

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ СИГНАЛОВ

*Проанализированы этапы развития перспективных цифровых вычислительных синтезаторов сигналов. Исследованы пути их дальнейшего развития с использованием передовых высокочастотных полупроводниковых технологий.*

**Ключевые слова:** ЦВС, этапы развития, полупроводниковые технологии.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ публикаций.

Цифровые вычислительные синтезаторы сигналов (ЦВС) широко применяются в различной радиоаппаратуре, что делает весьма актуальным разработку новых, более совершенных и модернизацию уже известных систем синтеза сигналов. Синтезаторы сигналов должны допускать оперативную, предельно быструю перестройку частоты в соответствии с командами, поступающими от внешних источников управления, и при этом обеспечивать необходимые параметры по диапазону рабочих частот и виду модуляции, разрешающей способности, уровню фазовых шумов и побочных составляющих в спектре выходного сигнала.

Цифровые синтезаторы сигналов используют как в устройствах формирования, так и в устройствах приема и обработки сигналов [1 – 4].

Благодаря фазовой и частотной модуляции, которые реализуют непосредственно в структуре ЦВС, а также высокой надежности синтезаторы подобного типа находят широкое применение в различных системах спутниковой связи, системах радиолокации и радионавигации, измерительных генераторах и т.п. [5 – 7].

В развитии ЦВС наблюдается несколько этапов их развития.

Начиная с начала 70-х годов до начала 80-х годов двадцатого века, назовем этот период **первым этапом**. В этот период вычислительные синтезаторы представляли скорее объект теоретических исследований, а реальные образцы имели тактовые частоты порядка единиц мегагерц. Это обстоятельство было продиктовано уровнем развития цифровой и аналоговой элементной базой.

**Второй этап**, с начала 80-х годов до начала 90-х годов 20-го века, ознаменовался бурным развитием цифровых технологий в различных областях техники. В этот период развиваются интегральные технологии: КМОП, КНС, GaAs, ЭСЛ. Производство микросхем по этим технологиям позволило им

работать с тактовыми частотами до десятков мегагерц. Основными производителями были компании Qualcomm, Harris, Hughes Space and Communication Company, Texas Instruments, Analog Devices, Motorola, Plessey, Stanford Telecom, Rockwell.

**Третий этап** – с начала 90-х годов двадцатого века по начало 2000-х годов, характеризуется периодом формирования основных структурных схем ЦВС, созданием новых алгоритмов преобразователей, а также развиваются цифроаналоговые устройства с тактовыми частотами до сотен и тысяч мегагерц. В течение этого периода на передовые позиции по производству ЦВС на КМОП технологии вышла фирма Analog Devices, которая и в настоящее время является лидером в данной области. Продукция данной фирмы отличается достаточно высоким качеством, разнообразием и относительно высокой доступностью, чего нельзя сказать о других фирмах, в частности, Euvivis, чьи позиции в этом плане выглядят более скромными.

**Четвертый этап** в развитии ЦВС – с начала двадцать первого века по настоящее время – характеризуется существенными усилиями и большим объемом работ по созданию высокочастотных ЦВС.

О следующем этапе в развитии ЦВС можно будет говорить после начала промышленного выпуска высокочастотных ЦВС с выходными частотами в диапазонах частот от 1 - 4 до 20 ГГц.

**Целью статьи** является анализ тенденций развития перспективных высокочастотных ЦВС на базе новейших полупроводниковых технологий.

### Основной материал

Со времени первых публикаций структурная схема цифрового вычислительного синтезатора сигналов не претерпела коренных изменений. В общем виде ЦВС (за исключением всевозможных схем коррекций) содержит: устройство управления и синхронизации (УУС), вычислитель кодов фазы (ВКФ) (накопитель), преобразователь кодов (ПК) (ПЗУ), цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и полосовой фильтр (ПФ) (рис. 1).

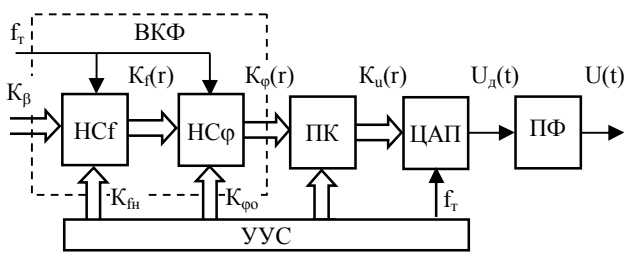


Рис. 1. Структурная схема классического ЦВС

В накапливающий сумматор частоты (НС<sub>f</sub>) предварительно записывается код начальной частоты ( $K_{fn}$ ), в накапливающий сумматор фазы (НС<sub>φ</sub>) – код начальной фазы ( $K_{φ0}$ ) формируемого колебания. При формировании ЛЧМ сигнала на вход НС<sub>f</sub> подается код скорости ЧМ ( $K_β$ ). Начальные коды одновременно связаны с параметрами формируемого ЧМ сигнала.

$$K_{fn} = \text{ent} \left[ \frac{f_n \cdot 2^{n_{нсf}}}{f_T} \right];$$

$$K_{φ0} = \text{ent} \left[ \frac{φ_0 \cdot 2^{n_{нсφ}}}{2π} \right];$$

$$K_β = \text{ent} \left[ \frac{β \cdot K_{τΔf} 2^{n+3}}{f_T^2} \right],$$

где  $\text{ent}[x]$  – операция выделения целой части числа  $x$ ;

$f_n, φ_0$  и  $β$  – соответственно, начальная частота, фаза и скорость ЧМ формируемого сигнала;

$K_{τΔf}$  – код длительности частотной ступеньки;

$f_T$  – тактовая частота ЦВС;

$n_{нсf}, n_{нсφ}$  – разрядности накопителя частоты и накопителя фазы.

Основным элементом таких ЦВС является ВКФ. Емкость ВКФ напрямую зависит от требуемой точности установки начальных параметров, их шага перестройки и качества формируемых сигналов [8].

Выходная частота синтезируемого колебания равна

$$f_c = Kft / N,$$

где  $K$  – код требуемой частоты,

$ft$  – тактовая частота,

$N$  – емкость накопителя фазы ( $N = 2^n$ ).

В течение последних пятнадцати лет вплоть до настоящего времени за рубежом, прежде всего, в США, проводятся активные исследования и разработки в области высокочастотных ЦВС. Например, в США поставлена задача создания в обозримом будущем ЦВС с выходными частотами до 20 ГГц.

Высокочастотные ЦВС должны сыграть существенную роль в перспективных радиотехнических системах. Подобные исследования проводятся, прежде всего, под эгидой оборонных ведомств и организаций США. Не так давно был опубликован ряд работ, в которых представлены лабораторные образцы микросхем высокочастотных ЦВС с тактовыми частотами до 32 ГГц, выполненных на базе перспективных полупроводниковых технологий.

Появление на рынке высокочастотных ЦВС приведет к быстрой разработке и внедрению нового поколения радиотехнических средств и систем, прежде всего, новых радаров и цифровых активных фазированных антенных решеток (ЦАФАР).

Целый ряд фирм, по всей видимости, будут создавать различные устройства на базе серийных высокочастотных ЦВС. В то же время на этом этапе, видимо, будут проводиться работы по созданию микросхем ЦВС с выходными частотами от 20 до 30 ГГц и существенно более высокими.

Тактовые и выходные частоты этих ЦВС должны быть в разы и десятки раз выше, чем у существующих коммерческих. На сегодняшний день, у новейшей модели ЦВС фирмы Analog Devices AD9914 выходная частота достигает величины 1,4 ГГц при тактовой частоте в 3,5 ГГц.

Поэтому, при создании ЦВС нового поколения разработчиками решаются следующие задачи:

- повышение выходных рабочих частот (в недалеком будущем до 20 ГГц);
- формирование сложных сигналов с необходимыми параметрами;
- расширение частотного диапазона и обеспечение функционирования ЦВС в очень широкой полосе частот;
- оперативное изменение параметров;
- улучшение спектральных характеристик перспективных синтезаторов;
- применение к перспективным синтезаторам уже апробированных методов управления и повышения качества их функционирования ;
- проверка и применение перспективных полупроводниковых технологий как базы для изготовления быстродействующих ЦВС и их дальнейшее развитие.

Полагают, что быстродействующие ЦВС будут играть определяющую роль при построении перспективных радиотехнических систем, которые будут применяться в войнах с применением высокоточного оружия. К примеру, таких систем относятся и радары нового поколения, способные в режиме реального времени отслеживать различные параметры «сложных» целей, в том числе не-большого размера. Большую роль такие ЦВС, как

упоминалось выше, будут играть при создании перспективных ЦАФАР, обеспечивающих цифровое формирование лучей и способных функционировать в многолучевом режиме. Кроме этого, в разрабатываемых ЦВС будет предусмотрена возможность формирования точных временных задержек, что даст возможность управлять лучом радара (технология True Time Delay).

Практически все американские работы по перспективным ЦВС проводятся при поддержке и участии организаций, занимающихся исследованиями и разработками в области обороны. К ним относятся, прежде всего, Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) и U.S. Army Research Laboratory. Многие разработки по перспективным ЦВС выполняются по общей программе работ для военного ведомства (Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitters – TFAST – технологии для передающих устройств с быстрым цифровым синтезом частот и сигналов) [9 - 14].

Для разработки и изготовления, перспективных ЦВС предлагается использовать высокочастотные полупроводниковые технологии.

Прежде всего, к ним относятся, технологии на основе InP (Фосфид Индия) и SiGe (Кремний-Германий). Обе эти технологии позволяют получить значения граничной частоты транзистора и максимальной частоты усиления мощности намного выше 100 ГГц.

Например, для технологии InP граничная частота и частота усиления могут достигать значения 300 ГГц. Для технологии SiGe граничная и усиливаемая частоты могут превышать значения в 200 ГГц.

Как следует из приведенных источников [9 - 14], наиболее быстродействующие лабораторные образцы перспективных ЦВС выполнены по технологии InP. Однако выход годных микросхем для технологии InP оказывается ниже, чем для технологии на основе SiGe. При этом с помощью технологии SiGe можно получить более компактные элементы, с меньшим энергопотреблением и как результат с меньшей стоимостью.

Из материалов последних лет следует, что обе эти технологии развиваются и конкурируют как основа для выпуска перспективных ЦВС. Например, модификации технологии на основе InP позволяют существенно снизить потребляемую мощность и уменьшить ширину эмиттера до значения в 0,15 мкм, что на порядок увеличивает количество транзисторов на одном чипе (примерно до 20000 и более).

В последнее время на основе технологии SiGe также стали получать все более высокочастотные микросхемы ЦВС.

А вот технология на основе GaAs (Арсенид Галлия) по частоте в несколько раз проигрывает технологиям InP и SiGe, поэтому в течение ряда последних лет практически не использовалась в разработке высокочастотных ЦВС.

## Выводы

Проведенный анализ значительного количества разработок перспективных ЦВС показал, что к началу второго десятилетия двадцать первого века в данном вопросе достигнут существенный успех.

Так тактовая частота ЦВС достигла значения в 32 ГГц, а выходная частота – 16 ГГц (опытные образцы).

Для изготовления высокочастотных ЦВС в настоящее время используются три основных технологии: на основе InP, SiGe и GaAs.

Одно из направлений использования этих перспективных ЦВС – это радары нового поколения. Однако, по имеющейся информации, перспективные ЦВС на данный момент времени пока прошли апробацию только при формировании гармонических колебаний. Кроме того, они пока отличаются существенными ограничениями. Одно из них это разрядность фазового аккумулятора (разрядность ВКФ) для большинства ЦВС не превышает 12 разрядов, что совершенно недостаточно для формирования качественных сигналов с ЛЧМ.

При проектировании и разработке быстродействующих ЦВС одновременно развиваются и конкурируют два основных подхода к их структуре - с использованием ПЗУ и без использования ПЗУ. В ЦВС без ПЗУ в большинстве случаев разработок применяется нелинейный ЦАП, с помощью которого решаются задачи формирования гармонического сигнала и цифро-аналогового преобразования.

На рубеже 2009 – 2012 годов появились разработки высокочастотных цифровых вычислительных синтезаторов сигналов с возможностью прямого формирования модулированных сигналов, в том числе и с ЛЧМ. Однако они пока ограничены по типам модуляции, параметрам модуляции и частоте выходного модулированного сигнала.

В настоящее время значительное внимание в разработках перспективных ЦВС уделяется не расширению частотного диапазона, а более глубокой проработке схемы ЦВС в целом. Основная задача при этом состоит в обеспечении показателей качества цифровых вычислительных синтезаторов сигналов. Вероятнее всего, будут активно применяться многие методы повышения эффективности, которые уже используются в структу-

рах существующих ЦВС, например, рандомизация паразитных составляющих в ЦВС.

В заключение можно предположить, что потребуется немало времени, чтобы доработать имеющиеся образцы новых цифровых вычислительных синтезаторов сигналов, усовершенствование их структуры, экспериментальной проверки и создание на их основе быстродействующих высокочастотных ЦВС частот и сигналов, которые потом будут выпускаться серийно.

### Список литературы

1. Кочемасов В.Н. Цифровые вычислительные синтезаторы частот и сигналов / В.Н. Кочемасов, А.Н. Фадеев, И.А. Раков // Труды МЭИ. – 1989. – Вып. 200. – С. 122 – 138.
2. А.С. 1203708 (СССР). Цифровой синтезатор частот / Гомозов В.И., Кандырин Н.П., Романов Ю.М. – Оpubл. Б.И. – 1986. – № 1.
3. А.С. 1305823 (СССР). Цифровой синтезатор частот / Гомозов В.И., Кандырин Н.П., Романов Ю.М., Соколов С.А. – Оpubл. Б.И. – 1987. – № 15.
4. А.С. 1552345 (СССР). Цифровой синтезатор частотно-модулированных сигналов / Гомозов В.И., Кандырин Н.П., Романов Ю.М., Михайлов Н.А. – Оpubл. Б.И. – 1990. – № 11.
5. Кандырин Н.П. Цифровые вычислительные синтезаторы простых и сложных сигналов / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. – Х.: ОНДІ ЗС, 2006. – Вип. 2 (4). – С. 135 – 144.
6. Кандирін М.П. Цифрові синтезатори сигналів у пристроях управління і зв'язку / М.П. Кандирін // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 4 (8). – С. 93 – 97.
7. Кандырин Н.П. Исследование вопросов применения цифровых синтезаторов для формирования сложных сигналов в метеорадиолокации / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 4 (37). – С. 58 – 63.
8. Кандырин Н.П. Математическая модель цифрового вычислителя кодов фазы простых и сложных ЧМ сигналов / Н.П. Кандырин, А.М. Дзигора // Системи обробки інформації. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил, 2006. – Вип. 2 (5). – С.37-42.

9. Егоров Н.П. Тенденции развития перспективных цифровых вычислительных синтезаторов частоты / Н.П. Егоров // Материалы Международной HTK. – М., 2012. – Часть 6. – С. 75 – 79.

10. ROM-Base Direct Digital Synthesizer at 24 GHz Clock Frequency in InP DHBT Technology. Steven Eugene Turner, Member, IEEE, Richard T. Chan, and Jeffrey T. Feng, Member, IEEE. IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS, VOL. 18, NO. 8, AUGUST 2008.

11. A 12 GHz 1.9 W Direct Digital Synthesizer MMIC Implemented in 0.18 $\mu$ m SiGe BiCMOS Technology. Xuefeng Yu, Fa Foster Dai, Senior Member, IEEE, J. David Irwin, Life Fellow, IEEE, and Richard C. Jaeger, Fellow, IEEE/ IEE JOURNAL OF SOLID – STATE CIRCUITS, VOL. 43, NO. 6, JUNE 2008.

12. Direct Digital Synthesizer With Sine – Weighted DAC at 32 – GHz Clock Frequency in InP DHBT Technology. Steven Eugene Turner, Student Member, IEEE, and David E. Kotecki, Senior Member, IEEE. IEEE JOURNAL OF SOLID – STATE CIRCUITS, VOL. 41, NO. 10, OCTOBER 2006.

13. 36 – GHz, 16 $\times$  6 Bit ROM in InP DHBT Technology Suitable for DDS Application. Sanjeev Manandhar, Student Member, IEEE, Steven Eugene Turner, Student Member, IEEE, and David E. Kotecki, Senior Member, IEEE. IEEE JOURNAL OF SOLID – STATE CIRCUITS, VOL. 42, NO. 2, FEBRUARY 2007.

14. 24 – Bit 5.0 GHz Direct Digital Synthesizer RFIC With Direct Digital Modulations in 0.13  $\mu$ m SiGe BiCMOS Technology. Xueyang Geng, Student Member, IEEE, Fa Foster Dai, Fellow, IEEE, J. David Irwin, Life Fellow, IEEE, and Richard C. Jaeger, Life Fellow, IEEE. IEEE JOURNAL OF SOLID – STATE CIRCUITS, VOL. 45, NO. 5, MAY 2010.

Поступила в редколлегию 11.02.2015

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

### ЕТАПИ РОЗВИТКУ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЦИФРОВИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИНТЕЗАТОРІВ СИГНАЛІВ

М.П. Кандирін

Проаналізовані етапи розвитку перспективних цифрових обчислювальних синтезаторів сигналів. Досліджені шляхи їх подальшого розвитку з використанням передових високочастотних напівпровідникових технологій.

**Ключові слова:** ЦОС, етапи розвитку, напівпровідникові технології.

### STAGES OF DEVELOPMENT PERSPECTIVE DIGITAL CALCULABLE SYNTHESIZERS OF SIGNALS

M.P. Kandyrin

The stages of development of perspective digital calculable synthesizers of signals are analysed. The ways of their further development are investigational with the use of front-rank high-frequency semiconductor technologies.

**Keywords:** DDS, stages of development, semiconductor technologies.