

文章编号: 2095-4980(2020)01-0099-04

一种 X 波段 GW 级 TE₂₁ 模耦合器的设计

邓广健, 李佳伟, 巴 涛, 郭乐田

(西北核技术研究院 高功率微波重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要: 针对目前高功率微波(HPM)传输与发射系统无法实现自跟踪的问题, 引入 TE₂₁ 模耦合器, 使 HPM 系统具备自跟踪能力。由于现有的 TE₂₁ 模耦合器应用到 HPM 中会面临功率容量的问题, 为此设计一种 X 波段 GW 级 TE₂₁ 模耦合器, 以探索其在 HPM 系统中的应用。仿真结果表明: 设计的 TE₂₁ 模耦合器在 9.0~10.0 GHz 频率范围内, 对 TE₂₁ 模的耦合度大于 -0.5 dB, 对 TE₁₁ 模的耦合度小于 -40 dB, 功率容量可达到 GW 量级。

关键词: 高功率微波; TE₂₁ 模耦合器; 耦合度; 功率容量

中图分类号: TN622

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019214

A design method of X-band GW-level TE₂₁-mode coupler

DENG Guangjian, LI Jiawei, BA Tao, GUO Letian

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: Since the transmission system of High Power Microwave(HPM) cannot realize self-tracking, the exploration of adding a TE₂₁-mode coupler into the HPM system is conducted. As the existing TE₂₁-mode couplers have the problems of power capacity, an X-band GW-level TE₂₁-mode coupler is proposed to explore the application in the HPM system. The simulation results demonstrate that the coupling coefficient of TE₁₁-mode of the designed TE₂₁-mode coupler is less than -40 dB from 9.0 GHz to 10.0 GHz, and the coupling coefficient of TE₂₁-mode is larger than -0.5 dB. The power capacity of the coupler is on GW level.

Keywords: High Power Microwave; TE₂₁-mode coupler; coupling; power capacity

TE₂₁ 模耦合器由作为主波导的过模圆波导和作为副波导的基模矩形波导构成。利用 TE₂₁ 模耦合器, 通过圆波导中 TE₂₁ 模形成的差波束与主模 TE₁₁ 模形成的和波束的共同工作, 可实现对目标的高精确度自动跟踪^[1-5]。当天线波束对准目标时, 馈源中只激励 TE₁₁ 模, 经耦合器的主波导传输至和通道, 此时要求副波导对 TE₁₁ 模不耦合; 当天线波束指向偏离目标时, 馈源中激励起 TE₂₁ 模, 要求耦合器的副波导对 TE₂₁ 模实现 0 dB 耦合, 并传输至差通道中, 通过差信号驱动天线对准目标。以 TE₂₁ 模耦合器为关键部件的自跟踪馈源在卫星通信技术、测控雷达等领域中^[6-8]已得到广泛应用, 并具有效率高、容易形成圆极化的优势。

高功率微波(HPM)技术近年来得到了飞速发展, 若将现有的 TE₂₁ 模耦合器应用到 HPM 系统中, 会面临功率容量的问题。本文设计了一种 GW 级 TE₂₁ 模耦合器, 以期探索在 HPM 系统中的应用。

1 耦合器研制

对 TE₂₁ 模耦合器进行设计, 首先需确定圆波导的尺寸。通常, 选取的圆波导尺寸, 仅需满足在工作频段内 TE₂₁ 模式可传播, 而更高次的 TE₀₁ 模、TM₁₁ 模被截止的要求^[2-7]。假定 TE₂₁ 模耦合器的工作频段为 $f_L \sim f_H$, 工作波长为 $\lambda_L \sim \lambda_H$, 则圆波导半径 R 需满足: $\lambda_L / 2.06 \leq R \leq \lambda_H / 1.64$ 。但对于 HPM 的 GW 级功率传输, TE₂₁ 模耦合器的圆波导尺寸需适当增大, 以满足功率容量要求。因而选择圆波导尺寸为 $R = \lambda_H / 1.64$ 。此时, 耦合器内的传播模式可满足工作要求, 且能够尽可能提高耦合器的功率容量。

在该尺寸下, 圆波导中 TE₁₁ 模、TM₀₁ 模、TE₂₁ 模均可传输。为保证跟踪精确度, 耦合器需对 TE₂₁ 模以外的

收稿日期: 2018-08-07; 修回日期: 2019-01-07

作者简介: 邓广健(1990-), 男, 硕士, 主要研究方向为电磁场与微波技术。email: gjdeng@126.com

其他模式具备较高的抑制度。为实现对 TE₂₁ 模的全耦合，要求圆波导中 TE₂₁ 模的传播常数与矩形波导中 TE₁₀ 模的传播常数相等。记 A 为矩形波导宽边长度，则有 $A=1.0286R$ 。

在确定了波导尺寸后，对耦合孔尺寸及耦合孔间距进行设计。TE₂₁ 模耦合器的目标是对 TE₂₁ 模实现 0 dB 耦合，把其他模式抑制到 40 dB 以上。分别采用强耦合、弱耦合耦合波理论进行分析^[2]：

$$\begin{cases} \text{强耦合} & C_T = \sin \left[2 \sum_{i=1}^N \arcsin(2\alpha_0\alpha_i) \right] \\ \text{弱耦合} & C_L = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cos \left[\frac{2i-1}{2N-1} \times \frac{L}{2} (\beta_1 - \beta_2) \right]}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中： N 为耦合孔数的一半，耦合孔等间距对称分布，耦合孔间距为 S ； i 为耦合孔序号，从中间向两边逐渐增大； $L=(2N-1)S$ 为耦合段长度； α_0 为参考孔耦合强度； α_i 为第 i 个孔相对于参考孔的耦合强度； β_1, β_2 为圆波导与矩形波导中 2 个耦合模式的传播常数。

TE₂₁ 模耦合器对 TE₁₁ 模、TM₀₁ 模的耦合为弱耦合，由弱耦合 C_L 为 -40 dB 以下确定耦合孔分布 α_i ；对 TE₂₁ 模的耦合为 0 dB 强耦合，由 C_T 为 0 dB 确定参考孔耦合强度 α_0 。常数加权 Bessel 分布性能较好，可满足模式抑制要求^[9-13]，其分布如下：

$$\alpha_i = \alpha_0 + b_0 J_0 \left(\frac{2i-1}{2N-1} c_0 \right) \quad (2)$$

对于 $N=24$ 的 48 孔耦合分布有： $\alpha_0=5.017, b_0=10, c_0=3.76$ 。根据强耦合中对 TE₂₁ 模式 0 dB 强耦合可得^[8]， $\alpha_0=0.002083$ 。在中心频率 9.5 GHz 下，为实现对 TE₁₁ 模、TM₀₁ 模 40 dB 以上的抑制度，由弱耦合选择耦合孔间距 $S=10$ mm。

为方便加工，耦合孔选择圆孔。由耦合波理论，根据耦合分布 α_i ，可得出各耦合孔孔径 r_i ^[14]，如表 1 所示。

$$\alpha_0\alpha_i = \frac{2}{3} r_i^3 R_M K_M h_{21}^C h_{10}^R \frac{1}{(\beta_{21}^C \beta_{10}^R)^{1/2}} \quad (3)$$

式中： R_M 为大孔因子； K_M 为壁厚因子； h_{21}^C, h_{10}^R 分别为圆波导 TE₂₁ 模与矩形波导 TE₁₀ 模的归一化磁场强度， $\beta_{21}^C, \beta_{10}^R$ 分别为圆波导 TE₂₁ 模与矩形波导 TE₁₀ 模的传播常数。

表 1 耦合孔径计算结果
Table 1 Calculation results of coupling apertures

No.	r_i/mm	No.	r_i/mm	No.	r_i/mm
1	6.89	9	6.38	17	4.93
2	6.88	10	6.24	18	4.70
3	6.85	11	6.10	19	4.45
4	6.81	12	5.94	20	4.21
5	6.75	13	5.77	21	3.99
6	6.68	14	5.58	22	3.78
7	6.58	15	5.37	23	3.63
8	6.49	16	5.16	24	3.55

2 仿真及优化设计

按上文得到的 TE₂₁ 模耦合器的结构尺寸，进行耦合器特性的仿真分析及进一步的优化设计。建立 TE₂₁ 模耦合器模型，见图 1。图中，主波导为半径 $R=18$ mm 的圆波导，副波导为 $18.51 \text{ mm} \times 7.85 \text{ mm}$ 的矩形波导。8 根矩形波导呈对称分布，矩形波导窄壁与圆波导壁相连，耦合孔开在公共壁上，并位于矩形波导窄壁中心线。

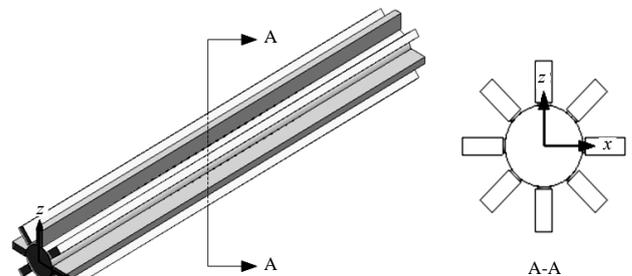


Fig.1 Simulation model of a TE₂₁-mode coupler
图 1 TE₂₁ 模耦合器仿真模型

图 2 为 TE₂₁ 模耦合器副波导对主波导中各模式耦合度的曲线。在 9.0~10.0 GHz 频率范围内，对 TE₁₁ 模的耦合度小于 -40 dB，对 TM₀₁ 模的耦合度小于 -60 dB，对 TE₂₁ 模的耦合度在 -1 dB 以内，耦合器的性能参数基本满足要求。当输入 3 GW 的圆极化波时，耦合孔附近的最大场强为 204.6 MV/m，如图 3 所示，将会引发电场击穿问题，无法满足 HPM 应用要求。

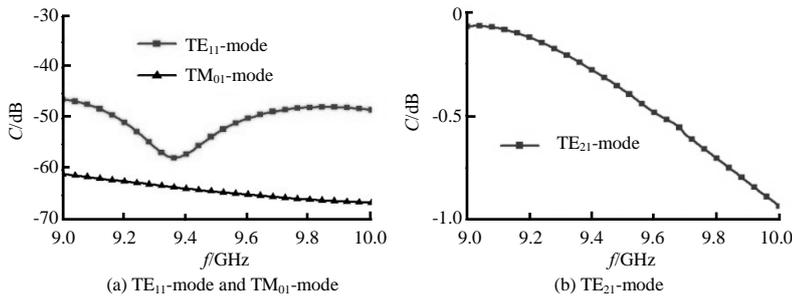


Fig.2 Simulation results of coupling coefficients of the TE₂₁-mode coupler
图 2 TE₂₁ 模耦合器耦合度仿真结果

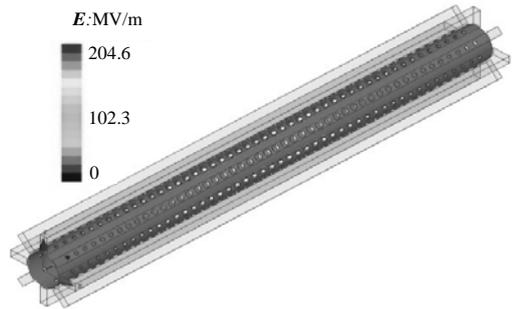


Fig.3 Electric field distribution of the coupler at 3 GW
图 3 耦合器在 3 GW 输入功率下电场分布仿真结果

为提升 TE₂₁ 模耦合器的功率容量,抑制耦合孔尖角引起的局部场增强,对耦合孔做倒角处理。同样,在 3 GW 的圆极化波输入下,最大场强降为 75.2 MV/m,如图 4 所示。应该指出的是,该耦合器设计基于终端匹配状态,仿真中没有加入任何天线等引入回波的负载器件,在实际应用中将会存在驻波叠加的问题,并且工程实现中的加工偏差、温度变化、空气状态等因素均会影响高功率特性,但以真空条件下金属击穿阈值 80 MV/m^[15]为依据,此 TE₂₁ 模耦合器实现 GW 级的功率容量依然留有足够的余量。由于耦合孔孔径尺寸均为理论值,对该尺寸进一步优化可得到更优越的耦合性能。因此,依然采用原孔径尺寸并进行倒角处理。仿真结果表明,耦合器特性同样得到改善。倒角处理后的耦合器各模式耦合度仿真结果如图 5 所示,在 9.0~10.0 GHz 范围内,对 TE₂₁ 模的耦合度在 -0.5 dB 以内,对 TE₁₁ 模的耦合度小于 -40 dB,对 TM₀₁ 模的耦合度小于 -60 dB。在 9.5 GHz 处,对 TE₂₁ 模的耦合度为 -0.007 dB,对 TE₁₁ 模的耦合度为 -50.4 dB,对 TM₀₁ 模的耦合度为 -61.1 dB。由此仿真结果可知,该耦合器的差波束至少能达到 40 dB 的零深,满足应用要求。

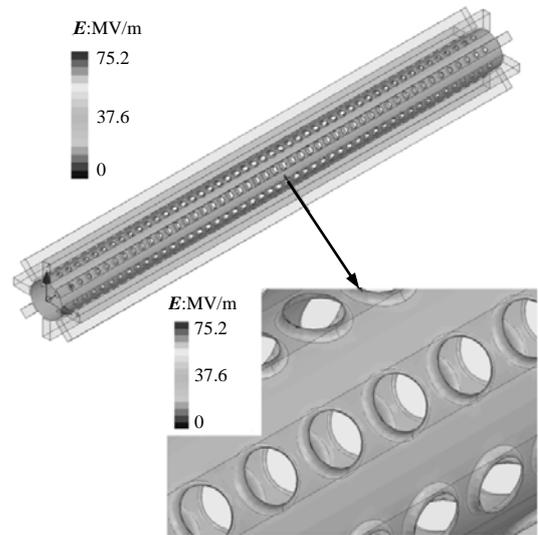


Fig.4 Simulation result of electric field distribution of the chamfered coupler at an incident power of 3 GW
图 4 倒角处理后的耦合器在 3 GW 输入功率下电场分布仿真结果

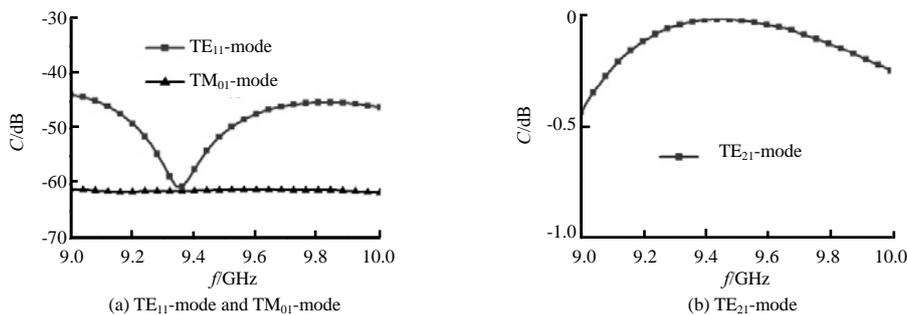


Fig.5 Simulation results of coupling coefficients of the chamfered TE₂₁-mode coupler
图 5 倒角处理后的 TE₂₁ 模耦合器耦合度仿真结果

3 结论

为探索 TE₂₁ 模耦合器在 HPM 系统中的应用,进行了 X 波段 GW 级 TE₂₁ 模耦合器的设计。仿真结果表明:在满足波导内传播模式要求的约束下,选择最大的圆波导尺寸,并对耦合孔进行倒角处理,耦合器可实现 GW 级圆极化 HPM 的传输。耦合孔的耦合强度采用常数加权 Bessel 分布,并根据耦合波理论计算耦合孔孔径,设计出的 TE₂₁ 模耦合器在 9.0~10.0 GHz 范围内,对 TE₂₁ 模的耦合度在 -0.5 dB 以内,对 TE₁₁、TM₀₁ 模的耦合度小于 -40 dB,满足应用要求。

参考文献:

- [1] 刘昊,孙向珍,李刚,等. 圆波导 TE_{11}/TE_{21} 双模自跟踪馈源的研究设计[J]. 遥测遥控, 2007,28(z1):177-181. (LIU Hao, SUN Xiangzhen, LI Gang, et al. Research and design of circular waveguide TE_{11}/TE_{21} dual modes auto-tracking feeding antenna[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007,28(z1):177-181.)
- [2] 田唯人. 宽频带圆波导 TE_{21} 模耦合器的设计方法[J]. 现代雷达, 2000,22(6):62-66. (TIAN Weiren. The design method of a wide-band TE_{21} -mode coupler in circular waveguide[J]. Modern Radar, 2000,22(6):62-66.)
- [3] 赫英毅,李彪,余川飞. 毫米波段 TE_{21} 模耦合器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2009,7(3):197-201. (HE Yingyi, LI Biao, SHE Chuanfei. Modified design method for millimeter-wave TE_{21} -mode coupler[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009,7(3):197-201.)
- [4] 赫英毅,余川飞,唐先发,等. 圆波导 TE_{21} 模跟踪网络的研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(4):458-466. (HE Yingyi, SHE Chuanfei, TANG Xianfa, et al. Research and design of circular waveguide TE_{21} -mode coupler[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(4):458-466.)
- [5] 赵涵,杨峰,苏佳胜. 紧凑型线极化自跟踪馈源设计[J]. 磁性材料及器件, 2013,44(6):35-40. (ZHAO Han, YANG Feng, SU Jiasheng. Design of compact linearly polarized self-tracking feed[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2013, 44(6):35-40.)
- [6] 许智,梁昌洪. TE_{21} 模耦合器研究[J]. 空间电子技术, 2005,2(3):44-47. (XU Zhi, LIANG Changhong. Research of a TE_{21} -mode coupler[J]. Space Electronic Technology, 2005,2(3):44-47.)
- [7] 许智,梁昌洪. 一种圆极化多模耦合器[J]. 电波科学学报, 2011,26(1):175-179. (XU Zhi, LIANG Changhong. A circular polarization multimode coupler[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011,26(1):175-179.)
- [8] 赵涵. 三频段高性能收发共用馈源的研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2014. (ZHAO Han. Research and design of tri-band highly performing transmitting and receiving antenna feeds[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)
- [9] YOUNG H C, KENNETH R G, LAWRENCE G B. Theory and design of a Ku-band TE_{21} -mode coupler[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982,30(11):1862-1866.
- [10] 王光辉. 用于精密跟踪天线的 TE_{21} 模耦合器研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013. (WANG Guanghui. Research of the TE_{21} -mode coupler in precision tracking antenna[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2013.)
- [11] 赫英毅. 毫米波段基于 TE_{21} 模差网络设计[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2009. (HE Yingyi. Design of differential network of TE_{21} -mode at the millimeter-wave[D]. Mianyang, Sichuan, China: China Academy of Engineering Physics, 2009.)
- [12] 邓淑英,李友才. 宽频段单脉冲跟踪网络设计研究[J]. 空间电子技术, 2006,3(3):54-60. (DENG Shuying, LI Youcai. Design and research of a wideband monopulse tracking network[J]. Space Electronic Technology, 2006,3(3):54-60.)
- [13] 乔峰. Ka 频段超宽带跟踪器的研究[D]. 烟台:烟台大学, 2014. (QIAO Feng. Research of the Ka-band ultra wideband tracker[D]. Yantai, Shandong, China: Yantai University, 2014.)
- [14] SPORLEDER F, UNGER H G. Waveguide tapers transitions and couplers[M]. Stevenage: Peter Peregrinus, 1979.
- [15] STEVEN H G, GREGORY S N. Review of high-power microwave source research[J]. Review of Scientific Instruments, 1997,68(11):3945-3974.