СЕРГЕЙ ДИНГЕС, к.т.н., доцент, МТУСИ,
ВИКТОР КОЧЕМАСОВ, к.т.н., с.н.с., Генеральный директор ООО «Радиокомп»

УСТРОЙСТВА РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ ЧАСТОТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В 1980 гг. на рынке измерительного оборудования появились системы векторного анализа цепей (Vector Network Analysis, VNA) для полного охвата волноводного диапазона, способные измерять характеристики поглощения (absorption), отражательную способность (reflectivity) и параметры рассеяния (scattering) до 110 ГГц. В конце 1990 гг. верхняя частотная граница применения волноводов увеличилась до 220 ГГц. В начале 2000 гг. были разработаны векторные анализаторы цепей (ВАЦ) на частоты до 230 ГГц. По мере развития техники СВЧ стали доступными системы ВАЦ для работы с волноводами на частоте выше 300 ГГц.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАСШИРИТЕЛЯХ ЧАСТОТ

В настоящее время наблюдается быстрый рост числа радиочастотных коммерческих и специальных приложений, использующих миллиметровый диапазон частот. Такие приложения как автомобильные радары, локальные системы и системы связи последней мили, системы безопасности, системы управления трафиком и БПЛА побуждают тех, кто разрабатывает и производит изделия для миллиметрового диапазона, увеличивать затраты на производство устройств, компонентов и узлов, использующих V-, E- и W-диапазоны и даже более высокие частоты. Измерение параметров, тестирование таких изделий являются ключевыми составляющими производственного процесса и зачастую требуют использования дорогостоящего испытательного оборудования, что приводит к значительному росту затрат компаний. Инженерам потребовалась недорогая измерительная техника для более высоких волноводных полос, что привело к разработке расширителей рабочих частот измерительного оборудования до 1000 ГГц и выше.

- Перенос СВЧ-сигналов **вниз по частоте** производится для их обработки или анализа с помощью широко распространенного оборудования, которое работает на много меньших частотах, чем исходные.
- Перенос сигналов **вверх по частоте** осуществляется, в основном, чтобы расширить вверх рабочий диапазон существующего высококачественного измерительного оборудования или гетеродинных опорных генераторов.

Основу большинства устройств расширения частоты составляет смеситель с опорным высокоточным, малошумящим, мощным гетеродином, как правило, с **умножителями частоты** на выходе.

КЛАССЫ РАСШИРИТЕЛЕЙ ЧАСТОТ

В соответствии со сложившейся на рынке классификацией можно выделить следующие классы расширителей частот (табл. 1):

- расширители частоты генераторов сигналов (*Signal Generator Frequency Extenders, Signal Generator Extension, SGX*);
- расширители частоты для анализаторов цепей (*Vector Network Analyzer Extension Modules, VNA Frequency Extender, Frequency Extender for VNA, VNAX*);
- расширители частоты для анализаторов спектра (*Spectrum Analyzer Extenders, SAX*);
- расширители частоты для приемников и тюнеров (*Receiver Frequency Extenders, RFX*);
- расширители частоты для измерителей коэффициента шума (*Noise Figure Analyzer Frequency Extenders, NFA Extenders, NFAX*). К этому классу устройств некоторые компании–производители относят блоки преобразования частоты (Frequency Block Converter, FBC).

Расширители диапазона рабочей частоты РДРЧ (Frequency Extender) представляют собой преобразователи радиосигнала вниз (или вверх) по частоте, позволяющие расширить функциональные возможности и, главное, диапазон рабочей частоты существующего радиооборудования. Зачастую эти устройства кратко называют **модулями (устройствами) расширения (Extension Module) и даже просто расширителями.**

Следует заметить, что зачастую компании–производители не выделяют устройства расширения рабочей частоты в отдельный класс, а относят их к классу смесителей и не корпусируют особым образом.

РАСШИРИТЕЛИ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ СИГНАЛОВ

Следует заметить, что ряд производителей осуществляет расширение диапазона рабочей частоты генераторов вниз, предлагая эту процедуру при изготовле-

Расширители диапазона рабочей частоты генераторов сигналов (SGX) предназначены для увеличения рабочей частоты стандартных низкочастотных источников сигнала или генераторов до более высокого миллиметрового частотного диапазона. Благодаря этим расширителям у пользователей появилась альтернативная возможность недорого приобретать источники сигналов миллиметровых волн, не потеряв всех функциональных возможностей и характеристик, которые обеспечиваются стандартными промышленными моделями. Для питания SGX-расширителей, как правило, требуется внешний источник питания постоянного тока.

нии и поставке генераторов как дополнительную опцию.

Одним из ведущих поставщиков инновационных расширителей диапазонов рабочей частоты миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов для векторных и скалярных анализаторов цепей (VNA Extension Modules), анализаторов спектра (Spectrum Analyzer Extension Modules), преобразователей и генераторов сигналов (Signal Generator Extension Modules) является американская компания OML (Oleson Microwave Labs).

Расширители частоты генераторов сигнала от компании OML повышают до миллиметрового диапазона рабочую частоту существующих синтезаторов с выходной частотой до 20 ГГц. Модули, охватывающие волноводные полосы в диапазоне 50–500 ГГц, соответствуют требованиям директивы RoHS. Модули оснащены опцией ручного управления мощностью с использованием микрометра в качестве механизма настройки. Стандартный исходный модуль требует подключения напряжения +12 В, которое обеспечивается многими серийно выпускаемыми источниками питания. В качестве альтернативы доступна специализированная опция SxxMS-AG, предусматривающая поставку источника питания исходного модуля.

На рис. 1 показана структура линейки генераторных модулей (Source Modules), работающих в диапазоне 50–325 ГГц, которые используются компанией OML для реализации расширителей частот разного назначения [1]. Умножители частоты в устройстве выполнены по балансным конфигурациям.

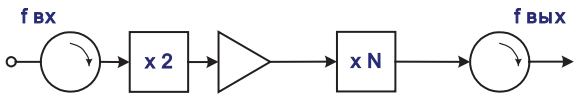
Восемь модулей серии SxxMS-AG источников миллиметрового диапазона волн от компании OML обеспечивают простой способ расширения рабочей частоты 20-ГГц генераторов сигналов серии PSG компании Keysight до диапазонов частот 50–500 ГГц (рис. 2). Модули источников компании OML обладают большой мощностью, высокой точностью установки частоты и разрешающей способностью, которыми характеризуются генераторы сигналов серии PSG, использующиеся вместе с модулями.

Наиболее высокочастотная модель серии S02.2MS расширяет существующие возможности генератора сигналов с частотой 10,8–16,7 ГГц для проведения измерений в диапазоне WR-02.2 (325–500 ГГц). Эти расширители легко под-

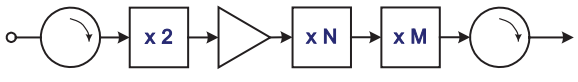
Таблица 1. **Компании–производители расширителей рабочей частоты**

Компания	Ссылка	Наличие изделий				
		SGX	VNAX	SAX	RFX	NFAX
3J Microwave	www.3jmicrowave.com (США)		+	+		
Anritsu	www.anritsu.com			+		
CERNEX	www.cernex.com					+
Cobham Defence Electronics	www.cobham.com				+	
Digital Receiver Technology	www.drti.com				+	
Ducommun	www.ducommun.com	+	+			+
Farran Technology	www.farran.com (Ирландия)		+	+	+	+
Keysight	www.keysight.com	+		+		
KratosDefense	http://gmcatalog.kratosmed.com	+				
Leonardo DRS	www.leonardodrs.com				+	
Maury Microwave	maurymw.com					+
Oleson Microwave Labs, OML	www.omlinc.com	+	+	+		
Rohde&Schwarz	cdn.rohde-schwarz.com (Германия)	+	+			
SAGE Millimeter	www.sagemillimeter.com (США)	+	+			+
Saluki	www.salukitec.com (Тайвань)	+	+	+		
Virginia Diodes, Inc.	www.vadiodes.com (США)	+	+	+		
VivaTech	www.vivatechmmw.com (Франция)		+	+		
WiNRADiO	www.winradio.com				+	

а)



f вх, ГГц	N	f вых, ГГц
12,5-18,8	2	50-75
10,0-15,0	3	60-90
12,5-18,4	3	75-110



f вх, ГГц	N	M	f вых, ГГц
11,2-17,5	2	2	90-140
9,1-14,2	3	2	110-170
11,6-18,4	3	2	140-220
12,2-18,1	3	3	220-325

б)

Рис. 1. Структурные схемы генераторных модулей (Source Modules) диапазонов 50–75; 60–90; 75–110; 90–140; 110–170; 140–220; 220–325 ГГц

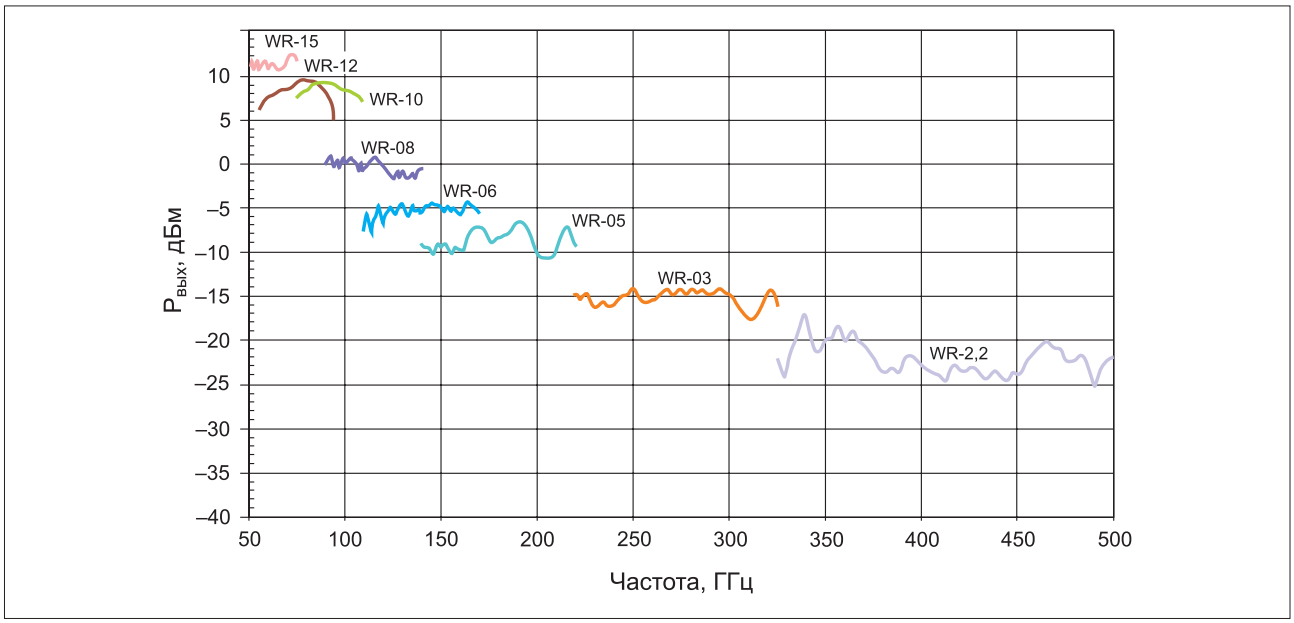


Рис. 2. Типовая выходная мощность модулей OML разных волноводных полос

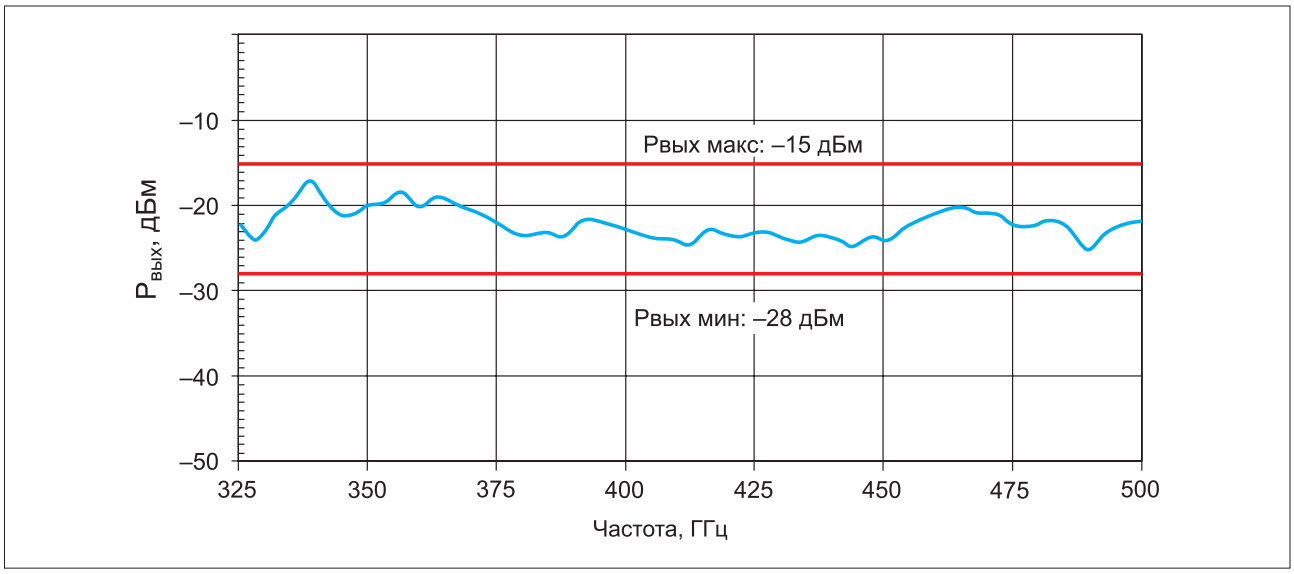


Рис. 3. Типовая частотная зависимость выходной мощности модуля WR-2.2 Source Module

ключаются к выходу генератора, создавая высококачественный источник для оценки характеристик тестируемого устройства (рис. 3). С помощью специализированных изделий этой компании можно избавиться от использования внешнего источника питания.

Компания Keysight (бывш. Agilent Technologies) в 2013 г. представила линейку расширителей частоты для генераторов сигналов, производимых для нее компанией Virginia Diodes (VDI), которая разрабатывает, изготавливает и продает миллиметровые и терагерцовые устройства, компоненты и системы для своих генераторов и анализаторов сигналов.

Генераторы сигналов серии PSG компании Keysight имеют очень хорошие технические характеристики, включая большую выходную мощность, малые уровни фазового шума, паразитных составляющих и нелинейных искажений, а также гибкие возможности введения модуляции в диапазоне частоты до 67 ГГц. При использовании с новой серией SGX (рис. 4) расширителей диапазона частоты компании Virginia Diodes Inc. (VDI) многие из этих возможностей стали доступны и в диапазоне частоты до 1,1 ТГц для решения как известных, так и вновь возникающих прикладных задач.

Рис. 4. Передняя и задняя панели расширителей SGX компании Keysight

ных задач в миллиметровом диапазоне длин волн.

14 моделей расширителей частоты генераторов сигналов E8257DVxx, выпускаемые компанией VDI, смещают диапазон рабочей частоты генераторов СВЧ-сигналов в миллиметровый диапазон длин волн. Модули со структурой AMC (*Amplifier/Multiplier Chain*) могут использоваться с генератором сигналов PSG Keysight E8257D. В них сочетаются высокая выходная мощность сигнала на выходном тестовом порту и низкий уровень фазового шума с широким перекрытием по частоте, полностью охватывающем волноводные диапазоны частот, что обеспечивает исключительно высокие эксплуатационные характеристики (табл. 2). Стандартными функциями расширителей являются возможность включения/выключения модуляции с помощью сигнала ТТЛ-уровня с частотой до 1 кГц и управляемый напряжением уровень выходного РЧ-сигнала. РЧ-сигнал, поступающий с генератора сигналов, умножается в модуле по частоте, а полученный сигнал миллиметрового диапазона выводится через выход прямоугольного волновода. Генератор сигналов и модуль E8257DVxx соединяются с помощью одного коаксиального кабеля.

Модули E8257DVxx имеют два разных входа (рис. 5), каждый из которых используется в определенном диапазоне частот. Стандартный вход предназначен для использования генераторов сигналов с диапазоном частоты до 20 ГГц, а высокочастотный вход (High Frequency) оптимизирован для использования с генераторами сигналов с диапазоном частоты 40 или 50 ГГц в зависимости от полосы рабочей частоты волновода. При подаче на высокочастотный вход сигнал не попадает в первый блок умножения с коэффициентом N1 (удвоитель или утроитель частоты), в результате чего формируемый выходной сигнал имеет более чистый спектр.

На рис. 6 показана схема конфигурирования тестовой системы для работы с низкими частотами, когда модулю требуется коаксиальная перемычка. Коэффициент умножения такой конфигурации равен N1•N2. При работе на высоких частотах коаксиальная перемычка удаляется, и коэффициент умножения частоты для этой конфигурации модуля равен N2.

Устройства умножения частоты хорошо работают как с незатухающими колебаниями, так и с импульсными сигналами. Однако необходимо заметить, что при работе с импульсными сигналами длительности фронта и среза импульсов могут несколько измениться по сравнению с первоначальным входным СВЧ-импульсом как в большую, так и в меньшую сторону.

Модули источников миллиметрового диапазона длин волн обычно обеспечивают близкий к фиксированному уровень выходной мощности, поскольку усилители работают в режиме насыщения. Влияние расширителей частоты с умножителями частоты на параметры сигналов с частотной и фазовой модуляцией проявляется в том, что значение девиации частоты или фазы увеличивается вместе со значением частоты несущей. Например, при использовании модуля с коэффициентом умножения, равном в стандартном режиме шести, частотно-модулированный входной СВЧ-сигнал с максимальной девиацией 10 МГц преобразуется в сигнал с максимальной девиацией до 60 МГц на выходе волновода.

Поскольку расширители диапазона частоты в своей основе являются нели-

Таблица 2. **Расширители частотного диапазона генераторов сигналов, производимых для Keysight компанией Virginia Diodes**

Модель компании Keysight	Модель компании VDI	Рабочая частота, ГГц
E8257DV01	WR1.0SGX	750–1100
E8257DV1B	WR1.5SGX	500–750
E8257DV02	WR2.2SGX	325–500
E8257DV2B	WR2.8SGX	260–400
E8257DV03	WR3.4SGX	220–330
E8257DV05	WR5.1SGX	140–220
E8257DV06	WR6.5SGX	110–170
E8257DV08	WR8.0SGX	90–140
E8257DV10	WR10SGX	75–110
E8257DV12	WR12SGX	60–90
E8257DV15	WR15SGX	50–75
E8257DV04	WR4.3SGX	170–260

Рис. 5. Задняя панель расширителя серии SGX компании Virginia Diodes

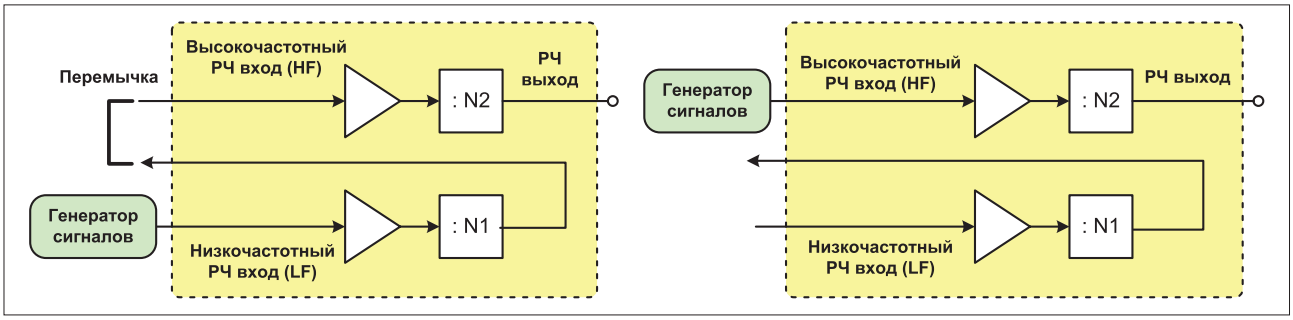


Рис. 6. Конфигурирование расширителей при работе с низкими (LF) и высокими частотами (HF)

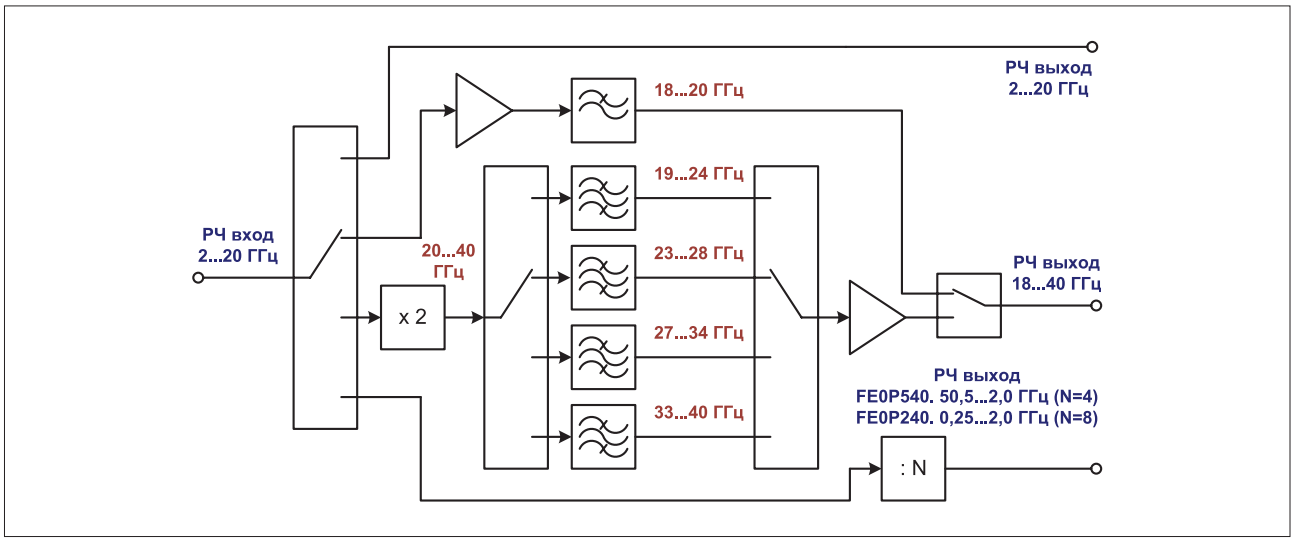


Рис. 7. Структура расширителей частоты серии FE компании Kratos

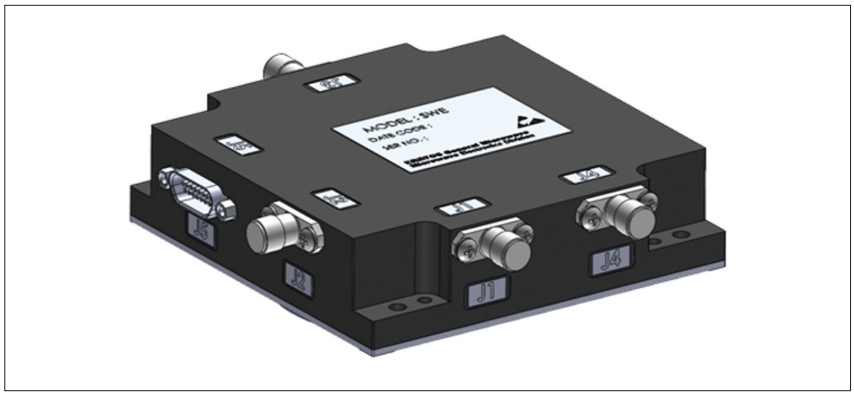


Рис. 8. Расширитель частоты FE0240 от компании Kratos

Рис. 9. Расширитель частоты E-диапазона модели STE-SF612-03-S1

Таблица 3. **Расширители частоты серии STE компании Sage Millimeter**

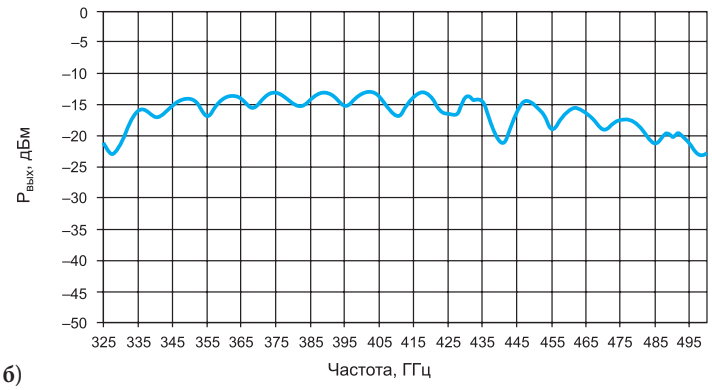
Диапазон	Модель	f вх, ГГц	Pвх, дБм	f вых, ГГц	P вых, дБм	Питание, В/мА
Ka	STE-SF228-08-S1	13,25–20,00	3,0–10,0	26,50–40,00	8,0	+12,0/180
Q	STE-SF322-05-S1	11,00–16,67	3,0–10,0	33,00–50,00	5,0	+12,0/180
U	STE-SF319-05-S1	13,33–20,00	3,0–10,0	40,00–60,00	5,0	+12,0/200
V	STE-SF415-04-S1	12,50–18,75	3,0–10,0	50,00–75,00	4,0	+12,0/500
E	STE-SF612-03-S1	10,00–15,00	3,0–10,0	60,00–90,00	3,0	+12,0/550
W	STE-SF610-00-S1	12,50–18,33	3,0–10,0	75,00–110,0	0,0	+12,0/550
F	STE-SF908-00-S1	10,00–15,56	3,0–10,0	90,0–140,0	–3,0	+12,0/650
D	STE-SF906-00-S1	12,22–18,89	3,0–10,0	110,0–170,0	–6,0	+12,0/650

нейными устройствами, их нельзя использовать для сигналов с амплитудной модуляцией, а также с любым типом цифровой модуляции, использующим изменение амплитуды, например QAM, из-за серьезного ограничения уровня, которое влияет на амплитуду выходного сигнала. Благодаря тщательной проработке конструкции нежелательные гармоники на входе обычно подавляются более чем на 20 дБ. Для каждого модуля расширения частотного диапазона E8257DVxx требуется внешний источник питания N5262VDI-175.

Четыре модели широкополосных расширителей частоты серии FE были разработаны компанией Kratos Defense & Security Solutions, чтобы при небольших затратах увеличить частотный диапазон высокопроизводительных быстродействующих синтезаторов частот на основе ФАПЧ, работающих в диапазоне 0,5–20 ГГц, до полосы 0,25–40 ГГц. В качестве источника входного сигнала для расширителей FE может использоваться ряд генераторов и синтезаторов семейств SW0120, SF6219, SM6220, D6218. Структура расширителей частоты серии FE представлена на рис. 7.

Очень популярный у потребителей синтезатор частот SM6220 формирует сигнал с широкополосной частотной модуляцией с диапазоном (размахом) 1 ГГц. Расширители FE (рис. 8) поддерживают эту возможность при формировании сигналов в диапазоне миллиметровых волн. При дополнении SM6220 расширителем FE получают широкополосный синтезатор, формирующий сигнал с частотной модуляцией в диапазоне 1–40 ГГц. Расширители могут использоваться в военных приложениях. В этом случае заказчик должен предоставить конкретные требования к окружающей среде в соответствии с системой стандартов МО США MIL STD и спецификацией EMI/RFI по ЭМС.

а)



б)

Рис. 10. Расширитель частоты серии FES (а) и зависимость выходной мощности от частоты для расширителя модели FES-02 (б)

Предлагаемые компанией Sage Millimeter (SAGE) расширители частоты STE охватывают полный волноводный диапазон 26,5–170 ГГц (табл. 3). Эти расширители состоят из высококачественных СВЧ-устройств, разработанных ранее Sage Millimeter, включая умножители частоты, усилители, фильтры, изоляторы и т. д. Для моделей каталогов требуется минимальная входная мощность на уровне 3 дБм при обеспечении выходной мощности до 20 дБм на частоте до 170 ГГц. Уровень гармоник на выходе составляет –20 дБн, а уровень побочных гармоник равен –60 дБн. По запросу заказчиков реализуются технические характеристики расширителей, отличные от предлагаемых в каталоге.

Среди новых изделий SAGE Millimeter — расширитель E-диапазона STE-SF612–03-S1, который осуществляет умножение входной частоты на 6, и предназначен для применения в системах 5G и системах связи E-диапазона. В качестве примера на рис. 9 показан внешний вид расширителя, который используется в диапазоне входной частоты 10–15 ГГц при входном уровне сигнала 0 дБм. Расширитель осуществляет генерацию гармоник и фильтрацию для создания выходного СВЧ-сигнала диапазона 60–90 ГГц с уровнем 3 дБм. Оснащенный компонентами компании SAGE, расширитель разработан и изготовлен как настольный блок для расширения диапазона рабочей частоты НЧ-синтезаторов, в т. ч. генераторов качающейся частоты (*sweepers*), с сохранением при этом всех их характеристик и функций. К типичным областям применения расширителей относятся контрольно-измерительные приборы, системы анализа сетей и лабораторные тестирующие установки. Регулируемые ножки расширителя и прочный корпус делают его универсальным дополнением к любой лабораторной среде. Это изделие можно также использовать в диапазоне до 170 ГГц.

Расширители генераторов сигналов SGX от компании Virginia Diodes (VDI) обеспечивают высококачественное частотное расширение генераторов СВЧ-сигналов в терагерцовом диапазоне. Модули VDI SGX, реализованные в 14 моделях для разных полос частот, обеспечивают полный охват волноводного диапазона и доступны в вариантах от WR15 (50–75 ГГц) до WR1.0 (750–1100 ГГц) с разрабатываемыми устройствами для дополнительных полос. Расширитель оснащен управляемым напряжением РЧ-аттенюатором. Уровень нежелательных гармоник в выходном сигнале не превышает –20 дБн. Расширители совместимы с любым генератором микроволнового сигнала, который соответствует требованиям по входной частоте и мощности. Некоторые устройства можно оснастить быстро заменяемыми компонентами для расширенного покрытия заданных частотных диапазонов.

Компания Farran Technology производит расширители частоты для генераторов сигналов серии FES, в которую входят девять моделей (рис. 10). Серия расширителей частоты позволяет значительно повысить возможности существующих генераторов СВЧ-сигналов для проведения измерений в диапазоне 40–500 ГГц. Эти расширители частоты легко подключаются к выходу имеющихся генераторов сигналов, создавая высококачественный источник для изучения характеристик тестируемого устройства, сохраняя высокую точность и разрешение по частоте генераторов серии PSG.

Наиболее высокочастотной моделью серии является расширитель FES-02, позволяющий использовать генераторы сигналов для проведения измерений в полосе 325–500 ГГц (WR-02). Устройство обеспечивает на этих частотах высокую выходную мощность, гарантированное значение которой составляет –20 дБм; при этом ее величина изменяется незначительно (рис. 10).

В 2014 г. ведущие эксперты в области измерений и тестирования основали тайваньскую компанию Saluki Technology Inc. В настоящее время Saluki специализируется на исследовании, проектировании и производстве оборудования для РЧ- и СВЧ-тестирования и измерений.

Рис. 11. Новое поколение расширителей миллиметрового диапазона серии SAV82406 компании Saluki Technology

Таблица 4. **Расширители частот серии SAV82406**

Модель	Диапазон, ГГц	Кум	Рвых, дБм	Интерфейс выходного порта
SAV82406A	50–75 ГГц	4	13 Вт	WR15
SAV82406B	75–110 ГГц	6	10 дБмВт	WR10
SAV82406C	110–170 ГГц	12	2 дБмВт	WR6.5
SAV82406D	170–220 ГГц	12	–2 дБмВт	WR5.1
SAV82406E	220–325 ГГц	18	–8 дБмВт	WR3.4
SAV82406F	325–500 ГГц	36	–18 дБмВт	WR2.2

Расширители частотного диапазона генераторов сигнала серии SAV82406 (рис. 11) относятся к новому поколению расширителей миллиметрового диапазона с рабочими выходными частотами 50–500 ГГц (табл. 4). Частота входного сигнала должна быть менее 20 ГГц. Встроенный микроволновый усилитель позволяет работать с маломощными сигналами. Соединение SAV82406 с генератором сигналов через ВЧ-кабель позволяет с легкостью составить систему генерации сигнала в миллиметровом диапазоне. Значения частоты и мощности выходного сигнала определяются соответствующими параметрами сигнала задающего генератора. Для питания модулей необходим источник питания постоянного тока 15–18 В; потребляемая мощность не превышает 20 Вт. Модули поставляются с адаптером питания постоянного тока с напряжением 15 В. Размеры модулей составляют 240×120×85 мм.

Ряд компаний производит установку расширителей в основное устройство, в данном случае — генератор сигналов, на заводе-изготовителе непосредственно при выполнении конкретного заказа. Например, нижнюю граничную частоту генераторов сигналов серии SMF с нижней частотой 1 ГГц, производимых компанией Rohde&Schwarz, можно при желании уменьшить до 10 МГц с помощью дополнительного расширителя вниз по частоте с диапазоном 0,01–1 ГГц. Так, для генератора SMF100A с нижней границей по частоте 1 ГГц в стандартной конфигурации имеется соответствующая дополнительная опция B2.

ЛИТЕРАТУРА

1. OML, Inc., Morgan Hill, CA. Frequency Extension Source Modules to Extend Signal Generator Capability from 50 to 325 GHz. MICROWAVE JOURNAL. March, 2004. www.omlinc.com.