

СИНТЕЗАТОРЫ СТАБИЛЬНЫХ ЧАСТОТ*

Работа радиотехнических систем основана на извлечении информации из радиосигналов с высокостабильными собственными параметрами: частотой, фазой, формой огибающей. Для достижения таких параметров необходимы как источники опорных колебаний, устойчивые к различным дестабилизирующим воздействиям, так и технические возможности управления ими. Но эти задачи противоречивы. Решаются они при помощи синтезаторов частоты (СЧ), преобразующих колебания опорного генератора, принимаемые за эталонные, в сигналы желаемого номинала частоты с незначительной потерей эталонных свойств. Наибольший интерес разработчиков электронной аппаратуры привлекают СЧ, реализованные в виде одной или нескольких микросхем, которые могут быть встроены в новые изделия. Что же сегодня представлено на мировом рынке моделей и модификаций микросхем, составляющих СЧ?

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Синтезатор частоты – устройство, преобразующее гармоническое колебание опорного источника $u_0(t)$, частота f_0 которого принимается за эталонную, в почти гармоническое колебание $u_{\text{вых}}(t)$ с частотой $f_{\text{вых}}$. Преобразование выполняется при допустимых значениях погрешности установки среднего значения частоты $f_{\text{вых}}$, уровня мешающих дискретных и шумовых составляющих спектра, отклонения формы выходного колебания от гармонической и отклонения параметров под действием дестабилизирующих факторов. Иногда при переходе от одного значения средней частоты к другому требуется высокое быстродействие, а иногда необходимо формировать в СЧ модулированные колебания с малыми погрешностями средней частоты и параметров модуляции [3].

При высоких требованиях к стабильности и чистоте спектра выходного сигнала используют следующие два типа СЧ.

Прямой цифровой синтезатор (Direct Digital Synthesizer – DDS), называемый также цифровым вычислительным синтезатором – ЦВС. В ЦВС выходной сигнал формируется на выходе цепочки из последовательно включенных накопителя кода частоты (НКЧ), накопителя кода фазы (НКФ), модулятора кода фазы (МКФ), фазо-амплитудного преобразователя кодов (ПК) и ЦАП (рис. 1). При фиксированных значениях частоты и фазы выходного сигнала

* Публикация продолжает серию статей по обзору характеристик радиокомпонентов мировых производителей [1, 2].



Л.Белов

с каждым импульсом тактовой частоты f_T в НКФ к текущему коду фазы K_Φ прибавляется код частоты K_f . Частота повторения циклов переполнения счетчика НКФ пропорциональна коду частоты

$$f_{\text{вых}} \equiv (K_f/R) f_T,$$

где R – объем счетчика НКФ. Погрешность связана с ошибками дискретизации при некратных значениях R и K_f . Минимальный шаг по частоте $\Delta f = f_T/R$ задается разрядностью шины K_f .

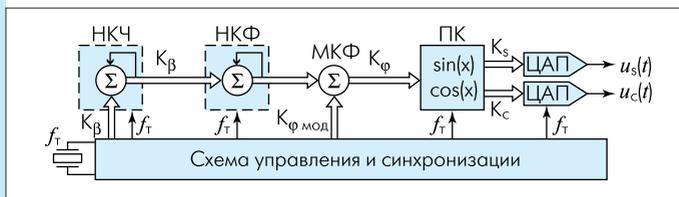


Рис. 1. Структурная схема прямого цифрового синтезатора

НКЧ используется в режиме автоматической перестройки частоты. При этом скорость изменения K_f на соседних тактах суммирования задается кодом K_B . Модуляция фазы выходного сигнала кодом $K_{\Phi \text{ мод}}$ вводится в МКФ. В блоке памяти ПК по коду фазы K_Φ считываются коды синусного K_s и/или косинусного K_c отсчетов выходного сигнала, которые ЦАП преобразует в выходные напряжения $u_s(t)$ и/или $u_c(t)$.

ЦВС обеспечивает малые погрешности установки параметров, имеет широкие возможности по модуляции, характеризуется малым временем перехода от одной частоты к другой. Но значения его выходной частоты ограничены быстродействием цифровых узлов.

Синтезатор на основе фазовой автоматической подстройки частоты – ФАПЧ. Выходной сигнал такого СЧ – колебание генератора, управляемого напряжением (ГУН), частота которого синхронизирована по опорному источнику при помощи цепи обратной связи. Выходная частота СЧ с ФАПЧ практически не ограничена. Но его настройка сложнее, чем ЦВС, и его функциональные возможности не столь широки. СЧ с ФАПЧ могут быть выполнены с целочисленным или дробно-переменным коэффициентом деления частоты.

В базовой схеме СЧ с целочисленным коэффициентом деления (Integer-N Divider) ГУН охвачен кольцом автоматической подстройки частоты, содержащим фазовый дискриминатор (ФД), опорный делитель частоты $\div M$, делители частоты в кольце $\div N$ и $\div P$ и цепь обратной связи с фильтром нижних частот (ФНЧ) (рис. 2). Делитель частоты $\div P$ работает на частоте $f_{\text{ГУН}}$ с фиксированным коэффициентом деления, кратным степени 2, а делитель $\div N$ работает как управляемый счетчик с произвольным коэффициентом деления. Иногда он может иметь двухмодульное исполнение, и тогда его коэффициент деления устанавливается равным N или $N+1$. Это позво-

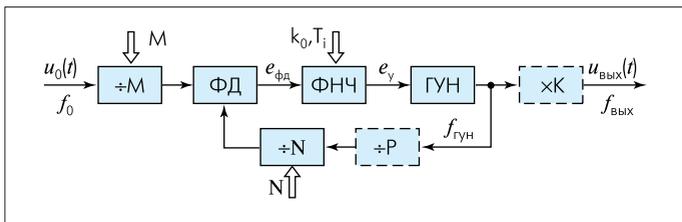


Рис.2. Базовая схема синтезатора частот с ФАПЧ

ляет снизить погрешность установки заданного номинала выходной частоты СЧ $f_{\text{Вых}}$ при фиксированной частоте опорного генератора f_0 . Вне кольца ФАПЧ может быть включен умножитель частоты $\times K$, предназначенный для повышения выходной частоты и дополнительного ослабления влияния нестабильности нагрузки на ГУН.

ФД на частоте f_0/M сравнивает приведенные фазы опорного и подстраиваемого генераторов. Если в кольце ФАПЧ установлен режим фазовой синхронизации, приведенные частоты совпадают, и тогда разность фаз колебаний на ФД, напряжение на его выходе $e_{\text{ФД}}$ и напряжение e_y на выходе ФНЧ постоянны. Коэффициент пропорциональности частот опорного генератора и ГУН представляет собой отношение целых чисел:

$$f_{\text{ГУН}} = \frac{NP}{M} f_0.$$

При различных значениях M и N частота ГУН может принимать дискретные значения с шагом $\Delta_f = f_0/M$. Для перехода на другую рабочую частоту необходимо переключить коэффициенты M и/или N . Это вызывает переходный процесс в кольце авторегулирования ФАПЧ, длительность которого τ равна 30–50 периодам частоты сравнения, $\tau \approx 30M/f_0$.

В СЧ типа, приведенного на рис.2, возникает противоречие между стремлением иметь малый шаг сетки частот Δ_f для уменьшения погрешности установки частоты и длительностью процесса ее установления τ , обратно пропорциональной шагу. Кроме того, при уменьшении Δ_f затрудняется фильтрация ближайших к несущей частоте паразитных дискретных компонент спектра.

Для разрешения этого противоречия используется более сложная схема делителя частоты в кольце – делитель с дробно-переменным коэффициентом деления (Fractional-N Divider) (рис.3). Эта схема содержит двухмодульный делитель частоты $\div N/(N+1)$, поглощающий счетчик – ПС (Swallowing Counter) и Σ - Δ -модулятор для коррекции помех дробности. Делитель $\div N/(N+1)$ делит частоту импульсов ГУН в N раз, если на его вход управления поступает логический "0", и в $N+1$ раз, если на входе управления логическая "1". Счетчик ПС выдает на выходе логическую "1", если число в его счетном регистре не превышает его объема R , т.е. $q < R$; в противном случае формируется логический "0". Выходной импульс переполнения счетчика $\div R$ сбрасывает содержание регистра ПС в нуль. Во время работы СЧ на выходе узла $\div N/(N+1)$ чередуются после-

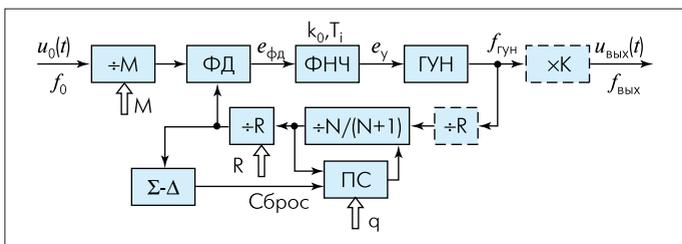


Рис.3. Структурная схема СЧ с ФАПЧ с дробно-переменным делителем частоты

довательности из q импульсов с периодом $(N+1)P/f_{\text{ГУН}}$ и $(R-q)$ импульсов с периодом $NP/f_{\text{ГУН}}$. Поэтому средняя частота $f_{\text{ГУН}}$ дробным образом связана с частотой опорного генератора:

$$f_{\text{ГУН}} = \left(N + \frac{q}{RP} \right) \frac{f_0}{M}.$$

Шаг сетки частот $\Delta_f = f_0/(MRP)$ значительно меньше, чем в схеме на рис.2, так как значение RP может составлять 2^6 – 2^{12} . При этом длительность переходного процесса в кольце ФАПЧ, как и в схеме на рис.2, определяется частотой сравнения f_0/M . Однако из-за периодического переключения коэффициента деления пре-скалера $\div N/(N+1)$ в схеме с дробным делителем частоты возникают регулярные фазовые погрешности и, соответственно, паразитные спектральные составляющие (ПСС). Для их уменьшения используют Σ - Δ -корректор, который псевдослучайным образом нарушает регулярность циклов переключения $\div N/(N+1)$.

В качестве ФД в СЧ используются импульсные схемы выборки-запоминания (СВЗ), триггерные частотно-фазовые детекторы (ЧФД) или смесители (См) гармонических колебаний с выходом по постоянному току. СВЗ хорошо подавляет спектральные компоненты частоты сравнения. ЧФД позволяет уменьшить число периодов частоты сравнения, за которые устанавливается синхронизм, и работает в широком интервале изменения частоты сравнения. Смесители вносят наименьший уровень собственных шумов и используются на самых высоких частотах, что снижает τ за счет сокращения длительности каждого периода частоты сравнения и уменьшает уровень ПСС [2]. ФД дополняется схемой поддержания заряда (Charge Pump) на КМОП-транзисторах с малыми токами управления и утечки. Эта схема эквивалентна интегратору постоянного тока и создает эффект астатизма по разности фаз на ФД, т.е. снижает установившееся значение этой разности. Кроме того, она используется для ускорения входа в синхронизм.

В цепи обратной связи между выходом ФД и входом управления ГУН включается усилитель постоянного тока, совмещенный с ФНЧ. Произведение коэффициентов передачи этого усилителя на постоянном токе k_0 , ФД и ГУН определяет наибольшую допустимую расстройку, т.е. полосу синхронизма BW_c (Loop Bandwidth), в которой удерживается фазовая синхронизация

$$BW_c = E_{\text{ФД}} k_0 S_y,$$

где $E_{\text{ФД}}$ – наибольшее напряжение, которое вырабатывает ФД, S_y – крутизна управления частотой ГУН. Значение BW_c должно превышать уходы собственной частоты ГУН в условиях эксплуатации СЧ.

Вид частотной характеристики ФНЧ $W(f)$ и параметры фильтра выбираются из соображений:

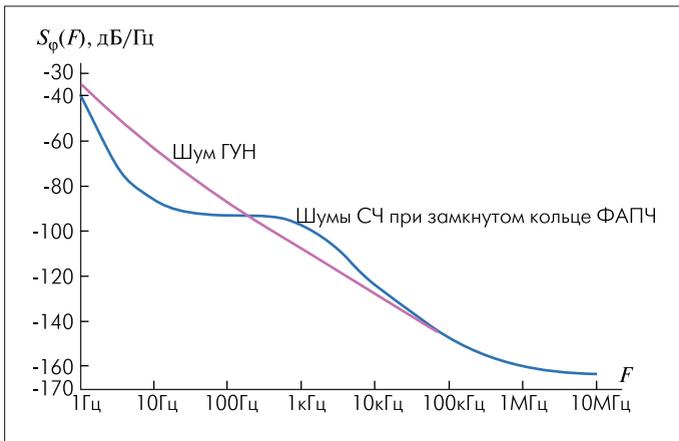


Рис.4. Типовые шумовые характеристики СЧ

- подавления нежелательных частотных компонент (помех) на выходе ФД;
- снижения длительности переходного процесса при переключении рабочей частоты;
- обеспечения устойчивости процесса автоподстройки частоты;
- уменьшения установившейся разности фаз опорного колебания и сигнала ГУН в пределах полосы синхронизма.

В качестве ФНЧ может использоваться простое RC-звено с коэффициентом передачи $W0(F)=1/(1+j2\pi FT_1)$, где T_1 – постоянная времени. Однако такой фильтр не обеспечивает хорошую одновременную фильтрацию как внутренних, так и внешних по отношению к ФАПЧ помех. Поэтому чаще применяют либо пропорционально-интегрирующий ФНЧ $W1(F)=(1+j2\pi FT_2)/(1+j2\pi FT_1)$, либо активный пропорционально-интегрирующий ФНЧ с полюсом (интегратором) на постоянном токе $W2(F)=(1+j2\pi FT_2)/(1+j2\pi FT_3)2\pi FT_1$. Фильтр $W1(F)$ позволяет улучшить фильтрацию шумов и ПСС; фильтр $W2(F)$ уменьшает остаточную разность фаз на ФД, но приближает систему ФАПЧ к порогу самовозбуждения.

Основная техническая характеристика, определяющая качество сигнала любого источника гармонических колебаний, – спектральная плотность мощности (СПМ) его фазовых нестабильностей $S_\phi(F)$, где $F = |f - f_{\text{вых}}|$ – отстройка от несущей частоты [1]. Ординаты $S_\phi(F)$ нормируют по отношению к мощности на несущей частоте в полосе 1 Гц, приводят к односторонней СПМ и выражают в [дБ/Гц]. Характеристика $S_\phi(F)$ отражает шумовые, регулярные и искажающие процессы, происходящие во всех узлах СЧ. Для ЦВС характеристика $S_\phi(F)$ определяется, главным образом, фазовыми нестабильностями опорного источника частоты f_c . Погрешности, вносимые схемой ЦВС, проявляются в увеличении ПСС из-за дискретизации процессов в ЦАП. Для СЧ с ФАПЧ наибольшее влияние на $S_\phi(F)$ оказывают фазовые нестабильности ГУН (рис.4). Снижения шумов СЧ до требуемого уровня в нужной зоне отстроек добиваются выбором полосы синхронизма BW_c и параметров ФНЧ. Некоторые производители СЧ в качестве характеристики качества сигнала приводят значение среднеквадратического дрожания фазы в градусах

$$\Delta_{\text{Фско}} = \sqrt{\int_{F_1}^{F_2} S_\phi(F) dF} / 180$$

для широкого интервала отстроек $F_2 - F_1$. Однако для каждой радиотехнической системы надо использовать конкретные значения пределов интегрирования, обычно отличающиеся от указанных в документации. Кроме того, сосредоточенные и распределенные по частоте компоненты $S_\phi(F)$ создают различные помехи в радио-

системе, поэтому нормы на шумовые и дискретные составляющие спектра различны.

Система ФАПЧ функционирует в установившемся режиме фазовой синхронизации или в режиме переключения частоты, когда происходит переходный процесс входа в синхронизм на новой частоте. При неправильном выборе параметров цепи обратной связи может наступить несинхронный режим биений за пределами полосы удержания или самовозбуждение ФАПЧ внутри полосы. Обычно в составе СЧ с ФАПЧ предусмотрены схемы индикации захвата частоты и ускоренного входа в синхронизм.

При разработке СЧ с ФАПЧ для выполнения высоких требований к качеству выходного сигнала и диапазону перестройки по частоте приходится решать непростую задачу обеспечения допустимых значений погрешности установки частоты, уровней ПСС и шума, длительности переходного процесса, остаточной фазовой ошибки. При этом значения опорной частоты, частоты сравнения, тип системы ФАПЧ, вид и параметры ФД и ФНЧ выбираются отдельно. Поэтому СЧ с ФАПЧ часто реализуется на основе нескольких узлов: ГУН, схемы приведения частоты, ЧФД, средств контроля и управления режимами, ФНЧ. Кроме того, в состав СЧ могут входить умножитель частоты, буферный усилитель мощности, энергонезависимая память параметров, модулятор выходного сигнала.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИНТЕЗАТОРОВ

Основные технические характеристики и параметры СЧ можно разделить на три группы: параметры выходного сигнала, характеристики цепей управления и питания, параметры чувствительности к внешним воздействиям.

К **параметрам выходного сигнала** относятся: **рабочий диапазон выходной частоты** $f_{\text{вых}}$; **частота** $f_{\text{оп}}$ и **мощность** $P_{\text{оп}}$ опорного сигнала; **частота сравнения** $f_{\text{ср}}$ или **тактирования** f_t ; **шаг** по частоте Δ_f ; **фазовый шум** $S_\phi(F)$; **уровень и частота ПСС** и **высших гармоник**; **длительность процесса перестройки частоты** τ . Иногда в число основных сигнальных параметров включают и среднеквадратическое **фазовое рассогласование** $\Delta\phi_{\text{уст}}$.

Из **характеристик цепей управления и питания** обычно приводятся **вид интерфейса и способ установки параметров СЧ**; **напряжение питания и ток** (мощность) **потребления**; **дополнительные функции управления** выходными колебаниями.

Чувствительность к вариациям параметров внешней среды и входных сигналов оценивается диапазоном **рабочих температур** в градусах Цельсия и **диапазоном допустимых значений напряжения питания**.

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НОМЕНКЛАТУРЫ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ

Сегодня десятки фирм выпускают множество моделей СЧ. Представительная подборка технических характеристик СЧ зарубежных производителей отражена на сайте www.radiocomp.ru [4]. СЧ нередко выполняются в виде автономных блоков, включающих в себя источники колебаний с прецизионной стабильностью частоты, органы управления и модуляции параметров, усилители мощности. Примеры таких СЧ можно найти на сайтах фирм Miteq (www.miteq.com), Giga-tronics (www.gigatronics.com), Meret Optical Communications (www.meretoptical.com) и др. Для встраивания в электронную аппаратуру более интересны технические решения в виде интегральных СЧ на одном или нескольких многослойных кристаллах, а также в виде микросборок для поверхностного монтажа.

ЦВС. В последние годы такие известные производители, как Qualcomm, Meret Optical Communications и др., не выдержав острой



Таблица 1. Прямые цифровые синтезаторы частот ЦВС

Модель, сайт производителя	Тактовая частота, МГц	Разрядность, бит				Виды модуляции	Интерфейс	Дополнительные свойства	Выход, мА	Диапазон температур, °С	Напряжение питания, В
		ЦАП	Частота	Фаза	Размах						
STEL-2375B, www.itmicrowave.com	1000	8	32	10	–	ЛЧМ, НЧМ	ПС	+	5	-55–100	-5,2; -2
AD9854, www.analog.com	300	12	2×48	2×14	12	ЛЧМ, ЧМн, ФМн	ПР/ПС	х; Кв	10	-40–85	3,3
AD9858, www.analog.com	1000	10	32	14	–	ЛЧМ	ПР/ПС	См, ФД	10	-40–85	3,3
AD9951, www.analog.com	400	14	32	14	14	ФМн	ПС	КГ; х	15	-40-105	1,8
AD9954, www.analog.com	400	14	32	14	14	НЧМ, ЧМн, ФМн	ПС, ЗУ	КГ; х; Комп.	15	-40-105	1,8

Примечание. ЛЧМ – линейная частотная модуляция; НЧМ – сканирование диапазона по нелинейному закону; ЧМн – манипуляция частоты; ФМн – манипуляция фазы; ПС – последовательный интерфейс; ПР/ПС – последовательный или параллельный интерфейс; ЗУ – встроенная память с организацией 1 Кх32 бит; КГ – внешний кварцевый резонатор; Комп. – компаратор; х – умножитель опорной частоты; Кв – квадратурные выходные сигналы sin/cos; См – смеситель; ФД – схемы приведения и ФД для ФАПЧ; + – выход поделенной тактовой частоты.

конкуренции с фирмой Analog Devices (табл. 1), уходят с рынка. Некоторые производители (например, фирма EM Research, www.emresearch.com) рекламируют СЧ с выходными частотами до 3,6 ГГц как ЦВС, но не приводят информацию о самом синтезаторе. Из приводимых характеристик $S_{\phi}(F)$ видно, что речь идет о комбинированных синтезаторах, где ЦВС – лишь один из компонентов, а сигналы повышенных выходных частот формируются системой ФАПЧ или преобразованием частоты вверх.

Для ЦВС значение тактовой частоты f_t задает высшую частоту выходного гармонического сигнала, которая в соответствии с теоремой отсчетов не превосходит половины частоты дискретизации. Низшая синтезируемая частота при этом равна шагу $\Delta_f = f_t/2^k$, где k – разрядность НКФ. Значение Δ_f для СЧ типа STEL-2375B компании ITT Microwave Systems составляет 0,23 Гц на выходной частоте 100 МГц при $f_t = 800$ МГц. Разработчики модели AD9854 использовали $k = 48$, что позволило резко уменьшить шаг по частоте по сравнению с большинством моделей, для которых $k = 32$. Повышение тактовой частоты заставляет разработчиков искать способы формирования высокостабильных опорных колебаний с частотой, равной нескольким сотням мегагерц. Так, в моделях AD9951–AD9954 введен буферный генератор с подключаемым внешним кварцевым резонатором на частоту, например, 20 МГц и программируемый множитель частоты в 4–20 раз с ФАПЧ, выходной сигнал которого используется как тактовый.

Качество выходного сигнала ЦВС определяется разрядностью ЦАП, близостью выходной частоты к половине частоты дискретизации и шумовым спектром источника тактирования. Большинство моделей имеют ЦАП достаточно высокой разрядности (10–14 бит), благодаря чему содержание высших гармоник не превышает -(15–20) дБ. В некоторых моделях (AD9854) используется два ЦАП с квадратурными выходными сигналами, каждый из которых имеет по два противофазных напряжения. При этом на любой выходной частоте формируется ансамбль из четырех сдвинутых по фазе на 90° сигналов одинаковых амплитуд, необходимый для использования в квадратурных модуляторах или демодуляторах, в однополосных преобразователях полосы частот вверх или вниз.

В ЦВС отсутствует ГУН, поэтому собственный фазовый шум синтезатора (Residual Phase Noise) незначителен. Его измеренное значение следует рассматривать как совокупность данных о выходной частоте ЦВС по сравнению с частотой тактирования, о фазовом шуме источника тактирования и шумовых свойствах анализатора фазовых нестабильностей. Для AD9858, например, приводится значение собственного шума $S_{\phi}(100 \text{ кГц}) = -152 \text{ дБ/Гц}$, измеренное при конкретных условиях: выходная частота 5 МГц и частота тактирования 300 МГц с прецизионными опорным источником и анализатором. А шумовые свойства источника тактовой частоты f_t ЦВС типа STEL-2375B можно определить из приводимой для него характеристики $S_{\phi}(F)$ (рис.5). Уровень ПСС составляет -(50–70) дБ, если ра-

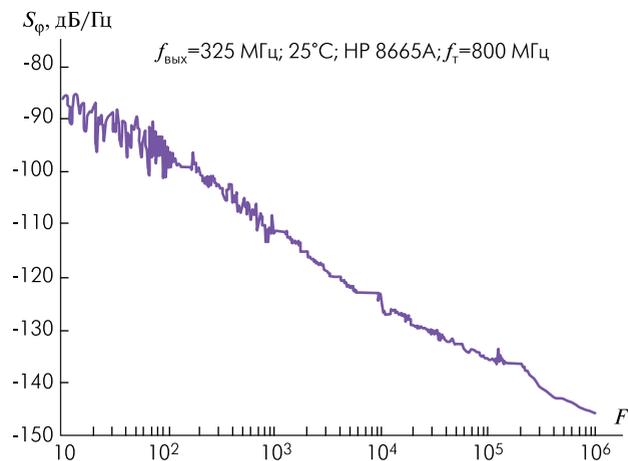


Рис.5. Зависимость СПМ фазового шума ЦВС типа STEL-2375B от частоты отстройки

бочая частота значительно ниже тактовой и возрастает до -35 дБ по мере приближения $f_{\text{вых}}$ к $f_t/2$.

Мощность выходного сигнала ЦВС определяется способностью ЦАП поддерживать ток нагрузки, задаваемый кодом отсчета. Поэтому обычно производители ее нормируют как измеряемый в миллиамперах ток на резистивной нагрузке с сопротивлением ~4 кОм.

Возможности перестройки выходного сигнала ЦВС по частоте уникальны. Частота задается фиксированным кодом частоты K_f или автоматически перестраивается по линейному во времени закону ЛЧМ в весьма широких пределах с сохранением формы выходного колебания. В ЦВС типа AD9954 предусмотрена возможность запоминания нескольких частотных профилей для нелинейного закона качания (сканирования) частоты, а в AD9854 – режимы формирования сигналов с манипуляцией частоты или фазы при стабильной не-

Таблица 2. Интегральные ФАПЧ для синтезаторов стабильных частот

Модель, сайт производителя	Особенности	Входные частоты, МГц		Наибольшая $f_{оп}$, МГц	Входные мощности, дБмВт		$P_{оп}$, дБмВт	$f_{ср}$, макс., МГц	Диапазон температур, °С	Напряжение питания, В
		f_{RF}	f_{IF}		P_{RF}	P_{IF}				
PE3293, www.peregrine-semi.com	Дв, Д, ПС	300–1800	45–550	50	-7+5	-10-0	0,5 В	10	-40–85	3
CX74038, www.skyworksinc.com	С, Дв, БЗ, Д	100–2600	1–800	50	-15-0	-5-0	-30	15	-40+100	3
LMX2326, www.national.com	Ц, ПМ, ДМ	0,1–2800	–	40	-10-0	–	-60	10	-40–85	3
PE3336, www.peregrine-semi.com	ПР/ПС, Ц, ДМ	50–3000	–	100	-5+5	–	-2-10	20	-40–85	3
ADF4213, www.analog.com	Дв, ДМ	200–3000	60–1000	115	-10-0	-10-0	-5-0	55	-40–85	5
PE3342, www.peregrine-semi.com	Ц, ЭНП,	300–3000	50–270	100	-5+5	0+5	-5-5	20	-40–85	3
LMX2434, www.national.com	Дв	1000–5000	500–2500	256	-15-0	-15-0	-5-0	10	-40–85	3
ADF4106, www.analog.com	С, ПС, БЗ	500–6000	–	250	-15-0	–	-5-0	55	-40–85	3
CX72302, www.skyworksinc.com	Дв, Кв, ЛЧМ, ПС, АМ, РПС	400–6100	100–1000	50	0+2	0+5	–	25	-40–85	3

Примечание. Ц – целочисленный; Д – дробный; ДМ – двухмодульный делитель; Дв – две схемы ФАПЧ; БЗ – быстрый захват частоты; ПМ – прямая модуляция частоты; ПР/ПС – параллельный или последовательный интерфейс; Кв – опорный генератор с внешним кварцевым резонатором; ЛЧМ – качание частоты; АМ – модуляция амплитуды; РПС – регулятор полосы синхронизма; ЭНП – энергонезависимая память.

сущей частоте. Для этой цели в микросхему AD9854 включены два 48-разрядных переключаемых регистра установки дискретов частоты и два 14-разрядных регистра установки фазы. Продолжительность перехода на новую частоту в ЦВС определяется только временем пересылки нового кода частоты.

В AD9852 и AD9854 для деления кода отсчета на функцию $(\sin x)/x$ используется цифровой аппаратный перемножитель кодов выходных отсчетов на 12-разрядный код амплитуды. Это обеспечивает постоянство амплитуды выходного сигнала в диапазоне частот. Кроме того, перемножитель позволяет модулировать амплитуду изменением кода. Благодаря возможности ввода $K_{ф, мод}$ при переключении частоты можно цифровым способом формировать сигналы с непрерывной фазой (QAM, MSK).

Микросхемы ФАПЧ, предназначенные для СЧ (табл.2).

В состав СЧ входит микросхема ФАПЧ с программируемыми делителями частоты, фазовым детектором и цепями управления, работающая совместно с внешними опорным генератором и ГУН. Такое решение обеспечивает большую гибкость при выборе параметров, особенно при широком диапазоне перестройки по частоте. В большинстве моделей предусмотрены два выхода управляющего напряжения: один для положительной, другой – для отрицательной крутизны управления частотой, что дает дополнительную свободу при выборе модели ГУН. Собственные шумовые свойства микросхем ФАПЧ проявляются как шумы ФД, делителей частоты и схемы управления. Сведения о собственных шумах $S_{\phi}(f)$ для схем ФАПЧ практически не приводятся, а приводимые некоторыми производителями характеристики $S_{\phi}(f)$ синтезатора с микросхемой ФАПЧ надо оценивать совместно с шумовыми параметрами ГУН, ФНЧ, источника опорного сигнала и использованного анализатора.

В большинстве микросхем ФАПЧ формируется выходной сигнал индикации захвата частоты (Lock Detect), предусмотрены средства перехода в "спящий" режим. Схема быстрого захвата частоты (Fast Lock) ускоряет восстановление захвата при срыве синхронизации. Эта схема способствует увеличению тока ФД в процессе перехода на другую частоту, что сокращает время установления. В ФАПЧ с целочисленными коэффициентами деления для уменьшения погрешности установки желаемой частоты при фиксированной частоте опорного сигнала иногда в кольце используется двухмодульный делитель частоты (прескалер) (модели PE83341, PE3238 фирмы Peregrine Semiconductor). Фирма выпускает ряд новых моделей для гражданских применений (PE3341, PE3342), модели для бортовой аппаратуры (PE9601, PE9704, PE9722), а также их аналоги для военных и спутниковых приложений (PE83341, PE83363, PE83336) с высокими показателями по устойчивости к внешним воздействиям.

При создании СЧ с ФАПЧ, работающего в диапазоне десятков гигагерц, используют предварительные делители частоты с фиксированным коэффициентом деления $\div P$ в кольце ФАПЧ [2] или широкополосные малозащумляющие умножители частоты $\times K$ вне кольца ФАПЧ (см. рис.2, 3). Выбор конкретной схемы производится на основе сопоставления итоговых шумовых характеристик $S_{\phi}(f)$ с учетом шумов ГУН и/или умножителя/делителя частоты, приведенных к выходной частоте.

Особенность СЧ с ФАПЧ модели PE3342 – наличие встроенной программируемой по последовательному интерфейсу энергонезависимой памяти EEPROM, модели PE3293 – малое энергопотребление: 3 В \times 4 мА. В CX72302 программируются параметры ФНЧ и коэффициент передачи ФД, что позволяет оперативно изменять полосу синхронизации. Поскольку частота сравнения, определяющая

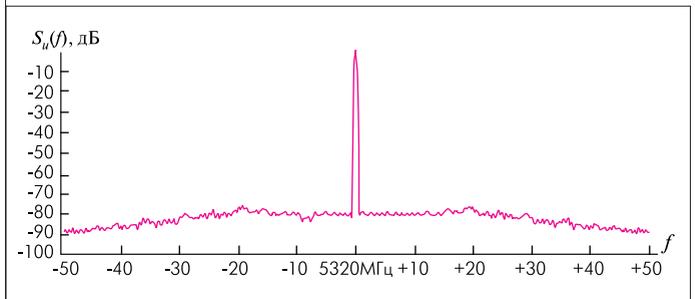


Рис.6. Спектр мощности сигнала СЧ на PSA5300A в сантиметровом диапазоне длин волн

продолжительность перестройки на другую частоту τ , изменяется в зависимости от коэффициента деления частоты опорного источника $\div M$, СЧ с ФАПЧ трудно нормировать по этому параметру. Обычно производители, разрабатывающие СЧ с малым временем перестройки, приводят соотношение $\tau = 10/BW_c$, связывающее время установления с полосой синхронизма BW_c . В модели CX74038 фирмы Skyworks Solutions за счет оптимального выбора схемы подкачки достигнут малый уровень среднеквадратической фазовой погрешности ($\Delta\phi_{уст} = 5^\circ$).

Среди ФАПЧ с дробным коэффициентом деления микросхема CX72302 отличается прецизионно малым шагом установки средней частоты ($\Delta_f = 0,01$ Гц) при выходной частоте около 6 ГГц.

Для фирм-производителей СЧ с дробным делителем особой проблемой является снижение помех дробности. Дело в том, что из расчетных выходных характеристик собственного шума $S_{\phi}(f)$ таких СЧ фоновый уровень не превышает -200 дБ/Гц при отстройках в несколько мегагерц, но дискретные компоненты достигают

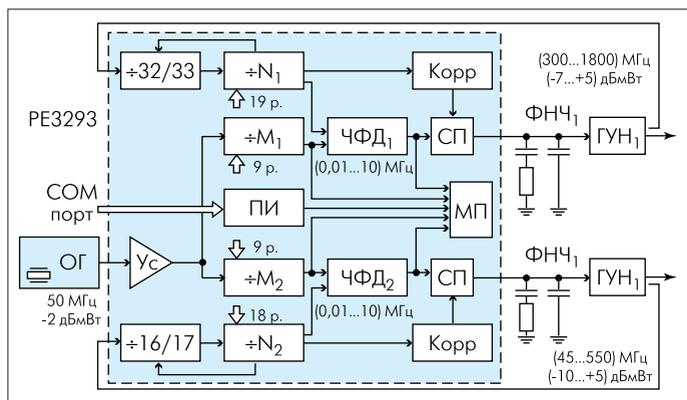


Рис.7. Структурная схема СЧ типа PE3293

-(50–70) дБ. Многие производители применяют патентуемые технические решения, направленные на существенное увеличение периода регулярности переключения двухмодульного делителя частоты (стохастизация переключений), в результате чего энергия дискретных компонент распределяется по широкой полосе отстроек. В моделях PE83363 и SX74038 благодаря применению Δ - Σ -модулятора третьего порядка уровень ПСС не превышает -60 дБ при отстройках более 100 кГц. Возможно и построение СЧ с дробным коэффициентом деления, в которых отсутствуют ПСС. Пример – СЧ модели PSA5300A фирмы Z-Communications, спектр мощности выходного сигнала которого в широкой полосе отстроек показывает отсутствие ПСС (рис.6), хотя уровень общего фона шума составляет -80 дБ/Гц.

Ряд производителей выпускают СЧ, содержащие элементы одной или двух систем ФАПЧ и дополнительно ФАПЧ на промежуточной частоте. Применение единого опорного колебания в нескольких СЧ обеспечивает когерентную обработку сигналов цифровой радиосвязи. Так, в СЧ на базе PE3293 (рис.7) из опорного колебания с частотой 50 МГц синтезируются когерентные сигналы стабильных частот $f_{RF} = 300\text{--}1800$ МГц и $f_{IF} = 45\text{--}550$ МГц. Помимо микросхемы PE3293 (рис.7, обведенный пунктиром прямоугольник), в СЧ входят два

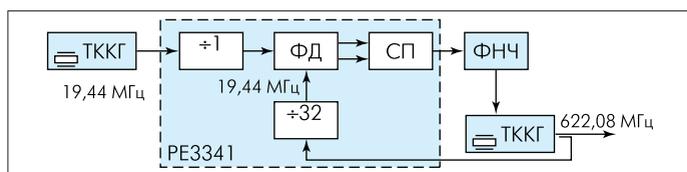


Рис.8. Вторичный источник эталонного опорного колебания на основе микросхемы PE3341

внешних ГУН и два ФНЧ. Встроенный регистр последовательного интерфейса (ПИ) хранит значения установленных параметров. Число дискретных значений средней частоты по каждому из выходов достигает $4,7 \cdot 10^6$. Ошибки дробности в кольцах ФАПЧ компенсируются с помощью узлов Корр, изменяющих параметры схем подкачки (СП). Мультиплексор (МП) формирует контрольный сигнал синхронной работы КС.

Интерес представляет сдвоенный синтезатор-модулятор со встроенным опорным кварцевым генератором модели SX72300 фирмы Skyworks Solutions. Вводом 12-разрядного управляющего слова в нем можно установить режим фиксированной частоты с 262144 дискретными значениями или режимы бинарной, многоуровневой, квадратурной манипуляции частоты, включая модуляцию МЧМ (MSK, GMSK) с минимальным фазовым сдвигом.

Обращает на себя внимание и решение задачи формирования с помощью ФАПЧ вторичного опорного источника фиксированной частоты с предельно малым уровнем фазового шума (рис.8).

Для этого с помощью PE3341 на частоте $f_{\text{вых}} = 622,08$ МГц по опорным колебаниям прецизионного термокомпенсированного кварцевого генератора фиксированной частоты (ТККГ) типа OSC-3BO-19.44 с частотой $f_0 = 19,44$ МГц организуется ФАПЧ управляемого по частоте кварцевого генератора (УКГ) типа OR4005B фирмы RF Monolithics. В такой схеме в полосе отстроек от $F1 = 100$ Гц до $F2 = 80$ МГц суммарная фазовая погрешность $\Delta\varphi_{\text{око}} = 0,023^\circ$, что на 5–10 дБ меньше, чем для других опорных источников этого диапазона.

Весьма перспективны комбинированные синтезаторы, использующие ЦВС в составе ФАПЧ. Так, AD9858 (см. табл.1) кроме ЦВС имеет дополнительные автономные ЧФД на частоту до 150 МГц со схемой подкачки, два программируемых делителя частоты и аналоговый смеситель. При работе с AD9858 ЦВС можно включить в состав СЧ с ФАПЧ в качестве делителя частоты опорного сигнала. При этом средняя частота и параметры модуляции устанавливаются с высокой точностью и с мелким шагом в диапазоне частот ГУН. Узел ЦВС может выполнять также функции дробного делителя частоты в кольце ФАПЧ и дополнительно расширить возможности СЧ с ФАПЧ с дробно-переменным делителем частоты (см. рис.3). Серию комбинированных ЦВС и ФАПЧ типа VDS-6600 предлагает фирма Meret Optical Communications. Фактически комбинированными являются и синтезаторы фирмы EM Research.

Интегральные синтезаторы частот с ФАПЧ со схемами приведения частот, ФД, ФНЧ и ГУН в одной микросборке или на одном кристалле (табл.3). Применение однокристалльного СЧ с ФАПЧ заметно упрощает монтажную схему и настройку ФАПЧ. Так, двухдиапазонный СЧ на основе сдвоенного интегрального синтезатора типа LMX2525 (рис.9) требует минимального числа вспомогательных

Таблица 3. Интегральные синтезаторы частот с ФАПЧ

Модель, сайт производителя	Тип	$f_{\text{вых}}$ МГц	Шаг Δf , Гц	$P_{\text{вых}}$ дБмВт	$f_{\text{ос}}$ МГц	$P_{\text{оп}}$ дБмВт	$f_{\text{ФД макс}}$ МГц	ПСС, дБ	$S_{\text{Ф}}$ (100 кГц) на $f_{\text{вых ср}}$ дБ/Гц	Гармоники, дБ		Диапазон температур, °С	Питание	
										2	3		E_0 , В	I_0 , мА
SLMS-700-01, www.emresearch.com	О, ПС, Кв	350–700	$5 \cdot 10^3$	+7	2–125	-5–0	–	-55	-105	-12	–	-40–85	12	75
LMX2525, www.national.com	Д, Дв	1270–1394 633–768	$20 \cdot 10^3$	-6–0	12; 14; 26	0,5 В	0,025	-45	-105	-25	-20	-30–85	2,8	10
Si4133W, www.silabs.com	Тр	2300–2500 750–1650 62,5–1000	–	-12–1 -8–1 -7–1	2–20	0,5 В	0,25	-60	-115	-28	–	-25–70	3,3	15
MTS2000-DS, www.sunergymwave.com	Ц, О, БЗ	1000–2000	1	+3	10	10	10	-65	-110	-15	–	-20–70	5; 20	–
PLL401-2650, www.sirenza.com	Ц	2600–2800	$1 \cdot 10^6$	-6–0	10	0,5 В	10	-70	-105	-12	-15	-35–85	3	18
HFS-5040-01, www.emresearch.com	Р, У, ПС	5040	–	+7	2–125	-5–0	15	-60	-115	-15	–	-30–70	5	150
PSA5300A, www.zcomm.com	ПМ, БЗ	5220–5420	$1 \cdot 10^6$	$1,5 \pm 2,5$	5–100	0,5 В	–	-70	-98	–	–	-40–85	5	38
PLL801-5840, www.sirenza.com	Ц	5800–5880	$2 \cdot 10^5$	-6–0	10	0,5 В	10	-70	-105	-12	-30	-35–85	3	35
PLYIG-12600-01, www.emresearch.com	ЖИГ, У, ПС	11800–12600	$1 \cdot 10^6$	+13	10–125	-5–0	25	-60	-115	-25	–	-30–70	15	370

Примечание. Ц – целочисленный; Д – дробный; Дв – два СЧ; Тр – три СЧ; БЗ – быстрый захват частоты; ПМ – прямая частотная модуляция; Р – встроенный резонатор для снижения шума; ЖИГ – перестройка частоты ферритовым резонатором; О – октавный диапазон перестройки; Кв – опорный генератор с внешним кварцевым резонатором; У – буферный усилитель; ПС – последовательный интерфейс.

и блокировочных элементов поверхностного монтажа. При необходимости изменения средней частоты одного из двух встроенных ГУН подключается внешняя индуктивность L . В этом СЧ за счет программирования режима 800 или 1500 МГц для двух ГУН используются один дробный делитель частоты в кольце, один ФД и один ФНЧ. Быстродействие по фронтам входных сигналов ввода параметров DATA по последовательному интерфейсу (установка режима SE, начало записи LE, тактирование ввода CLK), предназначенных для записи 24-бит управляющего слова во внутренний регистр, составляет 50 нс. Выходной сигнал LD позволяет контролировать наличие синхронизма по двум ВЧ-выходам. В режиме ускоренного переключения шаг по частоте Δf составляет 20 кГц, а время перестройки τ не превышает 300 мкс. За счет применения 10-разрядной запатентованной схемы Δ - Σ -модулятора уровень помех дробности ПСС при отстройке 25 кГц снижен до -45 дБ, в зоне отстроек 25–100 кГц – до -60 дБ, а при отстройках более 100 кГц не превышает -75 дБ. Благодаря выбору параметров схемы подкачки фазовая погрешность $\Delta\phi_{\text{ско}}$ в полосе 1 кГц–10 МГц составляет 1,3°.

Для улучшения шумовых характеристик в однокристалльные СЧ ФАПЧ серии HFS фирмы EM Research встроены дополнительные резонаторы, что позволило в модели HFS-5040-01 на частоте 5 ГГц получить $S_{\text{Ф}}$ (10 кГц) = -95 дБ/Гц. Из-за встроенных резонаторов полоса перестройки таких СЧ узкая, а у HFS-5040 выходная частота даже фиксирована.

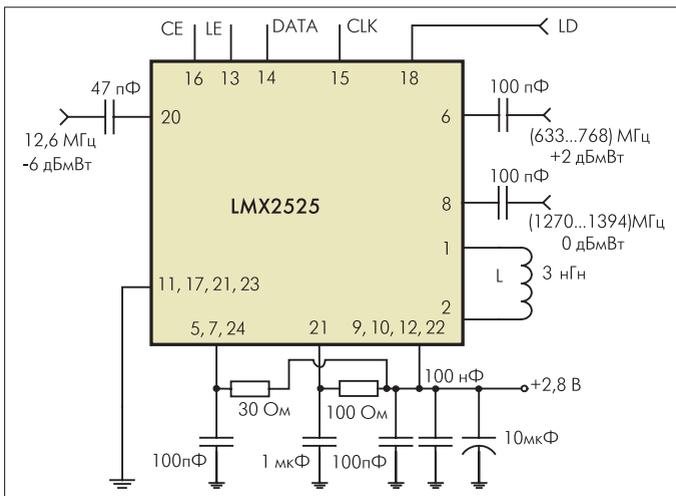


Рис.9. Принципиальная схема двоясного интегрального синтезатора на основе микросхемы LMX2525

Полоса перестройки СЧ серии SLMS этой же фирмы может достигать октавы, поэтому в них встроен автоматический регулятор усиления по цепи обратной связи ФАПЧ. Кроме того, в этих СЧ предусмотрена возможность работы с внешним кварцевым резонатором на опорную частоту. В серии PLYIG сантиметрового диапазона фирмы EM Research используется встроенный ГУН с перестройкой частоты в пределах до 1 ГГц объемным резонатором на железо-иттриевом гранате (ЖИГ). Серия MСХ имеет повышенную радиационную стойкость.

Для защиты от нестабильности нагрузки и одновременного повышения выходной мощности в СЧ модели HFS-5040-01 фирмы EM Research используется буферный усилитель сигнала ГУН. Такой же эффект с дополнительным повышением рабочей частоты достигается при использовании умножителя частоты вне кольца ФАПЧ.

Синтезатор MTS2000-DS отличается малым шагом установки частоты 1 Гц при октавном диапазоне 1–2 ГГц. Это ограничивает скорость перестройки с одной частоты на другую, и τ не превышает 2 мс.

В Si4133W фирмы Silicon Laboratories организовано три кольца ФАПЧ со встроенными ГУН и ФНЧ. Два ВЧ-сигнала с частотами $f_{\text{RF1}} = 2,3\text{--}2,5$ ГГц и $f_{\text{RF2}} = 0,75\text{--}1,65$ ГГц могут программно подключаться на первый выход, а на второй выход постоянно подключен сигнал с частотой $f_{\text{F}} = 62,5\text{--}1000$ МГц. Среднюю частоту сигнала RF2 можно корректировать присоединением внешней индуктивности. Шаг по частоте в 10^5 раз меньше, чем частота сравнения, которая может изменяться в широких пределах. Однако длительность переходного процесса по частоте не превышает 200 мкс. Подавление высших гармоник синтезатора не хуже -28 дБ, а ближайших ПСС при отстройке 150 кГц – не хуже -60 дБ. Интегральная фазовая ошибка в полосе 100 Гц-1 МГц составляет 1,7° для ВЧ-выходов и 0,7° для выхода на ПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

- Белов Л. Компоненты синтезаторов стабильной частоты. Генераторы, управляемые напряжением. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, № 1, с. 42-46.
- Белов Л. Радиочастотные компоненты. Смесители частот. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, № 2, с. 44.
- Белов Л.А. Синтезаторы частот и сигналов. –М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. – 80 с.
- РАДИОКОМП – радиокomпоненты мировых производителей. <http://www.radiocomp.ru>