

Q波段脊过渡正交模耦合器设计

陈卯蒸^{1,2,3}, 马 军^{1,2}, 覃 律⁴, 刘兆明⁴, 王 娜^{1,2}, 王 凯^{1,2}

(1. 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210008;
3. 中国科学院大学 北京 石景山区 100049; 4. 中国电子科技集团公司第三十九研究所 西安 710065)

【摘要】描述了一款宽带脊过渡正交模耦合器, 该正交模耦合器中心频率为40 GHz, 相对带宽50%, 拟应用于射电望远镜Q波段接收机系统。该正交模耦合器由双脊过渡-分支接头、Y型接头、E型弯头组成, 其结构紧凑, 降低了加工装配误差对电气性能的影响。对该正交模耦合器实际加工后进行测试, 其Y型接头输出口回波损耗 ≤ -22.7 dB, 直臂输出口回波损耗 ≤ -21.0 dB, Y型接头输出口-直臂输出口隔离度 ≤ -45.6 dB。实测结果表明该正交模耦合器反射损耗和隔离度与仿真结果的曲线变化趋势基本吻合, 在实际工作频段30~50 GHz范围内可以满足射电天文观测需求。

关键词 宽带; 正交模耦合器; Q波段; 脊过渡

中图分类号 TN823.28 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.02.003

Design of a Q Band Orthomode Transducer Based on the Ridged Waveguide Connection

CHEN Mao-zheng^{1,2,3}, MA Jun^{1,2}, QIN Lü⁴, LIU Zhao-ming⁴, WANG Na^{1,2}, and WANG Kai^{1,2}

(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences Urumqi 830011;

2. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences Nanjing 210008;

3. University of Chinese Academy of Sciences Shijingshan Beijing 100049;

4. The 39th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation Xi'an 710065)

Abstract This paper describes a wideband orthomode transducer (OMT) based on the ridged waveguide connection, the center frequency of OMT is 40 GHz, relative bandwidth is 50%. The transducer is aimed to work in Q-band receiver system in radio telescope. This OMT is composed of dual ridged waveguide connection joint, Y type joint and E type elbow, the structure of OMT is compact, and the influence of processing and assembling errors on the electrical performance is reduced. After testing the actual machining of the OMT, the reflection loss of Y type joint output $S_{11} \leq -22.7$ dB, the reflection loss of direct arm output ≤ -21.0 dB, and the isolation between Y type joint output and direct arm output ≤ -43.4 dB. The trend of curve change between actual measure and simulation result is very similar, and this OMT can satisfy the requirements of radio astronomic observation in (30~50) GHz bandwidth.

Key words broadband; ortho-mode; Q-band; ridged

射电天文学在宇宙学、星系演化、恒星物理、探索地外生命等研究领域扮演着重要的角色, 其中毫米波射电天文是研究恒星形成、星系形成乃至宇宙形成的重要研究领域。在3 mm波段, 由于有分布非常广泛的CO分子的最低转动能级跃迁, 国内外已有大量的观测研究, 并且取得很大的成绩, 而7 mm波段的观测相对较少。在7 mm波段也有大量的分子谱线, 且包括很多重要的分子谱线, 如HC3N(5-4) (45.49 GHz)、SiO(1-0) (43.42 GHz)、

CS(1-0) (48.99 GHz)以及其同位素 $C^{34}S(1-0)$ (48.21 GHz)和 $^{13}CS(1-0)$ (46.25 GHz)、H₂CO(48.28 GHz)、CH₃OH(44.07 GHz)等^[1-3]。这些谱线是分子云和恒星形成区物理、化学性质的重要探针; 如果具备足够的灵敏度(如依托大口径望远镜), 还可以用这些分子谱线研究星系演化早期阶段的物理和动力学性质。发展7 mm(Q)波段观测将显著提高在分子谱线前沿研究领域的能力和水平^[4-5]。

随着射电望远镜接收机系统工作带宽和工作频

收稿日期: 2017-03-01; 修回日期: 2017-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(U1431230,11253001); 国家重点基础研究发展计划(2015CB857100)

作者简介: 陈卯蒸(1975-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事射电天文微波接收技术、超宽带接收技术、毫米波接收技术等方面的研究。

率需求的不断增加, 为了满足Q波段接收机的要求, 需要对正交模耦合器(ortho-mode transducer, OMT)的工作带宽进行扩展并且提高频段OMT加工装配程序^[6-7]。由于工作频率越高, 加工装配误差对OMT的性能影响愈加明显。本文设计了一款宽带脊过渡正交模耦合器, 该OMT工作覆盖Ka和Q波段, 结构紧凑, 性能优异, 降低了加工装配误差对电气性能的影响, 最后利用HFSS仿真软件进行仿真设计, 并通过实物测试验证了设计的正确性。

1 方案选择

常规窄带正交模耦合器的结构一般为非对称的T型结构, 工作带宽主要受制于微波器件公共端口的横截面形状及对应的主模与第一高次模截止频率的相对关系。

圆波导的主模 TE₁₁ 模的截止波长 $\lambda_c=3.41R$ (R 为圆波导半径)^[8], 第一高次模 TM₀₁ 模的截止波长 $\lambda_c=2.62R$ 。为保证最低工作频点 f_0 能够在圆波导中传输, 要求最低工作频点 $f_0 \geq 1.05f_c$, 圆波导的半径至少应该取 $R=1.05c/(3.412f_0)$ (c 为光传播速度), 正交模耦合器主模高低频点之比为(3.412/1.05/2.62):1=1.24:1, 最大工作带宽的百分比为 21.4%。方波导的主模 TE₁₀ 模的截止波长 $\lambda_c=2a$, (a 为方波导边长), 第一高次模 TM₁₁/TE₁₁ 模截止波长 $\lambda_c=1.414a$ 。为保证最低工作频点 f_0 能够在方波导中传输, 要求最低工作频点 $f_0 \geq 1.05f_c$, 因此方波导半径至少应该取 $a=1.05c/2f_0$, 正交模耦合器主模高低频点之比为(2/1.05/1.414):1=1.34:1, 最大工作带宽百分比为 29.5%^[9-10]。

常规采用对称耦合孔技术的正交模耦合器, 工作带宽最宽可以达到33%。若要实现40%以上的工作带宽, 一般常见的结构形式有双脊过渡-分支合成 OMT、双脊过渡-同轴输出型 OMT、四臂合成型 OMT、鳍线型 OMT^[11]、隔板-分支合成型(Bøifot型) OMT^[12]、四脊 OMT^[13]等类型。其中双脊过渡-同轴输出型 OMT、鳍线型 OMT、四脊 OMT 均为同轴输出端口, 在Ka以上的波段制作加工以及装配调试的难度比较大, 无法实现批量生产。而四臂合成型 OMT 则结构较为复杂, 插入损耗比较大, 不利于降低天馈系统噪声温度。隔板-分支合成型(Bøifot型) OMT 结构相对简单, 设计难度较低, 更易于设计、加工和调配, 但是侧臂分支合成通道的驻波性能较差。双脊过渡-分支合成 OMT 虽然设计难度比较大, 但是两个线极化通道的电气性能优良, 结构设计也

更加紧凑, 是射电天文望远镜天线馈源设计的最佳选择方案。

本文设计的Q波段正交模耦合器用于射电天文望远镜天线系统, 工作频率为30~50 GHz, 工作带宽百分比达到50%。为满足设计要求, 正交模耦合器最终采用双脊过渡-分支合成结构, 公共端口为方形波导边长5.4 mm×5.4 mm, 输出端口为BJ400标准波导。该双脊过渡-分支合成型正交模耦合器结构紧凑, 对于水平极化和垂直极化都是对称的, 可以抑制高次模的产生, 理论上在小于1.8:1倍频程内有较好的驻波和隔离特性, 其仿真模型如图1所示。

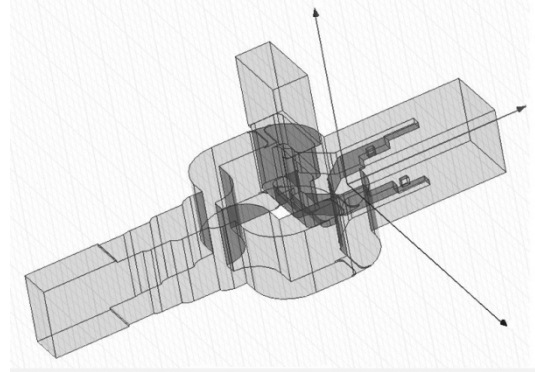


图1 双脊过渡-分支合成型OMT

为了抑制方波导的高次模TE₂₀模, 同时保证主模传输, 正交模耦合器方波导边长取5.4 mm(TE₂₀模的截止频率为55.55 GHz, 主模截止频率为27.78 GHz), 正交模耦合器出口波导为标准波导BJ400(5.69 mm×2.845 mm)。考虑到结构小型化的要求, 正交模耦合器采用了分支纵向合成输出的结构形式。

2 具体设计

双脊过渡-分支合成型 OMT 可以分为双脊过渡分支接头、Y型接头、E型弯头3大部分, 其中以双脊过渡分支接头、Y型接头为核心部件, 它们将决定整个 OMT 的性能。将3个部件优化仿真后, 再拼接组合成完整的 OMT 模型进行优化设计。

2.1 双脊过渡分支接头设计

根据以往工程设计的经验, 侧臂波导窄边的尺寸应小于方波导边长的一半, 如此才能兼顾驻波和隔离性能, 后口波导窄边的尺寸约为方波导边长的1/3左右, 脊厚度约为方波导边长的0.12~0.16倍。直通道的双脊过渡段按四分之一波长阻抗变换器原理设计, 方波导根部双脊的切角尺寸要求, 同时还要兼顾直通道的侧臂分支通道的驻波性能, 最终与E型弯头进行融合设计。侧臂分支通道的设计主要影

响因素是方波导根部双脊的切角尺寸,考虑到结构的小型化,将接头分支与E型弯头融合设计并引入匹配钉和电感膜片,如图2所示。

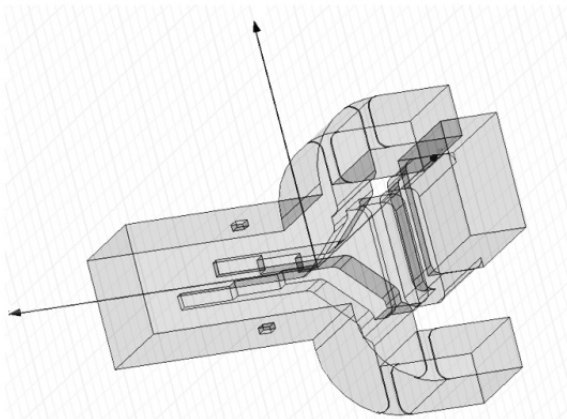


图2 双脊过渡分支接头模型

双脊过渡分支接头方波导口径为 $5.4\text{ mm}\times 5.4\text{ mm}$,直通道出口波导口径为BJ400标准,便于后续的装配和调试。在设计中为保证加工的可实现性,接头中双脊过渡的厚度均取 0.7 mm ,减少了加工误差参数。电气设计过程中充分考虑了结构器件加工的条件,对器件各个尺寸进行合理的分配。经过优化,最终双脊过渡分支接头双脊过渡采用3个台阶,直通道的反射损耗均小于 -25.5 dB ,侧臂通道的反射损耗均小于 -22.5 dB ,如图3所示。

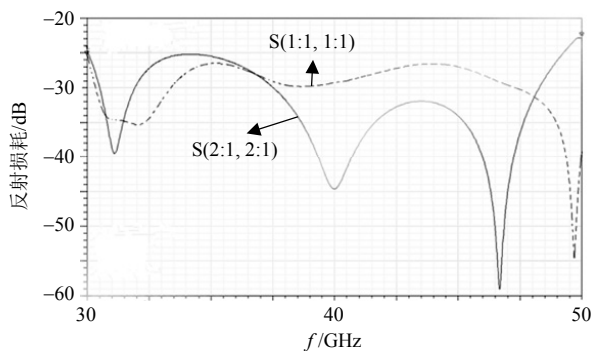


图3 双脊过渡分支接头反射损耗

2.2 Y型接头设计

Y型接头是将双脊过渡分支接头输出的两路水平极化信号合成一路信号的部件,由 90° 弯头和阻抗变换段组成,如图4所示。

弯头的尺寸与双脊过渡分支接头分支口的尺寸一致,出口波导为BJ400标准尺寸。根据切比雪夫阻抗转换器的设计原理,Y型接头采用了4节阻抗转换器结构,并且根据实际的加工工艺条件合理的选择了倒角半径。经优化,Y型接头反射损耗均小于 -25 dB ,如图5所示。

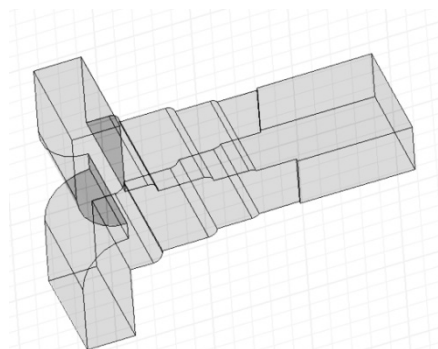


图4 Y型接头模型

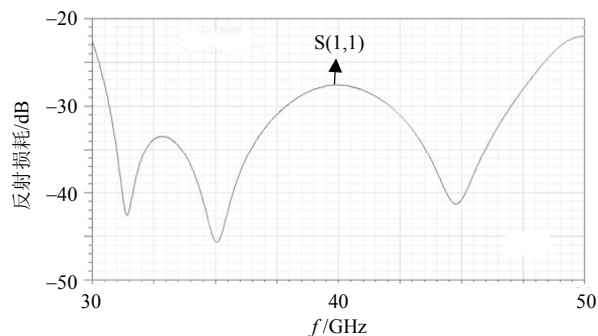


图5 Y型接头反射损耗

2.3 E型弯头

E型弯头是连接双脊过渡分支接头和Y型接头的部件,如图6所示。

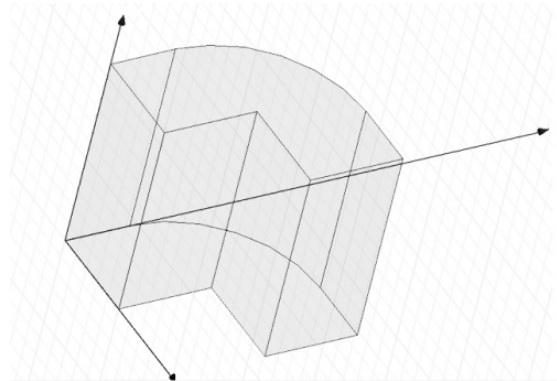


图6 E型弯头模型

E型弯头仿真的反射损耗小于 -37.7 dB ,如图7所示。

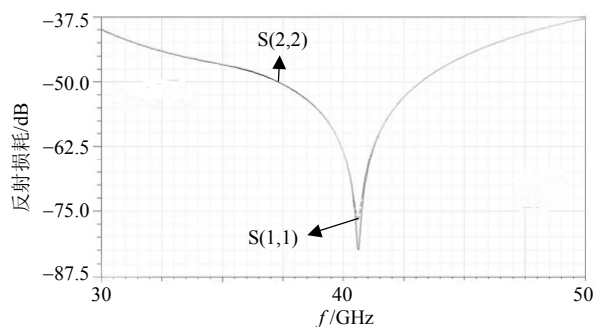


图7 E型弯头反射损耗

2.4 整体设计

在HFSS仿真软件中将双脊过渡-分支合成型OMT的3个部件组合成一个完整的模型, 在频率为30~50 GHz的频带内进行优化设计, 仿真要求反射损耗小于-20 dB, 极化隔离度大于50 dB。微调Y型接头过渡段和E型弯头倒角等参数, 最终的优化结果如图8所示, 其中直口回波损耗 ≤ -24.7 dB, 侧口回波损耗 ≤ -24.4 dB, 直口-侧口的隔离度-62 dB。

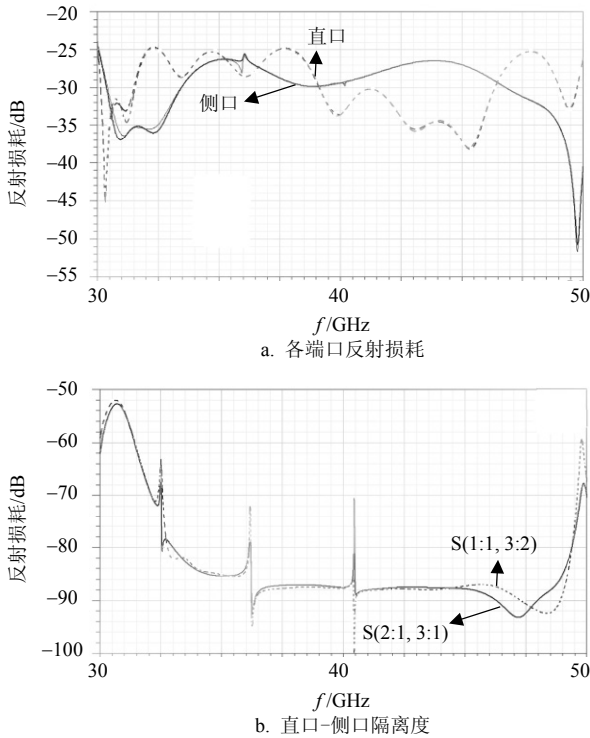


图8 双脊过渡-分支合成型OMT仿真结果

3 实测结果

双脊过渡-分支合成型OMT经实际加工后的实物如图9所示。在实际测量中采用美国安利公司的矢量网络分析仪MS4647B, 使用5.4 mm×5.4 mm方波导到 $\phi 10$ 圆波导的圆方过渡和 $\phi 10$ 的圆负载。各项参数的测试结果如下: 直口回波损耗 $S_{11} \leq -22.7$ dB; 侧口回波损耗 $S_{11} \leq -21.0$ dB; 直口-侧口隔离 $S_{12} \leq -45.6$ dB, 如图10所示。

实测结果与仿真结果相比, 曲线的变化趋势基本吻合。在HFSS软件中, 对圆弧类的面或物体(如圆柱体等)采用了正多边形进行拟合剖分, 而仿真模型的横截面比实际的尺寸小, 导致计算结果与实测结果存在偏差。实测回波损耗整体抬高, 这是由于加工和装配精度存在一定的偏差造成的, 正交器匹配钉安装误差、整体使用螺钉固定等存在的误差也会导致回波损耗增大。回波损耗结果波动较大, 与测试时使用圆方过渡、负载引入的扰动及测试系统

和定标时使用的非稳相同轴电缆和波导同轴转换器有关。隔离度偏大与加工和装配误差相关。

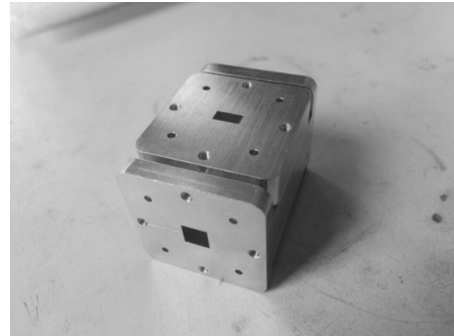


图9 双脊过渡-分支合成型OMT实物图

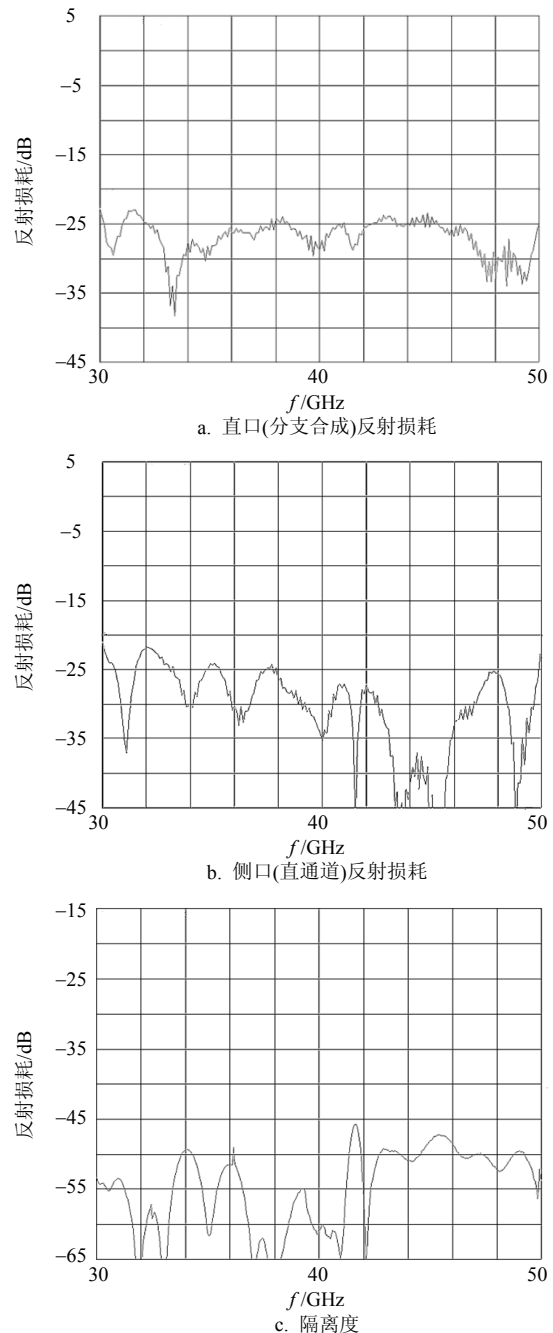


图10 双脊过渡-分支合成型OMT实测结果

4 结束语

本文采用双脊过渡分支合成结构设计了一种用于射电望远镜天线系统的Q波段宽带正交模耦合器。通过仿真优化设计,提出了一种比较可行的设计方案,并对实际加工的正交器进行测试,实测结果与仿真结果基本一致,各项性能指标均达到了预期的目标,可以满足设备使用的要求。

参 考 文 献

- [1] CESARONI R. Outflow, infall, and rotation in high-mass star forming regions[M]. Netherlands: Dense Molecular Gas Around Protostars and in Galactic Nuclei, 2005.
- [2] WU Y F, WANG J Z, WU J W A. Search for extremely young stellar objects[J]. Chin Phys Lett: English Edition, 2003(8): 1409-1412.
- [3] ZHOU W F, WU Y F, WEI Y, et al. Massive molecular cloud cores and activities of star formation[J]. Chin Phys B: English Edition, 2005, 14(4): 863-868.
- [4] CHUNG M H, KHAIKIN V B, KIM H R, et al. A next generation multi-beam focal plane array receiver of TRAO for 86-115 GHz band[J]. Journal of Astronomy & Space Sciences, 2006, 23(1): 19-28.
- [5] YANG J, SHAN W L, SHI S C, et al. The superconducting spectroscopic array receiver (SSAR) for millimeter-wave radio astronomy[C]//Global Symposium on Millimeter Waves, 2008. [S.l.]: IEEE, 2008: 177-179.
- [6] 佚名. 天馈系统中的波导元件[M]. 合肥: 电子工业部第38研究所, 1982.
- Anonymity. Waveguide components in the antenna feed system[M]. Hefei: No. 38 Research Institute of CETC, 1982.
- [7] 波扎. 微波工程[M]. 第3版. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- POZAR D M. Microwave engineering[M]. 3rd. translated by ZHANG Zhao-yi, ZHOU Le-zhu, WU De-ming, et al. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.
- [8] SKINNER S J, JAMES G L. Wide-band orthomode transducers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 1991, 39(2): 294-300.
- [9] COUTTS G M. Wideband diagonal quadruple-ridge orthomode transducer for circular polarization detection[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011, 59(6): 1902-1909.
- [10] BØIFOT A M, LIER E, SCHAUG-PEETEERSEN T. Simple and broadband orthomode transducer[J]. IEEE Proceedings H, 1990, 137(6): 396-400.
- [11] CHATTOPADINGS G, CHARLSTROM J E. Finline ortho-mode transducer for millimeter waves[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9(9): 330-341.
- [12] RUIZ-CRUZ J A, MONTEJO-GARAI J R, REBOLLAR J M, et al. Computer aided design of wideband orthomode transducers based on Boifot Junction[C]//Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International. [S.l.]: IEEE, 2006: 1173-1176.
- [13] COUTTS G M. Wideband diagonal quadruple-ridge orthomode transducer for circular polarization detection[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(6): 1902-1909.

编辑 税红