

ЧАСТОТНЫЙ СИНТЕЗ: ТЕКУЩИЕ РЕШЕНИЯ И НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Синтезатор частоты является ключевым элементом практически любой системы связи, измерения и контроля [1–5]. Традиционно синтезаторы подразделяют на две основные группы: аналоговые и цифровые. Вместе с тем, есть и комбинированные решения, в которых используют как аналоговые, так и цифровые электронные элементы. В предлагаемой статье рассказывается о современных технологиях построения частотных синтезаторов СВЧ-диапазона, рассматриваются особенности различных синтезаторов, их технические ограничения и возможные инженерные решения.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗАТОРОВ

При проектировании современных синтезаторов частоты нужно учитывать ряд требований к их характеристикам.

Частотный диапазон и разрешение. Широкая полоса частот и высокое разрешение (ниже 1 Гц) – обязательные характеристики измерительных инструментов: лабораторных генераторов частоты, анализаторов спектра и т. д. Представляется целесообразной разработка универсального широкодиапазонного синтезатора, который можно использовать во многих применениях.

Выходная мощность. Необходимый уровень выходной мощности варьируется в широких пределах – в зависимости от конкретного применения. Обычно синтезатор используют в качестве источника опорного сигнала смесителя в различных системах частотного преобразования. Как правило, достаточно 10–17 дБм, хотя некоторые схемы требуют более высокой мощности.

Негармонические искажения. Под искажениями понимаются негармонические спектральные составляющие, создаваемые синтезатором на отдельных дискретных частотах. Местоположение и уровень этих составляющих определяются архитектурой конкретного синтезатора. В микроволновых системах связи негармонические искажения могут ограничить способность приемного устрой-

А.Ченакин, к.т.н

ства выделять, а затем и обрабатывать принимаемый сигнал. Поэтому уровень негармонических спектральных составляющих синтезатора минимизируется и, как правило, не превышает -60 дБн относительно уровня основного сигнала, хотя в ряде случаев его необходимо снижать до -80 дБн и более. Это обуславливает определенные требования к проектированию частотного синтезатора, и в результате часто ухудшаются другие параметры, в частности уровень фазового шума, разрешение по частоте и скорость перестройки.

Фазовый шум и стабильность – одни из главных параметров, которые ограничивают чувствительность приемных систем. Стабильность синтезатора и фазовый шум определяются опорным сигналом, а также архитектурой синтезатора. В синтезаторах, где применяется фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ), эти параметры зависят также от используемого перестраиваемого генератора.

Скорость перестройки определяет, как быстро синтезатор может быть перестроен с одной частоты на другую. Время, требуемое для перестройки, является критическим параметром, так как обычно не может быть использовано для обработки сигнала. Новые поколения систем связи имеют большую пропускную способность, а значит – требуют все более высоких скоростей переключения (часто в микросекундном диапазоне). Даже традиционно "медленные" измерительные приборы требуют увеличения скорости перестройки. Характерным примером является новый векторный сетевой анализатор, содержащий четыре независимых высокоскоростных синтезатора частоты [6].

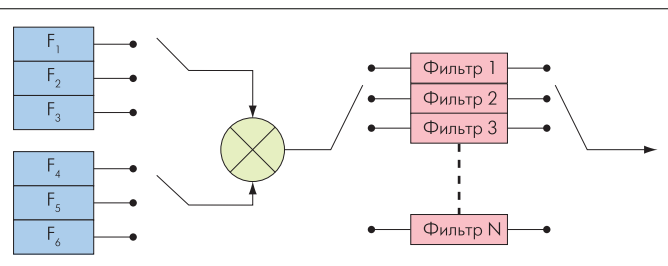


Рис. 1. Аналоговый синтезатор

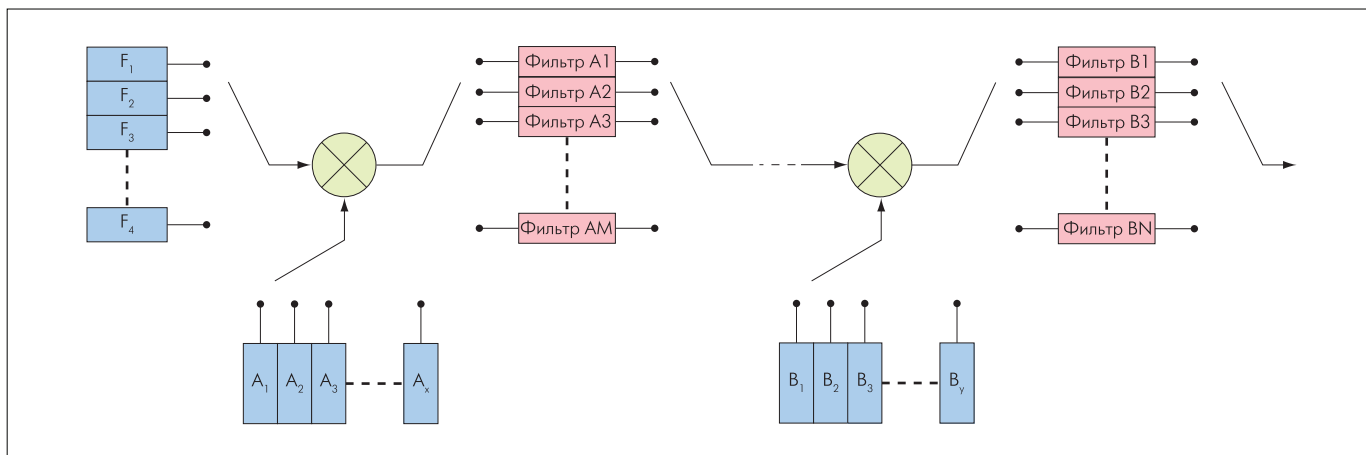


Рис.2. Аналоговый синтезатор с дополнительными смесительными каскадами

Потребление энергии и габариты. Размеры современного оборудования постоянно минимизируются, а потребляемая ими энергия снижается. Новые разработки должны использовать микросхемы с высокой степенью интеграции и малой потребляемой мощностью.

Вероятно, ключевыми параметрами в разработке новых поколений синтезаторов частоты будут микросекундный диапазон скорости перестройки (вместе с малыми шумами и искажениями!) и низкая стоимость.

Ниже рассматриваются различные архитектуры и особенности построения частотных синтезаторов. Особое внимание уделяется техническим решениям, направленным на увеличение скорости перестройки, а также уменьшение стоимости синтезатора.

АНАЛОГОВЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ

Основной функцией любого синтезатора является преобразование опорного сигнала (reference) в требуемое количество выходных сигналов. Аналоговые синтезаторы (Direct Analog Synthesizers) реализуются путем смешения отдельных базовых частот с их последующей фильтрацией (рис.1). Базовые частоты могут быть получены на основе низкочастотных (кварцевые и ПАВ-резонаторы) или высокочастотных (диэлектрический, сапфировый, волноводный, керамический резонаторы) генераторов посредством умножения, деления или фазовой автоподстройки частоты [7].

Ключевым преимуществом аналоговых синтезаторов является чрезвычайно высокая скорость переключения, лежащая в микро- или даже наносекундном диапазоне. Другое преимущество – использование компонентов (например, смесителей) с исключительно малым уровнем собственных шумов по сравнению с источниками базовых частот. Таким образом, шумы аналогового синтезатора определяются в основном шумами используемых базовых источников и могут быть весьма низкими.

Основной недостаток указанной топологии – ограниченный диапазон и разрешение по частоте. В нашем примере (см. рис.1) генерируется не более 18 выходных частот

(даже если используются обе боковые полосы смесителя). Количество генерируемых сигналов можно увеличить, введя большее число базовых частот и/или смесительных каскадов (рис. 2). Однако такой подход требует большего числа компонентов и, следовательно, усложняет систему.

Эффективным решением является использование цифрового синтезатора (Direct Digital Synthesizer – DDS) для увеличения минимального частотного шага, требуемого от аналоговой части (рис. 3).

Еще одна серьезная проблема – множество нежелательных спектральных составляющих, которые генерируют смесительные каскады. Они должны быть тщательно отфильтрованы. Необходимо также обеспечить изоляцию переключаемых фильтров. Существует немало различных схем организации смесителей и фильтров, и все они, как правило, требуют большого числа компонентов для обеспечения малого частотного шага и широкого диапазона частот. Таким образом, хотя аналоговые синтезаторы и предлагают исключительно высокую скорость перестройки и малые шумы, их использование ограничено из-за довольно высоких стоимостных характеристик.

ЦИФРОВЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ

В отличие от традиционных (аналоговых) решений, цифровые синтезаторы используют цифровую обработку для конструи-

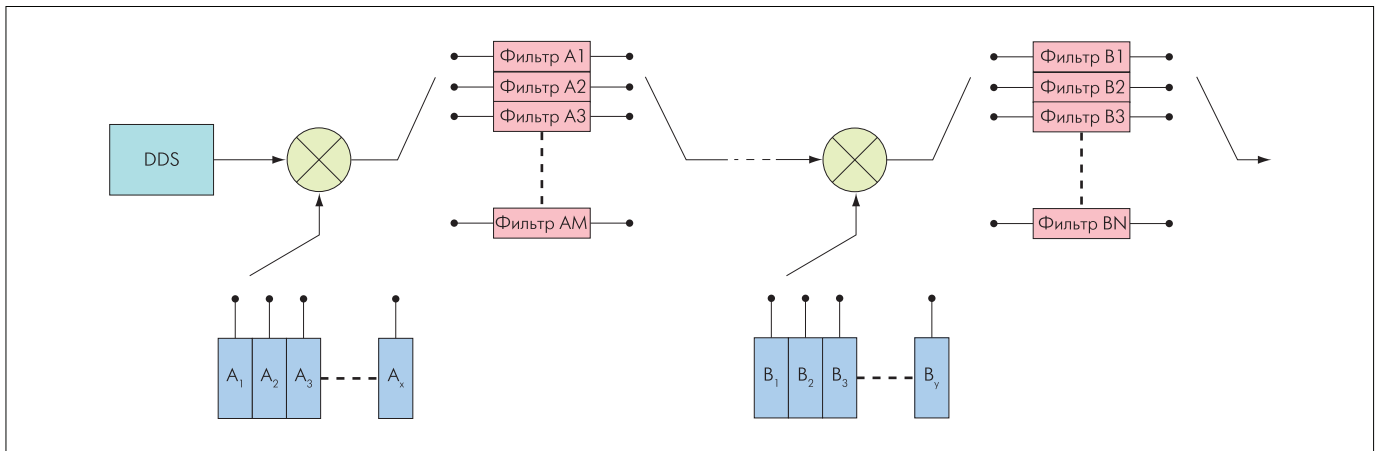


Рис.3. Аналоговый синтезатор с дополнительными смесительными каскадами и цифровым синтезатором в качестве генератора базовых частот

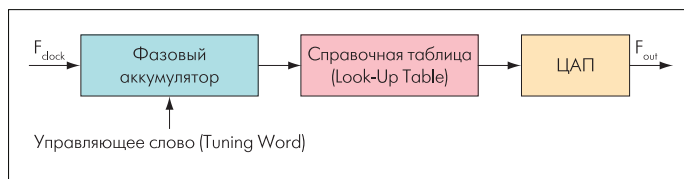


Рис.4. Аналоговый синтезатор

рования требуемой формы выходного сигнала из базового (тактового) сигнала [8]. Сначала с помощью фазового аккумулятора создается цифровое представление сигнала, а затем генерируется и сам выходной сигнал (синусоидальной или любой другой желаемой формы) посредством цифроаналогового преобразователя (ЦАП) (рис.4). Скорость генерации цифрового сигнала ограничена цифровым интерфейсом, но весьма высока и сопоставима с аналоговыми схемами. Цифровые синтезаторы также обеспечивают довольно малый уровень фазовых шумов. Однако основным достоинством цифрового синтезатора является исключительно высокое разрешение по частоте (ниже 1 Гц), определяемое длиной фазового аккумулятора.

Главные недостатки – ограниченный частотный диапазон и большие искажения сигнала. В то время как нижняя граница рабочего диапазона частот цифрового синтезатора находится близко к нулю герц, его верхняя граница, в соответствии с критерием Найквиста, не может превышать половины тактовой частоты. Кроме того, реконструкция выходного сигнала невозможна без фильтра нижних частот, ограничивающего диапазон выходного сигнала приблизительно до 40% тактовой частоты.

Другая серьезная проблема – высокое содержание нежелательных спектральных составляющих из-за ошибок преобразования в ЦАП. С этой точки зрения цифровой синтезатор ведет себя как частотный смеситель, генерирующий побочные составляющие на комбинационных частотах. В то время как частотное местоположение этих составляющих можно легко вычислить, их амплитуда гораздо менее предсказуема. Как правило, искажения более низкого порядка имеют наиболее высокую амплитуду. Тем не менее, искажения высокого

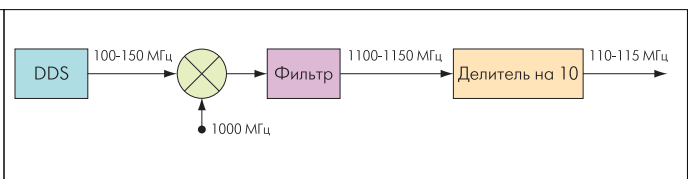


Рис.5. Синтезатор с дополнительным смесителем и делителем

порядка также приходится учитывать при разработке архитектуры конкретного синтезатора. Амплитуда паразитных спектральных составляющих увеличивается и с увеличением тактовой частоты, что также ограничивает диапазон генерируемых частот. Практические значения верхней границы диапазона находятся в районе от нескольких десятков до нескольких сотен мегагерц при уровне дискретных спектральных продуктов -50...-60 дБн. Очевидно, прямое умножение выходного сигнала частотного синтезатора невозможно из-за дальнейшей деградации спектрального состава.

Существует много аппаратных и программных решений, призванных улучшить спектральный состав цифрового синтезатора [9]. Аппаратные методы обычно основаны на переносе сигнала цифрового синтезатора вверх по частоте и его последующем делении (рис.5). Этот метод уменьшает содержание нежелательных спектральных продуктов на 20 дБ/октаву. К сожалению, при этом также уменьшается диапазон генерируемых частот. Для расширения диапазона частот на выходе синтезатора приходится увеличивать число базовых частот и фильтров (рис.6) – подобно тому, как это делается в аналоговых схемах.

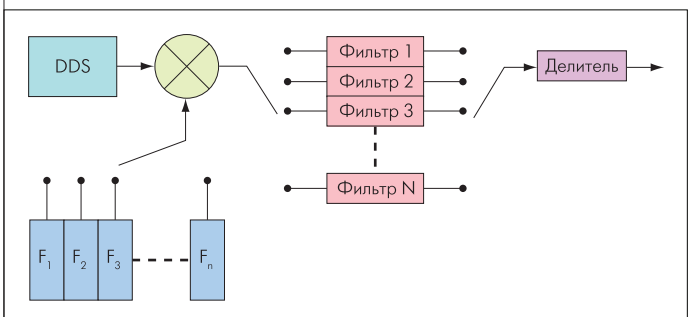


Рис.6. Цифровой синтезатор с дополнительными генераторами базовых частот и фильтрами

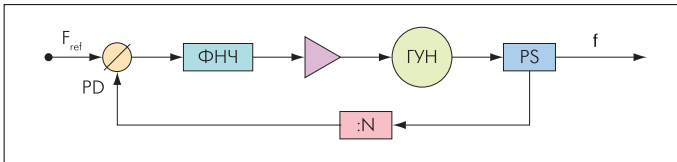


Рис.7. Синтезатор с ФАПЧ

Программные методы основываются на том, что частоты побочных искажений синтезатора являются функцией частоты дискретизации ЦАП. Таким образом, для каждой конкретной выходной частоты синтезатора побочные искажения могут быть сдвинуты по частоте (а в дальнейшем и отфильтрованы) путем изменения частоты дискретизации ЦАП. Этот метод особенно эффективен, если тактовые импульсы для ЦАП генерировать с использованием систем на основе ФАПЧ. Следует отметить, что программный метод работает достаточно эффективно для подавления искажений относительно малого порядка. К сожалению, плотность дискретных спектральных продуктов обычно увеличивается пропорционально их порядку. Поэтому программным методом удается отфильтровать искажения только до уровня $-70\dots-80$ дБн.

Таким образом, из-за ограниченного диапазона частот и высокого содержания нежелательных спектральных продуктов цифровые синтезаторы редко используются для непосредственного генерирования СВЧ-сигнала. В то же время их широко применяют в более сложных аналоговых и ФАПЧ-системах, чтобы обеспечить высокое разрешение по частоте.

СИНТЕЗАТОРЫ С ФАПЧ

Типичный однопетлевой синтезатор с ФАПЧ включает в себя перестраиваемый генератор, управляемый напряжением (ГУН), сигнал которого после требуемого (программируемого) деления по частоте доставляется ко входу фазового детектора (PD) (рис.7).

Другой вход фазового детектора подключен к источнику опорного сигнала (reference), частота которого равна требуемому частотному шагу. Фазовый детектор сравнивает сигналы на обоих входах и генерирует сигнал ошибки, который после фильтрации и усиления (при необходимости) подстраивает частоту ГУН к $f = F_{REF} \times N$, где F_{REF} – частота опорного сигнала на входе фазового детектора.

Главными преимуществами схем на основе ФАПЧ являются более чистый спектр выходного сигнала, обусловленный эффективным использованием фильтра нижних частот (ФНЧ), и значительно меньшая сложность устройства по сравнению с аналоговыми синтезаторами [10–14]. Основным недостатком – большее время перестройки и значительно более высокий уровень фазового шума по сравнению с аналоговыми схемами. Фазовый шум синтезатора в пределах полосы пропускания фильтра ФАПЧ равен $\lambda = \lambda_{PD} + 20 \log N$, где λ_{PD} – пересчитанный ко входу фазо-

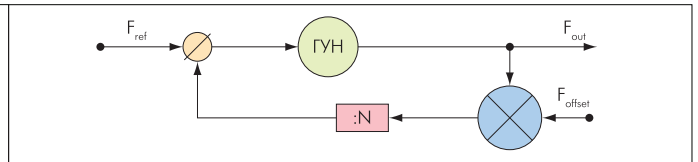


Рис.8. ФАПЧ-синтезатор со смесителем в цепи обратной связи.
 F_{offset} – частота опорного сигнала смесителя

вого детектора суммарный уровень фазовых шумов опорного сигнала, фазового детектора, фильтра и усилителя цепи обратной связи. Таким образом, фазовый шум зависит от коэффициента деления частотного делителя, который, чтобы обеспечить требуемое разрешение по частоте, может быть довольно большим. Так, для получения сигнала на частоте 10 ГГц с разрешением 1 МГц коэффициент деления должен быть равен 10000, что соответствует увеличению фазового шума на 80 дБ. Кроме того, программируемые делители используются на относительно низких частотах, что требует введения дополнительного высокочастотного делителя с фиксированным коэффициентом деления (prescaler – PS). В результате увеличивается суммарный коэффициент деления петли обратной связи и, как следствие, возрастает фазовый шум. Очевидно, такая простая схема не позволяет использовать шумовые возможности современных малозумящих генераторов опорного сигнала. В итоге однопетлевые схемы с ФАПЧ применяются редко, а именно, в системах с низкими требованиями к качеству генерируемого сигнала.

Основные характеристики синтезатора можно значительно улучшить, включив частотный преобразователь (смеситель) в цепь обратной связи (рис.8). При этом сигнал ГУН переносится вниз по частоте, что позволяет значительно уменьшить коэффициент деления цепи обратной связи [10]. Опорный сигнал смесителя генерируется с помощью дополнительной петли ФАПЧ (многопетлевые схемы) или умножителя частоты. Удачным решением является применение смесителя гармоник, который использует многочисленные гармоники опорного сигнала, генерируемые встроенным в смеситель диодом. Смеситель гармо-

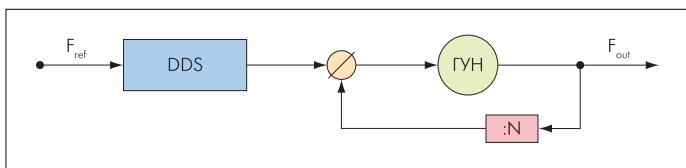


Рис. 9. ФАПЧ-синтезатор с цифровым синтезатором в качестве источника опорного сигнала

ник позволяет значительно упростить конструкцию синтезатора. При этом следует отметить исключительно высокую чувствительность данного типа смесителя к параметрам отдельных элементов схемы, оптимизация которых – далеко не тривиальная задача.

В зависимости от конкретных требований к фазовым шумам и разрешению по частоте возможно введение большего числа смесительных каскадов, что, однако, усложняет конструкцию синтезатора. Другой проблемой, связанной с применением схем, основанных на частотном преобразовании, является ложный захват частоты (например, при использовании зеркального канала смесителя). Поэтому необходимо предварительно достаточно точно настроить частоту ГУН, например с помощью ЦАП. Это, в свою очередь, требует исключительно высокой линейности (и повторяемости) зависимости выходной частоты ГУН от управляющего напряжения в рабочем температурном диапазоне, а также точной калибровки ГУН для компенсации температурного дрейфа данной зависимости. Кроме того, цифроаналоговые преобразователи обычно отличаются повышенным уровнем шумов, что влияет на шумовые характеристики синтезатора и требует выведения ЦАП из петли ФАПЧ после предварительной настройки на требуемую частоту [10].

Снизить суммарный коэффициент деления можно и путем использования дробных коэффициентов деления – делением частоты на $N+1$ каждые M периодов сигнала и делением на N в течение остального промежутка времени [15]. В этом случае усредненный коэффициент деления равен $(N+1)/M$, где N и M – целые числа. Для заданного размера частотного шага схемы с дробным коэффициентом деления позволяют использовать более высокую частоту сравнения на входе фазового детектора, что приводит к уменьшению фазового шума и увеличению скорости перестройки синтезатора. Основным недостатком техники дробного деления – повышенное содержание негармонических спектральных составляющих из-за фазовых ошибок, присутствующих механизмов дробного деления.

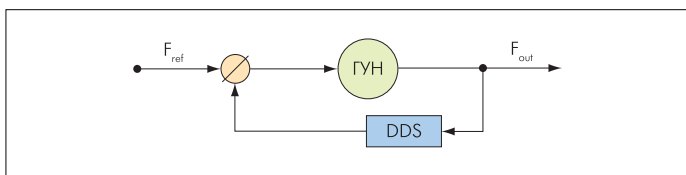


Рис. 10. ФАПЧ-синтезатор с цифровым синтезатором в качестве делителя частоты

Весьма эффективное решение – использование цифрового синтезатора (DDS), который, по сути, также является дробным делителем частоты. Цифровой синтезатор может быть задействован в качестве источника опорного сигнала (рис.9) или же дробного делителя частоты (рис.10). Особое внимание следует уделить спектральному составу выходного сигнала цифрового синтезатора, который ухудшается на 20 дБ/октаву из-за наличия частотного делителя в петле ФАПЧ. С этой точки зрения конфигурация, приведенная на рис.9, представляется более гибкой, так как позволяет вводить упомянутые смесительные каскады. Хотя схема, приведенная на рис.10, и не содержит частотного делителя, в ней спектральный состав выходного сигнала синтезатора ухудшается так же, как и в схеме с цифровым синтезатором в качестве опорного сигнала (см. рис.9). Несмотря на то, что использование цифрового синтезатора приводит к определенному усложнению схемы, представляется, что конструкция в целом демонстрирует хорошие технические и стоимостные характеристики.

ВЫБОР ГУН

Проектирование синтезаторов с ФАПЧ в значительной степени определяется параметрами используемого ГУН. Разработчики синтезаторов всегда полагались в первую очередь на ЖИГ-генераторы с широким диапазоном генерируемых частот и малыми фазовыми шумами. ЖИГ-генераторы также демонстрируют линейные (и повторяемые) зависимости выходной частоты от управляющего магнитного поля, что упрощает первоначальную подстройку и захват частоты в системах многопетлевой ФАПЧ. Эти уникальные особенности ЖИГ-генераторов в течение длительного времени обеспечивали доминирование синтезаторов, сконструированных на их основе.

Однако, большое потребление энергии, размеры, высокая стоимость и, особенно, низкая скорость перестройки, присущие любому ЖИГ-генератору, обусловили переход к полупроводниковым генераторам. В настоящее время высокочастотные (до 10 ГГц и выше) твердотельные перестраиваемые генераторы доступны в виде дешевых интегральных схем. Так как шумовые характеристики таких генераторов значительно хуже по сравнению с ЖИГ-генераторами, то при разработке таких синтезаторов должны использоваться источники опорного сигнала с ультранизкими фазовыми шумами. В настоящее время коммерческие кварцевые генераторы демонстрируют фазовые шумы в районе -160...-176 дБн/Гц на частоте 100 МГц при отстройке 20–100 кГц [16]. Эти величины соответствуют -120...-136 дБн/Гц при пересчете на 10 ГГц и такой же отстройке, что даже превосходит шумовые характеристики ЖИГ-генераторов. Конечно, при этом предполагается, что шумовые характеристики отдельных элементов синтезатора не оказывают заметного влияния на процесс преобра-



зования опорного сигнала. Хотя такое предположение требует неординарных технических решений, конечный эффект очевиден: синтезаторы на основе полупроводниковых генераторов могут потенциально достичь исключительно высоких скоростей перестройки вместе с отличными шумовыми и спектральными характеристиками без применения дорогостоящих, громоздких и энергоемких ЖИГ-генераторов.

БУДУЩИЕ РАЗРАБОТКИ

Аналоговый синтезатор на сегодняшний день является наиболее передовой архитектурой, демонстрирующей исключительно высокую скорость перестройки и малые фазовые шумы. Хотя его ценовые характеристики весьма высоки, тем не менее, аналоговый синтезатор может быть отличным решением в некоторых применениях, где низкая стоимость не является определяющим фактором.

Цифровые синтезаторы имеют отличные перспективы, которые связаны со стремительным развитием GaAs-, Si- и SiGe-технологий. Ожидается, что рабочая частота цифровых синтезаторов повысится, а спектральные характеристики улучшатся. Это, безусловно, поможет в проектировании аналоговых и ФАПЧ-синтезаторов.

Однако наиболее перспективные разработки в ближайшее время, по-видимому, будут связаны с ФАПЧ-синтезаторами, в которых применяются дешевые генераторы на интегральных схемах. Разработчики будут стараться снизить собственные шумы отдельных элементов синтезатора, чтобы расширить оптимальную полосу пропускания фильтра ФАПЧ до нескольких мегагерц. Это позволит достичь микросекундного диапазона скорости перестройки частоты с сохранением уровня шума, присущего ЖИГ-генераторам. Данные характеристики, наряду с низкой стоимостью, присущей синтезаторам на основе ФАПЧ, по-видимому, предопределят их доминирование в будущих разработках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Browne J. Frequency Synthesizers Tune Communications Systems. – *Microwaves&RF*, March 2006.
2. Kroupa V. Frequency Synthesis Theory, Design and Applications. – New York: Wiley, 1973.
3. Manassewitsch V. Frequency Synthesizers Theory and Design. Third Edition. – New York: JohnWiley & Sons, 1987.
4. Rohde U. Microwave and Wireless Synthesizers: Theory and Design. – New York: John Wiley & Sons, 1997.
5. Klapper J., Frankle J. Phased-Locked and Frequency Feedback Systems. – New York: Wiley, 1972.
6. A 24 GHz Network Analyzer, by Rohde & Schwartz. – *Microwave Journal*, October 2005.
7. Galani Z., Campbell R. An Overview of Frequency

Synthesizers for Radars. – *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. MTT-39, 1991, p. 782–789.

8. Kroupa V. Direct Digital Frequency Synthesizers. – New York: IEEE Press, 1999.

9. Endres T., Hall R., Lopez A. Design and Analysis Methods of a DDS-Based Synthesizer for military spaceborne applications. – *IEEE International Frequency Control Symposium Proc.*, 1994, p. 625–632.

10. Egan W. Frequency Synthesis by Phase Lock. – New York: Wiley, 2000.

11. Best R. Phase-Locked Loops – Theory, Design, and Applications. – New York: McGraw-Hill, 1984.

12. Rohde U. Digital PLL Synthesizers: Design and Applications” NJ: Prentice Hall, 1983.

13. Blanchard A. Phase-Locked Loops” New York: Wiley, 1976.

14. Gardner F. Phaselock Techniques. Second Edition. – New York:Wiley, 1979.

15. Fractional-N Synthesizer. Application Note. Synergy Microwave Corporation. – www.synergymwave.com.

16. A High Frequency Reference Module by Valpey Fisher Corporation. – *Microwave Journal*, April 2005.