



高性能3:1带宽四脊正交模耦合器设计

王进^{1*}, 马军², 伍洋¹

1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081

2. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011

*联系人, E-mail: 15831969575@139.com

收稿日期: 2024-12-09; 接受日期: 2025-02-21; 网络出版日期: 2025-04-11

国家重点研发计划(编号: 2022YFC2205302)资助项目

摘要 在射电望远镜天线馈源系统中, 正交模耦合器是关键部件之一. 传统正交模耦合器的相对带宽超过2:1后, 在工作频段的高端会激励器高次模, 高次模会使得正交模耦合器的性能变差, 且影响馈源喇叭的辐射性能, 无法满足日益增长的宽频带应用需求. 该文研究了四脊正交模耦合器主要参数变化对高次模幅度特性的影响和宽带匹配方法, 设计了一种3:1带宽四脊正交模耦合器, 工作带宽为3.3–10.0 GHz. 加工并实测了一个正交模耦合器样机, 该正交模耦合器两个正交极化的反射系数均优于−16 dB, 插入损耗小于0.4 dB, 端口隔离优于35 dB, 测试与仿真结果吻合良好, 证明了设计方法的正确性.

关键词 射电望远镜, 正交模耦合器, 宽频带, 四脊波导

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Az, 42.82.Et

1 引言

随着射电天文观测技术的快速发展, 现代射电天文望远镜, 如新疆QTT110 m需要在一个很宽的频带范围内具有双极化信号接收能力, 这就推动了射电望远镜宽带馈源系统的研究与设计. 宽带馈源系统可以实现射电望远镜在覆盖很宽的观测频带时降低所需要的接收机数量. 实现射电望远镜馈源系统双极化接收的关键部件是正交模耦合器(Orthomode Transducer, OMT), 其用于从射电望远镜接收的射电信号中分离出两个正交的极化信号, 评价OMT性能的主要指标是反射系数、插入损耗和端口隔离度. 进一步的, 对宽带

工作的OMT来说, 因为工作带宽超过了波导的单模工作带宽, 会产生高次模, 而高次模会影响馈源喇叭的辐射, 进而影响射电望远镜的性能, 因此, 抑制高次模的数量和幅度也至关重要. 宽带正交模耦合器多年以来受到国内外学者的广泛关注, 其设计方法是射电天文望远镜馈源系统研究的热点.

应用于宽带工作的OMT, 其型式主要有: Boifot OMT, Double Ridged OMT, Turnstile OMT, 四脊OMT (Quad-ridged OMT). 当OMT的工作带宽超过2:1时, 在工作频率的高频段, OMT的腔体内不再是主模工作, 而是存在高次模, 这些高次模不仅影响OMT本身的性能, 使得OMT的匹配性能变差, 反射系数增大, 损耗增

引用格式: 王进, 马军, 伍洋. 高性能3:1带宽四脊正交模耦合器设计. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 269507

Wang J, Ma J, Wu Y. Design of high-performance quad-ridged OMT with a 3:1 bandwidth (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 269507, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0568

大, 两个正交极化的隔离度也变差, 且高次模的存在还会影响馈源喇叭的辐射性能. 因此, 仅采用矩形或圆形光壁波导结构不能满足要求, 研究如何减少高次模的数量和抑制高次模的幅度是设计超过倍频程带宽 OMT 的重点和难点.

根据 OMT 结构是否具有对称性, 文献[1]中, Boïfot 将其分为非对称分支 OMT 和对称分支 OMT, 根据波导的模式激励和耦合理论, 采用对称激励结构时, 能够抑制与激励模式对称性不同的高次模的产生, 从而减少了激励起的高次模数量, 拓展了工作带宽^[1], 相对带宽展宽到 40% (1.5:1). Boïfot OMT 型式被提出后, 在 X 频段至太赫兹频段均得到应用^[2,3]. Double Ridged OMT 与 Boïfot OMT 的结构类似, 具有单对称性, 同样是对称分支 OMT, 但是与 Boïfot OMT 不同的是, Double Ridged OMT 的公共波导中为实现双极化匹配, 采用了双脊代替 Boïfot OMT 中的金属隔板和插入的调配探针, 这一改进使得 OMT 的匹配性能更加优良, 且解决了 Boïfot OMT 隔板加工和装配时的误差问题, 仅采用高精度 CNC 加工即可实现, 加工难度显著降低, 在毫米波和太赫兹频段得到了广泛应用^[4-11]. 文献[11]把 Double Ridged OMT 中脊的宽度设计为渐变型, 设计了工作频率为 275–500 GHz 的 OMT, 其相对带宽达到了 58% (1.82:1). Turnstile OMT 结构具有双重对称性, 传统的 Turnstile OMT 的工作带宽能够接近一个倍频程, 相对带宽 64%, 达到了标准波导单模带宽的极限^[12-24]. 文献[25]设计的基于 Turnstile 四脊 OMT, 其工作频率为 24–51 GHz, 相对带宽 72% (2.12:1), 超过了一个倍频程, 且其两个正交极化接收端口为脊波导端口^[25]. 带宽超过一个倍频程时, 采用标准光壁波导型设计的 OMT 不能满足要求, 基于四脊波导的 OMT 被广泛采用.

随着射电天文望远镜技术的发展, 基于四脊波导的 OMT 研究和设计越来越多, 是实现倍频程宽带和超宽带 OMT 的主要型式^[26-41]. 四脊 OMT 设计的主要难题是如何实现整个宽频带内的良好匹配和减少激励起的高次模数量和幅度. 下面介绍几个代表性的设计, 文献[28]中介绍了采用脊片馈电偏置降低 OMT 内存在陷模谐振的技术, 缺点是采用该技术的 OMT 较长, 带宽也只能达到一个倍频程. 文献[29]介绍了通过采用余弦高次方脊曲线和短路栅匹配技术, 并在后端增加吸波材料等措施, 实现在不增加 OMT 长度的情况下达到

良好的宽带匹配和抑制高次模的效果. 文献[37]介绍了偏置馈电四脊 OMT 技术, 实现了 3.4:1 工作带宽, 是目前文献中报道工作带宽最宽的四脊 OMT. 根据对称结构抑制高次模的原理, 文献[38,39]中研究了采用对称馈电技术的原理和方法, 但从文中给出的结果可以看出, 目前采用对称馈电的四脊 OMT 的端口反射损耗较大.

国内对四脊 OMT 的研究也取得了很大的进展, 中国科学院上海天文台庄重、李斌等设计了一种改进型四脊 OMT^[40], 在 4.5–7 GHz 频率范围内反射系数小于 -20 dB, 插入损耗小于 0.3 dB, 端口隔离大于 25 dB, 相对带宽 43.5% (1.55:1). 国家天文台范瑾计算设计了一款 L 频段四脊 OMT^[41], 在 1.1–1.9 GHz 频率范围内反射系数小于 -20 dB, 插入损耗优于 0.15 dB, 端口隔离大于 45 dB, 相对带宽 53.3% (1.73:1).

综上所述, 四脊 OMT 工作带宽能够实现超过一个倍频程, 且两个正交极化接收端口为同轴口, 便于与后端射频链路连接, 在射电天文望远镜馈源系统中具有重要应用. 但目前文献中介绍的传统四脊 OMT 的工作带宽超过 2:1 时, 在工作频率的高频端激励起高次模影响 OMT 的性能, 而且传输给馈源喇叭后还会影响馈源喇叭的辐射性能. 本文在作者已有研究成果基础上^[42], 分析了四脊 OMT 脊曲线、波导外壁轮廓的主要参数变化对 OMT 性能的影响, 通过优化脊曲线、将波导外壁轮廓进行赋性、在同轴探针馈电中加载阶梯阻抗调配单元, 在没有采用偏置馈电的情况下实现了 3:1 带宽内的良好匹配, 工作频率为 3.3–10.0 GHz, 且有效抑制了高次模的幅度, 加工了 OMT 实物样机并进行了测试, 测试结果表明设计的 OMT 在工作频带内性能良好.

2 四脊正交模耦合器的工作原理

判断 OMT 性能优劣的主要指标为工作带宽、反射系数、插入损耗、端口隔离度. 对于工作带宽超过一个倍频程的宽带 OMT, 因为 OMT 中的不连续必然会产生激励起高次模, 其被激励后会进入与 OMT 相连的馈源喇叭, 高次模的存在会影响馈源喇叭的辐射特性, 进一步还会影响射电望远镜的辐射方向图, 因此, OMT 性能的优劣还需要考虑 OMT 中高次模的数量多少和幅度大小. 为了能够实现双极化应用, OMT 的公共波导需要采用圆形波导或正方形波导, 只有这样, 公

共波导内才能传输两个正交的主极化模式. 因为馈源喇叭一般设计为圆波导, 因此, 当OMT的公共波导为圆波导时, 其优点是可以直接与馈源喇叭链接, 不需要外接方圆过渡波导, 在宽带应用时, 方圆过渡波导也会引起高次模.

根据文献[43], 圆形四脊波导中, 截止波数最低的几个模式分别为 TE_{11} , TE_{21L} , TE_{21U} , TE_{01} , TE_{31} , 根据电耦合奇偶法则, 当采用 TE_{11} 模式激励时, 如果圆形四脊波导中存在高次模, 与 TE_{11} 模较强的模式为 TE_{21U} 和 TE_{31} 模. 圆形四脊波导中这几个模式的截止波数与脊波导结构参数的关系如图1所示[43], 图中参数 a 为圆波导的半径, 参数 d 为对称脊之间的间距, 参数 k_c 为截止波数. 从图中可以看出, 设计合适的圆形脊波导的结构尺寸, 不激励起 TE_{21L} 模的情况下, 圆形四脊波导具有很宽的单模工作带宽, 且具有两个正交极化主模 TE_{11} 模, 通过两对相互正交脊处插入同轴探针即可激励, 因此, 圆形四脊波导可以用来设计带宽超过一个倍频程的OMT.

图2给出了圆形四脊OMT的仿真原理结构示意图, 从图中可以看出, 圆形四脊OMT从结构形式上主要可分为两部分: 一是圆形四脊波导到圆形波导的脊波导渐变段, 二是用于OMT两个正交极化模式激励的同轴到四脊波导转换段. 脊波导渐变段的作用是把与馈源喇叭相连接的圆形波导逐渐过渡到具有宽主模带宽的圆形四脊波导, 其设计的主要原则是该渐变段的反射系数要较小, 且要抑制高次模的产生, 高次模的幅度尽可能小; 同轴到四脊波导转换段的主要作用是把圆形四脊波导中接收到的正交极化信号通过对应的两个正交同轴端口耦合出来, 其设计的主要原则是馈电同轴与圆形四脊脊波导要有良好的匹配, 从而实现低损

耗和低反射系数的传输, 为实现这一目的, 在馈电同轴的四脊波导一段加载了匹配腔用来调节同轴端口与圆形四脊波导之间的匹配.

3 正交模耦合器分析与设计

3.1 四脊正交模耦合器高次模分析

图3是圆形四脊OMT仿真模型的端视图和侧视图, 给出了圆形四脊OMT的主要结构参数: 脊宽度 t_1 , 脊倒角 t_2 , 脊间距 g , 圆波导出口 R_1 , 圆形四脊波导圆半径 R_2 , 馈电端口到圆波导出口的距离 L , 两个正交馈电端口到匹配腔的距离 L_1 和 L_2 .

带宽为3:1的正交模耦合器的工作带宽已经超过了圆波导的单模工作带宽, 设计时面临的主要难题: 一是要在3:1的带宽内有良好的匹配, 即在工作频带内具有较低的反射系数; 二是在工作频带内, 由于馈电处的不连续性和四脊波导到圆波导的渐变, OMT会中激励起多种的高次模, 如何控制高次模的数量或把激励起

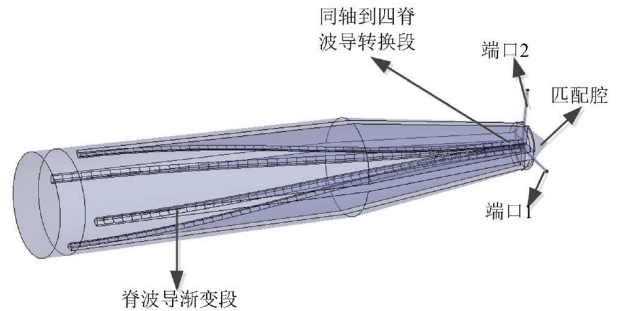


图2 传统四脊OMT结构示意图

Figure 2 Conventional quadruple-ridged OMT structure.

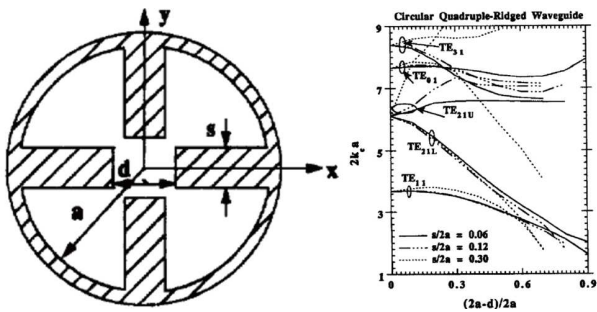


图1 圆四脊波导及归一化截止波数与脊结构的关[43]

Figure 1 Circular quadruple-ridged waveguide and normalized cutoff wavenumbers versus ridge structure [43].

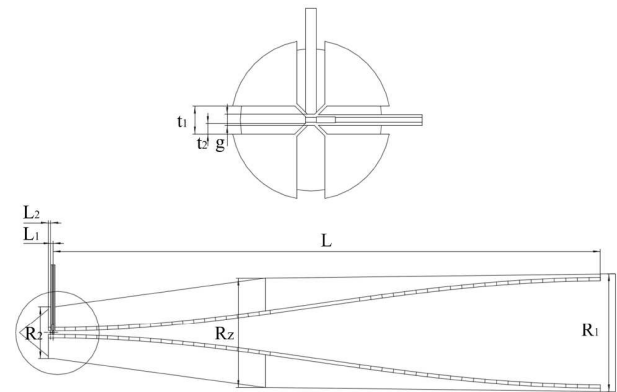


图3 OMT结构参数

Figure 3 Configurations of OMT structure.

的高次模幅度抑制在一个较低的水平也是一个难题.

根据第2节介绍的四脊OMT基本原理, 为实现OMT的低反射系数, 各部分必须要良好匹配, 一个是圆形四脊波导到圆形波导的脊波导渐变段的匹配, 另一个是用于OMT两个正交极化模式激励的同轴到四脊波导转换段的匹配. 脊波导渐变段是通过脊尺寸以及圆波导直径的改变从四脊波导逐渐变为圆波导, 其截面尺寸和截面形状都逐渐变化. 同轴到四脊波导转换段是通过同轴探针穿过其中一个脊插入相对的脊中, 从而实现 TE_{11} 模式的激励和传输. 从一种截面的波导渐变过渡到另一截面的波导时, 传输的模式可能变换为一些其他的模, 因此, 脊波导渐变段的设计不仅要主模 TE_{11} 模的反射系数小, 而且换为其他可传输的高次模的功率小, 即完成渐变过渡时反射损耗小, 且转换为高次模的幅度低. 为了实现低反射损耗和高次模幅度, 在分析波导中可以存在的模式的基础上, 通过设计脊曲线和改变波导壁的轮廓, 能够较好地抑制激励起的高次模. 同轴到四脊波导转换段的匹配主要是通过同轴探针的阻抗与四脊波导的阻抗基本相等来实现, 且通过加载匹配腔进一步提升匹配性能.

本文设计的OMT初始尺寸参数选取参考了文献[30], 为减少波导中能够传输的模式的数量, 圆波导尺寸的选取应尽量小, 从而能够使波导不连续性激励起的高次模数量少. 表1给出了四脊OMT结构参数的初始值, 其中 λ 为最低工作频率在真空中传播时的波长. 研究了改变脊曲线的长度、圆形四脊波导的外壁轮廓和同轴探针馈电部位加载调配单元改变阻抗等技术措施对四脊OMT电性能的影响, 根据研究结果设计了带宽达到了3:1的OMT.

工作带宽为3:1的四脊OMT, 其圆波导端口尺寸选择为 $0.65\lambda_L$ 时, 圆波导中能够存在的传输模式有多个. 当以 TE_{11} 模激励圆波导时, 根据波导激励时模式耦合的奇偶禁戒规则, 对称激励不可能激励起反对称模, 因此, 在圆波导中仅能够激励起 TE_{21} , TM_{11} 和 TE_{31} 模, 其截止频率分别为5.08, 6.37和7 GHz. 根据表1的结构参数建立了四脊OMT的结构模型, 并进行了仿真分析, 图4给出了初始OMT模型在圆波导端口高次模幅度的仿真结果. 从图中可以看出, 各模式激励起的频率范围与截止频率的计算基本一致, TE_{21} 模即使激励起以后, 其幅度小于-25 dB, TM_{11} 模激励起以后的幅度小于-20 dB, 而 TE_{31} 模激励起以后的幅度随频率增大而增

表1 OMT结构参数值

Table 1 Values of the structural parameters

R_1	R_2	L	L_1	L_2	t_1	t_2	g
$0.65\lambda_L$	$0.3\lambda_L$	$3\lambda_L$	$0.02\lambda_L$	$0.015\lambda_L$	$0.05\lambda_L$	$0.02\lambda_L$	$0.02\lambda_L$

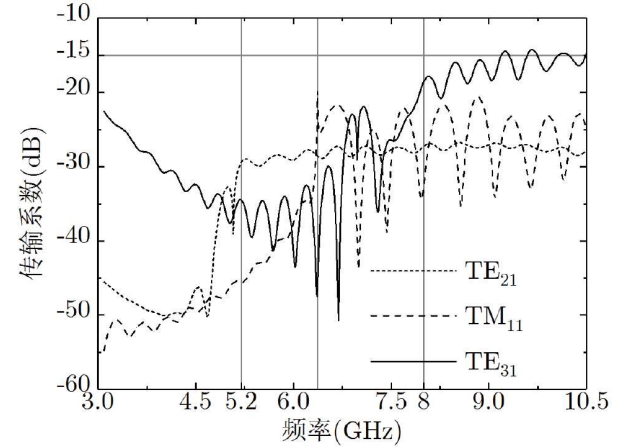


图4 圆波导端口激励的高次模幅度

Figure 4 Level of the higher-order modes generated at circular waveguide port.

大, 且在频率的高端其幅度大于-15 dB. 从图中还可以看出, 在5.2–6.37 GHz, OMT中的高次模主要是 TE_{21} 模, 在6.37–8 GHz, TM_{11} 模和 TE_{31} 模的幅度均大于 TE_{21} 模的幅度, 在频率大于8 GHz的频段, TE_{31} 模幅度明显增加, 成为主要的影响模式. 在3:1的设计频带内, TE_{21} , TM_{11} 模的幅度始终不超过-20 dB, 对OMT的性能影响较小, 在频带的高频端, TE_{31} 模幅度较大, 如何抑制高频端 TE_{31} 模的幅度成为展宽OMT带宽的关键.

3.2 四脊正交模耦合器高次模抑制方法研究

(1) 四脊波导脊长度对OMT电性能影响

设计四脊OMT时, 脊曲线的选取时最为重要. 文献[44]中介绍了多种实现波导渐变的曲线形式. 在分析多种曲线形式的基础上, 本文设计了正弦平方函数的脊轮廓曲线, 其公式为

$$x = g/2 + 17.02 \times \sin^2(\pi/2 \times (1 - z/L)),$$

式中, g 是脊间距, z 是脊曲线沿OMT轴线方向的位置, x 为在位置 z 处脊的横向坐标值. 根据OMT初始结构数值和曲线公式建立了OMT仿真模型, 计算了脊长度 L 取不同值时, 四脊OMT反射系数的仿真值, 结果如图5所示. 从仿真结果可以看出, 随着脊长度 L 的增大, 四脊

OMT的反射系数逐渐变小, 但当 L 的值增大到一定的数值后, 四脊OMT的反射系数改善不明显, 说明渐变段的长度已能满足匹配要求.

图6给出了脊长度 L 取不同值时, 四脊OMT激励起的高次模在圆波导端口幅度的变化, 从仿真结果中可以看出, 随着脊长度 L 的增加, 激励起的高次模幅度变小, 但幅度的变化量逐渐变小, 说明增大 L 使得渐变段的变换趋势变缓, 有利于高次模幅度的降低, 但脊长度 L 达到一定数值后对高次模的抑制作用变弱.

对比图5和图6的结果, 可得出, 由于长度达到一定的长度后, 对高频段来说, 所分析参数 L 长度相对波长来说已经足够长, 渐变的匹配性能好, 参数 L 变化对高频段反射系数影响较小, 但参数 L 对高次模的影响大于

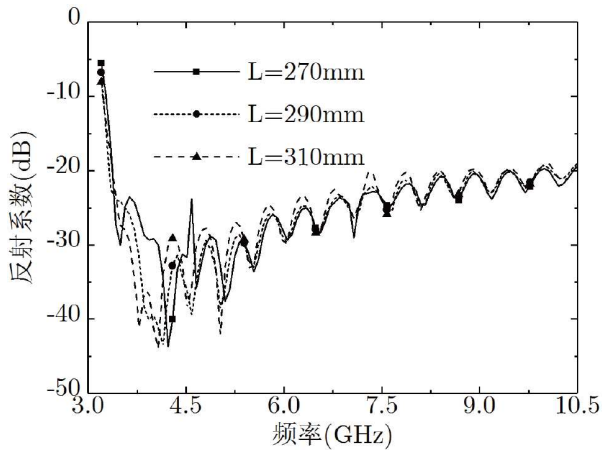


图 5 OMT反射系数与参数 L 之间的关系
Figure 5 OMT reflection coefficients with different L .

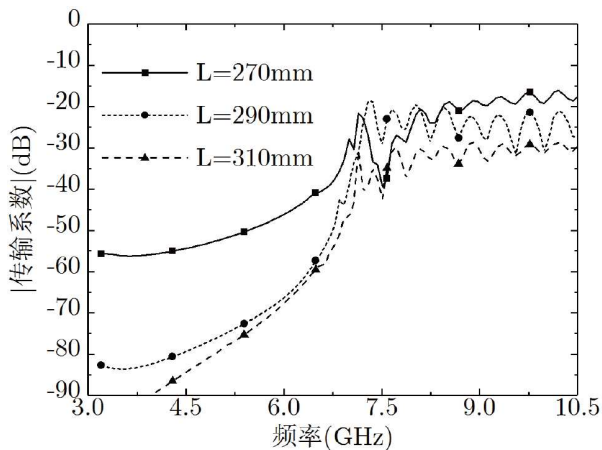


图 6 OMT激励起的 TE_{31} 模幅度与参数 L 之间的关系
Figure 6 OMT TE_{31} mode level with different L .

对反射系数的影响, 说明在设计渐变过渡时, 实现低主模到高次模耦合的渐变过渡长度要大于仅实现良好匹配时的过渡长度.

(2) 四脊波导外壁轮廓对OMT电性能的影响

根据前面分析可知, 通过增加脊波导渐变段的脊长度 L 能够起到抑制高次模的作用, 但是, 当 L 增加大一定数值后, 抑制高次模的效果不明显, 因此, 还需要通过采取其他的设计手段. 根据波导理论, 波导中模式截止频率与波导的截面尺寸有关, 对于同轴探针馈电的四脊OMT, 越靠近馈电点, 截面越复杂, 不连续性也越大, 激励起的高次模数量也越多, 而在远离同轴探针馈电点后, 主要是脊波导渐变, 其不连续性变缓, 激励起的高次模数量减少, 主要是高次模幅度的变化. 虽然在馈电点激励起的高次模数量多, 但如果能通过改变四脊波导的截面尺寸, 在四脊波导的渐变段即对一部分高次模呈截止状态, 使其不能在OMT中传输, 高次模在OMT中能够存在和传输的位置远离馈电点, 那么到OMT圆波导端口的高次模数量和幅度均会大幅降低, 起到明显的抑制高次模效果. 据此, 本文通过设计四脊圆波导的外壁轮廓, 将传统四脊OMT的圆柱波导设计为圆锥波导, 即 $R_2 < R_1$, 增加结构变量 R_2 的OMT结构示意图如图7所示.

图8给出了参数 R_2 取不同值时, R_2 与圆波导端口尺寸 R_1 相等和 R_2 小于 R_1 并逐渐减小时, 四脊OMT反射系数的变化. 从仿真结果中可以看出, 随着参数 R_2 的变小, 四脊OMT的最低工作频率变大, 说明渐变段波导尺寸的变小使得截止频率增大, 低频端呈现截止状态, 工作频率的高频段性能无明显变化.

图9给出了参数 R_2 取不同值时, 四脊OMT在圆波导端口激励起的高次模幅度变化情况, 从仿真结果中可以看出, 随着参数 R_2 的变小, 在高频段激励起的高次模的幅度变小, 而且幅度下降的效果较大, 说明 R_2 改变, 波导外壁轮廓的变化对高次模的抑制具有良好

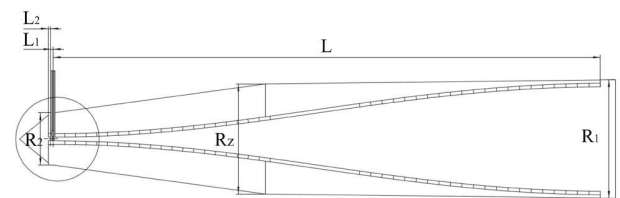


图 7 OMT外壁轮廓参数 R_2
Figure 7 The waveguide side-wall parameter R_2 of OMT.

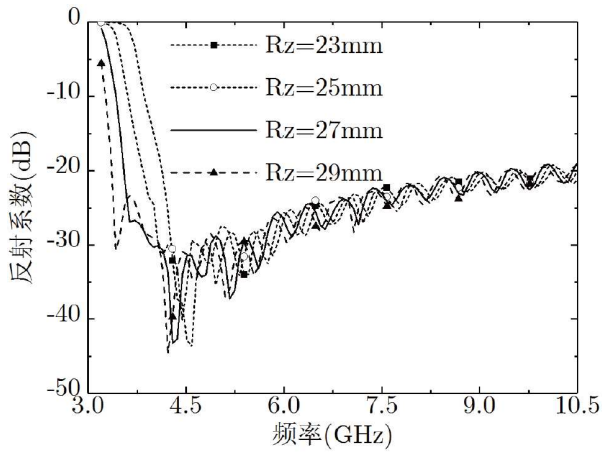


图 8 OMT反射系数与参数 R_z 之间的关系
Figure 8 OMT reflection coefficients with different R_z .

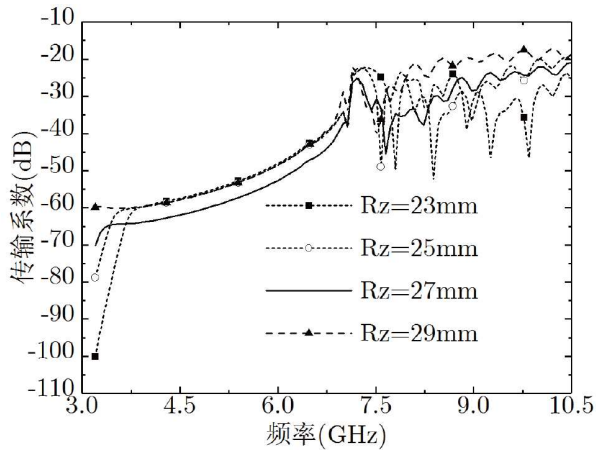


图 9 OMT激励起的 TE_{31} 模幅度与参数 R_z 之间的关系
Figure 9 The TE_{31} mode level of the OMT with different R_z .

的效果. 因为 R_z 变小时, 低频工作频率升高, 因此, 为了实现即抑制高频端激励器的高次模又保证OMT的最低工作频率变化不影响工作带宽, 该值的最终结果由优化得到.

3.3 四脊正交模耦合器宽带匹配方法研究

宽频带的匹配问题是设计3:1带宽OMT的难点之一, 因为OMT的阻抗特性是频率的函数, 会随着频率的不同而不同. 为实现四脊OMT在3:1带宽内都具有良好的传输, 改善传统四脊OMT馈电探针与四脊波导的匹配特性, 在同轴馈电探针的内导体上增加了一个阶梯阻抗调配单元, 如图10所示, 其中 H_s 为阶梯阻抗调配单元的高度, D_s 为阶梯阻抗调配单元的直径, L_s 为阶

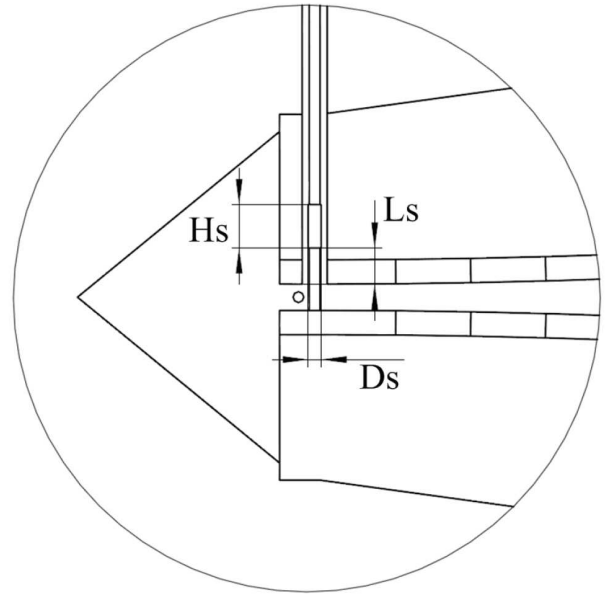


图 10 加载阶梯阻抗调配单元的馈电探针
Figure 10 Coaxial probes with step impedance unit.

梯阻抗调配单元距脊片边缘的距离.

图11给出了未加载阶梯阻抗调配单元和加载阶梯阻抗调配单元两种情况下设计的OMT两个端口反射系数对比图. 从仿真结果中可以看出, 在未加载阶梯阻抗调配单元的情况下, OMT在高频端的反射系数大于 -15 dB, 说明同轴到四脊波导的转换匹配较差. 加载阶梯阻抗调配单元以后, 在整个3:1的工作频带内, 反射系数优于 -20 dB, 其匹配特性得到了较大改善.

本文研究了阶梯阻抗调配单元的结构参数和在同轴中位置的变化对OMT反射系数的影响. 首先我们研究了阶梯阻抗调配单元在同轴中位置的变化对OMT反射系数的影响, 图12给出了阶梯阻抗调配单元的位置 L_s 改变时, OMT反射系数的仿真结果曲线, 从仿真结果中可以看出, 当阶梯阻抗调配单元与脊边缘平面齐平时匹配作用最好, 反射系数最优, 随着参数 L_s 的变大, OMT反射系数变大, 因此, L_s 的取值为0时效果最优.

图13给出了阶梯阻抗调配单元的高度 H_s 取不同值时, 四脊OMT反射系数的仿真结果, 从仿真结果中可以看出, 高度 H_s 的改变, 反射系数在工作频带的低频端和高端的变化趋势相反, 当高度 H_s 变大时, 低频端的反射系数变小, 高频端的反射系数变大, 但变化幅度不大, 从整体仿真结果上还可以看出, 高度 H_s 的改变对

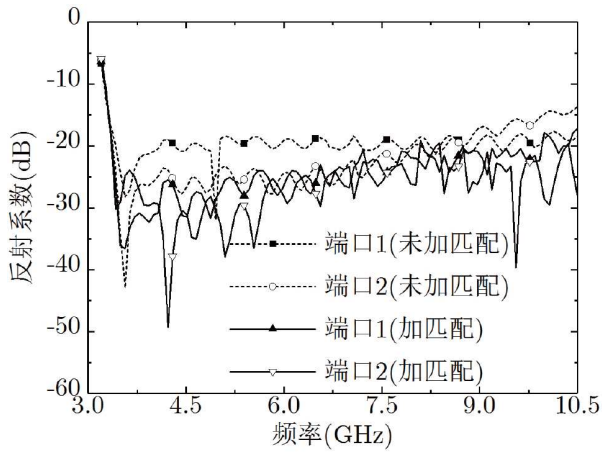


图 11 加载与未加载匹配单元反射系数的对比

Figure 11 Reflection coefficients with and without step impedance unit.

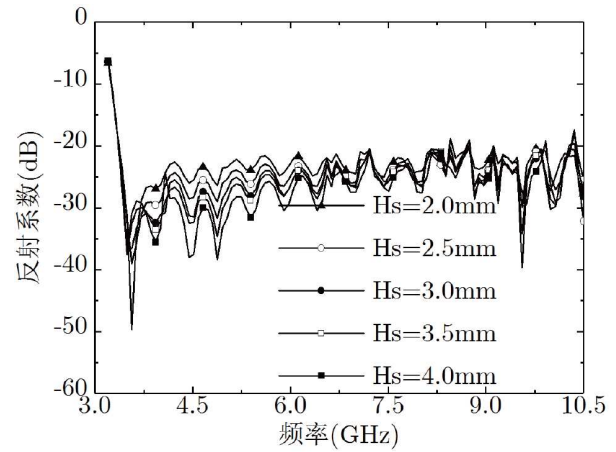


图 13 OMT反射系数与 H_s 之间的关系

Figure 13 OMT reflection coefficients with different H_s .

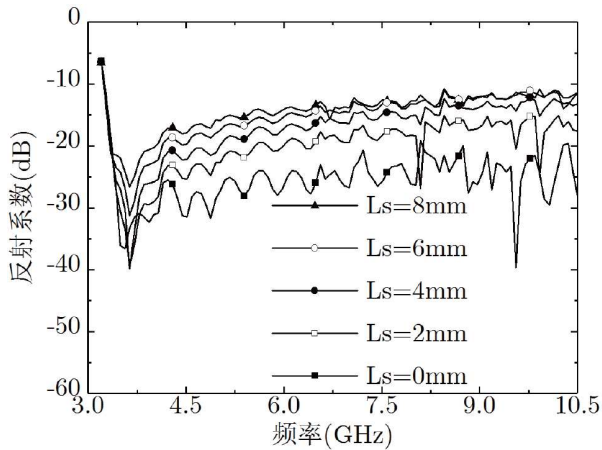


图 12 OMT反射系数与 L_s 之间的关系

Figure 12 OMT reflection coefficients with different L_s .

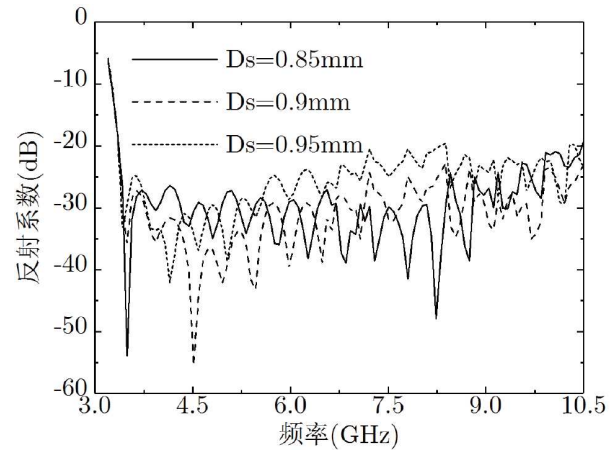


图 14 OMT反射系数与 D_s 之间的关系

Figure 14 OMT reflection coefficients with different D_s .

四脊OMT反射系数的影响较小. 为保证四脊OMT在整个工作带宽内的性能, 高度 H_s 具有一个最优值使得整个频带内的匹配性能较为平衡.

图14给出了阶梯阻抗调配单元的直径 D_s 取不同值时, 四脊OMT反射系数的仿真结果, 从仿真结果中可以看出, 直径 D_s 的改变, 反射系数在工作频带的低频端和高频端的变化趋势也相反, 当直径 D_s 变大时, 低频端的反射系数变小, 高频端的反射系数变大, 直径 D_s 也具有一个最优值使得整个频带内的匹配性能较为平衡.

根据仿真计算的结果, 阶梯阻抗调配单元的最终结构参数为高度 H_s 为3 mm, 直径 D_s 为0.9 mm, L_s 为0 mm, 在此情况下, 设计的四脊OMT反射系数在整个

频带内优于-20 dB.

3.4 四脊正交模耦合器优化结果

根据上述分析结果, 对四脊正交模耦合器的参数进行了优化设计, 优化后OMT主要参数值如表2所示.

图15、图16和图17分别给出了优化后正交模耦合器的反射系数、端口隔离和激励起的高次模幅度仿真结果. 从仿真结果可看出, 反射系数优于-20 dB, 端口隔离度优于40 dB, TE_{21} , TM_{11} 和 TE_{31} 的高次模幅度在整个工作频带内均小于-20 dB. 图17还给出了主模 TE_{11} 模的传输, 可看出 TE_{11} 模的传输损耗小于-0.3 dB, 从图17中还可以看出, 高次模幅度大的频段, 传输损耗也较大.

表 2 优化后OMT主要参数值(单位: mm)

Table 2 Optimization values of OMT structural parameters (unit: mm)

R_1	R_2	R_z	L	L_1	L_2	t_1	t_2	g
57.4	25.7	52.4	275	1.31	2.43	4.48	1.68	1.82

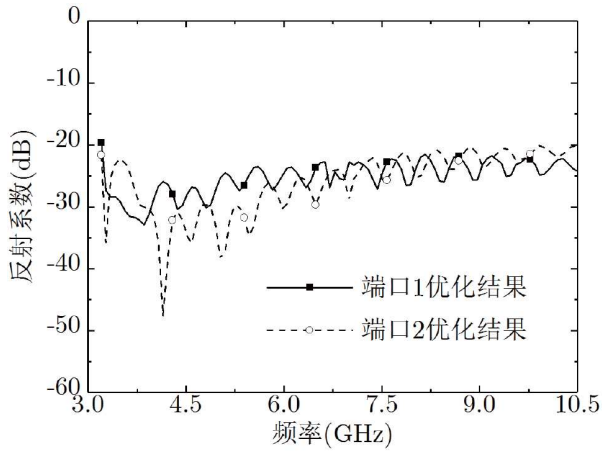


图 15 优化后OMT反射系数结果

Figure 15 Reflection coefficients of optimized OMT.

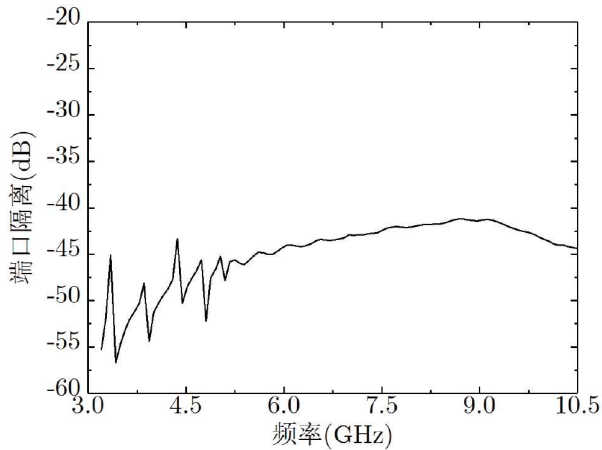


图 16 优化后OMT端口隔离结果

Figure 16 Isolation of the optimized OMT.

4 样机测试结果

根据前面分析和设计的仿真结果, 为了加工样机进行验证, 对四脊OMT的加工工艺进行了研究与设计. 为保证加工和装配精度, 四脊波导的圆波导外壁采用了整体加工技术, 并在插入脊片的正交对称位置进行开槽缝, 其宽度大小与脊厚度相一致且能紧密配合, 四个脊单独加工后, 相对应的装配到该四个槽缝

中, 并由螺钉实现紧密连接, 采用该加工工艺方法, 不仅保证了四脊波导脊的正交性和对称性, 且减小装配误差实现了OMT整体的紧密性和精确性, 图18给出了该四脊OMT三维加工实现示意图.

为验证设计分析和加工工艺方法的正确性, 加工了四脊OMT实物样机, 如图19所示. 采用矢量网络分析仪(VNA) Anritsu 37369C对四脊OMT的传输性能进行了测试, 包括反射系数、插入损耗和端口隔离度. 图20~图22给出了四脊OMT的测试结果. 可以看出, 反射系数的实测结果小于 -16 dB, 插入损耗小于 0.4 dB, 端口隔离大于 35 dB. 反射系数测试结果与仿真结果基本一致, 插入损耗和端口隔离在高频段的测试结果与仿真结果基本一致, 但在低频段的差别较大, 且测试结果均大于仿真结果, 根据3.3节各主要参数对OMT性能的影响分析, 测试结果与仿真结果存在偏差的主要原因一是同轴探针的影响, 从装配调试中发现, 同轴探针处的不连续性以及其尺寸与脊的配合情况对OMT性能影响

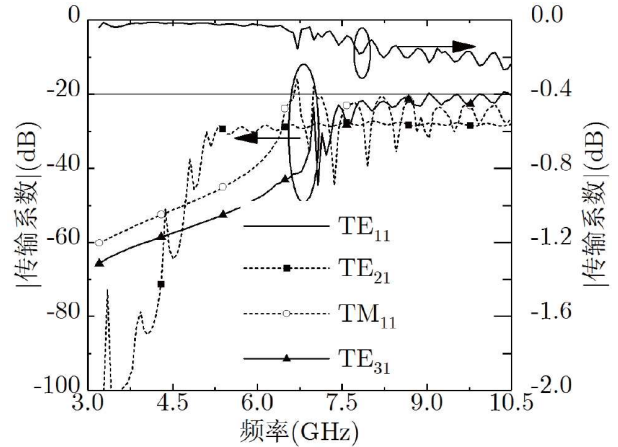


图 17 优化后OMT主模及高次模传输

Figure 17 The main mode and higher order mode transmission coefficient of optimized OMT.

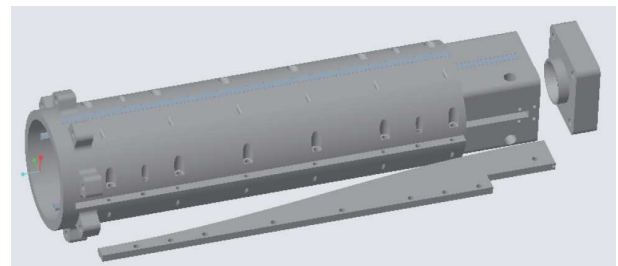


图 18 OMT三维加工模型图

Figure 18 3D model of OMT manufacture.



图 19 OMT实物样机
Figure 19 Prototype of OMT.

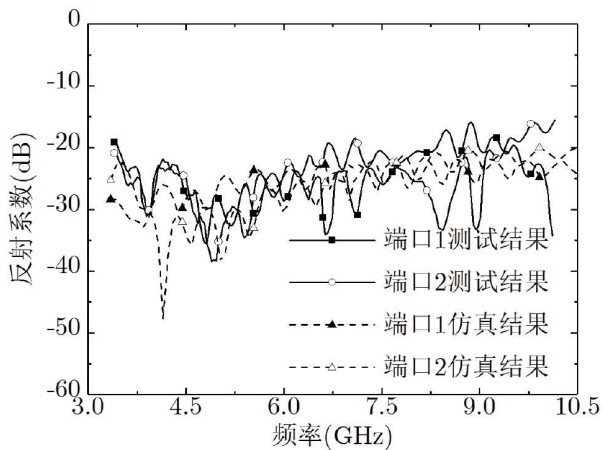


图 20 实测与仿真反射系数
Figure 20 Measured and simulated OMT reflection coefficient.

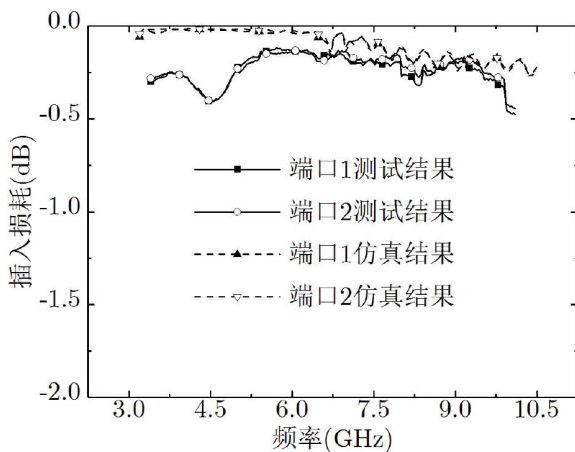


图 21 实测与仿真插入损耗
Figure 21 Measured and simulated OMT insertion loss.

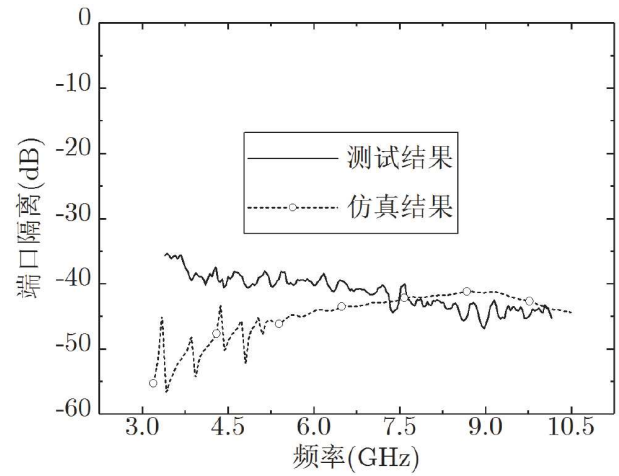


图 22 实测与仿真端口隔离
Figure 22 Measured and simulated OMT isolation.

表 3 本文与文献中OMT的实测性能比较

Table 3 Comparison of measured performances with result from literatures

文献	频率 (GHz)	相对带宽 (%)	反射系数 (dB)	插入损耗 (dB)	端口隔离 (dB)
[30]	1–2.2	75	≤ -15	≤ 0.2	≥ 20
[32]	2.4–4	50	≤ -20	–	≥ 40
[33]	1–2	66.7	≤ -18.8	≤ 0.2	≥ 35.7
[34]	4–8.5	72	≤ -15	≤ 1	≥ 40
[37]	3.6–12.4	110	≤ -15	≤ 0.3	–
[41]	1.1–1.9	53	≤ 20	≤ 0.15	≥ 45
本文	3.3–10.0	100	≤ -16	≤ 0.4	≥ 35

较大; 二是脊波导加工精度和装配存在误差。

表3给出了本文设计的四脊OMT与代表性文献中四脊OMT实测性能的对比, 列出的主要比较指标包括工作频率、相对带宽、反射系数、插入损耗、端口隔离。从与文献中结果的对比可以看出, 本文设计的3:1带宽四脊OMT, 工作频率3.3–10.0 GHz, 相对带宽为100%, 工作频带内的实测反射系数小于 -16 dB, 插入损耗小于 0.4 dB, 端口隔离大于 35 dB, 与文献中介绍的四脊OMT相比, 具有良好的综合电气性能。

5 结论

基于圆形四脊波导的宽频带单模工作特性, 本文设计了一种工作带宽达到3:1的四脊OMT, 一是通过将波导壁的轮廓进行赋性技术, 将四脊波导的外壁设计

为两段圆锥波导的组合, 有效抑制了OMT内高次模数量和激励起的高次模的幅度; 二是通过优化设计脊曲线和在同轴探针馈电部位加载阶梯阻抗调配单元技术, 有效提升了OMT的宽带匹配, 从而实现了3:1工作带宽, 加工了正交模耦合器的样机, 在工作频带内实测

反射系数优于 -16 dB、实测插入损耗小于 0.4 dB、实测端口隔离度优于 35 dB, 测试结果与仿真结果吻合较好, 说明OMT中高次模的抑制效果良好, 验证了设计的正确性. 该四脊OMT的设计技术已经成功应用于射电天文望远镜和宽带接收天线中.

参考文献

- 1 Boïfot A M. Classification of ortho-mode transducers. *Trans Emerg Tel Tech*, 1991, 2: 503–510
- 2 Leal-Sevillano C A, Reck T J, Chattopadhyay G, et al. Development of a wideband compact Orthomode Transducer for the 180–270 GHz band. *IEEE Trans THz Sci Technol*, 2014, 4: 634–636
- 3 Park K W, Choi H K. Design of an X/KU band OMT based on a Boïfot junction using capacitive posts. *Micro Opt Tech Lett*, 2014, 56: 1617–1622
- 4 Stoumpos C, Duran-Venegas J, Pierré T, et al. Orthomode transducers in additive manufacturing for Broadband and high-power applications. In: *Proceedings of the 17th European conference on antennas and propagation (EuCAP)*. Florence: IEEE, 2023. 1–5
- 5 Wang J. Broadband orthomode transducer based on the boifot junction. In: *Proceedings of the 2024 IEEE 7th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*. Xi'an: IEEE, 2024. 710–711
- 6 Reyes N, Zorzi P, Pizarro J, et al. A dual ridge broadband orthomode transducer for the 7-mm band. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2012, 33: 1203–1210
- 7 Abdelaal M A, Shams S I, Moharram M A, et al. Compact full band OMT based on dual-mode double-ridge waveguide. *IEEE Trans Microw Theor Techn*, 2018, 66: 2767–2774
- 8 Gonzalez A, Asayama S. Double-ridged waveguide orthomode transducer (OMT) for the 67–116-GHz band. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2018, 39: 723–737
- 9 Chen M Z, Ma J, Qin L, et al. Design of a Q band orthomode transducer based on the ridged waveguide connection (in Chinese). *J Univ Electron Sci Technol China*, 2018, 47: 178–182 [陈卯燕, 马军, 覃律, 等. Q波段脊过渡正交模耦合器设计. *电子科技大学学报*, 2018, 47: 178–182]
- 10 Zhang T L, Yan Z H, Chen L, et al. Design of broadband orthomode transducer based on double ridged waveguide. In: *Proceedings of the 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*. Chengdu: IEEE, 2010. 765–768
- 11 Gonzalez A, Kaneko K. High-performance wideband double-ridged waveguide OMT for the 275–500 GHz band. *IEEE Trans THz Sci Technol*, 2021, 11: 345–350
- 12 Jiang H, Yao Y, Xiu T, et al. Novel double-ridged waveguide orthomode transducer for mm-wave application. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2022, 32: 5–8
- 13 Tang X, Zhu K. Design of a waveguide orthomode transducer (OMT) at 340 GHz band. In: *Proceedings of the 2022 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA)*. Guangzhou: IEEE, 2022. 1–4
- 14 Gonzalez A, Kaneko K. Practical aspects of the design and fabrication of high-performance (sub)mm-wave dual-ridged waveguide orthomode transducers, and application to a 205–280 GHz design. *IEEE Trans THz Sci Technol*, 2023, 13: 587–593
- 15 Pisano G, Pietranera L, Isaak K, et al. A broadband WR10 turnstile junction orthomode transducer. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2007, 17: 286–288
- 16 Cano J L, Tribak A, Hoyland R, et al. Full band waveguide turnstile junction orthomode transducer with phase matched outputs. *Int J RF Microw Comp Aid Eng*, 2010, 20: 333–341
- 17 Dousset D, Claude S, Ke Wu S. A compact high-performance orthomode transducer for the atacama large millimeter array (ALMA) band 1 (31–45 GHz). *IEEE Access*, 2013, 1: 480–487
- 18 Tribak A, Cano J L, Mediavilla A, et al. Octave bandwidth compact turnstile-based orthomode transducer. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2010, 20: 539–541
- 19 Henke D, Claude S. Minimizing RF performance spikes in a cryogenic orthomode transducer (OMT). *IEEE Trans Microw Theor Techn*, 2014, 62: 840–850

- 20 Virone G, Peverini O A, Lumia M, et al. Platelet orthomode transducer for Q-band correlation polarimeter clusters. *IEEE Trans Microw Theor Techn*, 2014, 62: 1487–1494
- 21 Virone G, Peverini O A, Lumia M, et al. W-band orthomode transducer for dense focal-plane clusters. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2014, 25: 85–87
- 22 Ruiz-Cruz J A, Montejo-Garai J R, Leal-Sevillano C A, et al. Orthomode transducers with folded double-symmetry junctions for broadband and compact antenna feeds. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2018, 66: 1160–1168
- 23 Nesti R, Orsi E, Pelosi G, et al. Design of two Ku-band orthomode transducers for radio astronomy applications. *Progr Electromagn Res*, 2018, 163: 79–87
- 24 Chen M Z, Ning Y W, Ma J. Study of a turnstile ultra wideband waveguide ortho-mode transducer (in Chinese). *Radio Eng*, 2016, 46: 54–57 [陈卯蒸, 宁云炜, 马军. 基于Turnstile结构的超宽带正交模耦合器研究. *无线电工程*, 2016, 46: 54–57]
- 25 Cano J L, Mediavilla A. Quasi-octave bandwidth in-phase three-layer platelet orthomode transducer using improved power combiners. *IEEE Microw Wirel Compon Lett*, 2018, 28: 1086–1088
- 26 Xiao J, Tian J, Qin D X, et al. A broadband turnstile orthomode transducer. In: *Proceedings of the 2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*. Hefei: IEEE, 2022. 665–666
- 27 Le Sage G P, Nantista C D. Broadband, high efficiency OMT in E-band. *IEEE Access*, 2022, 10: 59630–59639
- 28 Henke D, Kelly N, Marshall K, et al. A turnstile quad-ridge orthomode transducer (OMT) for octave-bandwidth receiver front-ends (24–51 GHz). *IEEE Trans Microw Theor Techn*, 2023, 71: 4906–4921
- 29 Tasouji N, Hesari S S, Henke D, et al. Compact turnstile quad-ridge orthomode transducer with octave bandwidth for radio astronomy applications. In: *Proceedings of the SPIE 13102, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy XII*. Yokohama, 2024. 1–5
- 30 Skinner S J, James G L. Wide-band orthomode transducers. *IEEE Trans Microw Theor Techn*, 1991, 39: 294–300
- 31 Valente G, Montisci G, Pisanu T, et al. A compact L-band orthomode transducer for radio astronomical receivers at cryogenic temperature. *IEEE Trans Microw Theor Techn*, 2015, 63: 3218–3227
- 32 de Villiers D I L, Meyer P, Palmer K D. Broadband offset quad-ridged waveguide orthomode transducer. *Electron Lett*, 2009, 45: 60–62
- 33 Coutts G M. Octave bandwidth orthomode transducers for the expanded very large array. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2011, 59: 1910–1917
- 34 Pollak A W, Jones M E. A compact quad-ridge orthogonal mode transducer with wide operational bandwidth. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, 17: 422–425
- 35 Wang J, Du B, Wu Y. Wideband orthomode transducer for the square kilometre array band4 single pixel feed. *Int J RF Microw Comput Aided Eng*, 2019, 29: e21937
- 36 Morgan M A, Pan S K. Graphical prediction of trapped mode resonances in sub-mm and THz waveguide networks. *IEEE Trans THz Sci Technol*, 2013, 3: 72–80
- 37 Dunning A, Bowen M, Chung Y. Offset quad ridged ortho-mode transducer with a 3.4:1 bandwidth. In: *Proceedings of the Microwave Conference Proceedings (APMC), 2013 Asia-Pacific*. Seoul: IEEE, 2013. 146–148
- 38 Granet C, Kot J S. A new type of octave-bandwidth orthomode transducer: The bullet OMT. In: *Proceedings of the 2020 4th Australian Microwave Symposium (AMS)*. Sydney: IEEE, 2020. 1–2
- 39 Kotzé K, Meyer P, Steyn W. Design and measurement of a bandwidth enhanced quad-ridged OMT. In: *Proceedings of the 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Madrid: IEEE, 2022. 1–4
- 40 Zhuang Z, Li B, Fan Q Y. Design and measurement of improved quad-ridged orthomode transducers (in Chinese). *J Microw*, 2011, 27: 59–63 [庄重, 李斌, 范庆元. 改进型四脊波导正交模转换器的设计与测量. *微波学报*, 2011, 27: 59–63]
- 41 Fan J, Yan Y, Jin C, et al. Design of wideband quad-ridged waveguide orthomode transducer at L-band. *Progr Electromagn Res*, 2017, 72: 115–122
- 42 Wang J. Research on Wideband Feed Network Technology (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China Academy of Electronics and Information Technology, 2019. 52–61 [王进. 宽带馈源网络技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国电科电子科学研究院, 2019. 52–61]
- 43 Sun W, Balanis C A. Analysis and design of quadruple-ridged waveguides. *IEEE Trans Microw Theor Techn*, 1994, 42: 2201–2207
- 44 Granet C. Profile options for feed horn design. In: *Proceedings of the 2000 Asia-Pacific Microwave Conference*. Sydney: IEEE, 2000. 1–4

Design of high-performance quad-ridged OMT with a 3:1 bandwidth

WANG Jin^{1*}, MA Jun² & WU Yang¹

¹ The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China

² Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

*Corresponding author (email: 15831969575@139.com)

Orthomode transducer (OMT) is a key component in radio astronomy telescope antenna feed systems. Conventional OMTs are found coupling energy to higher orders at high frequency band when operating bandwidth over 2:1, which is exacerbated by manufacturing errors. The higher order modes degrade OMT performances and affect horn radiation pattern, which is unsuitable for wide band applications. In this paper, the effects of main parameters on higher modes performances and wideband matching method are studied. A 3:1 bandwidth quad-ridged OMT from 3.3–10.0 GHz is designed. We built a prototype of this design and checked its performances. The reflection coefficients of two orthogonal polarizations are better than -16 dB, the insertion loss is less than 0.4 dB and the isolation is better than 35 dB. Measured and simulated results match very well, which validates our design.

radio astronomy telescope, orthomode transducer, wide band, quad-ridged waveguide

PACS: 95.55.Jz, 84.40.Az, 42.82.Et

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0568](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0568)