引用格式：魏坤, 范志强, 赵杰, 等. 紧凑型圆−矩波导模式转换拍波合成器设计 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(3): 345-349.
WEI K, FAN Z Q, ZHAO J, et al. Design of a compact circular-to-rectangular waveguide mode conversion beat-wave synthesizer[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(3): 345-349.

紧凑型圆−矩波导模式转换拍波合成器设计

魏 坤*，范志强，赵 杰，王 武，王 琛

（军事科学院国防科技创新研究院，北京 100071）

摘要：提高高功率微波（HPM）系统的输出功率是 HPM 系统研究的核心和关键问题，功率合成技术是提高输出功率的同时突破单个高功率微波源性能提升的重要方法。据此研究设计了一种紧凑型 X 波段圆波导 TM01-矩波导 TE11 模式转换拍波合成器，通过不同半径及长度的圆波导组合以及增加多路末端封闭的 TM01-TE10 分支结构等方法实现滤波功能，从而在实现模式转换的同时实现拍波合成功能。该合成器结构紧凑，加工难度低，合成效率约 95%，功率容量达 GW 级，可同时实现模转和拍波合成，为小型化 HPM 系统集成提供了更多的可行性和便利性。

关键词：高功率微波；拍波合成；模式转换；功率容量
中图分类号：TN102; O451 **文献标志码：**A DOI: 10.12178/1001-0548.2025151

Design of a compact circular-to-rectangular waveguide mode conversion beat-wave synthesizer

WEI Kun*, FAN Zhiqiang, ZHAO Jie, WANG Wu, and WANG Chen

(Defense Innovation Institute, Academy of Military Science, Beijing 100071, China)

Abstract: Enhancing the output power of high-power microwave (HPM) systems remains a central challenge in HPM research. Power synthesis technology serves as a critical method to increase the output power while breaking through the performance improvement of a single high-power microwave source. This paper presents a beat-wave synthesizer based on mode-conversion filters, configured as a dual-channel device. Each channel incorporates a circular-to-rectangular waveguide TM01-TE10 mode converter integrated with sidewall coupling structures and short-circuited waveguide sections to achieve simultaneous mode conversion and beat-wave synthesis. The prototype demonstrates 95% synthesis efficiency with gigawatt-level power handling capacity. Its compact configuration and low manufacturing complexity enable effective mode transition and wave synthesis, offering enhanced feasibility for miniaturized system integration.

Key words: high power microwave; beat synthesis; microwave mode conversion; power handling capacity

高功率微波（high power microwave, HPM）技术是指产生峰值输出功率超过 100 MW、频率范围在 1～300 GHz 内、波长处于厘米至毫米范围的电磁波技术。作为等离子体物理与脉冲功率技术相结合的产物，HPM 技术自 20 世纪 70 年代起快速发展，已成为现代电子科学与工程领域的前沿研究方向。随着其应用领域不断拓展，HPM 技术在等离子体加热、高功率短脉冲雷达、射频加速、材料处理等领域展现出巨大潜力，吸引了众多学者进行深入研究。在 HPM 系统的众多技术挑战中，如何获取更高的输出功率始终是核心问题。然而，单个高功率微波源的性能提升面临诸多物理和工程限制，包括局部电场击穿[1-2]、微波脉冲缩短以及过模高频系统中的模式寄生等技术难题。这些瓶颈使得单一器件难以持续突破功率上限，促使研究人员将目光转向功率合成技术，探索通过多个微波源协同工作来实现更高功率输出的技术路径。

微波功率合成根据合成机制和原理，可分为相干合成和非相干合成。相干合成要求各输入信号具有严格的频率和相位关系，系统复杂度和稳定性要求较高；非相干合成对输入信号的相位要求较低，系统复杂度和实现难度也大大降低。非相干功率合

收稿日期：2025−07−14
作者简介：魏坤，博士，主要从事高功率微波方面的研究。
*通信作者 E-mail: weikun@pku.edu.cn

成技术通常在同频段内两列或多列相近频带间进行合成，当这两列或多列频率间隔在几百兆赫兹以内、幅值在同一水平且极化方向相同的微波，迭加后可形成拍波。在 HPM 效应研究中，拍波可以在目标处产生与拍频相关的低频成分，这些低频成分可能与电子系统固有频率发生谐振，形成能量积累效应，大幅降低损伤目标所需的场强阈值[3]。

另外，微波功率合成根据合成实现方式可分为空间功率合成和通道功率合成两大类。空间功率合成技术对各辐射单元的稳定性和一致性要求极高，环境因素如温度变化、机械振动和大气湍流等都可能影响合成效果，且功率密度随传播距离衰减显著，这些因素在实际应用中需特别考虑。通道功率合成则是通过波导、腔体等传输结构将多个微波源的输出在器件内部直接合成，再经统一输出口辐射。通道功率合成的优势在于结构紧凑、合成效率高、输出波束质量好，且对环境条件的敏感度较低。特别是在有限空间内需要获得高功率密度输出的应用中，通道功率合成表现出明显优势。但该技术也面临着功率容量受限以及高功率下的器件损耗大、模式控制难度大等挑战，尤其是在超高功率应用中，器件内部的电场强度可能超过材料击穿阈值，限制了系统的最大输出能力。

在微波合成技术特别是通道合成研究方面，近年有较多研究进展和成果。2010 年，文献 [4] 设计了一种使用过模矩形波导的 HPM 功率合成器，该合成器由两个基于过模矩形波导设计的滤波器和一个 T 形双工器组成。2013—2016 年，文献 [5-8] 先后研制了两路、四路以及五路的紧凑型通道合成器件，用于 HPM 的产生。2023 年，文献 [9] 给出一种基于干涉机理的双工器设计思路。两个不同频率的信号同时输入电桥的两个端口，通过调整支路电长度实现移相，得到相互叠加的输出。此外，还有许多关于相干合成[10-12] 和极化合成[13-15] 的研究。

据此，本文开展了一种 X 波段拍波合成器方案的设计工作，采用通道合成技术路线，在实现 X 波段拍波合成的基础上，尽可能实现系统的紧凑型和集约化，同时保证一定的功率容量。通过设计和优化，此合成器结构紧凑，加工难度低，可同时实现模转和拍波合成，为后续小型化 HPM 系统合成应用提供了一定的可行性和便利性。

1 拍波合成器结构设计及参数优化

传统高功率微波产生器件（如相对论返波管）产生 TM01 模式。对高功率微波（HPM）的多路合成及辐射，一般需要先将 TM01 模式转换成线极化的圆波导 TE11 模式或矩形波导 TE10 模式。为获得更高的微波功率而进行多路相合时，常需要产生矩形波导 TE10 模式，且一些 HPM 辐射天线也需要矩形波导 TE10 模式激励，故本文采用矩形波导 TE10 模式作为最终输出模式。本文中的拍波合成器单路结构为一种圆波导 TM01 到矩形波导 TE10 的模式转换器，如图 1 所示。通过不同半径及长度的圆波导组合以及增加多路末端封闭的 TM01-TE10 分支结构等实现滤波功能，从而在实现模式转换的同时实现拍波合成功能。

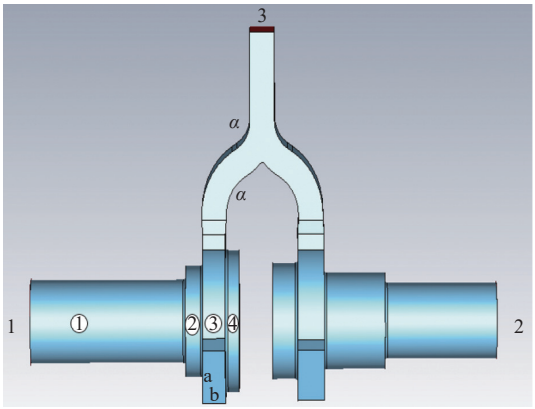


图 1 拍波合成器结构示意图

根据图 1 所示，对于选定的频率参数，需要对合成器结构部件的参数值进行优化。设合成器左端为 1 端口（圆形波导口，TM01 模），右端为 2 端口（圆形波导口，TM01 模），上端为 3 端口（矩形波导口，TE10 模）。图中①②③④为 4 段不同尺寸的圆波导，第 3 节圆波导外侧有 3 个矩形分支结构，两侧为对称结构，但具体参数不同。优化目标为 S_{31} 参数和 S_{32} 参数，使其在特定频段的传输系数尽可能高，以达到较高的合成效率。优化的结构参数主要有两个模转滤波器不同圆波导段的长度和内径、矩形波导臂的尺寸以及合成段波导的结构参数。这里优化针对的 f_1 频段为 9.0～9.4 GHz，从 1 端口输入，f_2 频段为 9.6～10.0 GHz，从 2 端口输入。基于 CST 软件对该器件的参数进行优化，优化后该器件的参数如表 1 所示。

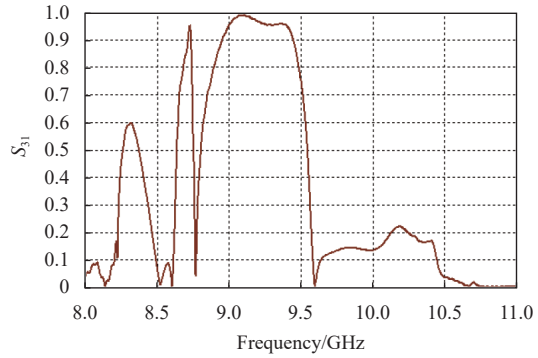
表 1 优化后器件参数表

参数（f_1端）	数值	参数（f_2端）	数值
*R*1,*H*1/mm	13.9,62.9	*R*1,*H*1/mm	12.7,45.3
*R*2,*H*2/mm	18.6,7.1	*R*2,*H*2/mm	16.7,24.7
*R*3,*H*3/mm	27.4,9.1	*R*3,*H*3/mm	26.9,10.7
*R*4,*H*4/mm	23.8,5.6	*R*4,*H*4/mm	19.3,10.5
a,*b*,*h*/mm	22.1,9.1,4.3	*a*,*b*,*h*/mm	20.7,10.7,3.6
α/（°）	65.7	*α*/（°）	65.7

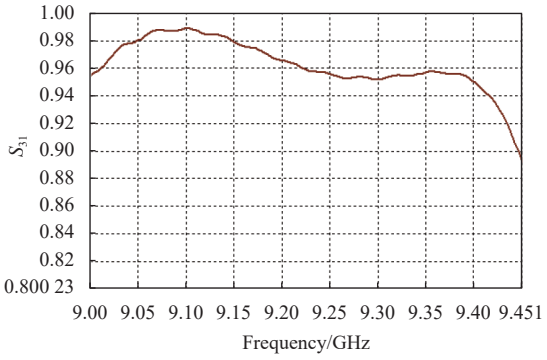
2　仿真模拟结果及讨论

2.1　拍波合成器参数优化及 *S* 参数计算结果

优化后的器件结构参数利用 CST 软件进行数值计算，得到 S_{31} 和 S_{32} 参数曲线如图 2 和图 3 所示。图 2 分别为全频段（8.0～11.0 GHz）以及 f_1 频段（9.0～9.4 GHz）S_{31} 参数曲线。相应地，图 3 分别为全频段（8.0～11.0 GHz）以及 f_2 频段（9.6～10.0 GHz）S_{32} 参数曲线。从图中可以看到，在 f_1 频段内，S_{31} 均大于 0.95，均值约 0.97；在 f_2 频段内，S_{32} 均大于 0.96，均值约 0.98。

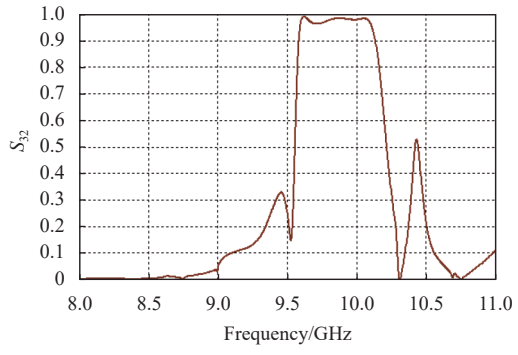


a. 全频段

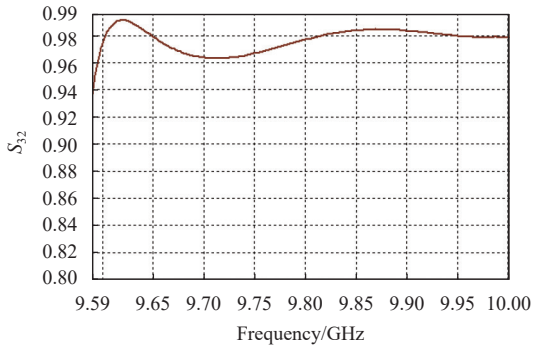


b. f_1频段

图 2　结构优化后 S_{31} 参数模拟结果



a. 全频段

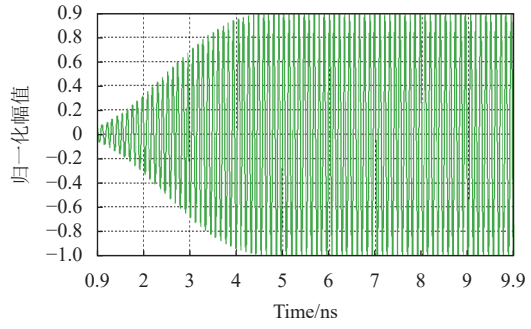


b. f_2频段

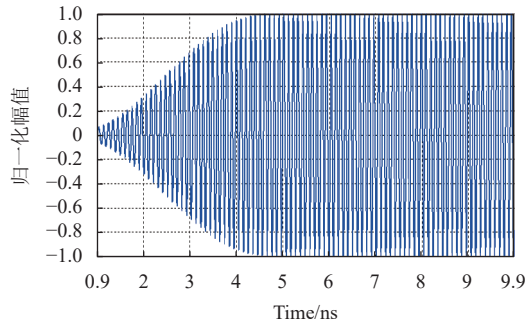
图 3　结构优化后 S_{32} 参数模拟结果

2.2　拍波合成波形及效率仿真计算

这里选择单一频点分析拍波合成波形及计算合成效率：f_1 频段频点拟采用 9.2 GHz 输入信号，f_2 频段拟采用 9.8 GHz 输入信号。输入信号波形如图 4 所示，模拟得到的拍波信号如图 5 所示。由图可见，合成拍波波形振幅周期性变化的频率为两个输入信号的频率差（0.6 GHz）。合成的拍波波形引入的低频信号为后续的 HPM 效应研究提供了条件。



a. 端口1



b. 端口2

图 4　输入信号波形

根据图中 *S* 参数计算结果，对于端口 1 的 19.2 GHz 输入信号，S_{31}=0.97，对于端口 2 的 9.8 GHz 输入信号，S_{32}=0.98，这里定义合成效率为微波的能量合成效率，计算公式 $\varepsilon=(S_{31}^2+S_{32}^2)/2$。据此计

算合成效率约 95%。对于其他频点合成效率，由于频带内传输 S 参数均大于 0.95，因此计算合成效率大于 90%。

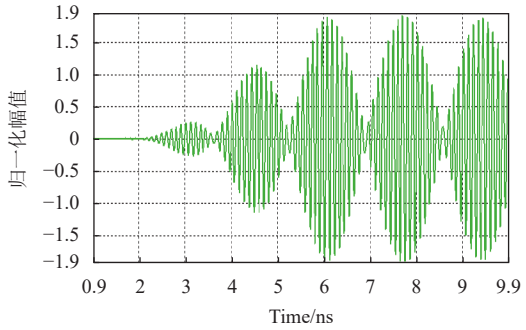


图 5　端口 3 输出的拍波合成波形

2.3　拍波合成器功率容量计算分析

由于本文设计的拍波合成器用于高功率微波的合成，所以需要考虑器件的功率容量，据此模拟该器件工作时的场分布，确认其功率容量，并通过倒角设计等提高其功率容量。

同样，端口 1 的输入信号频率为 9.2 GHz，端口 2 的输入信号频率为 9.8 GHz。CST 仿真得到端口 1 和端口 2 同时馈入时该合成器的场分布、剖面电场分布如图 6 所示，从图中看出在圆波导接缝处及合成器出口等尖峰位置场强较高，因此通过倒角设计来提高器件的功率容量。在不同半径圆波导接缝及合成段夹角处进行倒角设计，倒角半径为 1 mm。经过倒角设计后，剖面电场分布如图 7 所示。优化后尖峰位置处电场强度明显降低，峰值电场从 84 dBV/m 降到 77 dBV/m。通常击穿容易发生在合成波导内壁处，模拟显示波导内壁处最大场强约 70 dBV/m（馈入源 0.5 W），场强经验阈值约 100 MV/m[5-6]，根据 $P_m = P_0(E_m/E_0)^2$ 估算最大功率容量，代入相关数值得到两个端口的馈入功率容量各约 500 MW，合成功率容量达到吉瓦级。

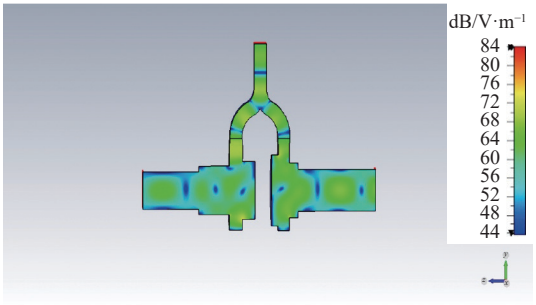


图 6　拍波合成器剖面电场分布

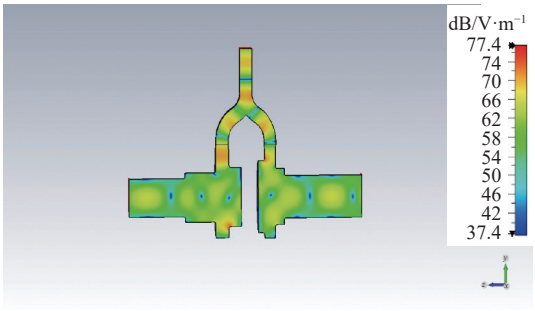


图 7　倒角优化后拍波合成器剖面电场分布

3　合成器机械结构设计

为实现本方案拍波合成器功能，即形成微波传输的固定形状真空腔体。通过分体设计实现不同的波导部分，将合成器机械结构主要划分为 f_1 模式转换滤波器、f_2 模式转换滤波器、矩形波导臂 3 部分。另外矩形波导臂与两个模式转换滤波器之间存在一小段矩形放样结构，为便于加工，作为单独部件制作。合成器装配体组成及各部件名称如图 8 所示。

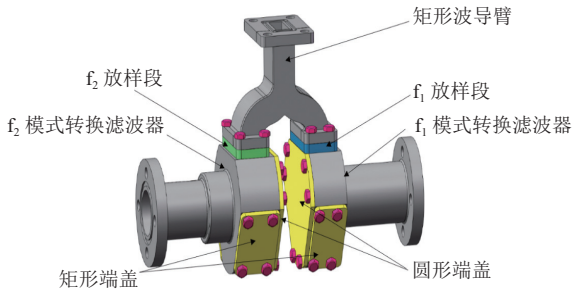


图 8　合成器装配体三维结构

本工程设计方案在机械加工过程中只使用到三轴 CNC 加工中心和数控车床，在实现功能性要求的基础上达到成本低且易加工的经济性目标。最终合成器各部件进行装配后，其形成的内腔符合本文前述设计要求，如图 9 所示。

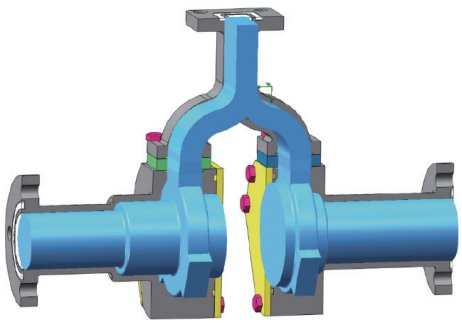


图 9　合成器装配体内腔结构

4　结束语

本文设计了一种基于模式转换滤波器的拍波合成器，该合成器可将传统高功率微波产生器件产生的 TM01 模式转换成矩形波导的 TE10 模式。拍波合成器通过不同半径及长度的圆波导组合以及增加多路 TM01-TE10 分支结构等实现滤波功能，在实现模式转换的同时实现拍波合成功能。该合成器结构紧凑，加工难度低，可同时实现模转和拍波合成。后续将在此工作基础上，加工制造此合成器，同时开展实验研究，验证拍波合成技术并为相应集成化 HPM 系统的研制提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] CHANG C, LIU G, TANG C, et al. Review of recent theories and experiments for improving high-power microwave window breakdown thresholds[J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(5): 055702.

[2] CHANG C, FANG J, ZHANG Z, et al. Experimental verification of improving high-power microwave window breakdown thresholds by resonant magnetic field[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(14): 141501.

[3] 方进勇. 简明高功率微波技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
FANG J Y. Concise high-power microwave technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2022.

[4] 李国林, 舒挺, 袁成卫, 等. 基于过模波导的高功率微波准相干功率合成器[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11): 2658-2662.
LI G L, SHU T, YUAN C W, et al. X-band quasi-coherent power combiner based on overmoded waveguides for high power microwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2658-2662.

[5] LI J, HUANG H, ZHANG Z, et al. A novel X-band diplexer based on overmoded circular waveguides for high-power microwaves[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(10): 2724-2728.

[6] CHANG C, SUN J, XIONG Z F, et al. A compact two-way high-power microwave combiner[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(8): 084704.

[7] CHANG C, XIONG Z, GUO L, et al. Compact four-way microwave power combiner for high power applications[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(21): 214502.

[8] LI J W, HUANG W H, WU X L, et al. An X band 5-way multiplexer for high power microwave combination[C]// 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Shanghai: IEEE, 2016: 4459-4461.

[9] 吴鑫磊. 基于干涉机理的紧凑化高功率微波拍波合成技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
WU X L. Research on compact high-power microwavebeat combine technology base on interference mechanism[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.

[10] 熊正锋, 宁辉, 陈怀璧, 等. 紧凑型矩形波导内功率合成器设计[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(6): 61-64.
XIONG Z F, NING H, CHEN H B, et al. Design of compact power combiner in rectangular waveguide[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(6): 61-64.

[11] XIAO R Z, DENG Y Q, WANG Y, et al. Power combiner with high power capacity and high combination efficiency for two phase-locked relativistic backward wave oscillators[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(13): 133502.

[12] XIAO R Z, DENG Y Q, SONG Z M, et al. An all circular waveguide four-way power combiner with ultrahigh-power capacity and high combination efficiency[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(7): 2475-2479.

[13] 张强, 袁成卫, 刘列. 一种 T 形高功率微波功率合成器[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2369-2372.
ZHANG Q, YUAN C W, LIU L. T-junction high power microwave power combiner[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2369-2372.

[14] 方进勇, 黄惠军, 张治强, 等. X 波段百兆瓦级高功率微波合成器设计及实验研究[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 88402.
FANG J Y, HUANG H J, ZHANG Z Q, et al. An X band synthesizer for a few hundred megawatt level power microwavesX[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(8): 88402.

[15] 涂思语, 肖龙, 陈俊峰, 等. X 波段高功率微波四路合成器的设计与仿真研究[J]. 光学与光电技术, 2021, 19(5): 88-94.
TU S Y, XIAO L, CHEN J F, et al. Design and simulation research of X-band high power microwave four-way combiner research[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2021, 19(5): 88-94.

责任编辑　税　红