

文章编号: 2095-4980(2021)06-0978-06

太赫兹-16 dB 本振信号耦合器设计与实现

谭 贞^{1a}, 丁江乔^{*1a,2}, 张沁旖^{1b}, 刘 冬²

(1.南京信息工程大学 a.电子与信息工程学院; b.长望学院, 江苏 南京 210044; 2.中国科学院 紫金山天文台, 江苏 南京 210034)

摘要: 针对太赫兹频段边带分离接收机的应用需求, 综合考虑本振信号弱耦合度、射频信号高方向性及现阶段铣削工艺精确度等要求, 研制了一款400~500 GHz频段-16 dB 本振信号波导耦合器。主要包括分支型定向耦合器的耦合度特性分析、-16 dB弱耦合度波导耦合器设计、基于数控机械加工(CNC)技术的器件制备与结果讨论。2件样品实测结果均表明: 该耦合器在400~500 GHz频段(相对带宽为22.5%)获得本振信号耦合度在-16~-17 dB, 射频信号方向性为-1.2 dB, 隔离度优于-20 dB, 所有端口回波损耗优于-15 dB。上述性能均与仿真结果保持高度一致, 表明当前CNC技术能够满足该高频段波导耦合器制备的高精确度需求。

关键词: 太赫兹; 波导耦合器; 耦合度; 本振信号; 射电天文

中图分类号: TN710

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021294

Design and implementation of THz -16 dB coupler for local oscillator signal

TAN Zhen^{1a}, DING Jiangqiao^{*1a,2}, ZHANG Qinyi^{1b}, LIU Dong²

(1a.School of Electronic & Information Engineering; 1b.Changwang School of Honors, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China; 2.Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu 210034, China)

Abstract: A -16 dB waveguide coupler for the Local Oscillator(LO) signal in 400-500 GHz band is developed in order to meet the application requirements of terahertz sideband-separating receivers, mainly considering the weak coupling of LO signal, the high directivity of Radio Frequency(RF) signal and current milling process accuracy. The characteristic of the coupling degree of the branch coupler is analyzed. The design of a -16 dB waveguide coupler is conducted. The device is processed based on Computer Numerical Control(CNC) technology and the result is discussed. The measured results of both samples show that this coupler can work in 400-500 GHz band (fractional bandwidth of 22.5%), obtaining the coupling coefficient for the LO signal in -16~-17 dB, the directivity for RF signal of -1.2 dB, the isolation degree better than -20 dB, and the return loss of each port better than -15 dB. The performance is highly consistent with that of the simulations, which indicates that current CNC technology can meet the high precision requirements for the fabrication of such high frequency waveguide coupler.

Keywords: terahertz; waveguide coupler; coupling degree; Local Oscillator signal; radio astronomy

太赫兹(THz)频段一般指 0.1~10 THz 频率范围, 覆盖短毫米波、亚毫米波至远红外波段, 是重要的前沿交叉领域, 在射电天文、雷达探测、高速通信等方面均展现出优越的应用前景^[1-2]。其中, 在射电天文研究领域, 为了实现双边带信号同时观测任务, 研制具有边带分离特性的太赫兹超导相干接收机成为必然^[3]。该系统中, 作为关键器件之一的定向耦合器, 能够将本振信号和微弱射频信号同时耦合至混频芯片, 进行射频信号与本振信号的下变频。毫无疑问, 耦合器的耦合度等特性直接关乎接收机系统的性能优劣。因此, 太赫兹高性能波导耦合器的研制被提上日程, 得到众多学者的广泛关注。矩形波导是太赫兹频段收发系统^[3-4]、滤波器^[5]、耦合器^[6]等电路的常用传输线结构, 该类型器件表现出低损耗、功率容量大、易安装固定、易连接等优点。在波导型定向耦合器方面, 文献[7-8]提出了 W-波段单孔型耦合器结构, 仅需要一个宽耦合缝隙结构即可实现功率耦合的功能, 但其操作带宽较窄, 波导间隙过薄, 一般难以承受机械加工及装配应力要求。得益于深反应离子刻蚀技术(Deep-

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12003011)

*通信作者: 丁江乔 email:jqding@nuist.edu.cn

Reactive Ion Etching, DRIE)等微工艺技术的发展, 多样式太赫兹波导定向耦合器结构被报道。首先结合弯头及装配设计, 常规定向耦合器得到验证^[9-10]; 其次, 田字型复杂耦合结构被提出, 并应用到耦合器中^[11-12]; 而且弱耦合度 (-10 dB)耦合器也得到有效研制^[13]。虽然微工艺技术具有高精度、高灵活、可控性强等优点, 但同时存在刻蚀陡峭度不足、刻蚀粗糙度高、镀金工艺不均匀等不足, 且需要额外的金属固定装置、高精度对准卡扣等, 这些因素均会导致器件性能的恶化。另一方面, 随着数控机械加工(CNC)技术的快速发展, 经典的分支型波导耦合器^[3-4,14]、多孔波导耦合器^[15]和低幅度不平衡耦合器^[16]成功实现, 且能够获得出色的损耗、隔离度、幅度不平衡、易装配等特性。综上所述, 已有多种太赫兹波导型耦合器被提出并报道。其中, 分支型耦合器最为经典, 高性能倍频器^[4]、混频接收机^[3,14]等系统中均集成了此类耦合器; 但是, 一般采用-3 dB 耦合度的设计。

针对该 400~500 GHz 频段超导(Superconductor-Insulator-Superconductor, SIS)混频接收机的应用需求, 折衷本振信号弱耦合度、射频信号高方向性及现阶段 CNC 工艺精确度等因素, 本文将重点进行分支型波导耦合器的耦合度特性分析, 并提出 400~500 GHz 频段-16 dB 弱耦合度耦合器的设计、制备及验证。一方面, 实现本振信号的弱耦合、射频信号的高方向性传输, 以满足混频系统中超导 SIS 混频器的噪声性能需求; 另一方面, 探索国内 CNC 工艺精确度极限, 能否满足 400~500 GHz 频段-16 dB 波导耦合器的高精确度加工要求。

1 耦合度特性分析

图 1 给出了典型 N 分支型定向耦合器的三维结构图^[17], 结构上有 4 个端口: 输入端 p_1 、直通端 p_2 、耦合端 p_3 和隔离端 p_4 , 且 p_2 和 p_3 端口输出信号一般存在 90° 相位差。该结构由 N 个分支构成, 每个耦合分支尺寸均一致, 为 $w_{\text{gap}} \times l_{\text{gap}}$, 分支间间隔长度为 t_{gap} 。参照图 1 的标注, 该定向耦合器的重要参量包括: 耦合度 $C = -10 \lg(P_1/P_3) = |S_{31}|$ (端口 1 馈入时, 端口 3 接收到的功率); 方向性 $D = -10 \lg(P_3/P_4) = |S_{34}|$ (端口 4 馈入时, 端口 3 接收到的功率, 同理端口 1 和端口 2 间的传输特性也为方向性); 隔离度 $I = -10 \lg(P_1/P_4) = |S_{41}|$ (端口 1 馈入时, 端口 4 接收到的功率)。

其工作原理如下: 假设输入端电磁波幅度为 A_1 , N 个耦合分支均激励起前向和后向耦合电磁波; 所有前向电磁波叠加形成耦合信号, 从耦合端 p_3 输出, 总幅度为 A_3 ; 所有后向电磁波叠加形成隔离信号, 从隔离端 p_4 输出, 总幅度为 A_4 。假设均匀耦合分支对前向电磁波的耦合系数为 f_3 , 后向电磁波的耦合系数为 f_4 , 传输系数为 f_2 。因此, 每个耦合分支的前向电磁波幅度为 $f_3 A_1 f_2^{i-1}$ ($i=1 \sim N$), 前向电磁波到耦合端 p_3 的传输距离为 $(N-i) \times t_{\text{gap}}$, 则在耦合端 p_3 获得的前向电磁波信号幅度为:

$$A_3 = \sum_{i=1}^N f_3 A_1 f_2^{i-1} e^{-j\beta(N-i)t_{\text{gap}}} \quad (1)$$

式中 β 为波导传输线的相位常数。另一方面, 每个耦合分支的后向电磁波幅度为 $f_4 A_1 f_2^{i-1}$ ($i=1 \sim N$), 从输入端 p_1 到隔离端 p_4 的传输距离为 $2(i-1) \times t_{\text{gap}}$, 则在隔离端获得的后电磁波信号幅度为:

$$A_4 = \sum_{i=1}^N f_4 A_1 f_2^{i-1} e^{-2j\beta(i-1)t_{\text{gap}}} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)可得, 定向耦合器的耦合度 C 和隔离度 I 为:

$$C = -20 \lg \left| \frac{A_3}{A_1} \right| = -20 \lg f_3 - 20 \lg \left(\sum_{i=1}^N f_2^{i-1} \right) \quad (3)$$

$$I = -20 \lg \left| \frac{A_4}{A_1} \right| = -20 \lg \left(f_4 \sum_{i=1}^N f_2^{i-1} e^{-2j\beta(i-1)t_{\text{gap}}} \right) \quad (4)$$

根据耦合器理论^[17], 单个耦合分支的电磁波能量很小, 因此可假设传输系数 $f_2 \approx 1$; 同时, 耦合分支的间距设置为 $t_{\text{gap}} = \lambda_g/4$ (λ_g 为波导波长), 即 $\beta t_{\text{gap}} = \pi/2$; 此时, 理想情况下会导致后向电磁波分量的相互抵消, 从而获得高隔离特性。根据上述假设条件, 耦合度 C 和隔离度 I 的式(3)和式(4)可简化为:

$$C = -20 \lg f_3 - 20 \lg N \quad (5)$$

$$I = -20 \lg \left(f_4 \sum_{i=1}^N e^{-j(i-1)\pi} \right) = \begin{cases} \infty, & N \text{ 为偶数} \\ -20 \lg(f_4), & N \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (6)$$

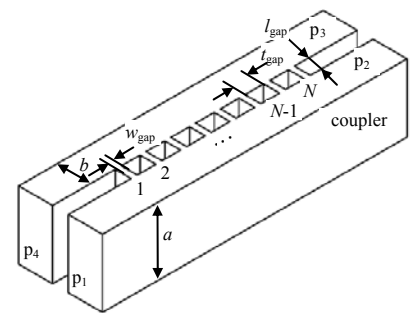


Fig.1 Typical structure of an N -branch waveguide directional coupler

图 1 典型 N 分支型波导定向耦合器结构

综上获得如下结论：

1) 根据耦合度 C 的计算，定向耦合器的耦合度 C 与单个耦合分支的耦合系数 f_3 和耦合分支的数量 N 有关，而耦合器的方向性与耦合度成线性反比关系。

2) 根据隔离度 I 的计算，耦合分支的数量 N 为偶数时，理想状态下定向耦合器的隔离度 I 为无穷大；耦合分支的数量 N 为奇数时，隔离度 I 与后向电磁波的耦合系数 f_4 有关。

为了进一步模型验证分支型定向耦合器的耦合度特性，基于上述理论分析，结合 ANSYS HFSS 仿真软件，针对图 1 中的经典结构，对 400~500 GHz 频段的分支型定向耦合器模拟计算，为简化运算，材质采用默认设置，为理想导体(Perfect Electric Conductor, PEC)。图 2 给出了 450 GHz 频点处，分支型耦合器的耦合度 C 随分支数量 N 及耦合分支宽度 w_{gap} 的变化规律。显然，耦合度随分支数增多而增大，随耦合分支宽度变宽而增大(耦合宽度的变大将引起耦合系数 f_3 的变大)。该特性与上述理论分析一致，同时该规律的总结，为需求不同耦合度定向耦合器的设计提供理论参考，耦合度的变化由耦合分支宽度及分支数量两个维度决定。

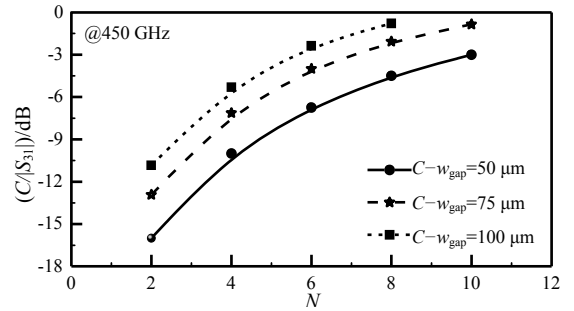


Fig.2 Curves of coupling degrees vs. branch numbers(N) and coupling widths(w_{gap})
图 2 耦合度随分支数(N)及耦合宽度(w_{gap})的变化曲线

2 -16 dB 耦合器设计

在具有边带分离特性的 400~500 GHz 频段超导 SIS 相干接收机系统中，该 SIS 混频器单元正常工作状态下，需要本振功率约 300 nW；而针对射频信号输入端，则要求传输损耗越小越好，以期获得最佳噪声性能。因此，本文将重点研究 400~500 GHz 频段 -16 dB 弱耦合度耦合器的设计，具有指标要求如下：a) 耦合度 C 为 -16 dB ($2.5\%P_{\text{out}}$ ，当前固态倍频链路在 400~500 GHz 频段输出功率 P_{out} 约 10 μW 量级)；b) 方向性 D 越小越好(射频信号损耗越大，将直接导致 SIS 混频器噪声性能的恶化)；c) 隔离度 I 优于 -20 dB (本振信号与射频信号通道间的隔离性能要求较高)。此外，综合考虑现阶段国内 CNC 铣削精确度等因素，如最精细钻头直径为 50 μm ，能否满足该耦合器的制备要求。

综上，折衷弱耦合度、高方向性及工艺精确度等因素，结合前文的耦合度特性分析，提出图 3 的 400~500 GHz 频段 2 分支定向耦合器结构(此模型材质也为 PEC)。根据奇偶模分析计算方法及其经验公式^[18]，并结合图 2 的变化趋势，计算出 -16 dB 耦合度时耦合分支的宽度初值(w_{gap})；同时，根据上述耦合器工作原理的讨论，耦合度中耦合分支间距和波导间距初值一般为 $t_{\text{gap}} \approx l_{\text{gap}} \approx \lambda_g/4$ 。经 ANSYS HFSS 全波优化仿真，该结构具有约 -16 dB 的耦合度 $|S_{31}|$ ，同时获得了高方向性 $|S_{34}|$ 和隔离度 $|S_{14}|$ 等，能满足前面所提指标要求。各个关键尺寸均已在图 3 中标注，并列入表 1，待比较。值得注意的是，该耦合器的耦合分支宽度 w_{gap} 为 50 μm ，该精细尺寸的加工与实现，能够被用来检验国内现阶段 CNC 铣削技术中最小钻头的可靠性。

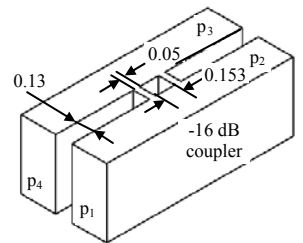


Fig.3 Structure of a -16 dB coupler in 400~500 GHz band(unit:mm)
图 3 400~500 GHz 频段 -16 dB 耦合器结构(单位: mm)

表 1 部分关键尺寸对比表

Table 1 Comparison of the key dimensions		
parameters	simulated dimensions/ μm	measured dimensions/ μm
b	279	280
w_{gap}	50	54
l_{gap}	130	128
t_{gap}	153	149

根据太赫兹边带分离超导 SIS 接收机系统中耦合器模块的实际应用布局及安装方式，引入波导弯头过渡设计，给出图 4 的本振信号耦合器结构，其中均匀波导尺寸均为 $a \times b = 0.558 \text{ mm} \times 0.279 \text{ mm}$ 。该结构是定向耦合器单元的变形电路，能够通过波导形式直接集成到混频接收机模块中，无需任何改动，且包括耦合度、方向性、隔离度等在内的主要特性保持不变。图 4 中端口 1 为本振信号的输入端口，通过该耦合器以 -16 dB 量级弱耦合至混频芯片(端口 3)；端口 2 为负载端，将放置黑体吸收掉多余的本振信号功率；端口 4 为射频信号的输入端口，将以高方向性直接传输至混频芯片(端口 3)，以提高射频信号探测灵敏度；其中 1-3 端口为耦合，1-4 端口为隔离，4-3 端口为方向。对该本振信号耦合器进行全波仿真，响应见图 5，为了后续与实际加工器件性能对比，该仿真模型的材质设为铝($\sigma = 3.5 \times 10^7$)。该耦合器仿真性能完全符合预期指标，耦合度 C 约为 -16 dB，方向性 D 在 -1 dB 左右，隔离度 I 优于 -25 dB，并且各端口回波损耗均优于 -15 dB。

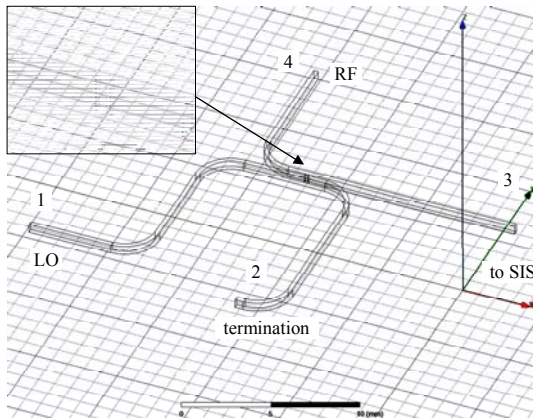


Fig.4 Coupler for the local oscillator signals in 400-500 GHz band
图 4 400~500 GHz 频段本振信号耦合器结构图

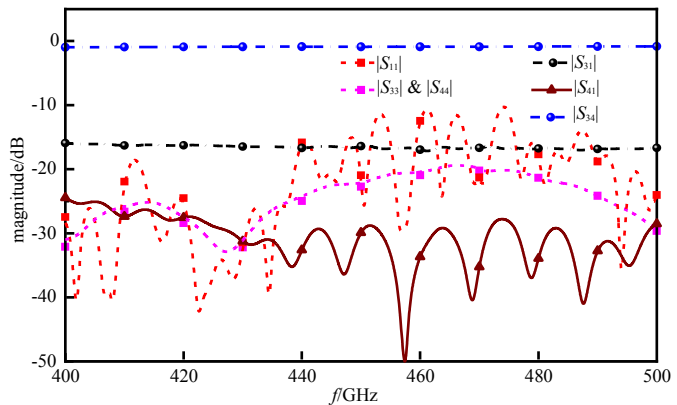


Fig.5 Simulated response of this LO coupler in 400-500 GHz band
图 5 400~500 GHz 频段本振信号耦合器全波响应

3 制备、实测与结果讨论

为了验证国内 CNC 工艺钻头极限(直径 50 μm)在 400~500 GHz 频段弱耦合度耦合器(极窄耦合分支宽度)加工方面的应用情况,采用 CNC 技术对该耦合器进行了制备。根据图 4 中给出的本振信号耦合器模型,提出待加工结构图,见图 6; p_1 至 p_4 端口功能均与上述讨论耦合一致;采用对称 E -面分裂加工方式(不破坏波导内的电场),利用先进 CNC 工艺,直接在铝块中对称地铣削出耦合器整体结构以及装配辅助结构等。其中,加工过程中最小钻头直径为 0.05 mm(50 μm),用于铣削出 2 个极窄耦合分支;1、3 和 4 端口面均配置了标准 UG-387 波导法兰,用于后续的互连、装配等;此外端口 2 处空置出大块区域,待放吸收黑体,提供终端负载。

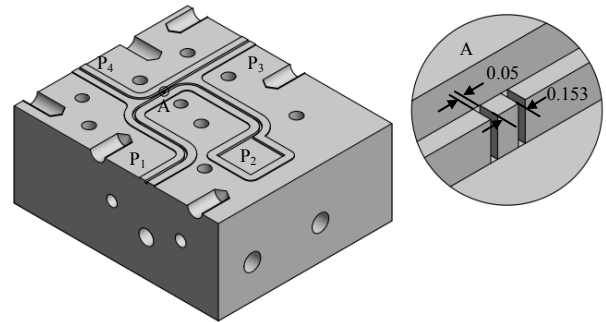


Fig.6 Processing diagram of this LO coupler in 400-500 GHz band
图 6 400~500 GHz 频段本振信号耦合器结构加工图

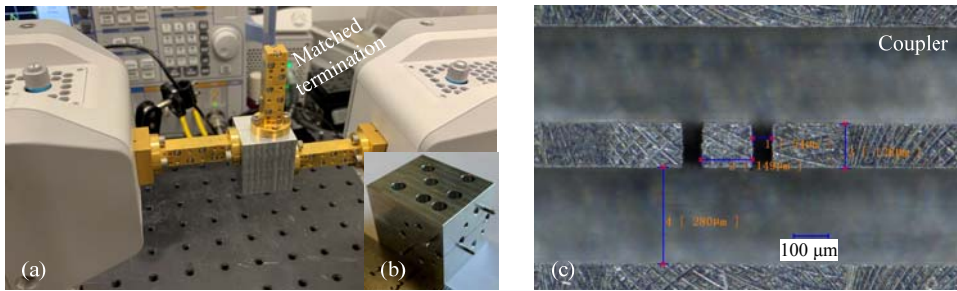


Fig.7 (a) actual measurement environment, (b) physical block of this coupler, (c) internal photomicrograph
图 7 (a) 耦合器的矢网实测环境; (b) 耦合器的实物图; (c) 内部显微镜照片

在上述基础上,装配成图 7(b)的耦合器样件,实物整体大小为 30 mm \times 25 mm \times 25 mm。基于罗德施瓦茨 R&SZVA24 矢量网络分析仪及外部 Z500 频率扩展模块,对 2 个样件(1#和 2#)均进行了二端口 S 参数的测试,测试过程见图 7(a)。首先,采用直通-反射-线路(Through-Reflect-Line, TRL)方法对该矢网进行 330~500 GHz 频段的校准,以消除被测器件(Device Under Test, DUT)输入和输出端口的测量误差: a) 在 2 个扩展件间使用标准垫片#1 建立直通连接,以实现直通“Through”性能校准; b) 将短路标准件连接到扩展模块-1,以实现反射“Reflect”性能校准,并以类似的方式应用到扩展模块-2; c) 在 2 个扩展件间使用标准垫片#2 建立线路连接,以实现“Line”性能校准。所有垫片和标准件均由 R&SZV-WR02 校准套件提供。其次,将该待测耦合器通过 UG-387 法兰装配到扩展模块上,见图 7(a);值得注意的是,二端口特性测试过程中,空置的端口需端接匹配负载(Matched termination),该标准负载件同样由 R&SZV-WR02 校准套件提供。最后,实现所有三端口中任意两端口的 S 参数性能测试。此外,为了验证 CNC 技术在该高频段下的精确度及误差,图 7(c)给出了耦合器核心部分的显微镜照

片及其实际测量尺寸,均使用 KEYENCE VHX-2000 显微镜获得,明显表明波导内部粗糙面良好,加工精确度/误差小于±5 μm,典型的实测尺寸与模型尺寸对比见表 1。

针对制备完成的 2 件样件(1#和 2#)均进行了 S 参数实测,以验证实物特性及其加工一致性,400~500 GHz 频段内的结果见图 8。为了直观地观察、对比实测与仿真结果的差异,仿真结果(边界材质为铝)一并显示在图 8 中。图 8(a)给出了 2 件耦合器的耦合度 $|S_{31}|$ 性能对比图,明显地发现样件 1#和 2#的耦合度高度一致,且与仿真值保持吻合,均在-16~-17 dB 之间;耦合度的测试结果存在小幅度驻波(幅度<1 dB),可能是由端口不匹配或端口 2 处吸收负载不理想导致。从图 8(b)中可以看出,样件 1#和 2#的方向性与仿真值基本一致,包括其变化趋势;仅存在约-0.2~-0.3 dB 的插入损耗,主要是由波导的材质及自身波导过长等损耗引起,能够通过镀金/镀铜来进一步降低;总之,该耦合器射频信号通道获得了良好的方向性。根据图 8(c),样件 1#和 2#的隔离度同样保持一致,且与仿真结果高度吻合,表明该耦合器的本振信号端口与射频端口之间隔离度在 400~500 GHz 频段内优于-20 dB。此外,从图 8(d)得出,端口 1 的回波损耗(反射系数)优于-15 dB,略逊色于仿真结果,主要原因是由端口 2 的不完全吸收导致;端口 2 处加载一块吸收黑体,该黑体负载由我国材料自主加工,在高频段的吸收性能稍欠缺;而端口 3/4 回波损耗优于-25 dB,与仿真性能一致,性能极佳。

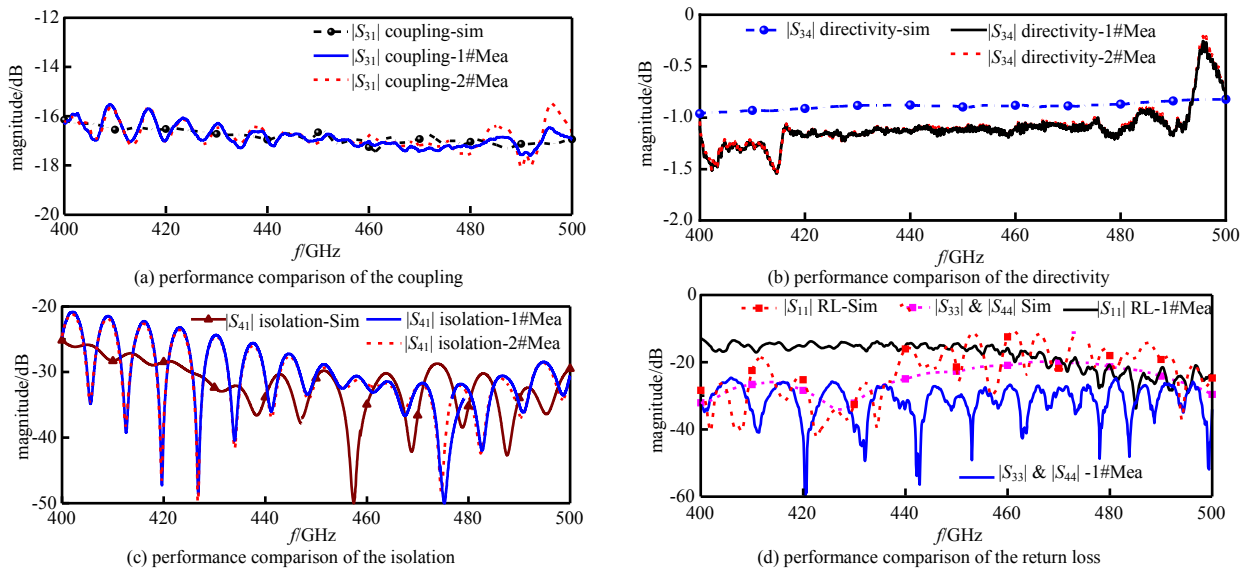


Fig. 8 Performance comparison of the measured and simulated results of this LO coupler in 400-500 GHz band

图 8 400~500 GHz 频段本振耦合器实测与仿真性能对比图

根据上述实测结果的讨论,该 400~500 GHz 频段本振信号耦合器获得了与模拟仿真相当的高性能结果,包括-16 dB 耦合度、-1.2 dB 方向性、-20 dB 隔离度等,完全满足接收机系统要求的性能指标要求。且针对两批次制备的样件 1#和 2#,其实际结果在 400~500 GHz 频段内保持高度一致,表明现阶段先进的 CNC 技术不仅能够满足如此高频段、高精度度波导耦合器的制备条件,而且保证了其可靠性、稳定性、重复性等。此外,将此耦合器性能与报道过的部分高频段耦合器性能对比,见表 2,该耦合器各方面性能具有优越性。此外,该耦合器存在工作频段最高、耦合度最弱、工艺难度最大等特点,尽管如此,基于 CNC 工艺制备的耦合器样件仍能获得满足高性能指标要求的实际结果,性能优越并达到预期。

表 2 部分太赫兹波段耦合器性能对比

Table 2 Performance comparison of different terahertz waveguide couplers

Ref.	f_0 /GHz	FBW(%)	coupling/dB	IL/dB	RL/dB	isolation/dB	technology
[10]	380	15.7	-3	-0.90	-17	-20	DRIE
[11]	340	5.8	-10	-0.20	-30	-30	DRIE
[12]	375	21.3	-3	-0.90	-15	-20	UV-LIGA
[13]	363	16.6	-10	-1.00	-17	-20	DRIE
[16]	188	29.5	-3	-0.25	-15	-15	CNC
this work	450	22.4	-16	-0.20	-20	-20	CNC

4 结论

本文基于现阶段高精度 CNC 技术,研制出 400~500 GHz 频段弱耦合度本振信号耦合器。对两样件均进行了性能验证,获得了-16 dB 耦合度、-1.2 dB 方向性及-20 dB 隔离度等,完全满足接收机系统对本振信号的耦合度和射频信号的方向性等性能要求;两样件性能在 400~500 GHz 频段内保持高度一致,表明了样件的可靠性、

稳定性、重复性等,且说明现阶段先进 CNC 技术能够满足该高频段、高精度度波导耦合器的制备要求。同时,该耦合器能够直接被集成到太赫兹边带分离混频接收系统中,获得实际应用。

参考文献:

- [1] SHI S C, PAINE S, YAO Q, et al. Terahertz and far-infrared windows opened at dome a in antarctica[J]. *Nature Astronomy*, 2016,1(1):1-7.
- [2] 赵明明,余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018,16(6):931-937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Research status and application prospect of terahertz communication system[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018,16(6):931-937.)
- [3] KOOI J, CHAMBERLIN R, MONJE R, et al. Balanced receiver technology development for the caltech submillimeter observatory[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012,2(1):71-82.
- [4] DING J Q, MAESTRINI A, GATILOVA L, et al. A 300 GHz power-combined frequency doubler based on E-plane 90°-hybrid and Y-junction[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020,62(8):2683-2691.
- [5] DING J Q, SHI S C, ZHOU K, et al. WR-3 band quasi-elliptical waveguide filters using higher order mode resonances[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017,7(3):302-309.
- [6] DING J Q, ZHAO Y, GE J X, et al. A 90° waveguide hybrid with low amplitude imbalance in full W-band[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019,40(3):429-434.
- [7] LI Y, KIRBY P L, OFFRANC O, et al. Silicon micromachined W-band hybrid coupler and power divider using DRIE technique[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008,18(1):22-24.
- [8] KUROIWA K, GONZALEZ A, KOYANO M, et al. Short-slot hybrid coupler using linear taper in W-band[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013,34(12):815-823.
- [9] DESMARIS V, MELEDIN D, PAVOLOTSKY A, et al. All-metal micromachining for the fabrication of sub-millimetre and THz waveguide components and circuits[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008,18(9):095004.
- [10] LIU S, HU J, ZHANG Y, et al. Silicon micromachined waveguide quadrature-hybrid coupler at terahertz frequency band[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2015,36(8):709-719.
- [11] 黄昆,钟伟,康小克,等. 一种可运用于 THz 波段的新颖定向耦合器[J]. *微波学报*, 2015,31(3):90-92. (HUANG Kun, ZHONG Wei, KANG Xiaoke, et al. A novel waveguide directional coupler at THz band[J]. *Journal of Microwaves*, 2015,31(3):90-92.)
- [12] DENG J Y, DUAN J P, LIU R, et al. A 3 dB E-plane waveguide directional coupler employing micromachining technique for terahertz application[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020,62(11):1-7.
- [13] LIU S, HU J, ZHANG Y, et al. Sub-millimeter-wave 10 dB directional coupler based on micromachining technique[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015(4):1-8.
- [14] SRIKANTH S, KERR A R. Waveguide quadrature hybrids for ALMA receivers[EB/OL]. (2001-01-17)[2021-04-01]. <http://www.alma.nrao.edu/memos/html-memos/alma343>.
- [15] 李小玲,赵广峰. 0.5 THz 波导双定向耦合器设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2021,19(1):24-26. (LI Xiaoling, ZHAO Guangfeng. Waveguide double power dividers and directional couplers design[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021,19(1):24-26.)
- [16] RASHID H, DESMARIS V, BELITSKY V, et al. Design of wideband waveguide hybrid with ultra-low amplitude imbalance[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016,6(1):83-90.
- [17] REED J. The multiple branch waveguide coupler[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1958,6(4):398-403.
- [18] NIU Z, LI D, ZHANG B, et al. Mode analyzing method for fast design of branch waveguide coupler[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2019,67(12):4733-4740.

作者简介:

谭 贞(2002-),女,江苏省徐州市人,本科,研究方向为电磁场与微波技术. email:1226430237@qq.com.

丁江乔(1987-),男,南京市人,博士,讲师,研究方向为太赫兹器件. email:jqding@nuist.edu.cn.

张沁漪(2000-),女,江苏省苏州市人,本科,研究方向为电磁场与微波技术.

刘 冬(1983-),男,南京市人,博士,副研究员,研究方向为太赫兹超导混频器.