

Борьба с фазовым шумом в ВЧ- и СВЧ-диапазонах

За последние 20 лет в погоне за быстрым развитием средств связи и радиолокационных систем, использующих сигналы с векторной модуляцией, разработчики были вынуждены постоянно расширять возможности и усложнять генераторы ВЧ- и СВЧ-сигналов. Достижение малого фазового шума (ФШ), как правило, существенно влияет на стоимость высококачественных генераторов сигналов, поэтому покупка серийно выпускаемого генератора для приложений, требующих малого уровня ФШ, может обойтись дорого. Существует несколько мер, которые можно предпринять для снижения и оптимизации ФШ генератора при условии, что он предоставляет доступ к опорному генератору, генераторам, управляемым напряжением (ГУН), и схеме фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которые входят в состав цепи синтезатора.

Джон ХАНСЕН (John HANSEN)

Фазовый шум

Фазовым шумом называются случайные флуктуации фазы сигнала, вклад в которые вносят различные компоненты и цепи генератора, отвечающие за перестройку частоты. В идеальном случае вся мощность синтезируемого немодулированного синусоидального сигнала сосредоточена на одной частоте. Такой сигнал можно представить моделью со случайной фазовой модуляцией. Значения ФШ ($L(f)$) измеряются в дБн/Гц или в дБ относительно мощности несущей в полосе частот 1 Гц при некоторой отстройке от частоты этой несущей. Например, ФШ генератора может быть указан как -97 дБн/Гц при отстройке 100 кГц от немодулированной частоты 20 ГГц. Для облегчения оценки фазового шума при малой (<1 кГц) и большой (>10 кГц) отстройке от несущей график ФШ строят обычно в логарифмическом масштабе (рис. 1).

Источники фазового шума в генераторе сигналов

ФШ генератора сигналов складывается из четырех основных компонентов: шума источника опорной частоты, шума синтезатора (фазовые детекторы и ФАПЧ), шума ГУН (генератора управляемого напряже-

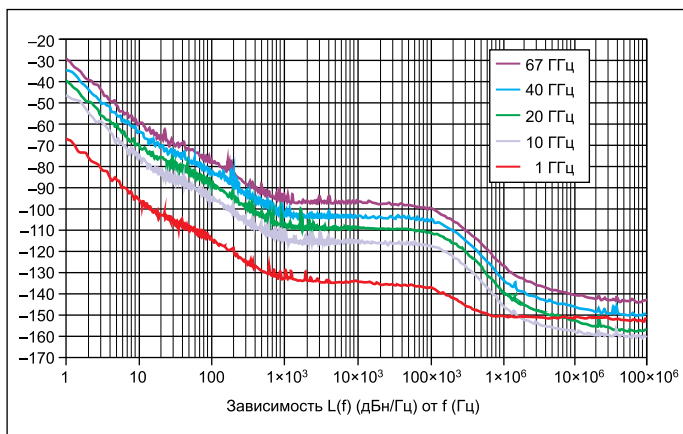


Рис. 1. График зависимости фазового шума от частоты несущей (абсолютное значение ФШ представляет собой общий ФШ генератора сигналов)

ния) и широкополосного шума. На рис. 2 показано, какая часть схемы генератора сигналов дает основной вклад в разные составляющие ФШ.

При отстройке частоты меньше 1 кГц стабильность и фазовый шум определяются схемой формирования опорной частоты, которая использует обычно опорный сигнал 10 МГц. Опорная частота 10 МГц может формироваться в генераторе или подаваться извне. Схема ее формирования умножает изначальное снижение $1/f^3$, преобразуя его в зависимость вида $1/f^2$, которая представляется на логарифмическом графике со спадом в 20 дБ на декаду.

В общем случае в генераторах сигналов с малым ФШ используют задающий генератор на основе железиттриевого граната (YIG), который обладает лучшими характеристиками, чем типичные ГУН. Фазовый шум YIG-генераторов быстрее спадает при больших отстройках от несущей (около 100 кГц). Они демонстрируют широкий диапазон настройки, что означает меньшую потребность в умножении сигнала для получения нужной частоты и приводит к уменьшению ФШ, особенно на высоких частотах. Точка, в которой вклад YIG-генератора в общий фазовый шум начинает существенно снижаться, определяется полосой ФАПЧ. Для частот отстройки, лежащих в пределах полосы ФАПЧ, общий ФШ генератора зависит от вклада фазового детектора и задающего генератора.

Собственный широкополосный шум состоит, в первую очередь, из теплового шума генератора, причем основной вклад дает выходной каскад усилителя мощности. Как правило, ФШ при отстройках больше 10 МГц ограничивается этим собственным шумом. ФШ при такой большой отстройке от несущей оказывает сильное влияние на широкополосные коммуникационные системы, особенно на те, которые используют мультиплексирование с ортогональным делением частот (OFDM). Если ФШ при отстройках, близких к разнесению несущих, слишком велик, то близкорасположенные несущие начинают влиять друг на друга.

Подавление фазового шума внутри генератора сигналов

Изготовители контрольно-измерительного оборудования постоянно ищут способы совершенствования архитектуры генераторов, которые понизили бы ФШ. Один из наиболее распространенных способов улучшения ФШ, особенно вблизи несущей, заключается в установке малошумящего источника опорной частоты 10 МГц.

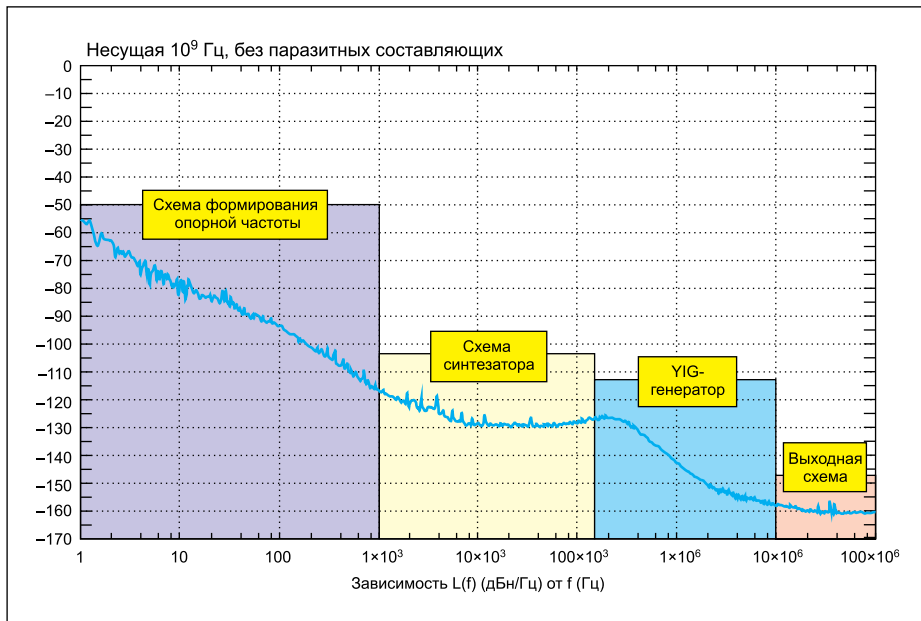


Рис. 2. Источники ФШ внутри генератора при разных отстройках на примере генератора сигналов Agilent E8257D с опцией малого ФШ

Обычно в качестве источников такой частоты используются термостатированные кварцевые генераторы (ОСХО).

Найденные в исследовательских лабораториях способы улучшения задающих генераторов быстро внедряются в серийно выпускаемые приборы. Появляются инновационные схемы, снижающие ФШ до новых пределов даже в тех областях, где он определяется преимущественно схемой синтезатора и YIG-генератором (рис. 2). Такие конструктивные усовершенствования задающего генератора и синтезатора включают тщательно продуманные частотные планы, минимизирующие паразитные составляющие, многоконтурные схемы с повышенной стабильностью и более тщательную обработку входного сигнала, обеспечивающую лучшее отношение

сигнал/шум при прохождении сигнала через схему синтезатора.

Использование преимуществ малого остаточного фазового шума

Остаточный фазовый шум представляет собой ФШ генератора сигналов без вклада схемы формирования опорной частоты. На рис. 3 показан график остаточного шума того же генератора, абсолютный ФШ которого показан на рис. 1. Абсолютный ФШ на этом графике показывает типовой и полный ФШ всего тракта генератора сигналов. Какие же преимущества может дать нам этот малый остаточный фазовый шум?

Большинство генераторов сигналов имеют порт для подачи внешнего опорного сиг-

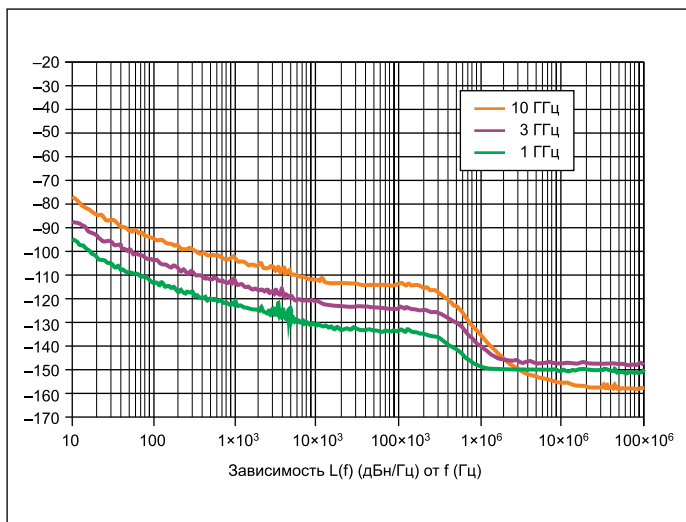


Рис. 3. Остаточный ФШ генератора представляет собой полный ФШ устройства, за исключением шума схемы формирования опорного сигнала

нала частотой 10 МГц. Это позволяет снизить ФШ при малой отстройке от несущей за счет применения высокостабильного источника сигнала, но, тем не менее, этот шум все еще будет значительно превышать остаточные уровни. Схема формирования опорного сигнала состоит не из одного только опорного генератора 10 МГц. Она включает фазовый детектор и схему ФАПЧ, а также умножители, генерирующие разнообразные частоты в диапазоне, используемом последующей схемой синтезатора (рис. 4).

Чтобы обойти источник опорной частоты, надо подать снаружи опорный сигнал более высокой частоты. Внешний источник более высокой частоты может приблизить ФШ генератора сигналов к остаточному уровню. Для этого генератор сигналов должен предоставлять доступ к тракту опорного сигнала после схемы формирования опорного сигнала, и при этом внешний источник опорного сигнала должен иметь меньший уровень собственного ФШ, чем внутренний источник опорного сигнала генератора сигналов. Многие высококачественные генераторы сигналов имеют внутренний опорный источник, который уже обладает весьма низкими фазовыми шумами. Поэтому внешний опорный источник должен обладать исключительными характеристиками ФШ.

Оптимизация фазового шума для вашего приложения

Полосой схемы ФАПЧ генератора сигналов считается полоса интегрирующего фильтра, стоящего на выходе фазового детектора (рис. 4). В тракте опорного генератора и синтезатора присутствует несколько схем ФАПЧ, каждая из которых дает свой вклад в фазовый шум. В большинстве генераторов эти полосы имеют фиксированные значения, оптимальные для большинства случаев. Полосу схем ФАПЧ задающего генератора

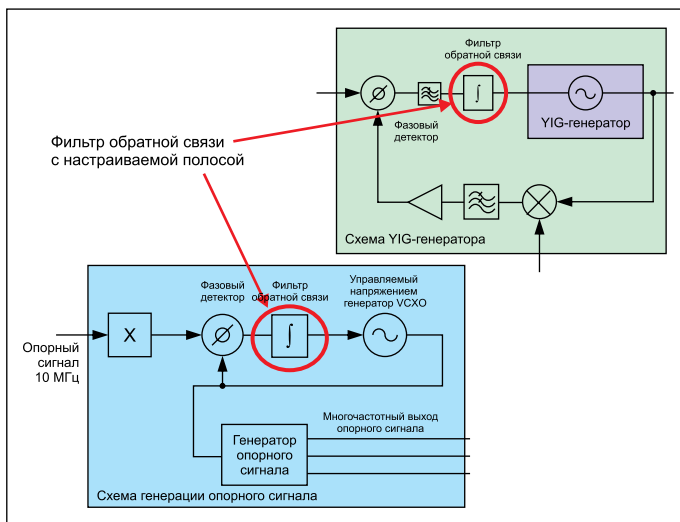


Рис. 4. Настройка полосы интегратора/фильтра ФАПЧ опорного и YIG-генератора в генераторе сигналов

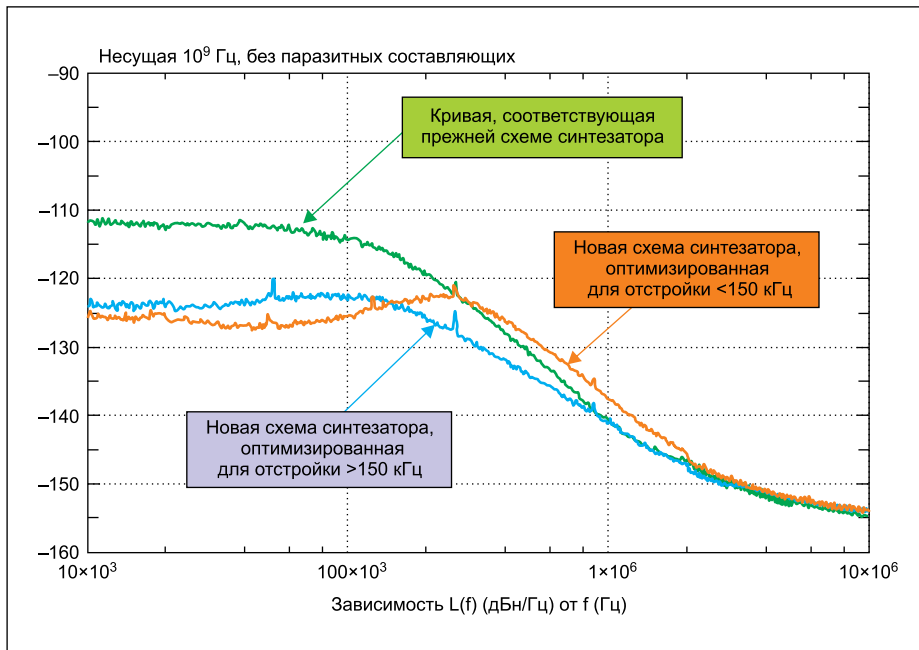


Рис. 5. Оптимизация полосы YIG-генератора

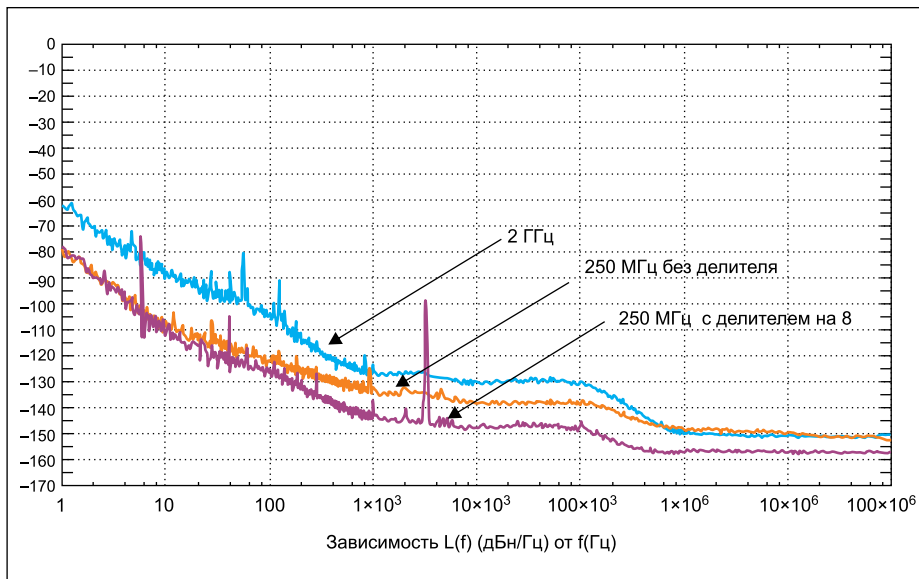


Рис. 6. Снижение фазового шума за счет применения делителей частоты

Применение делителей вместо гетеродинных смесителей на низких частотах

Для грубой настройки частоты генераторы сигналов используют делители. Когда сигнал несущей проходит через делитель частоты, ее частота уменьшается в n раз:

$$F_{\text{вых}} = F_{\text{вх}} \times 1/n,$$

где $F_{\text{вх}}$ — входная частота; n — коэффициент деления.

Если коэффициент деления $n = 2$, выходная частота будет в два раза меньше входной частоты.

Помимо снижения частоты несущей, уменьшается и ФШ на $20 \log n$:

$$L(f)_{\text{вых}} = L(f)_{\text{вх}} - 20 \log n.$$

В случае деления на 2 фазовый шум выходной частоты снижается на 6 дБ ($20 \log 2$) по отношению к ФШ входной частоты, что видно на рис. 1. Если в генераторе сигналов применяется частотная или фазовая модуляция (ЧМ или ФМ), деление несущей уменьшает девиацию ЧМ и ФМ в n раз. При малых частотах несущей девиация модуляции может стать слишком малой и практически бесполезной. Поэтому для сохранения полосы модуляции многие генераторы на нижних частотах переходят с деления частоты на гетеродинное смешение. Заметьте, что гетеродинное смешение на низких частотах не снижает фазовый шум. ФШ сигнала частотой 250 МГц, полученный делением частоты 2 ГГц и гетеродинным смешением, показан на рис. 6.

Делители частоты могут быть как внешними, так и внутренними. Если делитель частоты включен, генератор использует на низких частотах метод деления частоты. Это улучшает ФШ для этих частот при всех отстройках. Использование делителя можно запретить, вернув генератор сигналов в стандартный режим генерации низких частот с помощью гетеродинирования. Этот режим обеспечивает большую полосу девиации ЧМ- и ФМ-сигналов.

Заключение

Для тестирования и измерения параметров ВЧ- и СВЧ-компонентов и систем, особенно приемников, необходим чистый испытательный сигнал. Классические методики требуют, чтобы характеристики испытательного сигнала как минимум на порядок превосходили характеристики исследуемой системы или устройства. В противном случае мы рискуем получить недостоверные результаты из-за аномалий источника испытательного сигнала. В статье были обсуждены некоторые меры, которые можно предпринять для обеспечения наилучших характеристик генератора сигналов. ■

и YIG-генератора (YIG) можно использовать для оптимизации ФШ в определенных диапазонах отстройки от несущей. Для этого генератор сигналов должен предоставлять возможность настройки этой полосы.

Как правило, настройка полосы фильтра ФАПЧ выполняется путем перестройки внутреннего или внешнего генератора опорной частоты фиксированными шагами в пределах 25–650 Гц. Такая настройка влияет на наклон кривой ФШ до значений отстройки около 2 кГц. Чем шире полоса опорной схемы, тем меньше ФШ при очень малых отстройках менее 200 Гц. С другой стороны, при меньших значениях полосы наблюдается небольшое снижение ФШ в диапазоне отстройки примерно от 200 Гц до 2 кГц. Таким образом,

оптимизация одного диапазона отстройки выполняется за счет ухудшения другого диапазона.

Новые схемы синтезатора обеспечивают доступ к настройке полосы схемы YIG-генератора, а также к генератору опорного сигнала, чего не было в прежних схемах. Настройка полосы схемы YIG-генератора влияет на совершенно иную часть графика фазового шума — на ФШ при отстройках примерно от 1 кГц до 1 МГц. Настройка полосы схемы YIG-генератора на большое значение (около 240 кГц) оптимизирует ФШ при отстройках больше 150 кГц. Установка узкой полосы YIG-генератора (около 130 кГц) оптимизирует ФШ для отстройки в районе 150 кГц и ниже (рис. 5).