

毫米波太赫兹测试平台

1 概述

毫米波 (millimeter wave)：波长为1~10毫米的电磁波称毫米波，它位于微波与远红外波相交叠的波长范围，因而兼有两种波谱的特点。毫米波的理论和技术分别是微波向高频的延伸和光波向低频的发展。

毫米波与较低频段的微波相比，有以下特点：

- (1) 可利用的频谱范围宽，信息容量大。
- (2) 易实现窄波束和高增益的天线，因而分辨率高，抗干扰性好。
- (3) 穿透等离子体的能力强。
- (4) 多普勒频移大，测速灵敏度高。

与光波相比，它们利用大气窗口（毫米波与亚毫米波在大气中传播时，由于气体分子谐振吸收所致的某些衰减为极小值的频率）传播时的衰减小，受自然光和热辐射源影响小。

毫米波在通信、雷达、制导、遥感技术、射电天文学和波谱学方面都有重大的意义。利用大气窗口的毫米波频率可实现大容量的卫星-地面通信或地面中继通信。利用毫米波天线的窄波束和低旁瓣性能可实现低仰角精密跟踪雷达和成像雷达。在远程导弹或航天器重返大气层时，需采用能顺利穿透等离子体的毫米波实现通信和制导。高分辨率的毫米波辐射计适用于气象参数的遥感。用毫米波和亚毫米波的射电天文望远镜探测宇宙空间的辐射波谱可以推断星际物质的成分。

太赫兹波是指频率在0.1 THz到10 THz范围的电磁波，波长大概在0.03到3mm范围，介于微波与红外之间。从频率上看，在无线电波和光波，毫米波和红外线之间；从能量上看，在电子和光子之间。在电磁频谱上，太赫兹波段两侧的红外和微波技术已经非常成熟，但是太赫兹技术基本上还是一个空白，其原因是在此频段上，既不完全适合用光学理论来处理，也不完全适合微波的理论来研究。太赫兹的独特性能给通信（宽带通信）、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像（无标记的基因检查、细胞水平的成像）、无损检测、安全检查（生化物的检查）等领域带来了深远的影响。由于太赫兹的频率很高，所以其空间分辨率也很高；又由于它的脉冲很短（皮秒量级）所以具有很高的时间分辨率。太赫兹成像技术和太赫兹波谱技术由此构成了太赫兹应用的两个主要关键技术。同时，由于太赫兹能量很小，不会对物质产生破坏作用，与X射线相比更具有优势。

毫米波与太赫兹应用于研究对测试测量也提出一系列的要求。

1. 信号产生：具有一定功率电平的连续波、脉冲信号、宽带调制信号；
2. 信号分析：频谱测量、模拟数字解调；
3. 元件测试：S参数测量、天线测试、散射特性分析、放大、上下变频器分析；
4. 单片集成电路：在片测量、参数测量与提取。

2 毫米波测试技术方案

2.1 信号产生

毫米波信号的产生是以信号源为基础倍频获得。R&S 的信号源 SMA100B 系列具有大功率低相噪的特点，能产生 67GHz 以下的高质量信号，同时支持调频、脉冲、脉内先行调频等调制方式。通过倍频器 SMZ 系列倍频器（有源）可以获得高达 170GHz 的信号。由于倍频的非线性，调制后的毫米波信号可以实现 FM 和 ϕ M，以及脉冲调制。同时能够实现脉内线性调频信号。产生信号的电平达到 +3dBm（170GHz），并可以利用倍频器内置的电子和机械衰减器，分别实现信号电平的衰减调节。机械衰减值达到 25dB，而电子衰减的调节达到 15dB。

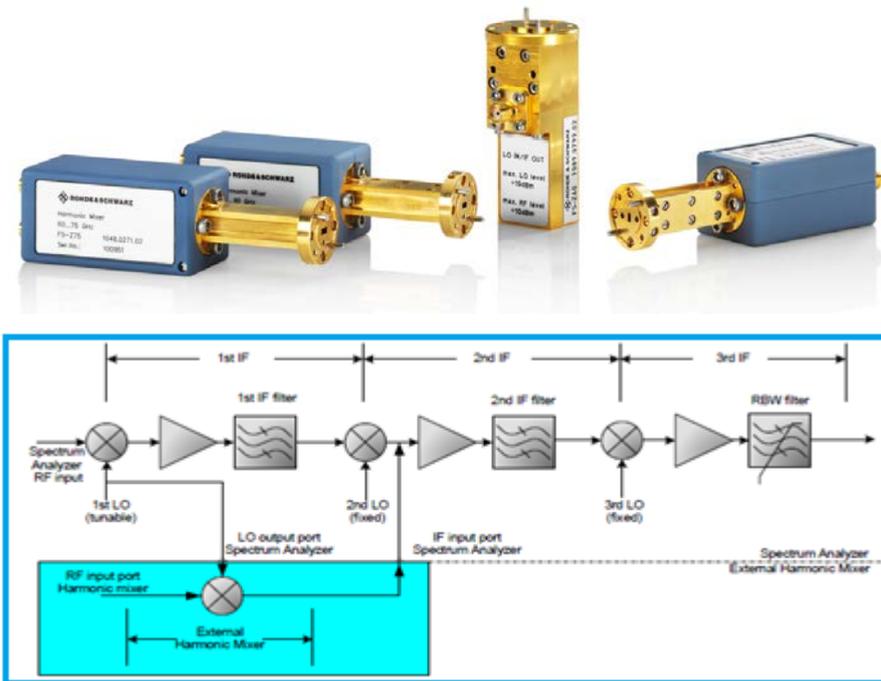


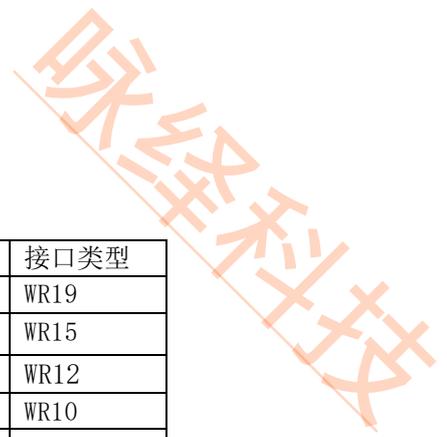


| 名称 | 型号 | 描述 | 输出功率 | 接口类型 |
|-----|---------------|-------------------|---------------|-------|
| 倍频器 | R&S®SMZ75 | 50 GHz 至 75 GHz | +5 dBm (typ.) | WR15 |
| | R&S®SMZ-B75M | 选配机械衰减器 | +4 dBm (typ.) | |
| | R&S®SMZ-B75E | 选配电子衰减器 | +1 dBm (typ.) | |
| 倍频器 | R&S®SMZ90 | 60 GHz 至 90 GHz | +5 dBm (typ.) | WR12 |
| | R&S®SMZ-B90M | 选配机械衰减器 | +4 dBm (typ.) | |
| | R&S®SMZ-B90E | 选配电子衰减器 | +1 dBm (typ.) | |
| 倍频器 | R&S®SMZ110 | 75 GHz 至 110 GHz | +5 dBm (typ.) | WR10 |
| | R&S®SMZ-B110M | 选配机械衰减器 | +4 dBm (typ.) | |
| | R&S®SMZ-B110E | 选配电子衰减器 | +1 dBm (typ.) | |
| 倍频器 | R&S®SMZ170 | 110 GHz 至 170 GHz | +8 dBm (typ.) | WR6.5 |

2.2 信号分析

信号分析以频谱分析仪（信号分析仪）为基础，通过相应频段的谐波混频器，将毫米波信号下变频到低频段进行分析。R&S 信号分析仪系列仪器 FSV30/40, FSVA30/40, FSV3030/44, FSVA3030/44, FSVR30/40, FSW26/43//50/67/85 等通过外接谐波混频器，可以进行高达 500GHz 的信号分析。其中，信号分析仪提供谐波混频器的本振信号，经过变频后的信号（中频）直接接到信号分析仪的第二级中频接收端。利用信号分析仪的后续部分进行处理和分析。





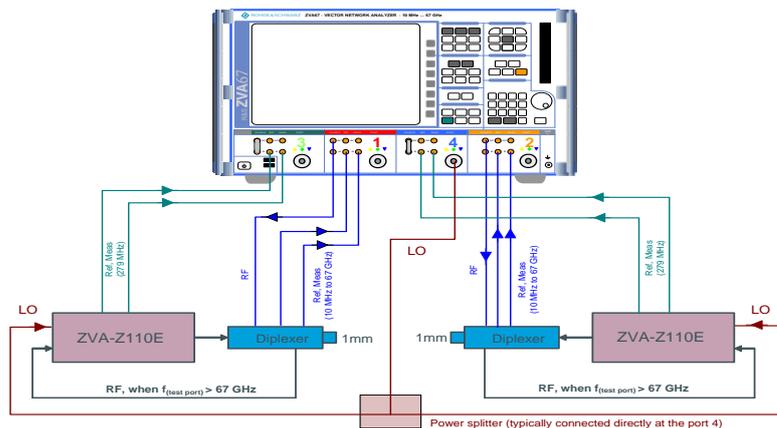
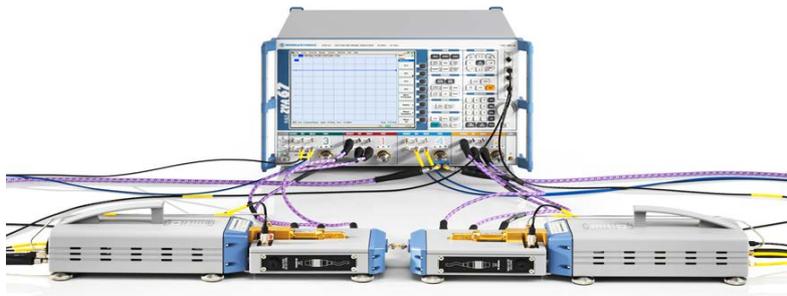
| 名称 | 型号 | 频率 | 接口类型 |
|-----------|-------------|-------------------|------|
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z60 | 40 GHz 至 60 GHz | WR19 |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z75 | 50 GHz 至 75 GHz | WR15 |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z90 | 75 GHz 至 110 GHz | WR12 |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-110 | 90 GHz 至 140 GHz | WR10 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z140 | 90 GHz 至 140 GHz | WR08 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z170 | 110 GHz 至 170 GHz | WR06 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z220 | 170 GHz 至 220 GHz | WR05 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z325 | 220 GHz 至 325 GHz | WR03 |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z500 | 325 GHz 至 500 GHz | WR02 |

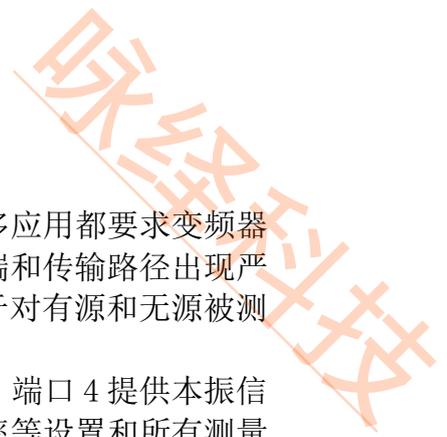
典型的变频损耗为 20-40dB, 根据不同的频段和谐波混频器的次数, 详细资料可参考技术指标书。在信号分析仪中, 集成了自动信号判读软件, 分辨由于谐波混频带来的虚假信号成分。

2.3 矢量网络分析

毫米波矢量网络分析基于 R&S ZVA24/40/50/67, ZNA26/43 (未来会推出 ZNA50/67) 等网络分析仪进行频率扩展。

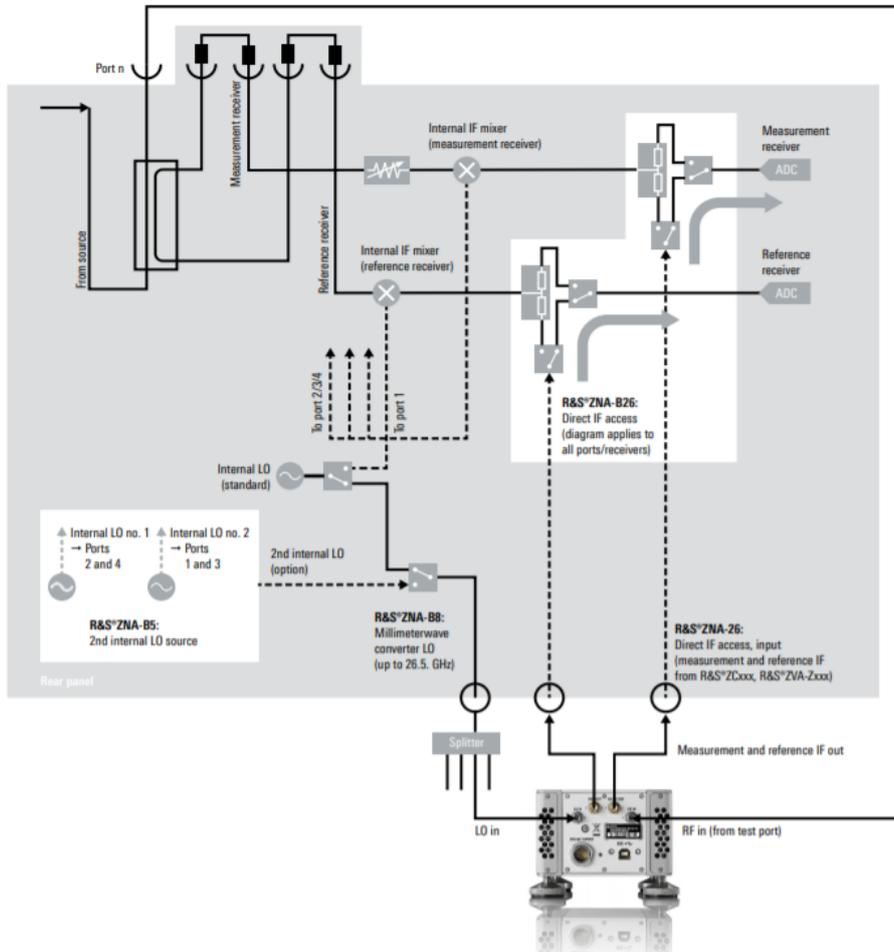
下图详细描述了扩展的原理的实现途径。四端口 ZVA67 具有 4 个独立源, ZVA-Z110 是 75-110GHz 频率扩展, 双工器对 75GHz 与 75GHz-110GHz 信号进行分配。端口 4 提供本振信号。内置于 ZVA 中的软件 ZVA-K8 控制矢量网络分析仪的频率、功率等设置和所有测量配置。





ZCxxx 毫米波变频器将 R&SZNA 频率范围扩展至 500 GHz。许多应用都要求变频器具有高输出功率。被测组件的工作频率较高，会导致波导、探头尖端和传输路径出现严重损耗。R&S 变频器具备高输出功率和一流的动态范围。它们可用于对有源和无源被测设备进行特性测量。

四端口 ZNA43 具有 4 个独立源，ZC330 是 220-330GHz 频率扩展，端口 4 提供本振信号。内置于 ZNA 中的软件 ZNA-K8 控制矢量网络分析仪的频率、功率等设置和所有测量配置。

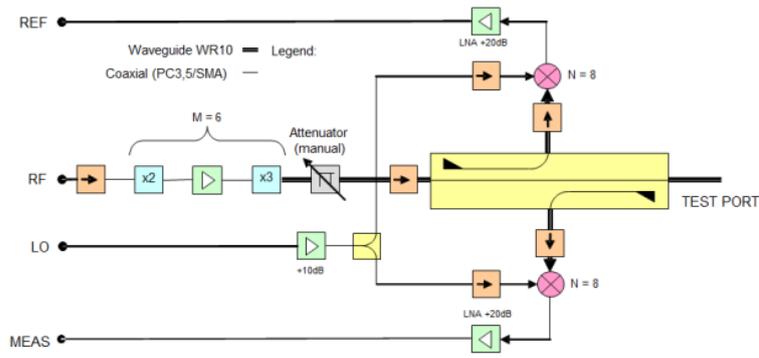




2.3.1 高达 500GHz 的毫米波扩展变频器

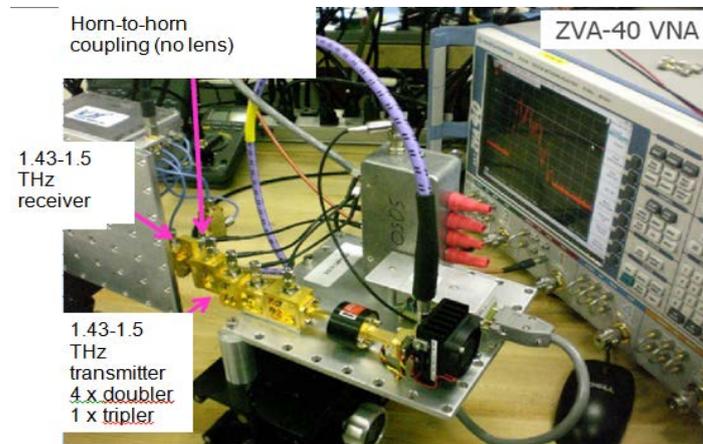
射频信号通过倍频扩展至高频毫米波信号，谐波混频器、本振信号及相应的定向耦合器构成参考支路、测量支路。基于 R&S 矢量网络分析仪 ZVA24/40/50/67，可扩展至 500GHz 的变频模块如下所示。

| 型号 | 频率范围 | 输出功率 (dBm) | 动态范围 (dB) | 接口类型 |
|--------------|-----------------|------------------------|----------------|------|
| R&S®ZVA-Z75 | 50 GHz~75 GHz | >0, typ. 4 | >90, typ. 110 | WR15 |
| R&S®ZVA-Z90 | 60 GHz~90 GHz | >6, typ. 10 | >100, typ. 115 | WR12 |
| R&S®ZVA-Z110 | 75 GHz~110 GHz | >7, typ. 10 | >100, typ. 110 | WR10 |
| R&S®ZVA-Z140 | 90 GHz~140 GHz | >-1, typ. 3 | >85, typ. 105 | WR08 |
| R&S®ZVA-Z220 | 140 GHz~220 GHz | >-14, typ. -10 | >85, typ. 105 | WR05 |
| R&S®ZVA-Z325 | 220 GHz~325 GHz | >-22, typ. -20 | >80, typ. 100 | WR03 |
| R&S®ZVA-Z500 | 325 GHz~500 GHz | >-25, typ. -22 | >70, typ. 90 | WR02 |
| R&S®ZC110 | 75 GHz~110 GHz | >+12, typ. +14 | >110, typ. 120 | WR10 |
| R&S®ZC140 | 90 GHz~140 GHz | >+5~+7, typ. +7~+9 | >105, typ. 120 | WR08 |
| R&S®ZC170 | 110 GHz~140 GHz | >+5, typ. +9 | >90, typ. 105 | WR08 |
| R&S®ZC220 | 140 GHz~220 GHz | >-4~-2, typ. 0~+2 | >100, typ. 115 | WR05 |
| R&S®ZC330 | 220 GHz~330 GHz | >-24~-17, typ. -18~-13 | >100, typ. 115 | WR03 |
| R&S®ZC500 | 330 GHz~500 GHz | >+12, typ. +14 | >85, typ. 100 | WR02 |



2.3.2 更高频段的扩展

支持 VDI Virginia Diodes Inc (<http://vadiodes.com/>) 矢量网络分析仪的扩展，R&S ZVA 与 VDI 的扩展，可完成 1THz 以上的矢量网络分析。下图描述了基于 ZVA40 和 VDI 扩展，完成 1.5THz 的矢量网络分析的成功实践。



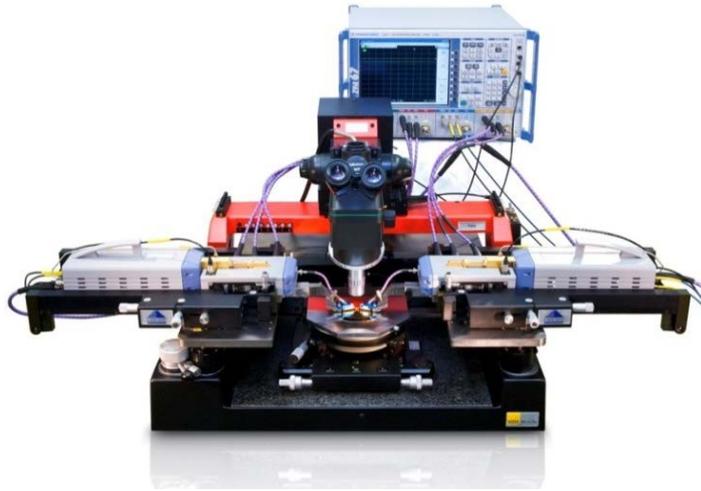
2.3.3 全端口 S 参数校准

毫米波的部件大多数是波导接口。R&S 的毫米波波段支持 T（直通），S（短路），Offset Short（偏置短路，在测试端口与短路之间增加四分之一波长波导段），M（匹配，固定或滑动负载）。



2.4 在片测量

兼容 Cascade 探针台，可以实现毫米波的器件在片测量。Cascade Wincal 软件支持矢量网络分析的校准。具体的探针台、探针的配置信息可参考。由于 R&SZV-Zxx 的扩展器采用无风扇的设计，R&SZCxxx 的扩展器采用底噪坟山设计，工作过程中低噪声和低振动，特别适合探针台及在片测量。



3 配置信息

| 名称 | 型号 | 频率范围 |
|----------------------------------|---------------|-------------------|
| 矢量网络分析仪基本单元 | | |
| 矢量网络分析仪, 4 端口, 40GHz, 2.4mm | R&S®ZVA40 | 10MHz 至 40GHz |
| 矢量网络分析仪, 4 端口, 40GHz, 2.92mm | R&S®ZVA40 | 10MHz 至 40GHz |
| 矢量网络分析仪, 4 端口, 50GHz, 2.4mm | R&S®ZVA50 | 10MHz 至 50GHz |
| 矢量网络分析仪, 4 端口, 67GHz, 1.85mm | R&S®ZVA67 | 10MHz 至 67GHz |
| 矢量网络分析仪, 2 端口, 26.5 GHz, 3.5 mm | R&S®ZNA26 | 10 MHz 至 26.5 GHz |
| 矢量网络分析仪, 4 端口, 26.5 GHz, 3.5 mm | R&S®ZNA26 | 10 MHz 至 26.5 GHz |
| 矢量网络分析仪, 2 端口, 43.5 GHz, 2.92 mm | R&S®ZNA43 | 10 MHz 至 43.5 GHz |
| 矢量网络分析仪, 2 端口, 43.5 GHz, 2.4 mm | R&S®ZNA43 | 10 MHz 至 43.5 GHz |
| 矢量网络分析仪, 4 端口, 43.5 GHz, 2.92 mm | R&S®ZNA43 | 10 MHz 至 43.5 GHz |
| 矢量网络分析仪, 4 端口, 43.5 GHz, 2.4 mm | R&S®ZNA43 | 10 MHz 至 43.5 GHz |
| 矢量网络分析仪选件 | | |
| 直接发生器/接收机访问接口, 4 端口, 40GHz | R&S®ZVA40-B16 | 10MHz 至 40GHz |
| 直接发生器/接收机访问接口, 4 端口, 50GHz | R&S®ZVA50-B16 | 10MHz 至 50GHz |
| 直接发生器/接收机访问接口, 4 端口, 67GHz | R&S®ZVA67-B16 | 10MHz 至 67GHz |
| 直接发生器/接收机访问接口, 2 端口, 26.5GHz | R&S®ZNA26-B16 | 10MHz 至 26.5GHz |
| 直接发生器/接收机访问接口, 4 端口, 26.5GHz | R&S®ZNA26-B16 | 10MHz 至 26.5GHz |
| 直接发生器/接收机访问接口, 2 端口, 43.5GHz | R&S®ZNA43-B16 | 10MHz 至 43.5GHz |
| 直接发生器/接收机访问接口, 4 端口, 43.5GHz | R&S®ZNA43-B16 | 10MHz 至 43.5GHz |
| 时域 (TDR) | R&S®ZVAB-K2 | |
| 变频器控制软件 | R&S®ZVAB-K8 | |
| 外部衰减器控制 | R&S®ZVAB-B8 | |
| 时域 (TDR) | R&S®ZNA-K2 | |
| 变频器控制软件 | R&S®ZNA-K8 | |
| 毫米波变频器扩展本振 (LO) | R&S®ZNA-B8 | |
| 直接中频接入 | R&S®ZNA-B26 | |
| 毫米波频率扩展单元 | | |
| WR15 毫米波频率扩展单元 | R&S®ZVA-Z75 | 50GHz 至 75GHz |
| WR12 毫米波频率扩展单元 | R&S®ZVA-Z90 | 60GHz 至 90GHz |
| WR10 毫米波频率扩展单元 | R&S®ZVA-Z110 | 75GHz 至 110GHz |

| | | |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| WR10 毫米波频率扩展单元 | R&S®ZC110 | 75 GHz 至 110 GHz |
| WR08 毫米波频率扩展单元 | R&S®ZC140 | 90 GHz 至 140 GHz |
| WR08 毫米波频率扩展单元 | R&S®ZC170 | 110 GHz 至 140 GHz |
| WR05 毫米波频率扩展单元 | R&S®ZC220 | 140 GHz 至 220 GHz |
| WR03 毫米波频率扩展单元 | R&S®ZC330 | 220 GHz 至 330 GHz |
| WR02 毫米波频率扩展单元 | R&S®ZC500 | 330 GHz 至 500 GHz |
| 频谱分析仪基本单元 | | |
| 频谱分析仪, 30/40GHz | R&S®FSV30/FSV40 | 10Hz 至 30/40GHz |
| 频谱分析仪, 30/40GHz | R&S®FSVA30/FSVA40 | 10Hz 至 30/40GHz |
| 频谱分析仪, 30/40GHz | R&S®FSVR30/FSVA40 | 10Hz 至 30/40GHz |
| 频谱分析仪, 30/44GHz | R&S®FSV3030/FSV3044 | 10Hz 至 30/44GHz |
| 频谱分析仪, 30/44GHz | R&S®FSVA3030/FSVA3044 | 10Hz 至 30/44GHz |
| 频谱分析仪, 26.5/43/50/67/85GHz | R&S®FSW26/43/50/67/85 | 2Hz 至 26.5/43/50/67/85GHz |
| 信号源分析仪, 26.5/50GHz | R&S®FSWP26/50 | 10mHz 至 26.5/50GHz |
| 毫米波频率扩展单元 | | |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z60 | 40 GHz 至 60 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z75 | 50 GHz 至 75 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-Z90 | 75 GHz 至 110 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | R&S®FS-110 | 90 GHz 至 140 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z140 | 90 GHz 至 140 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z170 | 110 GHz 至 170 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z220 | 170 GHz 至 220 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z325 | 220 GHz 至 325 GHz |
| 毫米波谐波下变频器 | RPG FS-Z500 | 325 GHz 至 500 GHz |
| 信号源基本单元 | | |
| 微波信号源, 20/31.8/40/50/76GHz | R&S®SMA100B | 8kHz 至 20/31.8/40/50/76GHz |
| 毫米波频率扩展单元 | | |
| 毫米波倍频器 | R&S®SMZ75 | 50 GHz 至 75 GHz |
| 选配机械衰减器 | R&S®SMZ-B75M | 50 GHz 至 75 GHz |
| 选配电子衰减器 | R&S®SMZ-B75E | 50 GHz 至 75 GHz |
| 毫米波倍频器 | R&S®SMZ90 | 60 GHz 至 90 GHz |
| 选配机械衰减器 | R&S®SMZ-B90M | 60 GHz 至 90 GHz |
| 选配电子衰减器 | R&S®SMZ-B90E | 60 GHz 至 90 GHz |
| 毫米波倍频器 | R&S®SMZ110 | 75 GHz 至 110 GHz |
| 选配机械衰减器 | R&S®SMZ-B110M | 75 GHz 至 110 GHz |
| 选配电子衰减器 | R&S®SMZ-B110E | 75 GHz 至 110 GHz |
| 毫米波倍频器 | R&S®SMZ170 | 110 GHz 至 170 GHz |