Измерение фазовых шумов импульсных сигналов

Указания по применению

Изделия:

R&S[®]FSWP

С развитием методов цифровой обработки сигналов в современных беспроводных системах связи становится все больше цифровых элементов, и все более жесткие требования накладываются на плотность размещения информации во все более узкой полосе частот. С точки зрения беспроводной связи, методы модуляции становятся более сложными с меньшим допуском на ошибочные символы. С точки зрения радиолокации, современные радиолокационные системы стараются извлекать больше информации о целях и их траекториях, а также обеспечивать возможность отслеживания медленно движущихся целей, таких как автомобили и пешеходы, на фоне помех.

Как для систем связи, так и для радиолокационных систем одним из основных ВЧ-параметров, ограничивающих производительность системы, является фазовый шум. Разработка современных и все более совершенных ВЧ-системы, требует обязательного учета влияния фазовых шумов генераторов и передатчиков.

В настоящем указании по применению основное внимание уделено измерению фазовых шумов импульсных сигналов, которые используются в радиолокационных системах. Будут рассмотрены некоторые физические ограничения на измерения фазовых шумов таких сигналов и представлены возможности современного анализатора фазовых шумов FSWP от компании Rohde & Schwarz.



Указания по применению К. Gheen

Содержание

1	Введение	3
1.1.1	Измерение скорости в РЛС	3
1.2	Характеристики импульсного сигнала	5
1.3	Импульсные ВЧ-сигналы	7
1.4	Фазовый шум импульсных сигналов	8
1.4.1	Разница между фазовым шумом непрерывного и импульсного сигналов	9
1.4.2	Зависимость параметров шума от параметров импульса	12
2	Анализатор FSWP от Rohde & Schwarz	14
2.1	Измерение фазового шума с помощью FSWP	15
2.1.1	Метод фазового детектора для измерения фазового шума	15
2.1.2	Анализаторы фазового шума с кросскорреляционной обработкой	17
2.1.3	Блок-схема анализатора FSWP	19
2.1.4	Измерение фазового шума импульсного сигнала при помощи FSWP	21

1 Введение

Слово радар (радиолокатор) является акронимом, означающим радиообнаружение и определение расстояния до цели. Исходя из этого определения, радиолокационные системы (РЛС), в первую очередь, предназначены для обнаружения цели и определения расстояния до нее. Можно также определить следующие параметры цели: местоположение, направление относительно РЛС, скорость цели и ее размер или даже некоторые идентификационные параметры.





Большинство РЛС используют импульсную модуляцию, передавая короткую пачку или отдельный импульс ВЧ энергии и ожидая, пока сигнал дойдет до цели, отразится от нее и вернется в РЛС. Измерив полное время, необходимое сигналу для прохождения пути до цели и обратно, и зная скорость распространения ВЧ-сигнала, можно определить расстояние до цели. Направление цели можно определить с помощью узконаправленной антенны, измеряя изменение угла антенны от севера на цель.

1.1.1 Измерение скорости в РЛС

Перед обсуждением импульсных фазовых шумов, следует пояснить их важность для разработчиков РЛС. В этом разделе приводится несколько примеров задач, иллюстрирующих диапазон отстроек от несущей частоты, интересных для анализа.

Скорость целей можно определить с помощью измерения доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала относительно переданного. В целом, если цель движется по направлению к радару, эффективная длина волны переданного сигнала снижается или сжимается на соответствующее смещение цели между каждым периодом ВЧ-сигнала. Доплеровскую частоту для движущейся цели можно выразить следующим образом:

$$f_d = \frac{2f_0}{c} \left(\vec{v} \bullet \hat{R} \right) = \frac{2f_0 v}{c} \cos \theta$$

где:

- fd = доплеровская частота
- f₀ = частота передаваемого сигнала РЛС
- с = скорость света
- v = вектор скорости цели
- R = радиальный единичный вектор антенны РЛС

Скорость цели важна не только для предсказания ее траектории, но часто и для разделения стационарных и движущихся целей. РЛС, способные отслеживать движущиеся цели на фоне большого количества стационарных объектов, таких как здания, горы и другие объекты рельефа, известны как селекторы движущихся целей (СДЦ). Такая способность становится особенно важной, если учесть, что сигнал пассивной помехи может значительно превосходить сигнал стандартной цели, иногда на 80...100 дБ.

Несколько простых примеров позволят проиллюстрировать диапазон доплеровских частот, с которыми работают инженеры-разработчики РЛС. Рассмотрим два примера:

- Первый это небольшой низкоскоростной самолет гражданской авиации, как его видно на обзорной РЛС аэропорта.
- Второй это два истребителя при встрече нос к носу

Пример 1:

Для этого примера рассмотрим самолет Cesena 150, приближающийся к полнофункциональному аэропорту, оснащенному обзорной РЛС, работающей на частоте 2,7 ГГц. Будем считать, что самолет летит со скоростью 80 км/ч строго к РЛС (нет косинусного члена в доплеровском уравнении). Следовательно:

$$f_d = \frac{2f_0 V}{c} = \frac{2(2.7 \times 10^9)(8 \times 10^4 \frac{M}{\text{qac}})}{(3 \times 10^8 \frac{M}{\text{c}})(3600 \frac{c}{\text{qac}})} = 400 \, \Gamma \text{u}$$

Пример 2:

Для этого примера рассмотрим РЛС управления огнем, применяемую на истребителе. Будем считать, что частота передаваемого сигнала РЛС равна 10 ГГц, что позволяет обрабатывать скорость приближения до 500 м/с (~1,5 Маха). Максимальная доплеровская частота для такой РЛС составила бы:

$$f_{\rm d} = \frac{2V}{\lambda} = \frac{2(500 \,\frac{\text{M}}{\text{c}})(10 \,X \,10^9 \,\Gamma\text{u})}{3 \,X \,10^8 \frac{\text{M}}{\text{c}}} = 33 \,\text{k}\Gamma\text{u}$$

По этим примерам можно судить, что частоты Доплера для многих РЛС в основном находятся в звуковом диапазоне и что они часто находятся очень близко к несущей. Также можно увидеть, что если используемый в РЛС генератор обладает высоким уровнем фазовых шумов в этом диапазоне частот, он ограничит возможности РЛС по определению скорости цели. Это особенно важно, учитывая, что эхо-сигналы РЛС, принятые от большого блока помеховых объектов, также содержат фазовый шум

передатчика РЛС, а их уровень мощности намного больше слабого эхо-сигнала цели.

Итак, видно, что фазовый шум очень важен для разработчиков РЛС, и так как большинство таких систем используют несущие с импульсной модуляцией, возможность измерения фазового шума импульсных несущих принципиально необходима.

Далее будут рассмотрены основные характеристики ВЧ-сигналов с импульсной модуляцией.

1.2 Характеристики импульсного сигнала

Лучше всего начать рассмотрение характеристик ВЧ-импульса с простого импульса прямоугольной формы. Напомним, что прямоугольный сигнал можно получить наложением синусоидального сигнала и его нечетных гармоник. Если сложить достаточное количество гармоник с соответствующими амплитудами, можно увидеть, как прямоугольный сигнал обретает форму.

На следующем рисунке показан синусоидальный сигнал, его третья, пятая и седьмая гармоники, причем амплитуда каждой гармоники уменьшается в 1/n раз, где n – это номер гармоники.





Как можно заметить по черной кривой, сумма основной гармоники и ее первых трех нечетных гармоник начинает довольно сильно походить на прямоугольный сигнал. Продолжив добавлять нечетные гармоники к сигналу, можно получить практически идеальный прямоугольный сигнал.

Создание прямоугольного ВЧ-импульса является продолжением этого процесса, когда все высшие гармоники проходят через точки максимума и минимума одновременно с основной. Для создания идеального прямоугольного импульса потребовалось бы бесконечное число гармоник, но, как можно заметить из приведенного выше примера, амплитуды высших гармоник достаточно быстро

уменьшаются, так что можно сформировать приемлемый импульс с помощью ограниченного их числа.

Чтобы создать последовательность импульсов, амплитуда которых изменяется от 0 В до некоторого положительного значения, необходимо добавить постоянную составляющую для компенсации отрицательной части синусоидального сигнала, используемого для создания последовательности импульсов. Постоянная составляющая представляет среднее значение сигнала.

При рассмотрении импульсных сигналов также полезно рассмотреть их спектральные составляющие, т.е. процедуру, обратную описанному выше процессу.



Рисунок 3 – Импульсный сигнал и его преобразование Фурье

Для показанной выше последовательности импульсов ключевыми параметрами являются длительность импульса, обозначенная греческой буквой т и период повторения импульсов (ППИ), обозначенный буквой Т.

Другими параметрами, описывающими последовательность импульсов, показанную на рисунке 3, являются:

Амплитуда	Пиковая амплитуда импульса, обычно обозначаемая буквой А и,	
	как правило, измеряемая в единицах напряжения	
ЧПИ	Частота повторения импульсов (ЧПИ) – число импульсов в	
	секунду, равное единице, деленной на период повторения	
	импульсов (1/Т)	
Коэффициент	Коэффициент заполнения импульсов – отношение длительности	
заполнения	импульса к периоду повторения импульсов (т/Т)	
А ср.	Средняя амплитуда импульсного сигнала. А ср. = А х	
	Коэффициент заполнения импульсов	

На рисунке 2, приведенном выше, изображены различные гармоники синусоидального сигнала, формирующие прямоугольный сигнал во временной области. На рисунке 3 показан обратный процесс, изображающей частотный спектр последовательности импульсов. Так как все частоты являются целыми множителями основной ЧПИ, расстояние между частотными линиями равно ЧПИ. Форма огибающей соответствует функции sin(x)/x, где нули спектра появляются с интервалом 1/т.

Так как импульсный сигнал является периодическим, его можно разложить в ряд Фурье для получения его частотного спектра следующим образом:

$$V(f) = \frac{\tau}{T} + \frac{2\tau}{T} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{n\pi\tau/T}$$

Здесь т/Т – это коэффициент заполнения или среднее значение сигнала.

1.3 Импульсные ВЧ-сигналы

Импульсная модуляция ВЧ-сигнала получается с помощью амплитудной модуляции ВЧ-несущей требуемым импульсным сигналом. Импульсные несущие также можно получить с помощью стробирования генератора включением и выключением; однако, стробируемые генераторы, такие как магнетроны, не обладают непрерывностью фазы, что приводит к случайной начальной фазе у каждого импульса. Случайная природа фазы не позволяет использовать стробируемые генераторы в доплеровских РЛС. Кроме того, случайная фаза от импульса к импульсу, как правило, не позволяет проводить измерения фазового шума таких источников с помощью фазовых или синхронных детекторов. Так как для фазового детектора необходим стабильный опорный сигнал, с которым сравнивается измеряемый сигнал, невозможно измерить фазовый шум, если фаза каждого импульса сильно изменяется.

Из-за указанного ограничения стробируемых генераторов основное внимание в данной публикации будет сосредоточено на измерении фазовых шумов импульсных источников, которые используют амплитудную модуляцию для формирования импульсной модуляции ВЧ-несущей. Амплитудная модуляция позволяет получить требуемый ВЧ-импульс с непрерывной фазой.

При рассмотрении процесса модуляции необходимо помнить, что умножение импульсного сигнала и ВЧ-несущей во временной области соответствует свертке их спектров в частотной области.

Из теории АМ модуляции известно, что при однотональной модуляции боковые полосы появляются слева и справа от несущей. Это можно проверить с помощью тригонометрического тождества, которое описывает умножение двух синусоидальных сигналов. Так как спектр последовательности импульсов представляет собой последовательность гармоник ЧПИ, можно сделать вывод, что АМ модуляция несущей импульсным сигналом приведет к появлению боковых полос слева и справа от несущей. Как уже упоминалось, во время модуляции происходит свертка спектра несущей со спектром импульсного сигнала и перенос спектра импульсного сигнала на частоту несущей. В результате будет сформирован симметричный относительно частоты несущей спектр, спектральные линии которого разнесены на п•ЧПИ. Амплитуда спектральных линий будет иметь ожидаемую огибающую вида sin(x)/x, нули которой возникают в точке 1/т.

На следующих рисунках показано влияние длительности импульса при постоянном значении ЧПИ. Различные длительности импульсов соответствуют левым и правым рисункам, они приводят к изменению ширины спектра. Кроме того, на верхних и нижних рисунках показано влияние ЧПИ на спектр. Можно заметить, что при уменьшении ЧПИ увеличивается плотность спектральных линий.



Рисунок 4 – Изменения спектра импульсного ВЧ-сигнала при изменении длительности импульса и ЧПИ

Примечание: При увеличении ЧПИ увеличивается расстояние между спектральными линиями. Это очень важный момент для разработчика РЛС с точки зрения измерения скорости цели. Если ЧПИ очень низкая, спектральные линии будут расположены очень близко друг к другу и могут мешать доплеровской обработке. Также и при измерениях фазовых шумов, увеличение интервала между частотными линиями увеличивает возможности измерения фазового шума между спектральными линиями с точки зрения значения максимально доступной отстройки от несущей.

На рисунках 3 и 4 спектральные линии математически точно отображаются выше и ниже базовой линии. Линии ниже базовой представляют гармоники модулирующего сигнала, фаза которых на 180° отличается от фазы основной гармоники модулирующего сигнала. На экране анализатора спектра все линии будут отображаться выше базовой линии, т.к. анализатор спектра не учитывает информацию о фазе.

1.4 Фазовый шум импульсных несущих

Напомним, что АМ модуляция формирует спектр с симметричными относительно несущей частоты боковыми полосами, которые представляют собой частотные линии с интервалом, равным ЧПИ модулирующего сигнала. Помимо составляющих, полученных от импульсной модуляции, каждая линия в спектре также содержит фазовый шум несущей, наложенный в процессе свертки. Этот добавленный шум на каждой спектральной линии можно легко выделить, изучив импульсный спектр (полоса разрешения << ЧПИ) сигнала с импульсной модуляцией на анализаторе спектра и увеличив область анализа до отображения нескольких отдельных спектральных линий. На следующем рисунке показан спектр 1 ГГц несущей, модулированной импульсным сигналом с длительностью импульса 10 мкс и ЧПИ 10 кГц. Показана только несущая и соседние спектральные линии.



Рисунок 5 – Спектр несущей с импульсной модуляцией

На приведенном выше рисунке хорошо различимы боковые полосы фазового шума несущей, и можно заметить, что фазовый шум несущей накладывается на каждую спектральную линию спектра импульсного ВЧ-сигнала. Также видно, что U-образная кривая формируется между каждой линией спектра. Еще из рисунка можно увидеть, что для сдвига частоты больше, чем ЧПИ/2, новая информация о фазовом шуме отсутствует. Именно по этой причине измерения фазового шума импульсных несущих проводятся, как правило, с отстройкой частоты от несущей, не превышающей ЧПИ/2.

Обычно при измерении фазовых шумов после фазового детектора ставят фильтр нижних частот. Частота среза этого фильтра меньше ЧПИ/2, что гарантирует проведение измерений фазовых шумов в корректном диапазоне отстроек частоты.

1.4.1 Разница между фазовым шумом непрерывного и импульсного сигналов

При сравнении фазового шума импульсного ВЧ-сигнала с фазовым шумом того же ВЧ-источника без импульсной модуляции сразу возникает вопрос: почему фазовый шум импульсной несущей выше, чем у непрерывного сигнала, особенно при больших отстройках от несущей частоты?

Ниже приведен график, на котором построен фазовый шум генератора сигналов с импульсной модуляцией и без импульсной модуляции.





На приведенном выше рисунке показаны результаты измерения фазового шума непрерывного сигнала и импульсного сигнала с частотой несущей 1 ГГц, полученные с помощью анализатора фазовых шумов FSWP компании Rohde & Schwarz. Использовалась импульсная модуляция с длительностью импульса 10 мкс и с ЧПИ 10 кГц ($\tau = 100$ мкс). Обратите внимание, что максимальная отстройка частоты для измерения импульсного сигнала равна 5 кГц (ЧПИ/2). Из этого рисунка можно увидеть, что фазовый шум импульсного сигнала начинает отличаться от фазового шума непрерывного сигнала, начиная с отстройки частоты порядка 400 Гц, и он примерно на 8 дБ выше на ЧПИ/2 (5 кГц). Сравнивая этот рисунок с измеренным спектром, приведенным на рисунке 5, можно заметить схожую форму кривой.

Вспомним процесс АМ модуляции непрерывной несущей импульсным сигналом: синусоидальный сигнал, представленный каждой спектральной линией в спектре импульсного сигнала (см. рисунок 3), формирует две боковые полосы, верхнюю и нижнюю. Свертка всех отдельных спектров приводит к появлению всех возможных сумм и разностей несущей частоты и всех гармоник модулирующего сигнала. Если боковые полосы фазового шума присутствуют в несущей и выполняется импульсная модуляция несущей, спектр импульсного сигнала сворачивается со спектром несущей и ее шумовыми боковыми полосами.

В целом, процесс модуляции накладывает шумовые боковые полосы несущей на каждую линию ЧПИ спектра импульса с коэффициентом sin(x)/x, см. рисунок 8.

Примечание: Вне зависимости от величины отстройки от несущей в непрерывном режиме генерации, наложенные боковые полосы фазового шума импульсно модулированной несущей будут появляться во всем диапазоне отстроек ± ЧПИ/2, и они не будут подавлены фильтром нижних частот с частотой среза ЧПИ/2.



Рисунок 7 – Спектр несущей и ее боковые шумовые полосы



Рисунок 8 – Спектр шумовых боковых полос, наложенных на каждую линию ЧПИ

Примечание: Для фиксированной ширины импульса увеличение шума на частоте F_c будет обратно пропорционально ЧПИ (низкая ЧПИ соответствует высокой спектральной плотности и большему шуму; в то время как увеличение ЧПИ приведет к снижению шума на F_c). Аналогично, при фиксированной ЧПИ увеличение коэффициента заполнения приведет к снижению шума на F_c из-за сужения спектральных полос. В наихудшем случае шум увеличится на:

Увеличение шума ≤ 10 Log₁₀ (число линий ЧПИ до первого нуля функции sin(x)/x)

Как уже упоминалось, это наихудший сценарий, предполагающий, что вклад шума на каждой линии ЧПИ до первого нуля функции sin(x)/x одинаков. Причина в том, что это не точное соотношение из-за формы спектра боковых полос фазового шума. Как правило, вблизи несущей уровень шума падает очень быстро, порядка 20-40 дБ на декаду. Из-за формы огибающей спектра сигнала с импульсной модуляцией sin (x)/x наложенный шум на этих отстройках будет ниже уровня шума непрерывного сигна-

ла; однако, при больших отстройках, вплоть до ЧПИ/2, отклонение будет более заметным, особенно если кривая спектра шума непрерывного сигнала имеет пьедестал. Так как пьедестал на кривой фазового шума означает относительно постоянный уровень энергии во всем диапазоне отстроек частоты, суммарная энергия наложенного шума будет больше, чем для области с постоянно уменьшающимся наклоном.

1.4.2 Построение зависимости параметров шума от параметров импульса

Из всего вышесказанного можно сделать вывод об изменении фазового шума импульсной несущей в зависимости от ЧПИ и длительности импульса. Лучше всего это можно увидеть по результатам реальных измерений фазового шума при различной длительности импульсов.



Рисунок 9 – Изменения фазового шума, вызванные изменением длительности импульса

На рисунке 9 приведены результаты трех измерений фазового шума импульсной несущей, показанные на одном графике. Все измерения проводились при постоянной ЧПИ 10 кГц.

Первое измерение проводилось при длительности импульса 10 мкс, результаты показаны с помощью синей (средней) кривой на рисунке 9. Для второго измерения длительность импульса была увеличена до 50 мкс, результаты показаны с помощью зеленой (нижней) кривой. Из графиков можно заметить, что фазовый шум уменьшился примерно на 6 дБ. Для этого измерения длительность импульса была увеличена в 5 раз, что привело к уменьшению ширины основного лепестка спектра импульсного сигнала также в 5 раз и числа спектральных линий ЧПИ в основном лепестке опять же в 5 раз. Используя приведенные выше формулы можно вычислить ожидаемое снижение фазового шума для этого случая:

10*Log₁₀ (1/5) = -6,9 дБ

Повторимся, полученное значение является упрощенной аппроксимацией наихудшего случая изменения фазового шума.

Последнее измерение, показанное на рисунке 9, проводилось при длительности импульса 1 мкс. Т.е. длительность импульса по сравнению с первым измерением (синяя кривая) была уменьшена в 10 раз, что привело к увеличению ширины основного лепестка функции sin(x)/x спектра в 10 раз и, соответственно, увеличило число спектральных линий ЧПИ в основном лепестке также в 10 раз, а это привело к увеличению фазового шума несущей, см. желтую (верхнюю) кривую на рисунке 9.

Исходя из вышесказанного, не стоит ожидать, что фазовый шум импульсной несущей будет такой же, как фазовый шум непрерывной несущей. Также очевидно, что инженеры и техники, занимающиеся измерением фазовых шумов импульсных несущих, должны хорошо знать параметры используемых источников сигналов и применяемой импульсной модуляции, чтобы иметь возможность оценить достоверность результатов измерения.

2 Анализатор FSWP от Rohde & Schwarz

Анализатор FSWP от компании Rohde & Schwarz – это полнофункциональный и комплексный анализатор фазового шума с кросскорреляционной обработкой. FSWP позволяет проводить измерения фазового шума и AM шума как непрерывных, так и импульсных несущих частотой до 50 ГГц, без необходимости подключения внешнего дополнительного оборудования. При необходимости расширения частотного диапазона до 500ГГц и более имеется возможность подключения дополнительных внешних смесителей. При этом, прибор поддерживает подключение двух преобразователей, что позволяет производить кросскорреляционную обработку во всем диапазоне частот. Помимо измерений фазового шума анализатор FSWP, оснащенный опцией B1, позволяет проводить полноценный анализ сигналов и спектра с полосой частот цифрового анализа до 320 МГц.



Рисунок 10 – Анализатор фазовых шумов FSWP

Для расширения функциональных возможностей на анализатор FSWP можно установить следующие опции:

Опция	Описание
B1	Анализ спектра и сигналов
B4	Термостатированный кварцевый генератор (ОСХО)
B60	Кросс-корреляция
B61	Кросс-корреляция, режим сверхвысокой чувствительности
B64	Измерения вносимых фазовых шумов (двухпортовые)
B80	Расширение полосы анализа до 80 МГц
B320	Расширение полосы анализа до 320 МГц

K4	мерение фазовых шумов импульсных сигналов. Примечание:	
	эта опция требуется для измерения фазовых шумов в	
	импульсном режиме работы ИУ	
K6	Измерение параметров импульса – подробный анализ импуль-	
	сов, последовательностей импульсов и их основных	
	параметров. Внутриимпульсная демодуляция.	
K7	Анализ аналоговой модуляции АМ/ЧМ/ФМ	
K30	Измерение коэффициента шума	
K70	Векторный анализ сигналов (анализ сигналов с	
	цифровой/векторной модуляцией)	

Анализатор R&S FSWP позволяет вывести процесс измерения фазовых шумов на новый уровень с точки зрения производительности, скорости измерения и удобства работы. Большинство измерений можно выполнить, просто подключив сигнал к анализатору и нажав на кнопку выбора режима измерений. После завершения измерений можно отобразить на экране кривые для фазового и AM шума, это также верно и для случая измерения фазового шума в импульсном режиме. В случае импульсной модуляции несущей, анализатор автоматически измеряет частоту ВЧнесущей, длительность импульса и ЧПИ сигнала, а затем конфигурирует анализатор для проведения измерений без вмешательства пользователя.

2.1 Измерение фазового шума с помощью анализатора FSW

Перед описанием метода измерения фазового шума с помощью анализатора FSWP имеет смысл рассмотреть классический метод фазового детектора для измерения фазового шума.

2.1.1 Метод фазового детектора для измерения фазового шума

Как правило, высокоточные измерения фазового шума выполняются с помощью калиброванного фазового детектора, в котором величина отклонения фазы несущей пропорциональна напряжению на выходе фазового детектора. Сигнал с выхода фазового детектора проходит через фильтр нижних частот и усиливается до подачи на высокопроизводительный аналогово-цифровой преобразователь или анализатор Фурье.



Опорный генератор

Рисунок 11 – Метод фазового детектора для измерения фазового шума

В большинстве случаев в качестве фазового детектора используется смеситель, к сигнальному входу которого подключено испытуемое устройство (ИУ), а к входу для гетеродина подключен опорный генератор. Опорный генератор настраивается на ту же частоту, что и ИУ, со сдвигом фазы на 90 градусов. При наличии двух входных квадратурных сигналов постоянное выходное напряжение смесителя равно нулю, а кратковременные отклонения фазы преобразуются в переменное напряжение. Анализатор Фурье показывает спектральную плотность флуктуаций фазы, которую можно преобразовать в фазовый шум.

Описанный выше метод часто называют методом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) опорного генератора, т.к. часто он используется для организации обратной связи с выхода фазового детектора на опорный генератор, для поддержания квадратурного соотношения фаз между ИУ и опорным генератором.

При измерении фазового шума импульсной несущей приведенная выше блок-схема обладает рядом ограничений. При подаче импульсного сигнала на вход фазового детектора и непрерывным опорным сигналом гетеродина выходное напряжение фазового детектора также становится импульсным и содержит среднее постоянное значение напряжения (из-за коэффициента заполнения импульсного сигнала), которое часто вводит малошумящий усилитель в режим насыщения. Чтобы этого избежать, как правило, необходимо также использовать опорный сигнал с такой же импульсной модуляцией, как и у ИУ, т.е. стробируя измерения во времени.



Рисунок 11(а) – Метод фазового детектора при импульсном входном сигнале и непрерывном сигнале гетеродина. (Возникновение постоянной составляющей напряжения на выходе фазового детектора в момент паузы между импульсами)

Добавление импульсной модуляции к опорному источнику (гетеродину) приводит к дополнительным сложностям, т.к. пользователю, скорее всего, придется с помощью осциллографа контролировать выходной сигнал фазового детектора, чтобы убедиться в синхронности импульсной модуляции ИУ и опорного сигнала. Если нет идеальной синхронизации этих модулирующих сигналов, на выходе фазового детектора будут наблюдаться так называемые "всплески", из-за которых также может произойти перегрузка малошумящего усилителя.

Кроме того, пользователь также должен подобрать подходящий фильтр нижних частот, чтобы устранить отстройки частоты, превышающие ЧПИ/2. В большинстве систем для измерений фазовых шумов используются аналоговые фильтры, и во многих системах требуемый фильтр может быть недоступен. Для случаев, когда подходящий ЧПИ/2 фильтр недоступен, пользователь вынужден использовать внешний фазовый детектор и внешний ФНЧ, что значительно повышает вероятность воздействия внешнего шума на результаты измерения фазового шума.

2.1.2 Анализаторы фазового шума с кросскорреляционной обработкой

Одним из ограничивающих факторов метода фазовой автоподстройки частоты опорного генератора является то, что производительность такой системы ограничена фазовым шумом опорного генератора. Практическим правилом здесь является выбор генератора, фазовый шум которого как минимум в 10 раз меньше, чем у измеряемого устройства. В большинстве случаев это серьезно ограничивает чувствительность установки. Одним из способов обойти это ограничение является использование двух одинаковых генераторов, предполагая, что итоговый фазовый шум на 3 дБ ниже, чем измеряемый. Часто предположение об идентичности двух источников оказывается неверно и требуется другое решение. Многие годы более подходящим решением было проведение трех измерений фазового шума с тремя похожими генераторами, во время которых каждый генератор являлся поочередно опорным и измеряемым источником. По результатам этих измерений фазовый шум каждого генератора можно было определить, решив три уравнения с тремя неизвестными.



Рисунок 12 – Метод сравнения трех источников

Продолжая совершенствовать технику измерения фазового шума с понижением уровня собственного шума, стало очевидно, что если разделить сигнал ИУ и подать на две независимые системы с автоматической подстройкой частоты опорного генератора собственный шум измерительной установки будет не коррелирован в обоих каналах за счет использования индивидуального источника сигнала гетеродина для каждой из систем, а шум от ИУ будет коррелирован в обоих каналах. При таком подходе можно использовать кросскорреляционную обработку для снижения шума, создаваемого измерительной установкой (прибором).



Рисунок 13 – Измерения фазового шума с кросскорреляционной обработкой

В системе измерения фазового шума с кросскорреляционной обработкой, как показано на рисунке 13, шум прибора в канале 1 не коррелирован с шумом, формируе-

мым в канале 2; поэтому при кросскорреляционной обработке на выходах двух независимых каналов коррелированы будут только сигналы ИУ, а шум измерительной системы снижается на 5 Log₁₀ (M), где М – число корреляций. Таким способом можно снизить шум системы на 10 дБ, если провести 100 кросс-корреляций.

Системы на основе фазовых детекторов с кросскорреляционной обработкой занимали лидирующие позиции на рынке последнее десятилетие или около того, но они все еще обладали тем же недостатком, что и ранние системы: измерения фазового шума по-прежнему зависели от аналоговых компонентов и их возможностей по обработке сигналов. С целью повысить качество самых современных систем измерения фазового шума компания Rohde & Schwarz разработала новый анализатор фазовых шумов, в котором большая часть обработки сигналов перемещена в цифровую область, в которой характеристики системы обладают большей повторяемостью, а калибровку на уровне системы можно упростить.

2.1.3 Блок-схема анализатора FSWP

Как уже упоминалось, анализатор фазовых шумов R&S FSWP использует кросскорреляционную обработку. Как и другие системы с кросс-корреляцией, анализатор FSWP разделяет входной сигнал и подает его на два независимых измерительных канала обработки. Однако, на этом сходство с уже рассмотренными системами заканчивается.



Рисунок 14 – ВЧ блок-схема анализатора FSWP

На рисунке 14 показана упрощенная блок-схема анализатора FSWP. На этой схеме можно четко различить два кросскорреляционных канала, с соответствующими гетеродинами и опорными генераторами, показанными слева. Как и в других кросскорреляционных системах, сигнал разделяется на канал 1 и 2. После разветвителя сигнал для каждого канала проходит через полосовой фильтр и подается на квадратурный смеситель. Аналоговый квадратурный смеситель с помощью сверхмалошумящего опорного генератора переносит сигнал на низкую или нулевую промежуточную частоту, в зависимости от измеряемой отстройки частоты. Сигналы с выходов квадратурных смесителей канала 1 и 2 подаются либо на малошумящий усилитель, либо на усилитель-ограничитель и затем на соответствующий АЦП с частотой

дискретизации 100 млн отсчетов/с. Сигналы с выходов всех четырех АЦП затем подаются на ПЛИС и программное обеспечение на ПК для дальнейшей обработки.

Комплексные низкочастотные сигналы с каждого канала, I и Q, оцифровываются, затем на ПЛИС выполняется их цифровая обработка в реальном масштабе времени.



Рисунок 15 – Обработка сигнала на ПЛИС анализатора FSWP

На рисунке 15 показан принцип обработки сигнала на ПЛИС для одного канала. Сигналы I и Q после оцифровки и последующего выравнивания (эквализации) подаются на цифровой преобразователь с понижением частоты, который формирует поток I-Q данных для дальнейшей обработки. Комбинация аналогового квадратурного смесителя и цифрового эквалайзера обеспечивает подавление паразитной AM более чем на 40 дБ, в отличие от 15-30 дБ в стандартных аналоговых системах ФАПЧ, таким образом, снижая вероятность коллапса взаимного спектра.¹ Коллапс взаимного спектра может возникнуть, если AM шум появляется на обоих входах анализатора кросс-корреляционного спектра, и оказывается инвертированным по фазе из-за не идеальности смесителей, которые используются в качестве фазовых детекторов.

Цифровой преобразователь с понижением частоты позволяет получить точные I и Q сигналы, которые не искажены типичными помехами I-Q демодулятора, такими как I-Q дисбаланс или квадратурные ошибки. После цифрового преобразователя с понижением частоты сигнал проходит через ФНЧ, чтобы устранить высокочастотные гармоники, возникшие после смесителя. После этого сигнал подается на импульсный детектор и цепь шумоподавления, которые используются в случае измерения параметров импульсной несущей. Этот процесс будет более подробно описан в следующих параграфах. Для непрерывных несущих сигнал подается на цифровой ЧМ демодулятор, который заменяет традиционный фазовый детектор систем с ФАПЧ опорного генератора, показанных на рисунках 11 и 13.

Цифровой ЧМ демодулятор передает информацию о низкочастотном дрейфе цифровому преобразователя с понижением частоты для коррекции дрейфа сигнала ИУ и формирует кратковременные флуктуации частоты обрабатываемый ПК посредством БПФ в спектральную плотность флуктуаций частот S_v(f), которую можно легко преобразовать в спектральную плотность флуктуаций фазы S_Φ(f) и фазовый

¹ Nelson, C.W.; Hati, A.; Howe, D.A., "A collapse of the cross-spectral function in phase noise metrology", Rev. Sci. Instrum., vol. 85, 2014.

однополосный шум. Кроме того, параллельно с ЧМ демодулятором работает цифровой АМ демодулятор, позволяя проводить одновременные измерения амплитудного и фазового шума.

Стоит отдельно отметить, что упомянутая выше возможность одновременного измерения амплитудного и фазового шума ИУ без применения отдельных или внешних амплитудных детекторов является очень важной и уникальной особенностью конструкции прибора R&S FSWP дающей возможность измерения таких шумовых параметров без дополнительной пере-коммутации.

2.1.4 Измерение фазового шума импульсной несущей с помощью анализатора FSWP

Как уже упоминалось ранее, существуют проблемы, усложняющие измерение фазового шума импульсной несущей, такие как: отсутствие уникальной информации о фазовом шуме для отстроек частоты, превышающих ЧПИ/2, необходимость использовать ФНЧ на ЧПИ/2 и проблемы, связанные с импульсной модуляцией опорного источника, необходимой для минимизации перегрузки малошумящего усилителя. Дополнительной проблемой, о которой стоит упомянуть, является десенсибилизация (просадка амплитуды) импульса.



Рисунок 16 – Спектр сигнала, отображающий десенсибилизацию импульса. (Желтый – спектр несущей с импульсной модуляцией, синий – спектр непрерывной несущей на той же частоте).

На рисунке 16 показан спектр непрерывной несущей (синяя кривая) и спектр той же самой несущей с импульсной модуляцией (желтая кривая). Следует обратить внимание, что центральная линия спектра импульсного сигнала на 20,07 дБ меньше, чем у непрерывного сигнала. Десенсибилизация импульса возникает из-за того, что

импульсная модуляция несущей "размазывает" спектральную энергию по широкой полосе частот. Общая мощность сигнала не изменяется, она просто оказывается распределенной по полосе частот занимаемой импульсным сигналом (несущая и все боковые полосы). Разница в мощности несущей модулированного и непрерывного сигналов часто называют коэффициентом десенсибилизации импульса, где:

Десенсибилизация импульса (дБ) = 20 Log₁₀(т/T) или 20 Log₁₀(коэфф-т заполнения)

Для спектра импульсного сигнала, изображенного на рисунке 16, длительность импульса составляет 10 мкс, а период повторения импульса 100 мкс, таким образом, десенсибилизация равна 20 дБ.

Как это влияет на измерение фазового шума?

Для анализируемого сигнала импульсная модуляция снижает мощность несущей на 20 дБ, приближая измерения на 20 дБ ближе к уровню собственных шумов анализатора. Теоретически, нижний порог измерения фазового шума ограничен тепловым шумом. Тепловой шум, если воспользоваться формулой kTB, при комнатной температуре равен -174 дБмВт/Гц. Так как фазовый шум и AM шум вносят равный вклад в тепловой шум kTB, вклад фазового шума в тепловой шум kTB составляет -177 дБмВт/Гц (на 3 дБ меньше, чем полная мощность теплового шума kTB).

Теоретические пределы kTB измерения фазовых шумов для низкоуровневых сигналов				
Р _в (дБмВт)	Д (f) дБн/Гц			
+10	-187			
0	-177			
-10	-167			
-20	-157			

Если мощность сигнала несущей мала, например, -20 дБмВт, предел, до которого можно измерить фазовый шум, это разница между мощностью сигнала несущей и вкладом фазового шума в тепловой шум kTB (-177 дБмВт/Гц- (-20 дБмВт) = = -157 дБн/Гц). Повышение мощности сигнала позволит измерить фазовый шум до более низкого уровня дБн/Гц.

В итоге, десенсибилизация импульса снижает чувствительность измерения фазового шума, поэтому для систем с фазовым

детектором необходимо использовать постоянную импульсного фазового детектора для компенсации изменения уровня выходного сигнала фазового детектора.

Обработка сигнала импульсной несущей в анализаторе FSWP

Приведенное выше описание десенсибилизации импульса необходимо для пояснения важного различия между анализатором FSWP и классическими системами измерения фазового шума. После блок-схемы цифровой обработки сигнала в анализаторе FSWP, показанной на рисунке 15, отсчеты импульсного сигнала попадают в программное обеспечение анализатора FSWP, в котором используются продвинутые алгоритмы обнаружения импульса для установки маркеров начала и конца каждого импульса.

Маркеры импульсов используются блоком обнаружения импульсов, показанном на рисунке 15, для автоматического определения длительности и периода повторения импульсного модулирующего сигнала. Длительность импульса используется для установки параметров стробирования по импульсу, таким образом, анализатор FSWP обрабатывает информацию о фазовом шуме только во время появления импульса. Так как для измерения фазового шума вблизи несущей необходимо очень высокое разрешение по частоте, анализатор FSWP должен использовать длительное время записи (во много раз больше, чем период повторения импульсов) для обработки сигнала. Используя стробирование по фронту "Edge" анализатор FSWP выполняет точное стробирования во времени (как правило, 75% от длительности импульса) внутри импульса и вычисляет коэффициент заполнения на основе длительности строба и периода сигнала. Так как блок шумоподавления полностью обнуляет сигнал между импульсами, уровень шума снижается на 10•Loq₁₀(коэффициент заполнения), компенсируя половину потерь из-за десенсибилизации импульса. Кроме того, зная коэффициент заполнения импульсного сигнала, схема цифровой обработки сигналов анализатора FSWP может использовать усиление для компенсации оставшейся части потерь из-за десенсибилизации импульса. Для получения оптимальной производительности измерений фазового шума импульсной несущей, необходимо использовать запуск по фронту Edge, см. рисунок 17 и пояснение ниже.



Рисунок 17 – Меню конфигурации "Pulse config" анализатора FSWP

На рисунке 17 показан экран конфигурации при измерении импульсных сигналов анализатора FSWP. В данном меню можно включить автоматическое или ручное обнаружение импульсов. По умолчанию используются автоматическое обнаружение. В этом режиме анализатор автоматически обнаруживает импульсы и центрирует временной строб по центральным 75% длительности импульса. Временное стробирование можно отключить с помощью переключателей Gate Type (что может привести к уменьшению чувствительности системы) или переключить в режим запуска по уровню (Level), в котором можно задать требуемый уровень стробирования. Наконец, в режиме ручного обнаружения импульсов можно задать задержку и длительность строба для измерения на конкретном участке импульса. На графике в верхней части меню, задержка строба отображается синей строкой в нижней левой части импульса и помечена как GD. Пурпурная строка отображает время, в течение

которого срабатывает строб, и анализатор FSWP проводит измерения фазового шума. Обычно, для измерения фазового шума необходимо использовать сотни импульсов. Отсюда можно сделать вывод, что предпочтительнее использовать сигналы с постоянной ЧПИ. Опытные пользователи могут, при желании, вручную изменить задержку и длительность строба для измерения фазового шума в конкретной области импульса. Однако следует заметить, что если строб выйдет за пределы импульса, к результатам измерения будет добавлен дополнительный шум (шум паузы), что ограничит технические характеристики анализатора.

Еще один достойный упоминания момент – это требуемая для измерения фазового шума минимальная длительность импульса. Если вспомнить блок схему, после квадратурного смесителя расположены четыре аналогово-цифровых преобразователя с частотой дискретизации 100 млн отсчетов/с. Для измерения фазового шума с помощью анализатора FSWP необходимо по крайней мере десять отсчетов на импульс; таким образом, минимальная длительность импульса составляет 100 нс. Большинство систем измерения фазового шума на основе ФАПЧ обладают достаточно серьезными ограничениями на минимальный коэффициент заполнения из-за десенсибилизации импульса. Анализатор R&S FSWP не настолько чувствителен к минимальному коэффициенту заполнения и остается способным выполнять точные измерения с коэффициентом заполнения менее 1%.

Снова возвращаясь к рисунку 15: синим прямоугольником выделен блок обработки сигналов, предназначенный для измерения импульсных несущих. Опять же, на основе маркеров начала и конца импульсов, полученных в программном обеспечении К6, детектор импульсов формирует стробы для блока шумоподавления. Блок шумоподавления обнуляет сигнал за пределами длительности импульса, что позволяет полностью устранить весь широкополосный шум между импульсами, тем самым повысив динамический диапазон измерений.

Далее следует блок IQLP. Это цифровой ФНЧ, вычисляемый на ПЛИС для подавления частотных составляющих лежащих за пределами ЧПИ/2, которые не содержат уникальной информации о фазовом шуме. Такой подход обеспечивает ключевое преимущество анализатора FSWP по сравнению с большинством систем измерения фазового шума. В большинстве существующих систем пользователь должен сам определить ЧПИ сигнала и вручную выбрать подходящий ФНЧ. Обычно, подходящий фильтр не реализован в измерительной системе, и приходиться использовать внешний фильтр. Что еще хуже, большинство таких систем не содержат разъема, к которому пользователь мог бы подключить подходящий фильтр, и приходиться использовать внешний фильтр.

Анализатор FSWP позволяет значительно облегчить этот процесс, благодаря автоматическому формированию подходящего фильтра, что освобождает пользователя от необходимости проделывать всю эту работу самостоятельно. Кроме того, на результаты измерения не влияют внешние фильтры и фазовые детекторы, которые являются дополнительным источником помеховых сигналов и шумов. Еще одним ключевым преимуществом анализатора FSWP является основанное на цифровой обработке сигналов обнаружение импульсов и их обработка, которая позволяет стробировать импульсы и проводить измерения в центральной части импульса, без необходимости иметь дело с переходными процессами, а также компенсировать потери от десенсибилизации импульса, о чем уже говорилось ранее.

Наконец, можно привести пример измерения фазового шума импульсной несущей с помощью анализатора FSWP. Как и раньше, будет использоваться импульс длительностью 10 мкс, который уже упоминался в этой статье.

На рисунке 18 показаны результаты одновременного измерения фазового и AM шума на анализаторе FSWP. Результаты полного измерения фазового шума импульсного сигнала получены менее чем за одну минуту, после простой установки параметров и нажатия всего нескольких кнопок.



Рисунок 18 – Результаты измерения фазового и амплитудного шума импульсной несущей с помощью анализатора FSWP

3 Заключение

Анализатор фазовых шумов FSWP от компании Rohde & Schwarz выводит производительность систем измерения фазовых шумов ВЧ и СВЧ-сигналов на новый уровень, а также облегчает проведение измерений. Благодаря переводу процесса обработки фазового шума от традиционных аналоговых детекторов в область цифровой обработки сигналов, анализатор FSWP обладает повышенной чувствительностью и упрощенной системой настройки и калибровки прибора. Благодаря размещению всего необходимо аппаратного обеспечения в одном корпусе, пользователь освобождается от утомительной работы с соединительными кабелями и получает значительное сокращение рабочего пространство, занимаемого системой. Ключевыми особенностями анализатора FSWP являются:

- Простой графический интерфейс пользователя на основе сенсорного экрана, облегчающий взаимодействие с прибором
- Диапазон частот от 1 МГц до 8/26,5/50 ГГц, без необходимости использовать внешние смесители или преобразователи с понижением частоты².
- Внутренний источник сигнала (Опция В64) для (двухпортовых) измерений остаточных (вносимых) фазовых шумов³. Кроме того, для проведения измерения вносимых шумов не требуются внешние линии задержки или фазовращатели, использование которых необходимо при реализации классических схем измерения с фазовым детектором.
- Измерение фазовых шумов импульсных сигналов с системой автоматического определения импульсов и ФНЧ с частотой ЧПИ/2, реализованным в блоке цифровой обработки сигналов
- Два независимых канала низкочастотных сигналов с полосой пропускания от 0 до 40 МГц
- Три встроенных малошумящих источника питания для питания ИУ и формирования подстроечного напряжения для ГУН. Источник питания обеспечивает ток до 2 Ампер.
- Одновременные измерения амплитудных и фазовых шумов без подключения внешнего АМ детектора
- Улучшенное на 15-30 дБ подавление паразитной АМ по сравнению с традиционными системами фазовых детекторов

³ Подробнее об измерении вносимых фазовых шумов вы можете узнать из руководства по применению 1EF100_2e – «Измерение уровня вносимого шума четырехполюсников» на сайте www.rohde-schwarz.com.

² Для расширения частотного диапазона измерений до 500ГГц и выше возможно подключение внешних смесителей.

- Опциональный встроенный анализатор спектра и сигналов высшего класса (Опция В1) с полосой анализа(демодуляции) до 320 МГц
- Опциональный встроенный векторный анализатор сигналов (Опция К70)
- Опциональное ПО для анализа импульсов РЛС/РЭБ (K6/K6S)
- Опциональное расширение для анализа стабильности фазы и амплитуды импульсных сигналов К6Р
- Опциональное ПО для анализа аналоговой модуляции АМ, ЧМ и ФМ (К7)
- Опциональное измерение коэффициента шума (Опция К30)
- Защита от несанкционированного использования (Опция КЗЗ)

Наконец, в дополнении к описанному выше вкладу прибора FSWP в область современных методов измерения фазовых шумов, FSWP работает примерно в 100 раз быстрее предыдущего поколения систем измерения фазовых шумов от компании Rohde & Schwarz. Анализатор FSWP является прекрасным дополнением для любой ВЧ и СВЧ лаборатории, связанной с измерениями фазовых шумов импульсных и непрерывных сигналов.

Rohde & Schwarz

Группа компаний Rohde & Schwarz предлагает инновационные решения в следующих направлениях: контрольно-измерительные системы и приборы, оборудование для теле- и радиовещания, системы профессиональной радиосвязи специального назначения, защита информации, системы радиомониторинга и радиопеленгации. Основанная более 80 лет назад, эта независимая компания имеет представительства и сервисные центры более чем в 70 странах.

Группа компания является одним из мировых лидеров в своей сфере деятельности. Штабквартира компании находится в Мюнхене, Германия. Rohde & Schwarz также имеет офисы в г. Нижний Новгород Сингапуре и Колумбии (штат Мэриленд, США), управляющие деятельностью компании в этих регионах.

Всю подробную информацию о продуктах и методиках, описанных в данной публикации вы можете получить в любом офисе Rohde & Schwarz

ROHDE & SCHWARZ В РОССИИ

г. Москва 117335, Нахимовский проспект, 58 тел.: +7 (495) 981 35 60 sales.russia@rohde-schwarz.com

г. Санкт-Петербург 197101, ул. Дивенская, д. 1, офисы 606 и 604 тел.: +7 (812) 448 65 08 sales.petersburg@rohde-schwarz.com

г. Новосибирск 630132, ул. Красноярская, д. 35, офис 1603 тел.: +7 (383) 230 39 91 sales.novosibirsk@rohde-schwarz.com

г. Красноярск 660135, ул. Весны 3а, БЦ «Весна», офис 410 тел.: +7 (391) 276 16 53

г. Нижний Новгород 603000, ул. Максима Горького, д. 117, офис 509 тел.: +7 (831) 233 03 00 тел.: +7 (831) 233 03 01 sales.nnovgorod@rohde-schwarz.com

г. Ростов-на-Дону 344018, ул. Текучева, д. 139/94, Clover House, офис 434 тел.: +7 (863) 206 20 29 тел.: +7 (928) 125 22 74 sales.rostov@rohde-schwarz.com

г. Екатеринбург 620142, ул. 8 марта, д. 51, офис 702 тел.: +7 (343) 311 00 72 sales.ekaterinburg@rohde-schwarz.com

г. Казань 420034, ул. Декабристов, д. 85б, офис 712 тел.: +7 (843) 567 27 51 sales.kazan@rohde-schwarz.com

г. Воронеж 394030, ул. Комиссаржевской, д. 10, офис 1213 тел.: +7 (473) 206 55 78 e-mail: sales.voronezh@rohde-schwarz.com

www.rohde-schwarz.com/ru

AD-T-M: 3573.7380.02/02.04/EN/

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG Mühldorfstraße 15 | 81671 Munich, Germany Телефон + 49 89 4129 - 0 | Факс + 49 89 4129 – 13777

www.rohde-schwarz.com