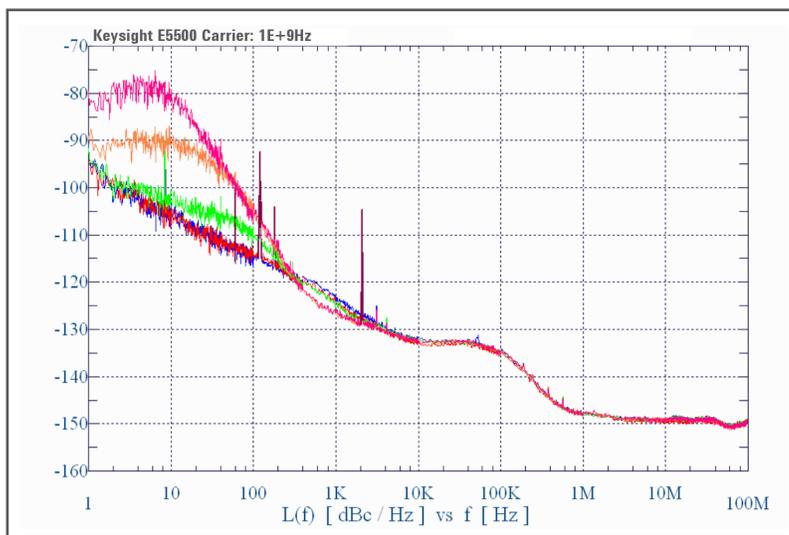


Keysight Technologies

Использование частотомера для измерения фазового шума вблизи сигнала несущей

Заметки по применению
Серия статей "Измерения сигналов РЛС"



Обзор

Гетеродин (LO) производит сигналы несущей для передатчиков и опорные сигналы для приёмников и поэтому является “сердцем” радиолокационных систем (РЛС), систем радиоэлектронного подавления и связи. В системах связи всё большие объёмы информации за счёт компрессии (сжатия) передаются по каналам с ограниченной шириной полосы пропускания. В процессе эволюции РЛС наблюдается постоянная потребность во всё более точном разрешении целей на всё больших расстояниях.

Чтобы соответствовать требованиям этих ответственных приложений, высокая стабильность и чистота (качество) спектра сигнала гетеродина являются критически важными при разработке схем передатчиков и приёмников с высокими характеристиками. При проверке нестабильности и чистоты спектра сигнала такие измерительные приборы, как анализаторы сигналов (спектра), обеспечивают информативные и охватывающие широкий диапазон частот отображения шума и спектральных составляющих вокруг сигнала несущей. К сожалению, этот тип приборов может оказаться неспособным обеспечить четкую картину фазового шума вблизи несущей. В данном контексте, “вблизи несущей” или просто “вблизи” относится к шуму в пределах ± 200 кГц относительно частоты несущей на оси X графика в частотной области.

При создании чёткой картины шума вблизи несущей такие измерительные приборы, как универсальный частотомер 53230A компании Keysight, выручают там, где анализаторы сигналов уже перестают работать. Далее в этих заметках описано, как возможности измерений с высоким разрешением без пропусков сигнала, обеспечиваемые 53230A, можно использовать для более тщательного исследования сигналов гетеродина. Кроме того, представлены примеры результатов измерений в виде графиков анализа в модуляционной области и девиации Аллана.¹

Проблема

До последнего времени полное определение характеристик шума на частотах, отстоящих от сигнала несущей менее, чем на 10 Гц, требовало сложных измерительных установок, например, таких как при использовании метода гетеродина (ссылка 2, W.J. Riley), либо дорогих измерительных систем, таких как специализированный анализатор фазового

шума. Анализаторы сигналов и частотомеры являются альтернативными техническими решениями, но при этом каждое из них имеет ограничения.

Как было отмечено ранее, анализаторы сигналов обеспечивают не имеющие себе равных возможности просмотра спектральных составляющих в широком диапазоне частот. Типичное измерение чётко покажет шум вокруг несущей, и при этом полоса обзора и полоса пропускания могут быть установлены таким образом, чтобы настроить различные режимы просмотра содержимого шума. Однако, чем ближе к несущей перемещаются измерения, содержимое шума делается всё более насыщенным, и становится трудно определить возможные причины этого шума.

Частотомер способен проводить измерения вблизи несущей, нужно следить за тем, чтобы результаты измерений были релевантными. Например, при работе вблизи несущей необходимо захватить достаточно большой набор данных, чтобы выявить любые медленные изменения, вызванные низкочастотным шумом. Однако, при выполнении статистического анализа на большом наборе измерений во временной области, традиционные методы, например, определение среднеквадратического отклонения, не будут достаточными, поскольку они вычисляют кумулятивный эффект выборки. В результате, чем больше набор выборок, тем больше может вырасти значение среднеквадратического отклонения. Иначе говоря, оно может стать расходящимся.

¹ Если шум, вызванный нестабильностью генератора, измеряется в частотной области, он часто называется фазовым шумом. При измерении во временной области такой шум часто упоминается как джиттер (ссылка 1, K.J. Button). Хотя в данных заметках основное внимание уделено измерениям во временной области, джиттер рассматривается как “фазовый шум” или просто “шум”, так как РЧ сигналы гетеродина обычно просматриваются в частотной области.

Решение

При измерениях вблизи несущей такие измерительные приборы, как частотомер 53230A, могут обеспечить более подробное представление деталей сигнала, чем анализатор сигналов. Одним из важнейших факторов — и ключевой отличительной особенностью современных частотомеров — является их разрешающая способность. Например, 53230A обеспечивает разрешающую способность, равную 20 пс, при измерениях во временной области.

Кроме того, 53230A снабжён возможностями, которые когда-то можно было найти только в самых совершенных и дорогих приборах для измерений во временной области. Примером, имеющим отношение к измерениям фазового шума, являются непрерывные измерения без пропусков сигнала или с нулевым временем простоя. Отклоняясь от темы, заметим, что это свойство позволило создать измерительный прибор, называемый анализатором в модуляционной области (MDA) — а это уже имеет непосредственное отношение к рассматриваемому вопросу, поскольку графики в стиле MDA являются полезным инструментом для анализа во временной области вблизи несущей.

Прежде чем объяснить, как эти свойства позволяют проводить анализ вблизи сигналов несущей, имеет смысл подробно объяснить значение непрерывных измерений без пропусков сигнала во временной области.

Понятие непрерывных измерений без пропусков сигнала

Типичный измерительный прибор при измерениях во временной области активирует таймер, когда возникает начальное событие (start event), например, положительный или отрицательный перепад сигнала. Внутренний таймер прибора производит отсчёты, пока не будет обнаружено конечное событие (stop event), которое соответствует положительному или отрицательному перепаду, представляющему один полный период сигнала.

Все частотомеры имеют настраиваемый период выборки или время счёта. При измерениях частоты или периода частотомер выполняет измерения временных интервалов от перепада до перепада в течение продолжительности времени счёта. В конце времени счёта он усредняет результаты измерения временных интервалов, берёт обратную величину и возвращает измеренное значение частоты.

В своём обычном режиме частотомер проходит через период установки готовности к новому измерению по окончании текущего времени счёта (времени измерения) и перед началом следующего времени счёта. Это не является непрерывным измерением без пропусков сигнала, поскольку данные сигнала пропускаются, пока прибор готовится к новому измерению. В случае непрерывных измерений без пропусков сигнала время установки готовности к новому измерению отсутствует. События, связанные с обнаружением перепадов сигнала,

синхронизируются непрерывно — без пропусков сигнала — с учётом заданного числа выборок, которое может быть установлено для 53230A в диапазоне от 1 до 1000000 измерений.

Скорость непрерывных измерений без пропусков сигнала, обеспечиваемая частотомером, обеспечивается быстродействием устройства управления измерениями. Универсальный частотомер 53230A имеет частоту дискретизации при сборе данных без промежутков до 1 Мвыб/с, которая в настоящее время является самой высокой в отрасли. Если частота входного сигнала превышает частоту дискретизации частотомера — неважно, равна ли она 10 МГц или 10 ГГц — схема предварительного масштабирования разделит частоту входного сигнала, прежде чем послать его на внутреннее устройство управления измерениями. Результатом этого является то, что частотомер не может захватить содержимое шума в отдалении от частоты несущей. Но даже при этих условиях данный режим всё же способен обеспечить возможность детального исследования содержимого сигнала вблизи несущей (см. раздел “Результаты и преимущества”). Объединение в частотомере высокой разрешающей способности и измерений без пропусков сигнала обеспечивает две важных возможности анализа сигналов.

- Возможно детальное исследование содержимого шума вблизи несущей, что обеспечивает более тщательную диагностику испытываемого источника сигнала
- Измерения могут проводиться ближе к частоте гетеродина, чем при использовании любого другого типа измерительных приборов

Примеры с использованием этих возможностями приведены в разделе “Результаты и преимущества”

Приближение к несущей

Дисперсия Аллана (или среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение частоты) была разработана для анализа нестабильности и процессов низкочастотного шума в гетеродинах и генераторах синхронизирующих сигналов (равенство 1). Применение этого метода к данным, захваченным частотомером, является первым шагом при использовании девиации Аллана (ниже) с целью установления источников фазового шума вблизи несущей.

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle = \frac{1}{2\tau^2} \langle (x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n)^2 \rangle$$

Равенство 1 - Дисперсия Аллана (или среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение частоты) может быть вычислена, используя измерение дробной частоты (y) или возмущение фазы или времени (x).

Если необходимо более подробно изучить этот метод, значительное число ссылок доступно в сети Интернет. Здесь приводится только краткий обзор.

- Если необходимо более подробно изучить этот метод, значительное число ссылок доступно в сети Интернет. Здесь приводится только краткий обзор.
- Временной интервал (τ) представляет интервал наблюдения каждой из выборок "y" или "x". Значение, выбранное для τ , определяет проверяемый диапазон частот шума. Например, если для τ выбрано значение, равное 1 с, путем интегрирования будет исключено любое содержимое шума на частоте 1 Гц.
- Угловые скобки представляют бесконечный ряд. Чем больше отсчетов (n) используется в этом ряду, тем выше уровень достоверности вычислений.

Другое связанное с этим вычисление, получившее название девиации Аллана, представляет собой корень квадратный из дисперсии Аллана (равенство 2). Когда это вычисление применено к большой выборке частотных данных и выведено в виде графика, оно может выявить скрытые циклические возмущения, которые влияют на характеристики фазового шума. Пример этого показан в разделе "Результаты и преимущества".

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\sigma_y^2(\tau)}$$

Равенство 2 - Девиация Аллана равна корню квадратному из дисперсии Аллана.

Результаты и преимущества

Два примера помогут проиллюстрировать виды результатов, которые возможны при использовании частотомера, ПК и программной среды, такой как MATLAB, Keysight VEE или LabVIEW, в которой можно легко обрабатывать векторные данные. В обоих случаях сигнал с искажениями был создан с использованием генератора сигналов компании Keysight, РЧ выход которого был подключен к 53230A.

Использование графика MDA

В этом первом примере на вход 53230A был подан сигнал несущей 1 ГГц, модулированный по частоте шумом прямоугольной формы. В частотомере частота дискретизации измерения без пропусков сигнала была установлена равной 100 Квыб/с, и было собрано 500 измерений. Данные были переданы в ПК, обработаны программой VEE компании VEE и отображены на графике в стиле MDA (рисунок 1). На этом графике данные представлены в виде зависимости частоты (ось Y) от времени (ось X).

На экране анализатора сигналов будут отображаться ЧМ или ФМ составляющие в виде зашумления вокруг несущей. В отличие от этого, график MDA показывает огибающую скрытого сигнала источника шума во временной области. В данном случае график MDA выявляет частотную модуляцию шумом прямоугольной формы, которая была добавлена к сигналу несущей 1 ГГц. Это может оказаться очень полезным при поиске источника шума, обусловленного паразитной связью, который могут производить источники питания, трансформаторы и электронно-механические компоненты.

Эти данные можно также просмотреть в дополнительном формате, аналогичном отображению в частотной области, посредством вывода их в виде гистограммы. Отображение выборок, полученных в результате измерения без пропусков сигнала, в виде графика гистограммы сравнимо с просмотром данных на экране анализатора сигналов с недостаточным общим диапазоном частот, но широкой полосой пропускания.



Рисунок 1 - Данный график в стиле MDA отображает зависимость частоты (ось Y) от времени (ось X) и выявляет модулирующий сигнал, который наложен на сигнал несущей 1 ГГц.

Применение девиации Аллана

В следующем примере девиация Аллана используется для анализа сигнала гетеродина 3 ГГц. Для имитации циклического шума испытательный сигнал был промодулирован по частоте синусоидальным сигналом с частотой 1 Гц и девиацией 3 Гц. Частотомер 53230A был установлен для проведения измерений без пропусков сигнала с частотой измерений 100 Гц, было проведено 1200 измерений, что обеспечило объём собранных данных длительностью 12 с.

Вычисление девиации Аллана было произведено на данных с использованием значений τ (τ) от 40 мс до 2 для выполнения того, что известно как анализ данных при всех значениях τ (τ) ("all-tau analysis") (ссылка 3, NIST). Этот вид анализа, применённый к сигналу гетеродина, облегчает определение низкочастотных периодических возмущающих воздействий, таких как циклическое изменение температуры (ссылка 2, W.J. Riley). График анализа данных при всех значениях τ (τ) ("all-tau analysis") был создан с использованием MATLAB (рисунок 2).¹

На рисунке 2, значение $\sigma_y(\tau)$ падает при значениях τ (τ), равных 1 и 2 секундам. Это ожидаемо, поскольку эти значения кратны периоду синусоидального сигнала 1 Гц. В результат добавленный шум на частоте 1 Гц был исключён путём интегрирования при измерениях девиации Аллана, проведённых при значениях τ (τ), равных 1 с и 2 с, поскольку они являются целыми кратными периода шума.

На рисунке видно, что девиация Аллана также понемногу снижается при уменьшении значений τ (τ). Это является результатом перемещения с удалением от диапазона частот источника шума.

Понижение графика при определённых значениях τ (τ) и изменения тренда в результатах измерения девиации Аллана помогает выявить диапазон частот паразитного шума, который влияет на сигнал гетеродина. Такая возможность исследования процессов возникновения шума вблизи сигнала гетеродина помогает точно локализовать источник шума и обеспечить информацию, которая может быть использована для уменьшения или устранения шума.

Данное обсуждение является поверхностным изложением использования дисперсии и девиации Аллана для целей анализа шума и нестабильности. Более подробно эти вопросы изложены в руководстве NIST (ссылка 3).

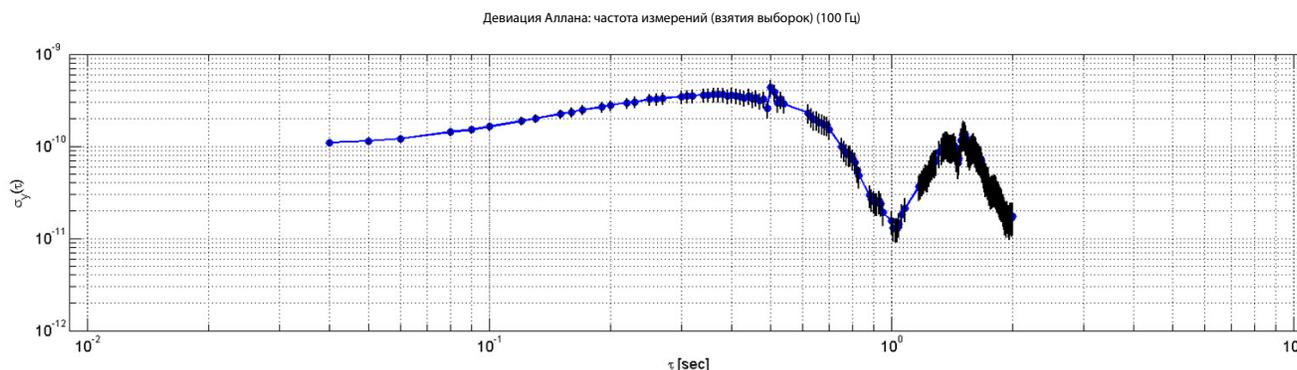


Рисунок 2 - График анализа данных при всех значениях τ (τ) ("all-tau analysis"), базирующийся на вычислениях девиации Аллана, может выявить низкочастотные периодические возмущающие воздействия.

¹ Скрипт MATLAB, с помощью которого был создан график на рисунке 2, бесплатно доступен на сайте обмена программами и кодами MATLAB Central под названием "Stability Analyzer 53230A."

Вывод

Частотомер является существенным добавлением к набору инструментальных средств инженера при исследовании РЧ сигналов, поскольку он дополняет информацию, предоставляемую анализаторами сигналов. Наличие двух важных функциональных возможностей, включающих высокую разрешающую способность и непрерывные измерения без пропусков сигнала, делает возможным не только захватывать фазовый шум вблизи несущей, но также подбирать ключ к источникам шума и определять способы уменьшения или устранения шума.

Ссылки

1. Button, K.J. (1984). *Infrared and Millimeter Waves; Ch 7, Phase Noise and AM Noise Measurements in the Frequency Domain (239-289)*. Academic Press, Orlando, FL
2. Riley, W. J. (2007). *Methodologies for Time-Domain Frequency Stability Measurement and Analysis*. Retrieved from website: www.wiley.com/METHODOLOGIES.pdf
3. National Institute of Standards and Technology (NIST Handbook of Frequency Stability Analysis (NIST Special Publication 1065). Retrieved from NIST website: <http://tf.nist.gov/general/pdf/2220.pdf>

Тематическая информация

- Обзор семейства: РЧ/универсальные электронно-счётные частотомеры серии 53200A компании Keysight, номер публикации 5990-6339EN
- Технические данные: РЧ/универсальные электронно-счётные частотомеры серии 53200A компании Keysight, номер публикации 5990-6283E
- MATLAB: более подробная информация доступна на сайте компании The MathWorks: www.mathworks.com/products/matlab
- Руководство по выбору: технические решения компании Keysight для измерения фазового шума, номер публикации 5990-5729RUR

myKeysight

[myKeysight](#)

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированное отображение интересующей вас информации



www.lxistandard.org

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



Три Года Стандартной Заводской Гарантии

www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty

Keysight обеспечивает высочайшее качество продукции и снижение общей стоимости владения. Единственный производитель контрольно- измерительного оборудования, который предлагает стандартную трехлетнюю гарантию на все свое оборудование.



Планы Технической Поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

До пяти лет поддержки без непредвиденных расходов гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.



www.keysight.com/go/quality

Keysight Electronic Measurement Group

DEKRA Certified ISO 9001:2008

Quality Management System

Торговые партнёры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

По этому адресу пользователь может получить лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерительной техники и широкая номенклатура выпускаемой продукции компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнёрами.

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

(BP-16-10-14)