

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФАПЧ И ЦСС ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СВЧ СИГНАЛОВ. ФАЗОВЫЕ ШУМЫ СИСТЕМЫ ФАПЧ

Проведен сравнительный анализ построения комбинированных формирователей сигналов на основе ФАПЧ и ЦСС. Приведены выражения, определяющие относительную спектральную плотность мощности фазовых шумов системы ФАПЧ и графики зависимостей фазовых шумов от частоты расстройки.

**Ключевые слова:** комбинированный формирователь сигналов, фазовая автоподстройка частоты, фазовый шум.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ публикаций.

Цифровые синтезаторы частот (ЦСЧ) и цифровые синтезаторы сигналов (ЦСС) являются основным элементом практически любой современной системы связи, радиолокации, измерения и контроля. Функциональные возможности данных систем в большей степени зависят от характеристик используемых синтезаторов. Наибольшее развитие получили два основных типа синтезаторов: прямые цифровые синтезаторы сигналов (DDS) и синтезаторы с петлей ФАПЧ (PLL). Однако, анализируя основные требования [1] в проектировании новых поколений синтезаторов СВЧ диапазона для различных задач, можно констатировать, что ни один синтезатор сигналов, выполненный по классической схеме PLL или DDS, в полной мере им не удовлетворяет. Причем преимущества и недостатки технологий как PLL, так и DDS разделились примерно пополам: DDS синтезаторы сигналов обладают лучшим частотным разрешением и максимальным быстродействием, а PLL синтезаторы – наилучшими спектральными характеристиками и возможностью формирования рабочей частоты до десятков ГГц. Дальнейшее техническое развитие данных технологий ограничивается техническим прогрессом в элементной базе.

Разрешение данного противоречия в настоящее время достигается использованием четырех [2] основных методов:

- синтез на промежуточной частоте с последующим умножением частоты;
- синтез на промежуточных частотах с последующим преобразованием частоты «вверх»;
- предварительное аналоговое деление частоты ГУН;
- преобразование частоты ГУН «вниз».

Все указанные методы требуют включения в структурную схему синтеза дополнительных устройств.

Целью статьи является проведение сравнительного анализа вариантов построения комбинированных синтезаторов на основе систем ФАПЧ и ЦСС и перспективы их использования.

### Основной материал

Использование умножителей наиболее очевидный способ повысить рабочую частоту. Однако для умножителя частоты характерен режим работы с большими амплитудами входного напряжения. Это обстоятельство наряду с уменьшением полезной мощности при повышении порядка умножения из-за убывания коэффициентов Берга существенно ухудшает энергетические соотношения в умножителях. Кроме того, умножители – это нелинейные элементы и при прохождении сложного модулированного сигнала через тракт умножения возникают искажения таких сигналов. Уровень побочных спектральных составляющих (ПСС) возрастает на  $20\lg(M)$ , где  $M$  – коэффициент умножения.

Использование преобразования частоты «вверх» не увеличивает уровень ПСС, но динамический диапазон не превышает 1 вследствие появления побочных продуктов преобразования:

$$f_{ПБ} = n \cdot f_C \pm m \cdot f_{ГЕТ},$$

где  $f_C$  – частота синтезатора,  $f_{ГЕТ}$  – частота гетеродина,  $n$  и  $m$  – целые положительные числа.

Аналоговое деление частоты ГУН подразумевает добавление сложных элементов в схему без возможности интегрального исполнения. Кроме того, аналоговые делители частоты обладают значительными собственными шумами. Общее отношение сигнал/шум системы с аналоговым делителем ухудшается пропорционально коэффициенту деления.

От перечисленных недостатков свободен метод преобразования частоты «вниз». При этом целесообразно в качестве гетеродина использовать DDS синтезатор, получая, таким образом, комбинирован-

ную схему синтеза, использующую как технологию DDS, так и технологию PLL.

Рассмотрим варианты построения подобных схем. В первой схеме DDS с фильтром на выходе является генератором опорного сигнала в системе ФАПЧ (рис. 1).

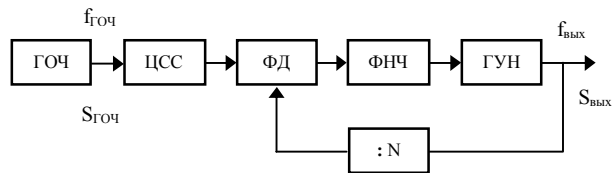


Рис. 1. Комбинированный синтезатор с использованием ЦСС в качестве опорного генератора системы ФАПЧ

Такое решение позволяет получить систему с разрешающей способностью по частоте как у DDS, сохранив при этом спектральные свойства PLL структуры.

Существенным недостатком данной схемы является потеря быстродействия DDS синтезатора, так как ширина полосы пропускания петли ФАПЧ в данном случае очень мала. Выбор ширины полосы пропускания фильтра и центральной частоты определяется компромиссом между требуемой скоростью перестройки частоты, уровнем шумов и помех и разрешением по частоте [1, 3].

Во второй схеме DDS используется в качестве делителя частоты в цепи обратной связи системы ФАПЧ (рис. 2).

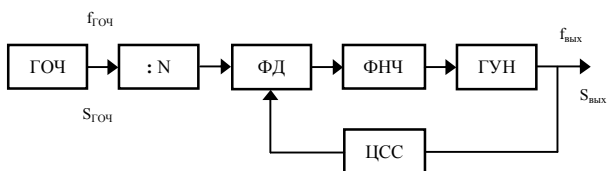


Рис. 2. Комбинированный синтезатор с использованием ЦСС как делителя частоты в системе ФАПЧ

Преимущества данной схемы в том, что она позволяет обеспечить широкую полосу выходных частот, низкий уровень фазового шума, малый уровень побочных спектральных составляющих, относительно низкую мощность энергопотребления [4]. При этом также необходимо учитывать, что при переносе частоты на более высокий уровень увеличиваются и шумовые характеристики.

Третий метод построения комбинированного синтезатора сигналов основан на сдвиге частоты. Это достигается при помощи ЦСС. Схема такого синтезатора приведена на рис. 3 [1, 4]. Разрешение такого синтезатора будет таким же, как и у ЦСС. При этом такой синтезатор будет иметь широкую полосу рабочих частот, присущую синтезаторам на основе ФАПЧ.

Преимущества такой схемы заключается в быстрой перестройке по частоте и низком уровне шумов, благодаря небольшому коэффициенту умножения в системе ФАПЧ.

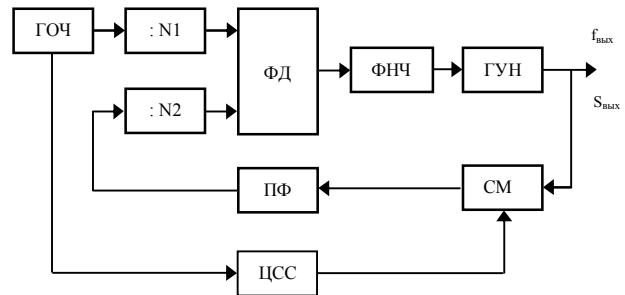


Рис. 3. Комбинированный синтезатор с использованием ЦСС для сдвига частоты

Схема на рис. 4 также основана на смещении частоты с помощью ЦСС. В этой схеме генерируемые синтезатором ЦСС сигналы с точной установкой частоты применяются для модулирования частоты ГУН, в результате чего образуются сигналы на частотах, соответствующих сумме и разности исходных частот.

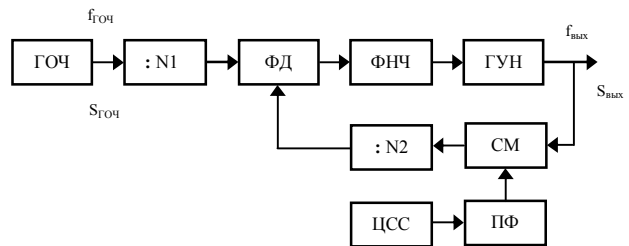


Рис. 4. Комбинированный синтезатор со смещением частоты ГУН

После фильтрации этот сигнал модулирует опорную частоту. Эта схема подобна многопетлевому синтезатору PLL, однако каскады PLL, предназначенные для тонкой настройки частоты, заменены на один синтезатор ЦСС. Применение синтезатора ЦСС в этой комбинационной схеме может обеспечить более высокое разрешение по частоте, чем синтезатор с несколькими петлями PLL.

Основные преимущества этого варианта:

- отличное разрешение по частоте с постоянным шагом,
- низкий фазовый шум,
- низкий побочный шум,
- относительно низкая мощность энергопотребления.

Таким образом, проведенный анализ наиболее распространенных схем комбинированных синтезаторов сигналов на основе системы ФАПЧ и ЦСС показал возможность формировать сигналы с параметрами, превосходящими параметры исходных схем.

## Исследование шумовых свойств системы ФАПЧ в режиме умножения частоты

При формировании высокочастотных сигналов используются синтезаторы частот с последующим умножением или преобразованием частоты [2]. Применение умножителей частоты увеличивает уровень шумов пропорционально квадрату коэффициента умножения, что при большом его значении существенно ухудшает спектральную чистоту выходного сигнала. Часто в качестве умножителей используют систему ФАПЧ, например, в ЦСС с целью повышения выходной частоты. При этом система автоподстройки вносит свои собственные шумы, величина которых и распределение по частоте зависят от параметров схемы. Поэтому возникает определенный интерес в исследовании шумов вносимых системой ФАПЧ в зависимости от коэффициента умножения и параметров системы.

Структурная схема исследуемой системы приведена на рис. 5.

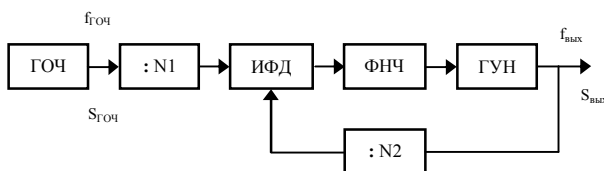


Рис. 5. Структурная схема системы ФАПЧ

Здесь приняты обозначения:

- N1, N2 – делители частоты с соответствующими коэффициентами деления,
- ИФД – импульсно-фазовый детектор,
- ФНЧ – фильтр нижних частот,
- ГУН – генератор, управляемый напряжением.

Для оценки шумовых свойств системы ФАПЧ используем относительные спектральные плотности (ОСП) фазовых флуктуаций, которые позволяют сравнивать уровни шума на выходе устройств с различной мощностью входного сигнала.

Относительная спектральная плотность фазовых флуктуаций на выходе такой системы

$$S_{\text{ФАПЧ}}(F) = \left[ \frac{S_{\text{ГОЧ}}(F)}{N1^2} + \frac{S_{\text{ИФД}}(F) + S_{\text{ФНЧ}}(F)}{E_{\text{ИФД}}^2} + S_{\text{Н1}}(F) + S_{\text{Н2}}(F) \right] \times N2^2 \times |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2,$$

где  $S_{\text{ГОЧ}}(F)$ ,  $S_{\text{ИФД}}(F)$ ,  $S_{\text{ГУН}}(F)$  – относительные спектральные плотности фазовых шумов ГОЧ, импульсного фазового детектора ИФД и генератора, управляемого напряжением ГУН;

N1 и N2 – коэффициенты деления частоты в делителях системы ФАПЧ;

$E_{\text{ИФД}}$  – максимальное выходное напряжение ИФД;

$H_{31}(p) = H(p) / (1 + H(p))$  – передаточная функция кольца ИФАПЧ по внешним шумам;

$H_{32}(p) = 1 / (1 + H(p))$  – передаточная функция кольца ИФАПЧ по внутренним шумам;

$H(p) = K_{\text{ФНЧ}}(p) \cdot E_{\text{ИФД}} \cdot S_{\text{ГУН}} / p$  – передаточная функция разомкнутого кольца ИФАПЧ;  
 $p$  – оператор  $d/dt$ .

Основные соотношения для расчета ОСП входящих в систему каскадов взяты из [5, 6].

$$S_{\text{ГОЧ}}(F) = \frac{10^{-10,82}}{F^3} + \frac{10^{-9,86}}{F^2} + \frac{10^{-12,7}}{F} + 10^{-15,8};$$

$$S_{\text{ГУН}}(F) = \frac{10^{0,7}}{F^3} + \frac{10^{-3}}{F^2} + 10^{-15,5}.$$

Как известно, что основной вклад шумов в системе ФАПЧ вносит импульсно-фазовый детектор и их ОСП удовлетворительно аппроксимируется зависимостью

$$S_{\text{ИФД}}(F) = \frac{10^{-14}}{F} + 10^{-16,5}.$$

Рассчитанные в программе MathCAD зависимости шумов системы ФАПЧ приведены на рис. 6.

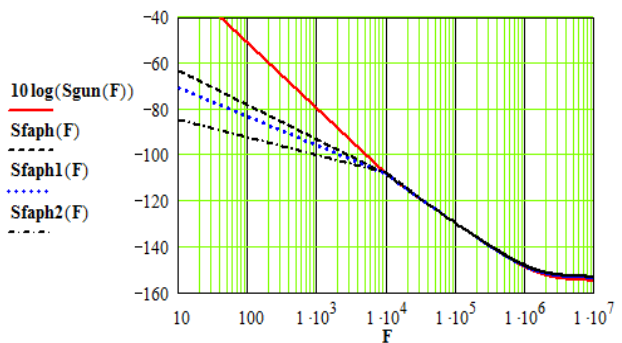


Рис. 6. Зависимость ОСП шумов ФАПЧ от частоты отстройки при различных коэффициентах деления N2:  
 $N2_{\text{faph}} = 2000$ ;  $N2_{\text{faph1}} = 1000$ ;  $N2_{\text{faph2}} = 200$

Как видно, уровень шума меньше при меньших коэффициентах деления при небольших отстройках частоты, так как здесь большее влияние оказывают ОСП ИФД.

Здесь величина коэффициента деления N2 определяет частоту сравнения в импульсно-фазовом детекторе – с увеличением N2 частота сравнения уменьшается.

При отстройках вище 5 кГц уровень ОСП опережается шумами ГУН и остается неизменным.

На рис. 7 приведена зависимость ОСП сигнала на выходе ФАПЧ при различных соотношениях коэффициентов деления  $N_2/N_1$ , что эквивалентно коэффициенту умножения частоты системой ФАПЧ. Вполне закономерно, что уровень шума выходного сигнала ФАПЧ растет с увеличением коэффициента умножения.

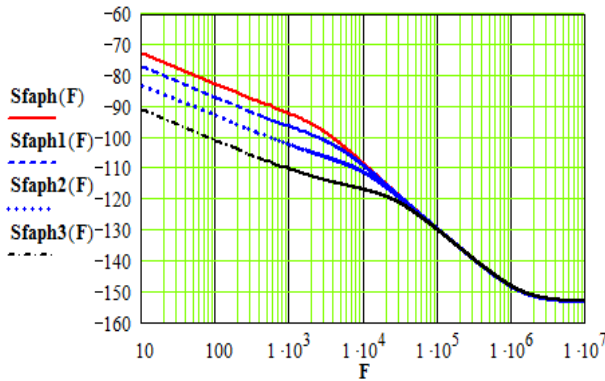


Рис. 7. Зависимость ОСП шумов ФАПЧ от частоты отстройки при различных коэффициентах умножения системы ФАПЧ ( $N_2/N_1$ ):  
 $N_2/N_{1\text{faph}} = 5$ ;  $N_2/N_{1\text{faph1}} = 4$ ;  
 $N_2/N_{1\text{faph2}} = 2$ ;  $N_2/N_{1\text{faph3}} = 1$

## Выводы

Применение комбинированных синтезаторов сигналов на основе системы ФАПЧ и ЦСС дает возможность формировать сигналы с параметрами, превосходящими параметры исходных схем.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что с ростом коэффициента умножения системы ФАПЧ растет и уровень шума.

Для уменьшения фазовых шумов ФАПЧ при небольших отстройках частоты от несущей необходимо уменьшить полосу пропускания ФНЧ, однако это ведет к уменьшению быстродействия такой системы, что не всегда является положительным эффектом.

## Список литературы

1. Chenakin A. Frequency Synthesis. Current Solutions and New Trends / A. Chenakin // *Microwave Journal*. – May 2007. – P. 256-266.
2. Формирование прецизионных частот и сигналов: учеб. пос. / Н.П. Ямпурин, В.В. Болотнев, Е.Ф. Сафонова, Е.Б. Жалнин. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т., 2003. – 187 с.
3. Ридико Л.И. DDS: прямой цифровой синтез частоты / Л.И. Ридико // *Компоненты и технологии*. – 2003. – № 11. – С. 50-56.
4. Никитин О.Р. Спектральные характеристики гибридных синтезаторов частот / О.Р. Никитин, Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов, А.Н. Фомичев // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. – 2011. – № 1. – С. 16-21.
5. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
6. Drucker Erik. Model PLL Dynamics and Phase-Noise Performance / Erik Drucker // *Microwaves & RF*. – 2000. – № 2. – P. 35-42.

Поступила в редколлегию 12.03.2014

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

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНИХ ФОРМУВАЧІВ НА ОСНОВІ ФАПЧ І ЦСС ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СВЧ СИГНАЛІВ. ФАЗОВІ ШУМИ СИСТЕМИ ФАПЧ

М.П. Кандирін

Проведено порівняльний аналіз побудови комбінованих формувачів сигналів на основі ФАПЧ і ЦСС. Наведено вирази, що визначають відносну спектральну щільність потужності фазових шумів системи ФАПЧ та графіки залежностей фазових шумів від частоти расстройки.

**Ключові слова:** комбінований формувач сигналів, фазова автопідстроювання частоти, фазовий шум.

## PROSPECTS OF COMBINED CONDITIONERS PLL BASED DSS FOR FORMING AND MICROWAVE SIGNAL. PHASE NOISE OF THE PLL

N.P. Kandyrin

A comparative analysis of constructing combined signal conditioners based on PLL and SSC. The expressions defining the relative power spectral density of the phase noise of the PLL and the dependency graphs of phase noise on the frequency detuning.

**Keywords:** combined signal shaper, phase-locked loop, the phase noise.