

# Малогабаритный синтезатор частот с высокой скоростью перестройки и «ЧИСТЫМ» СИГНАЛОМ

Александр ЧЕНАКИН,  
к. т. н.  
achenakin@phasematrix.com

**Синтезаторы частот — исключительно важные функциональные узлы многих систем, от коммерческих сетей связи до испытательно-измерительных стендов [1]. Бурное развитие электронных систем обуславливает необходимость постоянного улучшения технических характеристик, расширения функциональных возможностей, уменьшения габаритов, энергопотребления и стоимости их отдельных элементов, в частности, синтезаторов частот.**

Современные синтезаторы должны обеспечивать широкий диапазон генерируемых частот с малым шагом, низкими фазовыми шумами и побочными спектральными составляющими. Однако особым требованием и, по сути, тенденцией развития частотных синтезаторов в настоящее время является увеличение скорости перестройки. Время, требуемое для перестройки с одной частоты на другую, является критическим параметром, так как обычно не может быть использовано для приема или передачи сигнала. Новые поколения систем связи имеют большую пропускную способность, а значит, требуют все более высоких скоростей перестройки. Даже для традиционно «медленных» измерительных приборов необходимо увеличение скорости перестройки для более быстрого сканирования в рабочем диапазоне частот. Время переключения новейших систем должно измеряться десятками микросекунд при сохранении чистоты спектра выходных колебаний (то есть уровня фазовых шумов и побочных спектральных составляющих), присущей синтезаторам

с большим временем переключения [2, 3]. Несмотря на все возрастающие требования к основным техническим характеристикам, также ожидается снижение стоимости устройств, как это показано на рис. 1. Все эти факторы, безусловно, влияют на выбор архитектурных и схемотехнических решений при проектировании синтезаторов.

В аналоговых синтезаторах частот прямого синтеза достигается хорошее сочетание скорости переключения и чистоты спектра [4]. Однако большой объем аппаратных средств и, соответственно, высокая стоимость ограничивают широкое применение синтезаторов этого типа. Архитектуры косвенного синтеза на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) получили гораздо более широкое распространение из-за относительной простоты реализации и существенно меньшей стоимости. Исторически в высококачественных СВЧ-синтезаторах (в частности, инструментальных) использовались ЖИГ-генераторы (то есть использующие резонаторы на основе железо-иттриевого граната): они отличаются широким диапазоном генерируемых частот и низкими фазовыми шумами. Однако высокое энергопотребление, относительно большие размеры, высокая стоимость и, что особенно важно, низкая скорость перестройки, характерная для ЖИГ-генераторов, обуславливают переход на архитектуры, ориентированные на применение генераторов, управляемых по частоте напряжением (ГУН), в которых низкие уровни шумов достигаются за счет использования маломощных опорных генераторов.

В настоящее время в современных коммерчески доступных термостатированных кварцевых генераторах с частотой 100 МГц достигнуты исключительно низкие уровни фазовых шумов: от  $-160$  до  $-180$  дБн/Гц при

отстройках на 10 кГц от несущей. Это теоретически эквивалентно от  $-120$  до  $-140$  дБн/Гц при пересчете на 10 ГГц, что даже превосходит собственные шумовые характеристики ЖИГ-генераторов.

Еще более низкие шумы (а это особенно актуально для более высокой частоты отстройки) могут быть получены при использовании высокочастотного опорного сигнала путем комбинирования низкочастотного кварцевого и высокочастотного (например, на основе диэлектрического резонатора) генераторов. Однако практически обеспечить такой идеальный перенос частоты опорного генератора с помощью ФАПЧ — далеко нетривиальная задача, требующая новых и неординарных для техники синтеза частот решений.

Такие нетрадиционные решения используются в новых прецизионных синтезаторах частот QuickSyn компании Phase Matrix, в которых достигается уникальное сочетание высокой скорости перестройки, исключительно низкого уровня фазовых шумов, низкого уровня побочных спектральных составляющих и низкой стоимости [5]. В противоположность традиционному подходу (при котором стремятся минимизировать коэффициент деления частоты в кольце ФАПЧ) в синтезаторах QuickSyn используется более радикальное решение, состоящее в полном удалении делителя частоты из цепи обратной связи ФАПЧ. Более того, коэффициент деления ФАПЧ инвертируется путем замены делителя на умножитель, что приводит не к деградации, а наоборот, к подавлению шумов отдельных элементов ФАПЧ (в частности, шумов фазового детектора). Это позволяет достигнуть существенного снижения фазовых шумов, которые в данном случае в основном определяются шумами используемого опорного генератора. При этом полоса

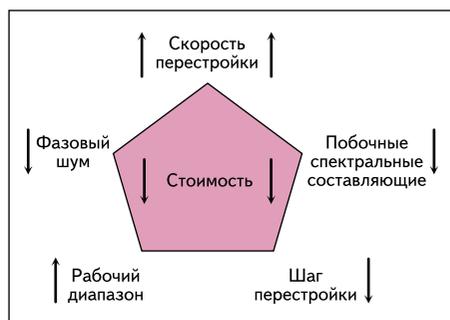


Рис. 1. Факторы, влияющие на выбор архитектурных и схемотехнических решений при проектировании современных синтезаторов частот



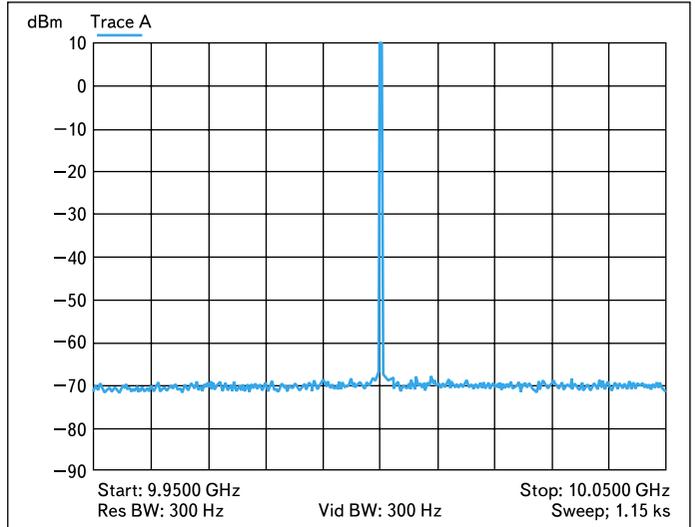
**Рис. 2.** Синтезатор частот QuickSyn, в котором сочетаются высокие показатели качества и широкие функциональные возможности с компактным исполнением

пропускания фильтра ФАПЧ существенно расширяется по сравнению с обычными конструкциями синтезаторов (с целью подавления собственных шумов ГУН до уровня, сравнимого с шумами ЖИГ-генератора), в результате чего достигается значительное повышение скорости перестройки и эффективное подавление вибрационных помех (известных как «микрофонный эффект»). Эти решения в сочетании с применением высокостабильного, малошумящего опорного генератора позволяют достичь одновременно высокой скорости перестройки и метрологического уровня чистоты спектра без использования дорогостоящих и крупногабаритных компонентов. В итоге все это позволило создать компактное и изящное устройство, которое имеет исключительно высокие показатели качества и расширенные функциональные возможности (рис. 2).

Линейка синтезаторов QuickSyn на данный момент представлена двумя моделями: FSW-0010 и FSW-0020, работающими в частотных диапазонах 0,5–10 и 0,5–20 ГГц (с возможностью расширения до 0,1 и 0,2 ГГц соответственно). Генерация сигнала производится с помощью высокочастотного ГУН; при этом требуемое частотное перекрытие обеспечивается без использования умножения (для которого характерно наличие субгармоник в выходном спектре). Применение передовой технологии цифрового вычислительного синтеза (ЦВС) позволяет получить высокое разрешение по частоте (0,001 Гц) без обычного в таких случаях снижения скорости перестройки. Поскольку схемы с применением ЦВС склонны к формированию относительно высоких побочных спектральных составляющих, были предприняты специальные меры (как на аппаратном, так и на программном уровнях) для подавления этих составляющих до исключительно низких значений (вплоть до –80 дБн), как показано на рис. 3. Схема распределенного усиления выходной мощности с последующей фильтрацией обеспечивает снижение уровня гармоник до уровня –35...–45 дБн.

Типичный уровень фазового шума, измеренного на выходной частоте 10 ГГц при отстройке 10 кГц, составляет менее –120 дБн/Гц (рис. 4). На более низкой частоте шумы дополнительно улучшаются за счет использования частотного деления. Как уже отмечалось, высокая чувствительность к вибрационным помехам, свойственная ЖИГ-генераторам, также существенно уменьшена благодаря использованию ГУН (обладающего небольшой массой) и очень широкой полосы фильтра ФАПЧ.

Скорость перестройки синтезатора частот QuickSyn также существенно (на несколько порядков) выше по сравнению с обычными синтезаторами на ЖИГ-генераторах. Для аппаратной части кольца ФАПЧ достаточно нескольких десятков микросекунд (это время зависит от требуемой точности), чтобы установить необходимое значение выходной частоты. Цифровая обработка сигнала вносит дополнительную задержку, которая нужна, чтобы принять команды настройки, выполнить необходимые вычисления и запрограммировать отдельные узлы синтезатора, внести коррекцию выходной

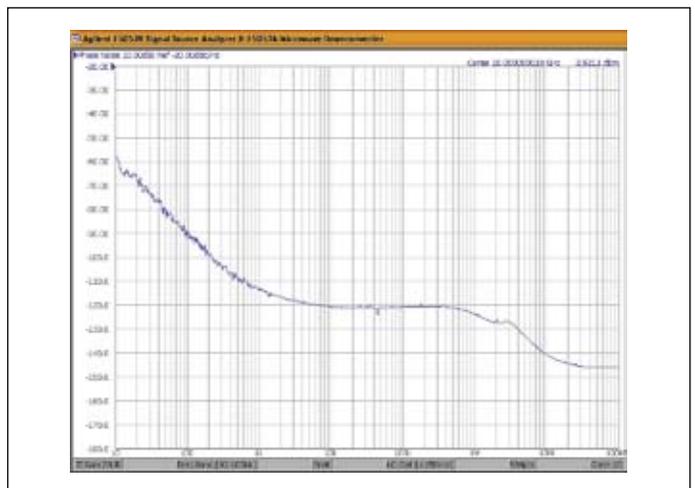


**Рис. 3.** QuickSyn генерирует «чистый» сигнал с исключительно низким уровнем побочных спектральных составляющих

амплитуды сигнала и, наконец, проконтролировать наличие захвата частоты. В результате полное время установления частоты в этом режиме специфицировано на уровне 200 мкс.

Однако большая часть этих задержек может быть сокращена или полностью исключена при использовании режима переключения по списку с внешним запуском (triggered list mode). Этот режим удобен, когда известны значения переключаемых частот. В этом случае заранее вычисляются и заносятся в память все параметры, необходимые для управления отдельными узлами синтезатора при переключении частот, что позволяет существенно снизить время переключения, составляющее в этом режиме менее 100 мкс. Следует отметить, что приведенные специфицированные значения выбраны с большим запасом и характеризуют максимальное время перестройки при любом сценарии переключения частот (то есть с любой частоты на любую во всем рабочем диапазоне частот).

Синтезатор обеспечивает выходную мощность, достаточную обычно для практического применения без использования внешнего усилителя (+15 дБм и +13 дБм для моделей FSW-0010 и FSW-0020 соответственно). Предусмотрена возможность калибровки и последующей регулировки уровня выходного сигнала при помощи встроенного аттенуатора и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Синтезатор содержит также схему температурной коррек-



**Рис. 4.** Синтезатор частоты QuickSyn демонстрирует фазовые шумы ниже –120 дБн/Гц при 10-Гц отстройке от выходной частоты 10 ГГц

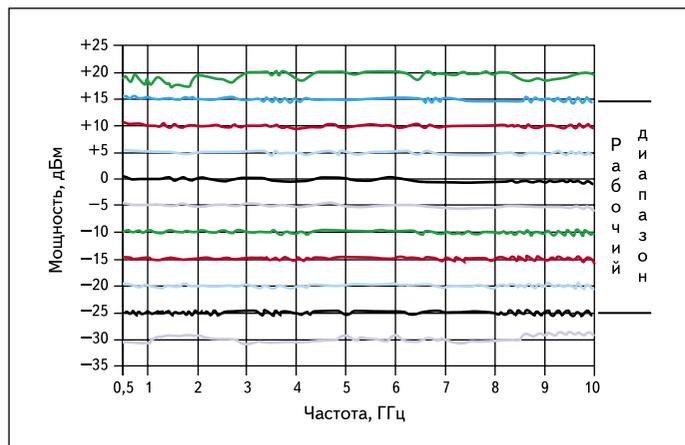


Рис. 5. Регулировки уровня выходного сигнала

ции, что позволяет получить стабильные характеристики выходной мощности во всем диапазоне рабочих частот и температур, как показано на рис. 5. Дополнительный аналоговый вход управления мощностью (через вход амплитудной модуляции) позволяет реализовать замкнутое кольцо автоматической регулировки мощности (АРМ). После добавления внешнего направленного ответвителя и СВЧ-детектора выходное напряжение этого детектора может быть подано на аналоговый вход управления мощностью, чтобы замкнуть кольцо обратной связи. В такой конфигурации гарантируется инструментальный уровень точности поддержания выходной мощности независимо от степени согласования с нагрузкой.

Внутренний высокостабильный опорный генератор может быть использован для синхронизации внешних устройств. Для этого в синтезаторе предусмотрен делитель на 10, который делит частоту опорного генератора до 10 МГц с выводом на внешнюю панель прибора. Частота опорного генератора калибруется с очень высокой точностью по сигналу GPS. Также предусмотрена программная корректировка внутреннего опорного генератора, что позволяет скомпенсировать уход частоты при старении. В свою очередь, внутренний опорный генератор может

быть синхронизирован внешним опорным сигналом частотой 10 МГц. В этом режиме QuickSyn автоматически определяет наличие внешнего опорного сигнала и осуществляет необходимое переключение внутренних цепей для синхронизации.

Встроенный 32-битный, 200-МГц центральный процессор с RISC-архитектурой обеспечивает выполнение всех вычислительных операций, необходимых для перестройки по частоте, а также множество дополнительных функций, таких как калибровка и управление выходной мощностью, линейное изменение во времени (сви́пирование) выходной частоты и мощности, изменение частоты и выходной мощности по любому требуемому алгоритму с возможностью внешнего запуска (triggered list mode), подавление сигнала во время переключения частот (blanking) и др. Более того, в синтезаторе частот QuickSyn предусмотрены режимы амплитудной, частотной, фазовой и импульсной модуляций, что делает его одним из самых универсальных среди доступных в настоящее время синтезаторов частот в модульном исполнении. По сути, QuickSyn обеспечивает технические характеристики и функциональные возможности, присущие инструментальным генераторам сигналов при существенно меньших габаритах и стои-



Рис. 6. Встроенный USB-интерфейс позволяет использовать QuickSyn в качестве инструментального генератора сигналов

мости. Поддерживается большое количество различных интерфейсов, включая SPI, осуществляющий дуплексную связь с высокой пропускной способностью. Дополнительная возможность связи через порт USB обеспечивает простой и привычный контроль синтезатора с помощью персонального компьютера (рис. 6).

Синтезатор частот QuickSyn выполнен в металлическом корпусе с размерами 127×178×25,4 мм (5×7×1 дюйм). Питание осуществляется от одного источника постоянного напряжения +12 В, потребляемая мощность в стационарном режиме не превышает 20 Вт. Специально разработанные встроенные активные фильтры обеспечивают эффективное подавление помех источника питания, что при необходимости позволяет использовать импульсный источник питания.

Итак, в синтезаторах частот СВЧ-диапазона QuickSyn применяются современные компоненты и передовые технические решения, обеспечивающие исключительно высокие технические характеристики для данного класса приборов, в частности, высокую скорость перестройки и низкий уровень фазовых шумов. Улучшенные характеристики, расширенные функциональные возможности и небольшие габариты делают синтезатор частот QuickSyn идеальным модулем при проектировании и изготовлении различных систем связи, а также измерительных приборов. ■

## Литература

1. Browne J. Frequency Synthesizers Tune Communications Systems. *Microwaves & RF*. March 2006.
2. Regazzi J., Gill R. Signal Generator Melds Speed with Low Phase Noise. *Microwaves & RF*. Oct. 2006.
3. Chenakin A. Frequency Synthesis: Current Solutions and New Trends // *Microwave Journal*. May 2007.
4. Manassewitsch V. Frequency Synthesizers Theory and Design. 3-d Ed. New York: John Wiley & Sons, 1987.
5. Chenakin A. A Compact Synthesizer Module Offers Instrument-grade Performance and Functionality // *Microwave Journal*. Feb. 2011.