

Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, акустика та навігація

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОДНОКОЛЬЦЕВОГО СВЧ СИНТЕЗАТОРА С ПРЯМЫМ ЦИФРОВЫМ СИНТЕЗОМ И СИСТЕМОЙ ФАПЧ

Рассмотрен пример проектирования однокольцевого СВЧ синтезатора на основе прямого цифрового синтезатора (DDS) и системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) в качестве умножителя частоты. Исследованы фазовые шумы на выходе цифрового синтезатора (100 МГц) и выходе умножителя частоты на петле ФАПЧ (8 ГГц) в зависимости от шумовых характеристик отдельных элементов схемы построения.

Ключевые слова: СВЧ, спектральная плотность мощности, фазовые шумы.

Введение

Постановка проблемы и анализ публикаций.

В настоящее время все большее количество радиоэлектронных систем нуждаются в качественных синтезаторах сигналов. К синтезаторам сигналов предъявляется множество требований, основные из них [1]: спектральная чистота, стабильность частоты, частотное разрешение, диапазон частот, время переключения частоты, фазовые шумы, стоимость.

Удовлетворение всех этих требований приводит к множеству противоречий, поэтому в каждом конкретном случае при построении синтезатора сигналов необходимо приходиться к поиску компромисса. Знание о назначении устройства, куда будет входить синтезатор, позволяет конкретизировать требования и сместить акценты разработки в нужную сторону.

Одним из важных отличительных признаков современной РЛС является ее когерентность, поскольку на нынешнем этапе развития радиолокационной техники именно когерентная обработка принятых сигналов позволяет достигать необходимых характеристик обнаружения.

Ключевым звеном современной РЛС является многофункциональный синтезатор сигналов. Основными параметрами синтезатора, в решающей степени определяющими характеристики обнаружения РЛС и ее помехозащищенность, являются:

– уровень фазовых $S(F)$ и амплитудных $U(F)$ шумов синтезированных сигналов; требуемые значения – $S(F) \leq -(90...140)$ дБ/Гц; $U(F) \leq -(110...150)$ дБ/Гц при отстройке частоты 1 кГц от несущей;

– возможность быстрого переключения рабочих частот (желательно без разрыва и потери их на-

чальных фаз); требуемое время переключения – $10...0,05$ мкс;

– ширина полосы рабочих частот – $(5...50)\%$ и более;

– относительная нестабильность формируемых частот – $\Delta f/f \leq (10^{-5}...10^{-11})$;

– чистота спектров формируемых сигналов – относительный уровень побочных составляющих $\alpha_{\text{поб}} \leq -(70...90)$ дБ.

Учитывая тенденцию к опережающему развитию, особенно бортовых РЛС, не менее важны эксплуатационные характеристики синтезатора:

– устойчивость к воздействию внешних факторов (вибрация, удары, акустический шум, температура, влажность и т.д.);

– надежность функционирования в течение срока службы;

– габариты, масса и энергопотребление.

Таким образом, синтезаторы частоты (СЧ) для современных РЛС являются одним из наиболее высокотехнологичных продуктов и аккумулируют в себе лучшие достижения из многих областей знаний – от элементной базы и соответствующей схемотехники до материалов, технологий и конструкций.

Однако уже сегодня, с учетом анализа тенденций развития схемотехники СЧ [2] можно обозначить некоторые из направлений работ для достижения значительного улучшения характеристик СЧ.

Важнейшей из характеристик СЧ является уровень фазовых шумов синтезируемых сигналов. По некоторым оценкам, уверенное обнаружение малогабаритных целей класса «stealth» возможно при $S(F) = -(135...140)$ дБ/Гц при отстройке 1 кГц [3]. Традиционно используемые методы синтеза частот

ем (ГУН), делители частоты ЦСС (ГОЧ) и ГУН, импульсно-фазовый детектор (ИФД) и фильтр низких частот (ФНЧ). Делители частоты выполняются программируемыми для возможности перестройки частоты. Развитие интегральных технологий позволяет выполнять значительную часть компонентов ФАПЧ в одной микросхеме (снаружи остаются только ЦСС, ФНЧ, ГОЧ и иногда ГУН) и дополнит систему новыми элементами управления и контроля (индикаторами захвата фазы, элементами ускорения захвата частоты) [9].

Поскольку, для синтезаторов сигналов, одним из важных, а в некоторых случаях и определяющим параметром является величина фазовых шумов на его выходе, то и комплектующие элементы для проектирования будем выбирать с минимальными фазовыми шумами.

В табл. 1 приведены значения фазовых шумов для различных опорных кварцевых генераторов при частоте выходного сигнала 100 МГц и различных значениях отстройки частоты от несущей. Малогабаритные генераторы применяются в качестве источников эталонных по частоте гармонических сигналов для стабилизации частоты синтезаторов СВЧ, тактирования цифровых устройств и т.п.

Таблица 1
Сравнительные характеристики генераторов опорной частоты

Отстройка от несущей	CVHD-950 100 МГц	ТЕМЕХ ULN HF BA2 100 МГц	МОХО- 100 МГц
100Гц	-118	-130	-135
1кГц	-143	-158	-162
10кГц	-157	-174	-175
100кГц	-164	≤175	-176
1МГц	-168	≤175	-176
10МГц	-170	≤175	-178

Из таблицы видно, что из рассмотренных генераторов минимальный уровень фазовых шумов обеспечивает кварцевый генератор «МОХО – 100». Поэтому при дальнейшем исследовании ЦСС с прямым цифровым синтезом он использовался как эталонный ГОЧ.

В табл. 2 приведены значения фазовых шумов синтезаторов частот с DDS при выходной частоте сигнала 100 МГц и различных частотах отстройки от несущей. Из результатов таблицы следует, что уровень ФШ у всех синтезаторов практически одинаков.

В качестве DDS при проектировании будем использовать синтезатор AD9911.

В качестве кольца ФАПЧ, умножителя частоты, выберем микросхему HMC508LP5 (генератор,

управляемый напряжением – ГУН) и HMC703LP4E (делитель частоты с переменным коэффициентом деления и фазовый детектор).

Для обеспечения малого уровня фазовых шумов на выходе ГУН среднее значение частоты выходного сигнала синтезатора DDS выбираем равным 100 МГц. При этом коэффициенты деления примут следующие значения:

$$M=1; N=80.$$

Интегральная схема HMC703LP4E включает в себя регистр данных, делители опорной частоты на M и частоты ГУН на N, частотно-фазовый детектор, схему подкачки заряда. Данная микросхема может работать как с целочисленным, так и с дробным коэффициентом деления. ГУН HMC508LP5 позволяет строить современный СВЧ синтезатор с повышением или понижением частоты в диапазоне до 8 ГГц.

Таблица 2
Сравнительные характеристики ЦСС прямого цифрового синтеза

Отстройка от несущей	AD9911	AD9912	AD9914	1508ПЛ18Т
100Гц	-123	-125	-125	-
1кГц	-132	-132	-140	-135
10кГц	-143	-143	-148	-145
100кГц	-151	-148	-148	-152
1МГц	-154	-150	-158	-155
10МГц	-154	-150	-160	-
Частота дискретизации	500 МГц	1000 МГц	3500 МГц	1000 МГц

В табл. 3 приведены данные уровней ФШ микросхемы HMC703LP4E в режиме целочисленного и дробного коэффициента деления и ФШ ГУН HMC508LP5.

Таблица 3
Основные технические характеристики микросхем HMC703LP4E и HMC508LP5

Отстройка от несущей	HMC703LP4E		HMC508LP5
	Целочисленный	Дробный	
100Гц	-92	-92	-25
1кГц	-103	-103	-60
10кГц	-107	-107	-90
100кГц	-110	-112	-116
1МГц	-135	-135	-140
10МГц	-160	-160	-
100МГц	-178	-178	-
Частотный диап., МГц	-	-	0...8000
Макс. раб. частота ЧФД, МГц	100	100	-

Моделирование характеристик синтезатора сигналов показало, что при частоте сравнения в ИФД 100 МГц, полоса пропускания ФНЧ должна быть менее 40 кГц, что позволяет обеспечивать минимальные значения фазовых шумов на выходе умножителя.

Известно, что в полосе пропускания ФНЧ фазовый шум выходного сигнала петли ФАПЧ определяется шумами опорного генератора, вне полосы – собственными фазовыми шумами ГУН [10].

Шумы в петле ФАПЧ зависят от следующих параметров: нормированных уровней фликкер-шумов и фазовых шумов ИФД, рабочей частоты ИФД (частоты сравнения), частоты ГУН и величины отстройки.

В нашем случае деление частоты после DDS не предусматривается, поэтому микросхему с двумя делителями частоты НМС703LP4Е заменим более простой с одним делителем, а именно НМС699LP.

Тогда окончательная структурная схема проектируемого СВЧ синтезатора, будет выглядеть следующим образом, рис. 2.

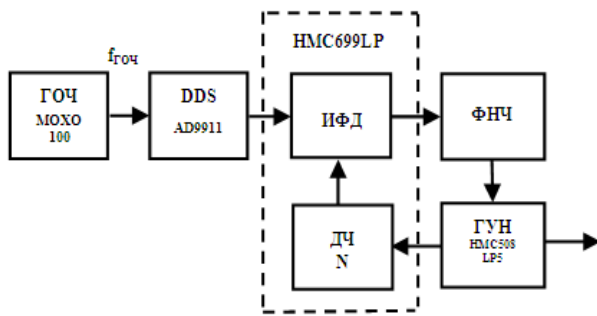


Рис. 2. Структурная схема проектируемого СВЧ синтезатора сигналов на основе DDS и PLL

Поскольку в качестве DDS синтезатора мы выбрали AD9911 с тактовой частотой 500 МГц, то для этого необходимо умножить частоту ГОЧ в пять раз. Есть два варианта: умножить частоту ГОЧ транзисторным умножителем или умножителем на петле ФАПЧ, который находится внутри самой микросхемы DDS.

Рассмотрим оба варианта.

При первом варианте, согласно [7] фазовый шум на выходе DDS (рис. 3) вычисляется на основании математической модели

$$S_{DDS1}(F) = ((S_{ГОЧ}(F) \cdot n_1^2 + S_{УЧ1}(F)) \cdot K_{DDS1}^2 + S_{DDS1}(F)).$$

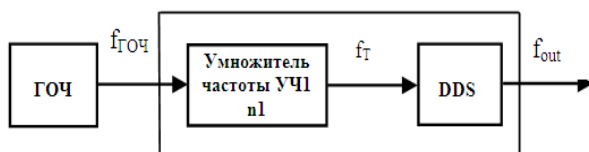


Рис. 3. Структурная схема DDS с транзисторным умножителем тактовой частоты

При втором варианте (рис. 4) фазовые шумы вычисляются согласно математической модели из [7]

$$S_{DDS2}(F) = (K_{DDS2}^2 S_{ИФАПЧ}(F) + S_{DDS2}(F));$$

$$S_{ИФАПЧ}(F) = \left[S_{ГОЧ}(F) + \left(S_{ДПКД}(F) + \frac{S_{ИФД}(F) + S_{ФНЧ}(F)}{E_{ИФД}^2} \right) \right] \times \times N_2^2 |H_{31}(F)|^2 + S_{ГУН}(F) |H_{32}(F)|^2.$$

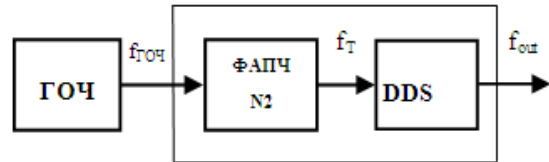


Рис. 4. Структурная схема DDS с умножителем тактовой частоты на кольце ФАПЧ

На рис. 5 приведены результаты расчетов теоретических исследований уровней фазовых шумов на выходе синтезатора с прямым цифровым синтезом (частота 100 МГц). При этом коэффициент умножения частоты ГОЧ транзисторным умножителем n1 и системой ФАПЧ N2 были равны пяти.

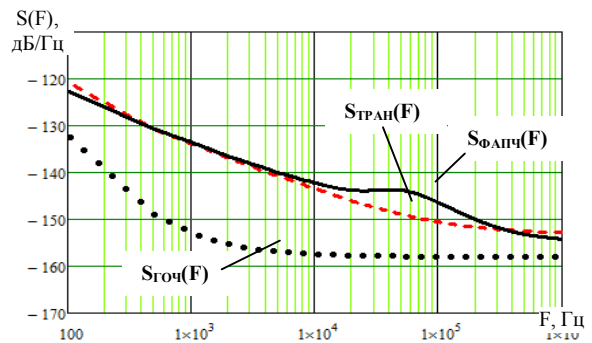


Рис. 5. Фазовые шумы на выходе синтезатора DDS (100 МГц) при умножении частоты ГОЧ (100 МГц) транзисторным умножителем (штриховая линия) и системой ФАПЧ (сплошная линия)

Анализ рисунка 5 показывает, что уровень фазовых шумов в обоих случаях почти одинаков, за исключением небольшого всплеска в районе частоты среза ФНЧ системы ФАПЧ. Малое расхождение в уровнях ФШ объясняется небольшим коэффициентом умножения частоты ГОЧ.

Фазовые шумы на выходе умножителя на кольце ФАПЧ (рис. 6) при частоте выходного сигнала 8 ГГц (коэффициент умножения 80) и использовании генератора «МОХО-100» (DDS0), синтезаторов DDS1 и DDS2 рассчитанные с использованием модели [7]:

$$S_{ФАПЧ}(F) = [S_{DDS}(F) + S_{ФД}(F)] \cdot N_2^2 |H_{31}(F)|^2 + S_{ГУН}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2,$$

показаны на рис. 7.

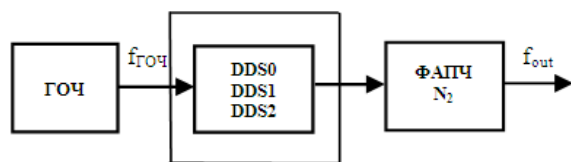


Рис. 6. Структурная схема умножителя частоты на кольце ФАПЧ

Из рисунка видно, что усредненное значение фазовых шумов для DDS1 и DDS2 составляет – 95 дБ/Гц при отстройке от несущей на 1 кГц. Проведенный анализ показывает, что полученные значения фазовых шумов синтезаторов частот определяются шумами умножителя частоты с петлей ФАПЧ.

Анализ сравнения результатов расчета, приведенных на рис. 7, показывает, что использование в качестве опорного генератора петли ФАПЧ и умножителя на транзисторах синтезатора частот с прямым цифровым синтезом на микросхеме AD9911 приводит к увеличению фазовых шумов выходного сигнала СВЧ, по сравнению с использованием малошумящего генератора «МОХО-100».

При отстройке частоты на 1 кГц от несущей шумы увеличиваются на 15 дБ, при отстройке на 10 кГц – на 8 дБ.

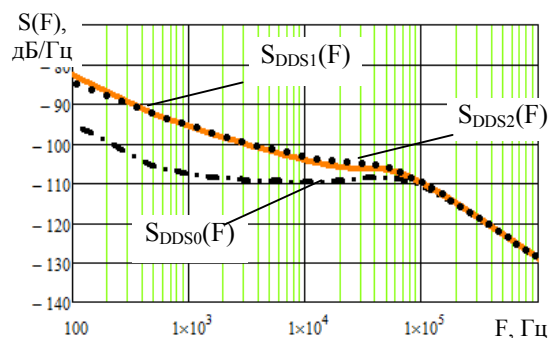


Рис. 7. Фазовые шумы на выходе умножителя частоты на кольце ФАПЧ при умножении частоты ГОЧ (100 МГц) (DDS0 – штрихпунктирная линия), DDS1 (сплошная линия, умножение частоты ГОЧ транзисторным умножителем) и DDS2 (точки, умножение частоты ГОЧ системой ФАПЧ)

Помимо увеличения фазового шума и увеличения уровней паразитных гармоник, умножение частоты с помощью ФАПЧ неблагоприятно сказывается на многих других важных параметрах сигнала DDS, включая скорость перестройки частоты и разрешение по частоте.

Разрешение по частоте по сравнению с сигналом DDS ухудшается в N раз, а скорость перестройки частоты выходного сигнала будет определяться постоянной времени системы ФАПЧ (и это время может в 10000 раз превышать время перестройки частоты сигнала DDS).

Если спектральная чистота синтезатора с ФАПЧ оказывается неудовлетворительной, то при-

бегают к двум широко распространенным методам ее улучшения.

Первый метод, позволяющий снизить их, – небольшое изменение опорной частоты, «отодвигающие» побочные спектральные составляющие (ПСС) дальше от несущей в область существенного подавления петель ФАПЧ.

Может быть реализовано либо переключение между двумя опорными частотами [11], либо формирование достаточно мелкой сетки опорных частот дополнительным синтезатором.

В этом случае основная ФАПЧ может иметь целочисленные коэффициенты деления, избавляя систему от биений вообще, а дополнительный синтезатор обеспечивает нужное частотное разрешение. Уровень фазовых шумов в такой системе остается, как минимум, неизменным или ухудшается. Дополнительный синтезатор может реализовываться как на микросхеме ФАПЧ, так и на микросхеме DDS.

Цифровой синтезатор в этом отношении позволяет добиться хорошего частотного разрешения и приемлемой спектральной чистоты.

Второй метод, позволяющий существенно снизить как фазовый шум, так и уровень ПСС, заключается в применении преобразования частоты в обратной связи [12, 13].

При таком решении делитель частоты в обратной связи исключается полностью или применяются как можно с минимальным коэффициентом деления – «усилитель» шумов ЧФД. Вместо него вводится смеситель, а в качестве дополнительного сигнала для преобразования применяется умноженный по частоте сигнал ГОЧ с переменным коэффициентом умножения. Требуемое частотное разрешение обеспечивается цифровым синтезатором сигналов (ЦСС), а уровень ФШ в большей степени определяется сигналом ГОЧ, умноженным по частоте. Улучшение спектральной чистоты возможно и применением менее шумящего управляемого генератора [4] – заменой октавного ГУН на ЖИГ - генератор.

Это возможно только на дальних отстройках от несущей и только ценой существенного замедления синтезатора.

Любая попытка улучшить какую-либо характеристику синтезатора приводит к появлению нового элемента или узла по сложности мало уступающего исходной системе, что зачастую означает кратное увеличение стоимости и энергопотребления.

Выводы

Разработан синтезатор сигналов с прямым цифровым синтезом и умножителем частоты на петле ФАПЧ.

Определен собственный уровень шумов разработанного умножителя частоты, равный - 95 дБ/Гц, при отстройке от несущей на 1 кГц.

Приведена частотная зависимость ФШ генератора с прямым цифровым синтезом, выполненного на микросхеме AD9911.

Появление в последние годы доступных микросхем, содержащих все необходимые узлы для построения синтезаторов сигналов на основе прямого цифрового синтеза, предоставляет альтернативу синтезаторам на основе ФАПЧ в диапазоне частот до 1,5 ГГц. Синтезаторы сигналов на основе прямого цифрового синтеза привлекательны в первую очередь сравнительно высокими характеристиками, отсутствием необходимости настройки, малым числом внешних элементов, легкостью управления и осуществления модуляции различных видов.

Однако малое количество типов микросхем прямого цифрового синтеза с тактовыми частотами выше 2,5...3,5 ГГц не позволяет им конкурировать с синтезаторами на основе ФАПЧ на частотах выше 1,5 ГГц. Значительно уступают они пока синтезаторам на основе ФАПЧ и в спектральной чистоте выходного сигнала.

Список литературы

1. Ченакин А. Современное состояние и пути развития синтезаторов частот СВЧ – диапазона. Презентация. [Электрон. ресурс] – Режим доступа к ресурсу: http://www.radiocomp/ru/joom/images/storage/photos/pm_pres/Chenakin_synth.ppt.
2. Browne J. Synthesizers add phase coherency to their arsenal / J. Browne // *Ibid.* – 1995. – № 6. – P. 140-147.
3. Царапкин Д.П. Применения диэлектрических резонаторов с волнами типа «шепчущей галереи» для стабилизации частоты автогенераторов сверхвысоких частот / Д.П. Царапкин // *Радиотехника.* – 2002. – № 2. – С. 28-35.
4. Кандырин Н.П. Выбор генераторов при проектировании СВЧ синтезаторов с ФАПЧ / Н.П. Кандырин // *Системы обработки информации.* – Х.: ХУПС, 2015. – № 8 (133). – С. 26-31.
5. Кандырин Н.П. Моделирование шумовых характеристик цифровых синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // *Системы обработки информации.* – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 4 (120). – С. 7-10.
6. 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. – Вып. 2 (39). – С. 70-73.
7. Кандырин Н.П. Анализ фазовых шумов комбинированных синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил.* – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 3 (40). – С. 63-68.
8. Шахтарин Б.И. Синтезаторы частот / Б.И. Шахтарин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 128 с.
9. ADF4156 6.2 GHz Fractional-N Frequency Synthesizer. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.analog.com.
10. Chenakin A. Frequency Synthesis: Current Solutions and New Trends: Transl. from English / A. Chenakin // *Microwave Journal, May 2007.* – P. 256-266.
11. Скоторенко И. Синтезатор частот. Патент РФ № 2458461.
12. Кандырин Н.П. Исследование фазовых шумов системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи / Н.П. Кандырин // *Системы обработки информации.* – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 8 (124). – С. 30-32.
13. Кандырин Н.П. Шумовые характеристики комбинированного формирователя сигналов на основе однокольцевой системы ФАПЧ со смесителем и цифрового синтезатора сигналов / Н.П. Кандырин // *Системы обработки информации.* – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 9 (125). – С. 35-38.

Поступила в редколлегию 24.03.2015

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

ПРОЕКТУВАННЯ ОДНОКІЛЬЦЕВОГО НВЧ СИНТЕЗАТОРА З ПРЯМИМ ЦИФРОВИМ СИНТЕЗОМ І СИСТЕМОЮ ФАПЧ

М.П. Кандирин

Розглянутий приклад проектування однокільцевого НВЧ синтезатора на основі прямого цифрового синтезу (DDS) і системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) у якості помножувача частоти. Досліджено фазові шуми на виході цифрового синтезатора (100 МГц) і виході помножувача частоти на петлі ФАПЧ (8 ГГц) залежно від шумових характеристик окремих елементів схеми побудови.

Ключові слова: НВЧ, спектральна щільність потужності, фазові шуми.

DESIGN OF THE ONE-RING MICROWAVE SYNTHESIZER WITH DIRECT DIGITAL SYNTHESIS AND SYSTEM OF PLL

N.P. Kandyrin

An example of design of the one-ring microwave a synthesizer on the basis of a direct digital synthesis (DDS) and system of a phase auto-adjust of the frequency (PLL) as a frequency multiplier is reviewed. Phase noise at the output of a digital synthesizer (100 MHz) and a frequency multiplier output on PLL (8 GHz) depending on noise characteristics of separate elements of the scheme of construction are investigated.

Keywords: microwave, spectral density of power, phase noise.