

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 3. Исследование фазовых шумов синтезаторов ЛЧМ сигналов в диапазоне СВЧ

Приводится сравнительный анализ двух наиболее распространенных способов переноса ЛЧМ сигналов в диапазон СВЧ. Исследованы шумовые характеристики синтезаторов ЛЧМ сигналов в диапазоне СВЧ.

Ключевые слова: сигнал с линейной частотной модуляцией, фазовая автоподстройка частоты, фазовый шум.

Введение

Постановка проблемы и анализ публикаций.

Освоение все более высокочастотных диапазонов длин волн на протяжении последних десятилетий остается устойчивой тенденцией развития современной радиотехники. Это в полной мере касается радиолокационных систем и устройств. Переход к использованию когерентных РЛС позволит значительно повысить потенциал и точностные характеристики радиолокационных систем [1, 2].

Когерентность работы всех узлов РЛС обеспечивается синхронизацией от общего опорного генератора.

Для решения задачи обеспечения когерентности формирования зондирующих, гетеродинных и синхронизирующих сигналов часто требуется соблюдать ряд условий при выборе схемотехнических решений и структуры построения устройства. Так для формирования когерентных зондирующих и гетеродинных сигналов в диапазоне СВЧ существует множество способов, среди которых и с помощью систем ФАПЧ [3].

Кольца ФАПЧ называют активными синтезаторами сигналов потому, что они содержат источник вторичных колебаний – генератор, управляемый напряжением (ГУН) [4]. Такие синтезаторы осуществляют умножение частоты опорного генератора до СВЧ диапазона.

Другим способом переноса сформированного сигнала в диапазон СВЧ, является способ переноса с помощью смесителя.

В-первых двух частях статьи были рассмотрены возможности формирования с помощью синтезаторов прямого цифрового синтеза широкополосных ЛЧМ сигналов и их шумовые характеристики. Здесь же мы рассмотрим шумовые характеристики синтезаторов в СВЧ диапазоне.

Синтезаторы с линейной перестройкой частоты в СВЧ диапазоне длин волн являются ключевыми

элементами для создания большинства радиолокаторов.

Нелинейность перестройки частоты таких синтезаторов определяет точность определения дальности и потенциал РЛС.

Фазовый шум – это один из важнейших критериев оценки частотной стабильности любого источника сигнала (СВЧ генератора).

Частотная стабильность генератора является качественным показателем того, насколько точно данный генератор может воспроизводить одну и ту же выходную частоту в заданном временном интервале [5].

Целью статьи является исследование шумовых характеристик СВЧ синтезаторов при формировании широкополосных ЛЧМ сигналов.

Изложение основного материала

Для формирования (переноса) ЛЧМ сигналов в диапазоне СВЧ воспользуемся двумя самыми распространенными способами, а именно с помощью петли ФАПЧ и с помощью смесителя. И в том и другом случае в качестве генератора опорного сигнала будем использовать один из синтезаторов DDS AD9914 или AD9915.

Простейшая схема переноса – это однопетлевой синтезатор с ФАПЧ (PLL). Типичный однопетлевой синтезатор с ФАПЧ включает в себя перестраиваемый генератор – генератор, управляемый напряжением, или ЖИГ – генератор, сигнал которого после требуемого снижения по частоте подается на один из входов фазового детектора, как показано на рис. 1.

На второй вход фазового детектора подается опорный сигнал с синтезатора DDS, на который поступают сигналы управления от ЭВМ, позволяющие устанавливать необходимые значения параметров выходного сигнала:

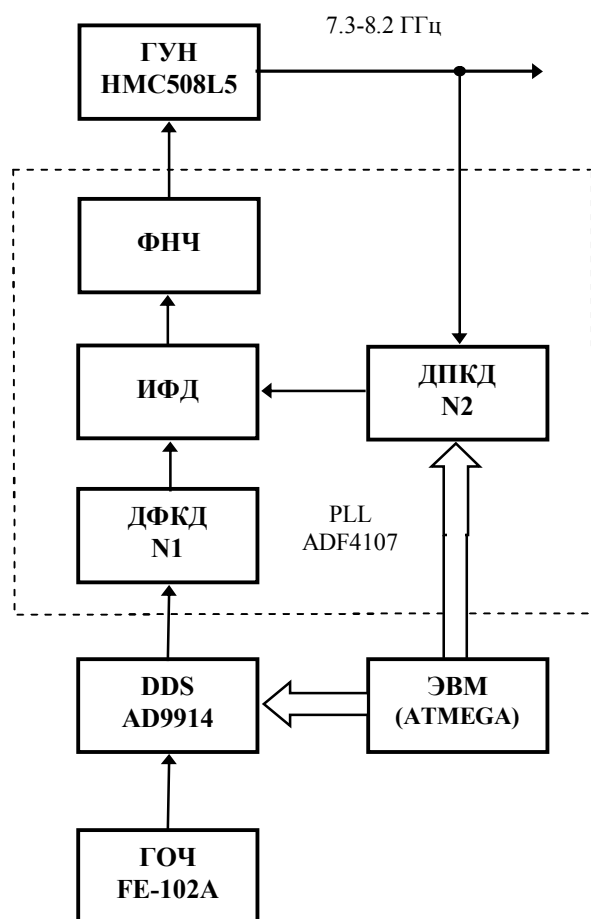


Рис. 1. Структурная схема переноса ЛЧМ сигнала в диапазон СВЧ с помощью системы ФАПЧ

- значения начальной частоты и фазы формируемого сигнала;
- значения скорости частотной модуляции;
- длительность и период повторения радиоимпульса;
- значения амплитуды выходного сигнала;
- дополнительное изменение фазы формируемого выходного сигнала для коррекции линейных искажений.

Для нормальной работы синтезатора AD9914 требуется стабильная тактовая частота 3,5 ГГц, которую получают путем умножения частоты малошумящих кварцевых генераторов встроенным умножителем, как правило, выполненным на петле ФАПЧ.

При моделировании шумовых характеристик синтезаторов будем использовать малошумящий кварцевый генератор частотой (100 МГц) с малым уровнем фазовых шумов (-173 дБ/Гц и 10 кГц) типа FE-102A или MOXO-100.

Выходная схема ФАПЧ (рис. 1) является по своей сути умножителем частоты с высокой кратностью умножения. В нашем случае кратность умножения ФАПЧ составит 80, а раз так, то она умножает и девиацию частоты ЛЧМ сигнала во столько же

раз. Поэтому при формировании опорного ЛЧМ сигнала в DDS необходимо учитывать кратность умножения системы ФАПЧ с тем, чтобы получить необходимую девиацию на выходе синтезатора в диапазоне СВЧ.

Основное отличие этой системы от обычного умножителя в том, что при изменении частоты опорного сигнала выходной сигнал меняется с задержкой, связанной с конечной полосой схемы ФАПЧ, которая планируется быть около 400-600 кГц, что приводит к задержке сигнала порядка 1 мксек (рис. 2).

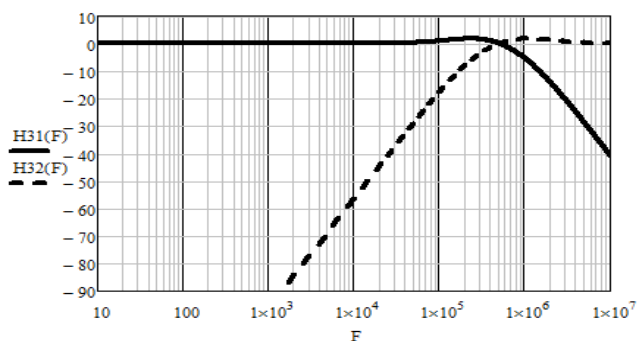


Рис. 2. Коэффициенты передачи замкнутого кольца ФАПЧ для фазовых шумов ГОЧ и ГУН

Из рис. 2 видно, что по отношению к фазовым шумам ГОЧ кольцо ФАПЧ ведет себя как ФНЧ с соответствующим коэффициентом усиления в полосе пропускания $\Delta f \ll f_{cp}$. Что же касается фазового шума ГУН, то здесь, напротив, кольцо ФАПЧ ведет себя подобно фильтру верхних частот с той же частотой среза $\Delta f \gg f_{cp}$.

Это 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. В этой области суммарный фазовый шум схемы стремится к уровню, определяемому ГУН, поскольку при частотах отклонения больше частоты среза шумы, создаваемые ГОЧ подавляются кольцом ФАПЧ.

Данный вывод определяет направление выбора ширины полосы кольца ФАПЧ. Ее значение должно лежать в области частот, в которой суммарный шум, создаваемый на выходе кольца ФАПЧ генератором опорной частоты, синтезатором DDS, делителями, фазовым детектором, а также резисторами, входящими в ФНЧ, сравнивается с шумом, генерируемым ГУН (рис. 3).

Поэтому в приведенной схеме обеспечивается не только быстрая и точная перестройка частоты, но и оптимальным образом регулируется уровень по-

ступающих на выход фазовых шумов, создаваемых ее отдельными элементами.

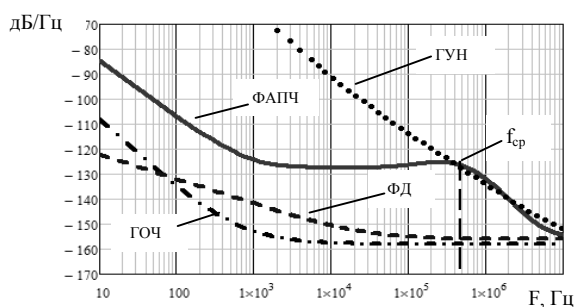


Рис. 3. СПМ фазовых шумов отдельных звеньев синтезатора

На основании проведенного анализа построения схемы синтезатора реализуем процедуры и составим программу моделирования ФШ работающую в среде MathCAD. Она позволяет определить полосу кольца ФАПЧ и определить ФШ прошедших через кольцо ФАПЧ всех элементов синтезатора сигналов.

Выходной сигнал синтезатора в диапазоне частот (7,3...8,2) ГГц формируется с помощью ГУН типа НМС508L5, который контролируется схемой ФАПЧ, выполненной на интегральной схеме ADF4107. В качестве опорного колебания с частотой (90...100) МГц на схему ФАПЧ подается ЛЧМ сигнал, сформированный DDS синтезатором, который управляется и контролируется с помощью ЭВМ или микроконтроллера.

При моделировании ФШ частоту сравнения в ФД системы ФАПЧ выбираем максимально возможной 100 МГц. Это позволит – во-первых, уменьшить коэффициент умножения системы ФАПЧ с тем, чтобы получить как можно меньший уровень ФШ на выходе синтезатора, во-вторых, ФД с частотой сравнения более 100 МГц на данный момент просто не существует.

Выходная частота DDS может быть линейно, увеличиваться (с положительным знаком скорости ЧМ), линейно уменьшаться (с отрицательным знаком скорости ЧМ) или быть постоянной (гармонический сигнал).

Фазовые шумы такого синтезатора с учетом умножения частоты ГОЧ внутренним множителем на петле ФАПЧ [6 – 8] приведены на рис. 4.

Сразу отметим, что ФШ для AD9914 и AD9915 при формировании ЛЧМ сигналов в полосе частот (90...100) МГц оказались практически одинаковыми (зависимости слились в одну широкую).

Для моделирования шумов комбинированного СВЧ синтезатора (рис. 1) воспользуемся моделями ФШ составных элементов из [7, 8] и рис. 3, 4. При этом коэффициент умножения ФАПЧ будет равен 80. Тогда выражение для СПМ фазовых шумов комбинированного синтезатора будет выглядеть следующим образом:

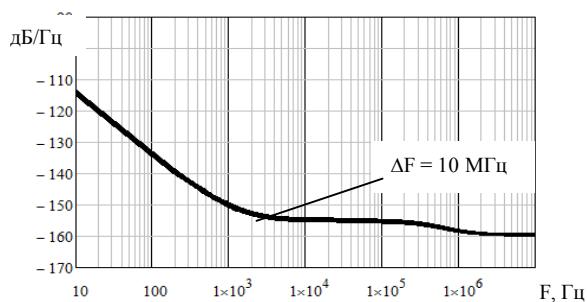


Рис. 4. СПМ фазовых шумов DDS AD9914 и AD9915 для ЛЧМ сигнала в диапазоне (90...100) МГц

$$S_{\text{ВЫХ}}(F) = \left[\frac{S_{\Phi-1}(F)}{N_1^2} + \left(\frac{S_{\PhiД}(F) + S_{\PhiНЧ}(F)}{E_{\PhiД}^2} \right) + S_{\text{ДФКД}}(F) + S_{\text{ДПКД}}(F) \right] \cdot N_2^2 \cdot \left(|H_{31}(F)| \right)^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot \left(|H_{32}(F)| \right)^2, \quad (1)$$

где $S_{\Phi-1}(F) = K_{\text{DDS}}^2 S_{\Phi\text{АПЧ}}(F) + S_{\text{DDS}}(F)$ – фазовые шумы DDS с учетом влияния встроенного умножителя тактовой частоты на петле ФАПЧ.

Для расчета СПМ ФШ DDS воспользуемся математической моделью и значениями коэффициентов k_i для степени 10 для микросхемы AD9914 из [7]:

$$S_{\text{DDS}}(F) = \left(\frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_T} \right)^2 \cdot \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4} \right) + 10^{k_3} + {}^{+2-2N-0,59} \left(\frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_T^2} \right) \cdot \left(\frac{\left(\frac{\pi f_{\text{ВЫХ}}}{f_T} \right)}{\sin \left(\frac{\pi f_{\text{ВЫХ}}}{f_T} \right)} \right)^2, \quad (2)$$

где k_i – коэффициенты аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов;

$K_{\text{DDS}}^2 = \left(\frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_T} \right)^2$ – коэффициент передачи входного шума синтезатором DDS; $f_{\text{ВЫХ}}$ – частота выходного сигнала DDS; f_T – тактовая частота; $N = 12$ – количество разрядов ЦАП DDS AD9914.

По выражению (1) было проведено моделирование ФШ СВЧ синтезатора в зависимости от частоты отстройки, кривые которых приведены на рис. 5.

Как и следовало ожидать, результирующий фазовый шум СВЧ синтезатора в пределах полосы пропускания фильтра ФАПЧ равен

$$S_{\text{ВЫХ}\Phi\text{АПЧ}}(F) = S_{\Sigma}(F) + 20 \log(N),$$

где $S_{\Sigma}(F)$ – суммарный шум, складывающийся из приведенного шума фазового детектора для заданной частоты сравнения, остаточного шума делителя,

шума ФНЧ и источника опорного сигнала, а N – коэффициент деления в петле ФАПЧ.

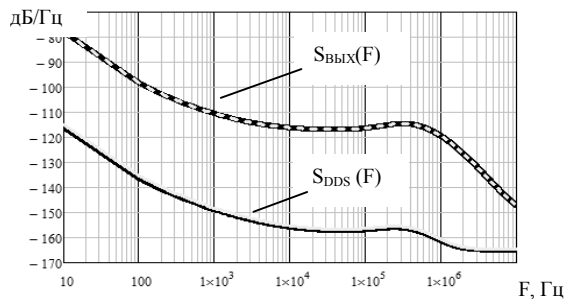


Рис. 5. Фазовые шумы DDS AD9914 для ЛЧМ сигнала в диапазоне (90...100) МГц и на выходе СВЧ синтезатора на частоте 7600 МГц

Главным преимуществом любой схемы на основе ФАПЧ является более чистый спектр выходного сигнала.

Недостатком такой системы является высокий коэффициент деления со значением 80, поэтому шумы в петле возрастают на 38 дБ относительно шумов $S_{DDS}(F)$.

Кроме того, синтезатор прямого синтеза DDS при перестройке в указанном диапазоне частот имеет случайные дискретные составляющие (spurious) на уровне -80 дБ. В петле ФАПЧ эти составляющие умножаются на $20 \log(N)$ и возрастают на 38 дБ. Поэтому петлю целесообразно делать узкой, чтобы ослабить дискретные паразитные составляющие фильтром низких частот ФАПЧ. Такое решение переноса ЛЧМ сигнала в диапазон СВЧ не есть оптимальным с точки зрения фазовых шумов и рассчитано на пользователей, которые используют доступную и широко известную элементную базу.

Из вышеизложенного видно, что использовать делитель в петле ФАПЧ не самое грамотное решение. Наиболее грамотное решение заключается в использовании для построения схемы переноса комбинации смесителя и системы ФАПЧ (рис. 6).

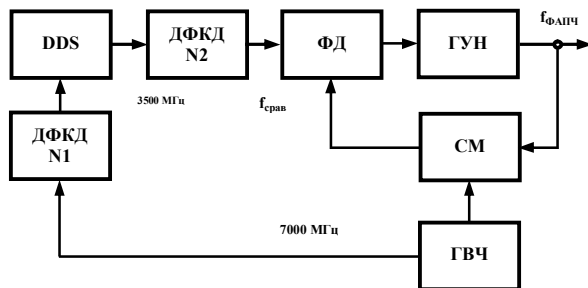


Рис. 6. Структурная схема переноса ЛЧМ сигнала в диапазон СВЧ с помощью системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи

В данной схеме шаг перестройки, даже после умножения в петле ФАПЧ, все еще будет оставаться

небольшим, так как шаг в DDS можно сделать очень малым.

В то же время, диапазон выходных частот остается типичным для системы ФАПЧ и составляет несколько гигагерц. Благодаря комбинированным синтезаторам на основе DDS и ФАПЧ можно покрывать очень широкий диапазон частот, в то время как выходная частота DDS будет меняться в небольших пределах.

Для расчета ФШ комбинированного синтезатора (рис. 6) воспользуемся моделью из [9] для расчета ФШ системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи.

Здесь, как и в предыдущем случае, DDS является опорным генератором системы ФАПЧ. При этом фазовые шумы опорного генератора можно не учитывать, так как они ослабляются в DDS в

$$\left(\frac{f_{DDS}}{f_T}\right)^2 \text{ раз и в ДФКД в } 2^2 \text{ раза.}$$

Тогда с учетом смесителя (СМ) в обратной связи СПМ ФШ выходного сигнала системы ФАПЧ запишем в следующем виде

$$S_{ВЫХ}(F) = \left[S_{Ф_2}(F) + S_{ДФКД}(F) + \left(\frac{S_{ФД}(F)}{E_{ФД}^2} \right) + S_{СМ}(F) \right] \cdot |H_{31}(F)|^2 + S_{ГУН}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2, \quad (4)$$

$$\text{где } S_{Ф_2}(F) = K_{DDS}^2 \cdot \frac{S_{ФАПЧ}(F)}{N_1^2} + S_{ДФКД}(F) \times K_{DDS}^2 + S_{DDS}(F) -$$

фазовые шумы DDS с учетом частоты генератора высокой частоты поделенной на 2, полученной умножением частоты ГОЧ на 70 с помощью петли ФАПЧ; $S_{ДФКД}(F)$, $S_{ФД}(F)$, $S_{ГУН}(F)$, $S_{СМ}(F)$ – фазовые шумы делителя частоты ДФКД, фазового детектора ФД, генератора управляемого напряжением ГУН, смесителя СМ, $N_1 = 2$ и $N_2 = 1$ – коэффициенты деления частоты делителей ДПКД.

Результаты моделирования по выражению (4) приведены на рис. 7.

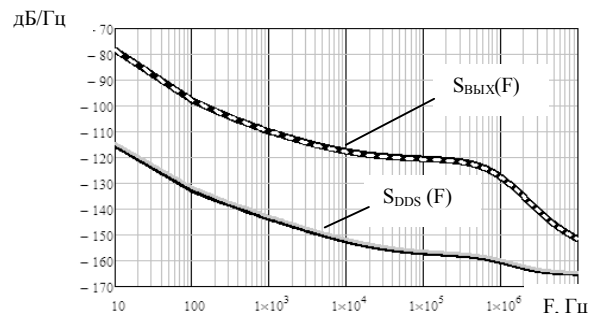


Рис. 7. Фазовые шумы AD9914 для ЛЧМ сигнала в диапазоне частот (90...100) МГц и на выходе СВЧ синтезатора на частотах 7090...7100 МГц

Из рисунка видно, что ФШ в этом случае тоже не опускаются ниже минус 120 дБ. Основной вклад в общий уровень шумов вносит ГОЧ, шумы которого умножены в 70 раз системой ФАПЧ.

Теперь посмотрим, как поведут себя фазовые шумы, если в качестве умножителя частоты ГОЧ использовать транзисторный умножитель на 70.

В этом случае выражение для расчета выходного ФШ примет следующий вид

$$S_{\text{ВЫХ}}(F) = \left(S_{\text{ГВЧ}}(F) + S_{\text{DDSI}}(F) + \frac{S_{\text{ФД}}(F)}{E_{\text{ФД}}^2} + S_{\text{СМ}}(F) \right) \times |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2, \quad (5)$$

где $S_{\text{ГВЧ}}(F) = S_{\text{ГОЧ}}(F) \cdot N_2^2 + S_{\text{УЧ}}(F)$ – фазовые шумы генератора высокой частоты;

$$S_{\text{DDSI}}(F) = K_{\text{DDS}}^2 \cdot \frac{S_{\text{ГВЧ}}(F)}{N_1^2} + S_{\text{ДФКД}}(F) \times K_{\text{DDS}}^2 + S_{\text{DDS}}(F) -$$

фазовые шумы DDS с учетом шумов ГВЧ.

Результаты моделирования СПМ ФШ по выражению (5) приведены на рис. 8.

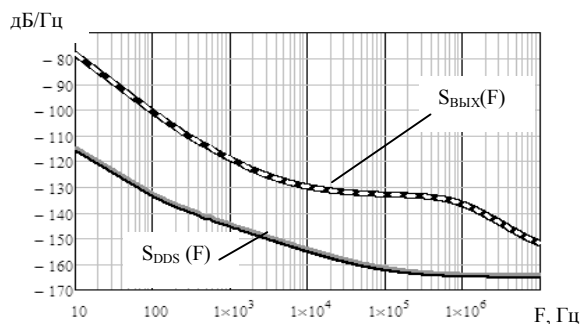


Рис. 8. Фазовые шумы AD9914 для ЛЧМ сигнала в диапазоне частот (90...100) МГц и на выходе СВЧ синтезатора на частотах 7090...7100 МГц

Как видим здесь уровень шумов на 10 дБ/Гц ниже, чем в предыдущем случае, однако шумы элементов системы ФАПЧ поддерживают их еще на достаточно высоком уровне.

Кроме того, при таком способе, из-за ограничения частоты сравнения ФД перенос широкополосных ЛЧМ сигналов в диапазон СВЧ невозможен.

Этого недостатка лишена схема переноса с помощью смесителя, которая очень часто используется на практике (рис. 9).

С ее помощью можно перенести в диапазон СВЧ любой сигнал, который может сформировать DDS синтезатор.

Для наглядности рассмотрим два случая: первый – частоту генератора ГВЧ будем получать умножением частоты ГОЧ с помощью системы ФАПЧ,

а второй когда эту частоту будем получать умножением частоты ГОЧ транзисторным умножителем.

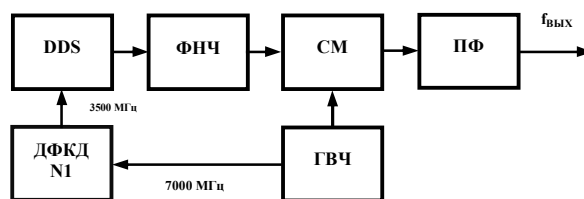


Рис. 9. Структурная схема переноса ЛЧМ сигнала в диапазон СВЧ с помощью смесителя

В этом случае выражение для расчета СПМ ФШ запишется следующим образом

$$S_{\text{ВЫХ}}(F) = S_{\text{DDSI}}(F) + S_{\text{СМ}}(F) + S_{\text{ГВЧ}}(F). \quad (6)$$

Фазовые шумы $S_{\text{DDSI}}(F)$ и $S_{\text{ГВЧ}}(F)$ – вычисляются, как и в предыдущих вариантах, при соответствующих умножителях частоты ГОЧ.

Зависимости фазовых шумов от отстройки частоты, рассчитанные по (6) для широкополосного ЛЧМ сигнала при частоте ГВЧ полученной с помощью петли ФАПЧ приведены на рис. 10.

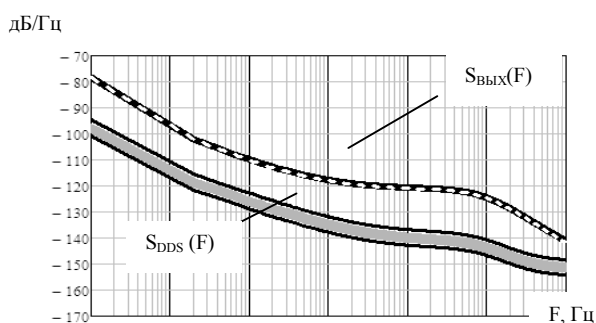


Рис. 10. Фазовые шумы AD9914 при формировании ЛЧМ сигнала в диапазоне частот (500...1000) МГц и шумы на выходе переносчика со смесителем на частотах (7500...8000) МГц

Из рисунка видно, что шумы синтезатора DDS возросли на 15 дБ за счет роста синтезируемой частоты, но, тем не менее, и в этом случае основной вклад в суммарные шумы вносит генератор ГВЧ.

Результаты расчета шумов по (6) при получении частоты ГВЧ умножением частоты ГОЧ транзисторным умножителем и девиацией частоты ЛЧМ сигнала равной $\Delta F = 500$ МГц приведены на рис. 11.

Здесь, как и в предыдущих случаях, фазовые шумы выходного сигнала будут определяться фазовыми шумами генератора ВЧ (при $f_{\text{ЛЧМ}} \ll f_{\text{СВЧ}}$). При этом, с ростом отстройки частоты ФШ остаются постоянными – минус 142 дБ/Гц. При дальнейшем росте частотного диапазона DDS его шумы будут сравнимы с шумами ГВЧ.

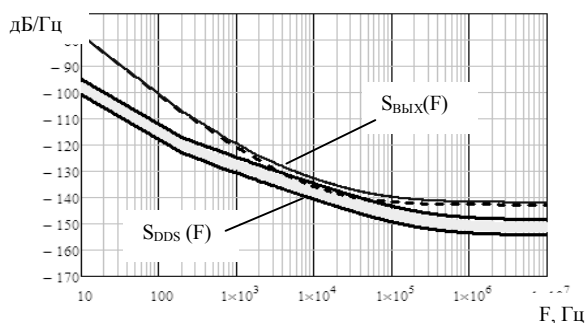


Рис. 11. Фазовые шумы AD9914 при формировании ЛЧМ сигнала в диапазоне (500...1000) МГц и шумы на выходе переносчика со смесителем на частотах (7500...8000) МГц

Кроме того, при такой реализации мощность спектральной составляющей генератора ВЧ $f_{ВЧ}$ сравнима со значениями мощности спектральных составляющих широкополосных выходных сигналов смесителя ($f_{ВЧ} + f_{DDS}$ и $f_{ВЧ} - f_{DDS}$), а значение мощности комбинационных составляющих

$$f_{ВЧ} \pm n \times f_{ЛЧМ} \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

на выходе смесителя не превышают минус 50 дБ.

Уменьшить уровень спектральной составляющей $f_{ВЧ}$ до необходимой величины возможно только с помощью полосовой фильтрации на выходе смесителя, при которой одновременно будут эффективно подавлены и мощности остальных спектральных составляющих $f_{ВЧ} - f_{DDS}$.

Выводы

Из анализа шумовых характеристик СВЧ синтезаторов на основе DDS и ФАПЧ, DDS и смесителя следует:

- при переносе сигнала в диапазон СВЧ (частоту 7...8 ГГц) с помощью системы ФАПЧ уровни фазовых шумов составляют (-120 дБн/Гц и 10 кГц);
- при переносе сигнала с помощью смесителя фазовые шумы составляют (-130 дБн/Гц и 10 кГц).

При всех способах переноса ЛЧМ сигналов в диапазон СВЧ основной вклад в суммарные шумы

синтезаторов вносит генератор ВЧ (опорный) и система ФАПЧ.

Список литературы

1. A new coherent for ice sounding in Greenland / A. Moussessian, R.L. Jordan, E. Redniguez, A. Sofaeinili, T.L. Akins, W.N. Edelstein, Y. Kim, S.P. Gogieni // Proc. IEEE, 2000.
2. Обоснование возможности и целесообразности создания РЛС радиовидения в миллиметровом диапазоне длин волн / Г.П. Кобельков, А.А. Курикина, Б.А. Левитан, Д.С. Очков, Г.К. Соловьев, А.А. Толкачев, С.А. Толчиев, В.Е. Фарбер // Радиотехника. – 2006. – №1.
3. Голуб В. Система ФАПЧ и ее применения / В. Голуб // Chip News. – 2000. – № 4.
4. Манасевич В. Синтезаторы частот (теория и проектирование) / В. Манасевич: пер. с англ.; под ред. А.С. Галина. – М.: Связь, 1979. – 394 с. ил.
5. Chenakin A. Building a Microwave Frequency Synthesizer / A. Chenakin // Summit Technical Media, LLC, High Frequency Electronics, May – September 2008.
6. 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. 27-32.
7. Кандырин Н.П. Формирование широкополосных ЛЧМ сигналов методом прямого цифрового синтеза и перенос их в диапазон СВЧ. Часть 2. Шумовые характеристики синтезаторов ЛЧМ сигналов на основе DDS / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 5(142). – С. 31-34.
8. 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.
9. Кандырин Н.П. Исследование фазовых шумов системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи / Н.П. Кандырин. // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 8(124). – С. 30-32.

Поступила в редколлегию 8.04.2016

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 І ПЕРЕНЕСЕННЯ ЇХ У ДІАПАЗОН НВЧ Частина 3. Дослідження фазових шумів синтезаторів ЛЧМ сигналів у діапазоні НВЧ

М.П. Кандирин

Наводиться порівняльний аналіз двох найбільш поширених способів перенесення ЛЧМ сигналів у діапазон НВЧ. Досліджено шумові характеристики синтезаторів ЛЧМ сигналів у діапазоні НВЧ.

Ключові слова: сигнал з лінійною частотною модуляцією, фазова автопідстроювання частоти, фазовий шум.

THE FORMATION OF A BROADBAND LFM SIGNAL BY DIRECT DIGITAL SYNTHESIS AND TRANSFER THEM TO THE MICROWAVE RANGE Part 3. A study of phase noise synthesizers LFM signals in the microwave range

N.P. Kandyrin

A comparative analysis of the two most common ways to transfer chirp signals in the microwave range. Investigated noise characteristics of the synthesizers chirp signals in the microwave range.

Keywords: signal with linear frequency modulation, phase locked loop, phase noise.