



·高功率微波技术·

基于同轴波导的 1 分 16 功分器的设计与实验*

杨梓晗¹, 张 军², 张 强¹, 周科霖¹, 冶 玲¹, 赵立山¹

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 国防科技大学 理学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对高功率固态源多路功率分配技术的需要, 设计并研究了一种基于同轴波导的多路功率分配器件。通过分析同轴波导传输特性与阻抗匹配理论, 利用电磁仿真软件设计了一种 S 波段 1 分 16 功分器模型, 并加工出实物进行实验测试。实验结果表明: 该功分器在 2.28~2.86 GHz, 相对带宽约 23% 频率范围内, 输入端反射系数 $S_{11} \leq -15$ dB; 在 2.37~2.57 GHz, 相对带宽约 8.1% 频率范围内, 输入端反射系数 $S_{11} \leq -20$ dB; 输出幅度不平衡度 ± 0.1 dB, 相位不平衡度 $\pm 5^\circ$ 。该功分器满足输出幅度与相位一致性要求, 可应用于 S 波段百瓦级连续波功率分配。

关键词: 功分器; 合路器; 连续波; 高功率微波; 同轴波导

中图分类号: TN81

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220275

Design and experiment of 1:16 power divider model based on coaxial waveguide

Yang Zihan¹, Zhang Jun², Zhang Qiang¹, Zhou Kelin¹, Ye ling¹, Zhao Lishan¹

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To meet the needs of multi-way power distribution applied to high-power solid-state sources, a multi-way power distribution device based on coaxial waveguide is designed and studied. By analyzing the transmission characteristics of coaxial waveguides and by applying the theory of impedance matching, an S-band 1:16 power divider is designed by electromagnetic simulation software. Moreover, the device is machined for testing. Experimental results show that the reflection coefficient S_{11} of the power divider is less than -15 dB in the range of 2.28 GHz to 2.86 GHz (the relative bandwidth is 23%). In the range of 2.37 GHz to 2.57 GHz (the relative bandwidth is 8.1%), the reflection coefficient S_{11} of the input port is less than -20 dB, with the amplitude imbalance ± 0.1 dB and phase imbalance $\pm 5^\circ$ at the output ports. To sum up, the power divider meets the amplitude and phase consistency requirements at output ports and can be applied to S-band hundred-watt continuous wave power distribution.

Key words: power divider, power combiner, continuous wave, high power microwave, coaxial waveguide

大功率微波系统在工业中的应用十分广泛, 其中存在大量的功率分配的需求^[1-2]。在固态高功率微波技术中, 单个固态器件输出功率由于受自身半导体物理特性的影响以及加工工艺、散热、阻抗匹配等问题限制, 常常达不到高功率应用的要求^[3]。为了解决这一问题, 通常采用多个固态器件进行功率分配、放大及合成的方法, 来获得高功率输出^[4]。

功分器, 是一种将一路微波信号分成多路微波信号的微波无源器件, 在固态功率分配技术领域有着十分重要的地位。基于微带传输线型的功分器, 如 Wilkinson 功分器, 通常为一分二树状结构, 在实现多路功率分配中需采用级联的方式, 不可避免地会造成功率分配效率低、功率容量小等缺陷^[5-6]; 同时, 这种结构散热性能差, 不适用于大功率连续波系统中。而基于同轴波导的功分器, 有效地减小了介质损耗; 其主要传输模式为 TEM 模, 具有圆柱对称性, 有利于实现多路等幅同相输出; 此外, 金属波导型器件, 具有功率容量高、散热性能好等特点, 有利于实现

* 收稿日期: 2022-09-20; 修订日期: 2022-11-30

基金项目: 国防科技大学前沿交叉学科学院重大基础自主研究项目

联系方式: 杨梓晗, 15234534500@163.com。

通信作者: 赵立山, lishanzhao@nudt.edu.cn。

百 W 级连续波功率分配^[7-9]。

近年来,已有学者做过相关方面的研究,国防科技大学许亮^[10]等人设计了双层宽带径向线波导多路功分器,在 1.64~3.6 GHz 频率范围内,电压驻波比小于 2,并进行了高功率脉冲功率容量的测试。西南交通大学李相强^[11]等人设计了多路径向线功率分配器,实现了在 2.55~3.15 GHz 频率范围内,插入损耗小于 0.3 dB,电压驻波比小于 1.4,输出不平衡度 ± 0.5 dB。现有研究侧重于对大功率微波脉冲系统的应用,未对在大功率连续波系统中的应用进行研究;且结构复杂、加工难度高,不可避免地增加了插入损耗,不适用于大功率连续波系统中。基于此,本文提出了一种以同轴为输入、输出方式的多路功分器模型,具有传输损耗更小、结构简单、散热性能好的优点,并具有较高的功率容量,可应用于百 W 级连续波功率分配领域。

1 功分器设计思想与基本结构

该模型是基于同轴波导的微波无源器件。同轴波导具有结构简单、带宽性能好、功率容量高的特点。功分器同轴波导一端为输入端,另一端为短路面。为了使各个输出端口等幅同相输出,利用同轴波导圆柱对称性以及其场分布沿轴线对称的特点,将 16 个输出端口沿圆周阵列呈辐射状均匀排列在同轴波导外侧。此外,为了减少输出端与同轴波导处不连续性引起的阻抗失配,同轴波导内导体处设计了阶梯型金属圆盘结构。最后,通过优化同轴波导的尺寸大小以及阶梯型金属圆盘结构参数,来实现功分器 16 路等幅同相输出。

16 路功率分配器的模型如图 1 所示。图 1(a)为功分器三维结构视图,图 1(b)为功分器结构剖视图。功分器由输入端、锥形同轴过渡段、阶梯型金属圆盘过渡段、底部短路面和 16 个输出端组成。该功分器正常工作时,微波由 1 端口输入,通过锥形同轴与阶梯型金属圆盘过渡段,从 2~17 端口输出。

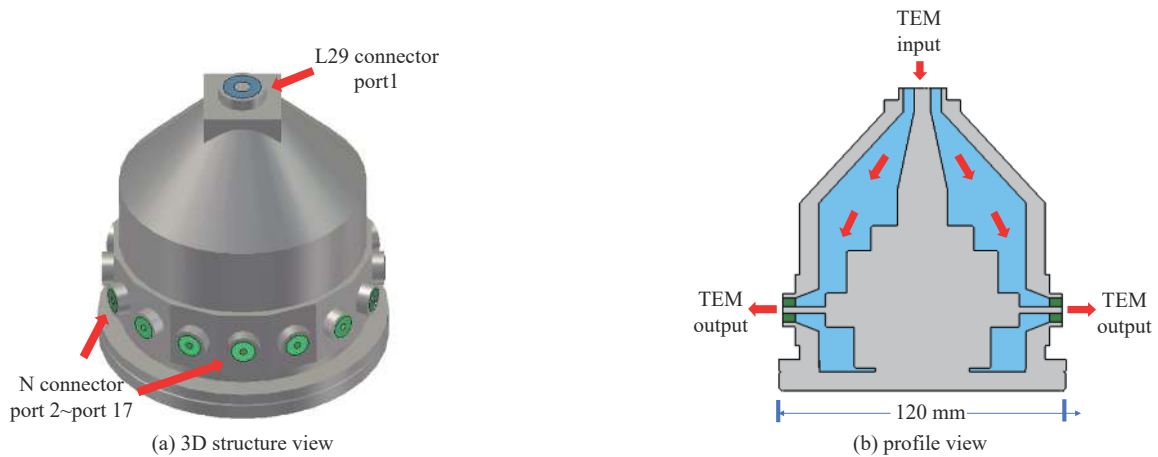


Fig. 1 Basic structure of power divider

图 1 功分器的基本结构

该模型以 L29 型 (17/6) 射频同轴接头为输入端, N 型 (10/3) 射频同轴接头为输出端,所有端口通过射频同轴接头与同轴电缆连接。这种连接方式可以使功分器在满足一定带宽的同时,具备较高的功率容量。同轴线的阻抗表达式为^[12-13]

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (1)$$

式中: a 为同轴线内导体半径, b 为外导体半径, ϵ_r 为同轴线填充介质的介电常数。

同轴线中电磁波除 TEM 模外,还存在其他模式的电磁波。为了使同轴线工作在 TEM 模式,可以通过调整同轴线的内外导体半径 a , b , 抑制 TE 模和 TM 模等模式。同轴线工作在 TEM 模式下,内导体半径 a 与外导体半径 b 需满足以下条件^[12-13]

$$\lambda_{\min} > \pi (a + b) \quad (2)$$

功分器输入端连接锥形同轴波导过渡段。输入端输入阻抗为 50Ω , 通过优化设计过渡段的尺寸参数,可以实现输入端阻抗到阶梯型金属圆盘处同轴波导阻抗的匹配,减小因失配带来的反射。

阶梯型金属圆盘过渡段与锥形同轴过渡段波导、底部短路面连接,由 4 层圆盘金属组成。为了减小输入端与输出端的不连续性,参照切比雪夫阻抗变换器的原理,设计了阶梯型金属圆盘过渡结构^[14-15]。该结构是设计的关

键, 主要实现阻抗匹配、增大带宽的目的。功分器结构参数如图2所示。

在等效电路模型中, 16路输出端传输线的特征阻抗等效于16个阻抗为 $50\ \Omega$ 的负载并联在传输线终端。因此, 为了减小反射, 需使16路并联分支等效阻抗与总线特征阻抗匹配。16路输出端所在平面处的同轴波导外径为 R , 内径为 r , 其特征阻抗为 $(60/\sqrt{\epsilon_r})\ln(R/R_1)$ 。而16路输出端并联等效阻抗近似为 $50/16\ \Omega = 3.125\ \Omega$ 。由上分析, 须有 $(60/\sqrt{\epsilon_r})\ln(R/R_1) \approx 3.125$ 。

对于波导型功分器, 为了减小大功率系统中的能量泄露, 通常选择短路面而非开路面。该功分器基于传输线理论中 $\lambda/4$ 短路线等效于开路的原理, 使同轴波导底部到输出端口所在平面的距离 $H_4 + H_1/2$ 近似等于 $\lambda/4$ 。这样, 电流几乎不流过同轴波导底部, 底部短路面处电场十分微弱。此外, 为了实现短路面与输出端的过渡, 设计了一层高度为 H_4 , 半径为 R_4 的金属圆盘结构。在仿真阶段, 也可以通过适当调节 R_4 与 H_4 的值, 完成短路面的设计。

为保证结构对称性, 阶梯型金属圆台与输入端同轴波导处于同一中轴线上。同时, 对阶梯型圆盘金属过渡段进行倒角处理, 使得内部场分布均匀, 利于提高功率容量。第1层到第4层圆盘半径和高度依次为: R_1, R_2, R_3, R_4 ; H_1, H_2, H_3, H_4 , 如图2所示。最后, 利用有限元电磁仿真软件, 对该结构进行优化, 得到合适的参数。

功分器输出端N型接头及过渡结构($R_{N-i}=5\ \text{mm}$, $R_{N-o}=1.5\ \text{mm}$, 介质介电常数为 $\epsilon_r = 2.02$), 如图3所示。

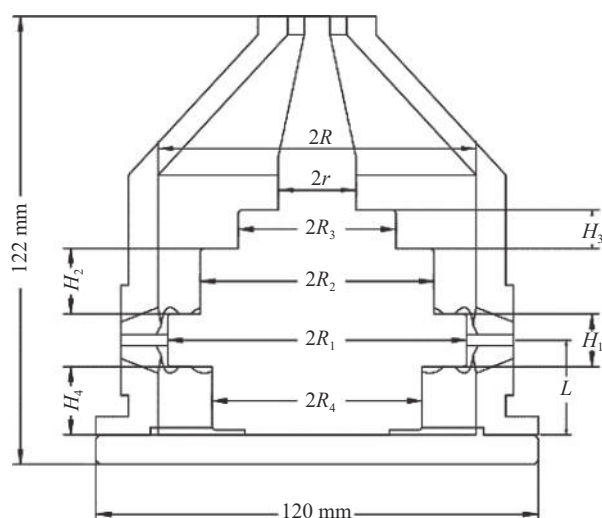


Fig. 2 Structural parameters of power divider
图2 功分器的结构参数

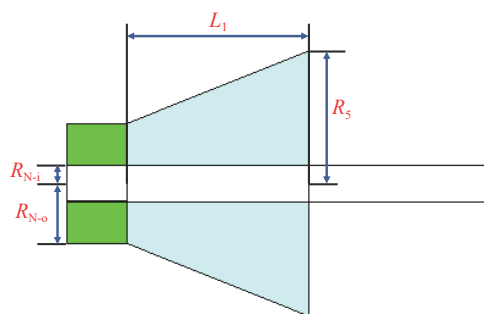
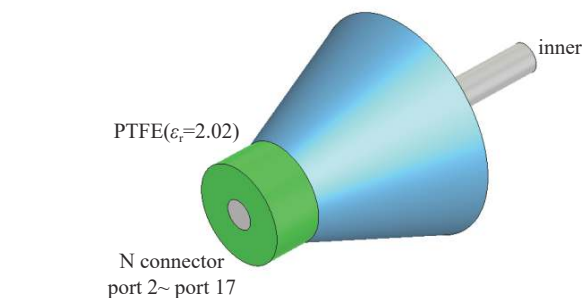


Fig. 3 Designed N-type connector model
图3 输入端N型接头模型

16个输出端口沿径向呈辐射状, 均匀排列在同轴波导外导体侧面。输出端N型射频同轴接头内导体沿圆柱径向延伸至阶梯型金属圆盘过渡结构第1层圆盘中心位置。相比于其他型号的接头, N系列射频同轴接头具有结构紧凑、稳定性好的特点。16个输出端口与同轴波导间通过圆台过渡段连接, 圆台上底面半径为 R_{N-o} 、下底面半径为 R_5 , 高为 L_1 , 如图3所示。这种过渡结构可以增加输出端口之间的隔离度。

当端口1注入0.5 W功率时, 仿真得到的电场分布如图4所示。从图中可以看出, 金属波导中场强最大点处的电场强度幅值为2412 V/m。我们取介质表面击穿场强约为5 MV/m经典击穿阈值来计算, 该功分器理论上至少可以承受MW量级的脉冲功率。

本文利用有限元电磁仿真软件, 对各结构参数进行了优化。其S参数仿真结果为: 在2.28~2.82 GHz频率范围内, $S_{11} \leq -15\ \text{dB}$ 。此外, 由于微波传输模式与功分器结构的高度对称性, 理论上可以实现16路等幅同相输出。

2 实验测量

设计加工的输出端N型接头如图5所示, 该接头的内导体延伸, 可插入功分器内部阶梯型圆盘金属过渡段中。功分器实物如图6所示。

功分器由6061铝合金制成, 6061铝合金具有优良的电特性。波导型器件相比于板级器件, 具有功率容量高、

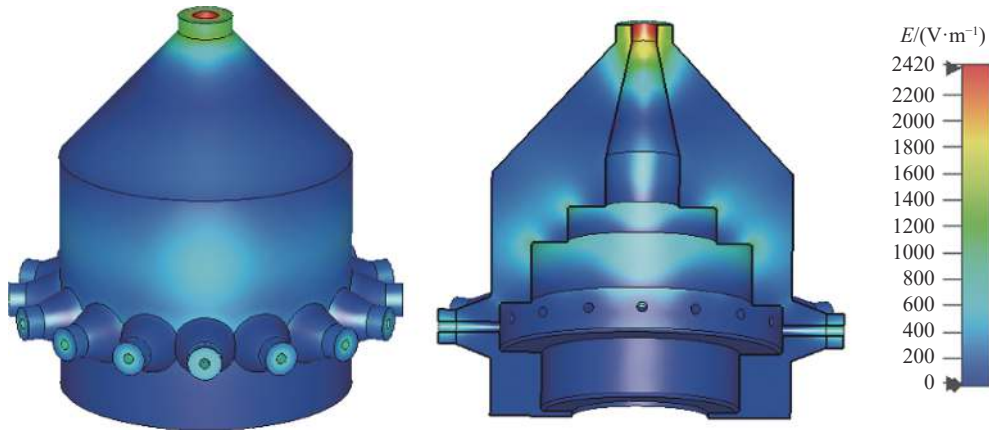


Fig. 4 Electric field distribution of power divider

图4 功分器电场分布



Fig. 5 Designed N-type connector

图5 N型接头实物



Fig. 6 Machined power divider

图6 功分器实物

传输损耗小、稳定性高等特点。其传输损耗主要来源是由趋肤效应引起的电损耗。为了降低损耗,除了选择合适的材料外,在设计时通常考虑将结构简单化,降低加工难度,采用一体加工的方式,也有利于减小大功率条件下的磁泄露。同时,各零件连接处需保持良好的电接触。这样便可以极大降低其传输损耗。

实验中,使用双端口矢量网络分析仪对功分器进行测试。功分器的输入端(L29型)连接L29-N转接头,与矢量网络分析仪1端口连接。功分器2~17端口连接N型射频同轴接头,待测端口连接矢量网络分析仪2端口,其余端口连接标准 $50\ \Omega$ 匹配负载。通过依次测量端口2到端口17的 S 传输参数与相位,来测试功分器的传输特性。

功分器 S 参数仿真与实测结果如图7所示。考虑到功分器的圆柱对称性,其各端口仿真传输系数与传输相位是一致的,所以图中给出了反射系数 S_{11} 与传输系数 S_{21} 的仿真结果。对于实测结果,由于各端口传输系数一致程度高,为了使图示清晰明了,选取两个典型代表值 S_{21} 与 $S_{10,1}$ 。实测结果显示,在 $2.28\sim 2.86\ \text{GHz}$ 频率范围内(相对带宽约23%),输入端反射系数小于 $-15\ \text{dB}$;在 $2.37\sim 2.57\ \text{GHz}$ 频率范围内(相对带宽约8.1%),输入端反射系数小于 $-20\ \text{dB}$ 。表明所设计的功分器16个输出端口 S 传输参数保持在一个稳定的水平,可以实现等幅输出。功分器输出相位特性曲线如图8所示,可以看出,功分器各输出端口传输相位不平衡度约为 $\pm 5^\circ$ 。实测结果表明,该功分器可以至少在 $2.37\sim 2.57\ \text{GHz}$ 频率范围内,实现多路等幅同相输出。

比较实测与仿真结果,可以看出 S_{11} 存在一定误差,可能是由于微小加工误差及16个输出端接头内导体与阶梯型金属圆盘连接处存在缝隙引起的,在仿真中是难以模拟的。但总体来看,该误差对传输参数影响不大,实验结果验证了设计的可行性。

接着,根据实际工程应用的需要,在 $2.45\ \text{GHz}$ 频点,对功分器16路输出端口的传输系数与传输相位进行了测试,测试结果如表1所示。由表1可知,功分器的 S 传输系数,主要集中在 $-12.0\sim -12.1\ \text{dB}$ 范围内。个别端口,如 $S_{12,1}$ 偏大,但此差值对整体的传输性能影响并不大。输出幅度不平衡度 $\pm 0.1\ \text{dB}$,输出相位不平衡度为 $\pm 5^\circ$ 。实验结

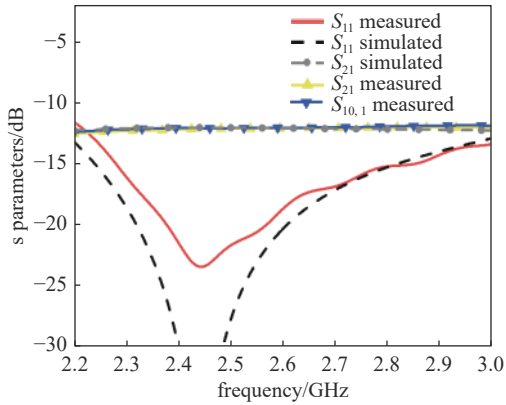


Fig. 7 Return loss (S_{11}) and transmission coefficients ($S_{n,1}$)
图7 反射损耗与传输系数

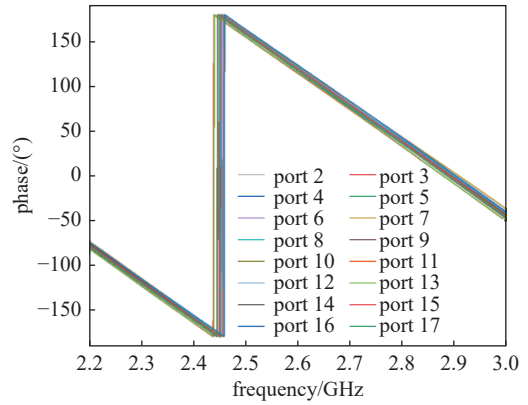


Fig. 8 Measured phase at output ports
图8 输出相位测量结果

表1 各输出端口的传输系数和相位 (2.45 GHz)

Table 1 Transmission coefficients and phase at output port (2.45 GHz)

port number n	transmission coefficients $S_{n,1}/\text{dB}$	phase/ $^\circ$	port number n	transmission coefficients $S_{n,1}/\text{dB}$	phase/ $^\circ$
2	-12.07	179.9	10	-12.03	178.6
3	-12.14	-179.9	11	-12.00	176.1
4	-12.00	178.7	12	-12.30	-179.9
5	-12.01	-177.4	13	-12.03	175.7
6	-12.00	-177.5	14	-12.11	178.1
7	-12.08	-176.7	15	-12.10	180.0
8	-12.03	-178.6	16	-12.06	-175.9
9	-12.04	-179.5	17	-12.07	178.8

果进一步验证, 在 2.28~2.86 GHz 频率范围内(相对带宽约 23%), 该功分器可以实现良好的 16 路等幅同相功率分配。

之后, 将功分器应用到大功率连续波系统中, 对其性能稳定性与功率容量进行了实验测试, 实验连接如图 9 所示。

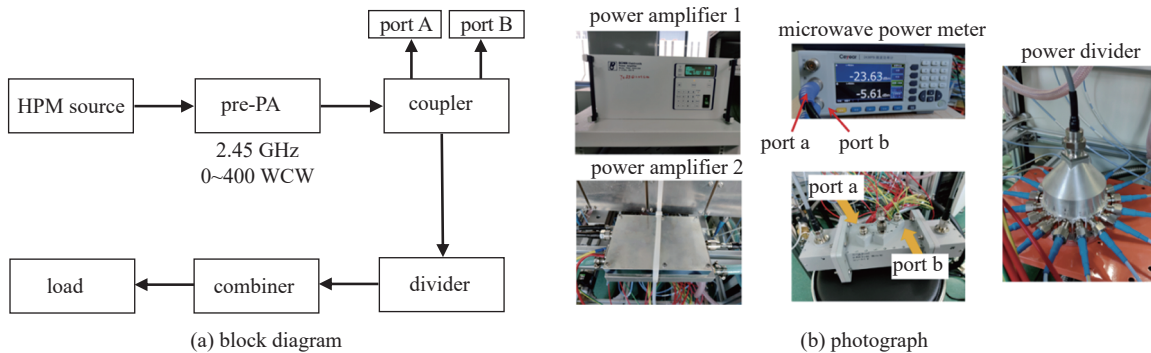


Fig. 9 Experimental setup
图9 实验设计

该实验中, 高功率固态源提供微波输入, 连接前级放大器, 可产生 2.45 GHz, 0~400 W 的连续波。前级放大器连接耦合器, 耦合器 Port A 耦合出功分器的输入功率, Port B 耦合出功分器的反射功率。Port A 与 Port B 分别连接微波功率计进行读数, 通过耦合值计算得出功分器输入功率与反射功率的实值。功分器通过同轴线缆连接 16 合 1 合路器, 微波在合路器中合成一路, 并连接负载吸收。同时, 在负载端口进行耦合功率测量, 监测从合路器输出的微波功率, 确保整个系统稳定工作。每一功率等级测试的系统工作时间不少于 120 min。测试结果见表 2。

表 2 给出了功分器在大功率连续波系统中, 输入功率与反射功率的关系。从表 2 可以看出, 该功分器可以承受至少 385 W 的连续波微波, 且其反射功率一直处于一个很低的水平, 通过计算得出的反射系数优于 -20 dB。实验结果表明, 该功分器可适用于百 W 级功率分配, 满足实验应用与设计的要求, 并且具有应用于更高功率级别的潜质。

表 2 功分器连续波条件下输入功率与反射功率的关系 (2.45 GHz)

Table 2 Measured input power and reflected power of power divider (2.45 GHz, CW)

input power/W	reflected power/W	input power/W	reflected power/W
66	1.1	201	3.6
77	1.3	238	4.3
92	1.5	277	5.1
107	1.8	325	5.9
127	2.2	354	6.7
147	2.5	385	7.5
175	3.0		

3 结 论

本文通过理论设计、电磁仿真提出了一种基于同轴波导的 1 分 16 功分器模型, 并加工出实物进行实验测试。研究结果表明, 该功分器在一定带宽内, 输出幅度不平衡度 ± 0.1 dB, 输出相位不平衡度为 $\pm 5^\circ$, 可以实现 16 路等幅同相功率分配, 具有功率容量高、微波损耗小、结构简单易实现等优点。此外, 对功分器进行了大功率连续波功率分配的测试, 结果表明该功分器可以在至少 385 W 连续波条件下实现低损耗功率分配且长时间稳定工作。该功分器不仅可以满足百 W 级大功率连续波功率分配, 还具有应用于更高功率级别的潜质。此外, 该功分器还可以拓展到其他路数, 以及利用波长共度效应扩展到其它波段。

参考文献:

- [1] Benford J, Swegle J A, Schamiloğlu E. High power microwaves[M]. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007.
- [2] Benford J. Space applications of high-power microwaves[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(3): 569-581.
- [3] Haddad G I, Trew R J. Microwave solid-state active devices[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2002, 50(3): 760-779.
- [4] 宋开军. 基于波导的微波毫米波空间功率合成技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007: 1-105. (Song Kaijun. The researches on microwave and millimeter-wave spatial power-combining technology based on waveguide[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007: 1-105)
- [5] Wilkinson E J. An N-way hybrid power divider[J]. *IRE Trans. Microwave Theory Tech*, 1960, 8(1): 116-118.
- [6] Nantista C, Tantawi S. A compact, planar, eight-port waveguide power divider/combiner: the cross potent superhybrid[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 2000, 10(12): 520-522.
- [7] Gysel U H. A new n-way power divider/combiner suitable for high-power applications[C]//*IEEE-MTT-S International Microwave Symposium*. 1975.
- [8] Guo L T, Chang C, Huang W H, et al. Compact high-power microwave divider and combiner. [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016(No.2): 24701-24702.
- [9] Shuguang Chen. A radial waveguide power divider for Ka band phased array antennas[A]. 2002 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. (Proceedings ICMMT 2002).
- [10] Xu L, Yuan C, Zhang Q, et al. A double-layer wideband radial-line waveguide power divider/combiner for high-power microwave application[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(8): 84709.
- [11] 李相强, 刘庆想, 张健穹, 等. S波段多路径向线功率分配器的设计与实验[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(07): 1591-1594. (Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhang Jianqiong, et al. Design and experiment of S-band radial-line waveguide power divider[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(07): 1591-1594)
- [12] (美)波扎著. 微波工程[M]. 第3版. 张肇仪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2015. (David M Pozar. *Microwave Engineering*[M]. 3rd ed. Trans. by Zhaoyi Zhang. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015)
- [13] 朱建清, 刘荣, 荣舜连, 等. 电磁波原理与微波工程基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. (Zhu Jianqing, Liu Rong, Rong Shunlian, et al. *Principle of electromagnetic wave and foundation of microwave engineering*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011)
- [14] 顾茂章, 张克潜. 微波技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989. (Gu Maozhang, Zhang Keqian, et al. *Microwave technique*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989)
- [15] 刘琨, 詹铭周, 张勇. 一种用于 3 mm 振荡器的低通阻抗变换器[C]//2009 年全国微波毫米波会议论文集(上册). 北京: 电子工业出版社, 2009: 247-249. (Liu Kun, Zhan Mingzhou, Zhang Yong. A low on-impedance converter for 3mm oscillators[C]//2009 National Conference on Microwave and Millimeter Waves (Volume 1). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 247-249)