

# Горизонты проектирования современных синтезаторов частот

С.А. Бельчиков<sup>1</sup>

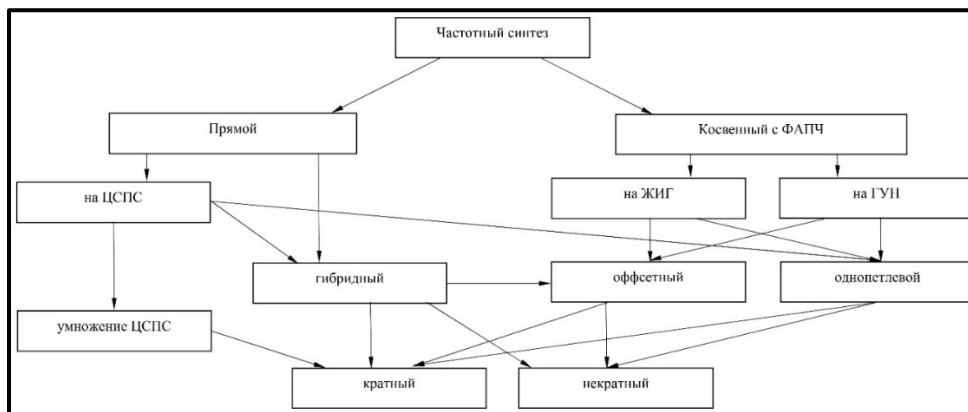
<sup>1</sup>АО ПФ «ЭЛВИРА»

**Аннотация:** в данной работе приведены классификация и обзор схемотехнических решений для построения синтезаторов высоких частот. На примере приборов, разработанных автором, показаны как сложности проектирования, так и достижимые предельные характеристики. Дан прогноз на среднесрочную перспективу.

**Ключевые слова:** синтезаторы частоты, фазовый шум, побочные спектральные составляющие

## 1. Введение

Концептуально существует два больших класса архитектур, основанных на прямом и косвенном методах синтеза радиосигнала (рис. 1). Здесь намеренно не выделяется отдельно метод прямого аналогового синтеза, поскольку с учетом развития цифровых синтезаторов прямого синтеза или ЦСПС (англ. DDS), практически используются только гибридные аналогово-цифровые архитектуры.



**Рисунок 1.** Классификация архитектур построения синтезаторов частоты

Традиционно задачами прямого синтеза частоты являются: достижение максимально возможной скорости перестройки частоты; достижение экстремально низких уровней фазового шума (далее - СПМ ФШ) и побочных спектральных составляющих (ПСС) при этом энергопотребление и массогабариты могут быть компромиссными.

Косвенный синтез частоты строится на базе управляемого генератора (УГ), захваченного системой ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты). Получили распространение как однокольцевые схемы захвата, так и сложные (иногда многокольцевые) системы с преобразованием частоты в петле обратной связи (оффсетные схемы). В качестве УГ обычно используются осцилляторы на железоиттриевых гранатах (ЖИГ) или же генераторы на варикапах, управляемые напряжением (ГУН). Схемы на ГУН обычно применяются в низкобюджетных задачах, схемы на ЖИГ чаще всего используются в измерительной технике.

В предложенной на рис.1 классификации, в числе важнейших упоминается критерий частотной кратности, который подразумевает, что выходной сигнал

формируется с помощью только таких вспомогательных сигналов, частоты которых всегда состоят в отношении строгой математической кратности или друг к другу или к некоторой третьей частоте. Данный принцип позволяет рассчитать все ПСС в выходном сигнале и гарантированно подавить их до любого требуемого уровня. Наибольший эффект от использования метода частотной кратности проявляется в синтезаторах частот, широко использующих смесители, – в косвенных синтезаторах с офсетными схемами и в прямых гибридных синтезаторах.

## 2. Обзор схемотехнических решений косвенного синтеза

Главным преимуществом **косвенного однопетлевого синтеза** является простота и дешевизна реализации. На рынке есть готовые решения (например, микросхемы, LMX259х, ADF437х), которые в рамках одного чипсета предлагают банк из нескольких ГУН, частотно-фазовый детектор (ЧФД) и набор делителей. Главным недостатком однопетлевых решений является повышенный уровень СПМ ФШ и ПСС в пределах петли на выходе синтезатора.

В **некратном косвенном офсетном синтезаторе** из сигнала опорного генератора тем или иным способом формируется сетка **фиксированных** высокочастотных сигналов-подставок с требуемыми параметрами фазового шума. Они используются для преобразования широкополосного сигнала ЖИГ/ГУН в смесителе на промежуточную частоту, которая сравнивается с перестраиваемым узкополосным опорным сигналом синтезатора малого шага в петле ФАПЧ. Все способы формирования малого шага не могут быть рассмотрены в формате данной статьи, самым простым способом является синтез сигнала на ЦСПС. В некратном косвенном синтезе, в зависимости от сложности реализации, может быть получен низкий уровень СПМ ФШ (до -138 дБн/Гц на частоте 10 ГГц, отстройка 10кГц). При этом основной проблемой является повышенный уровень ПСС из-за некратного смещения в петле ФАПЧ. Генерируемые смесителем отклики вида  $m \cdot F_{\text{ОПОРА}} \pm n \cdot F_{\text{ЖИГ}}$  могут попадать в пределы петли ФАПЧ и транслироваться на выход синтезатора. Эти ПСС могут быть снижены только при соблюдении высокого соотношения между частотами ЖИГ (СВЧ опоры) и ПЧ ( $n(m) \geq 20$ ) и (или) при использовании смесителей с повышенной линейностью

В основе **кратного косвенного синтеза** лежит идея гармонического частотного плана, где **перестраиваемые с малым шагом** частоты опорных сигналов-подставок и сигнала УГ являются разными гармониками частоты сравнения. Если выразить перестройку частоты сравнения как  $F_{\text{МАКС}} - F_{\text{МИН}}$  и умножить ее на целое число  $N$ , то при  $N = 1 / ((F_{\text{МАКС}} / F_{\text{МИН}}) - 1)$ , диапазоны соседних гармоник частоты сравнения с номерами  $N$  и  $(N+1)$  окажутся состыкованными. Данная точка является началом непрерывного перекрытия по частоте (началом рабочей октавы синтезатора). При построении кратного косвенного синтезатора удобно формировать все используемые частоты из одной базовой перестраиваемой гармоники с номером  $N$ , из которой с минимальными аппаратными затратами синтезируются все остальные гармоники, включая первую. Эта базовая гармоника  $N$  представляет собой ядро кратного синтезатора и определяет все его итоговые характеристики. Для достижения минимальных уровней СПМ ФШ и ПСС системы такое ядро целесообразно формировать на высокой частоте при помощи единственного некратного частотного преобразования при значениях  $n(m) \geq 20$ , используя при необходимости смеситель с повышенной линейностью.

Классическими примерами удачной реализации схемы **кратного косвенного офсетного синтеза** являются модульный прибор на ГУН QuickSyn FSW0020 от компании Phasematrix, США, и настольный генератор MG362х1А от компании Anritsu, США. Автором обоих решений является известный специалист по частотному синтезу

А. Ченакин (Anritsu, США). В более позднем варианте MG362x1A заявляется достигнутый уровень СПМ ФШ в -140 дБн/Гц (на 10 ГГц, отстройка 10 кГц) при типовых ПСС ниже -90дБ, что является на сегодняшний день рекордом для косвенных синтезаторов частот.

При непосредственном участии автора данной статьи по техническому заданию заказчика был разработан компактный синтезатор частот на ЖИГ **TRIYXS-0110** на диапазон (0.1-10) ГГц (габариты 183мм x 122мм x 40мм), также использующий методы **кратного косвенного синтеза**. При формировании генератора-подставки в ядре с гармоническим номером  $N=2^5$  был использован умноженный кварцевый термостатированный генератор с умеренно-низким шумом -175дБн/Гц. В качестве синтезатора малого шага была применена коммерчески доступная микросхема ЦСПС с шумом -150 дБн/Гц. Использование офсетной схемы с кратным синтезом позволило добиться сбалансированных параметров СПМ ФШ и ПСС выходного сигнала при скорости перестройки в 5 мс. СПМ ФШ на частотах 1 ГГц и 10 ГГц на отстройке 10кГц составила менее -148 дБн/Гц и -130 дБн/Гц соответственно, типовой уровень ПСС менее -90дБ. По основным синтезаторным характеристикам данный модульный синтезатор частот находится на уровне настольного прибора SMA100B класса high-end производства компании Rohde & Schwarz, Германия.

Дальнейшее улучшение характеристик косвенных офсетных синтезаторов предполагает все более широкое использование методов прямого синтеза для снижения шумов УГ. При этом компоненты петли ФАПЧ (например, ЧФД) начинают выступать лимитирующим звеном системы. УГ при этом используется лишь как селективный фильтр ПСС, характеризующийся высокой степенью инерции. Для достижения определенного уровня характеристик (СПМ ФШ ниже -140дБн/Гц на частоте 10 ГГц, время перестройки по частоте ниже 1мкс) следует переходить в прямой синтез.

### 3. Обзор схемотехнических решений прямого синтеза

В **прямом кратном синтезе** есть три архитектуры, которые имеют разный уровень сложности и позволяют реализовать разный уровень итоговых параметров синтезатора. Первый тип архитектуры – это **бинарное умножение широкополосных октавных ЦСПС**, реализованное в настольных генераторах серии UXG Keysight Technologies. Итоговые характеристики указанной серии приборов полностью определяются параметрами специализированных интегральных ЦСПС собственного производства данной компании. К достоинствам приборов следует отнести малое время переключения при перестройке по частоте (50-380нс) при сохранении фазовой когерентности выходного сигнала. Значения СПМ ФШ и ПСС лимитированы технологией производства ЦСПС и являются компромиссными: СПМ ФШ -128дБн/Гц на частоте 10ГГц (отстройка 10кГц) и ПСС -90дБ соответственно.

Более интересной является архитектура прямого синтеза, построенная на **каскадировании блоков расширения диапазонов перестройки (БРДП)**. Термин БРДП и сама идея их каскадирования были предложены известным отечественным специалистом по частотному синтезу Бариновым Д.А. (ЗАО НПЦ «Алмаз-Фазотрон»), которому также принадлежит патент на одну из реализаций синтезатора частот в соответствии с данным методом. БРДП состоит из смесителя, на который подается входная частота  $F$ , делителя с переменным коэффициентом деления (ДПКД), который подключен ко входу ПЧ смесителя, и блока полосовых фильтров, который на выходе смесителя выделяет полезную составляющую  $F \cdot (1+1/N)$ . Действие БРДП эквивалентно дробному умножению входной частоты с переменным коэффициентом  $(1+1/N)$ . Расчет коэффициентов деления для каждого БРДП представляет собой сложную итерационную процедуру. Математические выражения для расчета не могут

быть приведены полностью из-за ограниченного формата данной статьи. Конечной целью каскадирования нескольких ячеек БРДП является достижение итогового значения относительной перестройки  $\geq 2$  (октавное перекрытие). В наиболее эффективных вариантах реализации октавного синтезатора количество БРДП не превышает трех-четырех. При смешении во всех ячейках БРДП всегда участвуют только кратные частоты. Следовательно, нежелательные продукты частотного преобразования могут генерироваться только на частотах  $F_{(i)}/N$ , где  $F_{(i)}$  частота входа в соответствующий БРДП $_{(i)}$ . Таким образом, могут быть однозначно определены требования к фильтрам, которые гарантированно ослабят аналоговые ПСС до любых требуемых значений. Схема кратного прямого синтеза с каскадированием БРДП способна обеспечить низкий уровень ПСС и СПМ ФШ (-140...-135)дБн/Гц на отстройке 10 кГц для 10 ГГц, а также малое время переключения частоты сигнала (не превышает нескольких сотен наносекунд). Одновременно данная схема характеризуется высоким шумовым полом (-145дБн/Гц на отстройках (0.1-10) МГц) из-за недостаточно низких шумов ДПКД. Также к недостаткам схем на БРДП следует отнести возможные скачки фазы выходного сигнала при смене коэффициентов деления в ДПКД при перестройке синтезатора по частоте, которые в ряде радиотехнических задач могут оказаться нежелательными или неприемлемыми.

Автор данной статьи разработал модули синтезаторов частот для гетеродинирования частотных преобразований в анализаторах спектра СК4-БЕЛАН 240М/400М/500М АО ПФ «ЭЛВИРА» нового поколения (выпускаются с 2022 года). Реализованы диапазоны частот (3-12,5)ГГц и (8-16)ГГц в соответствии с идеологией **прямого кратного частотного синтеза с каскадированием БРДП**. В отличие от схемы патента Барина Д.А., в указанных синтезаторах частот не используются ДПКД. Вместо них используются отключаемые статические делители, т.к. в БРДП используются только два или четыре значения коэффициента деления. Входной сигнал БРДП разветвляется на соответствующие отключаемые статические делители при помощи группы направленных ответвителей. Полезные продукты частотного деления собираются на выходе делителей при помощи сумматоров мощности. В блоках полосовых фильтров используется оригинальное решение по встраиванию в копланарные линии передачи ППФ на встречно-штыревых резонаторах. В качестве синтезатора малого шага используется ЦСПС на дискретных элементах (цифровое ядро на ПЛИС отдельно, ЦАП отдельно) с ПСС -100дБн в полосе перестройки (0-500) МГц. В качестве сигнала гетеродина для первого смешения используется два варианта СВЧ опоры 5 ГГц. Первый вариант - умножение в диапазон С сверхмалошумящего кварцевого генератора 100 МГц (получен уровень СПМ ФШ на 5 ГГц -144дБн/Гц на 10кГц). Второй (опциональный) - сверхмалошумящий генератор на ДР, стабилизируемый от 100 МГц (получен уровень СПМ ФШ на 5 ГГц -154дБн/Гц на 10кГц). СПМ ФШ синтезатора частот в базовом исполнении составила -136дБн/Гц на частоте 10 ГГц (отстройка 10кГц). Типовое время перестройки частоты синтезатора на любое значение не превышает 50нс.

Альтернативой прямому синтезу, построенному на бинарном умножении октавных ЦСПС, или каскадировании БРДП, является **прямой кратный частотный синтез на гармониках** с фиксированными номерами. Ключевым преимуществом этой схемы является возможность формирования базовой гармоникой с предельно низким уровнем СПМ ФШ за счет использования сверхмалошумящего опорного сигнала-подставки, реализованного непосредственно в С или Х диапазоне. Автором данной статьи для базовой перестраиваемой гармоникой (относительная перестройка  $< 3,5\%$ ) получены значения СПМ ФШ в -152дБн/Гц на частотах 6-6,2 ГГц (отстройка 10кГц). Базовая гармоника синтезирована при помощи смешения опорного сигнала-подставки 6,4 ГГц (сверхмалошумящий генератор на ДР шепчущей галереи) с синтезатором

малого шага с ПСС <-100дБ. Указанный уровень характеристик позволяет обеспечить на выходе синтезатора на частоте 10 ГГц СПМ ФШ в -148дБн/Гц (отстройка 10 кГц) и ПСС <-90дБ. Время перестройки частоты синтезатора не превышает нескольких сотен наносекунд. В базовом варианте разрывы фазы при переключении частоты в пределах рабочей октавы отсутствуют, поскольку делители с программируемым коэффициентом деления (ДПКД) не используются. В качестве устройств деления узкополосного сигнала базовой гармонике используются аналоговые регенеративные делители, обеспечивающие минимальный уровень вносимых фазовых шумов. Следовательно, аналоговые ПСС в рабочей октаве могут появиться только на частотах, отстоящих от полезного сигнала на величину минимального гармонического шага. Для обеспечения подавления ПСС >90дБ были реализованы фильтры на встречно-штыревых резонаторах девятого порядка и выше. Эти и другие сложности реализации метода следует отнести к недостаткам самого метода.

#### **4. Заключение**

Опыт проектирования и серийного производства приборов, использующих архитектуру прямого кратного синтеза, позволяет уверенно говорить о возможности реализации синтезаторов частот с низким уровнем СПМ ФШ в ближней зоне (от -148дБн/Гц до -135дБн/Гц на частоте 10 ГГц на отстройке 10 кГц), низкими ПСС (до -100дБ) и наносекундной скоростью перестройки. Сравнение достижимых характеристик для разных архитектур прямого и косвенного синтеза, приведенное в данном обзоре, показывает, что прямой синтез является единственным видом синтеза, в котором можно одновременно обеспечить минимально возможные фазовые шумы и время перестройки по частоте при сохранении низкого уровня ПСС. Системно используемый принцип кратности является фундаментом обеспечения низкого уровня ПСС при проектировании синтезаторов прямого синтеза. При этом основными факторами, ограничивающими дальнейший рост характеристик гибридных прямых синтезаторов, являются ограничения по шумам и полосе частот со стороны цифровой элементной базы (микросхемы ЦСПС, ЦАП, делителей). Аппаратные затраты, связанные с реализацией архитектур прямого синтеза, на сегодняшний день остаются сравнительно высокими. Приборы, использующие архитектуру прямого синтеза, относятся к верхнему ценовому сегменту. Одновременно за последние годы наметилась устойчивая тенденция к снижению аппаратных затрат прямого синтеза за счет совершенствования цифровых и СВЧ технологий. При сохранении данной тенденции на горизонте десяти лет архитектура прямого синтеза станет преобладающей в сегменте измерительной техники класса high-end, вытеснив косвенный офсетный синтез на ЖИГ. В более отдаленной перспективе вероятно появление преимущественно цифровых синтезаторов прямого синтеза, использующих сверхширокополосные ЦСПС, тактируемые сигналами в диапазоне 80-100 ГГц. Источниками подобных сверхчистых сигналов тактовой частоты в будущем могут послужить умноженные генераторы на высокочастотных диэлектрических (например, лейкоапфировых) резонаторах шепчущей галереи (в том числе, с использованием криогенных методов) или генераторы, построенные с применением оптических методов, например, на фемтосекундных оптических гребенках.

**Таблица 1.** Сравнение методов синтеза по достижимым характеристикам

<b>Тип архитектуры синтеза</b>	<b>Уровень СПМ ФШ (частота 10 ГГц, отстройка 10 кГц)</b>	<b>Типовой относительный уровень ПСС</b>	<b>Время переключения частоты</b>	<b>Уровень аппаратных затрат реализации</b>
Косвенный однопетлевой синтез (ГУН)	-130...-115дБн/Гц	-80...-70дБ	~5-20 мкс	низкий или средний
Косвенный офсетный некратный синтез (ЖИГ)	-138...-128дБн/Гц	-90...-80дБ	1-5 мс	средний или умеренно высокий
Косвенный офсетный кратный синтез (ЖИГ)	-140...-130дБн/Гц	<-100дБ	1-5 мс	средний или умеренно высокий
Прямое умножение ЦСПС	-128...-120дБн/Гц	-70...-60дБ	~50-380 нс	средний или умеренно высокий