

Анализ развития архитектурных решений синтезаторов частоты

Д.А. Баландин, А.Д. Кузьмин, Н.С. Сурков

АО «НПП «Пульсар», г. Москва, balandin@pulsarnpp.ru

Аннотация — Представлен анализ архитектур построения синтезаторов частоты СВЧ диапазона. Проведен анализ малошумящих и быстродействующих решений формирователей. Приведен анализ импортных аналогов. Предложена реализация синтезатора с низкой плотностью побочных составляющих в спектре выходного сигнала.

Ключевые слова — синтезатор СВЧ сигнала, архитектурные решения формирователей, ФАПЧ, СПМ ФШ, спур.

I. ВВЕДЕНИЕ

Формирователи сверхвысокочастотного сигнала востребованы во всех отраслях народного хозяйства, начиная от исследований энергетических переходов квантовых объектов (кубитов) заканчивая возможностью совершать звонки по телефону из автомобиля.

Каждое прикладное направление предъявляет свои уникальные требования к электрическому, конструктивному и другим параметрам синтезаторов частот (СЧ), что привело к развитию архитектур построения ППП с СЧ [1]. В данном материале приведен обзор методов решения задач разработки формирователей сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала.

Анализ построен на основе наиболее распространенных схемотехнических решений формирователей, таких как синтезаторы прямого аналогового и цифрового синтеза, косвенного синтеза с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), кратко приведен обзор перспективных оптоэлектронных исполнений.

II. ПРЯМОЙ АНАЛОГОВЫЙ СИНТЕЗ

В общем виде синтезаторы можно разделить на две категории, – это синтезаторы прямого синтеза либо косвенного с фазовой автоподстройкой частоты. Метод прямого аналогового синтеза относится к первой категории и заключается в смешивании сигналов гетеродинов с последовательной фильтрацией и выделении сигнала желаемой частоты из продуктов преобразования [2]. На рисунке 1 приведен пример структурной схемы такого синтезатора.

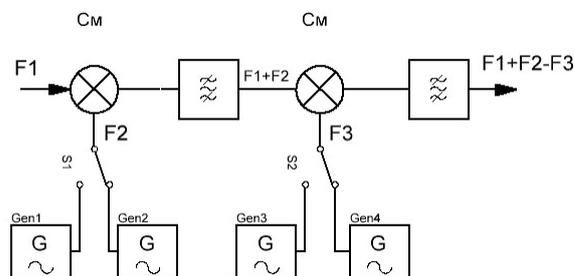


Рис. 1. Структурная схема синтезатора прямого аналогового синтеза

Несмотря на то, что метод прямого аналогового синтеза совершенно не поддается повсеместной тенденции к миниатюризации и обладает рядом других недостатков из которых стоит выделить скромные показатели подавления побочных спектральных составляющих и низкое разрешение по частоте, тем не менее использование в составе синтезатора малошумящих опорных генераторов позволяет обеспечить наименьший относительный уровень спектральной плотности мощности фазового шума (СПМ ФШ), который является одним из важнейших параметров. Это свойство обеспечило востребованность метода и по сей день. СЧ прямого аналогового синтеза успешно применяются в наземной радиолокационной аппаратуре, для которой требования к уровню фазового шума жестче, чем к массогабаритным показателям.

Отдельно хотелось бы выделить одно из наиболее простых и малошумящих решений прямого аналогового синтеза – «генератор гребенки» (comb generator). Это низкочастотный генератор опорной частоты, нагруженный на длинную линию с нелинейной неоднородностью (nonlinear transmission line) [3]. Спектр выходного сигнала такого синтезатора представляет собой пачку кратных гармонических спектральных составляющих как на рисунке 2.

При использовании кварцевого генератора в качестве задающего уровень фазового шума сформированного СВЧ сигнала обеспечивается на уровне показателей лабораторного оборудования. На рисунке 3 приведена зависимость СПМ ФШ вблизи 40ой гармоники генератора гребенки с задающим кварцевым генератором частотой 100 МГц [4].

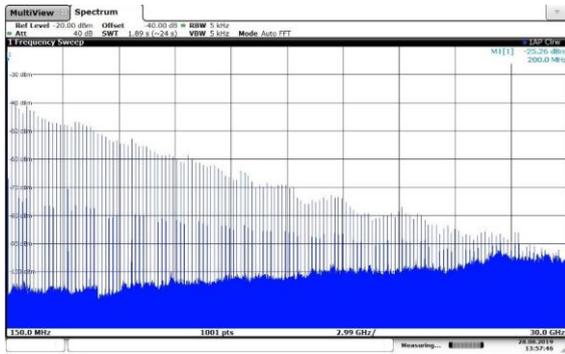


Рис. 2. Спектр выходного сигнала генератора гребенки

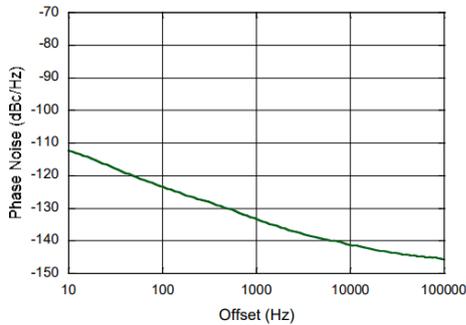


Рис. 3. СПМ ФШ генератора гребенки с частотой выходного сигнала 4 ГГц

III. ПРЯМОЙ ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗ

Представителем категории прямого синтеза является цифровой вычислительный синтезатор (ЦВС, DDS), выходной сигнал в котором формируется цифрово-аналоговым преобразователем (ЦАП).

Формирование сигнала начинается с фазового аккумулятора, в котором вырабатывается цифровой код фазы сигнала для последующей обработки по таблице кодов определенной формы сигнала [5]. По завершении обработки кодовая последовательность подается на вход ЦАП (Рис. 4).

Ввиду изобилия цифровых сложно-функциональных (СФ) блоков в составе ЦВС изготовление проводится на основе кремниевых технологических процессов, что ограничивает верхнюю границу рабочих частот на уровне 8 ГГц в настоящее время.

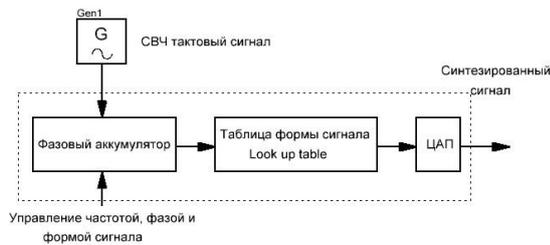


Рис. 4. Структурная схема цифрового синтезатора

Недостаток цифрового синтеза связан с дискретной природой цифро-аналогового преобразования, в следствии чего спектр выходного сигнала наполнен шумами квантования в виде достаточно мощных негармонических составляющих. При этом относительный уровень ФШ обеспечивается на уровне минус 150 дБ/Гц, что является высоким показателем.

Возможность программной конфигурации формы, частоты и фазы выходного сигнала ЦВС является важной особенностью, которая обеспечила развитие многоканальных когерентных схем в радиочастотном измерительном оборудовании.

IV. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ

Развитие архитектур построения формирователей СВЧ сигналов не ограничивается областью твердотельной электроники, в настоящее время достаточно много работ проводится по теме оптоэлектронных синтезаторов частоты. На рисунке 5 приведены структурные схемы двух вариантов реализации контура формирования СВЧ сигнала.

В первом варианте использовано фундаментальное свойство света проявлять волновую природу, а именно при облучении фотодетектора двумя источниками лазерного излучения с близкими частотами наблюдается биение амплитуды оптического излучения, при этом длина волны модуляции может лежать как в сантиметровом, так и в миллиметровом диапазоне длин волн.

Второй вариант представляет собой петлю обратной связи с преобразованием энергии оптического излучения в энергию СВЧ сигнала. Гармонические колебания на выводе управления модулятора вызывают девиацию частоты оптического сигнала, затем модулированное оптическое излучение проходя через высокочастотный резонатор вызывает модуляцию интенсивности излучения, которая выделяется в виде СВЧ сигнала на фотодетекторе.

Благодаря достаточно простым принципам формирования сигнала с длиной волны мм-диапазона представляется, что фотонные решения синтезаторов могут иметь перспективы применения в телекоммуникации по мере освоения частот сети пятого поколения. В настоящее время проводятся исследовательские работы по интеграции оптоэлектронных принципов в монолитном исполнении [6].

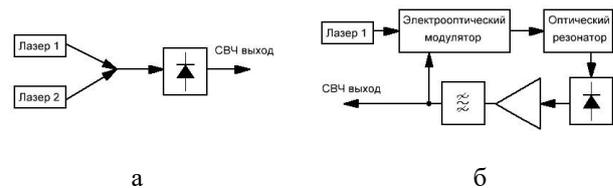


Рис. 5. Структурные схемы оптоэлектронного синтезатора

V. СИНТЕЗАТОРЫ С ФАПЧ

Все рассмотренные выше архитектурные решения относятся к категории прямого синтеза, ниже приведен обзор методов косвенного синтеза сигнала. Формирователи с ФАПЧ снижали наибольший спрос благодаря уникальной комбинации электрических и массогабаритных показателей, которые отвечают требованиям большинства задач синтеза радиосигналов.

Из названия понятно, что отличительной особенностью таких изделий является наличие следящей связи за фазой сигнала, при этом долговременная стабильность выходного сигнала определяется эталонным сигналом опорной частоты.

На рисунке 6 приведена структурная схема петли ФАПЧ в которой вырабатывается сигнал компенсации фазы генератора, управляемого напряжением (ГУН) по результатам сравнения фазы ГУН с фазой сигнала опорной частоты в частотно-фазовом детекторе (ЧФД).

Частота ГУН программируется коэффициентом деления (N) в петле обратной связи. Также в составе микросхемы ФАПЧ могут быть блоки, которые управляют значением N в автоматическом режиме, что предоставляет дополнительные опции разработчику, например, субгерцовый шаг переключения частоты либо реализация различных типов модуляции выходного сигнала.

На рисунке 7 приведены структурные схемы синтезаторов ФАПЧ с подкачкой заряда, по которым изготавливается большинство современных интегральных исполнений программируемых синтезаторов [7]. Указанные варианты различаются по виду сигнала ошибки в цепи управления, так на первой схеме (рис. 7а) часть блоков выполнена на дискретных компонентах и сигнал управления формируется в аналоговом виде. Остальные две схемы изготавливаются по концепции «система на кристалле» и сигнал управления вырабатывается в виде кодовой последовательности, такие схемы условно именуется «цифровыми» петлями ФАПЧ.

Схема аналоговой петли ФАПЧ (рис. 7а) является на данный момент самым распространенным решением для задач формирования СВЧ сигнала несущей частоты. Такой подход обеспечивает совместную работу блоков, изготовленных по разнородным технологическим процессам, что позволило добиться предельных параметров формирователя благодаря уникальной совокупности характеристик каждого блока.

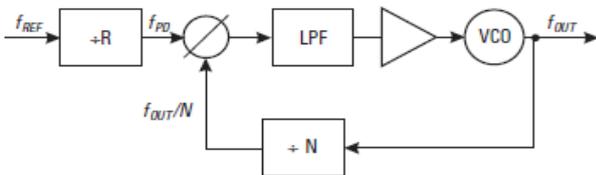
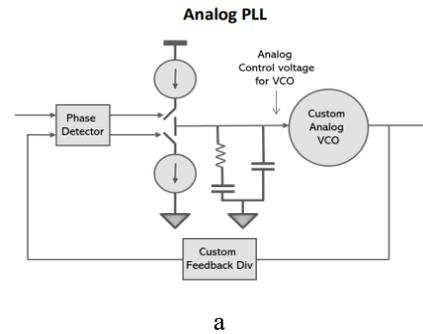
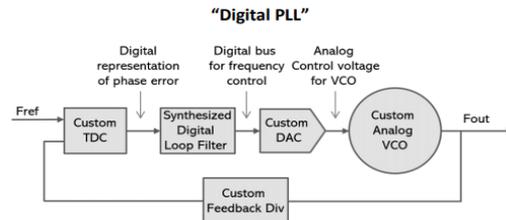


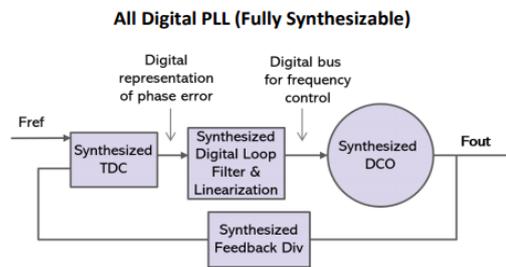
Рис. 6. Структурная схема петли ФАПЧ



а



б



в

Рис. 7. Структурные схемы ИМС ФАПЧ

В обоих вариантах цифровой петли ФАПЧ (рис. 7б, 7в) петлевой фильтр интегрирован на кристалл синтезатора, что освобождает потребителя от необходимости проводить настройку петли, а также упрощает интеграцию с остальными узлами радиочастотного тракта приемопередачи на одном кристалле.

Если детальнее рассмотреть развитие схемотехнических решений синтезаторов с ФАПЧ, то можно выделить тенденцию к «цифровизации» СФ блоков в составе схемы ФАПЧ, то есть разработка методами цифрового синтеза микросхем. Преимущество такого подхода заключается в «портируемости» отработанных и проверенных решений изделий на продвинутое технологические процессы с меньшими экономическими издержками на проектирование и разработку. При аналоговом подходе смена технологического процесса изготовления неизбежно связана с прохождением всех этапов проектирования с нуля. Поэтому несмотря на технические сложности реализации аналоговых СВЧ блоков в цифровом виде, например, ГУН [8], метод цифрового синтеза микросхем позволяет снизить

издержки на разработку новых типов радиочастотных «систем на кристалле».

Помимо экономических причин методы цифрового синтеза микросхем удачно укладываются в канву применения машинного обучения при разработке, так как СФ блоки хорошо формализованы на языке описания аппаратуры и машинный «интеллект» может в автоматическом режиме проводить синтез комбинаций схемно-топологических решений на кристалле с последующим моделированием и выбором наиболее подходящих решений требованиям разработчика [9].

VI. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ СИНТЕЗАТОРОВ С ФАПЧ

Разработка конкретного технического решения СВЧ формирователя частоты является исключительно творческим процессом, в ходе которого разработчик формирует облик гибридной архитектуры, соединяя уже известные методы и сращивая их уникальным образом, так чтобы максимально выделить положительные особенности и компенсировать недостатки для выполнения требований технического задания.

В данном разделе приведен краткий анализ развития схемотехнических решений синтезаторов с ФАПЧ под давлением необходимости повышения верхней граничной частоты и снижения относительного уровня фазового шума. Общую тенденцию требований к синтезаторам можно выразить в трех тезисах:

- 1) «как можно выше рабочая частота»;
- 2) «как можно ниже уровень шума»;
- 3) «как можно шире полоса перестройки».

Если тезис № 3 удалось решить путем применения ГУН с октавной перестройкой частоты и делителем частоты с программируемым коэффициентом деления, то первые два тезиса нельзя обеспечить раз и навсегда, потому что они взаимоисключающие и между ними возможен только компромисс.

Верхняя рабочая частота синтезатора определяется динамическими параметрами ГУН и делителем частоты [10], поэтому решение задачи тезиса №1 связано с развитием схемотехнических решений генераторов, которые обеспечили повышение верхней планки по частоте выходного сигнала. На рисунке 8 приведены методы для расширения верхней границы РЧ [11].

Первый способ – самый простой и заключается в разработке ГУН по выбранной схеме автогенератора на соответствующем тех. процессе, который сможет обеспечить требуемую частоту. Второй и третий подход являются продолжением первого, а именно использование умножения частоты либо реализация двухтактных схем связанных автогенераторов.

Каждый способ обладает преимуществами и недостатками, так при первом способе можно разработать ГУН с наиболее «чистым» спектром, но

такой подход, как правило, требует применения дорогостоящих процессов изготовления полупроводниковых структур.

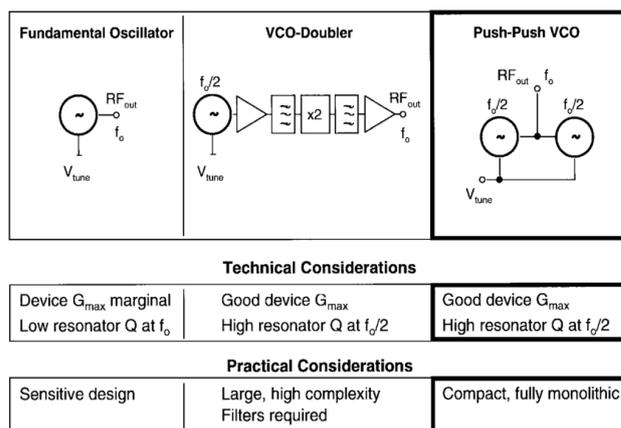


Рис. 8. Концепции расширения f_B ГУН

Другие два способа менее затратны при изготовлении, но за счет нелинейного преобразования частоты приводят к наполнению спектра нежелательными субгармоническими составляющими.

VII. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МАЛОШУМЯЩИХ РЕШЕНИЙ СИНТЕЗАТОРОВ С ФАПЧ

Уровень подавления фазового шума в петле ФАПЧ определяется коэффициентом деления и чем он больше, тем выше уровень фазового шума, эта зависимость хорошо выражается соотношением:

$$PN_{tot} = PN_{syn} + 20 \lg(N) + 10 \lg(f_{PFD}),$$

где PN_{tot} – относительный уровень СПМ ФШ синтезатора в полосе синхронизации ФАПЧ;
 PN_{syn} – приведенное значение относительного уровня фазового шума синтезатора;
 N – коэффициент деления в петле ФАПЧ;
 f_{PFD} – частота сравнения ЧФД.

Следует отметить, что максимальная частота сравнения большинства микросхем ФАПЧ лежит в диапазоне 100-200 МГц и для задач формирования частоты в мм-диапазоне длин волн необходимо устанавливать огромный коэффициент деления. Разрешить это можно путем преобразования частоты вниз с помощью смесителя и гетеродина либо обеспечением высокой частоты сравнения ЧФД.

Среди импортных изделий, которые выполнены с переносом частоты следует выделить синтезатор, приведенный в патенте А. Ченакина US9628066B1 и модуль ADF4401A от Analog Devices (США) [12],[13], которые приведены на рисунке 9 и 10 соответственно.

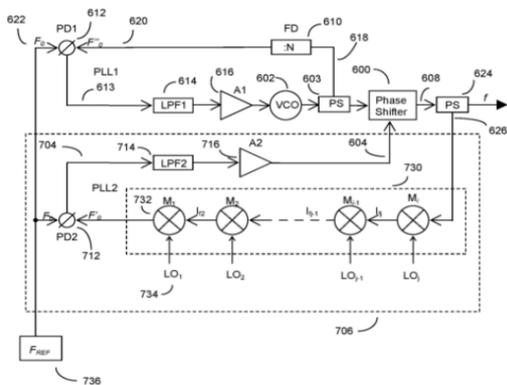


Рис. 9. Структурная схема предложенная в патенте US9628066B1

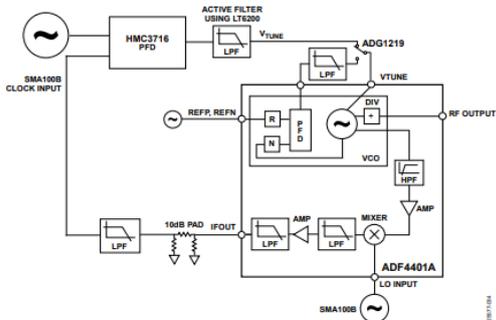


Рис. 10. Структурная схема синтезатора ADF4401A

Реализация переноса частоты позволяет добиться существенного снижения уровня СПМ ФШ по сравнению со стандартными решениями с микросхемами ФАПЧ.

Быстродействующие схемы ЧФД могут быть альтернативой решениям с переносом частоты. На данный момент среди импортных микросхем быстродействующих ЧФД можно выделить HMC3716, HMC439 производства Analog Devices с рабочей частотой до 1,3 ГГц. По данным производителя относительный уровень приведенного шума синтезатора составляет минус 232 дБ/Гц [14], что соответствует уровню микросхем аналоговой петли ФАПЧ, например, HMC704 [15]. Важным параметром решений с быстродействующим ЧФД является низкая плотность распределения в спектре негармонических составляющих.

VIII. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработка быстродействующих микросхем ЧФД также проводится в АО «НПП «Пульсар». Изготовленный образец микросхемы детектора обеспечил работу на частоте сравнения до 3 ГГц, что вдвое выше, чем у изделий от Analog Devices.

С целью исследований электрических параметров был разработан макет синтезатора с экспериментальным образцом ЧФД, структурная схема приведена на рисунке 10.

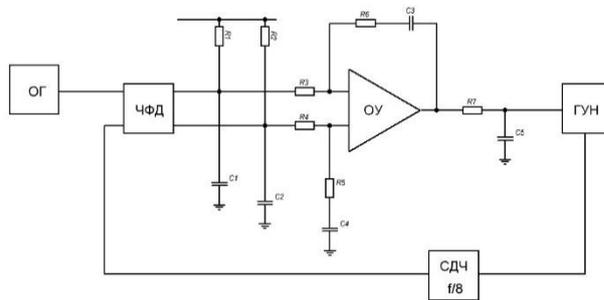


Рис. 10. Структурная схема синтезатора X-диапазона частот

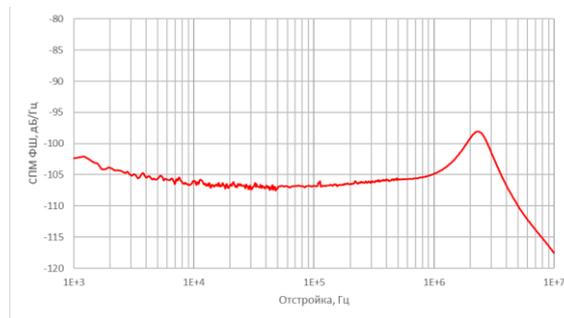


Рис. 11. Зависимость СПМ ФШ экспериментального СЧ

Петля ФАПЧ была разработана на основе электронной компонентной базы, изготовленной в АО «НПП «Пульсар», в качестве опорного генератора использован аналоговый генератор СВЧ сигналов Agilent N5182B. На рисунке 11 приведена зависимость относительного уровня СПМ ФШ синтезатора с частотой выходного сигнала 12 ГГц.

В качестве завершено архитектурного решения синтезатора с быстродействующим ЧФД предлагается схема как на рисунке 10, с тем исключением, что в качестве опорного генератора наиболее целесообразно применение цифрового синтезатора, что обеспечит совмещение положительных особенностей цифрового и косвенного синтеза, а именно:

- 1) Быстродействующий ЧФД нечувствителен к побочным спектральным составляющим ЦВС, поэтому присутствие шумов квантования в спектре выходного сигнала будет исключено;
- 2) Разрешение по частоте определяется параметрами ЦВС;
- 3) ЦВС обладает достаточно низким уровнем СПМ ФШ, чтобы исключить его вносимый фазовый шум из расчета;
- 4) Плотность распределения негармонических составляющих определяется выходной частотой ЦВС и может достигать нескольких гигагерц.

Анализ импортных ИМС синтезаторов с ФАПЧ подтверждает тенденцию к повышению частоты сравнения, так ряд наиболее свежих серийных изделий от Texas Instruments (США), например, LMX2820

обеспечивают работу блока ЧФД вплоть до 400 МГц [16].

В качестве перспективного направления развития микросхем синтезаторов с ФАПЧ может стать объединение на одном кристалле ЦВС с быстродействующим ЧФД и генератором управляемым напряжением, к тому же современные SiGe БИКМОП тех. процессы такую возможность обеспечивают.

IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечень импортных изделий синтезаторов частоты указывает на то, что зарубежные производители ЭКБ придерживаются концепции «пусть расцветают сто цветов», каждое конкретное техническое воплощение представляет собой пример связки одной или нескольких описанных в статье архитектур. Такой подход выбран с целью поиска наиболее перспективных направлений эволюции архитектурных решений по критерию массовости применения для извлечения максимальной выгоды в случае успеха.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Савченко Е.М., Будяков А.С., Гаранович Д.И., Огурцова К.М. Состояние и перспективы развития интегральных схем программно-конфигурируемых радиочастотных передатчиков / Сб. трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». С.-Петербург 2019 г. М.: ФГАОУВО СПбГЭУ ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина). с. 15-20.
- [2] Chenakin Alexander. (2010). Frequency Synthesizers: Concept to Product. Norwood: Artech House.
- [3] URL: <https://www.macom.com/blog/non-linear-transmission-line-c-2> (дата обращения: 24.08.2021)
- [4] URL: <https://cdn.macom.com/datasheets/MLPNC-7100S1.pdf> (дата обращения: 24.08.2021)
- [5] Murphy E., Slattey C. (2004). All About Direct Digital Synthesis. Analog Dialogue, Vol. 38.

- [6] Spencer, D. T., Drake, T., Briles, T. C., Stone, J., Sinclair, L. C., Fredrick, C., Papp, S. B. (2018). An optical-frequency synthesizer using integrated photonics. Nature, 557(7703), pp.81–85.
- [7] URL: <https://www.movellus.com/all-digital-pll-phase-locked-loop/> (дата обращения: 24.08.2021)
- [8] Савченко Е.М., Будяков А.С., Баландин Д.А. СВЧ МИС генератора, управляемого напряжением X-диапазона частот на основе гетеробиполярного GaAs технологического процесса / Сб. трудов 14-ой Российской научно-технической конференции «Электроника, микро- и нанoeлектроника». Суздаль 2012 г. М.: НИЯУ МИФИ. 2012. С. 284.
- [9] Mirhoseini, A., Goldie, A., Yazgan, M. et al. (2021). A graph placement methodology for fast chip design. Nature 594, pp.207–212.
- [10] Будяков А.С., Свченко Е.М. Особенности разработки ИМС широкополосных делителей частоты / Сб. трудов 11-ой Российской научно-технической конференции. Нижний Новгород 2009 г. М.: НИЯУ МИФИ. 2009. С. 284.
- [11] K. W. Kobayashi et al., A 108-GHz InP-HBT monolithic push-push VCO with low phase noise and wide tuning bandwidth. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 34, no. 9, pp. 1225-1232, Sept. 1999
- [12] O. Chenakin, S. Nediyanath 2017. Fast switching, low phase noise frequency synthesizer. US9628066B1
- [13] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adf4401a.pdf> (дата обращения: 24.08.2021)
- [14] URL:<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC3716.pdf>(дата обращения: 24.08.2021)
- [15] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc704.pdf> (дата обращения: 24.08.2021)
- [16] URL:https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmx2820.pdf?ts=1629792010192&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLMX2820 (дата обращения: 24.08.2021)

Analysis of the Frequency Synthesizers Architecture Evolution

D.A. Balandin, A.D. Kuzmin, N.S. Surkov

JSC “Scientific and production enterprise “Pulsar”, Moscow, balandin@pulsarnpp.ru

Abstract — This article analyzes the most popular schemes and development trends of microwave frequency synthesizers. Two methods of direct frequency synthesis are described. The photonic synthesis is also discussed. The phase locked loop synthesizers are described in detail. The development progression has been reviewed as the creative process of combining already known methods that merge in unique way. The article evaluates modern trends in microwave frequency synthesis solutions that demand low noise and increase in the operating frequency. The synthesizer with low density of spurs in spectrum was suggested.

Keywords — frequency synthesizer, signal generator, low phase noise, microwave frequency, phase-locked loop, architectural solutions, high speed PFD.

REFERENCES

- [1] Savchenko E.M., Budyakov A.S., Garanovich D.I., Ogurtsova K.M. Sostoyanie i perspektivi razvitiya integral'nikh skhem programmno-konfiguriruemikh radiochastotnikh priemopredatchikov (State and development prospects of integrated circuits of software-defined radio frequency transceivers) / Sb. trudov VIII Vserossyiskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Elektronika i mikroelektronika SVCH». S.-Peterbourg 2019. M.: FGAOYVO SPbGEY LETI. s. 15-20.
- [2] Chenakin Alexander. (2010). Frequency Synthesizers: Concept to Product. Norwood: Artech House.
- [3] URL: <https://www.macom.com/blog/non-linear-transmission-line-c-2> (access date: 24.08.2021)

- [4] URL: <https://cdn.macom.com/datasheets/MLPNC-7100S1.pdf> (access date: 24.08.2021)
- [5] Murphy E., Slattery C. (2004). All About Direct Digital Synthesis. Analog Dialogue, Vol. 38.
- [6] Spencer, D. T., Drake, T., Briles, T. C., Stone, J., Sinclair, L. C., Fredrick, C., Papp, S. B. (2018). An optical-frequency synthesizer using integrated photonics. Nature, 557(7703), pp.81–85.
- [7] URL: <https://www.movellus.com/all-digital-pll-phase-locked-loop/> (access date: 24.08.2021)
- [8] Savchenko E.M., Budyakov A.S., Balandin D.A. SVCH MIS generatora, upravlyayemogo napryazheniyem KH-diapazona chastot na osnove geterobipolyarnogo GaAs tekhnologicheskogo protsesssa (Microwave MMIC X-band VCO based on HBT GaAs process) / Sb. trudov 14 Rossyiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektronika, mikro- i nanoelektronika». Syzdal 2012 г.. M.: NIYAU MEPHI. 2012. S. 284.
- [9] Mirhoseini, A., Goldie, A., Yazgan, M. et al. (2021). A graph placement methodology for fast chip design. Nature 594, pp.207–212.
- [10] Budyakov A.S., Savchenko E.M. Osobennosti razrabotki IMS shirokopolosnykh deliteley chastoty (Features of the development of MMIC broadband frequency dividers) / Sb. trudov 11oi Rossyiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektronika, mikro- i nanoelektronika». Nishznii Novgorod 2009. M.: NIYAU MEPHI. 2009. S. 284.
- [11] K. W. Kobayashi et al., A 108-GHz InP-HBT monolithic push-push VCO with low phase noise and wide tuning bandwidth. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 34, no. 9, pp. 1225-1232, Sept. 1999
- [12] O. Chenakin, S. Nediyanath 2017. Fast switching, low phase noise frequency synthesizer. US9628066B1
- [13] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adf4401a.pdf> (access date: 24.08.2021)
- [14] URL:<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC3716.pdf>(access date: 24.08.2021)
- [15] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc704.pdf> (access date: 24.08.2021)
- [16]URL:https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmx2820.pdf?ts=1629792010192&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLMX2820 (access date: 24.08.2021)