

ЦИФРОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ – ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ СИНТЕЗА ЧАСТОТ И СИГНАЛОВ

В.Кочемасов, к.т.н., А.Голубков, Н.Егоров, к.т.н., А.Черкашин, к.т.н., А.Чугуй
inbox@radiocomp.ru

Цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС) сегодня широко используются в различных системах синтеза частот и сигналов. Принцип работы, характеристики и варианты реализации ЦВС подробно рассматривались в предыдущих публикациях в журнале "Электроника: НТБ" [1, 2]. ЦВС могут применяться как самостоятельно, так и в сочетании с модулями на основе других методов формирования заданной частоты сигнала. О технических решениях в области создания гибридных синтезаторов частот и средств формирования сигналов с использованием ЦВС рассказывается в статье.

На этапе зарождения радиоэлектроники задача формирования колебаний требуемой частоты решалась с помощью сменных кварцев в задающем генераторе, а затем посредством переключения частот нескольких кварцевых генераторов. Позже появились прямые аналоговые синтезаторы (ПАС), в которых сетка частот складывалась из колебаний кварцевого генератора посредством многократного

умножения, деления, преобразования и фильтрации исходного опорного колебания. Системы синтеза частот на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) позволили строить синтезаторы с эквидистантной сеткой частот в широком диапазоне с привязкой к частоте опорного генератора, которая определяет шаг сетки частот. Время переключения в таких синтезаторах обратно пропорционально шагу частоты.

Таблица 1. Микросхемы ЦВС

Модель	Фирма	Тактовая частота, МГц	Разрядность ЦАП, бит	Разрядность накопителя кода фазы, бит	Количество каналов	Потребляемая мощность, Вт	Корпус
AD9954	Analog Devices	400	14	32	1	0,2	TQFP-48
1508ПЛ8Т	НПЦ "Элвис"	1000	10	48	2	1	TQFP-100
AD9858	Analog Devices	1000	10	32	1	<2,5	TQFP-100
DS856	Euvis	3000	11	32	1	3,3	QFN-64
AD9914	Analog Devices	3500	12	32	1	<3	LFCSP-88

Последними стали применяться цифровые вычислительные синтезаторы [3], в которых колебания синтезируются посредством арифметических операций по вычислению кода фазы и соответствующих им значений отсчетов синусоидальной или косинусоидальной функций с последующим преобразованием в аналоговый вид [1]. Рабочая полоса в таких синтезаторах определяется частотой тактирования цифровых блоков синтезатора, а шаг частоты зависит от разрядности цифрового накопителя и может быть сколь угодно малым.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И МОДУЛИ ЦВС

На разных этапах развития ЦВС реализовывались на дискретных схемах и на ПЛИС. В последнее время используются преимущественно специализированные интегральные ЦВС, выполненные, прежде всего, по технологии КМОП [1].

Максимальная достижимая частота ЦВС определяется частотой тактирования цифрового накопителя и функционального преобразователя "код фазы - код $\sin(\cos)$ ". Для увеличения частоты, как в зарубежных, так и в отечественных интегральных схемах (ИС), применяют параллельную структуру [4]. Число каналов может быть равно 2, 4, 8, 16 и др. С использованием этого схемотехнического решения удалось создать значительное количество ИС ЦВС с высокими тактовыми частотами, в том числе российскую ИС 1508ПЛ8Т [5] (табл.1). На базе ИС ЦВС реализовано немало

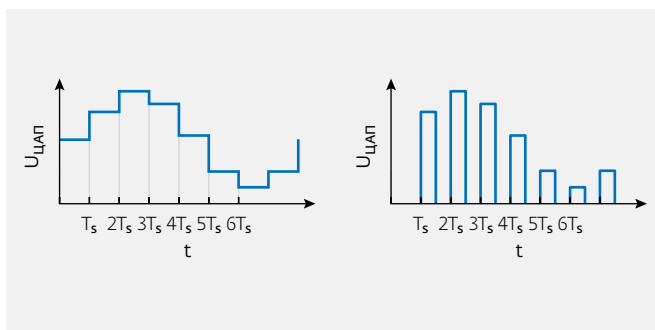


Рис.1. Временные диаграммы работы ЦАП: без возврата (а) и с возвратом к нулевому значению напряжения (б). $T_s = 1/f_T$, где f_T – тактовая частота ЦАП

функционально законченных изделий: отладочных плат, измерительных приборов и модулей (табл.2). Появление на рынке микросхемы AD9914 с тактовой частотой 3,5 ГГц означает, что в ближайшее время можно ожидать выпуска модулей с максимальной частотой около 1 ГГц.

В большинстве ЦВС применяют цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), в которых по мере изменения входного кода изменяется напряжение на выходе в течение периода действия кода (Non Return to Zero, NRZ) (рис.1а). В ЦВС компании Euvis используются ЦАП, в которых напряжение сбрасывается к нулю в каждом такте установки выходного кода (Return to Zero, RZ) (рис.1б). В силу разных временных диаграмм работы ЦАП типа NRZ и RZ

Таблица 2. Отладочные платы и модули

Фирма	Модель	Тип устройства	Выходная частота, МГц	Разрешение по частоте, Гц	Размеры, мм, особенности
Chase Scientific Company	CG400-PCI	Синтезатор частот и тактовый генератор	1–400	0,23	Модуль PCI
Furaha	Synth-300-TRIG	2-канальный модуль, синусоидальный или тактовый сигнал	0,3–300	0,23	Модуль PCI
Praxsym	310-010104-001	Модуль ЦВС, время переключения 800 нс	$1 \cdot 10^{-3}$ –120	0,0698	152,4×149,9×13,4 модуль в корпусе
TRAK Microwave	9021	4-канальный модуль ЦВС, индивидуально программируемые каналы	$1 \cdot 10^{-6}$ –50	1	Бескорпусный модуль, TTL или дифференциальные выходы
Радиокомп		Отладочная плата на основе ЦВС 1508ПЛ8Т	0,5–300	$2,6 \cdot 10^{-6}$	112 × 57 × 21

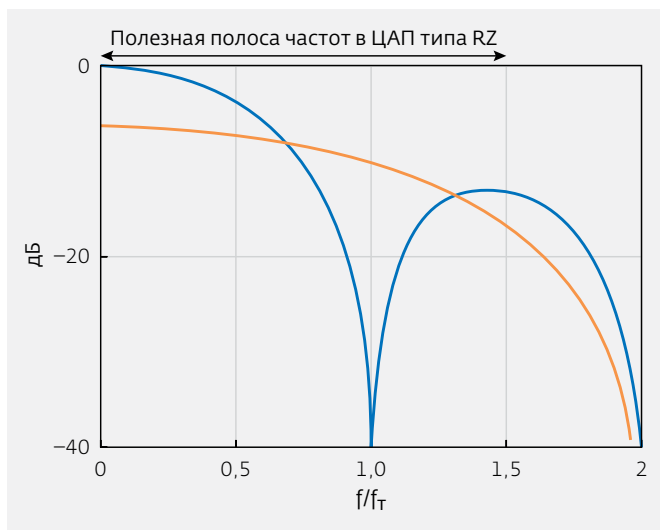


Рис.2. Огибающая спектра выходного сигнала ЦАП NRZ (синяя линия) и ЦАП RZ (оранжевая линия)

различается спектр их выходных сигналов (рис.2). Так, у ЦАП NRZ рабочая область выходных частот ограничивается первой зоной Найквиста ($0,5f_T$, где f_T – тактовая частота ЦАП). ЦАП типа RZ возможно использовать в трех зонах Найквиста, что позволяет формировать более высокочастотные сигналы не повышая частоту тактирования.

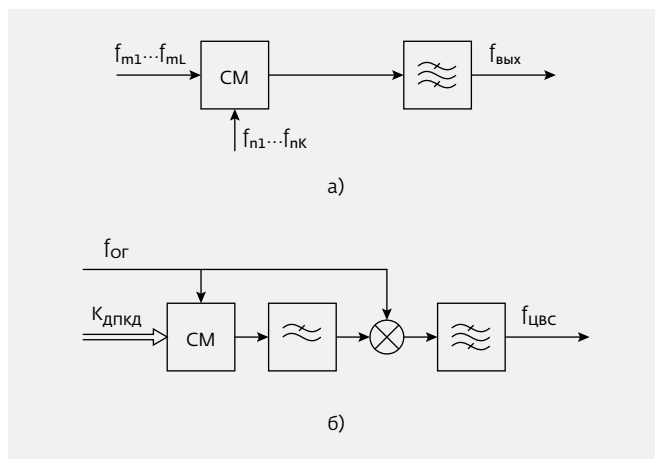


Рис.3. Ячейки преобразования частоты аналогового синтезатора частот: классическая (а), с использованием делителя с переменным коэффициентом деления (б). CM – смеситель

СИСТЕМЫ, СОЧЕТАЮЩИЕ АНАЛОГОВЫЙ И ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗ

Комбинированные системы, в которых используются одновременно методы прямого аналогового и прямого цифрового синтеза обладают рядом преимуществ. В частности, в одном техническом решении могут быть реализованы главные достоинства

Таблица 3. Гибридные синтезаторы с использованием методов прямого аналогового и цифрового синтеза

Фирма	Модель	Выходная частота, ГГц	Разрешение по частоте, Гц	Время переключения, мкс	Паразитные составляющие, дБн
Hunter	SMS-DA	1,25–18	1	0,35	-50
Elcom Technologies	Серия UFS	0,3–18 (опционально до 40)	1	0,25	-65
Spinnaker Microwave	SMS-DA	0,25–4	0,1	<0,3	-70
ITT Microwave Systems	WaveCor 20.0 Synthesizer	0,3–20	1	<0,2	-65
Kratos Electronic Products/ CTI Division	Серия DS	0,01–41	1	0,1	<-60
Holzworth instrumentation	HSM18001A	0,01–18	0,01	6	-70
Noise XT	LNS-18	4–18			<-80
Elisra Microwave Division	MW-15132HS-2-18-1HZ-00	2–18	1	<0,2	-70

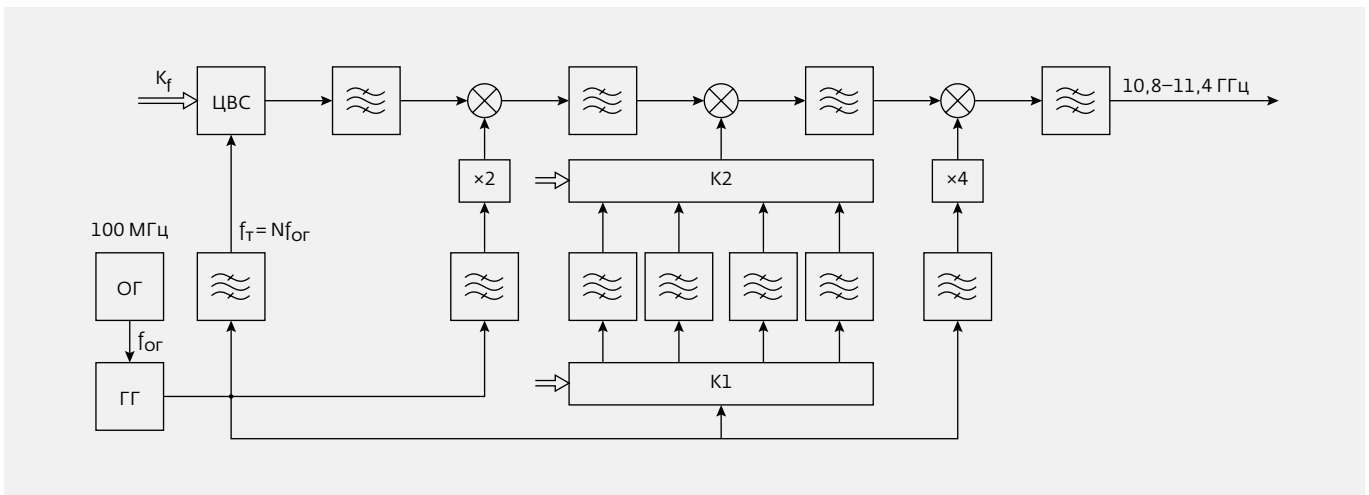


Рис.4. Структурная схема синтезатора частот, использующего цифровые и аналоговые методы прямого синтеза. ОГ – опорный генератор, ГГ – генератор гармоник, К1 и К2 – коммутаторы, N – номер гармоники

каждого метода – широкая полоса перестройки, низкий уровень шума и паразитных спектральных составляющих выходного сигнала, свойственные методам прямого аналогового синтеза, в сочетании с малым шагом перестройки и разнообразием видов модуляции, обеспечиваемыми методами прямого цифрового синтеза. В таком решении сохраняется также важное преимущество обоих методов – высокие скоростные характеристики. Синтезаторы этого вида отличаются повышенной надежностью и стойкостью к вибрациям.

Актуальной задачей является преодоление недостатков, свойственных каждому методу синтеза. Для синтезаторов прямого аналогового синтеза это громоздкость и большая стоимость технических решений, для синтезаторов прямого цифрового синтеза – достаточно высокий уровень паразитных спектральных составляющих, обусловленный методами формирования выходного сигнала.

Прямой аналоговый синтезатор включает в себя ряд ячеек преобразования частоты (ЯПЧ). Каждая из них (рис.3а) представляет собой смеситель, на один из входов которого подается первая группа опорных частот ($f_{m1}...f_{mL}$), а на другой вход – вторая группа ($f_{n1}...f_{nK}$). Выход смесителя нагружен на полосовой фильтр. Последовательное включение таких ячеек позволяет обеспечить большую полосу перестройки и уменьшить шаг сетки частот. При этом выход предыдущей ячейки соединяется с одним из входов смесителя следующей ячейки. Чем выше требования к спектральной чистоте выходного сигнала, тем более жесткие требования предъявляются к фильтрации на выходе каждой ячейки преобразования частоты.

Наряду с классической ЯПЧ широко применяются ячейки с использованием делителя с переменным коэффициентом деления (ДПКД) (рис.3,б). В этом случае сигнал опорного генератора $f_{ог}$ подается на

Таблица 4. Синтезаторы на основе ЦВС и систем ФАПЧ

Фирма	Модель	Выходная частота, ГГц	Разрешение по частоте, Гц	Размеры, мм, особенности
Digital Signal Technology	DPL-3.2GXF	0,005–3,2	0,001	100×35×100
National Instruments	FSW-0010, FSW-0020	0,1–10 0,2–20	0,001	127×178×25,4
National Instruments	FSL-0010, FSL-0020	0,65–10 0,65–20	0,001	102×102×20
Signal Core	SC800 Nano Synth	0,025–6	1	50,8×25,4
	SC5511A	0,1–20	1	146×95×19

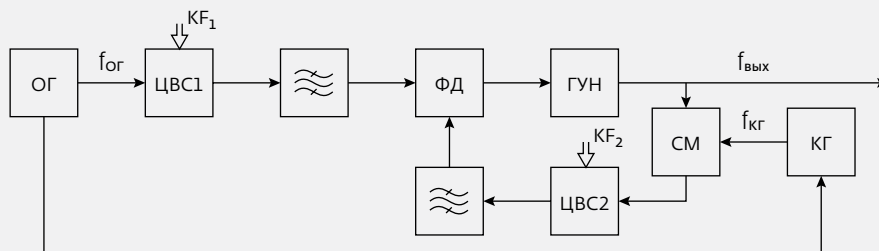


Рис.5. Обобщенная структура совместного использования ЦВС и ФАПЧ. ФД – фазовый детектор, ГУН – генератор, управляемый напряжением, КГ – кварцевый генератор

один из входов смесителя и вход ДПКД. Выходной сигнал ДПКД через фильтр нижних частот поступает на второй вход смесителя. Из выходного сигнала смесителя с помощью полосового фильтра выделяются верхняя или нижняя боковые полосы. При изменении коэффициента деления ДПКД изменяется выходная частота.

Недостаток такой схемы – формирование неэквидистантной сетки частот. Однако при последовательном включении достаточно большого количества ячеек преобразования частоты можно получить сетку частот, близкую к равномерной. Кроме того, схема с ДПКД обеспечивает значительно меньший уровень негармонических составляющих в спектре выходного сигнала синтезатора.

Синтезаторы частот, построенные с использованием методов прямого аналогового и цифрового синтеза, дают возможность снизить необходимое количество ЯПЧ, а в случае их реализации на основе ДПКД – устранить недостаток, связанный с неэквидистантностью шага сетки частот.

Одна из возможных моделей синтезатора на основе методов прямого аналогового и цифрового синтеза (рис.4) работает следующим образом. Генератор гармоник формирует

последовательность гармоник частоты опорного генератора. Выходной сигнал генератора гармоник, прошедший через полосовые фильтры, используется для тактирования ЦВС. Кроме того, его частота умножается на два и на четыре и подается на смесители. Этот сигнал также через коммутатор К1 поступает в банк полосовых фильтров, выделяющих требуемую гармонику. Коммутатор К2 подключает выход соответствующего фильтра к смесителю. Сигналы перемножаются в смесителях, и на их выходах выделяется требуемая боковая полоса сигнала. В результате на выходе синтезатора формируется сигнал в СВЧ-диапазоне с разрешением, определяемым шагом сетки ЦВС. Время переключения частот, которое зависит от быстродействия ЦВС, может составлять доли микросекунд.

Комбинация прямого аналогового и цифрового синтезаторов в одном устройстве оптимизирует аппаратные затраты, так как позволяет получить сколь угодно малый шаг сетки частот при меньшем количестве ячеек преобразования частоты. При этом задача формирования мелкого шага сетки решается с помощью ЦВС, а необходимые полосы и спектральные характеристики обеспечиваются

Таблица 5. Характеристики многоканальных синтезаторов частот

Фирма	Модель	Выходная частота, ГГц	Разрешение по частоте, Гц	Размеры, мм, особенности
Signal Core	SC5511A (ЦВС+ФАПЧ)	0,1–20	1	146 × 95 × 19
Holzworth	Серия HS-9000 (ЦВС+ПАС)	0,25 кГц – 20 ГГц (несколько диапазонов)	0,001	430 × 380 × 45
ООО "Радиокомп"	ДСЧ-РК (ЦВС+ФАПЧ)	0,125–6	100	120 × 80 × 32 (один канал)



Рис.6. Синтезатор NanoSynth фирмы Signal Core



Рис.7. Синтезатор SC5511A фирмы Signal Core

за счет применения узлов прямого аналогового синтеза.

Системы, реализующие методы прямого аналогового и прямого цифрового синтеза выпускают ряд производителей (табл.3). Подобные устройства широко применяются в РЛС, системах определения "свой-чужой", военных системах передачи данных.

СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ФАПЧ И ЦВС

Для традиционных синтезаторов частоты на основе систем ФАПЧ характерно непреодолимое противоречие между шагом перестройки частоты и скоростью переключения частот. Разрешить его можно в синтезаторах на основе комбинации ФАПЧ и ЦВС (рис.5, 6, табл.4).

Для схемы рис.5 выходная частота определяется формулой:

$$f_{\text{ВЫХ}} = (K_{F1}/K_{F2})(2^{N2}/2^{N1})f_{\text{ОГ}} + f_{\text{КГ}},$$

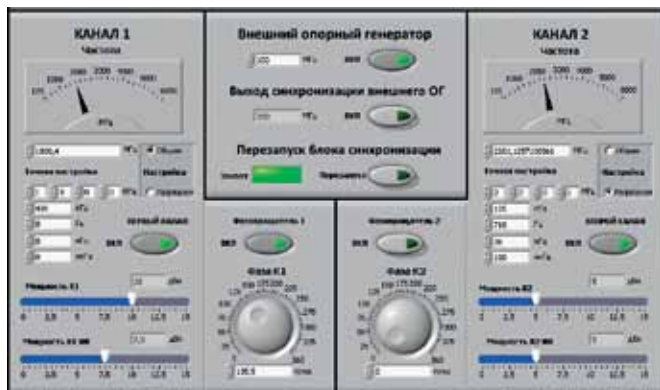


Рис.8. Пример графического интерфейса управления двухканального синтезатора, разработанного ООО "Радиокомп"

где $N1$ и $N2$ – разрядности кодов частоты для ЦВС1 и ЦВС2; K_{F1} и K_{F2} – входные коды частоты для ЦВС1 и ЦВС2. Кольцо фазовой автоподстройки в данной схеме – аналог ФАПЧ с дробным делителем частоты. Управляя одновременно кодами K_{F1} и K_{F2} , в таких структурах можно обеспечить приемлемый уровень паразитных составляющих сигнала.

Количество технических решений и публикаций, относящихся к тандему блоков с ФАПЧ и ЦВС, чрезвычайно велико. Высокими техническими характеристиками отличаются синтезаторы FSW-0010 и FSW-0020 компании National Instruments, в них используются все три технологии синтеза (ФАПЧ, ЦВС и пассивный аналоговый синтез).

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ ЧАСТОТ

В преобразователях частот, при тактировании АЦП и ЦАП и других вариантах применения часто требуются синтезаторы с двумя и более каналами, как независимыми, так и работающими на одной частоте. Во втором случае нередко приходится изменять фазу и амплитуду в каналах в достаточно широких пределах.

Такие синтезаторы (табл.5, рис.7) выполняются в виде комбинации ЦВС как с прямым аналоговым синтезатором, так и с синтезатором на основе

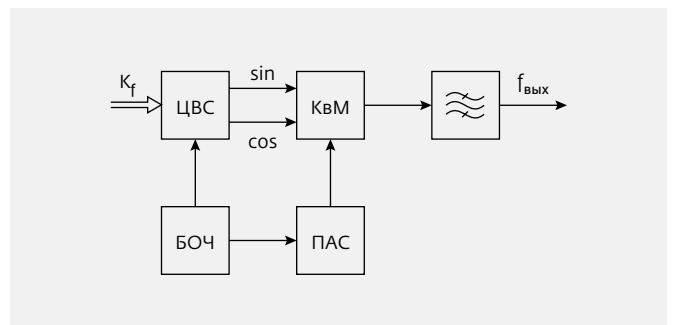


Рис.9. Структура на базе квадратурного модулятора. БОЧ – блок опорных частот, ПАС – прямой аналоговый синтезатор

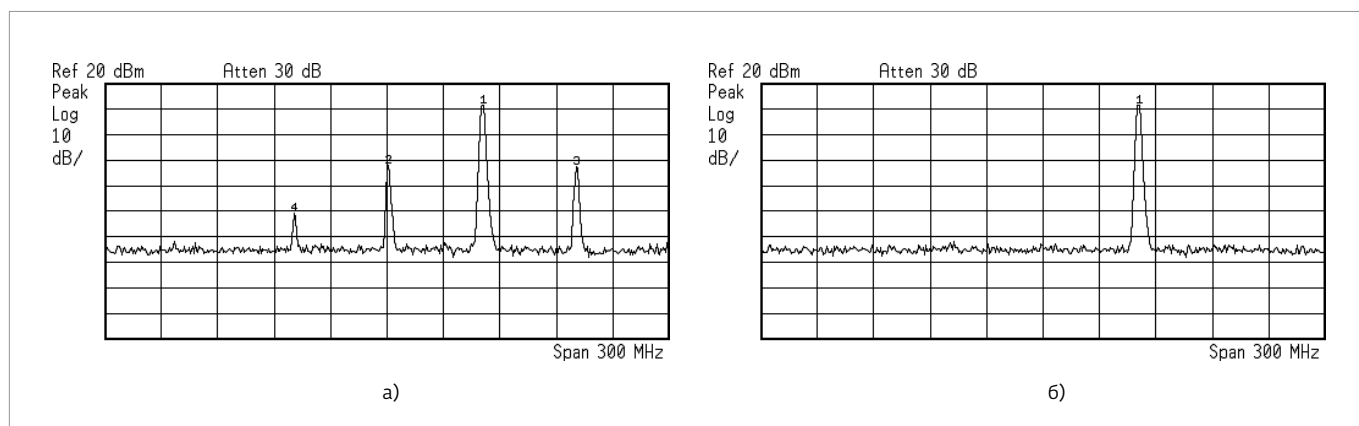


Рис.10. Спектры сигналов на выходе квадратурного модулятора до (а) и после (б) калибровки

системы ФАПЧ. Некоторые модели имеют удобный графический интерфейс, обеспечивающий управление частотой, фазой и мощностью выходных колебаний (рис.8).

ФОРМИРОВАНИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Проще всего модулированные сигналы формируются в ЦВС посредством подачи на них соответствующих кодов управления частотой K_f , фазой K_φ , амплитудой K_A , длительностью сигнала K_{Tc} и периодом его повторения $K_{Tп}$. При необходимости формирования ЛЧМ-сигналов [6] в ЦВС обычно добавляется накопитель кода скорости K_v , обеспечивающий линейное изменение кода частоты K_f . Так, отечественная микросхема ЦВС 1508ПЛ8Т для формирования ЛЧМ-сигналов содержит 48-разрядный накопитель кода скорости.

Наиболее известное техническое решение, сочетающее методы цифрового вычислительного и прямого аналогового синтеза, – структура (рис.9) на базе квадратурного модулятора (КВМ). В рамках этой структуры сохраняются все преимущества,

свойственные ЦВС, а с помощью ПАС формируемый сигнал переносится в высокочастотный диапазон. Для уменьшения уровня дискретных составляющих, связанных с квадратурным модулятором, применяется калибровка, которая заключается в подстройке фазы и амплитуды выходного сигнала ЦВС с помощью специального алгоритма (рис.10).

Формирователи модулированных сигналов в системах синтеза на основе ЦВС и ФАПЧ могут быть реализованы различными способами. Один из таких формирователей (активный умножитель частоты на основе системы ФАПЧ) реализуется в схеме на рис.5 при замене ЦВС2 целочисленным делителем частоты.

Сегодня формирователи модулированных сигналов предлагает ряд производителей (табл.6).

Уровень фазовых шумов рассмотренных в статье синтезаторов определяется качеством используемых кварцевых генераторов и примененными схмотехническими решениями. При этом пропорционально повышению синтезируемой частоты увеличиваются и фазовые шумы. В перспективе альтернативой кварцевым опорным генераторам

Таблица 6. Модули с ЦВС для формирования модулированных сигналов

Фирма	Модель, серия	Тип устройства	Выходная частота, ГГц	Разрешение по частоте, Гц	Размеры, мм
Euvis	DSM309	Модули ЛЧМ-сигналов различной формы	≤ 2	$< 0,5$	127 × 127
Hunter	SMS-DU	Модуль синтезатора с ЦВС и повышающими преобразователями, время переключения менее 100 мкс, ЛЧМ или квадратурная модуляция	1–26	10^6	101,6 × 114,3 × 25,4
Avid Systems	AVS-1010	Синтезатор с ЦВС, время переключения 55 нс; дополнительно формируются сигналы с АМ, ФМ, ЧМ, FSK	0,015–1,5	0,5	114,3 × 101,6 × 25,4
"Радио-комп"	СЛЧМ-РК	Формирователь сверхширокополосных ЛЧМ сигналов с ЦВС, девиация ЛЧМ до 600 МГц	0,4–6 (несколько диапазонов)	$3 \cdot 10^{-6}$	165 × 88 × 21
Synopsis	AWAACS-40000A	Генератор сигналов произвольной формы, время переключения менее 100 нс	0,1–40	0,23	482 × 310 × 504

могут стать генераторы на сапфировых резонаторах [7] и оптоэлектронные генераторы [8]. Например, для вторых достижимый уровень фазовых шумов составляет -163 дБн/Гц при отстройке 10 кГц на частоте 10 ГГц [9]. Пример построения синтезатора с опорным генератором на сапфировом резонаторе можно найти в статье [10].

Таким образом, сегодня устройства на базе ЦВС эффективно используются во многих системах синтеза частот и сигналов. Их применение позволяет обеспечить высокое разрешение по частоте и фазе, быстрое переключение частот и формирование модулированных сигналов. Ведущие мировые производители продолжают совершенствовать ЦВС и комбинированные синтезаторы, что позволяет рассчитывать на появление в будущем устройств с еще большими возможностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кочемасов В., Скок Д., Черкашин А.** Цифровые вычислительные синтезаторы – современные решения. – Электроника: НТБ, 2014, № 2, с. 150–160.
2. **Кочемасов В., Скок Д., Черкашин А.** Цифровые вычислительные синтезаторы – современные решения. Часть 2. – Электроника: НТБ, 2014, № 4, с. 152–156.
3. **Tierney J., Rader C., Gold B.** A Digital Frequency Synthesizer. – IEEE Trans. Audioelectroacoust., V. Au-19, March, 1971, p. 48.
4. **Жаров А.Н., Кочемасов В.Н., Будишов В.П.** Синтезатор сигналов с заданным законом изменения фазы. Авт. свид-во СССР SU 1686693 A1, 23.10.91. <http://multicore.ru/index.php?id=466>.
5. **Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконешников В.С.** Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. 192 с.
6. **Царапкин Д.П.** Методы генерирования СВЧ-колебаний с минимальным уровнем фазового шума. Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук. М.: МЭИ(ТУ), 2004.
7. **Кулешов В.** Оптоэлектронные СВЧ-генераторы с рекордно низкими фазовыми шумами. – Электронные компоненты, 2009, № 8, с. 75. <http://www.oewaves.com/technology>.
8. **Belchicov S., Dzisiak A., Guletsky I.** A Low Phase Noise Octave-Band Synthesizer Using an X-Band Frequency Reference. – Microwave Journal, May 2014, p. 104–112.

