

Keysight Technologies

Анализ стабильности частоты в частотной
и временной областях

Рекомендации по применению

Введение

Во многих современных РЛС и системах связи нестабильность частоты является основным фактором, определяющим их рабочие характеристики. В РЛС стабильность частоты гетеродина влияет на обработку доплеровской информации, причем в системах обнаружения медленно движущихся объектов это влияние приобретает особую важность. В системах связи с цифровой модуляцией нестабильность частоты приводит к росту амплитуды вектора ошибок (EVM), что отражается на пропускной способности систем.

Случайные возмущения, возникающие из-за нестабильности частоты или фазы несущего сигнала, могут быть связаны с различными эффектами. Для оценки этих эффектов используется метод, основанный на измерении частоты несущей и ее стабильности в определенных пределах (в пределах отстройки от несущей). Кратковременную стабильность частоты обычно оценивают на основе измерений в частотной области, например, измерений однополосного фазового шума, представляющего мощность сигнала с одной боковой полосой в полосе 1 Гц при определенной отстройке от несущей. Стабильность частоты можно измерять и во временной области, выполняя статистические измерения флуктуаций фазы или частоты в зависимости от времени. Основной характеристикой, измеряемой во временной области, является дисперсия Аллана или модифицированная дисперсия Аллана.

Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, но для полного анализа сигнала необходимы измерения как в частотной, так и во временной области. В данных рекомендациях по применению описаны измерения в обеих областях, причем особое внимание уделено практическим и экономически выгодным решениям. Для тех, кто не знаком с измерениями во временной области, предложены два надежных метода преобразования сигналов из частотной области во временную.

Работа в частотной области

При рассмотрении фазового шума необходимо учитывать, что он связан со стабильностью частоты сигнала. Долговременная стабильность, например, генератора оценивается на основе изменений частоты в течение часов, суток, месяцев и даже лет. Кратковременная стабильность представляет изменения частоты в течение периодов времени, не превышающих нескольких секунд. Кроме того, реальные сигналы имеют небольшие паразитные флуктуации амплитуды и фазы. Любая кратковременная нестабильность сигнала в большей степени влияет на работу систем, в которых высокая информационная насыщенность достигается за счет сложной обработки сигналов.

Из множества параметров, характеризующих кратковременную стабильность, чаще всего используется однополосный (SSB) фазовый шум. Он определяется как отношение спектральной плотности мощности при заданной частоте отстройки от несущей к полной мощности сигнала несущей. Фазовый шум измеряется в полосе частот 1 Гц при отстройке "f" от несущей, единицы измерения – дБн/Гц или "децибелы относительно уровня мощности несущей в полосе частот 1 Гц."

На рис. 1 показан результат сравнения двух сигналов – идеального и реального. Как и следовало ожидать, идеальный сигнал представлен одной спектральной линией в частотной области, в то время как реальный сигнал имеет спектр, распределенный вдоль нескольких спектральных линий, которые расположены до и после номинальной частоты несущей. Эти линии являются следствием модуляции сигнала, возникающей из-за флуктуаций амплитуды и фазы.

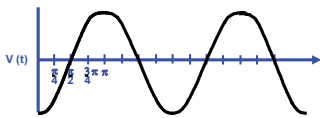
Идеальный сигнал

$$V(t) = A_o \sin(\omega_o(t))$$

Где:

A_o – номинальная амплитуда

ω_o – номинальная частота



Реальный сигнал

$$V(t) = (A_o + E(t)) \sin(\omega_o(t) + \phi(t))$$

Где:

$E(t)$ – случайные изменения амплитуды

$\Phi(t)$ – случайные изменения фазы

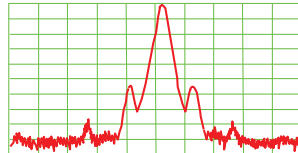
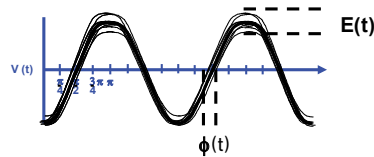


Рис. 1. Уравнение для реального сигнала во временной области (справа) имеет дополнительные члены, учитывающие флуктуации амплитуды и фазы.

Методы измерения фазового шума развивались по мере совершенствования анализаторов спектра. Далее в этом разделе будут рассмотрены три метода, от простого к сложному, основанные на прямом измерении спектра, на использовании фазового детектора и двухканальной кросс-корреляции.

Метод прямого измерения спектра

Один из первых и, возможно, самых простых методов определения фазового шума – прямое измерение спектра. Исследуемый сигнал подают на вход анализатора сигналов Keysight PXA, или подсоединяют к входу этого анализатора исследуемое устройство, после чего анализатор настраивают на частоту несущей. Затем измеряют мощность несущей и спектральную плотность мощности (PSD) шума генератора при заданной отстройке и вычисляют отношение PSD к мощности несущей.

Если не используются специальные функции, то точный результат гарантируется только после выполнения множества коррекций. В частности, может понадобиться коррекция с учетом ширины полосы шумов фильтров ПЧ анализатора, определяющих полосу разрешения (RBW), а также характеристик пикового детектора анализатора, создающего реальный шум, который может быть недокументирован.

Коррекции являются одноразовой процедурой и выполняются вручную с использованием Рекомендаций по применению Keysight 150 «Основы анализа спектра». Исключить такие дополнительные шаги можно при использовании современного анализатора сигналов, обладающего функцией дельта-маркера полоса/плотность (для измерения PSD), или встроенного программного обеспечения, например, ПО N9068A для анализаторов сигналов серии X – PXA, MXA и EXA – предназначенного для измерения фазового шума.

ПО N9068A для анализаторов серии X предлагает простое меню, позволяющее выполнять измерение нажатием одной кнопки и выбирать один из четырех режимов: мониторинг спектра, поточечное измерение зависимости фазы от времени на одной частоте, представление результатов измерений в логарифмическом масштабе и отображение квадратурных составляющих (I/Q). При представлении результатов измерений в логарифмическом масштабе на экран также выводится таблица значений фазового шума при основных значениях отстройки от несущей (рис. 2).

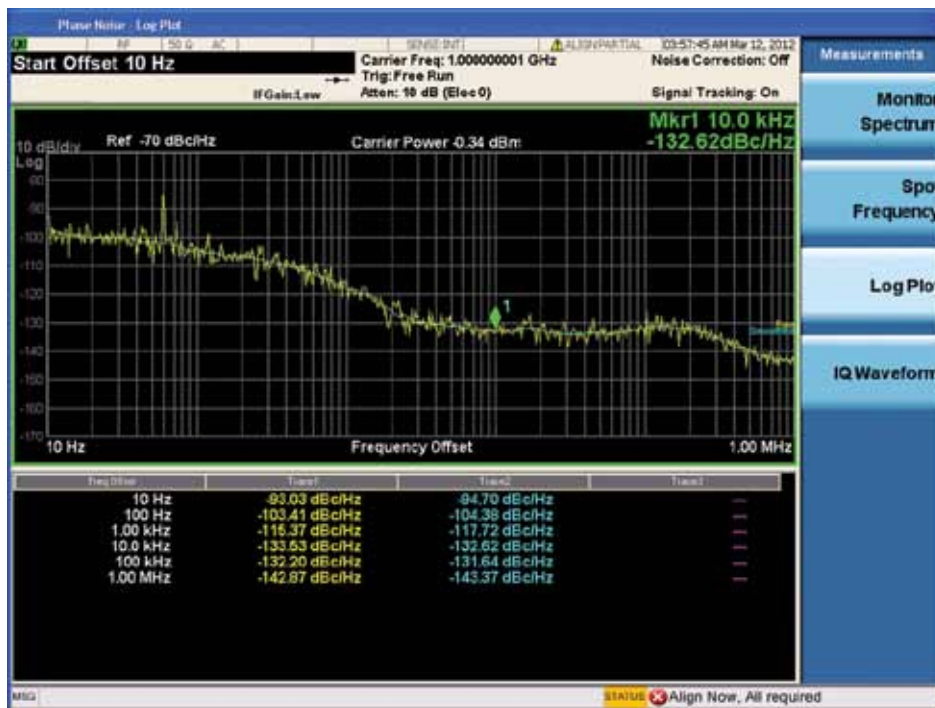


Рис. 2. ПО N9068A для измерения фазового шума обеспечивает высокую точность измерений за счет автоматической оптимизации измерения для каждого значения отстройки от несущей.

Время и опыт показали, что метод прямого измерения спектра имеет ограниченные возможности. Ограничения связаны с низким качеством или недостаточно высокими характеристиками некоторых анализаторов спектра, в частности с остаточной ЧМ гетеродина анализатора, шумовыми боковыми полосами или фазовым шумом гетеродина, а также уровнем собственных шумов анализатора, влияющим на результаты измерений. Кроме того, большинство анализаторов спектра измеряют только скалярную амплитуду шумовых боковых полос исследуемого сигнала, что затрудняет различение амплитудного шума и фазового шума. Процесс усложняется при измерении шума на каждой интересующей нас частоте отстройки и становится более трудоемким при выполнении операций вручную.

Использование анализатора сигналов серии X и ПО N9068A позволяет минимизировать влияние факторов, о которых сказано выше. Например, при использовании этого ПО с анализатором сигналов PXA, составляющая шума AM может быть удалена из результатов измерения (для отстроек не более 1 МГц). В этом случае анализатор использует встроенные средства цифровой обработки сигналов ПЧ и I/Q для измерения только составляющей шума ФМ, что способствует повышению точности измерений.

Кроме того, специализированные функции маркеров для выполнения множества основных измерений, предоставляемые приложением N9068A, повышают эффективность работы и упрощают процесс анализа сигналов. С помощью этого приложения выполняются измерения среднеквадратического значения шума, остаточной ЧМ и средней плотности шума, а также поиск пика и следующего выброса сигнала. Функции дельта-маркера можно использовать для определения абсолютных значений, крутизны на октаву и крутизны на декаду.

В общем случае метод прямого измерения спектра дает хорошие результаты при отстройках не более 200 Гц. В стандартном режиме с «узкой полосой синхронизации» анализаторы серии X обеспечивают приемлемые результаты измерений при отстройке от 30 до 200 Гц. Анализатор PXA можно использовать с внешним высокостабильным опорным генератором частотой 10 МГц, фазовый шум которого соизмерим с фазовым шумом высококачественного опорного генератора, встроенного в анализатор. Это позволяет почти на 10 дБ повысить точность измерений при отстройках менее 30 Гц.

Работа в миллиметровом диапазоне

Многие современные РЛС работают в миллиметровом диапазоне. В отличие от РЛС дециметрового диапазона, характеристики этих РЛС в большей степени зависят от фазового шума источника сигнала.

В настоящее время для анализа сигналов миллиметрового диапазона с помощью стандартного анализатора СВЧ сигналов используют внешние гармонические смесители, внешние «интеллектуальные» смесители и понижающие преобразователи частоты. Смесители обоих типов накладывают существенные ограничения на измерение фазового шума. Лучшей альтернативой смесителям является понижающее преобразование частоты. В зависимости от конструкции анализатора сигналов и понижающего преобразователя частоты для измерительной схемы могут потребоваться два из трех следующих приборов: анализатор сигналов, понижающий преобразователь частоты и, возможно, генератор, если потребуется более высокая частота гетеродина.

В большинстве понижающих преобразователей частоты сигнал гетеродина, подаваемый с анализатора сигналов или с внешнего генератора сигналов, умножается и усиливается перед подачей на смеситель. В зависимости от конструкции понижающего преобразователя частоты, смеситель может выполнять преобразование частоты на основной частоте гетеродина или работать на гармониках низкого порядка. В последнем случае снижаются потери на преобразование, что приводит к уменьшению среднего уровня собственного шума.

Подробную информацию см. в рекомендациях по применению «Измерительные средства для генерирования и анализа сигналов миллиметрового диапазона», номер документа 5991-3968EN.

Метод фазового детектора

Для отделения фазового шума от амплитудного шума можно использовать фазовый детектор. Как показано на рис. 3, фазовый детектор преобразует разность фаз двух входных сигналов в выходное напряжение. При сравнении сигналов с разностью фаз, кратной 90° , выходное напряжение равно нулю. Если разность фаз входных сигналов отличается от этого значения, то на выходе детектора появляется ненулевое напряжение.

Этот принцип лежит в основе нескольких широко используемых методов измерения фазового шума. Особый интерес представляют метод опорного источника/ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты), метод частотного дискриминатора и метод гетеродинного цифрового дискриминатора. Преимущества и недостатки каждого метода приведены в таблице 1.

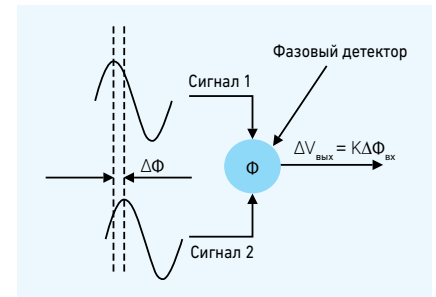


Рис. 3. Функциональная схема фазового детектора, используемая во многих приборах.

Метод	Преимущества	Недостатки
Опорный источник/ФАПЧ	<ul style="list-style-type: none"> – Очень высокая чувствительность – Широкая полоса измерения – Нечувствительность к шуму АМ – Слежение за сигналами источников с дрейфом частоты 	<ul style="list-style-type: none"> – Опорный источник должен иметь низкий фазовый шум – Необходимость электронной настройки опорного источника – Необходимость настройки опорного источника в широком диапазоне при высокой скорости изменения параметров исследуемого сигнала
Частотный дискриминатор	<ul style="list-style-type: none"> – Хорошая работа с автогенераторами, такими как LC-генераторы и генераторы на объемных резонаторах – Повышенная чувствительность за счет увеличения номинала линии задержки 	<ul style="list-style-type: none"> – Уменьшенная чувствительность при измерениях с малой отстройкой от несущей – Уменьшение отношения сигнал/шум и ограничение максимальной частоты отстройки, при которой может быть выполнено измерение, из-за большого номинала линии задержки – Внесенные потери линии задержки могут быть соизмеримы с уровнем исследуемого сигнала
Гетеродинный цифровой дискриминатор	<ul style="list-style-type: none"> – Хорошая работа с генераторами и нестабильными источниками сигналов со сравнительно большим фазовым шумом – Диапазон измерения шире, чем при использовании ФАПЧ – Применение цифровой технологии позволяет обходиться без линий задержки, используемых в методе частотного дискриминатора – Простое и точное измерение шума АМ с помощью одной и той же измерительной схемы (время задержки равно нулю) 	<ul style="list-style-type: none"> – Общий динамический диапазон ограничен малощумящим усилителем (МШУ) и аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) прибора

Эти три метода подробно рассмотрены в кратком приложении Keysight «Анализ методов и технологий для измерения фазового шума» (номер документа 5991-2069EN).

Метод двухканальной кросс-корреляции

С помощью этого метода можно устранить недостатки метода гетеродинного цифрового дискриминатора, указанные в предыдущем разделе. В измерительном приборе, таком как анализатор источников сигналов (SSA) Keysight E5052B, для реализации метода двухканальной кросс-корреляции используются два одинаковых канала опорного источника/ФАПЧ и вычисляется кросс-корреляция между выходными сигналами этих каналов (рис. 4).

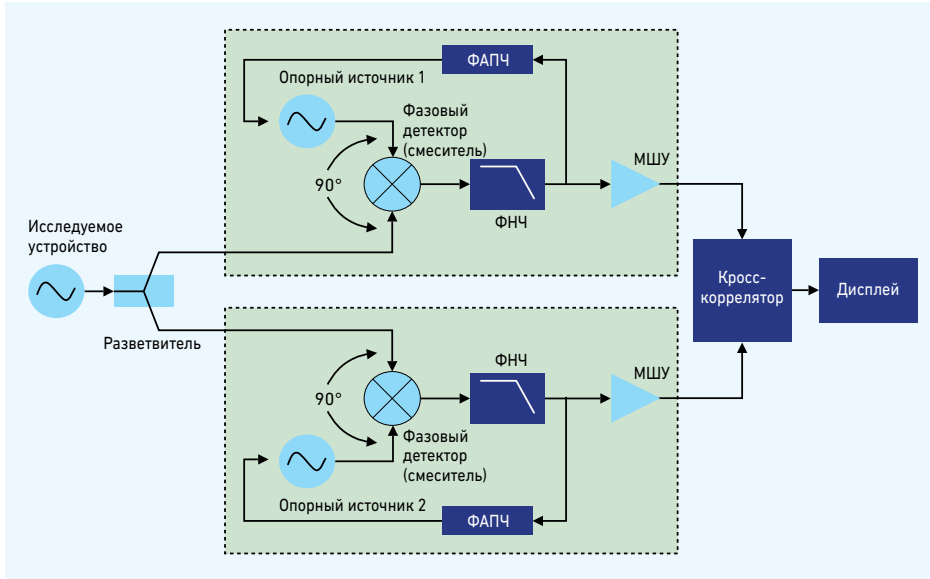


Рис. 4. В анализаторе E5052B метод двухканальной кросс-корреляции реализуется с помощью двух фазовых детекторов.

Шумы исследуемого сигнала в каналах когерентны, поэтому они не влияют на вычисление кросс-корреляции. В отличие от этого, любой собственный шум каждого канала не является когерентным, и в результате кросс-корреляции его уровень снижается пропорционально корню квадратному из числа корреляций.

Общее время измерения определяется числом корреляций. В анализаторе E5052B число коррелирующих выбирается пользователем. Увеличение этого числа приводит к уменьшению вклада шума обоих каналов в результат измерения (табл. 2) при одновременном увеличении времени измерения.

Таблица 2. При увеличении числа операций кросс-корреляции уровень некогерентного шума снижается.

Число корреляций	10	100	1000	10000
Снижение уровня шума	-5 дБ	-10 дБ	-15 дБ	-20 дБ

Снижение шума при использовании метода двухканальной кросс-корреляции позволяет повысить чувствительность измерений, а поскольку этот метод реализуется за счет цифровой обработки сигналов, то увеличение чувствительности не приводит к усложнению измерительного оборудования. По сравнению с методом гетеродинного цифрового дискриминатора, данный метод обеспечивает более широкий динамический диапазон.

Благодаря этим преимуществам метод двухканальной кросс-корреляции наиболее полезен для измерения характеристик автогенераторов. Наблюдения показали, что при измерении по этому методу многих типов источников и генераторов обеспечивается минимальный уровень фазового шума.

Измерения во временной области

Для определения кратковременной стабильности частоты большинство инженеров выполняют измерения в частотной области, используя кривые зависимости фазового шума в дБн/Гц от частоты отстройки. Однако при малой отстройке от несущей, такой как 10 Гц, 1 Гц или 0,1 Гц, измерения во временной области позволяют получить дополнительную информацию и глубже понять причины нестабильности сигналов.

Сначала захватывают достаточно большой набор непрерывных данных и используют его для выявления незначительных изменений, обусловленных НЧ шумом. Стабильность источника сигналов определяют, вычисляя статистические данные зависимости фазы и частоты сигнала источника от времени на основе дисперсии. Чаще всего для вычислений используют дисперсию Аллана, но при этом статистическая достоверность невелика. В качестве альтернативы применяется модифицированная дисперсия Аллана, с помощью которой можно различать белый шум при наличии фликкер-шума.

Метод может быть реализован с использованием универсального частотомера, например Keysight 53230A. При этом основные требования предъявляются к разрешению однократного захвата и возможности непрерывного сбора данных без «пробелов» или «мертвых зон». Универсальный частотомер/таймер Keysight 53230A обеспечивает разрешение однократного захвата 20 пс, имеет встроенную память на 1 Мвыб. (16 МВ) и непрерывно захватывает данные со скоростью от 1 Мвыб./с до 1 выборки в 1000 секунд (рис. 5). Благодаря этим характеристикам данный прибор можно использовать для захвата практически любого представляющего интерес шумового сигнала.



Рис. 5. Частотомер 53230A имеет два входных канала с полосой пропускания до 350 МГц и может быть оснащен третьим каналом с полосой пропускания до 6 ГГц (опция 106) или до 15 ГГц (опция 115).

Кроме того, прибор 53230A имеет математические функции для статистической обработки и анализа, позволяющие вычислять среднее значение, среднее отклонение, максимальное и минимальное значения и стандартное отклонение Аллана (квадратный корень из дисперсии Аллана). Для визуального представления результатов анализа используются гистограммы и графики трендов с линиями предельных значений.

Специальное встроенное решение

В анализаторе источников сигналов E5052B используются более сложные методы фазового детектора и кросс-корреляции, а также поддерживаются измерения шума АМ и фазового шума без изменения ВЧ соединений. Анализатор E5052B обладает низким уровнем собственных шумов, имеет малозумящие источники опорного сигнала и цифровой сигнальный процессор, позволяющий реализовать методы гетеродинного цифрового дискриминатора и двухканальной кросс-корреляции. С помощью этого анализатора можно эффективно выполнять измерения с частотами отстройки от 1 Гц до 100 МГц. Специальные функции анализатора упрощают его эксплуатацию и облегчают настройку и калибровку.



Модульная система серии E5500 на основе компьютера, предназначенная для измерения фазового шума, может быть настроена для реализации метода фазового детектора, а также метода опорного источника/ФАПЧ или метода частотного дискриминатора с аналоговой линией задержки. При работе по методу опорного источника/ФАПЧ эта система имеет характеристики и функциональные возможности, позволяющие измерять очень низкие уровни фазового шума при отстройках от 0,01 Гц, но только при использовании высококачественного гетеродина. В режиме частотного дискриминатора система может измерять очень низкие уровни фазового шума при большой отстройке от несущей частоты.



Для подробного анализа генераторов тактовой частоты, гетеродинов и других источников сигналов компания MathWorks предлагает бесплатное ПО на основе MATLAB под названием Stability Analyzer 53230A (2.0)¹. Это приложение получает данные непосредственно от универсального частотомера 53230A или из файлов формата .CSV. На основе загруженных данных можно определить стабильность, выбрать отклонение Аллана или отклонение Адамара, подобное модифицированному отклонению Аллана. Результаты вычисления можно использовать для построения трех типов кривых: отклонение Аллана или Адамара с выбираемыми доверительными интервалами, зависимость частоты от времени и гистограмма. При работе с этими кривыми можно выполнять их масштабирование и панорамирование, а также выбирать одну точку кривой и определять ее координаты (например, зависимость «сигма» от «тау», отклонение частоты от среднего значения в зависимости от времени или зависимость числа бинов от частоты).

Важно отметить, что на дисперсию Адамара не влияет линейный уход частоты, так как оно определяется на основе разностей дробных частот второго порядка. Именно поэтому дисперсию Адамара можно использовать для анализа стабильности комбинации источников сигналов с разными значениями ухода частоты. При отсутствии ухода частоты дисперсии Аллана и Адамара обеспечивают одинаковые результаты.

На рис. 6 показан пример измерений сигнала генератора с частотой 69,521 МГц. Для непрерывных измерений использовался частотомер 53230A, позволяющий выполнять 5000 измерений с интервалом между измерениями 10 мс (общее время измерения равно 50 с). На зависимости частоты от времени (внизу слева) можно различить два основных типа шума:

- Белый шум ЧМ, представляющий собой случайный шум с постоянной спектральной плотностью за пределами интервала времени от 10 до 30 с.
- Фликкер-шум ЧМ или шум $1/f$, спектральная плотность которого растет с понижением частоты, т. е. отклонения шума обратно пропорциональны отклонению от средней частоты.

Зависимость «сигма» от «тау» для отклонения Аллана (вверху справа) в интервале времени от 50 мс до 5 с показывает, что на сигнал генератора влияет случайный или броуновский шум ЧМ. Это подтверждается положительным наклоном кривой, который соответствует фазовому шуму при малой отстройке от несущей.

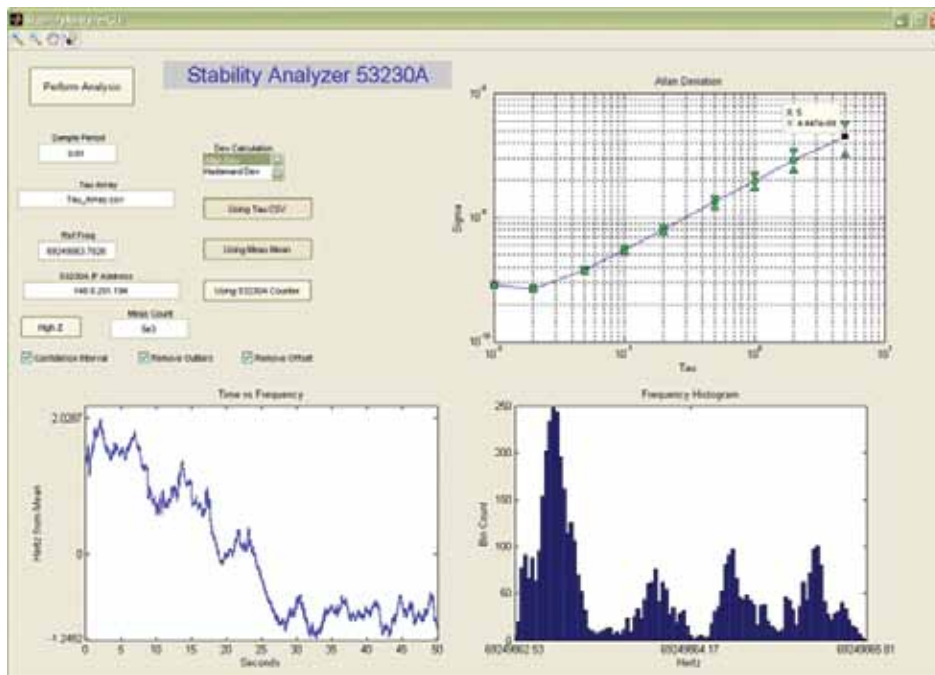


Рис. 6. ПО Stability Analyzer 53230A вычисляет статистические характеристики, помогающие детально анализировать шум при отстройках менее 10 Гц.

¹ Требуется лицензированное ПО MATLAB. Взаимодействие с частотомером 53230A осуществляется с помощью ПО «Instrument Control Toolbox». Программное обеспечение доступно на сайте www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/.

Преобразование между частотной и временной областями

Для более глубокого понимания статистических характеристик результаты из частотной области могут быть преобразованы во временную область. Такое преобразование, представляющее собой непростой процесс, может быть выполнено двумя надежными методами: численное интегрирование, используемое наиболее часто, и аппроксимация шума экспоненциальной моделью.

Численное интегрирование

Программные средства, такие как ПО MATLAB, можно использовать для выполнения преобразования с помощью численного интегрирования и, следовательно, для определения дисперсии Аллана или модифицированной дисперсии Аллана. Чтобы получить требуемые выражения, необходимо сначала связать стабильность частоты во временной области со спектральной плотностью флуктуаций дробной частоты:

$$\sigma^2(\tau) = \int_0^{\infty} S_y \cdot |H(f)|^2 \cdot df$$

где $|H(f)|^2$ – передаточная функция для дискретизации во временной области. Чтобы обеспечить стабильность во временной области для двух выборок Аллана, надо иметь следующую передаточную функцию:

$$|H(f)|^2 = 2 \left[\frac{\sin^4(\pi\tau f)}{(\pi\tau f)^2} \right]$$

На основе этой функции дисперсия Аллана может быть вычислена следующим образом:

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) \frac{\sin^4(\pi\tau f)}{(\pi\tau f)^2} df$$

Выполнив преобразования, получим выражение для модифицированной дисперсии Аллана:

$$Mod\sigma_y^2(\tau) = \frac{2}{N^4\pi^2\tau_0^2} \int_0^{f_h} S_y(f) \frac{\sin^6(\pi\tau f)}{f^2 \sin^2(\pi\tau_0 f)} df$$

Экспоненциальные модели шума

Преобразование между частотной и временной областями можно выполнять, используя экспоненциальный закон и следующее выражение:

$$\sigma_y^2(\tau) = h_{-2} \frac{(2\pi)^2}{6} \tau + h_{-1} 2 \ln 2 + h_0 \frac{1}{2\tau} + h_1 \frac{1.038 + 3 \ln(2\pi f_h \tau)}{2\pi^2 \tau^2} + h_2 \frac{3f_h}{(2\pi)^2 \tau^2}$$

В этом выражении члены h_n представляют соответствующие уровни шумов, изменяющиеся по экспоненциальному закону, как показано в таблице 2.

Тип шума	$\sigma_y^2(\tau)$	$S_y(f)$	где
Случайный (ЧМ)	$A f^2 S_y(f) \tau^{-1}$	$A^{-1} \tau^{-1} \sigma_y^2(\tau) f^{-2}$	$A = 4\pi^2/6$
Фликкер-шум (ЧМ)	$B f^1 S_y(f) \tau^0$	$B^{-1} \tau^0 \sigma_y^2(\tau) f^{-1}$	$B = 2 \ln 2$
Белый шум (ЧМ)	$C f^0 S_y(f) \tau^{-1}$	$C^{-1} \tau^1 \sigma_y^2(\tau) f^0$	$C = 1/2$
Фликкер-шум (ФМ)	$D f^{-1} S_y(f) \tau^{-2}$	$D^{-1} \tau^2 \sigma_y^2(\tau) f^1$	$D = 1.038 + 3 \ln(2\pi f_h \tau) / 4\pi^2$
Белый шум (ФМ)	$E f^{-2} S_y(f) \tau^{-2}$	$E^{-1} \tau^2 \sigma_y^2(\tau) f^2$	$E = 3 f_h / 4\pi^2$

Определим остальные переменные выражения: f_h – верхняя граничная частота полосы пропускания измерительной системы в Гц, τ_0 – время измерения. Эти переменные применимы только к фликкер-шуму ФМ и белому шуму ФМ.

Закключение

Стабильность частоты – это очень важный параметр для характеристик большинства современных систем, таких как РЛС, системы аналоговой и цифровой связи. Рассмотренные в данной статье методы анализа сигналов во временной и частотной областях взаимно дополняют друг друга и могут быть объединены для более глубокого исследования сигналов.

При выборе наиболее эффективного метода следует учитывать частоту несущей и необходимые частоты отстройки. Как правило, анализатор сигналов с установленным приложением для измерения фазового шума позволяет наилучшим образом анализировать качество сигнала и спектральный шум, а также все изменения в диапазоне отстроек от 20 Гц до 1 МГц. С помощью специализированного анализатора источников сигналов E5052B можно выполнять точные измерения при отстройках от 1 Гц до 100 МГц. Используя частотомер с функциями статистического анализа и, при необходимости, внешнее ПО, можно анализировать сигналы при отстройках 10 Гц, 1 Гц и 0,1 Гц.

Для минимизации остаточного шума рекомендуется использовать специализированную систему измерения фазового шума. Однако в этом случае схема измерения получится сложнее, чем при работе с анализатором сигналов или универсальным частотомером.

Сопутствующая информация

- Брошюра «Анализаторы сигналов серии X», номер документа 5990-7998EN
- Брошюра «Измерительные приложения серии X», номер документа 5989-8019EN
- Технической обзор «Приложения серии X для измерения фазового шума», номер документа 5989-5354EN
- Рекомендации по применению «Измерительные средства для генерирования и анализа сигналов миллиметрового диапазона», номер документа 5991-3968EN
- Краткие сведения о применении «Обзор методов и средств для измерения фазового шума», номер документа 5991-2069EN
- Техническое описание «Анализатор источников сигналов E5052B», номер документа 5989-6388EN
- Техническое описание «Система измерения фазового шума серии E5500», номер документа 5989-0851EN
- Руководство по выбору «Решения Keysight для измерения фазового шума», номер документа 5990-5729EN
- Обзор семейства приборов «ВЧ и универсальные частотомеры/таймеры Keysight серии 53200», номер документа 5990-6339EN
- Рекомендации по применению «Уменьшение фазового шума в диапазонах ВЧ и СВЧ», номер документа 5990-7529EN

Российское отделение Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская
наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России
бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: tmo_russia@keysight.com

www.keysight.ru

Сервисный Центр

Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская
наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: tmo_russia@keysight.com

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированное представление интересующей вас информации.

www.keysight.com/find/ad