

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518062

一种 Ku 频段三路波导功率分配/合成网络*

刘立浩 魏伟 李强

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘要: 为了克服现有三路波导功率分配/合成器的不足,提出一种新型 Ku 频段三路波导功率分配/合成器。该结构由分支波导定向耦合器、共面魔 T、新型 90° 弯波导和波导匹配负载组成。在此基础上,构建了一种 Ku 频段三路波导功率分配/合成网络。采用三维电磁场仿真软件 HFSS 进行了结构建模和优化仿真,制作了样品并进行了测试。测试结果表明在 13.75~14.5 GHz 频率范围内,三路波导功率分配/合成网络传输损耗小于 0.12 dB,回波损耗优于 17 dB。经计算,其合成效率大于 98.6%,是一款性能优良的功率分配/合成网络。

关键词: Ku 频段;三路;功率分配器;功率合成器;分支波导定向耦合器;共面魔 T

中图分类号: TN73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

A Ku-band three-way power dividing/combining network in rectangular waveguide

Liu Lihao Wei Wei Li Qiang

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In order to solve the deficiency of the current three-way power dividers/combiners, a novel Ku-band three-way power divider/combiner in rectangular waveguide was presented, which was composed of a branch waveguide directional coupler, a coplanar magic T, two novel 90° waveguide bends and a waveguide matched load. Based on the power divider/combiner, a Ku-band three-way power dividing/combining network was established. The structure was modeled and optimized using three-dimensional electromagnetic simulation software HFSS. The sample was fabricated and measured. The measured results show that the transmission loss of the network is less than 0.12 dB, the return loss is better than 17 dB between 13.75 GHz and 14.5 GHz. After calculation, the power combination efficiency is greater than 98.6%. The performance of the Ku-band three-way power dividing/combining network is excellent.

Keywords: Ku-band; three-way; power divider; power combiner; branch waveguide directional coupler; coplanar magic T

0 引言

随着全球卫星通信产业的蓬勃发展,对功率放大器^[1-2]大功率、小型化、高效率和高可靠性等要求越来越高。功率放大器芯片的最大输出功率有限,为获得大功率输出,必须对多个芯片进行功率合成。传统的功率合成器主要采用多级二进制(2^n)功率合成方式实现,而在实际工程应用中,二进制功率合成方式存在类似以下不足:采用二路(2^1)合成输出功率不足;采用四路(2^2)合成输出功率余量较大,但芯片数量翻倍导致功耗变大、整机体积增大和成本变高。

针对上述问题,国内外学者对三路波导功率分配/合成器展开了研究。从结构上划分,其大致分为两类:一类是基于波导定向耦合器;一类是基于波导 E-T 结。对于第一类

结构的研究开始于 1994 年,Rebollar 等^[3]基于分支波导定向耦合器提出了分支波导三路功率分配器,对输入功率实现了三路等分,但其相位一致性差;Kumar 等^[4]基于 H 面波导裂缝电桥结构,提出了一种波导三路功分器,其相位一致性也较差;刘玥玲等^[5]基于 H 面波导裂缝电桥结构,设计了一种 K 波段三路合成器,中间支路通过增加波导弯折和长度,使 3 个输出端口相位相等,但 3 个支路的幅度一致性较差;Dang 等^[6]基于 E 面波导定向耦合器和磁耦合波导—微带变换,设计了一种 Ka 频段三路波导功率分配/合成器,取得了良好的指标,其缺点是微带探针的安装误差会影响幅度和相位的一致性。对第二类结构的研究开始于 2012 年,才博等^[7]基于波导 E-T 结设计了一种 Ka 频段三路波导等功率分配器,其结构包括四个波导 T 型结,第一 T

收稿日期:2025-02-12

* 基金项目:国防科技 173 计划技术领域基金(2023-JCJQ-JJ-0494)项目资助

型结为等功率分配器,第二和第三 T 型结为不等功率分配器,第四 T 型结为等功率合成器;莫坤山^[8]设计了一种紧凑型 Ka 波段三路波导功分器,其各支路间隔度较低;陈冠军等^[9]设计了一种类似才博结构的 Ku 频段三路波导等功率分配/合成器,其各支路间的隔离度较低,需要进一步改进;黄薛龙等^[10]将类似结构应用于 Ku 频段 120 W 功放模块的研制中,使用 6 片 30 W 功放芯片合成,输出功率仅有 120~131 W,合成效率约为 70%;Shen 等^[11]将类似结构用于 Q 频段 50 W 功放模块的研制中,构建了二十四路的功率分配/合成网络,合成效率为 76%;卢小娜等^[12]对上述结构进行了改进设计,在 E 面 T 型结中引入匹配端口,构成变异四端口网络,在此基础上提出一种变异一分三波导功分器,并研制了 Ku 频段 500 W 功率放大器。经过理论分析和软件建模仿真,本文发现以上学者基于波导 E-T 结提出的三路波导功率分配/合成器存在以下缺点:3 个输出端口之间的隔离度较差,不足 10 dB;中间输出端口的驻波比很差,回波损耗只有 3 dB 左右,这意味着作为功率合成器使用时,中间端口连接的功放模块一半功率将被反射,导致整机功率合成效率低,而且易造成功放模块的损坏。

为了克服现有技术的不足,本文将分支波导定向耦合器、共面魔 T、新型 90°弯波导和波导匹配负载等结构相结合,设计并制作了一种新型 Ku 频段(13.75~14.5 GHz)三路波导功率分配/合成器,具有结构简单、幅度相位一致性好、插入损耗小、端口驻波好、隔离度高的特点。在此基础上,构建了一种高效的 Ku 频段三路波导功率分配/合成网络。

1 理论分析

1.1 分支波导定向耦合器

分支波导定向耦合器是由两个平行波导和若干耦合分支波导组成,利用经各分支波导耦合得到的分波在各端口所形成的波程差,使之在某一端口同相而叠加,在另一端口反相而抵消,从而构成定向耦合器。分支波导长度及其间距均为中心频率波导波长 λ_g 的 1/4。分支波导定向耦合器结构如图 1 所示,端口 1 为输入端口,端口 2 为直通输出端口,端口 3 为耦合输出端口,端口 4 为隔离端口^[13-15]。

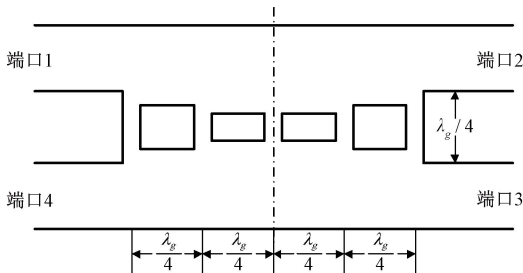


图 1 分支波导定向耦合器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of branch waveguide directional coupler

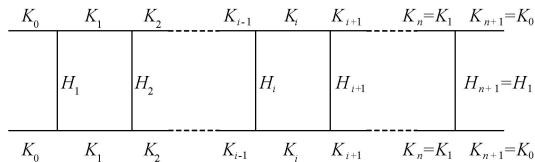


图 2 分支波导定向耦合器导抗示意图

Fig. 2 Immittance diagram of branch waveguide directional coupler

图 2 中,用 K_i 表示主波导的导抗,用 H_i 表示分支波导的导抗。所研制的耦合器属于周期分支波导定向耦合器,其导抗满足下列关系式:

$$K_i = K_0, i = 1, 2, 3, \dots, n + 1 \quad (1)$$

$$H_i = H_2, i = 2, 3, 4, \dots, n \quad (2)$$

$$H_1 = H_{n+1} \quad (3)$$

周期分支波导定向耦合器是对称的,它的主波导导抗各处都是一样的,对应波导结构就是主波导尺寸保持不变;中间部分的分支波导导抗也都是一样的,对应波导结构就是中间部分的分支波导尺寸一样,而最外侧的两个分支波导尺寸不同于中间。故设计这种定向耦合器只要计算出 H_1 和 H_2 就可以了。设在中心频率上定向耦合器的功率耦合系数 C_0^2 (C_0 是电压耦合系数)为:

$$C_0^2 = 10^{-P_3/10} \quad (4)$$

其中, P_3 是端口 3 的耦合功率,单位为 dB。则导抗 H_1 和 H_2 满足下列关系式:

$$S_{n-1}(-H_2) = \begin{cases} \sqrt{1-C_0^2}, n = \text{奇数} \\ C_0, n = \text{偶数} \end{cases} \quad (5)$$

$$H_1 = \left| \frac{|\sqrt{1-S_{n-1}(-H_2)}| - |S_{n-2}(-H_2)|}{S_{n-1}(-H_2)} \right| \quad (6)$$

其中, S_n 是 n 阶第一类切比雪夫多项式。由此公式,只要已知 n 和 C_0^2 ,即可计算出耦合器的各分支波导导抗。主波导和分支波导的宽边尺寸均等于 WR62 波导的宽边尺寸(15.799 mm),分支波导的窄边尺寸为 WR62 波导的窄边尺寸(7.899 mm)乘以归一化导抗值 H_1 和 H_2 。

1.2 共面魔 T

波导魔 T 是一种常见的功率分配/合成器,其缺点是 4 个波导臂位于不同的平面,给模块组装带来不便;另外在较高频段,波导魔 T 的匹配元件(如销钉、膜片等)尺寸变小,加工难度很大。针对以上问题,一些学者对共面魔 T 结构进行了研究,该结构更易于加工和装配^[16]。

共面魔 T 由波导 E-T 结和微带探针组成,通过引入微带探针的方式将波导魔 T 垂直的隔离端移动到水平方向,其结构示意如图 3 所示,其中端口 1 为标准波导口,端口 2 和端口 3 为减低波导口,端口 4 为 50 欧姆微带集总端口。微带探针的作用有两个:一是微带探针头部伸入波导腔体内部,参与 E-T 结的阻抗匹配;二是微带探针将端口 2 和端口 3 的不平衡输入耦合到微带模式,经过微带末端功率电阻负载的吸收,阻断端口 2 和端口 3 之间的信号通路,提高

分支波导定向耦合器的导抗示意图如图 2 所示。

端口 2 和端口 3 之间的隔离度^[17]。

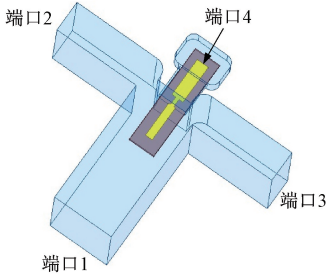


图 3 共面魔 T 结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of coplanar magic T

图 3 中的微带探针采用 Rogers 公司的 RT/duroid 5880 微波介质板制作,介电常数 2.2,耗散因子 0.0009,介质板厚度为 0.508 mm,覆铜层厚度为 0.035 mm。受多种因素影响,厂家不同批次生产的板材介电常数会有一些的差异,可通过文献[18]的方法进行精确测量。微带探针的 50 Ω 微带线末端通过金带连接 50 Ω 功率电阻负载,功率电阻采用四川永星生产的 RFGA110DT-50B-50Ω-J 射频功率型固定电阻器,良好散热的情况下可耐受 50 W 连续波功率。

1.3 新型 90°弯波导

根据结构需要,共面魔 T 的端口 2 和端口 3 既要实现直角拐弯,又要实现减高波导到标准波导的尺寸变换。由于尺寸受限,无法采用波导喇叭渐变结构,因此提出了一种新型 90°弯波导结构,在实现直角拐弯的同时完成波导的尺寸变换,具有插入损耗小和回波损耗优的特点。其结构如图 4 所示,不对称切角的尺寸值可通过三维电磁场仿真软件 HFSS 15 或更高版本软件进行优化仿真得到。

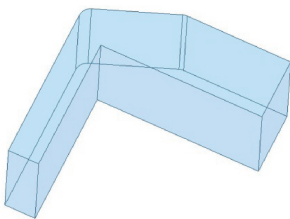


图 4 新型 90°弯波导结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of a novel 90° waveguide bend

1.4 波导匹配负载

为了实现三路波导功率分配/合成器的小型化,采用在分支波导定向耦合器的隔离端内置斜劈形吸波材料的方式。根据功分器的结构布局,斜劈长度取值为波导波长的 1 倍,波导波长 λ_g 的计算公式如式(7)所示。

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} \quad (7)$$

其中, λ 为自由空间波长; λ_c 为标准波导的截止波长, λ_c 可由式(8)计算得到。

$$\lambda_c = 2a \quad (8)$$

其中, a 为标准波导的宽边尺寸。

波导匹配负载结构示意图如图 5 所示。

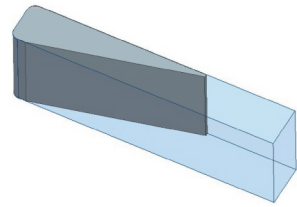


图 5 波导匹配负载结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of waveguide matched load

斜劈形吸波材料为碳化硅材料^[19],该材料通过 GD414 硅橡胶粘接在波导内壁,吸收微波能量转化为热量,通过热传导的方式将热量转移到屏蔽盒,散热良好的情况下可耐受约 50 W 的连续波功率。

2 设计与仿真

2.1 新型 Ku 频段三路波导功率分配/合成器

基于分支波导定向耦合器、共面魔 T、新型 90°弯波导和波导匹配负载结构,设计了一种新型 Ku 频段三路波导功率分配/合成器,其中分支波导定向耦合器实现 2:1 的功率分配,共面魔 T 实现等功率分配。该结构的功率分配示意图如图 6 所示,在 HFSS 软件中的三维模型如图 7 所示。

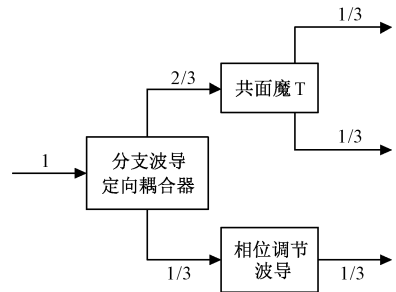


图 6 功率分配示意图

Fig. 6 Diagram of power dividing

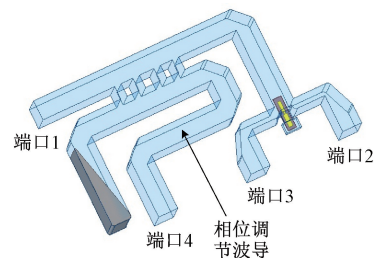


图 7 三路功率分配/合成器结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of three-way power divider/combiner

如图 7 所示,该结构作为三路波导功率分配器使用时, Ku 频段射频信号进入端口 1,经过不等功分的分支波导定向耦合器分为两路,直通输出端口和耦合输出端口的输出功率比为 2:1;直通输出端口接等功分的共面魔 T,端口 2

和端口 3 的输出功率比为 1 : 1;耦合输出端口连接端口 4;因此,该结构可实现对输入信号功率的三等分。共面魔 T 为对称结构,端口 2 和端口 3 输出的信号等幅同相。通过调整“相位调节波导”的长度,改变端口 4 输出信号的相位,即可实现端口 2、端口 3 和端口 4 的输出信号同相位。由以上分析可知,Ku 频段三路波导功率分配器可将输入信号分为等幅同相的三路信号。

Ku 频段三路波导功率分配器幅度仿真结果如图 8 所示,相位仿真结果如图 9 所示,输出端口隔离度仿真结果如图 10 所示,输入端口和输出端口回波损耗如图 11 所示。

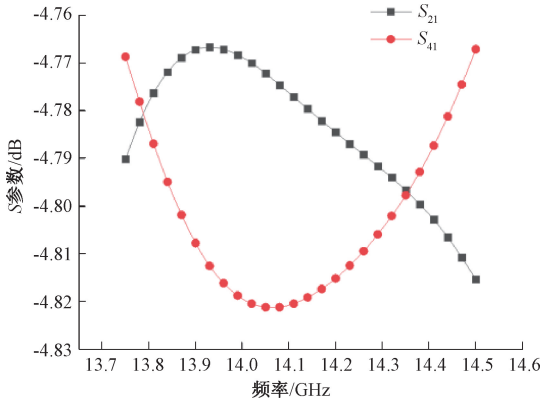


图 8 三路功分器幅度仿真结果

Fig. 8 Amplitude simulation results of three-way power divider

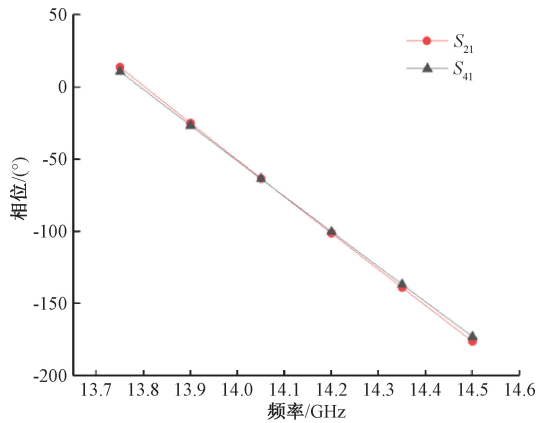


图 9 三路功分器相位仿真结果

Fig. 9 Phase simulation results of three-way power divider

共面魔 T 为对称结构,端口 2 和端口 3 输出的曲线完全一致,因此图 8~11 中只给出了端口 2 的曲线。由仿真结果可知,在 13.75~14.5 GHz 频率范围内,3 个输出端口的幅度差小于 0.06 dB,相位差小于 3.5°,隔离度优于 20 dB,回波损耗优于 20 dB。仿真结果表明,该 Ku 频段三路波导功率分配/合成器具有结构简单、幅度相位一致性好、插入损耗小、端口驻波好、隔离度高的特点。

2.2 Ku 频段三路波导功率分配/合成网络

将两个三路波导功率分配/合成器背靠背连接,即可组

成一种 Ku 频段三路波导功率分配/合成网络,其三维模型如图 12 所示,仿真结果如图 13 所示。

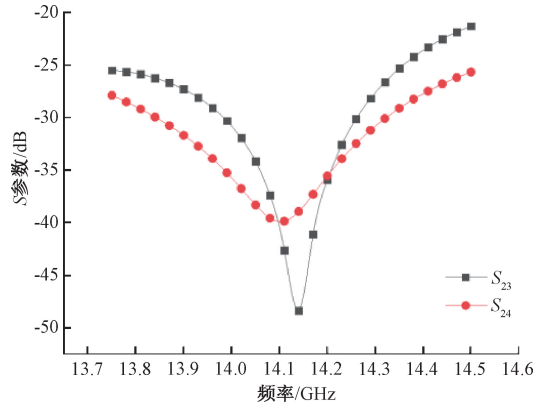


图 10 三路功分器隔离度仿真结果

Fig. 10 Isolation simulation results of three-way power divider

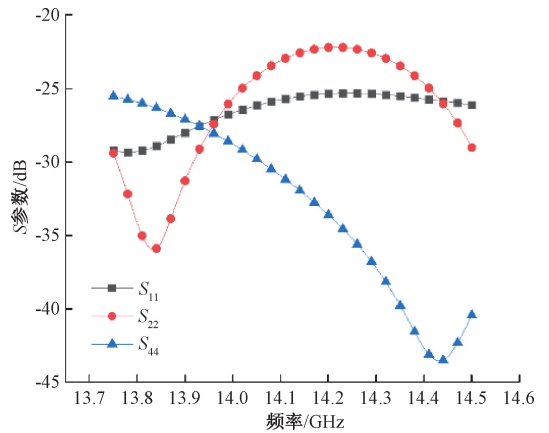


图 11 三路功分器回波损耗仿真结果

Fig. 11 Return loss simulation results of three-way power divider

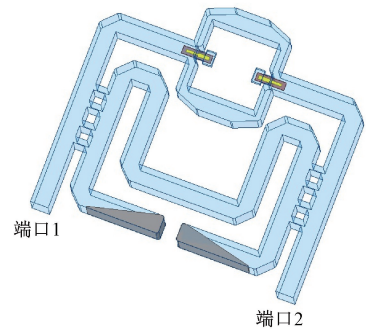


图 12 三路功率分配/合成网络结构示意图

Fig. 12 Structure diagram of three-way power dividing/combining network

功率分配/合成网络性能主要体现在传输损耗和回波损耗两个指标上,传输损耗决定了功率合成网络的合成效率,传输损耗越大则合成效率越低。考虑到功率分配/合成网络为背靠背对称结构,因此功率分配/合成网络传输损耗

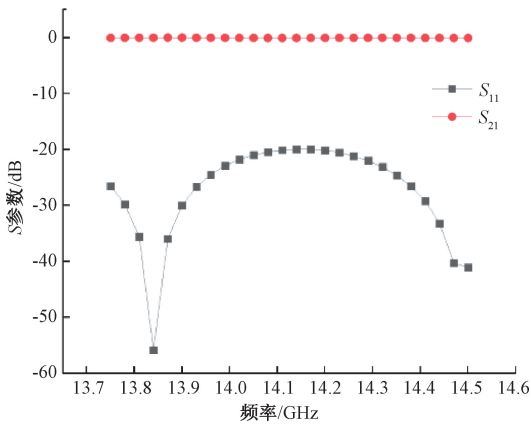


图 13 三路功率分配/合成网络仿真结果
Fig. 13 Simulation results of three-way power dividing/combining network

的一半即为单个功率合成网络的传输损耗,用 L_r 表示,则功率合成网络的合成效率 η 为:

$$\eta = 10^{-L_r/10} \quad (9)$$

由仿真结果可知,在 13.75~14.5 GHz 频率范围内,三路功率分配/合成网络的回波损耗优于 19.5 dB,传输损耗小于 0.1 dB。因此,三路功率合成网络的传输损耗小于 0.05 dB,计算得到其合成效率大于 98.9%,是一款高效的功率合成网络。

3 加工与测试

根据 HFSS 软件优化的结构尺寸值,加工制作了 Ku 频段三路波导功率分配/合成器样品。整体结构分为上腔和下腔两部分,采用螺钉固定;材料选用 6063-T6 铝合金,表面镀银,该材料导热系数为 201 W/(m·K),导热能力较强。三路波导功率分配/合成器实物如图 14 所示。

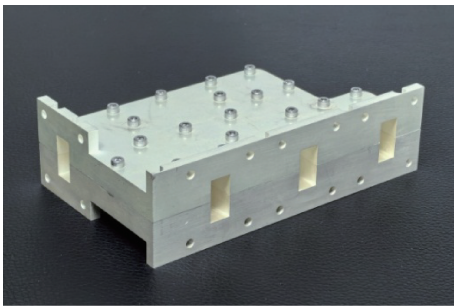


图 14 三路波导功率分配/合成器实物图

Fig. 14 Photo of three-way waveguide power divider/combiner

该批次共加工两个样品,使用思仪(Ceyear)3674G 型矢量网络分析仪对两个样品进行测试,测试结果表明该款 Ku 频段三路波导功率分配/合成器具有良好的幅度相位一致性,此处不再赘述;下面重点对本文结构相对于其他文献结构的优点进行对比和分析。

Ku 频段三路波导功率分配器输入端口和输出端口回波损耗测试结果如图 15 所示,输出端口之间的隔离度测试结果如图 16 所示。由图 15 可知,输入端口回波损耗优于 20 dB,输出端口回波损耗优于 18 dB,解决了文献[7-12]输出端口驻波差的难题。由图 16 可知,图 7 结构所示的端口 2 和端口 3 之间的隔离度大于 18.5 dB,端口 2 和端口 4 之间的隔离度大于 22 dB。

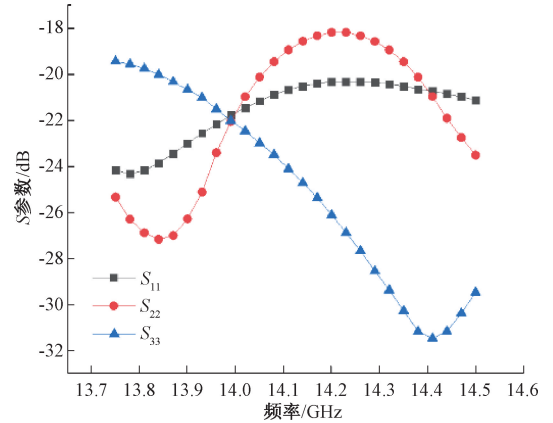


图 15 三路功分器回波损耗测试结果

Fig. 15 Return loss measured results of three-way power divider

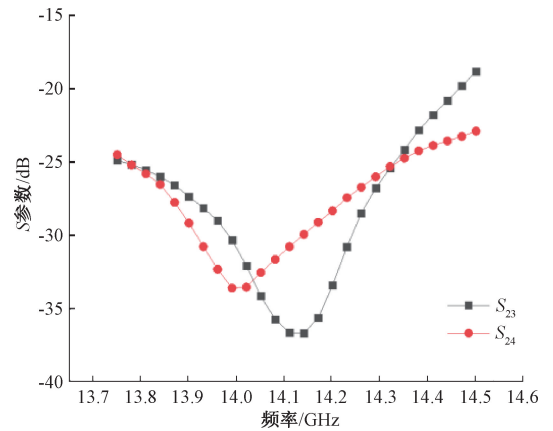


图 16 三路功分器隔离度测试结果

Fig. 16 Isolation measured results of three-way power divider

表 1 为本文与其他文献所设计的 Ku 频段三路功率分配/合成器隔离度指标对比。由表 1 可以看出,本文设计的三路功率分配/合成器隔离度指标明显优于其他文献。在进行功率合成时,高隔离度使三路之间的相互影响很小。

经测试,两个样品指标一致性良好;将两个样品通过螺钉背靠背连接得到三路功率分配/合成网络,对其传输损耗和回波损耗进行测试,测试结果如图 17 所示。由测试结果可见,传输损耗小于 0.12 dB,回波损耗优于 17 dB,测试结果与仿真结果基本保持一致。三路功率合成网络的传输损耗小于 0.06 dB,根据式(9),计算得到其合成效率大于 98.6%,是一款高效的功率分配/合成网络。

表 1 Ku 频段三路功率分配/合成器性能参数对比表

Table 1 Comparison of performance parameters of Ku-band three-way power divider/combiner

文献	工作频率/GHz	隔离度/dB
[9]	13.75~14.5	1)>9(两个侧端口之间); 2)>7(侧端口和中间端口)。
[10]	13.5~15.35	无具体数值,可参考文献[7]。
[12]	12~15	1)>18(两个侧端口之间); 2)侧端口和中间端口之间隔离度差,无具体数值。
本文	13.75~14.5	1)>22(端口 2 和端口 4); 2)>18.5(端口 2 和端口 3)。

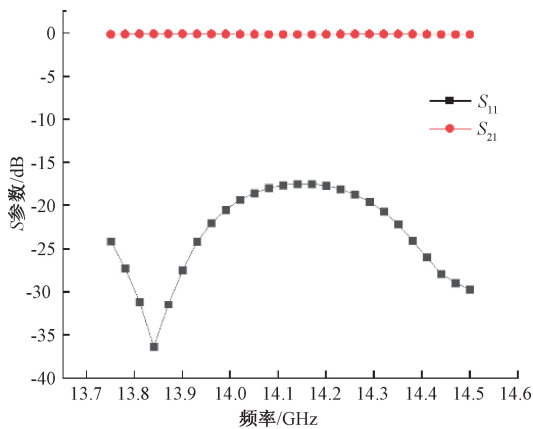


图 17 三路功率分配/合成网络测试结果

Fig. 17 Measured results of three-way power dividing/combining network

由上面研究可知,该三路波导功率分配/合成网络性能指标优良,可应用于 Ku 频段固态功率合成中。为了使三路波导功率分配/合成器具有更高的可靠性,可在图 14 的上腔外壁加工散热片结构,更有利于其散热;若整机重量指标要求宽松,可使用无氧铜材料,该材料导热系数为 $400 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,具有更高的热传导能力。此外,Ku 频段波导尺寸较大,现有数控机床加工精度完全可保证该三路波导功率分配/合成器的性能指标和批产一致性。

4 结 论

为了克服现有三路波导功率分配/合成器的不足,基于分支波导定向耦合器、共面魔 T、新型 90° 弯波导和波导匹配负载结构,设计并制作了一种新型 Ku 频段 (13.75~14.5 GHz) 三路波导功率分配/合成器,具有结构简单、幅度相位一致性好、插入损耗小、端口驻波好、隔离度高的特点。在此基础上,构建了一种 Ku 频段三路波导功率分配/合成网络,制作了样品并进行了测试,结果表明其传输损耗小于 0.12 dB,回波损耗优于 17 dB;经计算,其合成效率大于 98.6%,是一款高效的功率分配/合成网络。Ku 频段三

路波导功率分配/合成器与传统二进制功率分配/合成器相结合可实现六路、十二路、十八路和二十四路等非二进制功率合成,即可灵活合理地选择功放芯片的数量,有利于提高功率放大器整机效率,减小整机体积和降低整机成本。该款三路波导功率分配/合成网络已应用于实际工程项目中,工作频率可拓展至毫米波频段,在固态功率合成领域具有较高的推广应用价值。

参考文献

- [1] 南星伊,李新春,丛密芳,等. 集成滤波特性的宽带滤波-功率放大器[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 51-59.
NAN X Y, LI X CH, CONG M F, et al. Wideband filter-power amplifier with integrated filtering characteristics[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 51-59.
- [2] 南敬昌,戴涛,丛密芳,等. 可重构宽带功率放大器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 25-32.
NAN J CH, DAI T, CONG M F, et al. Reconfigurable broadband power amplifier design[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 25-32.
- [3] REBOLLAR J M, ESTEBAN J, PAGE J E. Design of a compact Ka-band three-way power divider[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting, IEEE, 1994: 1074-1077.
- [4] KUMAR G A, BISWAS B, PODDAR D R. A compact broadband Riblet-type three-way power divider in rectangular waveguide[J]. IEEE Microwave and Wireless Components, 2017, 27(2): 141-143.
- [5] 刘玥玲,邱雨,何继昌. 基于波导 H 面的 K 波段三路合成器[J]. 固体电子学研究与进展, 2018, 38(3): 201-204.
LIU Y L, QIU Y, HE J CH. Design of a K band three-way power combiner based on the H-plane waveguide[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2018, 38(3): 201-204.
- [6] DANG Z, ZHANG Y, ZHU H L, et al. An isolated three-way power combiner via magnetically coupled microstrip ring probes [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 9: 1-10.
- [7] 才博,李鹏程,刘得喜,等. 一种 Ka 频段波导三路功率分器设计[J]. 遥测遥控, 2012, 33(4): 42-45.
CAI B, LI P CH, LIU D X, et al. A Ka band waveguide three-way power divider [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2012, 33(4): 42-45.
- [8] 莫坤山. 一种紧凑型三路波导功分结构的设计[J]. 信

- 息记录材料, 2020, 21(5): 136-137.
- MO K SH. Design of a compact three-way waveguide power divider structure [J]. Information Recording Materials, 2020, 21(5): 136-137.
- [9] 陈冠军, 景新攀, 魏伟, 等. 一种新型 Ku 频段三路功率分配/合成网络[J]. 河北工业科技, 2022, 39(6): 456-460.
- CHEN G J, JING X P, WEI W, et al. A novel Ku-band three-way power divider/combiner [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2022, 39(6): 456-460.
- [10] 黄薛龙, 张俊, 周二凤. Ku 波段 120 W 小型化功放模块的研制[J]. 长春师范大学学报, 2022, 41(10): 32-37.
- HUANG X L, ZHANG J, ZHOU ER F. Development of Ku-band 120 W miniaturized power amplifier module [J]. Journal of Changchun Normal University, 2022, 41(10): 32-37.
- [11] SHEN C, LYU L, LI X H, et al. A Q-band 50 W solid-state amplifier based on a new 24-way waveguide dividing and combing integrative network with electromagnetic emulation and thermal analysis cooperating worked [C]. Conference on Infrared, Millimeter, Terahertz Waves and Applications(IMT2022), 2022.
- [12] 卢小娜, 乔得琢. 一种隔离度好的一分三同相波导功率分器研究[J]. 无线互联科技, 2022, 18: 122-124.
- LU X N, QIAO D ZH. Research on high-isolation one-three same-phase power divider of waveguide [J]. Wireless Internet Technology, 2022, 18: 122-124.
- [13] NIU Z Q, ZHANG B, LI D T, et al. A mechanical reliability study of 3 dB waveguide hybrid couplers in submillimeter and terahertz bands [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(8): 1104-1113.
- [14] DAI B L, ZHANG B, NIU Z Q, et al. A novel ultrawideband branch waveguide coupler with low amplitude imbalance [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(8): 3838-3846.
- [15] 王怀北. Q/V 频段线性功率合成放大技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- WANG H B. Research on Q/V band linear power combining amplification technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [16] 龚志伟. 毫米波及太赫兹频段功率合成关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- GONG ZH W. Research on key technologies of millimeter-wave and terahertz band power combining [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [17] 刘杰. 3 mm 功率合成关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- LIU J. Study on key technologies of 3 mm power combiner [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [18] 陈佳慧, 杜宏宇, 任英杰, 等. 高频板材的复介电常数测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6): 178-186.
- CHEN J H, DU H Y, REN Y J, et al. Research on the measurement of complex permittivity of high-frequency substrate [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6): 178-186.
- [19] 徐俊杰, 王岭, 王晓猛, 等. 耐高温吸波材料的研究进展[J]. 现代电子陶瓷, 2024, 45(3): 189-205.
- XU J J, WANG L, WANG X M, et al. Research progress of high temperature absorbing materials [J]. Advanced Ceramics, 2024, 45(3): 189-205.

作者简介

刘立浩(通信作者), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。

E-mail: liulihao1978@126.com

魏伟, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。

E-mail: weiw dw_0312@163.com

李强, 硕士, 研究员, 主要研究方向为通信装备与系统。

E-mail: liq_54@qq.com