

Кросскорреляционный анализ спектра фазовых флуктуаций СВЧ сигналов вблизи несущей

Рассмотрены несколько методов измерения спектров фазовых флуктуаций гармонических сигналов СВЧ: с применением анализатора спектра, синхронного детектора и двухканальной системы синхронного детектирования с вычислением взаимного спектра каналов. Выбран последний метод, обеспечивающий наилучшие характеристики чувствительности. Приведены результаты реализации макетного анализатора спектра НЧ и фазовых флуктуаций СВЧ сигналов. Приведены результаты измерений спектров фазовых шумов источников СВЧ с разным их уровнем и в сравнении с эталонными измерениями.

Ключевые слова: фазовый шум, анализатор спектра, СВЧ, взаимный спектр.

Введение

Влияние амплитудных и фазовых шумов несущих сигналов на характеристики радиотехнических систем хорошо изучено [1]. Постоянно растущие требования к качеству сигналов приводят к необходимости создания высокочувствительной аппаратуры для анализа тонкой структуры сигналов: флуктуаций и помех в дискретном спектре.

Несмотря на успехи в построении анализаторов спектра, остаются существенные ограничения по чувствительности измерений с их помощью. В силу специфики структурной схемы широкополосных универсальных анализаторов, чувствительность измерений ограничивается на уровне минус 140...130 дБн/Гц на частотах ниже 2...3 ГГц и не зависит от частоты. На высоких частотах ограничение связано исключительно с качеством первого гетеродина и составляет около минус 130 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей 10 ГГц. В дополнение к этому, невозможность отделить амплитудные флуктуации от фазовых вполне может привести к ухудшению указанных характеристик. Несложные математические операции с цифрами показывают, что даже в лучшем случае удастся анализировать спектр недорогих источников СВЧ, построенных с применением распространенных микросхем ФАПЧ. Кварцевые генераторы измерять сложнее, а генераторы на ДР или генераторах с дисковыми сапфировыми резонаторами на модах "шепчущей галереи" невозможно.

Первый шаг, который позволяет ослабить влияние амплитудных флуктуаций на результаты измерений – это применение синхронного детектора (местный опорный источник и смеситель в режиме фазового детектора). Чувствительность измерений, как и в случае анализатора спектра, ограничится опорным источником.

Второй шаг, улучшающий чувствительность измерений – двухканальная система синхронного детектирования с вычислением взаимного спектра каналов. Оба канала должны быть независимы – иметь индивидуальные источники, фазовые детекторы и т.д. Шумы каналов, будучи некоррелированными, будут подавлены при вычислении взаимного спектра. Последний будет стремиться к спектру флуктуаций входного сигнала.

Многоканальная система

Пусть имеются два независимых канала (В и С) синхронного детектирования. Для простоты выкладок примем, что амплитуды опорных источников в обоих каналах одинаковы и равны B . Фазовые шумы входного сигнала и опорных источников каналов характеризуются соответственно $\varphi(t)$, $\psi(t)$ и $\zeta(t)$. Тогда

$$UB(t) = K_{\varphi} \cdot \varphi(t) + K_{\psi} \cdot \psi(t), \quad (6)$$

$$UC(t) = K_{\varphi} \cdot \varphi(t) + K_{\zeta} \cdot \zeta(t). \quad (7)$$

где $K_{\varphi} = \frac{A \cdot B}{2}$ – коэффициент передачи детектора, а A и B – амплитуды входного и опорных сигналов соответственно.

Взаимный спектр двух каналов, учитывая, что все три процесса $\varphi(t)$, $\psi(t)$ и $\zeta(t)$ некоррелированы [2],

$$S_{BC}(f) = K_{\varphi}^2 \cdot |S_{\varphi}(f)|^2. \quad (8)$$

Взаимный спектр двух каналов всегда действительный и положительный, определяющийся только спектром шумов входного сигнала.

В реальности приходится иметь дело с дискретным преобразованием Фурье и выборками ограниченной длины, которые естественно приводят к появлению мнимых составляющих при вычислении произведения спектров каналов. Учитывая это, мнимую составляющую следует отнести, скорее, к влиянию каналов, и при обработке результатов не учитывать. Или использовать ее для косвенной оценки влияния шумов каналов на результат вычисления. Предполагая эргодичность случайных процессов, фигурирующих в системе, можно перейти от усреднений по реализациям к усреднению по времени [2]. Таким образом, можно усреднять взаимные спектры каналов по мере накопления данных и их обработки и постепенно сводить мнимый взаимный спектр каналов к нулю, выигрывая по чувствительности 5 дБ на декаду количества усреднений [3].

Влияние взаимной связи между каналами

Конечные развязки между входами фазовых детекторов приводят к просачиванию одного опорного сигнала на вход другого канала. Предполагая, что перекрестная связь взаимна, выразим ее величину параметром α – величиной подавления опорного сигнала одного канала при попадании его на вход другого канала. Тогда

$$S_{BC}(f) = K_{\varphi}^2 \cdot (S_{\varphi}(f) + S_{\psi}(f) + \alpha \cdot S_{\zeta}(f)) \cdot (S_{\varphi}^*(f) + S_{\psi}^*(f) + \alpha \cdot S_{\zeta}^*(f)). \quad (9)$$

Если принять шумы каналов равными, то

$$S_{BC}(f) = K_{\varphi}^2 \cdot (|S_{\varphi}(f)|^2 + |\sqrt{2\alpha} S_{\psi}(f)|^2). \quad (10)$$

Тогда произведение $|\sqrt{2\alpha} S_{\psi}(f)|$ определит предельную чувствительность системы и способы ее повышения.

Реализация низкочастотного анализатора спектра с кросс-спектральной обработкой

Для отработки основных алгоритмов цифровой обработки был реализован двухканальный анализатор спектра 100 Гц ... 20 МГц с прямой оцифровкой входного сигнала. Ниже показаны спектры каналов и их произведение в виде действительной и мнимой частей (взаимный спектр) при подключенной ко входу согласованной нагрузке. Подход к отображению результатов таков, что количество точек отображения меньше числа точек в спектрах и первые распределяются равномерно в пределах декады. Ближайшие точки спектра к точкам отображения усредняются в комплексном виде.

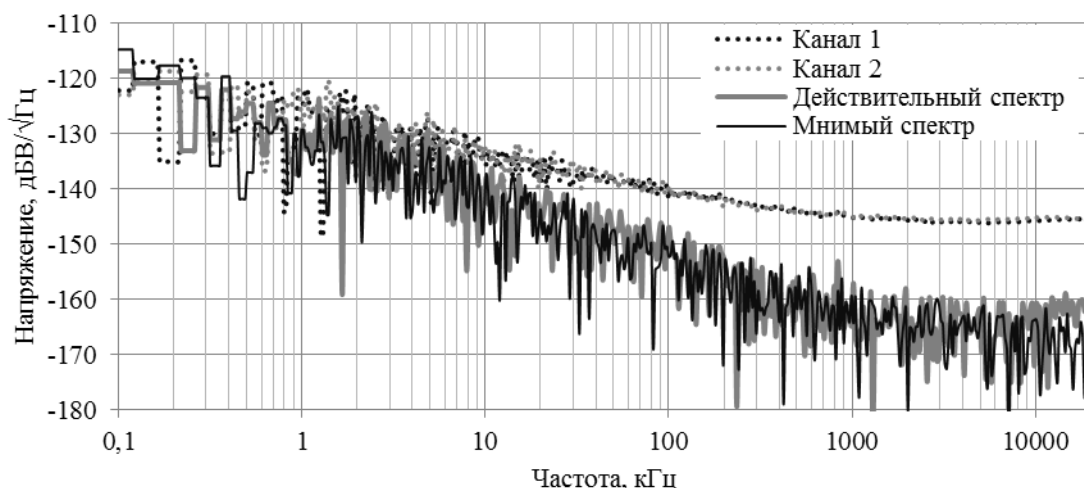


Рис. 1. Индивидуальные и взаимные спектры каналов

Примечательно, что уровень шума в каналах на больших частотах соответствует уровню шума, заявленному в описании на АЦП [4]. Так как резистор 50 Ом, подключенный ко входу, шумит равномерно со среднеквадратическим значением напряжения $0,9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, то можно сделать вывод, что коэффициент шума каналов очень высок.

По взаимному спектру видно существенное улучшение чувствительности системы на высоких частотах, а значит, мгновенный динамический диапазон. Дело в том, что при описанном выше подходе к отображению результатов, количество усредняемых спектральных компонент пропорционально растет при росте частоты в силу расширения частотного интервала усреднения. Это приводит к уже известному эффекту повышения чувствительности на 5 дБ на декаду количества усреднений [3]. Таким образом, взаимный спектр оказывается похожим на спектры каналов, с дополнительным наклоном 5 дБ на декаду. К тому же, динамический диапазон можно увеличивать, наращивая длину выборки. Это было подтверждено в экспериментах (см. рис. 2).

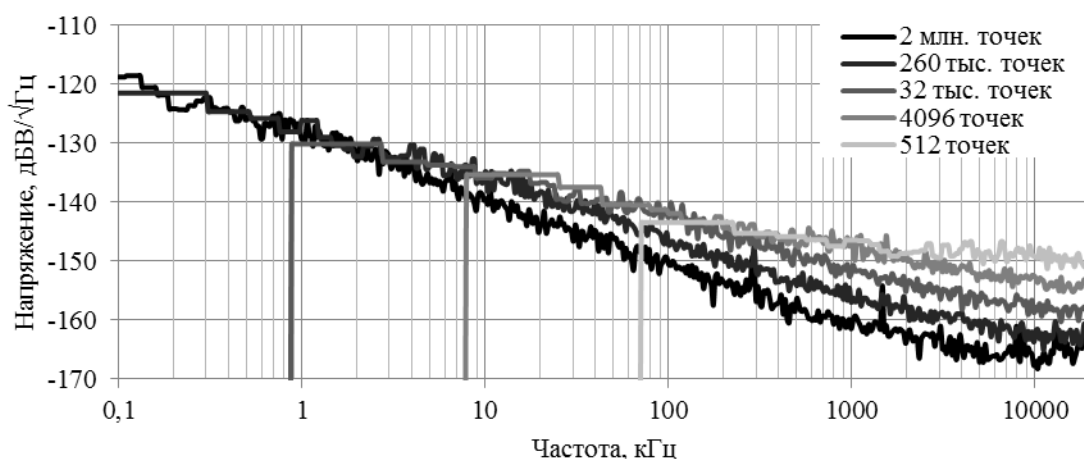


Рис. 2. Действительный взаимный спектр при различных длинах выборки

Измерение с дополнительными МШУ в каналах с коэффициентами усиления 30 дБ и максимально длинной выборкой 4 млн. отсчетов позволило наблюдать часть спектра шумов резистора на входе системы.

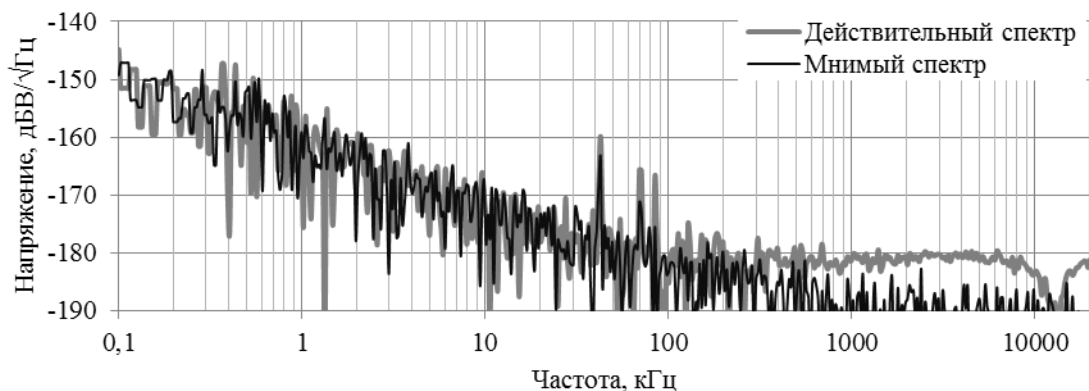


Рис. 3. Взаимный спектр каналов при максимальном усилении и длине выборки

Видно, что в области, где преобладает действительный спектр, его значение соответствует значениям шума резистора сопротивлением 50 Ом. На низких частотах проявляется избыточный фликкер-шум системы. Природа провала на частотах выше 10 МГц пока не ясна.

Реализация анализатора спектра фазовых шумов с кросс-спектральной обработкой

Следующим шагом стало построение двухканальной системы измерения фазовых шумов с синхронным фазовым детектированием. Была получена работоспособная система с автоматической настройкой и калибровкой. В тестах использовались два источника СВЧ на частоты 3,5 и 6 ГГц с разным качеством спектра фазовых шумов. 6 ГГц получались от генераторно-измерительного блока скалярного анализатора цепей P2M-18 Микран [5], 3,5 ГГц – от второго гетеродина анализатора спектра СК4М-18 Микран [6]. Для верификации измерений спектры шумов источников были измерены на E5052B Keysight Technologies.

Результат измерения спектра шумов сигнала 6 ГГц показан ниже. Как видно из рисунка, расхождение минимально.

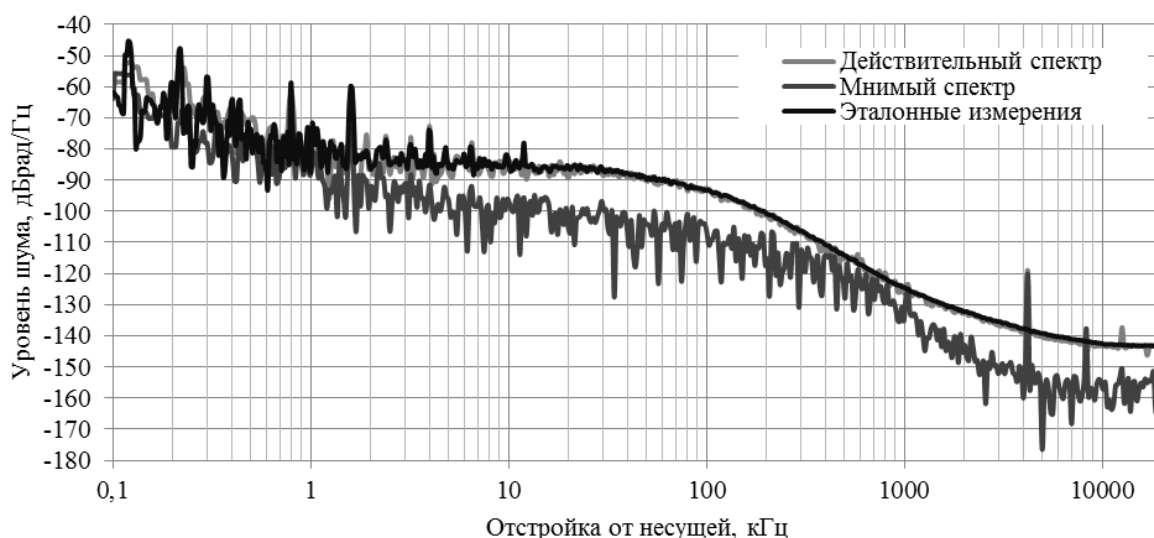


Рис. 4. Измерение спектра фазовых шумов сигнала с частотой 6 ГГц

Ниже показан результат измерений малошумящего второго гетеродина СК4М-18 с частотой 3,5 ГГц. Видно, что по чувствительности система пока уступает эталонному прибору, отчасти благодаря относительно короткой выборке и, видимо, относительно шумящим гетеродинам.

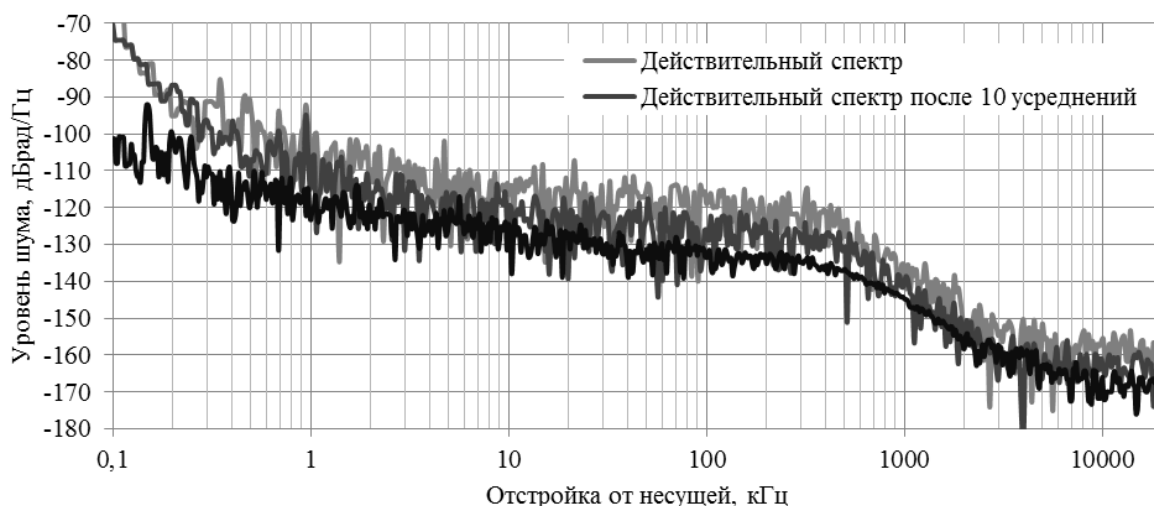


Рис. 5. Фазовый шум второго гетеродина СК4М-18

Заключение

Применение двухканальной системы фазового детектирования с вычислением взаимного спектра каналов позволяет существенно улучшить чувствительность измерения фазовых флуктуаций сигналов СВЧ.

Дополнительный рост чувствительности на больших отстройках возможен за счет перехода на логарифмический масштаб частотной оси с равномерным разбиением на интервалы усреднения в этом масштабе. При таком подходе отпадает необходимость в опорных источниках с исключительной спектральной чистотой выходного сигнала и измерения можно проводить с относительно шумящими источниками, но с обязательным наращиванием выборки, а значит, времени измерения. С другой стороны, менее шумящие источники позволят ускорить процесс измерений.

На данный момент имеется возможность измерять спектры фазовых флуктуаций сигналов синтезаторов СВЧ с широко распространенными микросхемами ФАПЧ [7]. В дальнейшем планируется переработать опорные источники, улучшив их фазовую стабильность, и дополнить прибор функциями измерения переходных процессов в источниках СВЧ, амплитудных шумов, регулировочных характеристик генераторов, управляемых напряжением.

Библиографический список

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М. : Издательский дом "Вильямс", 2003. — 1104 с.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — 3-е над., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1989. — 656 с.
3. Rubiola E. The Cross-Spectrum Experimental Method / E. Rubiola, F. Vernotte. — Besancon: France, 2010. — 39 p.
4. ADC32J42 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ti.com/product/ADC32J42>, свободный (дата обращения: 17.05.2016).
5. Скалярные анализаторы цепей серии P2M [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.micran.ru/productions/instrumentation/sna/p2m/>, свободный (дата обращения: 17.05.2016).
6. Лирник А.В. Построение экономичного одночастотного синтезатора с низким уровнем фазовых шумов / А.В. Лирник // Материалы докладов конференции "Электронные средства и системы управления". — 2014. — Часть 2. — С. 190–195.
7. Fractional-N PLLs [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/pll-synth/fractional-n-plls.html>, свободный (дата обращения: 17.05.2016).