

Появление побочных спектральных составляющих в синтезаторах частот с ФАПЧ и методы их уменьшения

Кузменков Андрей

г. Москва, 2016

1. Введение

Относительный уровень негармонических побочных спектральных составляющих (ПСС) является показателем чистоты спектра сигнала наряду со спектральной плотностью мощности фазовых шумов. В документации на современную генераторно-синтезаторную продукцию принято обозначать гарантированный уровень подавления ПСС в заданной полосе частот выходного сигнала или свободный от паразитных составляющих динамический диапазон (в англоязычной литературе приводят Spurious Free Dynamic Range – «SFDR» или Nonharmonic suppression). Например, у генератора Keysight N5183B с опцией UNY подавление ПСС составляет 92 дБ в полосе частот $750 \text{ МГц} < f \leq 1,5 \text{ ГГц}$. Для синтезаторов частот в модульном исполнении, например, FSW-0020 или UNO-11M, обычно указывается наихудший уровень ПСС сразу для всех выходных частот. Уровни ПСС у некоторых малошумящих генераторов и модульных синтезаторов частот представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Название	Производитель	Полоса измерений	Уровень ПСС, дБн
SMA100B	Rohde & Schwarz	$f \leq 1 \text{ ГГц}$	-100
N5183B с опцией UNY	Keysight	$750 \text{ МГц} < f \leq 1,5 \text{ ГГц}$	-92
FSW-0020	National Instruments	$200 \text{ МГц} < f \leq 20 \text{ ГГц}$	-60
HSM18001B	Holzworth	$8 \text{ ГГц} < f \leq 18 \text{ ГГц}$	-60
UNO-11M	Адвантех	$100 \text{ МГц} < f \leq 13 \text{ ГГц}$	-60

С ростом выходной частоты уровень негармонических спектральных составляющих неизменно повышается, что обусловлено умножением частоты на основе нелинейных эффектов полупроводниковых узлов, например, диодов. При каждом умножении частоты на два уровень ПСС возрастает на 6 дБ, что можно увидеть в документации на большинство генераторов сигналов. Достойным и соответствующим спектральной чистоте инструментального класса на сегодняшний день считается уровень ПСС -90 дБн на несущей 1 ГГц (или в полосе частот $f \leq 1 \text{ ГГц}$). Отметим, что мало кто раскрывает подробные данные об измерениях негармонических составляющих. Одной из первых график зависимости величины подавления ПСС от выходной частоты привела компания Rohde & Schwarz в рекламной брошюре на генератор SMA100B [1]. Он представлен на Рис. 1.

Однако методика измерений для этого графика не указывается, что вызывает ряд вопросов:

- как была установлена выходная частота (случайным образом или перестраивалась с постоянным шагом);
- каким измерительным прибором и в каком режиме сделаны измерения;
- гарантированно ли при измерениях исключаются ПСС измерительного прибора?

Примем во внимание, что ПСС в спектре несущей также могут появляться при ошибках дизайна печатной платы синтезатора, а также при прохождении помех в питание ключевых цифровых микросхем. В дальнейшем считается, что такие ПСС исключены.

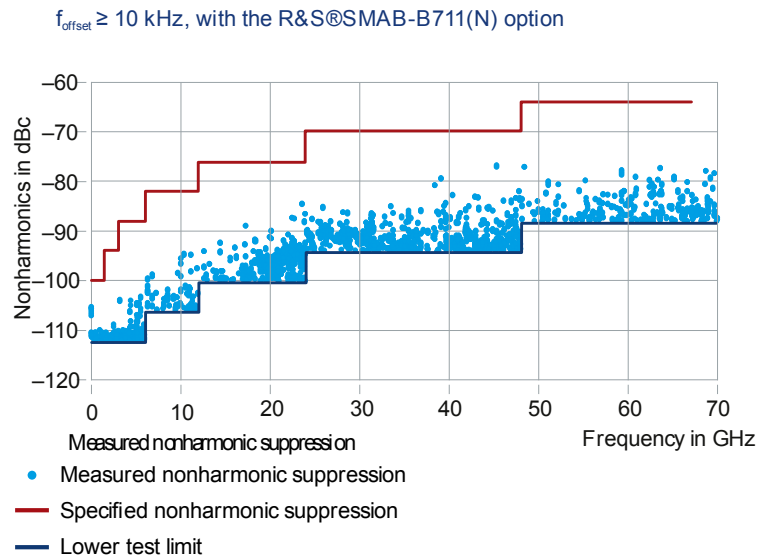


Рис. 1. Зависимость измеренных уровней ПСС в спектре генератора R&S SMA100B от частоты

Всё перечисленное выше показывает, что вопрос исследования природы, методов подавления и методики измерений ПСС остается актуальным и нераскрытым в полной мере. Попробуем внести ясность в вопросах методов уменьшения негармонических составляющих.

2. Известные методы подавления ПСС

Рассмотрим гибридный синтезатор частот, который объединяет в себе цифровой вычислительный синтезатор (ЦВС) и ФАПЧ, работающую в целочисленном режиме (Рис. 2).

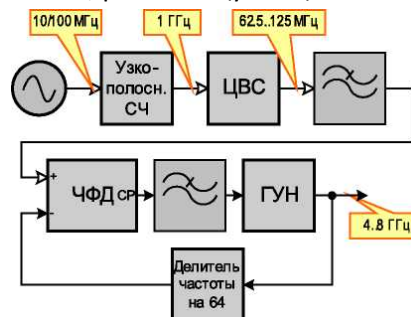


Рис. 2. Схема синтезатора с ФАПЧ и ЦВС в тракте опорного сигнала

В таком синтезаторе присутствуют два основных источника побочных спектральных составляющих:

- 1) ПСС ФАПЧ, обусловленные работой импульсного частотно-фазового детектора (ЧФД). Такие ПСС достаточно малы по уровню и кратны частоте сравнения;
- 2) ПСС ЦВС, обусловленные нелинейностью его цифро-аналогового преобразователя.

Первым источником ПСС можно пренебречь, поскольку сами по себе малые импульсные помехи ЧФД при больших значениях частоты сравнения (порядка 100 МГц) хорошо подавляются петлевым фильтром ФАПЧ. ПСС ЦВС имеют существенно больший уровень и при широкой полосе выходных частот могут достигать значений -60 дБн. Повышенный уровень ПСС будет наблюдаться в спектре при небольшом смещении от частоты выходного сигнала ЦВС, равной $f_{\text{clk}} \cdot M/N$, где f_{clk} – частота тактирования ЦВС, $M – 1, 2, 3, 4$ и т.д., а $N – 3, 4, 5$ и т.д. Например, при f_{clk} равной 1 ГГц и при $M=1$, «испорченными» будут выходные частоты 333.33 ± 0.1 МГц, 250 ± 0.1 МГц, 200 ± 0.1 МГц, 166.66 ± 0.1 МГц, 142.86 ± 0.1 МГц и т.д. Однозначно определить зависимость уровня таких ПСС от

выходной частоты затруднительно, но с ростом кратности и удалением от несущей их уровень уменьшается, так как при этом начинает работать петлевой фильтр ФАПЧ.

Относительно простой способ избавиться от ПСС ЦВС в этом случае – использовать переменную тактовую частоту.

При анализе схемы синтезатора необходимо знать коэффициенты преобразования фазы от каждого источника фазового шума и ПСС к ее выходу. Отметим, что коэффициенты преобразования по фазе для источников фазового шума и ПСС в синтезаторе одинаковы, поскольку шум и негармонические составляющие имеют фазовую природу. Как известно, для существенного уменьшения фазового шума в синтезаторе с ФАПЧ и опорным кварцевым генератором необходимо использовать элементы аналогового синтеза частот, т.е. увеличить частоту опорного кварцевого генератора аналоговыми умножителями для формирования смещения в тракте обратной связи ФАПЧ. При таком умножении обеспечивается прирост уровня фазового шума опорного генератора приблизительно по закону $20\log N$, где N – коэффициент умножения частоты, так как аналоговые умножители имеют собственные фазовые шумы уровня -175 дБн/Гц и менее. Таким образом, при смещении частоты можно обеспечить малые коэффициенты передачи для других, более шумящих узлов синтезатора, например, для частотно-фазового детектора, и снизить в итоге как фазовый шум, так и уровень ПСС на выходе синтезатора.

Рассмотрим на примере схемы гибридного синтезатора частот принцип сохранения низкого уровня фазового шума и ПСС (рис. 3). У ЧФД НМС3716 на частоте 100 МГц и отстройке 10 кГц при подаче синусоидального сигнала уровень вносимых фазовых шумов составляет -143 дБн/Гц [2], что на 20-25 дБ выше, чем у кварцевого опорного генератора МХО37/14 с частотой 100 МГц [3]. Обеспечив умножение частоты такого опорного колебания с малыми потерями по фазовым шумам, можно получить на частоте 1100 МГц и отстройке 10 кГц уровень фазового шума -145 дБн/Гц, поскольку фазовый шум ЦВС AD9912 меньше и свой вклад почти не вносит. Уровень вносимого шума петлевого фильтра с операционным усилителем ОРА211 мал и в расчёте не учитывается. Фазовый шум генератора, управляемого по частоте напряжением (ГУН), в области малых отстроек от несущей подавляется петлевым фильтром ФАПЧ. В этой схеме перенос ПСС от выхода ЦВС к выходу ФАПЧ осуществляется без потерь, поскольку коэффициент передачи от ЧФД к выходу ФАПЧ по модулю приблизительно равен 1. По сравнению с классической схемой синтезатора с ФАПЧ (например, сделанной на микросхеме НМС4069) и ЦВС AD9912 в опорном тракте, выигрыш по уровню фазовых шумов и уровню ПСС в схемах со смещением составляет около 20 дБ.

Отстройки ПСС от выходной частоты ЦВС можно рассчитать по формуле:

$$\pm f_{ref} m \mp f_{clk} n = \Delta f,$$

где m и n – целые положительные числа, которые определяют порядок ПСС, f_{ref} – частота сравнения (выходная частота DDS), f_{clk} – частота ГУН, Δf – величина отстройки ПСС от частоты ГУН. При высокой Δf , т.е. большей по величине, чем полоса пропускания петлевого фильтра, негармонические составляющие будут подавлены петлевым фильтром.

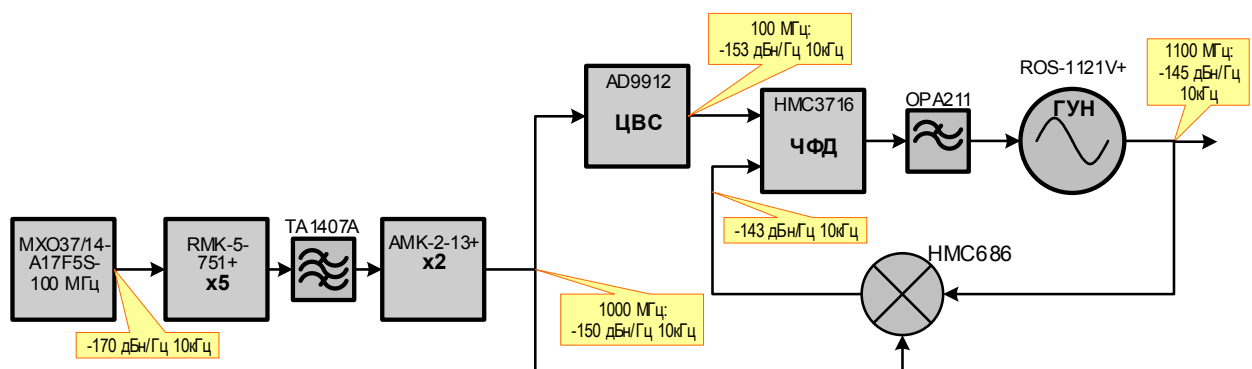


Рис. 3. Схема гибридного синтезатора частот с ФАПЧ и смещением в тракте обратной связи

Помимо упомянутых выше источников ПСС в синтезаторе на рис. 3, есть еще один «проблемный» узел. Им является смеситель HMC686 в тракте обратной связи ФАПЧ. Комбинации частот ГУН и частоты смещения появляются на выходе промежуточной частоты, проходят на вход ЧФД и не подавляются. Для более точного определения таких «испорченных» частот на выходе была написана программа Mixer Spurs Calculator. Ее окно с примером расчета показано на рис. 4.

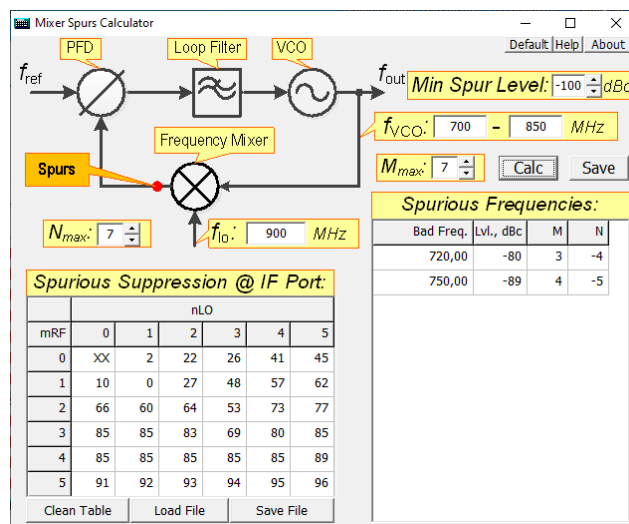


Рис. 4. Окно программы расчета «испорченных» частот синтезатора со смесителем

Таким образом, для ПСС справедливо использовать те же методы уменьшения уровня, как и для фазового шума. Помимо описанного выше традиционного метода, и для ЦВС, и для синтезаторов с дробным коэффициентом деления N (так называемые Fractional-N синтезаторы) существуют специальные методы подавления ПСС. Рассмотрим их внимательнее.

В двух серийно выпускаемых ЦВС компании Analog Devices AD9911 и AD9912 был использован запатентованный способ подавления (компенсации) негармонических составляющих, так называемый SpurKiller. Его идея в том, чтобы в цифровом виде добавить в результирующий код специальную разрушающую последовательность, которая формирует идентичную, но смещенную по фазе на 180° помеху. Важно принять во внимание, что помехи считаются гармоническими, поскольку сам компенсатор формирует код с помощью гармонического генератора частоты, и хорошее подавление обеспечивается только для крупных побочных составляющих, свойственных ЦВС. Также можно отметить, что со временем и с изменением температуры амплитуда и фаза гармонической помехи меняются, так что без обратной связи сложно точно ее скомпенсировать. В менее шумящей микросхеме AD9912 с помощью компенсатора можно подавить две крупные помехи в спектре.

В Fractional-N синтезаторах существуют четыре вида ПСС: ПСС ЧФД (так называемые Phase Detector Spurs), ПСС кратных частот (так называемые Integer Boundary Spurs), первичные дробные ПСС (так называемые Primary Fractional Spurs), дробные ПСС высшего порядка (так называемые Sub-Fractional Spurs) [4]. Природа появления всех ПСС, кроме ПСС ЧФД, заключается в периодической во времени неточной работе сигма-дельта модулятора. ПСС ЧФД идентичны по своей природе ПСС, появляющихся в целочисленной ФАПЧ.

Наиболее значительные по уровню в Fractional-N синтезаторах ПСС кратных частот, возникают, когда частота ГУН близка к гармонике опорной частоты или коэффициент деления в обратной связи ФАПЧ близок к целому по величине. Например, если частота сравнения 100 МГц, а частота ГУН установлена 2703 МГц, то на отстройке 3 МГц от несущей в спектре появится ПСС кратной частоты. В уже несколько устаревших микросхемах ADF4159 и HMC704 их уровень может достигать -50 дБн, а в передовой микросхеме LMX2594 составляет примерно -55 дБн (на несущей 10 ГГц и отстройке 100 кГц). Наиболее действенным для подавления этих помех является метод перестраиваемой опорной частоты, когда на входе ЧФД формируется набор опорных колебаний. Выбор определенной частоты из набора позволяет «отодвинуть» ПСС в область дальних отстроек от несущей, где они подавляются петлевым фильтром ФАПЧ.

Для дробных ПСС высшего порядка предусмотрен свой механизм подавления помех дробности, который называется сглаживанием или дизерингом. Если сигма-дельта модулятор построен по схеме MASH (от англоязычного сочетания «Multi-stAge noise SHaping» – многокаскадное формирование шума), то в его структуру входят несколько последовательно включенных сигма-дельта модуляторов 1-го порядка. Первый сигма-дельта модулятор формирует распределение сигнала, которое определяет средний уровень, а остальные каскады формируют распределение шумового сигнала. В современной микросхеме LMX2492 с 24-битным сигма-дельта модулятором сглаживание помех реализовано с тремя степенями силы: слабое, среднее и сильное, что позволяет найти компромисс между уровнем ПСС и уровнем фазового шума, который увеличивается из-за дизеринга. Отметим, что сглаживание помех дробности слабо влияет на первичные дробные ПСС, поэтому для очистки спектра от них приходится использовать упомянутый выше метод выбора опорного колебания.

3. Синтезатор частот с низким уровнем ПСС

Рассмотрим пример архитектуры гибридного синтезатора частот (Рис. 5).

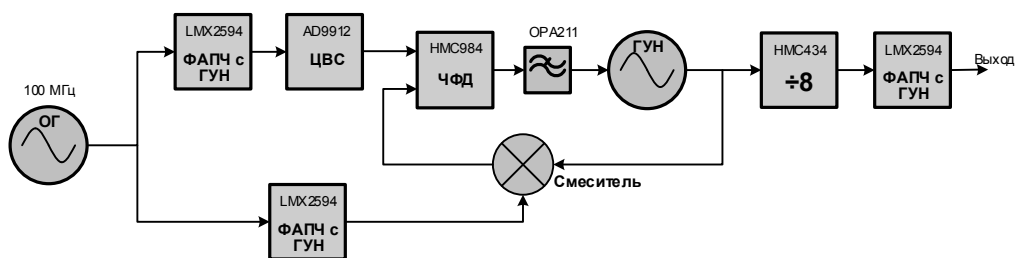


Рис. 5. Архитектура гибридного синтезатора частот

В качестве основной и формирующей выходное колебание выбрана микросхема LMX2594. Это передовая микросхема ФАПЧ с 32-битным сигма-дельта модулятором, встроенным ГУН и выходными делителями частот, что позволяет обеспечить диапазон частот выходного колебания от 10 МГц до 15 ГГц. Преимуществ микросхемы перед аналогами немало. Во-первых, банк из семи ГУН этой микросхемы при полном использовании вспомогательного алгоритма имеет скорость калибровки всего 5 мкс. Во-вторых, это пониженный на 5-9 дБ уровень фазового шума в полосе ФАПЧ по сравнению с другими микросхемами, например, LMX2492 или LMX2592. В-третьих, микросхему характеризует исключительно высокая частота работы ЧФД, которая составляет 300

МГц для дробно-переменного режима и 400 МГц для целочисленного. Цена этой микросхемы умеренная и сопоставима с ценой только за ГУН НМС732 с перестройкой от 6 до 12 ГГц, что сразу выводит LMX2594 в единоличные лидеры для создания малошумящего синтезатора частот с диапазоном до 15 ГГц. Отметим недостатки такого выбора. Во-первых, это фиксированный уровень фазового шума и, во-вторых, неизбежные крупные ПСС кратных частот. С первым придется смириться, поскольку решение должно быть недорогим и компактным. Для устранения второго недостатка придется усложнить схему синтезатора, вводя вторую петлю ФАПЧ и ЦВС для формирования полосы опорных частот.

В итоге, в синтезаторе используются две петли ФАПЧ, первая из которых формирует полосу опорных частот для второй. Отдельная микросхема ФАПЧ со встроенным ГУН LMX2594 формирует набор гетеродинов для смесителя. Частотный план можно выбрать таким образом, что вторая петля ФАПЧ работает в целочисленном режиме. Это исключает ПСС кратных частот из спектра при любой выходной частоте, поскольку такие помехи отсутствуют по определению. В первой же петле ФАПЧ опорная частота формируется ЦВС, тактовая частота которого может выбираться из набора, заданного уже описанной ранее микросхемой LMX2594. Эта микросхема работает в целочисленном режиме и реализует ограниченный набор опорных частот для ЦВС. По сравнению с умножением частоты опорного кварцевого генератора, в таком решении можно получить большее число тактовых частот ЦВС меньшими усилиями. В первой ФАПЧ в схеме осуществляется преобразование выходной частоты ЦВС вверх с помощью смещения на двойном балансном смесителе, что обеспечивает перенос ПСС ЦВС на высокую частоту. Последующее деление частоты формирует полосу опорных колебаний для второй петли ФАПЧ и подавляет негармонические составляющие на 18 дБ. Помимо этого традиционного метода подавления можно задействовать компенсатор помех ЦВС, поскольку он встроен в используемый AD9912.

4. Заключение

Были рассмотрены механизмы появления ПСС в спектре синтезаторов частот с ФАПЧ, как гибридных, так и в Fractional-N. На примере простых схем гибридных синтезаторов с ФАПЧ продемонстрированы рабочие методы подавления негармонических составляющих в спектре сигнала.

Список литературы.

1. https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/SMA100B_bro_en_5215-1018-12_v0103.pdf
2. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC3716.pdf>
3. http://magicxtal.com/upload/uf/e30/MXO37-14D_MXO37-37HD-rus.pdf
4. Application Report AN-1879 Fractional N Frequency Synthesis
<http://www.ti.com/lit/an/snaa062a/snaa062a.pdf>