

УДК 631.372.632

Сверхвысокочастотные синтезаторы на кольцах фазовой автоподстройки частоты с широкой полосой перестройки частоты

Д.А. Томозов

Аннотация

Разработаны и изготовлены СВЧ синтезаторы на кольцах фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с октавной полосой частот для трех литерных диапазонов 1 — 2 ГГц, 2 — 4 ГГц и 4 — 8 ГГц. Разработаны инженерная методика проектирования синтезаторов частот (СЧ) и программа для расчета фазового шума. Даны рекомендации по выбору полосы пропускания кольца ФАПЧ. Рассчитаны параметры трех литерных СЧ. Описаны схема и конструкция СЧ, функционирующего в диапазоне частот 2 — 4 ГГц. Показано, что спектральные характеристики этого синтезатора хорошо согласуются с расчетными: подавление паразитных дискретных спектральных составляющих шумов (ПДСШ) составляет не менее 40 дБ, уровень фазового шума при отстройке от несущей на 10 кГц равен минус 62 дБн/Гц, на 100 кГц — минус 85 дБн/Гц, на 1 МГц — минус 128 дБн/Гц.

Ключевые слова: синтезатор частот; кольцо фазовой автоподстройки частоты; пропорционально-интегрирующий фильтр; фазовый шум.

1. Введение

В литературе описаны различные типы синтезаторов гармонических колебаний СВЧ диапазона, и, в том числе, реализованных на кольцах ФАПЧ [1 — 3]. В последние годы наиболее часто используется схема, изображенная на рис.1 а). Методы проектирования синтезаторов частот рассматриваемого типа достаточно подробно описаны как в профильных монографиях [4, 5], так и в информационно-справочной документации, которая выпускается фирмами-изготовителями. Более того, этими фирмами разработаны специализированные программные комплексы, которыми заинтересованные пользователи могут бесплатно воспользоваться по сети интернет. Например, ADIsimPLL 3.1 — продукт фирмы Analog Devices, США [6]. С помощью этой программы инженер может выполнить все

основные расчеты, необходимые для проведения разработки, а в прилагаемом описании найдет справочные материалы по проектированию СЧ на кольцах ФАПЧ.

Вместе с тем, есть необходимость дополнительного освещения ряда вопросов проектирования СЧ. Среди них такие, как быстрый, при этом оптимальный, выбор полосы пропускания кольца ФАПЧ и расчет элементов пропорционально-интегрирующего фильтра (ПИФ) с учетом подавления ПДСШ. Кроме того, имеющиеся в интернете программы обычно ориентированы на использование конкретной фирменной элементной базы, и могут оказаться малопригодными при переходе на микросхемы, выпускаемые другими производителями. Следовательно, они, вообще говоря, не являются универсальными, и поэтому приходится разрабатывать собственные программные модули [7, 8].

Цель работы состоит в создании инженерной методики проектирования СЧ, реализованных на кольцах ФАПЧ, а также проектировании действующих образцов с использованием этой методики и проведение измерений их характеристик.

2. Базовая схема СЧ и коэффициенты передачи по напряжению ее основных элементов

Основные элементы базовой схемы СЧ, приведенной на рис.1 а), выделены пунктиром. Среди них: делитель опорной частоты (Reference Divider — ДОЧ) с коэффициентом R , цифровой фазовый детектор (Phase Detector — ФД), к выходу которого подключен генератор тока, или накачки заряда (Charge-Pump — ГНЗ) и делитель выходной частоты (ДВЧ) с коэффициентом N .

Для функционирования схемы синтезатора на вход ДОЧ подается сигнал с кварцевого генератора опорной частоты (Crystal Reference — ГОЧ). С выхода ДОЧ он поступает на один из входов ФД, а затем на ГНЗ. За ним следует резистивно-емкостной пропорционально-интегрирующий фильтр нижних частот (Loop Filter — ПИФ). Выделяющееся на нем напряжение определяет частоту установленного на выходе генератора, управляемого напряжением (Voltage Control Oscillator — ГУН). Выходную частоту синтезатора перестраивают в широком диапазоне, изменяя программным способом значения коэффициентов деления R и N . Для иллюстрации типичная спектральная характеристика СЧ дана на рис.1 б).

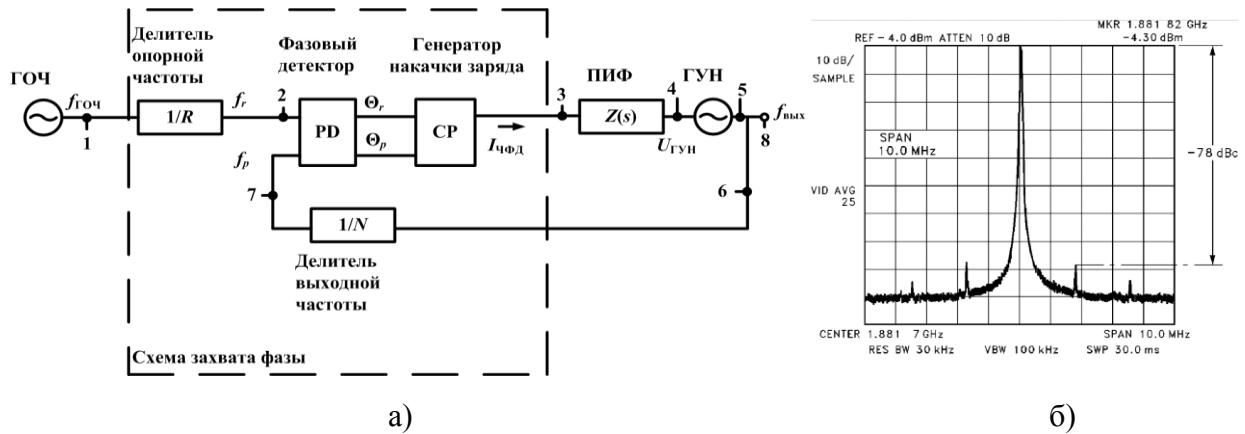


Рис.1. Схема синтезатора, реализованного на кольце ФАПЧ с фазовым детектором, имеющим токовый выход а), типичная спектральная характеристика СЧ б)

В частотно-временной области захвата кольца ФАПЧ ему может быть сопоставлена линейная модель, изображенная рис.2. В ней каскад, состоящий из ФД и ГНЗ, который будем называть схемой захвата фазы (СЗФ), характеризуют общим параметром K_ϕ с размерностью $\text{мА}/2\pi$, имеющим смысл коэффициента пропорциональности между выходным током и разностью фазы на двух входах ФД. На один из входов ФД подается сигнал с частотой сравнения, которая равна частоте ГОЧ, деленной на коэффициент R , $f_r = f_{CR}/R$, а на второй — с частотой $f_p = f_{VCO}/N$, формирующейся после прохождения по кольцу обратной связи через ДВЧ выходного сигнала ГУН. ПИФ характеризуют его сопротивлением $Z(s)$, равным отношению напряжения на входе ГУН к току на выходе ГНЗ, параметр $s = j\Delta\omega = j2\pi\Delta f$, Δf — частота отстройки от несущей.

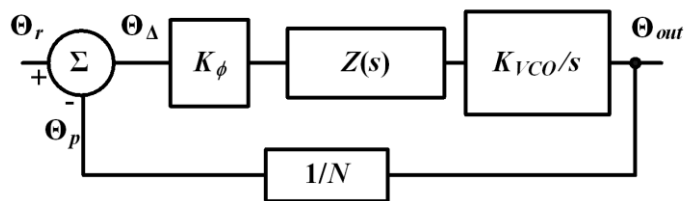


Рис.2. Линейная модель звена ФАПЧ

Для описания ГУН вводят коэффициент K_{VCO} с размерностью $\text{МГц}/\text{В}$, имеющий смысл крутизны его вольт-частотной характеристики. Поскольку коэффициент K_{VCO} выражен в терминах частотной переменной, а линейная модель построена для напряжений, пропорциональных фазе сигнала, то в схеме, изображенной на рис. 2, ГУН характеризуют коэффициентом K_{VCO}/s . Сделано это потому, что фаза определяется через интеграл от частоты, а в области преобразования Лапласа такой операции соответствует деление на переменную s .

Все элементы, входящие в схему СЧ, вносят фазовые шумы. Их выходы на рис.1 а) пронумерованы. Полагая, что собственные шумы элементов определены теоретически или экспериментально, найдем те значения, в которые они пересчитываются через кольцо ФАПЧ к выходу схемы 8.

Как известно [1], коэффициент передачи по напряжению из любой точки прямой ветви кольца ФАПЧ на выход равен коэффициенту передачи в прямом направлении, деленному на единицу плюс коэффициент передачи по напряжению разомкнутого кольца. Учитывая это положение, приходим к следующим выражениям для коэффициентов передачи с выходов отдельных элементов на выход кольца ФАПЧ:

прямой ветви (2—5)

$$H_F = K_\phi Z(s) K_{VCO} / s, \quad (1)$$

обратной ветви (6—7)

$$H_R = 1 / N, \quad (2)$$

разомкнутой петли (2—7)

$$H_{OL} = H_F H_R, \quad (3)$$

замкнутой петли (2—8)

$$H_{CL} = H_F / (1 + H_{OL}), \quad (4)$$

замкнутой петли по отношению к шумам ГОЧ (1—8)

$$H_{CL1} = H_{CL} / R, \quad (5)$$

замкнутой петли по отношению к шумам ГУН (5 — 8)

$$H_{CL2} = 1 / (1 + H_{OL}). \quad (6)$$

3. Суммарный шум схемы СЧ и выбор ширины полосы частот кольца ФАПЧ

Если определены спектральные плотности мощности (СПМ) фазового шума (ФШ) $S_{CR}(\Delta f)$ – ГОЧ, $S_{VCO}(\Delta f)$ – ГУН, $S_{PLL}(\Delta f)$ – схемы захвата фазы (СЗФ) и $S_{R\Sigma}$ – резисторов, входящих в ПИФ, то СПМ ФШ на выходе кольца ФАПЧ рассчитывается с помощью соотношения

$$S_\Sigma(\Delta f) = 10 \log \left[|H_{CL1}|^2 10^{\frac{S_{CR}(\Delta f)}{10}} + |H_{CL}|^2 10^{\frac{S_{PLL}(\Delta f)}{10}} + |H_{CL2}|^2 10^{\frac{S_{VCO}(\Delta f)}{10}} + 10^{\frac{S_{R\Sigma}}{10}} \right] \quad (7)$$

Проанализируем в общем виде особенности прохождения отдельных составляющих фазового шума через кольцо ФАПЧ. Типичный вид частотных зависимостей коэффициентов передачи H_{CL1} (для шумов ГОЧ) и H_{CL2} (для шумов ГУН) представлен на рис.3.

Видим, что $H_{CL1}(s) \rightarrow 10\log(N/R)$ дБ при $\Delta f \ll f_c$. Что же касается выхода ГУН, то $H_{CL2}(s) \rightarrow 0$ дБ при $\Delta f \gg f_c$, где f_c – ширина полосы кольца ФАПЧ. Таким образом, по отношению к фазовым шумам ГОЧ кольцо ФАПЧ ведет себя, как ФНЧ с коэффициентом усиления в полосе пропускания f_c , равным N/R . Аналогичное поведение кольца ФАПЧ наблюдается и по отношению к фазовому шуму схемы захвата фазы, но с коэффициентом усиления, равным N . Что же касается фазового шума ГУН, то здесь, напротив, кольцо ФАПЧ ведет себя подобно фильтру верхних частот с той же частой среза f_c .

Это принципиально важное обстоятельство при малом отклонении частоты от центральной позволяет избавляться от фазового шума ГУН, имеющего в этой области высокий уровень. При большой отстройке частоты фазовый шум ГУН быстро уменьшается, и его уровень оказывается ниже уровня шума ГОЧ и СЗФ. В этой области суммарный фазовый шум схемы стремится к уровню, определяемому ГУН, поскольку при $\Delta f > f_c$ шумы, создаваемые ГОЧ и СЗФ, подавляются кольцом ФАПЧ.

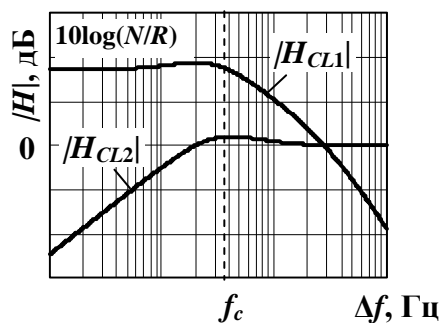


Рис. 3. Коэффициенты передачи замкнутого кольца ФАПЧ для фазовых шумов ГОЧ (H_{CL1}) и ГУН (H_{CL2})

Данный вывод и определяет стратегию выбора ширины полосы кольца ФАПЧ f_c . Ее значение должно лежать в области частот, в которой суммарный шум, создаваемый на выходе кольца ФАПЧ генератором опорной частоты, схемой захвата фазы, а также резисторами, входящими в ПИФ, сравнивается с шумом, генерируемым ГУН.

Таким образом, в рассматриваемой схеме обеспечивается не только быстрая и точная перестройка частоты синтезатора, но и оптимальным образом регулируется уровень поступающих на выход фазовых шумов, создаваемых ее отдельными элементами.

На основании проведенного анализа схемы СЧ реализованы процедуры и составлена программа, работающая в среде комплекса MathCAD. Она позволяет определить полосу кольца ФАПЧ, рассчитать компоненты ПИФ и определить СПМ ФШ, прошедших через кольцо ФАПЧ для всех элементов СЧ.

4. Расчет элементов ПИФ и фазового шума, генерируемого в схеме синтезатора с активным фильтром 3-го порядка

Проведем расчет СЧ с активным фильтром третьего порядка (рис.4) с выходной частотой $f_{\text{вых}} = 2$ ГГц. В качестве ГОЧ используем кварцевый генератор C2310A1-108 с выходной частотой 20 МГц, который выпускается фирмой VECTRON INTERNATIONAL(США). Он характеризуется следующим уровнем фазового шума $S_{CR}(\Delta f_1) = -125$ дБн/Гц при $\Delta f_1 = 1$ кГц, $S_{CR}(\Delta f_2) = -135$ дБн/Гц при $\Delta f_2 = 10$ кГц и $S_{CR}(\Delta f_3) = -145$ дБн/Гц при $\Delta f_3 = 100$ кГц.

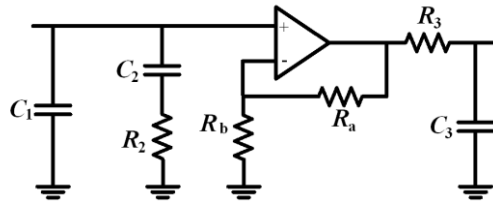


Рис.4. Схема активного ПИФ третьего порядка

В качестве СЗФ применяем микросхему ADF4157 [9], в состав которой входят два делителя частоты с коэффициентами R и N , причем последний может принимать дробные значения. Такое решение позволяет сформировать шаг сетки частот много меньшей частоты сравнения. Полагая $R = 1$, получим $f_r = f_{CR} = 20$ МГц. В справочных данных на микросхему ADF4157 указано, что можно регулировать максимальное значение выходного тока СЗФ $I_{CP, \max}$, выбирая величину внешнего сопротивления R_{set} в интервале от 2,7 кОм до 10 кОм, подключаемого к одному из ее входов. Максимальное значение тока накачки определяется следующим соотношением

$$I_{CP, \max} = 25,5 / R_{set}, \text{ мА.} \quad (8)$$

Тогда, принимая $R_{set} = 5,1$ кОм, получаем $I_{CP, \max} = 5$ мА, и, соответственно, максимальный коэффициент пропорциональности $K_{\phi, \max} = 5 \text{ мА} / 2\pi$. Это значение и выберем при расчете элементов ПИФ.

В качестве ГУН воспользуемся генератором HV87SM-42, который производится фирмой Spectrum Microwave, США. Уровень фазового шума данного ГУН не превышает минус 100 дБн/Гц при отстройке частоты от центральной на $\Delta f = 50$ кГц. Диапазон перестройки частоты этого ГУН лежит в интервале 2 — 4 ГГц. Причем, на его управляющий вход следует подавать напряжение, изменяющееся в интервале от 1 до 18 В. Вольт-частотная

характеристика и зависимость K_{VCO} от частоты для данного ГУН представлены на рис.5. Видим, что при $f = 2$ ГГц крутизна перестройки $K_{VCO} = 220$ МГц/В.

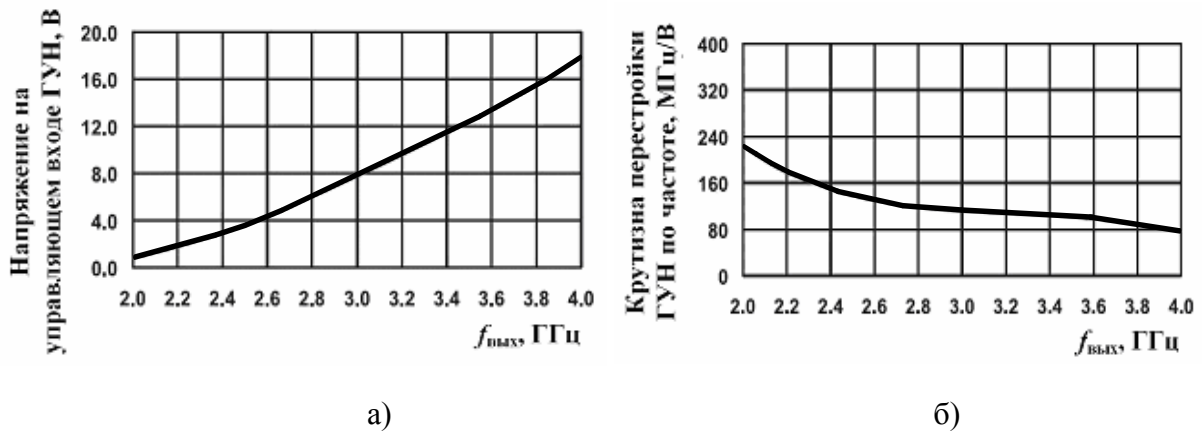


Рис.5. Вольт-частотная характеристика ГУН а), зависимость K_{VCO} от частоты б)

Теперь выберем полосу пропускания кольца ФАПЧ f_c . Она, как было сказано выше, определяется как абсцисса точки пересечения двух кривых на графике зависимости СПМ ФШ от частотной отстройки Δf , рис.6. Первая кривая дает суммарные шумы ГОЧ и СЗФ S'_Σ , прошедшие через кольцо ФАПЧ при бесконечно малом значении отстройки частоты, при которой $H_{CLI} \approx N/R$. Причем,

$$S'_\Sigma = 10 \log \left(10^{\left[S_{CR} - 20 \log(R) \right] / 10} + 10^{S_{PLL} / 10} \right) + 20 \log(N). \quad (9)$$

Вторая кривая — собственные шумы ГУН при выбранной частоте его выходного сигнала (в данном случае $f_{\text{вых}} = 2$ ГГц). Полученные на основе расчетов графические зависимости представлены на рис.6. Видим, что в данном случае следует выбрать полосу пропускания кольца ФАПЧ $f_c = 21$ кГц. Это значение, впрочем, является лишь оценочным и подлежит дальнейшей оптимизации.

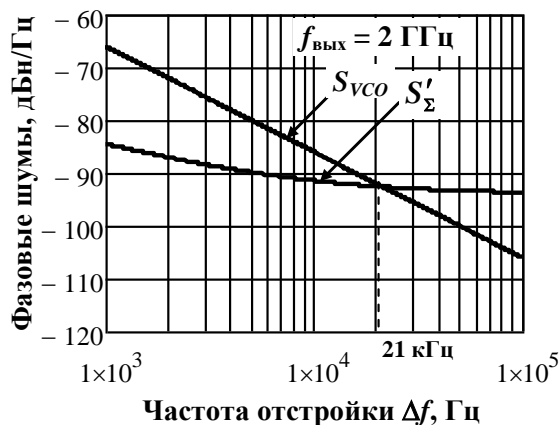


Рис. 6. Определение полосы пропускания ФАПЧ

В соответствии с рекомендациями, указанными в монографии [5], в качестве начальных значений для варьируемых параметров ПИФ выберем $T_{31} = 2$, $\phi_c = 42,5^\circ$ и $\gamma = 1,203$. При дальнейшей оптимизации параметров ФАПЧ их можно изменить. Вместе с тем, данный выбор приводит к минимизации времени захвата кольца ФАПЧ, а также уровня ПДСШ. Теперь проводим расчет элементов схемы активного ПИФ 3-го порядка с помощью программы MathCAD. Получаем: $C_1 = 430$ нФ, $C_2 = 6630$ нФ, $C_3 = 1,2$ нФ, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = 2$ кОм. Характеристики разомкнутого и замкнутого кольца ФАПЧ, рассчитанные с помощью выражений (1) — (6), приведены на рис.7.

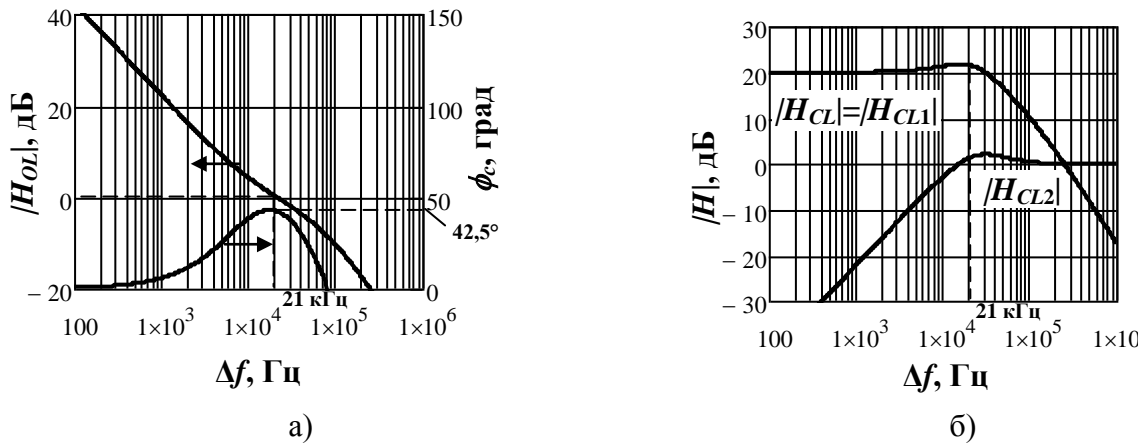


Рис.7. Коэффициент передачи и его фаза для разомкнутого а) и коэффициенты передачи $|H_{CL}| = |H_{CL1}|$ и $|H_{CL2}|$ для замкнутого кольца ФАПЧ б)

Видим, что коэффициент передачи разомкнутого кольца ФАПЧ на частоте $f_c = 21$ кГц равен 0 дБ, а его фаза $\phi_c = 42,5^\circ$. Замкнутое кольцо ФАПЧ ведет себя как ФНЧ с коэффициентом усиления в полосе пропускания f_c , равным $N = f_{VCO}/f_{CR} = 2000/20 = 100$ или 20 дБ. В то же самое время, коэффициент передачи замкнутого кольца ФАПЧ по отношению к шумам ГУН ведет себя, как ФВЧ с частой среза $f_c = 21$ кГц. Таким образом, численная проверка описанной выше методики проектирования ПИФ для кольца ФАПЧ подтверждает ее правомерность.

Эксперимент показывает, что найденное значение полосы пропускания кольца ФАПЧ f_c не является окончательным, и его можно варьировать в пределах $\pm 20\%$ [10]. В результате этого, естественно, будут изменяться и номиналы элементов ПИФ. В умении правильно подобрать необходимые номиналы элементов ПИФ и заключается искусство проектирования СЧ.

Для описания свойств кольца ФАПЧ полезно ввести константу K [5]

$$K = K_{\phi} K_{vco} / N. \quad (10)$$

Анализ показывает, что между номиналами элементов ПИФ, его частотой среза f_c и константой K существуют следующие связи $C \sim K / f_c^2$ и $R \sim f_c / K$. Кроме того, хотя это и будет грубым приближением, можно положить, что $f_c \sim \sqrt{K}$.

Для анализа фазового шума в схемах с активными ПИФ можно использовать приближенную методику, описанную в [11]. В качестве операционного усилителя применяем микросхему AD8065, выпускаемую фирмой Analog Devices. При $\Delta f = 10$ кГц в справочных данных на нее указаны средние квадратические значения входного шума по напряжению $V_n = 7$ нВ/Гц^{1/2} и по току $I_n = 0,6$ фА/Гц^{1/2}.

Полученные в результате расчета зависимости СПМ ФШ на выходе СЧ от Δf , как для отдельных элементов схемы (и, в том числе, операционного усилителя — S_{OA}), так для суммарного значения S_{Σ} представлены на рис.8.

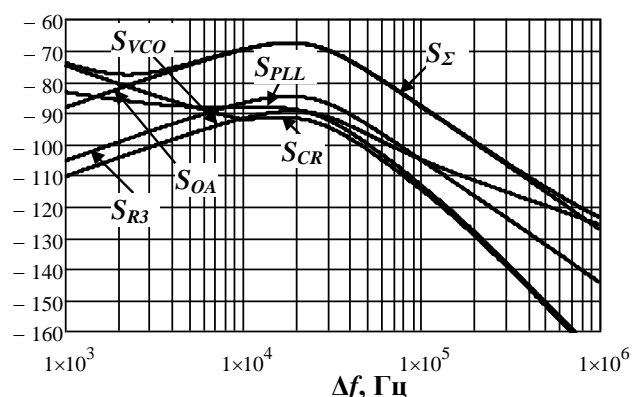


Рис.8. Зависимости от Δf прошедших через кольцо ФАПЧ СПМ ФШ элементов, входящих в схему синтезатора частот с активным ПИФ, и суммарного шума

Для сравнения полученных выше результатов с данными моделирования, выполненного с помощью программы ADIsimPLL 3.1, были проведены специальные расчеты. Отличия между результатами весьма незначительны.

Вместе с тем, при всех очевидных достоинствах комплекса ADIsimPLL 3.1 отметим следующее. Во-первых, при его эксплуатации могут возникнуть проблемы с использованием элементной базы, выпускаемой не фирмой Analog Devices, а другими производителями. Во-вторых, разработчиками программы не предусмотрена возможность изменения некоторых важных параметров элементов схемы СЧ и нет схем активных ПИФ четвертого порядка. В-третьих, затруднительно проводить подробное исследование СПМ ФШ каждого составного

источника шума в отдельности, а это часто оказывается полезным при оптимизации параметров схемы. В-четвертых, имеются нежелательные ограничения по графическому представлению получаемых результатов.

5. Реализация синтезаторов частот

С помощью программы ADIsimPLL, а также комплекса MathCAD проведен расчет параметров трех литерных СЧ, реализованных на кольцах ФАПЧ для диапазонов 1 – 2 ГГц, 2 – 4 ГГц и 4 – 8 ГГц. Выпущены схемы электрические принципиальные, разработана конструкция, а сами СЧ изготовлены в опытном производстве. Все синтезаторы обеспечивают выходную мощность не менее 0 дБм, неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в октавном диапазоне частот не более 3 дБ, уровень второй и третьей гармоник выходного сигнала относительно несущей ослаблен не менее чем на 14 дБ. Величина ослабления ПДСШ относительно несущей при отстройке от нее на 40-1000 Гц составляет не менее 40 дБ. Уровень фазового шума при отстройке от несущей на 10 кГц равен минус 62 дБн/Гц, на 100 кГц – минус 85 дБн/Гц, на 1 МГц – минус 128 дБн/Гц.

Опишем конструкцию и схему, а также приведем результаты испытаний одного из этих СЧ, который функционирует в диапазоне частот 2 – 4 ГГц. Он состоит из двух плат – вторичных источников питания (ВИП) и СВЧ элементов (на которой смонтированы основные компоненты устройства). На рис.9 показан внешний вид этой платы. На плате СВЧ элементов диапазона 4 – 8 ГГц введен делитель частоты на два, так как максимально возможная входная частота микросхемы ADF4157, которая и является СЗФ, равна 6 ГГц.

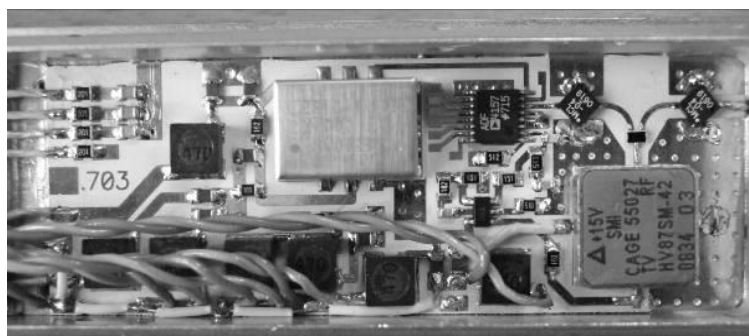


Рис.9. Плата СВЧ элементов

На рис.10 приведены измеренные с помощью анализатора спектра WCA280A (WIRELESS COMMUNICATION ANALIZER) зависимости фазовых шумов от отстройки в полосах частот а) 20 кГц, б) 200 кГц, в) 2000 кГц при центральной частоте 2 ГГц. Видим, что спектральные характеристики СЧ хорошо согласуются с расчетными данными.

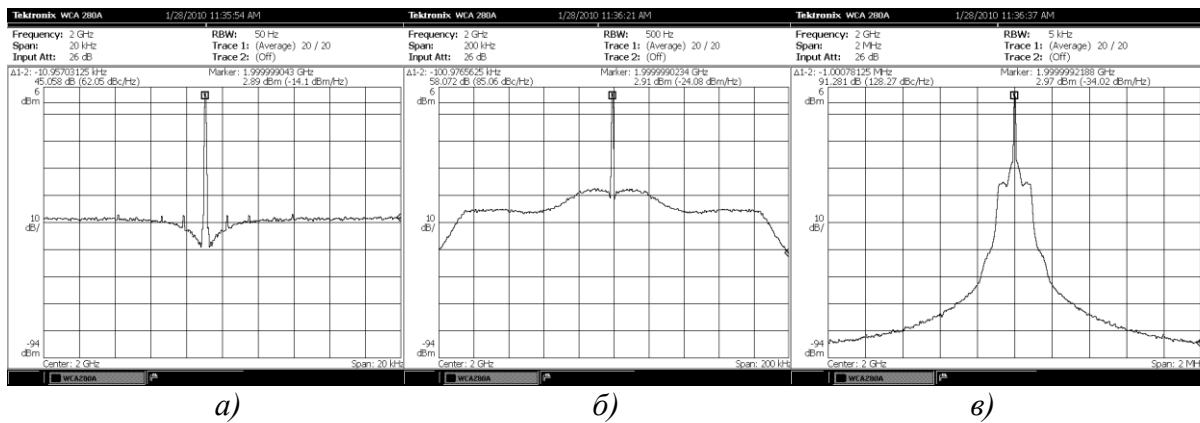


Рис.10. Зависимости фазовых шумов от отстройки в полосах частот а) 20 кГц, б) 200 кГц, в) 2000 кГц при центральной частоте 2 ГГц

6. Заключение

Разработана методика моделирования с помощью ЭВМ синтезаторов диапазона СВЧ, реализованных на кольцах ФАПЧ. Решены вопросы оптимального выбора полосы пропускания пропорционально-интегрирующего фильтра и расчета его параметров. Спроектированы схемы и топологии, проведено изготовление и испытаны синтезаторы для трех литерных диапазонов 1 — 2 ГГц, 2 — 4 ГГц и 4 — 8 ГГц. Детально описаны схема и конструкция синтезатора, функционирующего в диапазоне частот 2 – 4 ГГц. Результаты экспериментальных данных хорошо согласуются с расчетными. Получены следующие основные параметры экспериментального образца: подавление паразитных дискретных спектральных составляющих шумов — не менее 40 дБ, уровень фазового шума при отстройке от несущей на 10 кГц, 100 кГц и 1 МГц не более минус 62 дБн/Гц, 85 дБн/Гц и 128 дБн/Гц, соответственно.

Библиографический список

1. Манассевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование. М.: Связь, 1979. — 384 с.
2. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: — Радио и связь, 1991. — 264 с.
3. Шахтарин Б.И., Прохладин Г.Н., Иванов А.А. Синтезаторы частот. Учебное пособие. М.: Горячая Линия-Телеком, 2007. — 128 с.
4. Rohde U.L., Newkirk D.P. RF/Microwave Circuit Design For Wireless Applications, John Wiley & Sons, Inc., 2000. — p. 954.
5. Banerjee D. PLL Performance, Simulation and Design 4th edition, 2006 // <http://www.national.com>.

6. ADISimPLL // <http://www.analog.com>.
7. *Томозов Д.А., Петров А.С.* Расчет фазового шума в синтезаторах частот, реализованных на кольцах ФАПЧ // Электромагнитные волны и электронные системы, 2010, т.15, №4.— с.57 - 68.
8. *Томозов Д.А., Петров А.С.* СВЧ синтезаторы на кольцах ФАПЧ с октавной полосой частот // XVI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», 2010, т.2.— с.1620 - 1625.
9. ADF4157, <http://www.analog.com>.
10. Clock Conditioner Owner's Manual, 2006. // <http://www.national.com/see/timing>.
11. *Lascari L.* Accurate Phase Noise Prediction in PLL Synthesizers // http://resume.rfdude.com/LL_apr2000pg30.pdf.

Сведения об авторах

Томозов Дмитрий Анатольевич, инженер ОАО НПК НИИ дальней радиосвязи;
т.:223-65-00, доб. 21-79; 8-906-720-21-13; e-mail: dimon-pit@yandex.ru