

文章编号: 2095-4980(2025)02-0138-07

## W 波段 32 路宽带高效率功率合成器设计与实现

高 港, 周梓乔, 王新悦, 张李迪, 于伟华, 单 琪

(北京理工大学 集成电路与电子学院, 北京 100081)

**摘 要:** 设计了一款 W 波段 32 路全波导带宽、高效率功率合成器。该器件采用  $E-H$  面 T 型结混合的实现方法, 提高了功率合成器的紧凑性。为了扩展多路合成带宽, 引入脊波导传输线, 并采用多节阻抗匹配阶梯、渐变式过渡等形式。该结构具有结构紧凑、全波导带宽匹配、高效率的特点。为了验证该方法, 加工并测试了 32 路功率合成器背靠背结构。在 W 波段范围内, 该结构回波损耗优于 15 dB, 插入损耗低于 1.05 dB, 相对带宽为 37.8%, 合成效率大于 78.4%。实测结果证明了该设计方法的有效性, 对于多路功率合成场景具有很好的应用价值。

**关键词:** 功率合成器; W 波段; 全波导带宽; 高效率

中图分类号: TN73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023048

## Design and realization of a W-band 32-way broadband high-efficiency power combiner

GAO Gang, ZHOU Ziqiao, WANG Xinyue, ZHANG Lidi, YU Weihua, SHAN Qi

(School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A 32-way wideband and high-efficiency power combiner operating at the W-band is designed. The component employs a hybrid  $E-H$  plane T-junction to enhance the compactness of the power combiner. To extend the combining bandwidth, ridge waveguide transmission lines are introduced, along with multi-section impedance matching steps and gradual transitions. This structure features compactness, wideband matching, and high efficiency. To validate the proposed method, a 32-way back-to-back power combiner was fabricated and tested. Experimental results show that the structure achieves a return loss better than 15 dB, an insertion loss below 1.05 dB, a relative bandwidth of 37.8%, and a combining efficiency exceeding 78.4% across the W-band. These results confirm the effectiveness of the proposed design method, demonstrating significant application potential for multi-channel power combining scenarios.

**Keywords:** power combiner; W-band; full waveguide bandwidth; high-efficiency

随着低频段频谱资源分配殆尽, 已经无法满足日益增长的高带宽、低时延、大容量的数据传输需求, 具有丰富频谱资源的高频毫米波成为当今研究的热点<sup>[1]</sup>。W 波段(75~110 GHz)处于毫米波频段与太赫兹频段的交界处, 具有宽频带、短波长的特点, 在通信、雷达、成像、军事等领域具有十分重要的应用价值。但是, 随着频率不断升高, 发射机的输出功率受固态器件物理极限的制约越来越明显, 高功率场景应用在 W 波段正面对巨大挑战<sup>[2]</sup>。功率合成技术是解决该问题的有效途径, 受到广泛关注与研究。基于微带结构的平面型功率合成器, 具有结构紧凑、易与电路集成、成本低的优点, 但是其在高频损耗大, 工作带宽窄, 功率容量小<sup>[3-4]</sup>。波导功率合成器结构简单, 损耗小, 工作频带宽, 功率容量大<sup>[5]</sup>, 但用于多路合成的情况下, 采用二进制级联结构体积大, 损耗随之增大, 带宽也会受到很大影响。径向波导功率合成器可采用圆波导  $TE_{01}$  模式、 $TM_{01}$  模式、同轴线 TEM 模式在多路合成情况下保持紧凑的尺寸, 但高频毫米波模式转换结构加工及装配难度均显著增加<sup>[6-8]</sup>。

本文采用  $E-H$  面 T 型结混合结构实现多路紧凑功率合成, 引入脊波导结构作为传输线来拓展带宽, 设计多节阻抗匹配阶梯和渐变式过渡以改善匹配。仿真和实测吻合良好, 验证了该方法实现的 32 路功率合成器具有全波导带宽、低成本、高效率的特性。

### 1 原理分析及设计

T 型结作为典型的波导功率合成器，具有结构简单，易加工制造的优点，但端口驻波差，如用于多路功率合成，端口回波损耗会随着级联而恶化，严重影响工作带宽。仅用 **H** 面 T 型结 (**H-T**) 或 **E** 面 T 型结 (**E-T**) 单一结构进行功率合成，功率合成路径为二维平面，随着级联数量的增加，T 型结之间的传输线长度会呈指数级增长，导致物理尺寸过于庞大且路径损耗显著增加。通过 **H-T** 与 **E-T** 相结合，功率合成路径为三维空间，大大减小了物理尺寸和路径损耗，实现了较低的插入损耗，提高了结构的紧凑性。此外，区别于单一 **H-T** 结或 **E-T** 结，**E-H** 面 T 型结组合结构利用 **H-T** 结和 **E-T** 结的相对独立性以及相位差提供输出口之间较高的隔离度，从而减少不同输出口间的相互干扰。由脊波导理论<sup>[9]</sup>可知，同等尺寸下脊波导的截止频率较低，工作频带优于矩形波导，且通过调节脊的几何参数，能够控制脊波导的特性阻抗，从而改善端口驻波。在 T 型结内部采用脊波导传输线，可以起到拓展带宽的作用。另外，由于脊波导需要过渡到标准矩形波导，过渡结构的性能优劣直接影响带宽特性。典型的过渡结构分为渐变式和阶梯式，其中切比雪夫多节阻抗变换阶梯能够根据需求调整反射零极点的位置<sup>[10]</sup>，设计更加灵活，在输入输出端口引入这种过渡形式，可实现 WR-10 标准波导到脊波导的高效匹配。在 W 波段，脊结构的设计不仅需要考虑工作带宽等参数，还需要考虑功率容量、加工的难度以及高次模的影响。此外，每一级阶梯的最小高度也受加工限制，给匹配带来了一定难度。本文采取了折中的方案，采取三阶阻抗变换阶梯，加工难度适中，同时尽可能地保证较大功率容量。**H-T** 和 **E-T** 结构如图 1 所示。

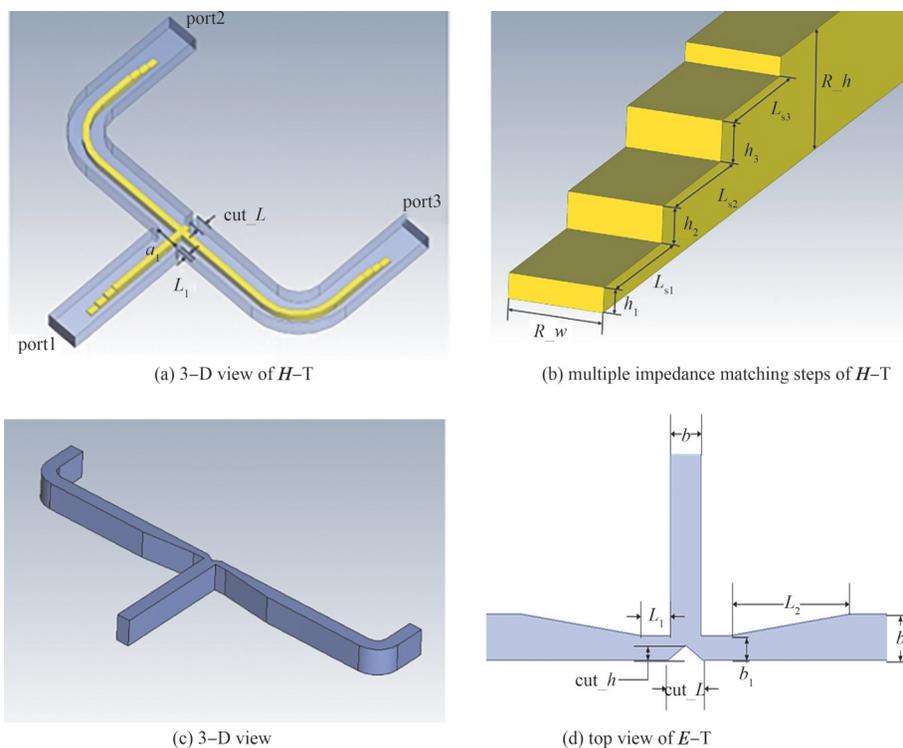


Fig.1 Schematic of **H-T** and **E-T**  
图 1 **H-T** 和 **E-T** 结构图

根据微波网络理论<sup>[10]</sup>，**ABCD** 矩阵适用于表征 2 个或多个二端口网络级联的情况，如图 2 所示。

根据二端口网络显示的总电压和总电流定义 **ABCD** 矩阵：

$$\begin{cases} U_1 = AU_2 + BI_2 \\ I_1 = CU_2 + DI_2 \end{cases} \quad (1)$$

写成矩阵形式即为：

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

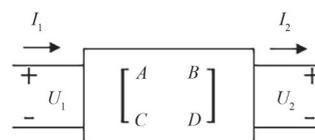


Fig.2 Two-port network  
图 2 二端口网络

以  $ABCD$  矩阵表征  $H-T$  的各组成部分, 具体框图如图 3 所示。

$H-T$  从端口 1 到端口 2 总的  $ABCD$  矩阵, 即  $ABCD_H$  为:

$$ABCD_H = ABCD_0 \times ABCD_m \times ABCD_s \times ABCD_0 \quad (3)$$

$ABCD_H$  由 4 个级联的  $ABCD$  矩阵组成, 其中  $ABCD_0$  对应传输线的输入输出端口,  $ABCD_m$  对应阻抗变换结构,  $ABCD_s$  对应输出并联端口。在 T 型结处, 由于  $H-T$  的输出端口为并联端口, 设每个端口的电压与电流分别为  $U_n$  与  $I_n$ , 根据电压电流关系<sup>[10]</sup>:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = ABCD_s \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在近似无耗的条件下,  $ABCD_0$  可表示为<sup>[11]</sup>:

$$ABCD_0 = \begin{bmatrix} \cos \theta & jZ_0 \sin \theta \\ j \sin \theta / Z_0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $\theta$  为传输线的电长度;  $Z_0$  为传输线的特性阻抗。

阻抗匹配结构可等效为一个并联电纳  $jB$ , 其  $ABCD$  矩阵  $ABCD_m$  表示如下:

$$ABCD_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过  $ABCD$  矩阵与散射参数矩阵的转换, 可得到散射参数  $S$  矩阵<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{(A+B/Z_0) - (CZ_0+D)}{A+B/Z_0+CZ_0+D} \\ S_{12} = \frac{2(AD-BC)}{A+B/Z_0+CZ_0+D} \\ S_{21} = \frac{2}{A+B/Z_0+CZ_0+D} \\ S_{22} = \frac{(B/Z_0+D) - (A+CZ_0)}{A+B/Z_0+CZ_0+D} \end{cases} \quad (7)$$

对于 T 型结这种三端口无源互易网络, 不能 3 个端口同时实现无耗、匹配与隔离, 其理想散射参数矩阵为<sup>[13]</sup>:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \mp \frac{1}{2} \\ \pm \frac{1}{\sqrt{2}} & \mp \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将计算得到的散射参数矩阵与理想散射参数矩阵对应, 就可得到关键尺寸参数的数值。值得注意的是, T 型结本身存在一个固有电抗, 但被引入的电调谐结构抵消掉, 故没有用  $ABCD$  矩阵表征。

为实现  $H-T$  的最佳匹配, 对其关键参数进行仿真分析, 见图 4。其中  $a_1$  为输入端口的宽度, 决定了阻抗变换结构等效电纳的数值, 主要对  $ABCD_m$  造成影响;  $cut\_h$  为 T 型结中间金属壁的长度, 在合适的取值下可抵消其固有电纳的影响;  $R\_h$  为脊波导传输线中脊的高度,  $R\_w$  为脊的宽度, 它们决定了脊波导传输线的特性阻抗, 主要对  $ABCD_0$  造成影响, 考虑到加工的难易程度, 脊的宽度和高度的初始尺寸都选择为 0.5 mm。

从图 4 中可以看出, 随着  $a_1$  的增大,  $H-T$  的低频回波损耗增大, 高频回波损耗轻微减小;  $R\_w$  对于回波损耗的变化趋势与  $a_1$  相似;  $cut\_h$  与  $R\_h$  对于  $H-T$  的整个频带都有影响。最终经过优化的各个参数取值见表 1。

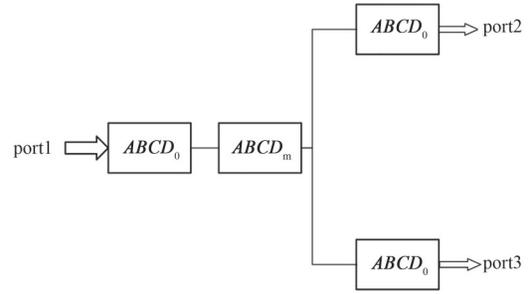


Fig.3  $ABCD$  matrices of each part of  $H-T$   
图 3  $H-T$  各组成部分的  $ABCD$  矩阵

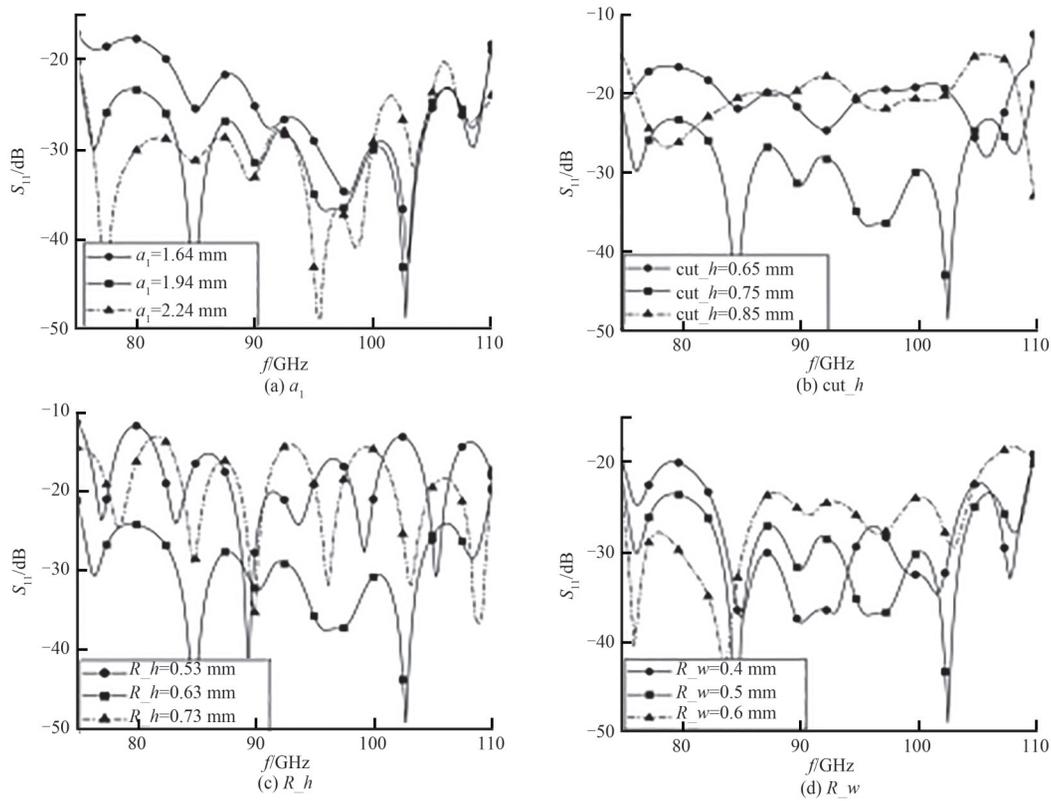


Fig.4 Parameter sweep results of  $H-T$

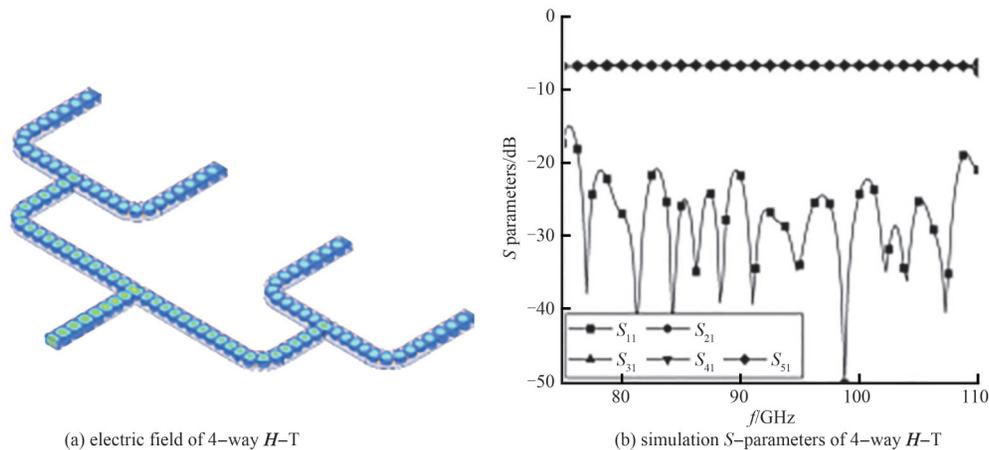
图 4  $H-T$  参数扫描结果

表 1  $H-T$  尺寸(单位:mm)

Table 1 Size of  $H-T$ (unit:mm)

parameter	size	parameter	size
$a_1$	1.94	$h_1$	0.13
cut_h	0.75	$LS_1$	0.76
$R_h$	0.63	$h_2$	0.19
$R_w$	0.50	$LS_2$	0.83
$h_3$	0.21	$LS_3$	0.80

以优化好的  $H-T$  为基本单元，组合成 4 路  $H-T$  结构，其电场分布及仿真结果见图 5。在整个 W 波段范围内，回波损耗优于 15 dB，插入损耗低于 0.5 dB，并且在 76.5~108 GHz 范围内，回波损耗优于 20 dB。



(a) electric field of 4-way  $H-T$

(b) simulation  $S$ -parameters of 4-way  $H-T$

Fig.5 Electric field and simulation  $S$ -parameters of 4-way  $H-T$

图 5 4 路  $H-T$  的电场分布及  $S$  参数仿真结果

对于  $E$  面 T 型结 ( $E$ -T), 引入渐变式过渡即可在整个 W 波段实现较好的匹配效果。采用  $H$ -T 同样的分析方法对  $E$ -T 进行优化, 然后将其作为基本单元, 即可实现 8 路  $E$ -T, 其电场分布及仿真结果见图 6。在整个 W 波段范围内, 回波损耗优于 17 dB, 插入损耗低于 0.5 dB, 并且在 75~107 GHz 范围内, 回波损耗优于 20 dB。

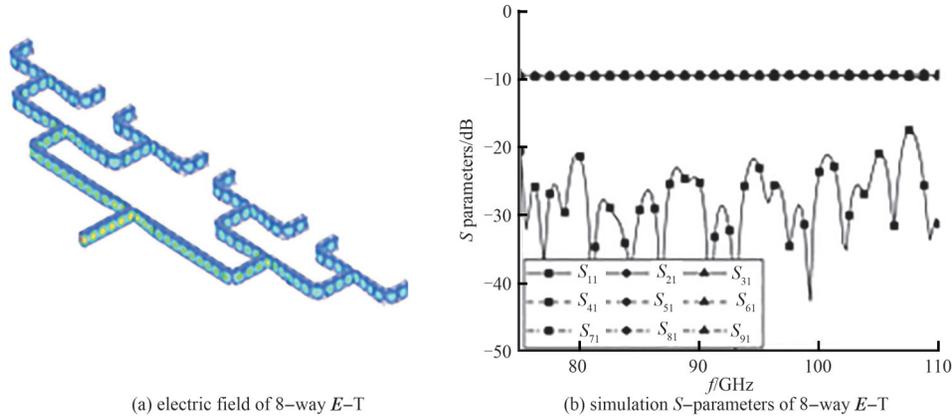


Fig.6 Electric field and simulation  $S$ -parameters of 8-way  $E$ -T

图6 8路  $E$ -T 的电场分布及  $S$  参数仿真结果

表2  $E$ -T 尺寸(单位:mm)

Table2 Size of  $E$ -T(unit:mm)

parameter	size	parameter	size
$b_1$	0.68	$L_1$	1.1
cut $h$	0.40	$L_2$	5.0
cut $L$	1.42		

## 2 加工测试与分析

以 4 路  $H$ -T 和 8 路  $E$ -T 作为单元, 可以实现 32 路功率合成器。采用背靠背测试法进行测试, 如图 7 所示, 左右两侧各有一个 4 路  $H$ -T, 通过中间 4 个 8 路  $E$ -T 背靠背结构连接在一起, 组成 32 路功率合成器背靠背结构。测试采用 KEYSIGHT PNA-X N5247A 矢量网络分析仪, 并采用 W 波段扩频模块 FEV-10-TR-0005, 测试端口为 WR-10 标准矩形波导(工作频率为 75~110 GHz)。



Fig.7 Measurement environment

图7 测试环境

图 8 为 32 路功率合成器背靠背结构仿真与测试结果, 图中 PEC 为理想电导体 (Perfect Electrical Conductor, PEC), 在 W 波段全频段内, 仿真得到的回波损耗优于 15.8 dB, 实测结果优于 15 dB, 两者整体吻合较好; 仿真结果的平均插入损耗为 1.2 dB, 实测的平均插入损耗为 2.1 dB, 计算得到的效率大于 78.4%。仿真与测试结果存在微小差距, 这是由于加工误差与金属腔体表面粗糙度的影响, 同时装配时不可避免地会存在微小缝隙, 这些因素都会导致损耗增大, 并会对响应的平坦度造成影响。

表 3 为本设计与最新文献中的相似工作对比, 本文设计的 W 波段功率合成器具有更多合成路径、更宽频带, 加工复杂度更低, 且每条合成路径引入的效率损耗最小。

表3 太赫兹频段功率合成器性能对比

Table3 Comparison of performances among related power combiners

	frequency band/GHz	fractional bandwidth/%	paths	return loss /dB	efficiency/%	efficiency loss per path/%	complexity of fabrication
[13]	85~100	16.2	12	14	89.5	0.96	difficult
[14]	90~96	7.0	14	20	80.0	1.43	difficult
[15]	88~100	13.0	5	20	86.0	2.80	medium
this work	75~110	38.0	32	15	78.4	0.68	easy

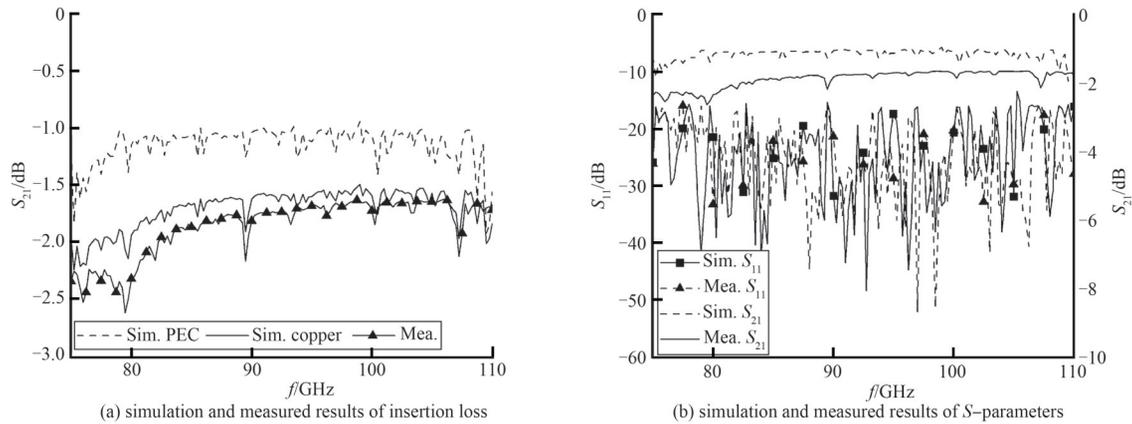


Fig.8 Simulation and measured  $S$ -parameters of back-to-back 32-way power combiner  
图 8 32 路功率合成器背靠背结构仿真与实测  $S$  参数

### 3 结论

本文设计并实现了一种 W 波段 32 路宽带高效率功率合成器，克服了 T 型结级联形式的多路功率合成器尺寸过大的缺点，引入脊波导结构来拓展多路合成带宽，设计多节阻抗匹配阶梯和渐变式过渡以改善匹配。实测结果表明，背靠背结构在整个 W 波段内的回波损耗优于 15 dB，插入损耗低于 2.1 dB，合成效率大于 78.4%。该功率合成器具有结构简单、全波导带宽、高效率的特点。此外，本文提出的设计方法可应用于任何频段的多路功率合成器设计，针对高功率场景具有很好的应用价值。

#### 参考文献：

- [ 1 ] MA Jianguo. From MHz to THz: systems and applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022,70(3):1459–1460. doi:10.1109/TMTT.2022.3151504.
- [ 2 ] CHATTOPADHYAY G. Technology, capabilities, and performance of low power terahertz sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1): 33–53. doi:10.1109/TTHZ.2011.2159561.
- [ 3 ] ZHANG Tianyu, CHE Wenquan, CHEN Haidong, et al. A compact four-way dual-band power divider using lumped elements[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015,25(2):94–96. doi:10.1109/LMWC.2014.2382681.
- [ 4 ] GOMAA W, SMITH R L, ESMAEILSABZALI H, et al. Terahertz power divider using symmetric CPS transmission line on a thin membrane[J]. IEEE Access, 2020(8):214425–214433. doi:10.1109/ACCESS.2020.3040986.
- [ 5 ] WANG Jie, ZHAO Yun, DING Jiangqiao.  $H$ -plane waveguide in-phase power divider/combiner with high isolation over the WR-3 band[J]. IEEE Access, 2021(9):22232–22238. doi:10.1109/ACCESS.2021.3056475.
- [ 6 ] ZHU Qingxin, MO Dayi, WU Qiong. An isolated radial power divider via circular waveguide  $TE_{01}$ -mode transducer[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015,63(12):3988–3996. doi:10.1109/TMTT.2015.2495204.
- [ 7 ] MONTEJO-GARAI J R, RUIZ-CRUZ J A, REBOLLAR J M. A 10-way power divider based on a transducer and a radial junction operating in the circular  $TM_{01}$  mode[J]. IEEE Access, 2019(7):127353–127361. doi:10.1109/ACCESS.2019.2939291.
- [ 8 ] FAHMI M M, RUIZ-CRUZ J A, MANSOUR R R. Design of ridge waveguide radial combiners[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022,70(1):895–906. doi:10.1109/TMTT.2021.3120732.
- [ 9 ] CHEN T S. Calculation of the parameters of ridge waveguides[J]. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1957, 5(1):12–17. doi:10.1109/TMTT.1957.1125084.
- [10] POZAR D M. Microwave Engineering[M]. 4th ed. Hoboken, USA: Wiley, 2011.
- [11] PAUL C R. Analysis of multiconductor transmission lines[M]. 2nd ed. Hoboken, USA: Wiley-IEEE Press, 2008.
- [12] FRICKEY D A. Conversions between  $S, Z, Y, H, ABCD$ , and  $T$  parameters which are valid for complex source and load impedances [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994,42(2):205–211. doi:10.1109/22.275248.
- [13] DANG Zhang, ZHU Haifan, HUANG Jian, et al. A high-efficiency W-band power combiner based on the  $TM_{01}$  mode in a circular waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(4): 2077–2086. doi: 10.1109/TMTT. 2021. 3135410.
- [14] ZHAN Jie, ZHAN Mingzhou, WANG Donghe. W-band radial power combiner based on circularly polarized  $TE_{11}$  mode[C]// 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium(IWS). Guangzhou, China: IEEE, 2019: 1–3. doi: 10.1109/IEEE-IWS. 2019.

8803868.

- [15] MONTEJO-GARAI J R, RUIZ-CRUZ J A, REBOLLAR J M. 5-way radial power combiner at W-band by stacked waveguide micromachining[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018(905):91-95. doi:10.1016/j.nima.2018.07.031.

#### 作者简介:

高 港(1997-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹收发前端系统设计、太赫兹无源器件、电磁带隙结构、太赫兹先进封装. email:3120215372@bit.edu.cn.

周梓乔(1997-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹无源器件、太赫兹 MMIC 封装、太赫兹接收机前端系统设计.

王新悦(1998-), 女, 硕士, 主要研究方向为太赫兹龙勃透镜天线、太赫兹天线封装.

张李迪(1998-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹滤波器设计、太赫兹 MMIC 电路设计、太赫兹 MMIC 封装.

于伟华(1978-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为毫米波和太赫兹有源 MMIC 设计、太赫兹 MMIC 封装、太赫兹通信.

单 琪(2001-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹功率合成技术、太赫兹有源功率合成放大.

(上接第 131 页)

- [20] RAMACHANDRAN R, RAVICHANDRAN G, RAVEENDRAN A. Evaluation of dimensionality reduction techniques for big data[C]// 2020 Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication(ICCMC). Erode, India: IEEE, 2020:226-231. doi:10.1109/ICCMC48092.2020.ICCMC-00043.
- [21] XIA Zhiming, CHEN Yang, XU Chen. Multiview PCA: a methodology of feature extraction and dimension reduction for high-order data[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(10):11068-11080. doi:10.1109/TCYB.2021.3106485.
- [22] PAN Yi, ZHANG Tianqi, ZHANG Gang, et al. A novel acquisition algorithm based on PMF-apFFT for BOC modulated signals[J]. IEEE Access, 2019(7):46686-46694. doi:10.1109/ACCESS.2019.2909787.
- [23] HNATTI J H J. On the threshold setting principles in code acquisition of DS-SS signals[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(1):62-72. doi:10.1109/49.821719.
- [24] GEIGER B C, VOGEL C, SOUDAN M. Comparison between ratio detection and threshold comparison for GNSS acquisition[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2):1772-1779. doi:10.1109/TAES.2012.6178098.
- [25] ATHUL-VIJAY M P, KANAGALAKSHMI S, SUBODH RAJ M S, et al. Hand gesture recognition system using modified SVM and hybrid ensemble classifier[C]// 2021 International Conference on Intelligent Technologies(CONIT). Hubli, India: IEEE, 2021:1-6. doi:10.1109/CONIT51480.2021.9498381.
- [26] 贾彬彬, 刘俊莹. 基于对率回归的导航信号捕获中的峰值检测方法[J]. 计算技术与自动化, 2019, 38(1):43-48. (JIA Binbin, LIU Junying. Peak detection in acquisition of satellite navigation signals based on logistic regression[J]. Computing Technology and Automation, 2019, 38(1):43-48.) doi:10.16339/j.cnki.jsjsyzdh.201901009.

#### 作者简介:

刘兆博(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航. email:2586173617@qq.com.

辜晓波(1987-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为集群自组网技术、卫星导航.

邱泽扬(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航.

王名为(1989-), 男, 在读博士研究生, 工程师, 主要研究方向为卫星导航、信号与系统.