

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДВУХКОЛЬЦЕВОЙ ИФАПЧ И ЦСС

В статье рассмотрен принцип работы комбинированного синтезатора сигналов, выполненного на основе цифрового синтезатора сигналов и двухкольцевой системы ИФАПЧ. Получено выражение для модели спектральной плотности мощности фазовых шумов комбинированного синтезатора. Приведены результаты расчетов шумовых характеристик комбинированного синтезатора для различных выходных частот (3 – 11 ГГц).

Ключевые слова: комбинированный синтезатор, ФАПЧ, ЦСС, шумовые характеристики, фазовый шум.

Введение

Постановка проблемы и анализ публикаций.

Современная микроэлектронная промышленность выпускает широкий спектр интегральных схем (ИС) для синтеза частот и сигналов на основе петли ФАПЧ (PLL синтезаторы) и цифровых синтезаторов сигналов прямого синтеза (ЦСС) или (DDS синтезаторы).

К одним из важных достоинств DDS синтезаторов относится малый шаг перестройки частоты. Однако есть и существенные недостатки: большой уровень побочных составляющих спектра, относительно невысокая выходная частота (до 1,5 ГГц), а также необходимость подключения внешнего тактового генератора с максимально возможной выходной частотой (до 3,5 ГГц).

Другим видом синтезаторов являются системы PLL. Их основными преимуществами являются широкий диапазон частот, низкий уровень фазовых шумов (при оптимальном выборе опорной частоты и коэффициента деления петли) и хорошая фильтрация побочных частотных составляющих. К недостаткам PLL синтезаторов относятся: низкое быстродействие и невысокая разрешающая способность по частоте.

Применение многокольцевых систем ИФАПЧ позволяет значительно уменьшить шаг сетки частот и уровень фазовых шумов, однако с увеличением колец возрастает их сложность в настройке, поэтому чаще всего применяют двухкольцевые системы ИФАПЧ. Фазовые шумы такой системы ИФАПЧ приведены в [1, 2].

Различные конструкции комбинированных синтезаторов на основе интегральных схем DDS и PLL синтезаторов позволяют конструировать устройства свободные от недостатков, присущих PLL и DDS синтезаторам, а именно уменьшить шаг частоты и снизить уровень фазовых шумов.

В [3 – 6] приведены несколько структурных схем комбинированных синтезаторов, дано описа-

ние принципа их работы, а также проведен анализ шумовых характеристик. Однако проведенные там исследования шумовых характеристик не дают однозначного ответа и рекомендаций по применению тех или иных типов синтезаторов в модернизируемых или перспективных радиотехнических системах.

Целью статьи является получение выражений для расчета СПМ фазовых шумов и проведение сравнительного анализа результатов расчета для комбинированного синтезатора сигналов на основе DDS синтезатора и двухкольцевой системы PLL с двухкольцевой системой PLL.

Основной материал

На рис. 1 представлена структурная схема комбинированного синтезатора сигналов на основе двухкольцевой PLL с формированием сдвига по частоте на DDS.

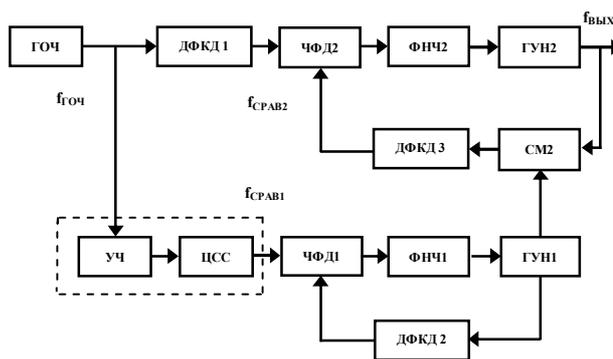


Рис. 1. Структурная схема комбинированного синтезатора сигналов на основе двухкольцевой системы ИФАПЧ и ЦСС

На схеме приняты обозначения: ГОЧ – генератор опорной частоты; ДФКД1, ДФКД2, ДФКД3 – делители частоты с фиксированным коэффициентом деления N_1, N_2, N_3 ; ЧФД1, ЧФД2 – частотно-фазовые детекторы; ФНЧ1, ФНЧ2 – фильтры нижних частот; УЧ – умножитель частоты с коэффициентом умно-

жения $N_{уч}$; ГУН1, ГУН2 – генераторы, управляемый напряжением; СМ – смеситель частоты.

Преимущества схемы изображенной на рис.1 заключаются в следующем:

- высокая разрешающая способность по частоте;
- широкий диапазон синтезируемых частот;
- высокое быстродействие синтезатора (время переключения с одной частоты на другую обычно не превышает 100 – 150 мкс);
- низкий уровень фазовых шумов и побочных составляющих.

Работает схема следующим образом. Выходная частота с ГОЧ $f_{ГОЧ}$ используется для получения тактовой частоты ЦСС. Для ее повышения в схему включен умножитель тактовой частоты УЧ с коэффициентом умножения $N_{уч}$. В современных ЦСС тактовая частота достигает 3500 МГц. Чтобы получить такую тактовую частоту, в составе многих интегральных ЦСС имеется встроенный умножитель тактовой частоты на ФАПЧ. Благодаря нему в качестве генератора опорной частоты можно использовать высокостабильные кварцевые автогенераторы, выходная частота которых, как правило, не превышает нескольких десятков мегагерц.

Сформированный ЦСС сигнал с частотой $f_{ЦСС}$ поступает на ЧФД1 первого кольца ИФАПЧ. Выходной сигнал первого кольца $f_{ГУН1}$ подается на смеситель, включенный в цепь обратной связи второго кольца ИФАПЧ. Смеситель в цепи обратной связи позволяет снизить коэффициент деления N_3 и тем самым уменьшить уровень фазовых шумов комбинированного синтезатора. При этом шаг сетки частот пропорционален шагу изменения частоты ЦСС, который может достигать долей герца.

Выходная частота первого кольца ИФАПЧ ГУН1 равна

$$f_{ГУН1} = f_{ГОЧ} N_{уч} K_{ЦСС} N_2, \quad (1)$$

где $K_{ЦСС}$ – коэффициент деления ЦСС, N_2 – коэффициент деления ДФКД2.

Для уменьшения выходной частоты ГОЧ до максимально возможной частоты сравнения $f_{срчфд2}$ в ЧФД2 (в современных ЧФД она достигает 100 МГц) используется делитель ДФКД1. Коэффициент его деления определяется как

$$N_1 = f_{ГОЧ} / f_{срчфд2}. \quad (2)$$

Делитель ДФКД3 с коэффициентом деления N_3 используется для обеспечения равенства между выбранной частотой сравнения в ЧФД2 $f_{срчфд2}$ с разностной частотой смесителя между частотой ГУН1 и ГУН2. При этом частота ГУН2 с учетом (1) равна

$$f_{ГУН2} = \frac{N_3}{N_1} f_{ГОЧ} + f_{ГОЧ} N_{уч} K_{ЦСС} N_2. \quad (3)$$

Важной особенностью ЦСС является очень малый шаг перестройки по частоте. Поскольку он достигает долей герца, то за счет небольшого коэффи-

циента деления N_2 можно обеспечить очень малый шаг перестройки частоты синтезатора. При этом первое кольцо ИФАПЧ выполняет функции умножителя частоты ЦСС.

Структурной схеме, приведенной на рис. 1, соответствует эквивалентная схема на рис. 2.

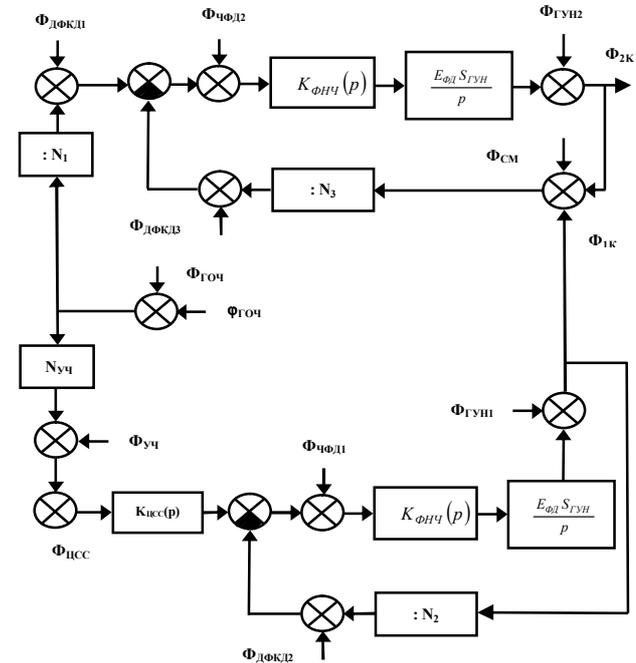


Рис. 2. Функциональная схема комбинированного синтезатора сигналов со всеми источниками шумов

Здесь символами Φ обозначены флуктуации фазы и шумы соответствующих звеньев на рис. 1.

На основе функциональной схемы рис. 2 запишем выражения для фазовых флуктуаций выходного сигнала второго кольца ИФАПЧ:

$$\Phi_{2К} = \left[\frac{\Phi_{ГОЧ}}{N_1} - \Phi_{ДФКД1} + \Phi_{ЧФД2} - \Phi_{N3} - \frac{1}{N_3} \times \right. \\ \left. \times (\Phi_{СМ} - \Phi_{ИК}) \right] \times H_{31_2}(p) + \Phi_{ГУН2} H_{32_2}(p), \quad (4)$$

где

$$\Phi_{ИК} = [N_{уч} \cdot K_{ЦСС} \cdot \Phi_{ГОЧ} + \Phi_{УЧ} \cdot K_{ЦСС} + \Phi_{ЦСС} + \\ + \Phi_{ЧФД1} - \Phi_{ДФКД2} - \frac{1}{N_2} \Phi_{СМ}] \times \\ \times H_{31_1}(p) + \Phi_{ГУН1} H_{32_1}(p) \quad (5)$$

– флуктуации фазы выходного сигнала первого кольца ИФАПЧ,

$$H_{31_1}(p) = \frac{H_1(p) N_2}{1 + H_1(p)} \quad \text{и} \quad H_{31_2}(p) = \frac{H_2(p) N_3}{1 + H_2(p)}$$

– передаточные функции замкнутых первого и второго колец ИФАПЧ по внешним шумам,

$$H_{32_1}(p) = \frac{1}{1 + H_1(p)} \quad \text{и} \quad H_{32_2}(p) = \frac{1}{1 + H_2(p)}$$

– передаточные функции замкнутых первого и второго колец ИФАПЧ по внутренним шумам,

$$H_1(p) = \frac{F_{\text{ФНЧ1}} \cdot K}{p} \cdot \frac{1}{N_2} \text{ и } H_2(p) = \frac{F_{\text{ФНЧ2}} \cdot K}{p} \cdot \frac{1}{N_3}$$

– передаточные функции разомкнутых первого и второго колец ИФАПЧ, где $F_{\text{ФНЧ1}}$ и $F_{\text{ФНЧ2}}$ – передаточные функции ФНЧ [7, 8].

Используя выражения (4) и (5), получим выражения для спектральной плотности мощности фазовых шумов комбинированного синтезатора:

$$S_{2K}(F) = \left[\frac{S_{\text{ГОЧ}}(F)}{N_1^2} + S_{\text{ЧФД2}}(F) + S_{\text{ДФКД1}}(F) + \left[\frac{1}{N_3^2} (S_{\text{СМ}}(F) + S_{\text{ИК}}(F)) \right] \cdot |H_{31_2}(F)|^2 + S_{\text{ГУН2}}(F) \cdot |H_{32_2}(F)|^2 \right], \quad (6)$$

где

$$S_{\text{ИК}}(F) = \left[S_{\text{ГОЧ}}(F) \cdot N_{\text{УЧ}}^2 \cdot K_{\text{ЦСС}}^2 + S_{\text{УЧ}}(F) \cdot K_{\text{ЦСС}}^2 + S_{\text{ЧФД1}}(F) + S_{\text{ДФКД2}}(F) + S_{\text{ЦСС}}(F) \right] \times |H_{31_1}(F)|^2 + S_{\text{ГУН1}}(F) \cdot |H_{32_1}(F)|^2$$

– СПМ фазовых шумов первого кольца ИФАПЧ.

В формуле (6) символом S обозначены СПМ фазовых шумов соответствующих звеньев структурной схемы, приведенной на рис. 1. Для расчета шумовых характеристик воспользуемся моделями СПМ фазовых шумов звеньев из [7 – 9], а для ЦСС – моделью, полученной в [10, 11]:

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

где коэффициенты k_2, k_1, k_4, k_3 определяют уровень СПМ $1/F^2$ шума, $1/F$ шума, естественной шумовой составляющей входных цепей и естественной шумовой составляющей сопротивления нагрузки, соответственно,

$$S_{\text{КВ}}(F) = 2^{-2N-0,59} \left(\frac{\sin\left(\pi \frac{f_{\text{out}}}{f_T}\right)}{\left(\pi \frac{f_{\text{out}}}{f_T}\right)} \right)^2 + \left(\frac{f_{\text{out}}}{f_T^2} \right)$$

– СПМ шума квантования [11], N – количество разрядов ЦАП, f_{out}, f_T – выходная и тактовая частоты.

В качестве реальных спектральных характеристик ЦСС выберем характеристики интегрального синтезатора типа AD9911, для которого количество разрядов ЦАП $N_{\text{Ц}} = 10$, а коэффициенты аппроксимации СПМ фазовых шумов согласно [12] соответственно равны:

$$k_1 = -9,0, k_2 = -8,3, k_3 = -17,8, k_4 = -14,8.$$

На рис. 3 приведены полученные шумовые характеристики комбинированного синтезатора сигнала

и его составляющих звеньев для следующих значений частот:

$$f_{\text{ГОЧ}} = f_{\text{ГУН1}} = 25 \text{ МГц}, f_{\text{СРЧФД2}} = 25 \text{ МГц}, f_{\text{ГУН2}} = 3000 \text{ МГц}.$$

Коэффициенты деления для выбранных частот составляют $N_1 = 1, N_2 = 25, N_3 = 119$.

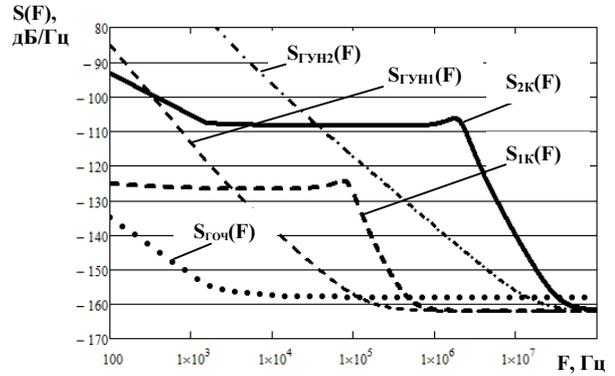


Рис. 3. Собственные фазовые шумы комбинированного синтезатора сигналов и его составляющих звеньев

В качестве ФНЧ системы ИФАПЧ используем пропорционально-интегрирующий фильтр второго порядка [13, 14], как наиболее часто применяемого в таких случаях. Его передаточная функция имеет следующий вид:

$$K_{\text{ФНЧ}}(F) = \frac{1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{1 + pT_1}{p(1 + pT_2)},$$

где $T_1 = C_1 R_1, T_2 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ – постоянные времени фильтра; C_1, C_2, R_1 – номиналы элементов фильтра. Расчет его параметров производился исходя из параметров системы ИФАПЧ по соотношениям из [15].

На рис. 4 – 7, для сравнения, приведены шумовые характеристики исследуемого комбинированного синтезатора сигналов на основе ЦСС и двухкольцевой ИФАПЧ и двухкольцевой ИФАПЧ с параметрами из [1], для разных частот ГУН2 и различных ЦСС.

Из графиков, приведенных на рис. 4 – 7, видно, что комбинированный синтезатор сигналов имеет небольшой выигрыш (порядка 2 – 2,5 дБ) по шумовым характеристикам по сравнению с двухкольцевой ИФАПЧ. Кроме того (рис. 6 – 7), с ростом частоты ГОЧ и частоты сравнения в ИФД2, увеличивается вклад шумов первого кольца ИФАПЧ.

На рис. 8, 9 приведено сравнение шумовых характеристик комбинированного синтезатора сигналов с ЦСС типа AD9915 с более высокой тактовой частотой (2500 МГц) и разрядностью ЦАП (12 дв. разрядов).

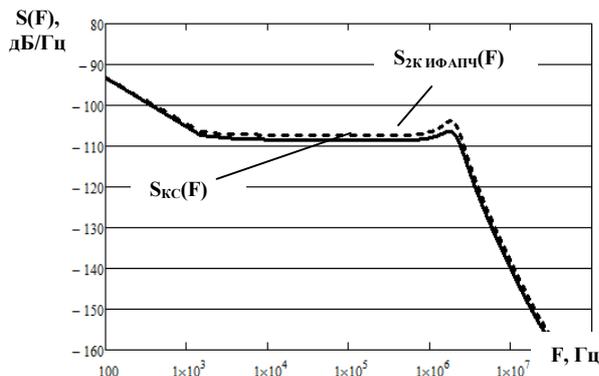


Рис. 4. Сравнение шумовых характеристик систем ИФАПЧ $f_{ГОЧ} = f_{ГУН1} = 25$ МГц, $f_{СРЧФД2} = 25$ МГц, $f_{ГУН2} = 3000$ МГц, шаг частоты $\Delta f = 1$ МГц

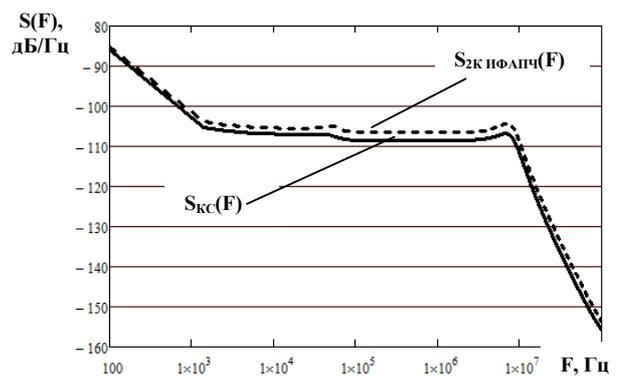


Рис. 7. Сравнение шумовых характеристик систем ИФАПЧ $f_{ГОЧ} = f_{ГУН1} = 100$ МГц, $f_{СРЧФД2} = 100$ МГц, $f_{ГУН2} = 9000$ МГц, шаг частоты $\Delta f = 1$ МГц

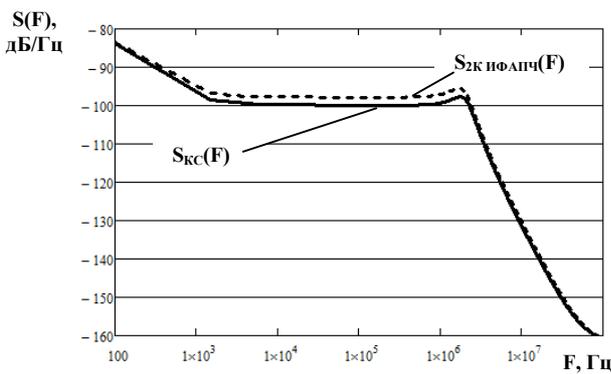


Рис. 5. Сравнение шумовых характеристик систем ИФАПЧ $f_{ГОЧ} = f_{ГУН1} = 25$ МГц, $f_{СРЧФД2} = 25$ МГц, $f_{ГУН2} = 9000$ МГц, шаг частоты $\Delta f = 1$ МГц

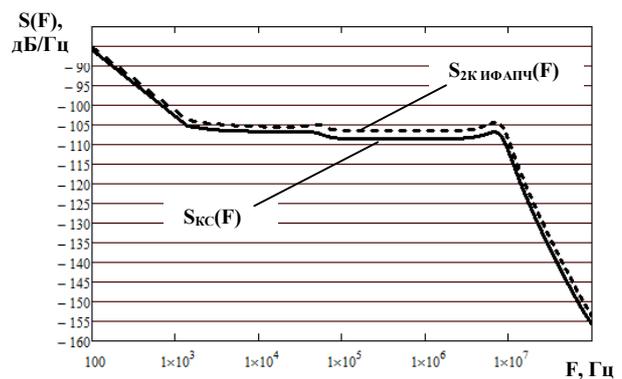


Рис. 8. Сравнение шумовых характеристик систем ИФАПЧ $f_{ГОЧ} = f_{ГУН1} = 100$ МГц, $f_{СРЧФД2} = 100$ МГц, $f_{ГУН2} = 9000$ МГц, шаг частоты $\Delta f = 1$ МГц

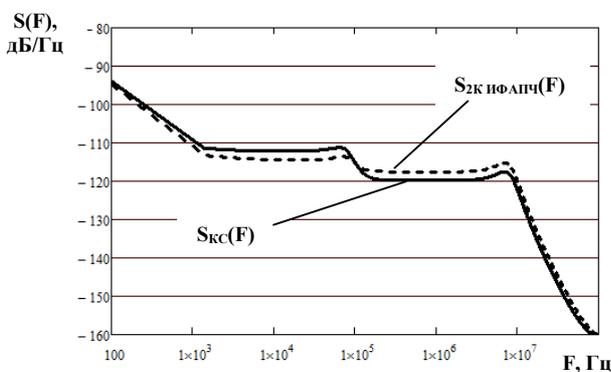


Рис. 6. Сравнение шумовых характеристик систем ИФАПЧ $f_{ГОЧ} = f_{ГУН1} = 100$ МГц, $f_{СРЧФД2} = 100$ МГц, $f_{ГУН2} = 3000$ МГц, шаг частоты $\Delta f = 1$ МГц

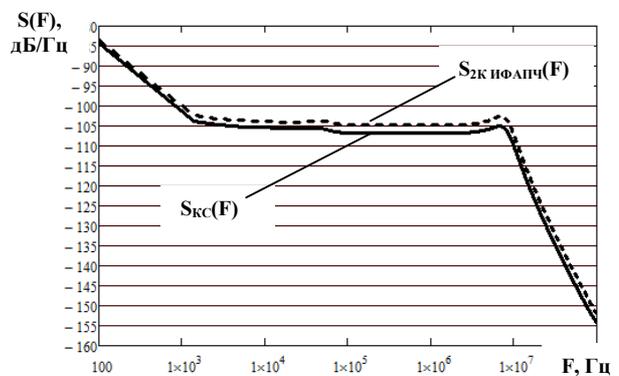


Рис. 9. Сравнение шумовых характеристик систем ИФАПЧ $f_{ГОЧ} = f_{ГУН1} = 100$ МГц, $f_{СРЧФД2} = 100$ МГц, $f_{ГУН2} = 11000$ МГц, шаг частоты $\Delta f = 1$ МГц

И в этом случае выигрыш в шумовых характеристиках комбинированного синтезатора сигналов по сравнению с двухкольцевой ИФАПЧ минимален. Изменение тактовой частоты и разрядности ЦАП в сторону увеличения, ни к какому выигрышу не приводят. Кроме всего прочего, как и в первом случае, так и здесь при увеличении частоты ГОЧ и частоты сравнения в ИФД2, хотя и в меньшей степени, скажется увеличение шумов первого кольца ИФАПЧ.

Поскольку комбинированный синтезатор сигналов имеет небольшой выигрыш по шумовым характеристикам по сравнению с двухкольцевой ИФАПЧ, тем не менее, в нем возможно значительное уменьшение шага перестройки частоты, определяемым ЦСС, без ухудшения шумовых характеристик.

Выводы

Полученная математическая модель СПМ фазовых шумов комбинированного синтезатора сигнала

лов на базе двухкольцевой ИФАПЧ и ЦСС позволяет проводить анализ шумовых характеристик при различных параметрах всей системы и в частности с различными ЦСС.

Анализ полученных результатов показал, что уровень фазовых шумов комбинированных синтезаторов ниже, чем в синтезаторах на основе двухкольцевой ИФАПЧ при аналогичных параметрах синтезаторов.

Поскольку шаг сетки частот при комбинированном синтезаторе сигналов намного меньше, чем в обычной двухкольцевой ИФАПЧ, выгоднее всего в формирователях зондирующих и гетеродинных сигналов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн использовать именно комбинированный синтезатор сигналов.

Список литературы

1. Кандырин Н.П. Шумовые характеристики двухкольцевой системы ИФАПЧ с преобразованием частоты внутри кольца / Н.П. Кандырин // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – №4(17). – С. 77-81.
2. Ромашов В.В. Исследование шумовых характеристик двухкольцевой системы ИФАПЧ / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, Е.В. Коробкова // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. – №3. – С. 9-15.
3. Synthesizer Products Data Book. Data Subject to Change With-out Notice. 1997. – QUALCOMM Incorporated.
4. 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.
5. Ромашов В.В. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе цифрового вычислительного синтезатора и двухкольцевой ИФАПЧ / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.А. Якименко // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2014. – №16. – С. 18-24.
6. Патент США, Frequency synthesizer and frequency synthesizing method / FurkanDayi; Sony Corporation. – №2012/112806; Заявлено 25.10.2011; Опубликовано 19.05.2012 – 15 с.
7. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
8. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis / V.F. Kroupa. – John Wiley & Sons, Ltd, 2003, ISBN: 0-470-84866-9 – 320 p.
9. Drucker Erik. Model PLL Dynamics and Phase-Noise Performance / Erik Drucker // Microwaves & RF. – 2000. – №2. – P. 35-42.
10. Ромашова Л.В. Моделирование спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов частот / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. – №1.
11. Кандырин Н.П. Моделирование шумовых характеристик цифровых синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 4 (120). – С. 7-10.
12. 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.
13. Голуб В. Несколько слов о системе ФАПЧ / В. Голуб // Компоненты и технологии. – 2003. – № 8.
14. Кен Холладей. Проектирование ФАПЧ по полосе пропускания. (перевод Ю. Потапова). [Электронный ресурс] / Кен Холладей. – EDN, 2000. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.chipinf.ru/literature/chipnews/200009/40.html>.
15. Direct Digital Synthesizer AD9910. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: // <http://www.analog.cjm.ru/rfjf-componentts/direct-digital-synthesis-dds/ad9910/products/product.html>.

Поступила в редколлегию 25.12.2014

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

КОМБІНОВАНІ СИНТЕЗАТОРИ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ДВОКІЛЬЦЕВОЇ ІФАПЧ І ЦСС

М.П. Кандирін

В статті розглянуто принцип роботи комбінованого синтезатора сигналів, виконаного на основі ЦСС і двокільцевої системи ІФАПЧ. Отримано вираз для розрахунку СПМ фазових шумів в моделі комбінованого синтезатора. Приведені результати моделювання шумових характеристик комбінованого синтезатора для різних вихідних частот (3 – 11 ГГц).

Ключові слова: комбінований синтезатор, ІФАПЧ, ЦСС, шумові характеристики, фазовий шум.

COMBINED SYNTHESIZERS OF SIGNALS ON BASIS TWOCIRCULAR PLL AND DDS

N.P. Kandyrin

The article describes the operation of a combined synthesizer, on the basis of a direct digital synthesizer (DDS) and a two-ring phase locked loop system (PLL). Expression is got for the model of spectral density of power of a phase noise of a combined synthesizer is gained. Results of modeling of noise performances of a combined synthesizer for various target frequencies (3 - 11 GHz) are resulted.

Keywords: combined synthesizer, PLL, DDS, noise characteristics, the phase noise.