

Вопросы метрологического обеспечения средств измерений фазового шума

А. Чадин¹

УДК 621.317 | ВАК 05.11.01

Для измерений фазового шума используются современные высокоточные анализаторы источников сигналов, анализаторы фазового шума и анализаторы спектра, обеспечение единства измерений которых представляет собой нетривиальную задачу в условиях постоянно возрастающих требований к измерительным задачам. В статье предложено решение по метрологическому обеспечению средств измерений фазового шума с использованием эталонного воздействия на основе частотно-модулированного сигнала.

В настоящее время в Российской Федерации обеспечение единства измерений спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения осуществляется при помощи государственного первичного эталона ГЭТ 21-2011 и поверочной схемы, приведенной в ГОСТ Р 8.860-2013. При этом данная государственная поверочная схема не распространяется на средства измерений фазового шума. В связи с широким применением высокостабильных источников сигналов в различных отраслях промышленности, возросла и потребность в задачах измерения фазового шума. Соответственно и парк средств измерений фазового шума постоянно растет, что обуславливает возросший интерес к обеспечению единства измерений таких средств измерений.

Существует несколько схемотехнических решений построения средств измерений фазового шума. Они отличаются способом преобразования измеряемого сигнала: с применением фазового или частотного детекторов, либо по схеме супергетеродинного приемника. Наиболее распространенные из них: метод прямого детектирования (анализатор спектра), метод фазового детектора (анализатор фазового шума) и метод частотного дискриминатора (анализатор источников сигнала).

Для оценки метрологических характеристик средств измерений фазового шума используются различные методы и средства [1], в том числе и на базе серийно выпускаемых приборов (рис. 1). Анализ существующих методов показал, что некоторые из них являются избыточно дорогими для проверки рабочих средств измерений.

Из рис. 1 видно, что оценка погрешности средств измерений фазового шума проводится при использовании эталонов других физических величин. Это означает, что измеряемая величина (спектральная плотность мощности фазового шума) определяется без прямого сравнения

с эталоном для нее, а единство измерений обеспечивается посредством измерения величины ослабления или линейности [2].

Известно, что суммарное распределение фазового шума состоит из нескольких основных составляющих, обусловленных частотным шумом случайных блужданий, частотным фликер-шумом, белым частотным шумом, фазовым фликер-шумом и белым фазовым шумом [3].

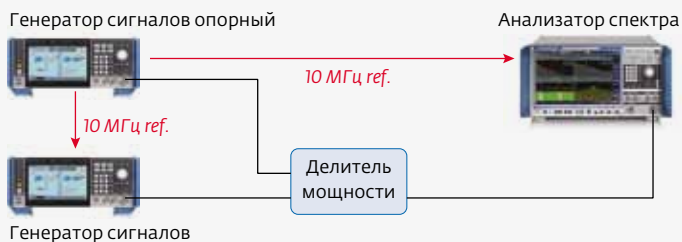
В области частот, близкой к несущей, преобладают частотные шумы случайных блужданий, связанные с воздействием на электронные компоненты устройства дестабилизирующих факторов. Источниками частотного фликер-шума служат активные элементы и резонаторы генератора. Белый частотный шум вызывается наличием источников аддитивного белого шума, например теплового шума, действующих внутри контура обратной связи генератора. Фазовый фликер-шум обусловлен шумящими электронными узлами (выходными усилителями или умножителями частоты). Белый фазовый шум обычно вызывается источниками аддитивного белого шума, внешними по отношению к цепи обратной связи генератора. Таким образом, влияние аддитивного белого шума на частоту и фазу сигнала порождает паразитную частотную модуляцию и паразитную фазовую модуляцию. Спектральная плотность мощности белого частотного и фазового шумов $L(f)$ пропорциональна величинам $1/f^2$ и $1/f^0$ соответственно, что эквивалентно спаду спектральной плотности мощности 20 и 0 дБ/декада соответственно.

Качественная сторона явлений сохранится и в случае с модуляцией частоты белым шумом, так как его действие, по крайней мере в среднеквадратическом смысле, всегда можно заменить на действие большого числа гармонических колебаний. Таким образом, используя свойства частотно-модулированных сигналов при малом индексе модуляции, возможно рассчитать спектральную плотность мощности фазового шума на различных отстройках по частоте от несущей как отношение одной боковой полосы

¹ ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, г. Мытищи, начальник лаборатории, cav213250@gmail.com.

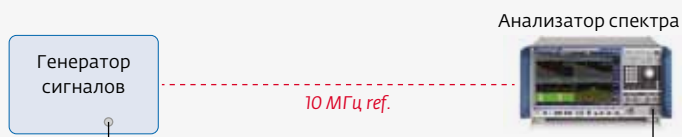
Метод сравнения

Относительные измерения интенсивности двух сигналов. Применимость метода ограничена дискретными значениями частот отстройки от несущей (100 Гц; 1, 10, 100 кГц)



Метод непосредственной оценки

Измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Применимость метода ограничена значениями несущей частоты эталонного источника сигнала (100 МГц и 1 ГГц)



Поэлементный метод

Определение погрешности амплитудных измерений и частотной неравномерности тракта преобразования. Трудоемкий процесс определения частных составляющих погрешности



Рис. 1. Существующие методы оценки погрешности средств измерений фазового шума

шумов к полной мощности сигнала с помощью функций Бесселя относительно индекса модуляции β . Для практического применения индекс модуляции β заменяется на девиацию частоты [4, 5].

Целью данной работы является показать применимость сигнала с модуляцией частоты белым шумом в качестве меры спектральной плотности мощности фазового шума при оценке погрешности средств измерений фазового шума.

МЕТОД

Учитывая вышесказанное, для решения задачи оценки погрешности средств измерений фазового шума должен быть использован метод непосредственной оценки, заключающийся в сравнении измеряемой величины с величиной, воспроизводимой мерой – сигналом с известным распределением спектральной плотности мощности фазового шума на различных отстройках по частоте от несущей.

При реализации данного метода необходимо учитывать ширину полосы модуляции шумового сигнала и режим работы измерителя: режим анализатора спектра (метод прямого детектирования) или режим анализатора фазового шума (метод фазового детектора). Анализатор спектра не способен измерять отдельно амплитудные и фазовые шумы, а суммарная спектральная плотность мощности сигнала состоит из мощности флуктуаций амплитуды и флуктуаций фазы. Их вероятность воздействия на сигнал равна, что необходимо учитывать при измерениях

анализатором спектра [6]. Таким образом, расчетное значение спектральной плотности мощности фазового шума сигнала в случае модуляции частоты белым шумом определяется выражением:

$$L(f_{отс.}) = 20 \cdot \lg(f_{dev.} / (k \cdot f_{отс.})) - 6, \tag{1}$$

где $f_{dev.}$ – девиация частоты, Гц;
 $f_{отс.}$ – частота отстройки от несущей, Гц;

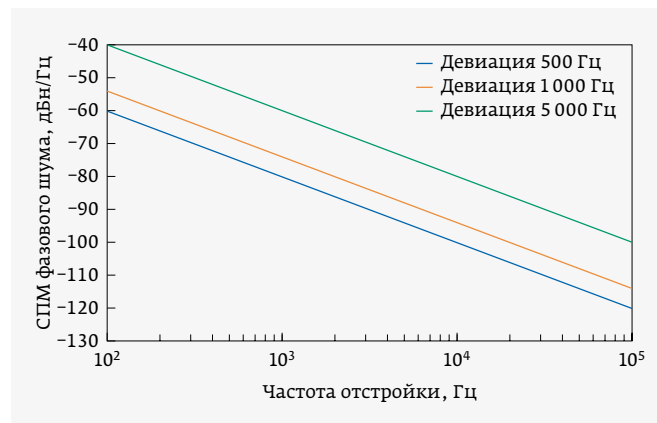


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности мощности (СПМ) фазового шума от частоты отстройки для различных девиаций частоты сигнала



Рис. 3. Схема измерений параметров частотно-модулированного сигнала

k – коэффициент пропорциональности, определяющий максимальное изменение частоты при заданной амплитуде модулирующего напряжения.

На рис. 2 представлены расчетные значения спектральной плотности мощности фазового шума от частоты отстройки для различных девиаций частоты сигнала.

Для формирования сигнала с рассчитанным распределением спектральной плотности мощности фазового шума (см. рис. 2) в виде потока комплексных I/Q-данных использовался пакет прикладных программ Matlab. Сформированный массив данных через интерфейс связи поступает на цифро-аналоговый преобразователь векторного генератора сигналов, с выхода которого частотно-модулированный сигнал подается на вход анализатора спектра для измерений спектральной плотности мощности фазового шума.

Схема измерений спектральной плотности мощности фазового шума с использованием частотно-модулированного сигнала приведена на рис. 3.

На рис. 4 представлены амплитудные спектры гармонического сигнала без модуляции и частотно-модулированного сигнала с девиацией частоты 500 и 1500 Гц. Из

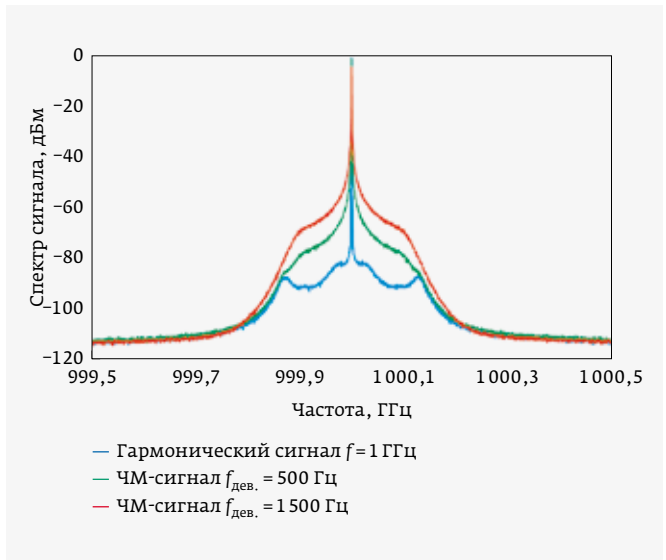


Рис. 4. Амплитудный спектр частотно-модулированного сигнала на анализаторе спектра

рис. 4 видно, что уровень боковых составляющих спектра частотно-модулированного сигнала повышается с увеличением девиации частоты относительно немодулированного сигнала, что эквивалентно изменению уровня спектральной плотности мощности фазового шума вблизи несущей.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перейдя в опциональный режим измерений фазового шума на анализаторе спектра, мы получим результаты, которые представлены на рис. 5. Как видно из рис. 5, наклон спектральной плотности мощности фазового шума составляет расчетные 20 дБ/декада.

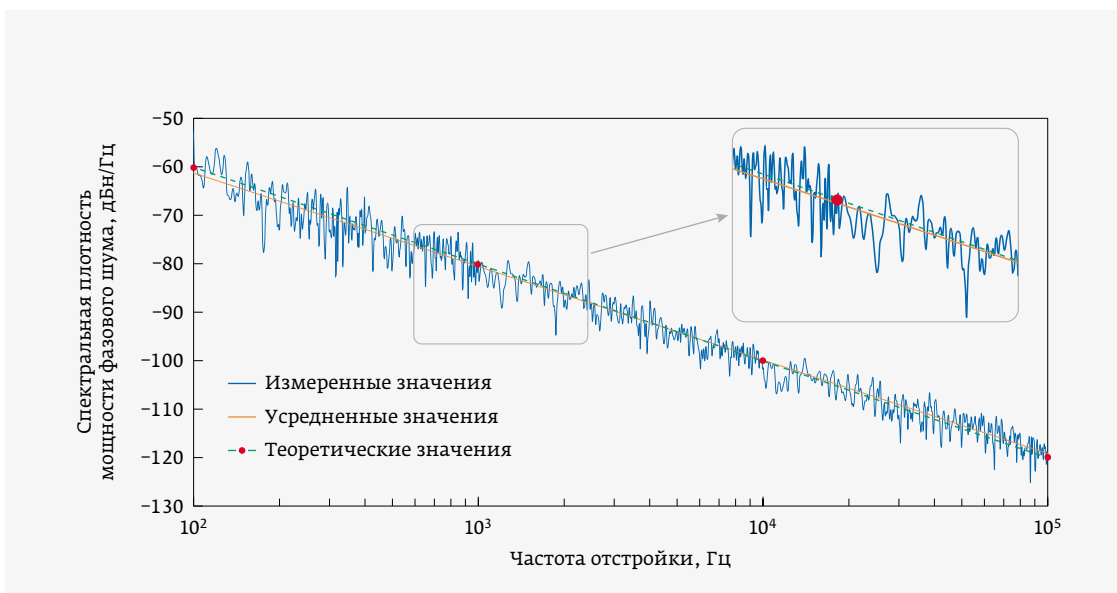


Рис. 5. Измеренные значения спектральной плотности мощности фазового шума генератора сигналов

Таблица 1. Результаты измерений и вычислений абсолютной погрешности

Спектральная плотность мощности фазового шума	Отстройка от несущей, Гц			
	100	1 000	10 000	100 000
Расчетные значения, дБн/Гц	-60,0	-80,0	-100,0	-120,0
Измеренные значения, дБн/Гц	-58,8	-78,9	-99,2	-199,3
Абсолютная погрешность ΔL , дБ	1,2	1,1	0,8	0,7
Пределы допустимой абсолютной погрешности ΔL , дБ	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 2,0$

Абсолютная погрешность вычисляется как разница между измеренным значением спектральной плотности мощности фазового шума $L_{изм.}$ и рассчитанным $L_{теор.}$:

$$\Delta L = L_{изм.} - L_{теор.} \quad (2)$$

Результаты вычислений и измерений спектральной плотности мощности фазового шума для девиации частоты сигнала 500 Гц приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что отклонение измеренного значения спектральной плотности мощности фазового шума от теоретического значения не превышает допустимых пределов для конкретного типа средства измерений.

* * *

Предложенный подход к оценке погрешности средств измерений фазового шума позволяет сократить при поверке применяемую номенклатуру средств измерений, что приводит к уменьшению в 1,5–2 раза времени, затрачиваемого на проведение сложных измерений по определению значений собственных параметров СВЧ-тракта и измерительной системы в целом, с требуемой погрешностью в диапазоне отстроек от 100 Гц до 100 кГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Measurement Uncertainty Analysis and Traceability for Phase Noise: [Электронный ресурс] // Компания Rohde&Schwarz. URL: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ef95___fswp_uncertainty_analysis/1EF95_0e_FSWP_uncertainty_analysis.pdf. (Дата обращения: 10.07.2016)
2. **Фельдхауз Г., Рёзель Г., Рот А., Волле Й.** Фазовый шум: анализ погрешностей и единство измерений // Главный метролог. 2021. № 1/118. С. 34–41.
3. **Андронов Е. В., Глазов Г. Н.** Теоретический аппарат измерений на СВЧ: Т.1. Методы измерений на СВЧ. Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. 804 с.
4. **Рыжков А. В., Попов В. Н.** Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь. 1991. 264 с.
5. **Манасевич В.** Синтезаторы частот (теория и проектирование) / Пер. с англ.; под ред. А. С. Галина. М.: Связь. 1979. 384 с.
6. **Корнилов С. А., Савшинский В. А., Уман С. Д.** Шумы клистронных генераторов малой мощности. М.: Советское радио, 1972. 200 с.

ЭЛЕКТРОНИКА
НАНОИНДУСТРИЯ
ФОТОНИКА
ПЕРВАЯ МИЛЯ
Аналитика
СТАНКОИНСТРУМЕНТ

ИНФО ПРОСТРАНСТВО ФЕССИОНАЛОВ

Мы на YouTube

Подписывайтесь