

УДК 621.37

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФЛУКТУАЦИИ ФАЗЫ МОДУЛИРОВАННОГО СВЧ СИГНАЛА

Лячин В.С.

В статье рассматривается проблематика замера фазового шума мощного усилителя-модулятора СВЧ-сигнала в ходе климатических испытаний. Предлагается вариант построения лабораторной схемы, и приводятся оценки результатов измерений.

К современной передающей аппаратуре предъявляются жесткие требования по устойчивости к различным видам климатических и механических воздействий. В условиях производства имитация различных климатических режимов, таких как повышенная или пониженная температура среды (от -70°C до $+100^{\circ}\text{C}$), а также повышенная влажность (до 98%), происходит в специальных климатических камерах. Все замеры параметров испытываемых устройств происходят непосредственно в климатических камерах, причем измерительная аппаратура всегда находится снаружи, а измеряемая – внутри климатической установки. Лабораторные схемы, используемые при испытаниях, отличаются, как от тех, что заложены конструкторами для монтажа аппаратуры в изделиях, так и от тех, что используются при сборке и настройке аппаратуры в производственном цехе. Некоторые сложные виды измерений, такие как замеры флуктуации сигналов генераторов, усилителей СВЧ сигнала и других устройств, требуют дополнительной аналитической обработки и оценки степени влияния измерительной линии на результаты измерений. Это связано с тем, что большую долю погрешности измерения СВЧ-мощности спектра составляет погрешность рассогласования. На данный момент в литературе представлены методы комбинирования погрешностей измерения с использованием моделей, которые могут быть использованы для определения погрешности рассогласования, например модель Релея или U-образного распределения [1]. Однако эти методы опираются на большое количество входных данных и сложный математический аппарат, использование которого в условиях подготовки производственных испытаний может быть нерационально. Целью статьи является рассмотрение варианта оценивания параметров передающей линии эмпирическим путем без определения дополнительных параметров измерительной установки и испытываемого устройства.

Известно несколько методов замера фазового шума модулированной по амплитуде СВЧ несущей, основными из которых являются [2]:

- метод прямого измерения спектра;
- метод частотного дискриминатора;
- метод гетеродинного (цифрового) дискриминатора.

Также известен метод фазового детектора, выбранный для реализации в рамках проводимого исследования.

В эксперименте реализовано измерение фазового шума модулированной по амплитуде СВЧ несущей методом фазового детектора с использованием гетеродина (так называемое *разностное измерение*) в качестве опорного сигнала без использования фазовой автоподстройки частоты.

При реализации данной схемы на практике учтено несколько дополнительных условий. Во-первых, установка квадратуры фаз испытываемого и гетеродинного сигналов, для чего в схему введен фазовращатель. Мощность сигнала на входе измерителя фазового шума ограничена величиной 10 мВт, поэтому в линиях испытываемого устройства (ИУ) и гетеродина устанавливаются аттенюаторы. Калибровочный генератор, входящий в состав измерителя, требует включения в линию гетеродинного сигнала направленного ответвителя. С учетом вышеперечисленного, а также того, что замеры флуктуаций производятся в условиях климатических воздействий на аппаратуру, измерительная установка собрана по схеме, приведенной на рисунке 1.

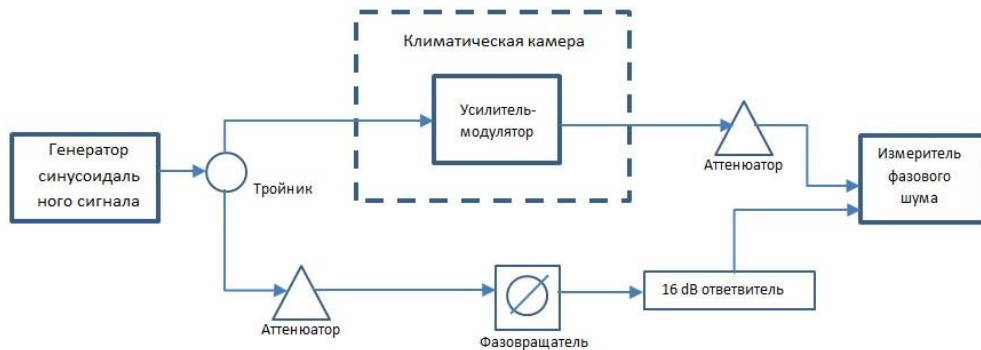


Рисунок 1 – Схема измерительной установки

Параметры шума снимаются в виде отношения спектральной мощности сигнала на частоте несущей к спектральной мощности шума на частоте отстройки в полосе 1 Гц. В данном случае интерес представляет исключительно шум, вносимый ИУ, а воздействия параметров схемы необходимо нивелировать.

Предполагая, что искажения в измерительный процесс вносит рассогласованность схемы, исключим измеряемую аппаратуру из рассмотрения.

На этом этапе важно нагрузить лабораторную схему сигналом, максимально идентичным тому, что вырабатывает испытываемая аппаратура:

- генерация синусоидального сигнала с низким уровнем шума и его усиление до величин, достаточных для измерения;
- модуляция сигнала в соответствии с режимами, используемыми в измеряемой аппаратуре;

При выборе источника синусоидального сигнала следует сравнить «шумовую маску», заявленную производителем, с ожидаемым уровнем шума ИУ на тех же частотах отстройки. Флуктуации фазы сигнала лабораторного генератора должны быть такими же или ниже чем у испытываемой аппаратуры. Также следует учитывать, что мощность на измерителе будет равна отношению мощности на выходе ИУ к произведению скважности сигнала на коэффициент затухания в передающей линии.

Средняя мощность современных генераторов составляет величину порядка 2 дБм, и если потери на линиях измерения и гетеродина достаточно высоки (мощность генератора на выходе делится поровну между обеими линиями), то необходимо использовать малошумящий усилитель для достижения необходимой мощности на входе измерителя флуктуаций.

В рамках проводимого исследования дополнительно к линиям гетеродинного сигнала и измеряемого сигнала добавлены две эталонные линии (по одной на каждый сигнал). Для минимизации рассогласований на эталонных линиях и уменьшения воздействия на них внешних помех использовано волноводное исполнение. Включение усилителя в схему происходит на выходе лабораторного генератора синусоидального сигнала до тройника и не влияет на оценку сравнения шумов линий.

Модуляцию сигнала можно производить различными способами, в зависимости от конкретных режимов и параметров работы ИУ:

- модуляция усилителем по питанию. В линию измеряемого сигнала включается СВЧ усилитель, питание которого включается в режиме модуляции необходимого режима при помощи программируемых источников питания или с помощью генератора импульсов;

- модуляция при помощи встроенных аппаратных решений лабораторных генераторов. Два лабораторных генератора синусоидального сигнала синхронизируются на частоте несущей, после чего на одном из них включается режим модуляции и его сигнал направляется в измеритель шума. Второй когерентный источник сигнала используется в качестве гетеродина;

- модуляция с использованием волноводного модулятора на р-і-п диоде. Этот модулятор представляет собой волноводный тракт с р-і-п диодом, изменяющим свою емкость, в зависимости от полярности и амплитуды поданного на него напряжения. Для модуляции удобно использовать его в связке с генератором импульсов.

В проведенном эксперименте использован вариант реализации схемы с применением р-і-п диода, так как режимы работы испытываемой аппаратуры имеют вид $\tau \neq T$. Использование усилителя с модуляцией по питанию в данном случае не обеспечивало необходимый уровень шума.

В результате построения предложенной схемы исключается возможность дополнительных шумов по питанию усилителя-модулятора или ГСС, что обеспечивает механизм оценки линии гетеродина (III) относительно ее эталонной копии (IV), а также линии усилителя (I), относительно ее эталона (II). С помощью

волноводных переключателей обеспечивается возможность оперативного переключения между измерительными линиями и сравнения результатов измерений.

Т а б л и ц а 1 – Сравнение вариантов реализации модуляции

Вариант реализации	Характерные особенности
Усилитель с модуляцией по питанию	Дополнительный усилитель на линии измеряемого сигнала имеет собственные шумы, что вносит дополнительную погрешность в измерение
Модуляция при помощи синхронизированных генераторов	Большинство встроенных аппаратных решений для модуляции в генераторах сигналов, поддерживают только режим <i>square modulation</i> , при котором $\tau = T$. Высокая нестабильность фазы двух синхронизированных генераторов при измерении флуктуаций разностным методом
Волноводный модулятор на р-и-п диоде	При использовании в коаксиальном тракте требуются дополнительные коаксиально-волноводные переходы

После построения измерительной линии был произведен замер ее КСВ. При повышении частоты измеряемого сигнала очень важно поддерживать низкий уровень КСВ линии передачи, однако погрешность рассогласования неизбежна. Вклад данной погрешности в погрешность наихудшего случая при измерении мощности сигнала играет самую большую роль.

Для определения качества способа оценки влияния физического исполнения линии передачи на результаты измерения фазового шума были произведены замеры на лабораторной схеме (рисунок 2) с двумя видами исполнения линии измерения – контрольной и эталонной.

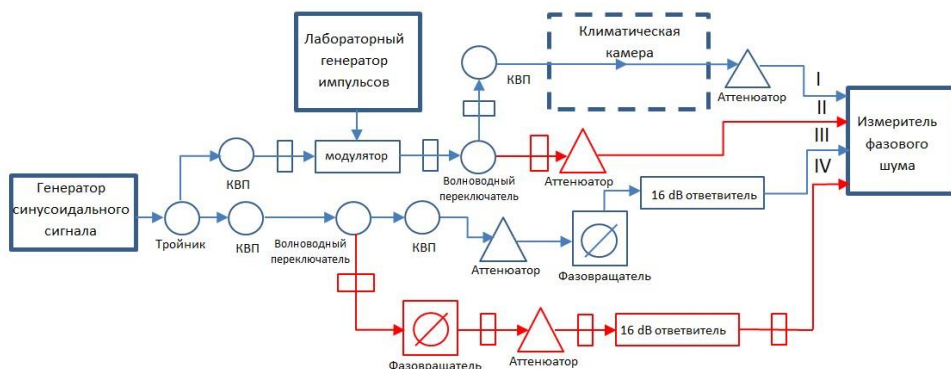


Рисунок 2 – Схема измерения флуктуаций фазы с включением эталонных передающих линий

Так как флуктуация фазы сигнала является случайным процессом, необходимо выяснить, как влияет физическое исполнение линии передачи на математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение результатов.

При допуске отклонения параметра шума 0,3 дБ/Гц (задано согласно требованиям к измерению параметра) и числе измерений $n = 15$, гарантийный коэффициент $k_t = 1,64$, что соответствует уровню доверительной вероятности $P_d = 0,9011$. При необходимости увеличения доверительной вероятности следует увеличить число измерений параметра шума [3].

Данные, полученные по результатам измерений, имеют вид матрицы $X_{(15,1288)}$. Множество частот отстройки определено значениями, на которых произведены измерения. В данном исследовании взято максимальное число частот отстроек для заданного интервала, ограниченное разрешающей способностью измерительной установки.

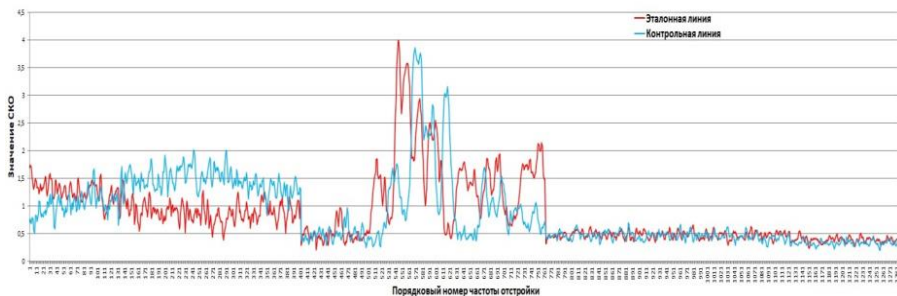


Рисунок 3 – Графики значений СКО

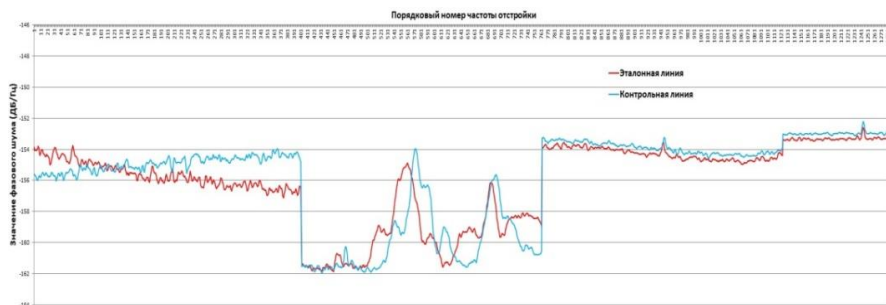


Рисунок 4 – Графики средних значений

Из представленных графиков видно, что СКО фазового шума имеет сложную зависимость от физического исполнения передающей линии, а среднее значение измеренного шума на контрольной линии оказалось выше в интервале от 2,0 до 0,5 дБ/Гц на различных частотах отстройки.

Литература

- 1 Как минимизировать погрешности измерений и оценить погрешность, вызванную рассогласованием. – Keysight Technologies, 2014.
- 2 Технические решения компании Agilent для измерения фазового шума. – Agilent Technologies Inc., 2010.
- 3 Шмойлова Р.А., Минашкин В.Г., Садовникова Н.А. Практикум по теории статистики. – М.: Финансы и статистика, 2006.