

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ОДНОКОЛЬЦЕВОЙ СИСТЕМЫ ФАПЧ СО СМЕСИТЕЛЕМ И ЦИФРОВОГО СИНТЕЗАТОРА СИГНАЛОВ

Рассматривается принцип работы комбинированного формирователя сигналов, выполненного на основе однокольцевой системы ФАПЧ со смесителем и цифровым синтезатором сигналов. Получено выражение для модели спектральной плотности мощности фазовых шумов комбинированного формирователя. Приведены результаты расчетов шумовых характеристик комбинированного формирователя для различных выходных частот и частот сравнения в фазовом детекторе.

Ключевые слова: комбинированный формирователь, ФАПЧ, шумовые характеристики, фазовый шум.

Введение

Постановка проблемы и анализ публикаций.

Цифровые синтезаторы частот (ЦСЧ) и цифровые синтезаторы сигналов (ЦСС) находят в последние годы все большее применение в современных радиотехнических системах, таких, как мобильные средства связи, прецизионные измерительные устройства, системы радиолокации и радионавигации. Основной тенденцией развития ЦСС в указанных областях является повышение выходных частот (десятки гигагерц) и уменьшение шага сетки частот (единицы герц). Поэтому к современным синтезаторам, для формирования сетки частот и сигналов в диапазоне СВЧ диапазоне, предъявляются высокие требования к уровню фазовых шумов. На данный момент времени получившие большое распространение ЦСС позволяют получить хорошие шумовые характеристики и очень малый шаг сетки частот. Однако современные ЦСС имеют пока ограниченный частотный диапазон (до 1,5 ГГц) и сравнительно высокий уровень дискретных спектральных составляющих.

Широко применяемые системы косвенного синтеза легко обеспечивают формирование СВЧ сигнала с хорошими шумовыми параметрами, однако для простых схем ФАПЧ уменьшение шага синтезируемых частот ведет к возрастанию уровня фазовых шумов.

Для уменьшения уровня фазовых шумов используют схемы ФАПЧ со смесителем, многокольцевые системы, однако шаг сетки частот определяется частотой сравнения в системе ФАПЧ, дальнейшее уменьшение которой оказывается невозможным.

Формировать сигналы СВЧ диапазона с малым шагом сетки частот позволяют комбинированные синтезаторы сигналов, использующие систему ФАПЧ [1, 2]. При этом малый шаг частоты обеспечивает ЦСС, а хорошую фильтрацию шумов и дискретных составляющих – система ФАПЧ с высокой частотой сравнения. Для комбинированных формирователей сигналов, использующих ФАПЧ с дели-

телями частоты и анализ шумовых характеристик приведен в [2 – 4]. Варианты комбинированных синтезаторов сигналов на основе ФАПЧ и ЦСС описаны в [5, 6], однако их выходная частота ограничивалась максимальной частотой ЦСС, а исследование шумовых характеристик таких комбинированных синтезаторов не проводилось.

Целью статьи является получение соотношений для спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов схемы комбинированного синтезатора сигналов на основе ФАПЧ со смесителем частоты и ЦСС в цепи обратной связи, а также исследование его шумовых характеристик в интересах использования его для РЛС дециметрового и сантиметрового диапазона волн.

Основной материал

Структурная схема такого комбинационного синтезатора сигналов, состоящего из: ГОЧ – генератора опорной частоты; ЦСС – цифрового синтезатора сигналов; ДФКД1, ДФКД2, ДФКД3 – делителей частоты с фиксированным коэффициентом деления N_1 , N_2 , N_3 ; ЧФД – частотно-фазового детектора; ФНЧ – а нижних частот; ГУН – генератора, управляемого напряжением; СМ – смесителя частоты, приведена на рис. 1. Для формирования тактовой частоты ЦСС введен умножитель частоты УЧ, который реализован в виде встроенной в интегральный ЦСС петли ФАПЧ с коэффициентом умножения n_1 (до 255), например, AD9914 с тактовой частотой 3,5 ГГц [7].

Для получения хороших показателей шумовых характеристик тактовая частота ЦСС f_t должна быть близка к максимально возможной. Делитель частоты ДФКД3 служит для возможности увеличения выходной частоты ГУН примерно в N_3 раз по сравнению с выходной частотой ЦСС (примерно 1,5 ГГц). В таких случаях коэффициент деления N_3 желательно иметь с небольшими значениями, иначе значительно возрастут фазовые шумы.

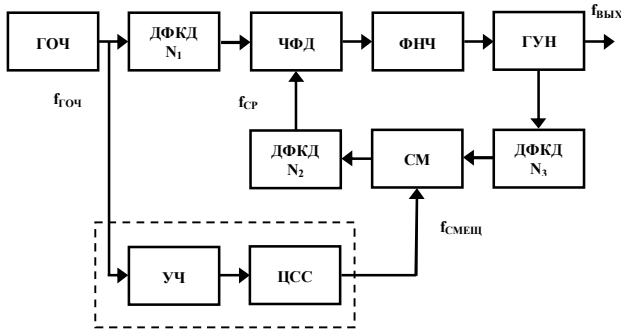


Рис. 1. Структурная схема комбинационного синтезатора сигналов на основе однокольцевой ИФАПЧ со смесителем и ЦСС

Смеситель в цепи обратной связи позволяет снизить коэффициент деления ДФКД2 N₂, а с ним снизить и уровень фазовых шумов выходной частоты ГУН. При этом шаг сетки частот комбинированного синтезатора определяется шагом изменения частоты ЦСС и может достигать единиц герц.

Делитель ДФКД1 с коэффициентом деления N₁ используется для уменьшения выходной частоты ГОЧ до значения максимально возможной частоты сравнения в ЧФД (на сегодня она достигает 100 МГц). Коэффициент деления делителя ДФКД1 определяется как: $N_1 = f_{ГОЧ} / f_{СР}$.

Коэффициент деления N₂ делителя ДФКД2 выбирается с условием, чтобы обеспечить равенство между выбранной частотой сравнения в ЧФД с разностной частотой смесителя между частотой ГУН и выходной частотой ЦСС.

В большинстве современных выпускаемых промышленностью микросхем ФАПЧ делитель ДФКД2 встроен в микросхему, при этом коэффициент деления N₂ может быть дробным

$$N_2 = \frac{f_{ГУН} / N_3 - f_{ЦСС}}{f_{СР}}$$

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.

Используя структурную схему рис. 1, запишем выражение для фазовых флуктуаций выходного сигнала синтезатора:

$$\Phi_{КС} = \left[\frac{\Phi_{ГОЧ}}{N_1} - \Phi_{ДФКД1} + \Phi_{ЧФД} - \Phi_{N2} - \frac{1}{N_2} \times \left(\Phi_{СМ} - \left(\Phi_{ГОЧ} \cdot n_1 + \Phi_{УЧ} \right) K_{ЦСС} - \Phi_{ЦСС} + \Phi_{ДФКД} \right) \right] \times \left(N_2 N_3 \right) H_{31}(p) + \Phi_{ГУН} H_{32}(p), \quad (1)$$

где $\Phi_{ГОЧ}$ – флуктуации фазы ГОЧ; $\Phi_{УЧ}$ – флуктуа-

ции фазы УЧ; $\Phi_{ЦСС}$ – флуктуации фазы ЦСС; $\Phi_{ДФКД1}$, $\Phi_{ДФКД2}$, $\Phi_{ДФКД3}$ – флуктуации фазы ДФКД1, ДФКД2, ДФКД3 кратностью N₁, N₂, N₃; $\Phi_{ЧФД}$ – эквивалентные флуктуации ФД; $\Phi_{ГУН}$ – флуктуации фазы ГУН; $\Phi_{СМ}$ – шумы смесителя СМ; $K_{ЦСС} = f_{ЦСС} / f_T$ – коэффициент деления ЦСС;

$$H_{31}(p) = \frac{H_1(p) N_2}{1 + H_1(p)}$$

– передаточная функция кольца ФАПЧ по внешним шумам; $H_{32}(p) = \frac{1}{1 + H_1(p)}$ –

передаточная функция кольца ФАПЧ по внутренним

шумам; $H_1(p) = \frac{F(p) \cdot K}{p} \cdot \frac{1}{N_2}$ – передаточная функ-

ция разомкнутого кольца ФАПЧ; $F_{ФНЧ}(p)$ – пере-

даточная функция ФНЧ.

На основании формулы (1) запишем выражение для спектральной плотности мощности фазовых шумов комбинированного синтезатора:

$$S_{КС}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_1^2} + S_{ДФКД1}(F) + S_{ЧФД}(F) + S_{ДФКД2}(F) + \frac{1}{N_2^2} \cdot \left[S_{СМ}(F) + K_{ЦСС}^2 \cdot \left(S_{ГОЧ}(F) \cdot n_1^2 + S_{УЧ}(F) \right) + S_{ЦСС}(F) + S_{ДФКД3}(F) \right] \right] \cdot \left(N_2 N_3 \right)^2 \times \left(|H_{31}(F)|^2 + S_{ГУН}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2 \right).$$

В качестве моделей СПМ фазовых шумов таких звеньев воспользуемся моделями из [5, 8, 9], а для ЦСС – моделью, полученной в [10]:

$$S_{ЦСС}(F) = \left(\frac{f_{ЦСС}}{f_T} \right)^2 \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3} + S_{КВ}.$$

Коэффициенты аппроксимации k₁, k₂, k₃, k₄, определяющие уровень СПМ 1/F² шума, 1/F шума, естественной шумовой составляющей входных цепей ЦАП и естественной шумовой составляющей сопротивления нагрузки, соответственно;

$S_{КВ} = 2^{-2N-0.59} \left(f_{ЦСС} / f_T^2 \right)$ – СПМ фазового шума квантования ЦАП; N – число разрядов ЦАП ЦСС [11].

На рис. 2 приведены собственные шумовые характеристики звеньев и самого комбинированного синтезатора, полученные в результате моделирования по (2) для выходной частоты $f_{ГУН} = 3000$ МГц при $f_T = 2500$ МГц, $f_{ЦСС} = 875$ МГц, $f_{ГОЧ} = 100$ МГц, $f_{СР} = 25$ МГц. При этом коэффициенты деления для выбранной частоты составляют N₁ = 4, N₂ = 5, N₃ = 4. Коэффициент умножения n₁ = 25.

На рис. 3, а приведены шумовые характеристики комбинированного синтезатора сигналов для РЛС РТВ дециметрового диапазона волн («П-37») с выходной частотой $f_{ГУН} = 3000$ МГц, а на рис. 3, б –

шумовые характеристики для РЛС сантиметрового диапазона волн (типа «Буран») с выходной частотой $f_{\text{ГУН}} = 9000 \text{ МГц}$ для различных значений частоты сравнения в фазовом детекторе.

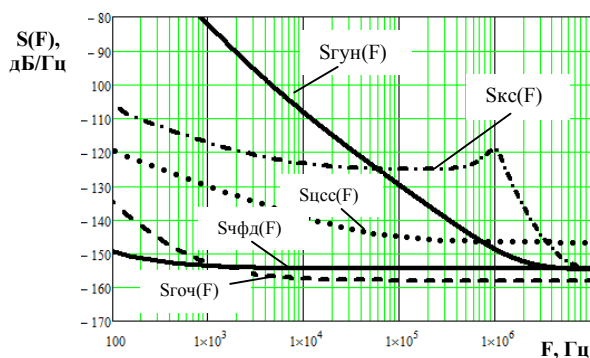


Рис. 2. Собственные фазовые шумы звеньев и самого комбинированного синтезатора сигналов

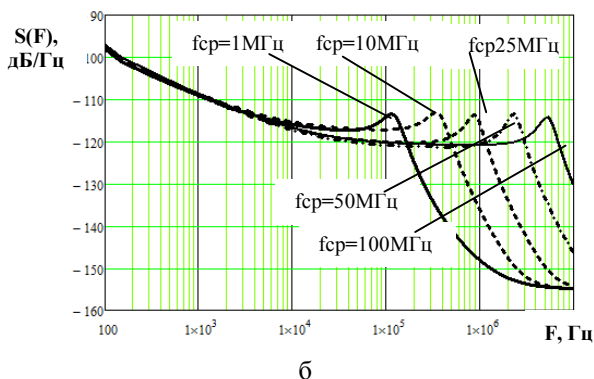
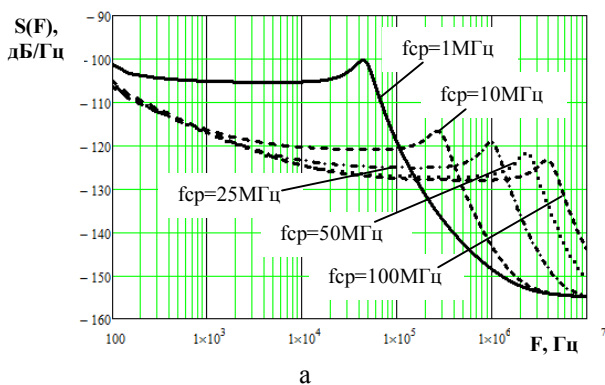


Рис. 3. Шумовые характеристики комбинированного синтезатора сигналов при $f_{\text{гун}} = 3000 \text{ МГц}$ (а) и $f_{\text{гун}} = 9000 \text{ МГц}$ (б) для различных частот сравнения в ЧФД

Для сравнения шумовых характеристик комбинированного синтезатора сигналов на рис. 4 приведены шумовые характеристики синтезатора сигналов на основе однокольцевой ИФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи, построенных на основных моделях из [3].

Анализ шумовых характеристик показывает, что с увеличением синтезируемой частоты при одних и тех же частотах сравнения в ЧФД фазовые шумы возрастают, в данном случае на 10 дБ/Гц.

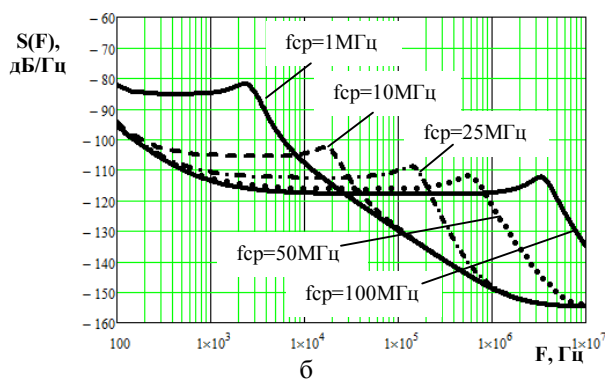
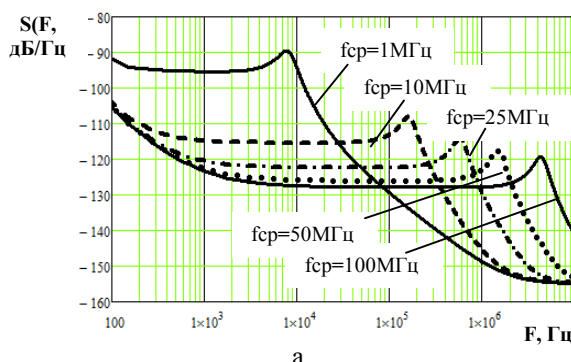


Рис. 4. Шумовые характеристики синтезатора сигналов на основе однокольцевой ИФАПЧ со смесителем при $f_{\text{гун}} = 3000 \text{ МГц}$ (а) и при $f_{\text{гун}} = 9000 \text{ МГц}$ для различных частот сравнения в ЧФД

Для тех же целей на рис. 5 приведены шумовые характеристики синтезатора сигналов на основе однокольцевой системы ИФАПЧ с делителем в цепи обратной связи, взятых из [2].

Анализ шумовых характеристик показывает, что с увеличением частоты сравнения в ЧФД СПМ фазовых шумов синтезаторов уменьшаются за счет увеличения полосы пропускания ФНЧ. У комбинированного синтезатора сигналов уровень шума несколько больше чем у синтезатора со смесителем. Это обусловлено тем, что основной вклад в общие шумы вносит ГОЧ из-за умножения частоты в УЧ и, хотя и в меньшей степени, влияют шумы ЧФД и ДФКДЗ особенно при частотах отстройки 100 – 10000 Гц.

Синтезаторы на основе однокольцевой ИФАПЧ с делителем частоты в цепи обратной связи (рис. 5) имеют довольно большой уровень фазовых шумов, по сравнению с синтезаторами со смесителями, из-за большого коэффициента деления в цепи обратной связи (при заданных значениях частот он составляет 120).

Выводы

По результатам сравнительного анализа можно сделать следующие выводы:

– по полученной модели СПМ фазовых шумов комбинированного синтезатора можно проводить анализ его шумовых характеристик при различных параметрах;

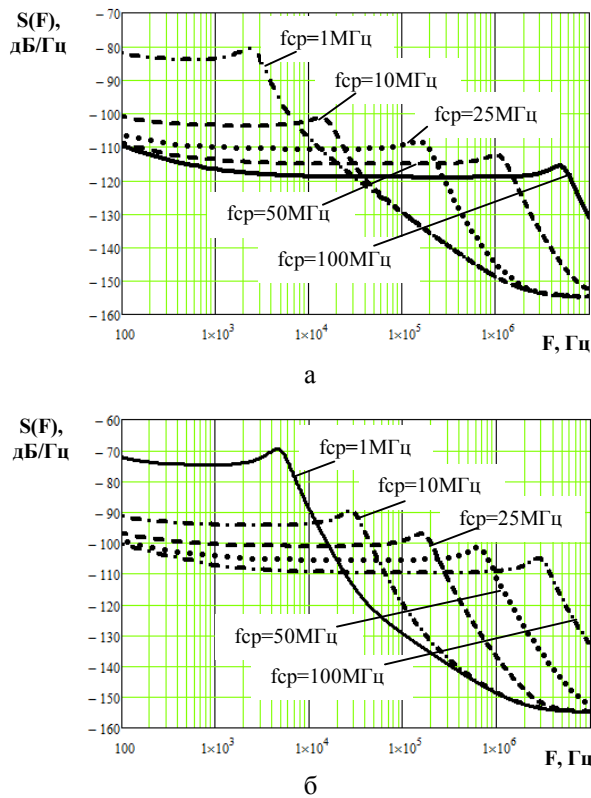


Рис. 5. Шумові характеристики синтезатора сигналів на основі однокільцевої ИФАПЧ делителем частоти при $f_{\text{гун}} = 3000$ МГц (а) і при $f_{\text{гун}} = 9000$ МГц (б) для різних частот порівняння в ЧФД

– для досягнення кращих шумових характеристик синтезатора необхідно до максимально можливого збільшувати частоту порівняння в ЧФД;

– синтезатори сигналів со смесителем в ланці зворотного зв'язку значно переважають по шумовим характеристикам синтезатори з делителями частоти;

– використання комбінованих синтезаторів з ЦСС дозволяє використовувати ФНЧ з більшою смугою пропускання для зменшення СПМ фазових шумів, так як крок сітки формуємих частот визначається тільки ЦСС;

– з метою подальшого зменшення фазових шумів комбінованого синтезатора необхідно

збільшити частоту вихідного сигналу ЦСС з тем, щоб виключити делитель частоти ГУН ДФКДЗ.

Список литературы

1. Synthesizer Products Data Book. Data Subject to Change Without Notice. 1997. QUALCOMM Incorporated.
2. Кандырин Н.П. Перспективы использования комбинированных формирователей на основе ФАПЧ и ЦСС для формирования СВЧ сигналов. Фазовые шумы системы ФАПЧ / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 2(39). – С. 70-73.
3. Кандырин Н.П. Анализ фазовых шумов комбинированных синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 3(40). – С. 63-68.
4. Спектральные характеристики гибридных синтезаторов частот / О.Р. Никитин, Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов, А.Н. Фомичев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – №1. – С. 10-15.
5. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
6. Патент США, Direct digital synthesis (DDS) phase locked loop (PLL) frequency synthesizer and associated methods / Nicholas Paul Shields; Harris Corporation. №7250823; Заявлено 25.05.2005; Опубл. 31.07.2007. – 9 с.
7. Продукция компании Analog Devices [Электронный ресурс]: офиц. сайт фирмы Analog Devices, Inc., 2013. – Режим доступа: <http://www.analog.com/ru/index.html>.
8. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis / V.F. Kroupa. – John Wiley & Sons, Ltd, 2003. – ISBN: 0-470-84866-9. – 320 с.
9. Drucker Erik. Model PLL Dynamics and Phase-Noise Perf. / Erik Drucker // Microwaves & RF. – 2000. – №2. – P. 35-42.
10. Кандырин Н.П. Моделирование шумовых характеристик цифровых синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 4(120). – С. 7-10.
11. Ромашова Л.В. Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов // Проектирование и технология электронных средств. – 2011. – №1. – С. 22-25.

Поступила в редколлегию 10.10.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ШУМОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБІНОВАНОГО ФОРМУВАЧА СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ОДИНКІЛЬЦЕВОЇ СИСТЕМИ ФАПЧ ЗІ ЗМІШУВАЧЕМ І ЦИФРОВОГО СИНТЕЗАТОРА СИГНАЛІВ

М.П. Кандирин

Розглядається принцип роботи комбінованого формувача сигналів, виконаного на основі однокільцевої системи ФАПЧ зі змішувачем і цифровим синтезатором сигналів. Отриман вираз для моделі спектральної щільності потужності фазових шумів комбінованого формувача. Приведені результати розрахунків шумових характеристик комбінованого формувача для різних вихідних частот і частот порівняння у фазовому детекторі.

Ключові слова: комбінований формувач, ФАПЧ, шумові характеристики, фазовий шум.

NOISE CHARACTERISTICS OF COMBINED SIGNAL CONDITIONER ON BASIS OF ONE CIRCULAR SYSTEM WITH MIXER AND DIGITAL WAVEFORM SYNTHESIZER

N.P. Kandyrin

Principle of operation of combined signal conditioner fulfilled on basis of one circular phase locking system with mixer and digital waveform synthesizer is examined. Expression for the model of power spectrum density in combined conditioner of phase noises is given. Calculation results of combined conditioner phase noises for different output frequencies and frequencies of comparison in phase detector are reduced.

Keywords: combined conditioner, PLL, noise characteristics, phase noise.