

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ФОРМИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЛЧМ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА И ПЕРЕНОС ИХ В ДИАПАЗОН СВЧ

Часть 2. Шумовые характеристики синтезаторов ЛЧМ сигналов на основе DDS

В номере 3(140) данного сборника за 2016 год [1] была опубликована первая часть статьи, рассказывающая об оптимальных возможностях формирования широкополосных ЛЧМ сигналов методом прямого цифрового синтеза. Вторая часть статьи посвящена исследованию СПМ фазовых шумов DDS синтезаторов.

Ключевые слова: сигнал с линейной частотной модуляцией, прямой цифровой синтез, фазовый шум.

Введение

Постановка проблемы и анализ публикации. Шумовые характеристики являются одним из важнейших параметров любых систем формирования сигналов, в том числе и синтезаторов сигналов DDS. Достоинствами прямого цифрового синтеза, реализованного в цифровых вычислительных синтезаторах, является высокая скорость перестройки частоты без разрыва фазы в пределах сетки частот и сигналов, широкий диапазон и малый шаг сетки частот, достигающий десятых и сотых долей герца, малый уровень спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов (ФШ) синтезированного сигнала. Основными недостатками синтезаторов на современном этапе развития является ограниченная выходная частота, которая не превышает 40% от тактовой частоты, которая на сегодняшний момент достигает 3500 МГц и высокий уровень побочных спектральных составляющих [1].

Шумовые характеристики цифровых синтезаторов частот хорошо исследованы в ряде работ, в том числе и автором [2 - 6]. В основном анализ шумовых свойств синтезаторов частот проводят с использованием моделей СПМ фазовых шумов основных звеньев синтезаторов. Для этого были разработаны модели СПМ фазовых шумов на основе многочисленных экспериментальных данных. Публикаций относящихся к анализу фазовых шумов синтезаторов широкополосных ЛЧМ сигналов в открытой печати не встречается, как не имеется их и в документации на интегральные схемы от производителя.

Поэтому представляет определенный интерес собственные шумы DDS при формировании широкополосных ЛЧМ сигналов, в том числе и поведение уровня ФШ DDS при умножении частоты ГОЧ для получения необходимой тактовой частоты.

Целью статьи является исследование СПМ ФШ шумов синтезаторов DDS при формировании широкополосных ЛЧМ сигналов.

Изложение основного материала

Проще всего модулированные сигналы формируются в DDS посредством подачи на них соответствующих кодов управления частотой K_f , фазой K_ϕ , амплитудой K_U , длительностью сигнала K_{τ_n} и периодом его повторения K_{T_n} . Для формирования ЛЧМ сигналов в синтезаторе имеется накопитель кода скорости K_β , обеспечивающий линейное изменение кода частоты K_f . Так, микросхемы AD9914 и AD9915 для формирования ЛЧМ сигналов содержат 32 – разрядные накопители кодов скорости.

Поскольку изначально ЛЧМ сигнал мы аппроксимировали ступенчатым законом изменения частоты, по сути, представили его набором отдельных частот в возрастающем или убывающем порядке с каким угодно шагом.

Сигнал с ЛЧМ является широкополосным и занимает определенную полосу частот от нижней f_H (начальной) до верхней f_B (конечной) частот, т.е. имеет девиацию частоты $\Delta F = f_B - f_H$.

В этом случае, для расчета ФШ, мы воспользуемся моделями для расчета СПМ собственных фазовых шумов синтезаторов частот [4, 5] и смоделируем шумы для начальной и конечной частот ЛЧМ сигнала.

Следует ожидать, что фазовые шумы от промежуточных частот ЛЧМ сигнала будут находиться в диапазоне шумов от начальной и конечной частот.

Перейдем непосредственно к анализу шумовых свойств DDS AD9914 и AD9915, используя модель СПМ собственных ФШ синтезаторов [4, 5]

$$S_{\text{DDS}}(F) = \left(\frac{f_{\text{out}}}{f_T} \right)^2 \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3} + S_{\text{КВ}}, \quad (1)$$

где $K_{DDS} = (f_{out}/f_T)^2$ - коэффициент деления DDS; f_T - тактовая частота DDS; f_{out} - выходная частота сигнала DDS; коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 определяют уровень СПМ $1/F^2$ шума, $1/F$ шума, естественной шумовой составляющей входных цепей ЦАП и сопротивления нагрузки, соответственно; $S_{KB}(F) = 2^{-2N-0,59} \cdot (f_{out}/f_T^2)$ - СПМ фазового шума квантования ЦАП; F - частота отстройки; N - число разрядов ЦАП DDS. Коэффициенты аппроксимации находятся по методике из [7] и сведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации DDS

DDS	k1	k2	k3	k4
AD9914	-9,128	-8,237	-16,006	-13,778
AD9915	-9,184	-8,871	-16,007	-13,76

Сравнение рассчитанных шумовых характеристик DDS AD9915, AD9914 при формировании ЛЧМ сигналов с экспериментально снятыми зависимостями гармонических колебаний, приведенные разработчиками интегральных схем в документации, приведено на рис. 1 и 2.

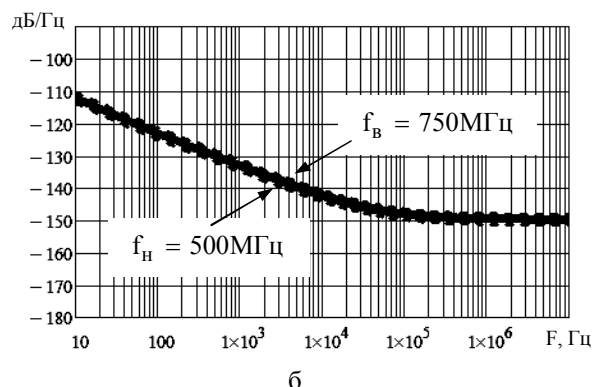
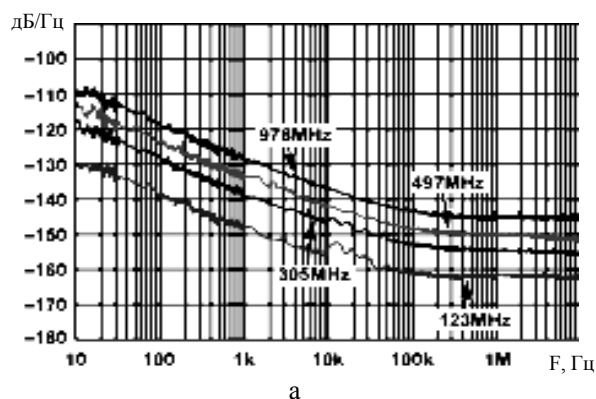


Рис. 1. СПМ собственных шумов DDS AD9915 при тактовой частоте 2500 МГц: а – экспериментальные для гармонических колебаний; б – рассчитанные для ЛЧМ сигнала

для нижней и верхней частот ЛЧМ сигнала по характеру изменения практически совпадают. Фазовые шумы промежуточных частот ЛЧМ сигнала лежат в диапазоне между шумами нижней и верхней частот, что хорошо видно из рисунков (рис. 1, б, 2, б).

Сравнивая одинаковые начальные частоты ЛЧМ сигналов ($f_n = 500$ МГц) для обоих синтезаторов видим, что из-за большей тактовой частоты микросхемы AD9914 ее СПМ ФШ меньше всего на 4 дБ, особенно при большей синтезируемой частоте.

Используя модели для расчета СПМ ФШ можно определять уровни собственных шумов DDS для любых значений тактовых частот и выходного сигнала синтезатора, в том числе и ЛЧМ сигнала с любой девиацией частоты.

Немалый интерес представляет и вопрос влияния на уровень ФШ умножение частоты опорного генератора для получения необходимой тактовой частоты.

Известно, что для получения высокой частоты выходного сигнала DDS необходима и высокая тактовая частота, поскольку DDS является делителем частоты с коэффициентом деления

$$K_{DDS} = f_{DDS}/f_T \leq 0,35..0,4.$$

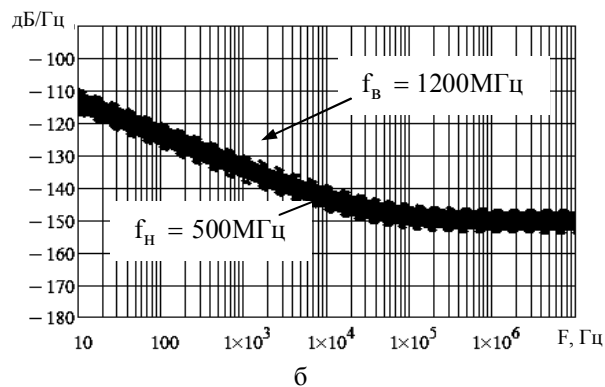
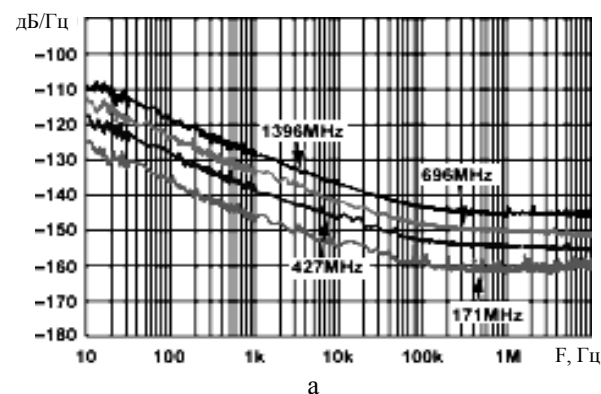


Рис. 2. СПМ собственных шумов DDS AD9914 при тактовой частоте 3500 МГц: а – экспериментальные для гармонических колебаний; б – рассчитанные для ЛЧМ сигнала

Видно, что зависимости СПМ ФШ частот снятых экспериментально и результаты моделирования

Чаще всего, в качестве опорного генератора используют высокостабильные кварцевые генерато-

ры с невысокими частотами, которые требуют дальнейшего умножения для получения тактовой частоты. Для умножения частоты опорного генератора в современных интегральных цифровых синтезаторах используют встроенную систему ФАПЧ с коэффициентом умножения от 4 до 255.

Обобщенная структурная схема DDS со встроенным умножителем тактовой частоты на ФАПЧ приведена на рис. 3.

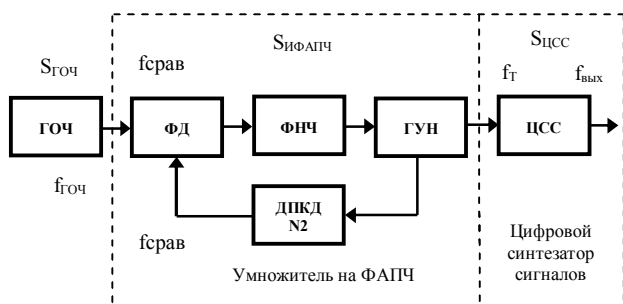


Рис. 3. Структурная схема интегрального DDS со встроенным умножителем тактовой частоты на ФАПЧ

Согласно [8] СПМ фазовых шумов DDS со встроенным умножителем на ФАПЧ будет выглядеть следующим образом

$$S_{\text{DDS}}(F) = K_{\text{DDS}}^2 S_{\text{ФАПЧ}}(F) + S_{\text{DDS}}(F), \quad (2)$$

где $S_{\text{ФАПЧ}}(F) = [S_{\text{ГОЧ}}(F) + (S_{\text{ДПКД}}(F) +$

$+ S_{\text{ФД}}(F))] \cdot N2^2 \cdot |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2$ – спектральная плотность фазовых шумов сигнала на выходе системы ИФАПЧ; $S_{\text{DDS}}(F)$ – собственные шумы DDS; $K_{\text{DDS}}^2 = (f_{\text{out}}/f_{\text{T}})^2$ – коэффициент передачи входного шума DDS; f_{out} – частота выходного сигнала DDS; f_{T} – тактовая частота DDS; $N2$ – коэффициент деления частоты в делителе с переменным коэффициентом деления; $H_{31}(p) = H(p)/(1 + H(p))$ – передаточная функция петли ФАПЧ по внешним шумам; $H_{32}(p) = 1/(1 + H(p))$ – передаточная функция петли ФАПЧ по внутренним шумам; $H(p) = K_{\text{ФНЧ}}(p) \cdot N2 \cdot S_{\text{ГУН}}/p$ – передаточная функция разомкнутой петли ФАПЧ; $K_{\text{ФНЧ}}(p)$ – передаточная функция ФНЧ; $S_{\text{ГУН}}$ – крутизна характеристики ГУН; p – оператор d/dt .

Используя выражение (2) проведем моделирование СПМ фазовых шумов для DDS AD9915 и AD9914 со встроенным умножителем тактовой частоты.

Результаты моделирования приведены на рис. 4, б и 5, б. Там же на рис. 4, а и 5, а для сравнения приведены экспериментальные зависимости для ряда гармонических колебаний.

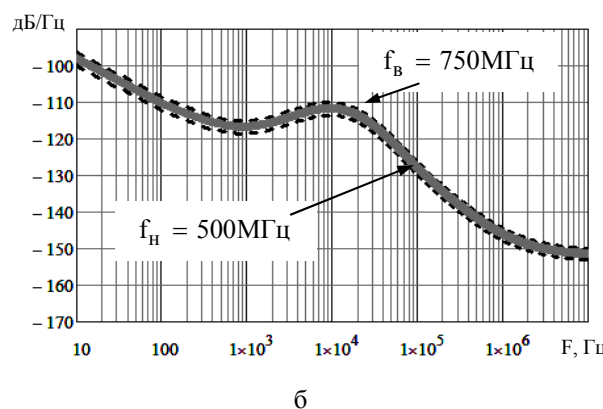
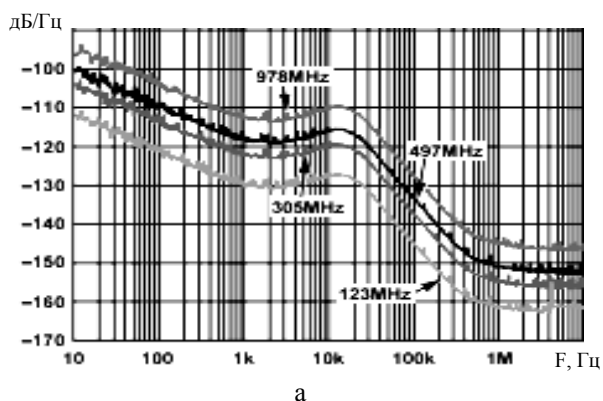


Рис. 4. Шумовые характеристики DDS AD9915 с умножением тактовой частоты на 25: а – экспериментальные ФШ для гармонических колебаний; б – рассчитанные ФШ для ЛЧМ сигнала

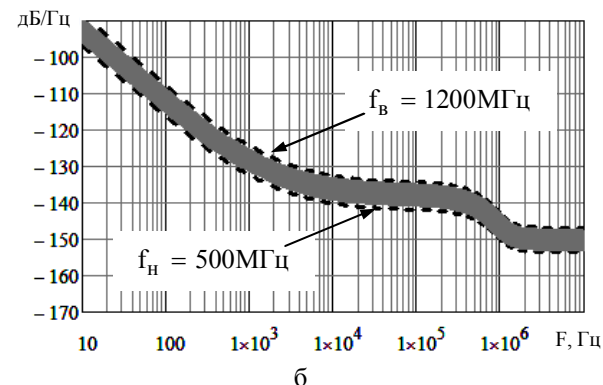
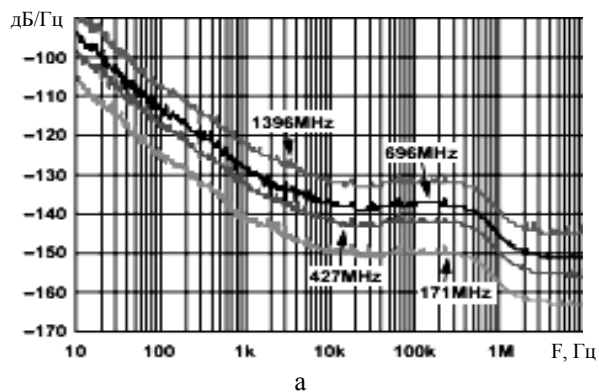


Рис. 5. Шумовые характеристики DDS AD9914 с умножением тактовой частоты на 35: а – экспериментальные ФШ для гармонических колебаний; б – рассчитанные ФШ для ЛЧМ сигнала

По характеру изменения ФШ для экспериментальных зависимостей и ФШ частот ЛЧМ сигнала видно, что они практически совпадают. При этом, сравнивая уровни ФШ до и после умножения частоты ГОЧ можно однозначно сказать, что с ростом коэффициента умножения ФШ синтезаторов возрастают.

В синтезаторе AD9915 шумы в среднем возросли на 15 дБ при коэффициенте умножения 25, а в AD9914 на 7..8 дБ при коэффициенте умножения 35 при отстройке частоты в 1 кГц.

Кроме того, в обоих DDS наблюдается некоторый рост фазовых шумов на частоте среза ФНЧ всегда присущий умножителям на петле ФАПЧ.

Как видим, применение тактового умножителя на петле ФАПЧ позволяет использовать ГОЧ в виде кварцевых генераторов, работающих на небольших частотах, для получения необходимой тактовой частоты, однако при этом значение синтезируемых параметров сигналов для обоих DDS будут значительно снижены.

Выводы

В результате проведенных исследований шумовых свойств современных интегральных DDS AD9914, AD9915 было выяснено, что:

1. Применение модели спектральной плотности мощности фазовых шумов DDS позволяет с достаточной точностью исследовать шумовые характеристики синтезаторов при произвольных значениях тактовой и выходных частот, в том числе и широкополосных ЛЧМ сигналов.

2. Использование модели спектральной плотности мощности фазовых шумов DDS синтезаторов со встроенным умножителем частоты на ФАПЧ позволяет оценить шумовые характеристики синтезаторов при применении низкочастотных опорных генераторов, однако частоты выходного сигнала при этом не будут превышать 1000 МГц.

3. При опорном генераторе в 100 МГц и коэффициентах умножения ФАПЧ равными 25 и 35, для AD9915 и AD9914 соответственно, были получены ФШ для частоты 500 МГц не хуже 120..132 дБ/Гц при отстройке в 1 кГц.

Список литературы

1. Кандырин Н.П. Формирование широкополосных ЛЧМ сигналов методом прямого цифрового синтеза и перенос их в диапазон СВЧ. Часть 1. Формирование прецизионных ЛЧМ сигналов DDS синтезаторами / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 3(140). – С. 64-68.
2. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
3. Ромашова Л.В. Моделирование спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов частот / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. – № 1.
4. Кандырин Н.П. Собственные фазовые шумы цифровых вычислительных синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2014. – № 2 (38). – С. 99-102.
5. Кандырин Н.П. Моделирование шумовых характеристик цифровых синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 4(120). – С. 7-10.
6. Кроура V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. – 2003, John Wiley @ Sons, Ltd. – 320 p.
7. 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.
8. Кандырин Н.П. Анализ фазовых шумов комбинированных синтезаторов сигналов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил / Н.П. Кандырин. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 3 (40). – С. 63 – 68.

Поступила в редколлегию 2.03.2016

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

ФОРМУВАННЯ ШИРОКОСМУГОВИХ ЛЧМ СИГНАЛІВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ ТА ПЕРЕНЕСЕННЯ ЇХ У ДІАПАЗОН НВЧ Частина 2. Шумові характеристики синтезаторів ЛЧМ сигналів на основі DDS

М.П. Кандирін

У випуску 3(140) даного збірника за 2016 рік була опублікована перша частина статті, що розповідає про оптимальні можливості формування широкосмугових ЛЧМ сигналів методом прямого цифрового синтезу. Друга частина статті присвячена дослідженню СПМ фазових шумів DDS синтезаторів.

Ключові слова: сигнал з лінійною частотною модуляцією, прямий цифровий синтез, фазовий шум.

FORMING OF WIDEBAND LFM SIGNALS AND TRANSFER OF THEM METHOD OF DIRECT DIGITAL SYNTHESIS IN RANGE GSE Part 2. The noise performance of synthesizers LFM signals based on DDS

N.P. Kandyrin

The number 3(140) for the year 2016 was published the first part of the article about the best opportunities of forming a broadband LFM signal by direct digital synthesis. The second part of the article is devoted to the study of SPM phase noise of a DDS synthesizer.

Keywords: signal with linear frequency modulation, direct digital synthesis, phase noise.