

# СИСТЕМЫ ФАПЧ В СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТЫ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ШУМОВ И ПАРАЗИТНЫХ СИГНАЛОВ

Э.Друкер

Системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) широко используются во многих приложениях, в частности, в синтезаторах частоты. На характеристики синтезатора сильно влияет схемотехническое решение ФАПЧ. Возможности одноконтурной схемы, независимо от уровня оптимизации, во многом ограничены. Многоконтурные ФАПЧ могут существенно уменьшить уровень фазового шума при малой и большой отстройке от несущей и уровень паразитных составляющих. При правильных схемотехнических решениях и методах моделирования многоконтурные системы ФАПЧ могут обеспечить характеристики, необходимые для приложений с высокими требованиями.

## КАК РАБОТАЕТ ФАПЧ

Чтобы лучше понять, какие факторы влияют на работу ФАПЧ (рис.1) и насколько они важны, нужно, в первую очередь, понять принципы ее работы. В установленном режиме ФАПЧ представляет собой линейную систему с регулируемой фазой. Для прогнозирования стабильности и фазового шума такой схемы используется анализ Лапласа в  $s$ -области. В качестве входного сигнала ФАПЧ выступает опорная частота, а выходная частота равна:

$$f_{\text{вых.}} = N f_{\text{вх.}}$$

При использовании целочисленного делителя шаги перестройки выходной и опорной частот совпадают, а при дробном делителе шаг выходной

частоты может быть значительно меньше шага опорной. Однако дробные делители имеют серьезные недостатки, связанные с паразитными составляющими, и их фазовый шум несколько выше, чем у целочисленных.

Передаточная функция с разомкнутым контуром обратной связи равна петлевому усилению  $GH(s)$ . Анализ  $GH(s)$  дает информацию о стабильности контура, выраженную в запасе устойчивости по фазе. Шумы опорного сигнала, фазового детектора и делителя на  $N$  описываются передаточной функцией фильтра нижних частот, который подавляет шумы, выходящие за пределы полосы пропускания контура ( $BW$ ). Шум ГУН описывается функцией фильтра верхних частот, подавляющего шум в полосе пропускания контура.

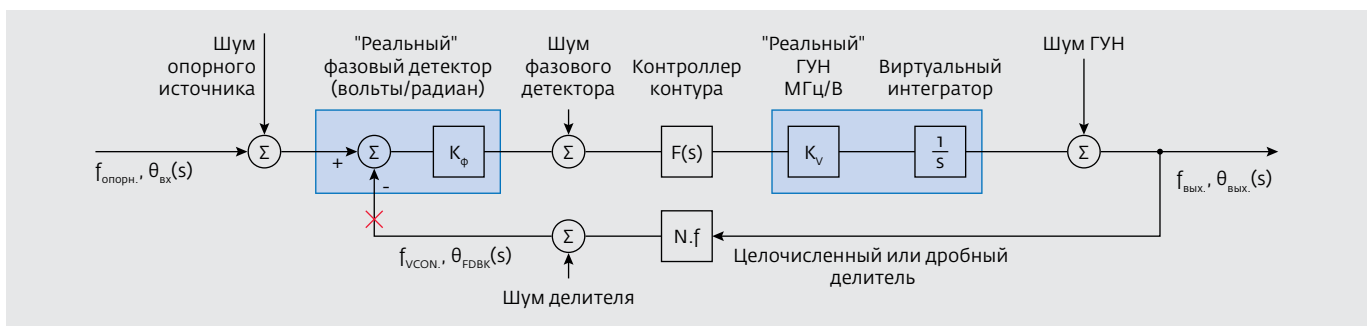


Рис.1. Базовая блок-схема ФАПЧ с разными источниками шума

Контроллер контура  $F(s)$  обычно представляет собой интегратор с нулевым сдвигом, хотя могут использоваться и более сложные цепи:

$$T_{\text{опорн.}}(s) = \frac{\theta_{\text{вых.}}(s)}{\theta_{\text{вх.}}(s)} = \frac{\text{Прямое усиление}}{1 + \text{Петлевое усиление}} = \frac{G(s)}{1 + GH(s)};$$

$$GH(s) = \frac{\theta_{\text{ос.}}(s)}{\theta_{\text{вх.}}(s)} = KF(s) \frac{K_V}{s} \cdot \frac{1}{N};$$

$$LP(s) = T_{\text{опорн.}}(s) = N \frac{GH(s)}{1 + GH(s)};$$

$$HP(s) = T_{\text{ГУН}}(s) = \frac{1}{1 + GH(s)}.$$

Для моделирования шума, связанного с разными компонентами ФАПЧ, можно использовать следующие уравнения:

$$L(f) = (k_0 + \frac{k_1}{f} + \frac{k_2}{f^2} + \frac{k_3}{f^3});$$

$$S_{\phi}(f) = 2L(f) = 2(k_0 + \frac{k_1}{f} + \frac{k_2}{f^2} + \frac{k_3}{f^3}),$$

где  $L(f)$  – фазовый шум в одной боковой полосе (SSB) при заданной отстройке от несущей, а  $S_{\phi}(f)$  – фазовый шум в двух боковых полосах или спектральная плотность мощности.

Коэффициенты ( $k_0, k_1, k_2, k_3$ ) представляют уровень собственных шумов в областях 10, 20 и 30 дБ/декада. Модель Лессона предполагает, что ВЧ- и СВЧ-генераторы должны иметь плоскую,  $1/f^2$ - и  $1/f^3$ -области, тогда как высокочастотные генераторы (кварцевые и ПАВ) имеют плоскую,  $1/f$ - и  $1/f^3$ -области. Делители и фазовые детекторы имеют плоскую область и область либо  $1/f$ , либо фликер-шума. Например, по известному уровню собственных шумов, точке  $1/f^2$  ( $\text{dB}_{f2\_ГУН}$ ) и точке  $1/f^3$  ( $\text{dB}_{f3\_ГУН}$ ) можно составить уравнение шума СВЧ ГУН:

$$k_{0\_ГУН} = 10^{\frac{\text{dB}_{f0\_ГУН}}{10}};$$

$$k_{2\_ГУН} = 10^{\frac{\text{dB}_{f2\_ГУН}}{10}} (f_{2\_ГУН})^2;$$

$$k_{3\_ГУН} = 10^{\frac{\text{dB}_{f3\_ГУН}}{10}} (f_{3\_ГУН})^3;$$

$$S_{\phi\_ГУН}(f) = 2(k_{0\_ГУН} + \frac{k_{2\_ГУН}}{f^2} + \frac{k_{3\_ГУН}}{f^3});$$

$$S_{\phi\_вх\_шума}(f) = S_{\phi\_оп.}(f) + S_{\phi\_делителя}(f) + S_{\phi\_фаз\_детектора}(f);$$

$$S_{\phi\_пьедестала\_вх\_шума}(f) = N^2 S_{\phi\_вх\_шума}(f);$$

$$S_{\phi\_ГУН\_контур}(f) = S_{\phi\_ГУН}(f) |HP(jf)|^2;$$

$$S_{\phi\_вых.}(f) = S_{\phi\_ГУН\_контур}(f) + S_{\phi\_пьедестала\_вх\_шума\_контур}(f).$$

Затем источники входного шума умножаются на  $N$ , порождая то, что обычно называют пьедесталом. Оптимальная полоса контура достигается в том случае, если пьедестал пересекает шум ГУН. Общий шум равен сумме модифицированного шума пьедестала контура (ФНЧ) и шума ГУН (ФВЧ). Взяв десятичный логарифм от выходного шума и вычтя 3 дБ, получим окончательную величину однополосного фазового шума (SSB).

### ОДНОКОНТУРНАЯ СХЕМА ФАПЧ

Позволяет создавать экономичные и эффективные синтезаторы, сочетая умеренную производительность, компактность и малое энергопотребление. Применяя серийно выпускаемые компоненты (например, специализированные ИС Fractional-N) и тщательно продуманное моделирование, можно оптимизировать схемы таких синтезаторов и получить сигналы с приемлемым фазовым шумом, паразитными составляющими и высоким разрешением по частоте.

### МНОГОКОНТУРНАЯ СХЕМА ФАПЧ

Несмотря на хорошую оптимизацию, одноконтурные схемы обладают некоторыми ограничениями. В высококачественных синтезаторах используются многоконтурные схемы, поскольку они обеспечивают значительно меньший фазовый шум и уровень паразитных составляющих по сравнению с простыми одноконтурными синтезаторами Fractional-N (FN). Существует множество конфигураций многоконтурных синтезаторов, одна из которых показана на рис.2. Она состоит из сумматора, цепи точной настройки и цепи ступенчатой перестройки.

Цепь смещения (или ступенчатой перестройки) выполняет грубую настройку по частоте, тогда как цепь тонкой настройки (или DDS) генерирует низкочастотный сигнал октавной ширины с высоким разрешением, который заполняет промежутки между шагами грубой настройки. Сумматор складывает эти два сигнала. В общем случае параметры при малой отстройке определяются шумом цепи смещения и главным опорным сигналом, а параметры при большой отстройке определяются ГУН сумматора. Цепь точной настройки дает вклад второго порядка. Поскольку сумматор содержит смеситель, нужно проявлять особую осторожность при выборе частотного плана, чтобы исключить попадание паразитных составляющих в полосу пропускания цепи.

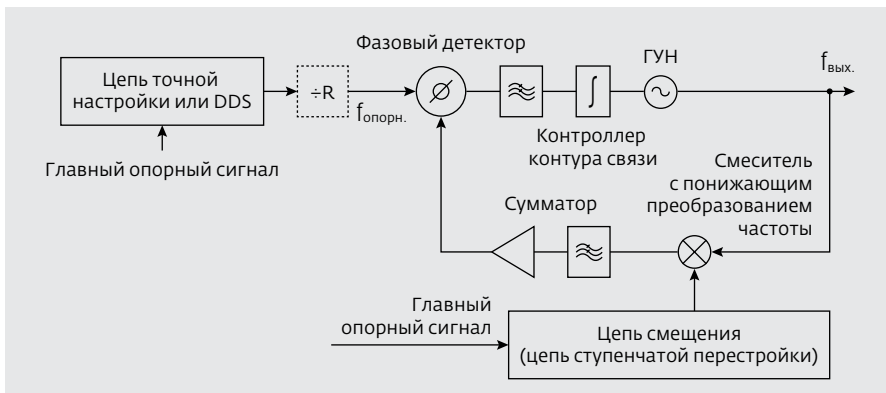


Рис.2. Блок-схема типичного многоконтурного синтезатора. Цепь генерации главного опорного сигнала не показана

Такая трехконтурная схема использована в генераторе сигналов Agilent N5181B/N5182B (рис.3). Схема Fractional-N генерирует частоты в диапазоне от 62,5 до 125 МГц. Выход цепи смещения, перестраиваемый в диапазоне от 3 до 6 ГГц с шагом 125 МГц, смешивается с выходной частотой ГУН сумматора и дает промежуточную частоту (ПЧ), которая совпадает с опорным сигналом, генерируемым схемой FN. Полное покрытие достигается за счет смещения в верхней и нижней боковых полосах.

Блок опорного сигнала генерирует маломощный сигнал частотой 100 МГц, который синхронизируется с высокостабильным опорным сигналом 10 МГц. Из этого сигнала 100 МГц создается опорный сигнал 50 МГц для схемы FN.

Для цепи смещения генерируется набор частот от 3 до 6 ГГц с шагом 500 МГц и две дополнительные частоты 62,5 и 187,5 МГц.

**СХЕМА СМЕЩЕНИЯ**

Все частоты в схеме смещения интегрально привязаны к частоте n·500 МГц. Поэтому, несмотря на присутствие смесителя, перекрестные паразитные составляющие здесь отсутствуют, и ближайшая к несущей паразитная составляющая имеет частоту 62,5 МГц.

Цепь управления ГУН необходима для синхронизации контура в соответствующей боковой полосе.

Фазовый шум с малой отстройкой в цепи смещения равен сумме шума n·500 МГц, шума опорного сигнала 62,5 или 187,5 МГц и шума фазочастотного детектора. Это предполагает точное умножение 100 МГц сигнала кварцевого ГУН до частоты 500 МГц и затем выше до различных гармоник. Для учета дополнительных источников шума добавляется поправочный коэффициент:

$$S_{\varphi\_смещ.\_вх.\_шума}(f) = n^2 S_{\varphi\_гарм.}(f) + S_{\varphi\_500\text{ МГц}}(f) + S_{\varphi\_смещ.\_оп.\_62,5\text{ МГц}}(f) + S_{\varphi\_поправ.\_смещ.}(f).$$

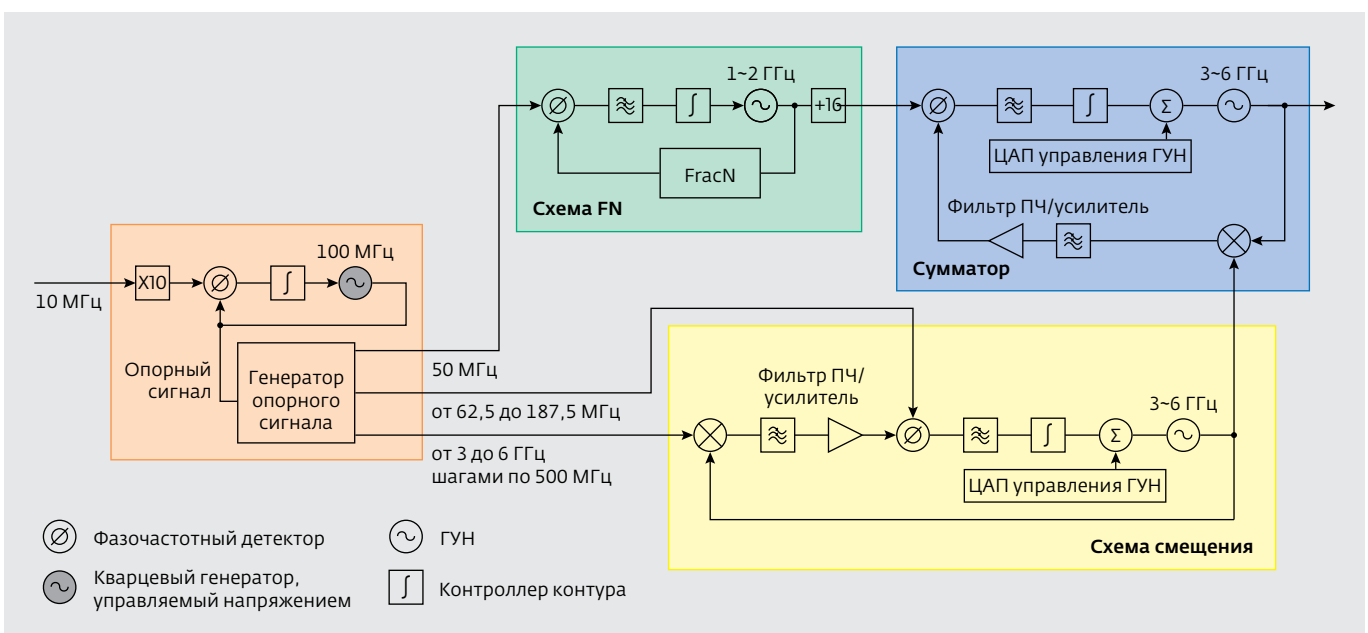


Рис.3. Трехконтурная схема, использованная в генераторах сигналов N5181B и N5182B

ГУН с диапазоном от 3 до 6 ГГц обладает довольно высоким фазовым шумом. Вследствие этого схеме смещения нужна широкая полоса пропускания для подавления или отслеживания шума ГУН. Контроллер схемы смещения состоит из дифференциального фильтра нижних частот, маломушящего измерительного усилителя с дифференциальным входом и несимметричным выходом и ступенчатых аттенюаторов, управляющих усилением схемы путем изменения  $K_V$ . Каждый из этих блоков, включая порт настройки ГУН, добавляет сдвиг фазы, который может неблагоприятно сказываться на запасе устойчивости по фазе и, следовательно, на стабильности схемы.

Дифференциальный ФНЧ подавляет поступающую из фазового детектора частоту 62,5 МГц, в результате чего несущая схемы смещения не имеет боковых полос. Эти боковые полосы могут взаимодействовать с сумматором и порождать паразитные составляющие при малой отстройке в выходном сигнале. При проектировании этого фильтра пришлось пойти на компромисс для достижения максимального подавления частоты

62,5 МГц при одновременном сохранении малого фазового сдвига на частоте среза. В полосе пропускания фильтра сдвиг фазы можно аппроксимировать постоянной задержкой.

Блоки операционного усилителя и ГУН моделируются с помощью простого времени задержки  $T$ . Была специально разработана "опережающе-запаздывающая" цепь суммирования с независимым от частоты затуханием. Частота среза и передаточная функция с разомкнутой петлей обратной связи для задержки 24 нс (рис.4, левый график) определяются уравнениями:

$$f_{x\_смещ.} = K_{V\_смещ.} K_{0\_смещ.} A_{смещ.\_фаз.\_дет.} \times A_{смещ.\_интегр.} A_{lg\_смещ.} = 3,2 \text{ МГц};$$

$$T_{смещ.\_инт.}(s) = \frac{s + f_{z\_смещ.\_интегр.}}{s} f_{z\_смещ.\_интегр.} = 80 \text{ КГц};$$

$$GH_{смещ.}(S) = \frac{f_{x\_смещ.}}{S} T_{смещ.\_интегр.}(S) e^{-2\pi s T_{смещ.}};$$

$$LP_{смещ.}(S) = \frac{GH_{смещ.}(S)}{1 + GH_{смещ.}(S)};$$

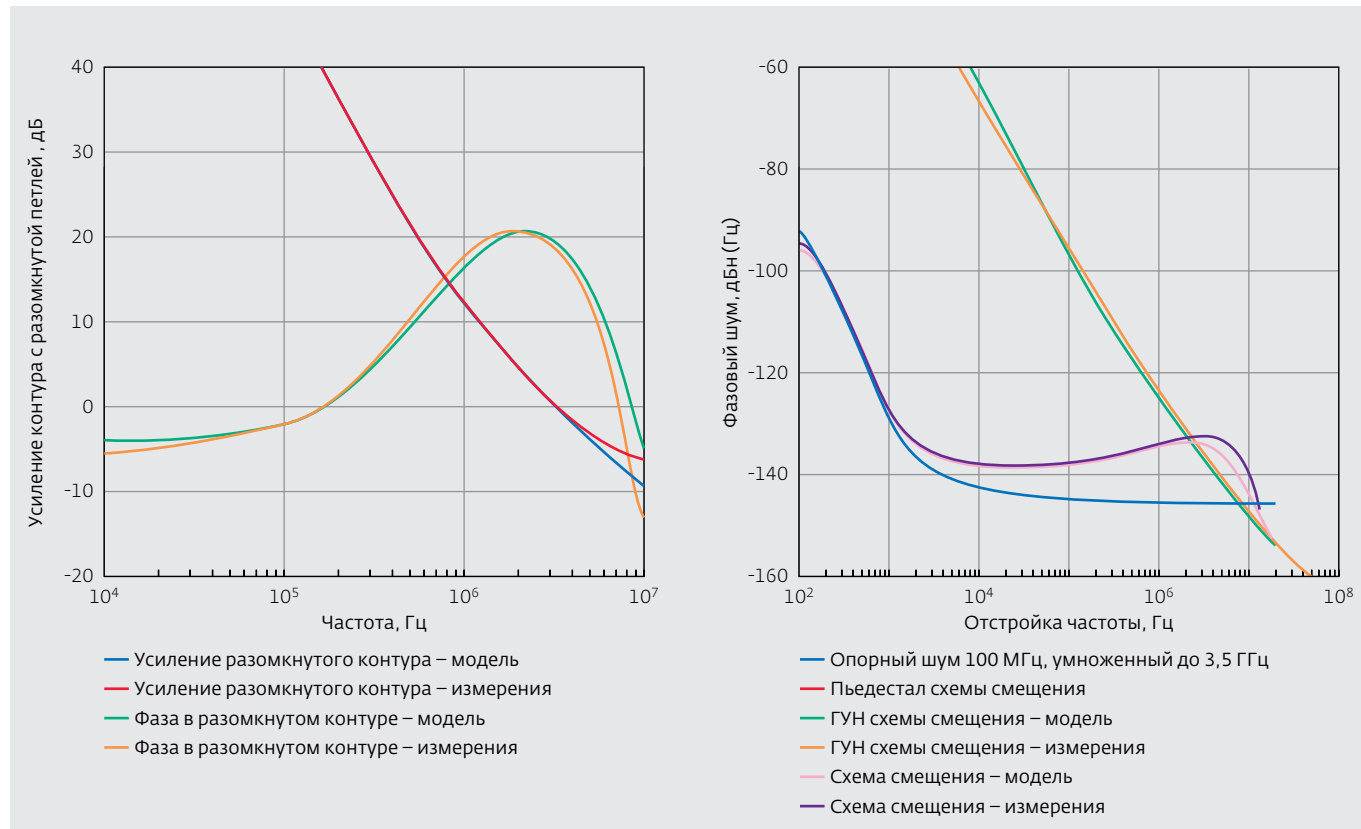


Рис.4. График Боде и график шума демонстрируют превосходную согласованность модели с результатами измерения. Запас устойчивости по фазе составляет примерно 48°

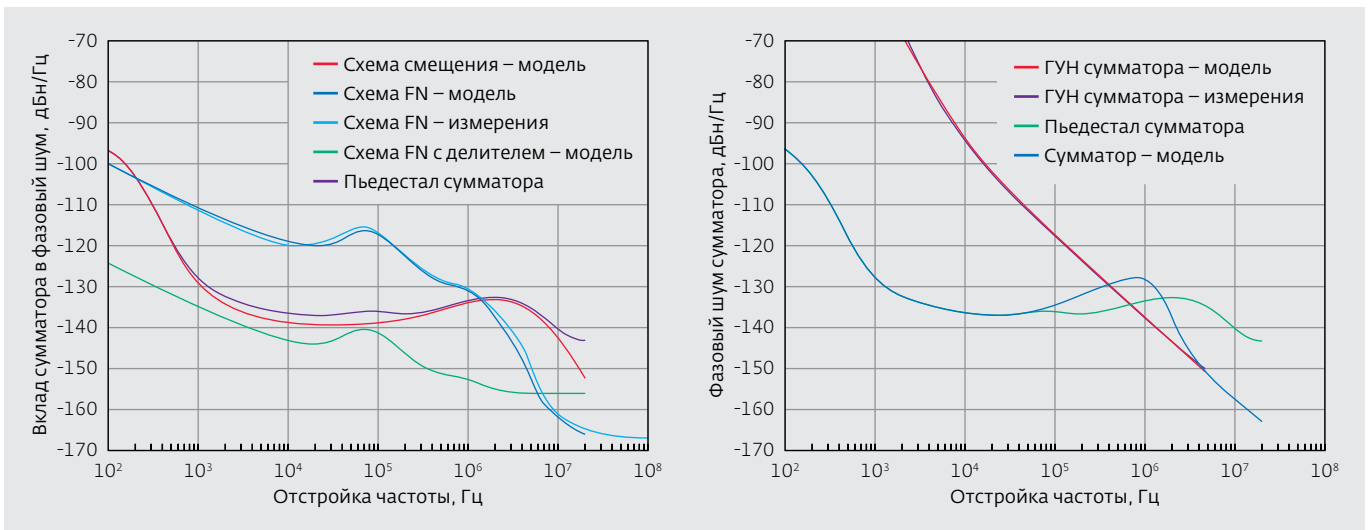


Рис.5. Вклад шума сумматора и результирующий выходной шум

$$HP_{\text{смещ.}}(S) = \frac{1}{1 + GN_{\text{смещ.}}(S)}$$

Используя передаточные функции ФНЧ, ФВЧ и различные уравнения шума, можно рассчитать шум схемы смещения по следующей формуле:

$$S_{0\_смещ.\_вых.}(f) = S_{\text{смещ.пьедестала}}(f) |LP_{\text{смещ.}}(jf)|^2 + S_{0\_смещ.\_ГУН}(f) |HP_{\text{смещ.}}(jf)|^2$$

Фазовый детектор, генератор опорного сигнала и другие источники шума в схеме ухудшают общий шум опорного сигнала примерно на 5 дБ. Полоса пропускания схемы составляла примерно 3,2 МГц. Это порождало большой пик фазового шума, который подавлялся сумматором (рис.4, правый график).

### СХЕМА Fractional-N И СУММАТОР

Схема FN генерирует выходной сигнал частотой от 1 до 2 ГГц, который делится на 16 для получения опорного входного сигнала сумматора частотой от 62,5 до 125 МГц. В схеме FN используется специализированная ИС Agilent с опорной частотой 50 МГц, что существенно снижает фазовый шум и паразитные составляющие по сравнению с серийно выпускаемыми компонентами. Благодаря делению шум и паразитные составляющие схемы FN снижаются на 24 дБ до поступления на сумматор. Такая же методология используется для анализа этой схемы. Выходной сигнал частотой от 1 до 2 ГГц делится на 16 для получения частоты от 62,5 до 125 МГц до подачи на

вход сумматора. Уровень поделенных паразитных составляющих не превышает -90 дБн.

В сумматоре используется малозумящий ГУН с диапазоном от 0,75 до 1,5 ГГц, частота которого умножается до частоты от 3 до 6 ГГц. Опорный вход сумматора представляет собой схему Fractional-N. Схема смещения выполняет суммирование с помощью смесителя в цепи обратной связи. Поскольку промежуточная частота сумматора (выход смесителя) значительно меньше частоты схемы смещения (вход смесителя), паразитные составляющие смесителя имеют более высокий порядок и, следовательно, очень невысокий уровень. Шум сумматора (рис.5) определяется уравнениями:

$$S_{0\_пьедестала\_сумм.}(f) = S_{0\_смещ.\_вых.}(f) + S_{0\_дел.\_вых.\_FN}(f) + S_{0\_фаз.\_дет.\_сумм.}(f) + S_{0\_попр.\_сумм.}(f);$$

$$S_{0\_вых.\_сумм.}(f) = S_{0\_пьедестала\_сумм.}(f) |LP_{\text{сумм.}}(jf)|^2 + S_{0\_ГУН\_сумм.}(f) |HP_{\text{сумм.}}(jf)|^2$$

Эти математические расчеты позволяют очень легко настроить параметры схемы - частоту среза, положение пиков и провалов, а также параметры разных источников шума для оптимизации характеристик путем выполнения сценариев типа what if. После выполнения этих операций можно рассчитать значения компонентов и использовать средства схемотехнического моделирования, например, Agilent Advanced Design System или SPICE, для проверки каждого параметра схемы с конкретными номиналами компонентов. ●