

Отечественные модули расширения 50–75 ГГц и 75–110 ГГц для векторных анализаторов цепей

В. Муравьев д. ф. -м. н.¹, А. Зарезин¹, А. Титенко², В. Бобова²,
М. Синогин³, И. Кукушкин д. ф. -м. н., акад. РАН¹, С. Заостровных³

УДК 621.317 | ВАК 2.2.2

Разработаны и изготовлены модули расширения частотного диапазона 50–75 ГГц и 75–110 ГГц для векторных анализаторов цепей. Исследование характеристик приборов показало, что модуль 50–75 ГГц имеет типичную выходную мощность 13 дБм и рабочий динамический диапазон 135 дБ. Конверторный модуль 75–110 ГГц демонстрирует типичную выходную мощность 10 дБм и динамический диапазон 135 дБ. Разработанные модули расширения совместимы как с отечественными векторными анализаторами цепей ПЛАНАР, так и с зарубежными от Rohde & Schwarz и Keysight.

Освоение отечественного производства электроники субтерагерцового частотного диапазона (0,1–1 ТГц) в настоящий момент является одной из важнейших государственных задач. Успешное решение этой сложной задачи приведет к прорыву во многих отраслях гражданской и оборонной промышленности. Именно поэтому последнее время повсеместно ведутся работы по разработке новых приборов и методик измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ-устройств [1–3]. При этом следует отметить, что в России с производством аппаратуры субтерагерцового/терагерцового частотного диапазона есть серьезные проблемы [4]. В настоящее время отечественные векторные анализаторы цепей (ВАЦ) (АО «НПФ «Микран» [5] и ООО «ПЛАНАР» [6]) покрывают частотный диапазон до 44 ГГц, а с модулями расширения частоты – до 54 ГГц. Частотный диапазон выше 54 ГГц в России в смысле метрологических средств остается слабо освоенным, а поставки зарубежной аппаратуры находятся под строжайшим запретом и контролем зарубежных правительств. Имеющееся западное оборудование в перспективе следующих 10 лет будет выходить из строя без возможности ремонта, поскольку сервисные центры международных компаний Rohde & Schwarz и Keysight (Agilent) сформированы.

Поэтому встает острая необходимость разработки отечественных субтерагерцовых метрических средств, а также узлов этих устройств для ремонта западной техники.

СХЕМА КОНВЕРТОРНЫХ МОДУЛЕЙ

При разработке макетов конверторных модулей была использована схема прибора, показанная на рис. 1. Сигнал низкой частоты с RF-порта модуля поступал на вход активного умножителя частоты. Для накачки модуля 50–75 ГГц использовался СВЧ-сигнал с частотой 12,5–18,75 ГГц. Соответствующий коэффициент умножения составлял $\times 4$. Для накачки модуля 75–110 ГГц использовался СВЧ-сигнал с частотой 12,5–18,33 ГГц с коэффициентом умножения $\times 6$. Далее высокочастотный сигнал проходил через аттенюатор и фарадеевский изолятор, после чего поступал на вход двунаправленного ответвителя. При прямом прохождении высокочастотного сигнала -23 дБ мощности ответвлялось в референсный канал R (reference). Электромагнитная волна, отраженная от выходного порта ответвителя, делилась с тем же коэффициентом -23 дБ в измерительный канал M (measure). В каждом из каналов R и M стоял фарадеевский изолятор, после которого подключался двойной балансный смеситель. Гетеродинный вход смесителя накачивался низкочастотным сигналом с выхода LO векторного анализатора цепей через активный умножительный модуль, коэффициент умножения которого составлял $\times 4$ для модуля 50–75 ГГц и $\times 6$ для модуля 75–110 ГГц. Выходной сигнал промежуточной частоты (ПЧ) с каждого из балансных смесителей усиливался малошумящим усилителем (коэффициент шума 0,9 дБ) и поступал на вход векторного анализатора цепей.

¹ ООО «МВЭЙВ», г. Черноголовка, Московская обл., Россия, info@emwave.ru.

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

³ ООО «ПЛАНАР», г. Челябинск, Россия, vna@planarchel.ru.

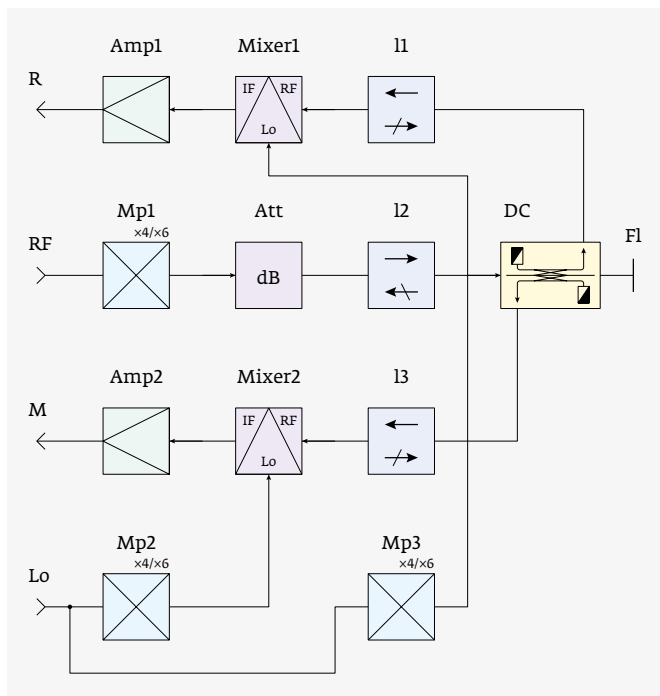


Рис. 1. Функциональная схема разработанных модулей расширения частотного диапазона. Коэффициент умножения для модуля 50–75 ГГц составлял $\times 4$, тогда как для модуля 75–110 ГГц был равен $\times 6$

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УЗЛОВ УСТРОЙСТВА

При создании макетов приборов был «с нуля» отработан целый ряд уникальных технологий, которые позволили добиться высоких технических характеристик измерительной схемы. Во-первых, в измерительных каналах R и M была использована пара балансных смесителей. Применение балансных смесителей позволило добиться значительной однородности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Однородность АЧХ на выходах R и M прибора составляла в пределах 3,5 дБ для модуля 50–75 ГГц и 5 дБ для модуля 75–110 ГГц. В большинстве иностранных модулей расширения используются гармонические смесители, которые работают на 8 и выше гармонике. Это приводит к типичной неоднородности АЧХ в 15 дБ, а в некоторых случаях и до 30 дБ.

Для лучших характеристик согласования измерительного тракта, а также для уменьшения влияния узлов модуля расширения друг на друга, смесители и умножитель сигнала RF подключены к направленному ответвителю через фарадеевские изоляторы. Такое решение значительно повышает качество модуля расширения радиочастотного диапазона как измерительной системы: режим работы выходных каскадов умножителя перестает быть зависимым от согласования с испытуемым

устройством. Кроме этого, изоляторы на входе смесителей препятствуют просачиванию сигналов гетеродина в измерительный тракт.

Команда проекта отработала изготовление фарадеевских изоляторов с использованием ферритов производства НИИ «Феррит-Домен» и сапфировых игл. Использование именно монокристаллических сапфировых игл позволило существенно снизить потери. Так в частотном диапазоне 50–75 ГГц на лучших образцах изоляторов удавалось получить потери $-0,7$ дБ, а в диапазоне 75–110 ГГц – потери $-1,0$ дБ. При этом развязка составляла не менее 30 дБ.

Отдельно стоит упомянуть, что в разработанных приборах перестройка мощности осуществляется посредством широкополосных электрически управляемых аттенюаторов на базе кремниевых p-i-n-диодов. В качестве активного элемента аттенюатора использовался полупроводниковый диод с n-i-p-i-n-структурой, что позволило создать аттенюатор с относительной полосой частот до 40%. За счет поглощения в диоде СВЧ-мощности в режиме инжекции аттенюаторы имеют малый коэффициент отражения. КСВН аттенюаторов в диапазоне ослаблений до 40 дБ не превышает 4. Управление и питание модуля расширения частотного диапазона осуществляется через кабель, подключенный к панели анализатора цепей, что позволяет управлять ослаблением аттенюатора через программу управления ВАЦ.

При производстве активных умножительных модулей использовались монокристаллические интегральные схемы (МИС) производства Китайской Народной Республики и отечественные – от АО «Микроволновые системы». Чипы собирались в волноводные корпуса. Волноводно-микроразветвляющие переходы изготавливались

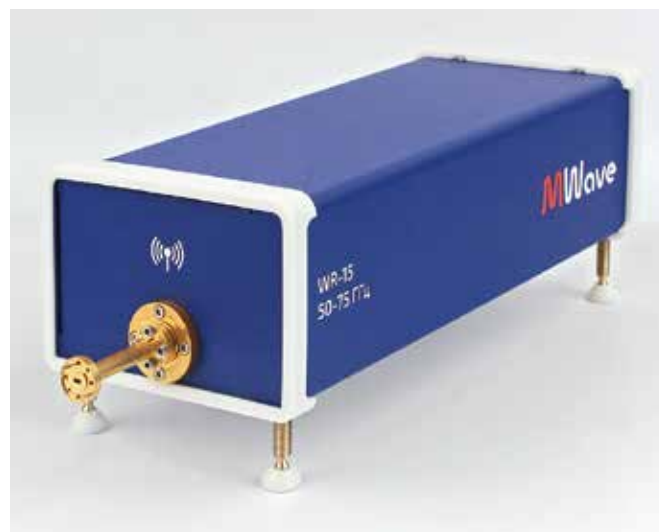


Рис. 2. Макет конверторного модуля 50–75 ГГц

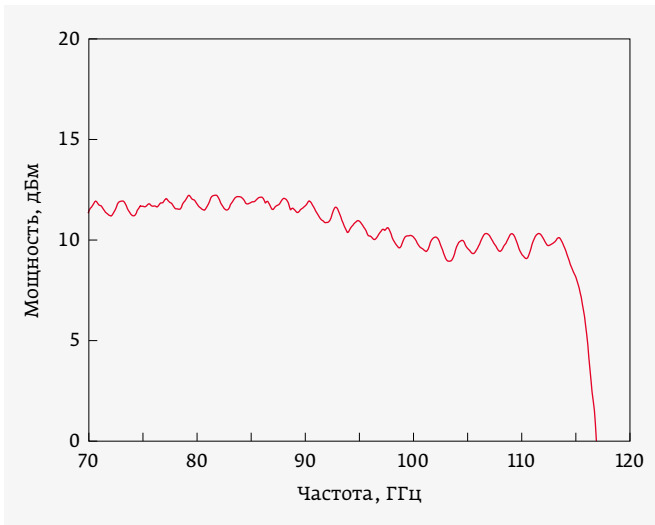


Рис. 3. Зависимость выходной мощности от частоты для модуля расширения 75–110 ГГц

на материале FSD с толщиной 127 мкм и диэлектрической проницаемостью 2,2. Волноводные корпуса производились на станке с числовым программным управлением (ЧПУ). Проектные нормы при производстве корпусов составляли 10 мкм.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕРТОРНЫХ МОДУЛЕЙ

На рис. 3 представлена зависимость выходной мощности модуля от частоты для макета расширительного модуля 75–110 ГГц. Измерения проводились с использованием болометрического измерителя мощности VDI Erickson PM5. Аналогичные измерения на макете расширительного модуля 50–75 ГГц показали типичную выходную мощность 13 дБм.

На рис. 4 показана зависимость выходной мощности на выходах ПЧ расширительного модуля 75–110 ГГц. Измерения проводились на векторном анализаторе цепей ПЛАНАР серии Кобальт С4220. Частота ПЧ для данного прибора составляла 15,45 МГц. Красной кривой на рис. 4

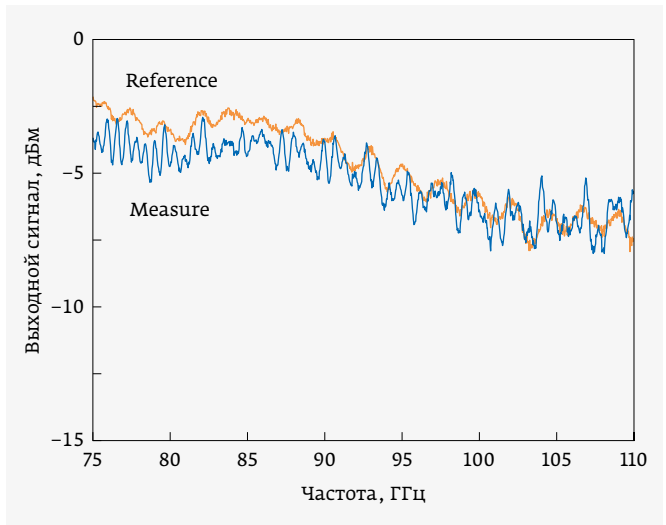


Рис. 4. Зависимость мощности ПЧ на выходах Reference (с согласованной нагрузкой) и Measure (с короткозамкнутой нагрузкой) в частотном диапазоне 75–110 ГГц

показана частотная зависимость мощности выходного сигнала с выхода R (reference) при подсоединении на выход расширительного модуля согласованной нагрузки. Синей кривой на рис. 4 изображена частотная зависимость мощности выходного сигнала с выхода M (measure) при подсоединении на выход короткозамкнутой нагрузки. Особенностью разработанных конверторных модулей является то, что в рабочей полосе частот АЧХ каналов R и M – подобны. При этом неоднородность АЧХ составляет не более 5 дБ.

На рис. 5 приведена частотная зависимость шума измерительной схемы с выхода R (reference) сигнала ПЧ расширительного модуля 75–110 ГГц. Измерения проводились на векторном анализаторе цепей ПЛАНАР серии Кобальт С4220 с шириной входной полосы $BW=1$ кГц. Если пересчитать уровень шумов на полосу $BW=10$ Гц и учесть, что, согласно рис. 4, максимальная мощность на выходе R

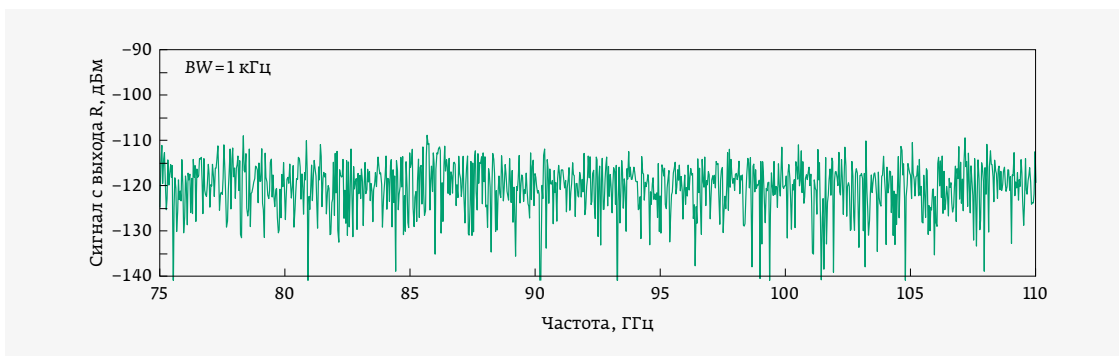


Рис. 5. Частотная зависимость шума на выходе R (reference) расширительного модуля 75–110 ГГц



ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ РАЗРАБОТЧИК и ПРОИЗВОДИТЕЛЬ
ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ МИРОВОГО УРОВНЯ



3 R&D центра
Собственные научно-исследовательские центры в Челябинске, Томске и Санкт-Петербурге

30 лет
Компания основанная в 1992 году, сегодня входит в ТОП-10 известных брендов радиоизмерительной техники в РФ

4 направления
Разрабатываем и производим измерительные и телеком решения, оборудование для производства РЗА и системы мониторинга

400 сотрудников
Опытная команда инженеров, разработчиков работает в Челябинске, Томске, Санкт-Петербурге и Москве

1500 моделей
Наши производственные мощности позволяют выпускать как серийные модели, так и решения по техническим требованиям заказчика

20% рост
Обеспечиваем ежегодный рост производственных мощностей до 20%

planarchel.ru
8 800 222 12 11



Таблица 1. Параметры модулей расширения. Сравнение с зарубежным аналогом

Параметр	ВЕКТОР 50–75 ГГц	ВЕКТОР 75–110 ГГц	Virginia Diodes WR15VNA	Ceyear 3643NA
Частота	50–75 ГГц	75–110 ГГц	50–75 ГГц	50–75 ГГц
Выходная мощность	13 дБм	10 дБм	13 дБм	5 дБм
Динамический диапазон тип. (BW = 10 Гц)	135 дБ*	135 дБ*	120 дБ	100 дБ
Динамический диапазон мин. (BW = 10 Гц)	125 дБ*	125 дБ*	110 дБ	90 дБ
Перестройка мощности	Электрическая	Электрическая	Механическая	Механическая
Калибровочный набор	+	+	+	+

* Предварительные значения, полученные в измерениях на макетах устройств.

составляет от –2 до –8 дБм, то получаем типичный динамический диапазон работы прибора от 138 до 132 дБ. Аналогичные измерения на макете модуля расширения 50–75 ГГц продемонстрировали динамический диапазон от 135 до 140 дБ. Следует заметить, что предел линейности входного каскада векторного анализатора цепей Кобальт С4220 составляет около 0 дБм. Таким образом, путем оптимизации выходного усилительного каскада ПЧ можно надеяться на увеличение динамического диапазона еще на 5 дБ.

* * *

В результате конструкторско-исследовательских работ были созданы макеты модулей расширения частотного диапазона 50–75 ГГц и 75–110 ГГц для векторных анализаторов цепей. Исследование характеристик приборов показало, что параметры конверторных модулей не уступают зарубежным аналогам. Дальнейшие планы команды проекта включают регистрацию приборов в Госреестре средств измерений, а также запуск мелкосерийного производства приборов. Параллельно начаты разработки

конверторного модуля на более высокий частотный диапазон 110–170 ГГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2687980 С1 Российская Федерация, МПК G01R 27 / 28. Устройство для измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ-устройств с преобразованием частоты: № 2018123068; заявл. 25.06.2018; опубл. 17.05.2019 / К. С. Коротков, А. А. Бабенко, Д. Р. Фролов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «КубГУ»).
2. Патент № 2731020 С1 Российская Федерация, МПК G01R 27 / 06. Способ измерения коэффициента отражения СВЧ-нагрузки: № 2019119430; заявл. 21.06.2019; опубл. 28.08.2020 / И. Ю. Данилов, А. Г. Романов, Ю. Е. Седельников, Е. В. Кривов; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева».
3. **Серков Д.** АКIP-4205 / 3 – новый анализатор спектра и векторный анализатор цепей до 1,5 ГГц // Компоненты и технологии. 2019. № 7(216). С. 118–119.
4. **Быканов В., Подъяпольский Б., Булгаков В.** Научно-технические проблемы метрологического обеспечения разработки ЭКБ нового поколения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 3(184). С. 112–119. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.184.3.112.118.
5. Официальный сайт АО «НПФ «Микран» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.micran.ru/>
6. Официальный сайт ООО «ПЛАНАР» [Электронный ресурс]. URL: <https://planarchel.ru/>

ООО СМП ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru
 электронные компоненты для поверхностного монтажа
НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК
 • Катушки индуктивности на токи до 10 А
 • U.FL разъемы и pigtail со SMA
 Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
 Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

XXVII МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

INTERPOLITEX



СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА

17—19 ОКТЯБРЯ 2023
МОСКВА, ВДНХ, ПАВИЛЬОНЫ № 55, 57



INTERPOLITEX.RU