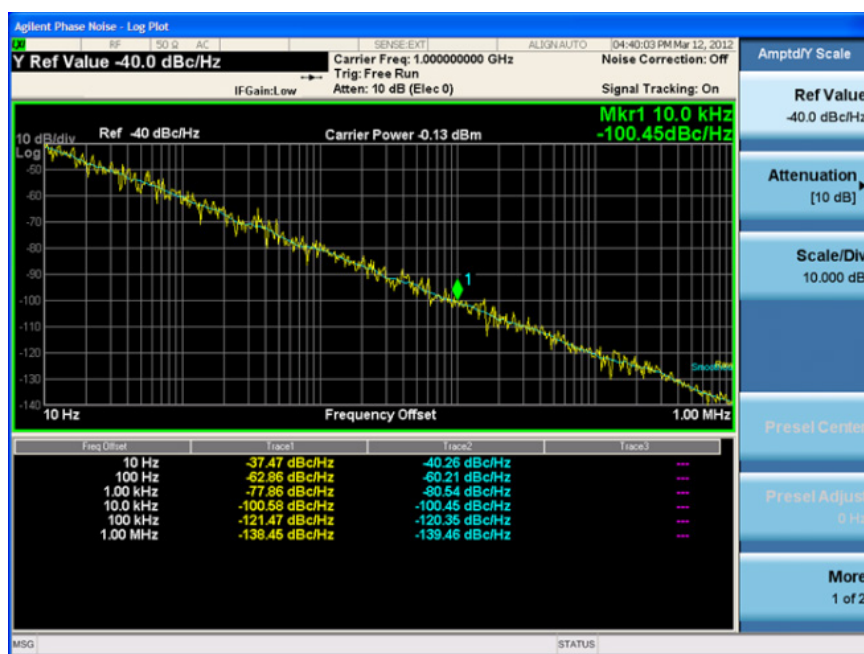


Рисунок 10 - Этот испытательный сигнал, созданный путём частотной модуляции генератора сигналом равномерного шума, может быть использован для оценки характеристик технических решений измерения фазового шума, самостоятельно созданных пользователями.

## Проверка правильности технических решений, самостоятельно созданных пользователями

Калиброванный сигнал фазового шума может быть использован для проверки испытательной установки. Эталонный опорный сигнал, к примеру, особенно важен при разработке решения на основе метода прямого измерения спектра, куда входит самостоятельно написанное ПО, учитывающее необходимые поправки. Подход, описанный здесь, применим для любого метода измерения фазового шума.

Надёжный испытательный сигнал может быть создан путём частотной модуляции генератора сигналом равномерного шума. Крутизна спада боковых полос шума постоянна и составляет -20 дБ/декада. Нужный уровень шума в боковой полосе может быть получен установкой девиации ЧМ сигнала.

Пример измерения фазового шума, показанный на рисунке 10, выполнен с помощью ЧМ сигнала, модулированного равномерным шумом с девиацией частоты 500 Гц. При этом обеспечивается уровень фазового шума 100 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц.

## Заключение

Фазовый шум является одним из самых важных критериев качества устройств генерации сигналов РЧ- и СВЧ-диапазона. Свойства этих устройств помогут определить, какой метод и техническое решение являются наиболее подходящими для точного измерения фазового шума.

Методы и технические решения, представленные в данном документе - наиболее просты и экономически эффективны. Данные методы и решения обеспечивают превосходные результаты для инженеров, не являющимися экспертами в области измерения фазового шума, и в то же время помогут экспертам интерпретировать данные, разобраться с которыми не всегда просто.

## Сопутствующая информация: генераторы сигналов

Название публикации	Номер публикации
<i>Основы анализа спектра – Рекомендации по применению</i>	5952-0292EN
<i>Уменьшение фазового шума на РЧ- и СВЧ-частотах – Рекомендации по применению</i>	5990-7529EN
<i>Технического решения измерения фазового шума компании Agilent – Руководство по выбору</i>	5990-5729EN
<i>Анализатор источников сигналов E5052B – Технические данные</i>	5989-6388EN
<i>Технические решения измерения фазового шума серии E5500 – Технические данные</i>	5989-0851EN
<i>Анализаторы сигналов серии X – Брошюра</i>	5990-7998EN
<i>Анализатор сигналов PXA серии X (N9030A) – Брошюра</i>	5990-3951EN
<i>Анализатор сигналов MXA серии X (N9020A) – Брошюра</i>	5990-5047EN
<i>Анализатор сигналов EXA серии X (N9010A) – Брошюра</i>	5989-6527EN
<i>Прикладная программа измерения фазового шума N9068A/W9068A компании Agilent – Технический обзор</i>	5989-5354EN

## Сопутствующая информация: анализаторы сигналов

Название публикации	Номер публикации
<i>Генераторы сигналов MXG и EXG серии X – Брошюра</i>	5990-9957EN
<i>Аналоговые (N5181B) и векторные (N5182B) генераторы сигналов семейства MXG серии X – Технические данные</i>	5991-0038EN
<i>Аналоговые (N5171B) и векторные (N5172B) генераторы сигналов семейства EXG серии X – Технические данные</i>	5991-0039EN
<i>Генераторы сигналов серии PSG – Брошюра</i>	5989-1324EN
<i>Микроволновый аналоговый генератор сигналов E8257D серии PSG – Технические данные</i>	5989-0698EN
<i>Векторный генератор сигналов E8267D серии – Технические данные</i>	5989-0697EN
<i>РЧ аналоговый генератор сигналов E8663D серии PSG – Технические данные</i>	5989-4136EN



**myAgilent**

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

Персонализированное представление наиболее важной для Вас информации.

### Торговые партнёры Agilent

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

Получите двойную выгоду: глубокие профессиональные знания в области измерительной техники и широкую номенклатуру выпускаемой продукции компании Agilent в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнёрами.



### Three-Year Warranty

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

Предоставляемое компанией Agilent сочетание надежности выпускаемой продукции и трёхлетней гарантии на все приборы - это ещё один способ, с помощью которого мы помогаем Вам достичь Ваших бизнес-целей за счёт возросшей уверенности в безотказности работы оборудования, снижения стоимости владения и дополнительных преимуществ.



### Agilent Advantage Services

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

Точные измерения в течение всего срока службы приборов.



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

[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. 3

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. 3

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. 2013  
Отпечатано в России  
19 июня 2013 года  
Номер публикации 5991-2069RURU



**Agilent Technologies**