

# АРХИТЕКТУРА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ ДЛЯ ПАНОРАМНЫХ СКАНИРУЮЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СВЧ

А. В. Горевой, ведущий инженер, ЗАО «НПФ «Микран»

Рассмотрена архитектура широкополосных синтезаторов частот, применяемых в панорамных измерительных приборах СВЧ. Проанализировано влияние специфики измерительного прибора на формирование требований к синтезатору. Описаны основные противоречия и способы их устранения при построении синтезаторов частот.

Ряд метрологических характеристик панорамных измерительных приборов СВЧ зависит исключительно от встроенного широкополосного источника гармонических сигналов, обуславливающего панорамность прибора, — синтезатора частот. В этот ряд входят: стабильность и точность установки частоты, шаг и время перестройки по частоте, спектральная чистота (уровень фазовых шумов, гармоник, побочных спектральных составляющих). В зависимости от типа прибора уровень требований может варьироваться в широких пределах. Например, для панорамных скалярных анализаторов цепей важны стабильность и точность установки частоты вместе с частотным разрешением, в то время как требования к спектральной чистоте крайне низкие в силу особенностей метода измерения. В анализаторах спектра требования к гетеродинам относительно жесткие и касаются практически всех их характеристик, кроме, разве что, гармоник и субгармоник.

## Общая архитектура широкополосных синтезаторов частот. Основные проблемы

Выделяют пять основных требований к синтезатору частот [1]:

- спектральная чистота;
- частотное разрешение;
- диапазон частот;
- время переключения частоты;
- стоимость.

В общем случае, удовлетворение всех требований приводит к множеству противоречий, и в каждом конкретном случае задача построения синтезатора частот

сводится к поиску компромисса. Как правило, первой жертвой становится стоимость. Знание о назначении прибора, куда будет входить синтезатор, позволяет конкретизировать требования и сместить акценты разработки в нужную сторону. Рассмотрим подробнее общую архитектуру синтезатора частот панорамных измерительных приборов СВЧ.

Практически каждый широкополосный синтезатор частот в измерительном приборе (рис. 1) представляет собой комбинацию из синтезаторного ядра и системы масштабирования диапазона частот ядра с помощью умножителей частоты (вверх) и делителей частоты (вниз).

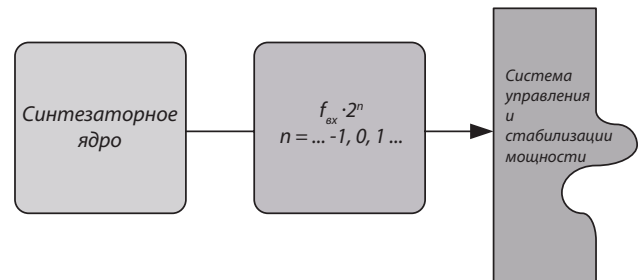


Рис. 1. Архитектура синтезатора частот панорамного измерительного прибора СВЧ

Обычно коэффициенты умножения и деления частоты при масштабировании равны двум с точки зрения энергетической эффективности преобразования частоты (особенно при умножении) и минимизации количества и уровня гармоник и субгармоник выходного сигнала. Отсюда следует естественное требование к октавной перестройке ядра. Кроме того, спектральная чистота, частотное разрешение, время перестройки по частоте в большей степени будут определяться ядром. Диапазон частот ядра удобнее выбирать ближе к верхней границе частот синтезатора, так как это позволяет избавиться от субгармоник в спектре и отказаться от сложных удвоителей частоты с высоким энергопотреблением. Решение с делителями частоты оказывается намного экономичнее по энергопотреблению, компактнее и дешевле.

Само ядро реализуется в виде синтезатора с фазовой автоматической подстройкой частоты (ФАПЧ). У этого метода существует ряд преимуществ перед более традиционными и даже архаичными (применением генератора качающей частоты ГКЧ, прямого синтеза [2]): высокая стабильность и точность частоты за счет использования высокостабильных и точных опорных генераторов, гибкость цифрового управления параметрами петли, стабильность работы, малое энергопотребление, низкая стоимость. Хотя ФАПЧ в своем исходном виде проигрывает по характеристикам спектральной чистоты, например, прямому синтезу, уже разработано множество методов ее улучшения. Сейчас современные синтезаторы с ФАПЧ занимают лидирующие позиции по совокупности характеристик.

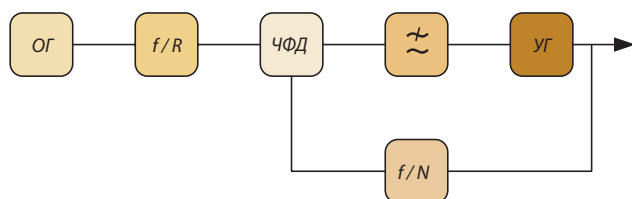


Рис. 2. Типовая схема синтезаторного ядра с ФАПЧ

В состав синтезатора входят опорный генератор (ОГ), управляемый генератор (УГ), делители частоты ОГ и УГ, частотно-фазовый детектор (ЧФД) и петлевой фильтр. Делители частоты выполняются программируемыми для возможности перестройки частоты. Развитие интегральных технологий позволяет выполнить значительную часть компонентов петли в одной микросхеме (снаружи остаются только петлевой фильтр, ОГ и иногда УГ) и дополнить систему новыми элементами управления и контроля (индикаторами захвата фазы, элементами ускорения захвата частоты) [3]. Частотное разрешение синтезатора в том виде, в каком он изображен на рис. 2, равно частоте на выходе делителя опорной частоты [4]. Попытки его улучшения приводят к известному противоречию между частотным разрешением и спектральной чистотой: улучшение частотного разрешения в два раза приводит к росту фазовых шумов на 3 дБ [3]. Это противоречие было красиво решено внедрением дробных делителей частоты с дельта-сигма модуляторами. При этом частота на выходе делителя  $R$  остается той же (спектральная чистота не страдает), а разрешение улучшается. Само по себе дробное деление является условностью. Идея решения заключается в манипулировании коэффициентом деления делителя  $N$  по определенному закону так, что средний коэффициент деления частоты оказывается дробной программируемой величиной [5]. В настоящее время существуют микросхемы синтезаторов частот с дробными делителями частоты, позволяющие получить частотное разрешение порядка 1 Гц до частот 13 ГГц [6] или «чипсет», дающие возможность строить синтезаторы с микрогерцовым разрешением [7].

Математические модели такой системы практически не отличаются от моделей простой импульсной ФАПЧ в линейном приближении [4]. Однако стоит отметить, что делитель частоты с дельта-сигма модулятором является источником дополнительного фазового шума, спектральная плотность мощности которого рассчитывается по формуле Миллера [8].

Расчет и оптимизация фазовых шумов в такой системе рассмотрена во многих книгах по тематике синтезаторов с ФАПЧ [4, 5, 9], поэтому подробно этот вопрос в данной статье не рассматривается. Следует обратить внимание на ограничения по уровню фазовых шумов в синтезаторах с цифровой ФАПЧ, обусловленные ЧФД. Современный уровень развития микроэлектроники

позволяет достигать уровня фазовых шумов до минус 133 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей 1 ГГц [7] без специальных схемотехнических решений, в то время как опорный генератор способен обеспечить фазовый шум минимум на 20 дБ ниже [10]. В [11] было описано улучшение почти на 6 дБ методом статистической компенсации параллельным включением четырех ЧФД, но о сроке выхода таких микросхем на рынок не сообщается. Для улучшения шумовых характеристик синтезаторов с ФАПЧ прибегают к специальным решениям описанным ниже.

Еще одной характеристикой, выражающей спектральную чистоту синтезатора, является уровень побочных спектральных составляющих (ПСС). В отличие от фазовых шумов, имеющих непрерывный спектр, ПСС имеют дискретный спектр и могут находиться практически в любом месте относительно несущей. Причины появления ПСС могут быть разными: от нелинейных искажений формы сигнала и простого умножения частоты (гармоники и субгармоники), до наводок по цепям питания и управления и биений между сигналами разных частот в системе, модулирующими полезный сигнал по частоте. Если ПСС вдали от несущей (например, субгармоники) могут относительно легко подавляться фильтрами, то вблизи несущей обеспечить их снижение может оказаться невозможным, и потому они представляют наибольшую опасность. Комплекс мер по снижению ПСС сводится к фильтрации по СВЧ, управлению и питанию чувствительных элементов и выбору рабочих частот системы, обеспечивающих минимальный уровень биений или их максимальную отдаленность от несущей [2]. Последнее относится к сложным задачам в технике синтезаторов и решения в общем виде не имеет. Ярким примером ПСС, которые невозможно подавить без усложнения схемы синтезатора, являются так называемые Integer Boundary Spur в синтезаторах с ФАПЧ с дробными делителями. Данные ПСС появляются в результате биений частоты УГ и гармоники ОГ. Возрастая до уровня  $-50$  дБн, они становятся особенно фатальными при почти кратных частотах ОГ и УГ. Отсюда следует, что возможности микросхем ФАПЧ с дробными делителями частоты по частотному разрешению удастся использовать не всегда. Требования к уровню ПСС для современных синтезаторов находятся на уровне  $-70$  дБн.

Основным недостатком ФАПЧ перед прямым синтезом является большее время перестройки. Время перестройки частоты синтезатора иногда ограничивает скорость развертки прибора и увеличивает время измерения, что не всегда удобно. Синтезатор с ФАПЧ инерционен принципиально. Как правило, все попытки «ускорить» синтезатор сводятся к расширению полосы пропускания петли программным увеличением крутизны ЧФД. Судя по результатам экспериментов и

расчетов, проведенных сотрудниками компании «Микран» ([www.micran.ru](http://www.micran.ru)), возможно получение времени перестройки порядка 1...3 мкс при условии малого времени программирования микросхемы ФАПЧ (что часто невозможно) и достаточной полосы пропускания канала управления УГ. Требования большинства приложений формулируются на уровне 100 мкс [1].

### Методы улучшения спектральной чистоты синтезаторов с ФАПЧ

Если спектральная чистота синтезатора с ФАПЧ оказывается неудовлетворительной, то прибегают к двум широко распространенным методам ее улучшения.

Первый метод, позволяющий снизить Integer Boundary Spur и т. п., — небольшое изменение опорной частоты, «отодвигающее» такие ПСС дальше от несущей в область существенного подавления петлей ФАПЧ. Может быть реализовано либо переключение между двумя опорными частотами [12], либо формирование достаточно мелкой сетки опорных частот дополнительным синтезатором. В конце концов, основная ФАПЧ может иметь целочисленные коэффициенты деления, избавляя систему от биений вообще, а дополнительный синтезатор обеспечит нужное частотное разрешение. Уровень фазовых шумов в такой системе остается, как минимум, неизменным или ухудшается. Дополнительный синтезатор может реализовываться как на микросхеме ФАПЧ, так и на микросхеме цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС). ЦВС в этом отношении позволяет добиться выдающегося частотного разрешения и приемлемой спектральной чистоты [13]. Синтезаторы такого типа активно применяются в системах для формирования гармонических сигналов с микрогерцовым разрешением в диапазоне частот от 0 до 300...400 МГц с относительно высокой спектральной чистотой [14]. Вопреки часто встречающемуся высокому мнению относительно ЦВС, стоит заметить, что достижение действительно высокой спектральной чистоты синтезатора возможно в крайне ограниченном диапазоне частот — не выше 1/10 тактовой частоты. Остальной диапазон частот использовать полностью не удастся. Учитывая достаточно высокое энергопотребление, целесообразность применения таких микросхем иногда вызывает сомнения.

Второй метод, позволяющий существенно снизить как фазовый шум, так и уровень ПСС, заключается в применении преобразования частоты в обратной связи (рис. 3).

При таком решении исключается делитель частоты в обратной связи — «усилитель» шумов ЧФД. Вместо него вводится смеситель, а в качестве дополнительного сигнала для преобразования применяется умноженный по частоте сигнал ОГ с переменным коэффициентом умножения (фактически, строится еще один синтеза-

тор). Требуемое частотное разрешение обеспечивается опорным ЦВС, а уровень фазовых шумов в большей степени определяется сигналом ОГ, умноженным по частоте. Здесь происходит разделение функций, что позволяет оптимизировать систему через отдельные элементы.

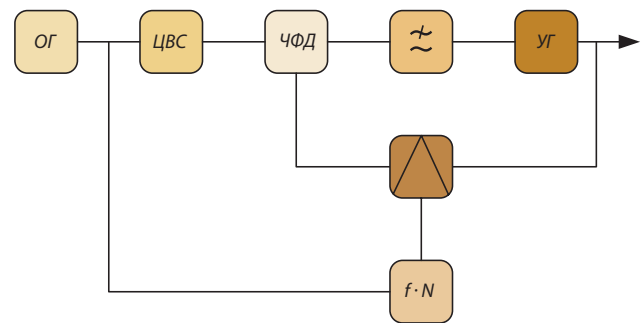


Рис. 3. Типовая схема синтезатора с ФАПЧ с улучшенными характеристиками спектральной чистоты

Улучшение спектральной чистоты возможно и применением менее шумящего УГ [10] — заменой октавного ГУН на ЖИГ-генератор. Это возможно только на дальних отстройках от несущей и только ценой существенного «замедления» синтезатора. Учитывая работу большинства систем в «непосредственной близости от несущей», такое решение редко бывает оптимальным.

Любая попытка улучшить какую-либо характеристику синтезатора приводит к появлению нового элемента или узла по сложности мало уступающего исходной системе, что зачастую означает кратное увеличение стоимости и энергопотребления. Часто этими параметрами легко жертвуют ради достижения высокого уровня приборов класса high-end. В приборах классом ниже, в том числе портативных, цена и энергопотребление получают более высокий приоритет среди критериев эффективности и, хотя требования к другим характеристикам снижаются, разработка синтезатора не всегда становится проще.

### Реализация синтезаторного ядра с точки зрения системных требований

Рассмотрим подробнее подход к реализации синтезаторов, исходя из требований, предъявляемых измерительным прибором. Развитие элементной базы позволяет построить октавное ядро синтезатора в диапазоне 10...20 или 20...40 ГГц [15, 16] и в приборах до 20...40 ГГц исключить умножители частоты, а в приборах, работающих на более высоких частотах, минимизировать их количество. Выбор типа ОГ и УГ, а также структуры ядра зависит от типа и класса прибора. Выделим три основные группы измерительных приборов, применяющих широкополосные синтезаторы частот, и для удобства будем рассматривать класс лабораторных приборов high-end:

- скалярные и векторные анализаторы цепей и измерители коэффициента шума;
- анализаторы спектра и сигналов;
- генераторы сигналов СВЧ, в т. ч. векторные.

Первая группа приборов является самой простой с точки зрения обеспечения спектральной чистоты. В силу специфики методов измерения, в таких приборах необходим близкий к гармоническому сигнал с высокой стабильностью частоты и частотным разрешением. Требования к спектральной чистоте здесь скромные, так как прибор измеряет либо отношение мощностей, либо разность фаз в достаточно широкой полосе, где влияние фазовых флуктуаций практически не сказывается на точности измерений. Следует уделить внимание уровню ПСС на больших отстройках от несущей, субгармоник и гармоник, так как они способны ограничить чувствительность измерений, как это может быть в скалярных анализаторах цепей. При измерении амплитудной частотной характеристики АЧХ частотно-избирательных устройств в области подавления, если ПСС с высоким уровнем попадет в полосу пропускания тестируемого устройства и окажется выше, чем основной сигнал, испытавший подавление, то детектор покажет повышенную мощность на своем входе, а значит, меньшее подавление фильтра (рис. 4).

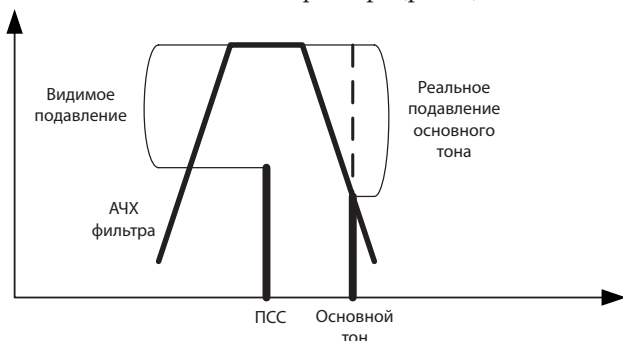


Рис. 4. Влияние уровня ПСС на результат измерения АЧХ фильтра

В качестве грубой оценки требуемого уровня ПСС можно использовать величину, обратную к диапазону измерений коэффициента передачи. Конкретные требования к уровню в зависимости от несущей частоты и отстройки от нее определяются свойствами измеряемых устройств. В диапазоне СВЧ редко используются устройства с эквивалентной добротностью выше 10 тысяч, поэтому ПСС на отстройках до 10...100 кГц чаще будут испытывать почти такое же подавление, что и основной тон, и не будут вносить существенного искажения в результат измерения. На низких частотах, где используются высокодобротные кварцевые структуры, ПСС на таких отстройках могли бы исказить картину измерений, но их уровень за счет деления частоты на десятки дБ ниже, чем на СВЧ. В векторных анализаторах цепей и измерителях коэффициента шума ПСС не должны находиться на отстройках, равных частоте

последней промежуточной частоте (ПЧ), так как после преобразования частоты они будут маскировать полезный сигнал и ограничат чувствительность измерений. В таких приборах следует уделить внимание снижению стоимости и энергопотребления синтезатора и повышению его скоростных характеристик, поэтому здесь выгоднее использовать микросхемы синтезаторов с интегрированными делителями частоты и УГ, а также интегральные схемы активных умножителей частоты.

Приборы второй группы используются для изучения тонкой структуры сигналов, а для этого нужен чувствительный инструмент в виде малошумящего синтезатора. Известно, что спектральная чистота гетеродина ограничивает чувствительность измерений вблизи несущей [4] — там, где находятся почти все возможные полосы модуляции. Вместе с высокими требованиями к частотному разрешению это влечет за собой естественный рост вложений в разработку и производство синтезаторов. Уровень требований к фазовым шумам отталкивается от массового применения синтезаторов с цифровой ФАПЧ и опорных кварцевых генераторов, имеющих, в лучшем случае,  $-130$  дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей 10 ГГц [17]. Часто в таких синтезаторах не достигаются экстремально низкие времена перестройки частоты в силу применения медленных ЖИГ-генераторов. Однако применение последних не всегда ограничивает время измерения. Вместо них негативное влияние оказывают алгоритмы цифровой обработки сигналов или другие аппаратные элементы, например, ЖИГ-преселектор анализатора спектра с крайне высокой индуктивностью управляющей катушки. На опыте разработки анализатора спектра СК4М-18 было выявлено большее влияние последних факторов на время измерения.

Приборы третьей группы предназначены для тестирования систем СВЧ во всевозможных отношениях. Для адекватных измерений необходим сигнал с абсолютной спектральной чистотой, бесконечно малым частотным разрешением и временем перестройки. Синтезаторы таких приборов имеют похожие характеристики с приборами предыдущей группы, так как задача генерирования чистого сигнала тесно связана с анализом его спектра. Реализация таких синтезаторов часто аналогична реализации синтезаторов для анализаторов спектра.

## Заключение

Методы формирования требований к синтезаторам частот панорамных измерительных приборов со сканированием по частоте во многом основываются на текущем уровне развития элементов СВЧ и являются консервативными. Однако бурный рост коммерческих приложений техники СВЧ в области связи, радиолокации и др. и растущая потребность в них требует повы-



шения качества соответствующих измерительных приборов. Если область анализаторов цепей в линейной ее части уже устоялась в своих требованиях, то нелинейный анализ только развивается и требования к зондирующим сигналам еще нельзя считать полностью сформулированными. Развитие высокоскоростных сетей передачи данных требует гармонических источников с повышенной степенью когерентности, которую все труднее удастся обеспечить классическими опорными кварцевыми генераторами. Здесь может потребоваться разработка опорных генераторов новых типов, а значит, выработка новых технических решений в синтезе частот. Последнее обязательно повлечет за собой необходимость разработ-

ки соответствующих анализаторов спектра и сигналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ченакин А. Современное состояние и пути развития синтезаторов частот СВЧ-диапазона. Презентация. [http://www.radiocomp.ru/joom/images/storage/photos/pm\\_pres/Chenakin\\_synth.ppt](http://www.radiocomp.ru/joom/images/storage/photos/pm_pres/Chenakin_synth.ppt).
2. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование. — М.: Связь. — 1979.
3. ADF4156 6.2 GHz Fractional-N Frequency Synthesizer. Datasheet. [www.analog.com](http://www.analog.com).
4. Bannerjee D. PLL Performance, Simulation and Design. — 2001.
5. Fractional/Integer-N PLL Basics. Technical Brief / Edited by Curtis Barrett. — Texas Instruments. — 2005.
6. ADF4159 Direct Modulation/Fast Waveform Generating, 13 GHz, Fractional-N Frequency Synthesizer. Datasheet. [www.analog.com](http://www.analog.com).
7. HMC983LP5E DC — 7 GHz Fractional-N Divider and Frequency Sweeper. HMC984LP4E Digital Phase-Frequency Detector. Datasheet. [www.hitite.com](http://www.hitite.com).
8. Osmany S. et. al. Phase Noise and Jitter Modeling for Fractional-N PLLs // Advances in Radioscience. — 2007. — 5.
9. Chenakin A. Frequency Synthesizer: From Concept to Product. Artech House. — 2011.
10. Горевой А. Выбор генераторов для построения малошумящих СВЧ-синтезаторов // Компоненты и технологии. — 2012. — №6.
11. Tsutsumi K. et. al. A Low-Noise Multi-PFD PLL with Timing Shift Circuit // Microwave Symposium Digest (MTT), IEEE MTT-S International. — 2012.
12. Скоторенко И. Синтезатор частот. Патент РФ № 2458461.
13. Kern P. Direct digital synthesis enables digital PLLs // RFDesign. — 2007. — July.
14. AD9912 1 GSPS Direct Digital Synthesizer with 14-Bit DAC. Datasheet. [www.analog.com](http://www.analog.com).
15. HMC733LC4B Wideband MMIC VCO w/ Buffer Amplifier, 10-20 GHz. Datasheet. [www.hitite.com](http://www.hitite.com).
16. MLOS-Series 40 GHz YIG-tuned oscillators. Millimeter Wave. Datasheet. [www.microlambdawireless.com](http://www.microlambdawireless.com).
17. Agilent E8257D PSG. Microwave Analog Signal Generator. Datasheet. [www.agilent.com](http://www.agilent.com).

# Бюджетные генераторы и синтезаторы СВЧ с превосходными характеристиками



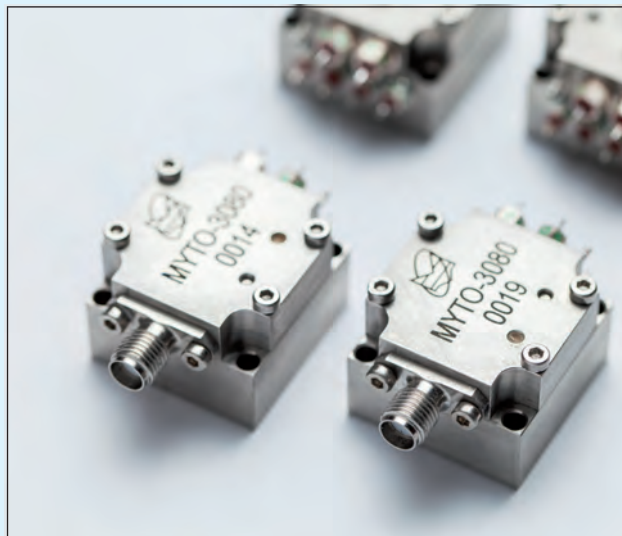
## Широкополосные автогенераторы СВЧ на ЖИГ-резонаторах. Серия МУТО

Генераторы отличаются более чем октавной перестройкой при уникально низком уровне фазовых шумов выходного сигнала, практически не зависящим от частоты несущей.

В основе конструкции лежит сферический высокодобротный резонатор из железо-иттриевого граната, резонансная частота которого пропорциональна напряженности подмагничивающего поля.

Генераторы имеют тщательно проработанную конструкцию, позволяющую обеспечить эффективный теплоотвод при малых габаритах (41x25x20 мм).

Область применения генераторов - измерительное и тестовое оборудование (анализаторы спектра, измерительные генераторы), источники зондирующих сигналов для широкополосных сканирующих систем.



## Октавные генераторы, управляемые напряжением. Серия MVCO

Недорогие, малогабаритные и экономичные генераторы с октавной перестройкой. Применяются в широкополосных сканирующих системах с жесткими требованиями к скорости сканирования.

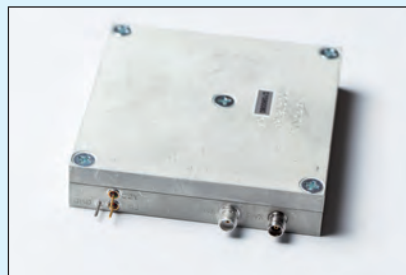
Уровень фазовых шумов постоянен во всем диапазоне рабочих частот и не превышает минус 120 дБн/Гц и минус 108 дБн/Гц на отстройке 100 кГц от несущей для моделей 1—2 и 2—4 ГГц соответственно. Выпускаются в двух исполнениях: стандартном с габаритами 12,6x12,6x3,7 мм и уменьшенном — 7,5x7,5x3,2 мм.



## Малозащумляющие термостатированные кварцевые генераторы. Серия MOXO

Малогабаритные генераторы применяются в качестве источников эталонных по частоте гармонических сигналов для стабилизации частоты синтезаторов СВЧ, тактирования цифровых устройств и т. п. Обладают наименьшим уровнем фазовых шумов в классе кварцевых генераторов: до минус 140 дБн/Гц на отстройке 100 Гц и минус 178 дБн/Гц на отстройках выше 10 кГц от несущей 100 МГц.

Габаритные размеры без учета длины выводов: 24,5x24,5x17 мм.



## Модули синтезаторов частот. Серии MSUW и MSFLN

Малогабаритные и экономичные модули малозащумляющих (MSFLN) и сверхширокополосных (MSUW) синтезаторов частот для различных применений.

Диапазон частот до 40 ГГц.

Шаг перестройки по частоте 1 Гц.

Уровень фазовых шумов до минус 130 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей 10 ГГц.

*Возможна разработка компонентов по ТЗ заказчика*