

# 基于交错带状线 3 dB 电桥的大功率功放技术

邢成浩, 祝大龙, 刘德喜, 才 博  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 在现今的军用电子系统中, 功率放大器起着举足轻重的作用。功率合成器件作为功率放大器的重要组成部分, 需要满足高合成效率、高功率耐受能力和小型化的特性要求。基于交错耦合带状线定向耦合器, 通过宽带匹配级联设计了一款 8 GHz~12 GHz 的四路功率合路器。测试结果显示: 四路功率合路器的隔离度 $<-15$  dB, 回波损耗 $<-19$  dB, 合成效率 $>78.7\%$ 。基于该四路功率合成模块研制了一款 X 频段功率放大器, 样机尺寸为 52 mm $\times$ 38 mm $\times$ 5.5 mm, 放大器在 8 GHz~12 GHz 的最大输出功率为 52.2 dBm (40% 占空比), 插入损耗 $<1.4$  dB。与传统的平面结构相比, 基于这种功率合成器的结构更紧凑, 合成效率更高, 隔离度更好, 功率耐受能力更强, 适用于卫星通信、雷达和电子对抗等领域。

**关键词:** 交错带状线; 3 dB 电桥; 大功率; 功放

**中图分类号:** TN626 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)02-0059-07

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20221020001

**引用格式:** 邢成浩, 祝大龙, 刘德喜, 等. 基于交错带状线 3 dB 电桥的大功率功放技术[J]. 遥测遥控, 2023, 44(2): 59-65.

## High-power amplifier with offset parallel-coupled 3 dB bridges

XING Chenghao, ZHU Dalong, LIU Dexi, CAI Bo  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The power amplifier plays a pivotal role in the military electronic systems in the present. The combiner, an important component of the RF power amplifier, needs to face the challenge of high combining efficiency, high power tolerance, wideband and miniaturization. This paper takes the width matching cascading scheme to design a 4-way power combiner in 8~12 GHz based on offset parallel-coupled cascade structure. The test result shows that the output isolation is  $<-15$  dB, the standing wave loss is  $<-19$  dB, and the combining efficiency is  $>78.7\%$ . And the power amplifier system is developed with the size of 52 mm $\times$ 38 mm $\times$ 5.5 mm, based on the 4-way power combiner. The experimental results show the maximum output power is 52.2 dBm and the insert loss is  $<1.4$  dB. Compared with the conventional microstrip coupler, this kind of power combiner is more compact, more efficient in synthesis, better in isolation, and more capable of withstanding power, which can apply to satellite communication, radar station and electronic countermeasure.

**Keywords:** Offset parallel-coupled; 3 dB bridge; High-power; Amplifier

**Citation:** XING Chenghao, ZHU Dalong, LIU Dexi, et al. High-power amplifier with offset parallel-coupled 3 dB bridges[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 59-65.

## 引 言

在无线通信系统中, 射频发射模块决定了整个微波系统的信号质量和传输能耗。随着半导体工艺的日渐成熟, 电路和芯片制造成本大大降低, 功率放大器的整体性能也随之提高, 呈现出集成化和小型化的发展趋势。其中, 功率输出能力、合成效率和功率密度是衡量功率放大器性能的重

要指标。集成单片(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)的输出功率有限, 要研制大功率固态功率放大器, 就需要将多个功率芯片的输出功率进行合成<sup>[1]</sup>, 这样可以大幅度地提升功率放大器的功率输出能力, 进而提高无线通信系统的作用半径和通信质量。功率合成效率是一项重要的指标: 一方面, 功率传输过程中损失的能量会转化成热量, 热量的积累会影响整个电子系统的性

能, 减少热量的产生可以有效降低设计成本; 另一方面, 较差的驻波会恶化功率放大器的功率输出, 破坏功率放大器的稳定性。另外, 小型化是功率器件的未来趋势, 对于缩小产品体积和节约制造成本具有极其重要的意义<sup>[2]</sup>。

定向耦合器作为一种无源微波器件, 具有工作频带宽、端口隔离度好的优点, 不同的定向耦合器的插入损耗、功率容量、合成效率之间存在差异, 按照传输线可以分为波导耦合器、微带线耦合器和带状线耦合器等<sup>[3]</sup>。其中, 波导耦合器和微带线耦合器分别应用于大功率和小功率场合, 波导耦合器的体积较大, 微带线耦合器的耦合度比较低, 散热性能较差<sup>[4]</sup>。带状线耦合器的耐受功率较高、体积较小, 符合功率放大器小型化和高输出功率的设计要求。带状线耦合器按结构可分为窄边耦合、宽边耦合和交错耦合三种<sup>[5]</sup>。其中, 交错带状线耦合器结构的优点多、应用广, 但其本身设计较为复杂, 在宽频应用上较困难。

1966 年, Shelton J P<sup>[6]</sup>针对交错耦合带状线提出过计算公式, 分析发现交错耦合带状线的耦合强度受限, 难以实现 3 dB 的强耦合。随着带状线技术的发展, 1983 年, Kemp G、Hobdell J、Biggin J W<sup>[7]</sup>等人提出了利用两个交叉级联的带状线获得任意耦合参数的定向耦合器的设计方案, 这种定向耦合器可以实现围绕中心频点的等纹波动, 同时保证对称带状线的正交性不变。

目前, 国内对于 X 频段的交错带状线耦合器的研究相对来说较少<sup>[8]</sup>, 这种耦合器相比于其他平面结构耦合器, 耦合强度更高, 多级级联实现 2<sup>n</sup> 功率合成时可以提高合成效率、降低加工难度。2016 年, 徐洋<sup>[9]</sup>等人设计了一种四节的非对称平面带状线定向耦合器, 在 2 GHz~12 GHz 内的耦合度为 20 dB, 隔离度>18 dB; 2018 年, 薛强<sup>[10]</sup>等人设计了一款 6 GHz~18 GHz 的带状线渐变结构的 3 dB 耦合器, 端口隔离度>20 dB, 插入损耗<0.3 dB; 2022 年, 郭垚<sup>[11]</sup>设计了一款基于渐进传输线的 X 波段八路带状线功率合成器, 在 10 GHz~11 GHz 的输出端口驻波<1.3, 各合成孔径的传输损耗在 0.5 dB 以内。2015 年, Mousavi S M 等人<sup>[12]</sup>设计了一款 2 GHz~18 GHz 的基于渐变传输线的平面带状线定向耦合器, 在频带内的耦合度为(20.5±0.5)dB, 回波损耗<15 dB。另外, Pasternack 和 Narda 等公司都对带状线 3 dB 电桥进行过研制, 其成熟产品在

频带内的插损<0.75 dB, 回波损耗<15 dB。国内外常用的带状线定向耦合器以平面结构为主, 辅助采用渐变传输线、补偿结等结构, 能够达到 74%~85% 的合成效率, 但是基于渐变传输线的平面结构加工精度要求较高, 而且平面结构相较于分层结构来说, 散热性能较差, 不适用于大功率功率合成的情形。

因此, 本文的主要内容是基于交错带状线定向耦合器设计一款 X 频段小型化、低损耗、高合成效率的功率放大器, 这对研制高效率功率放大器具有重要的工程参考意义。

### 1 理论分析

#### 1.1 交错带状线耦合器设计

交错带状线耦合器的结构如图 1 所示。这种耦合结构适用于强耦合, 其中接地平面厚度为  $H$ , 带状线厚度为  $T$ , 带状线之间垂直距离为  $S$ , 两个耦合器的交错距离为  $w_0$ , 导线线宽为  $w$ , 介质基板的介电常数为  $\epsilon_r$ , 所有尺寸参数对接地平面之间距离  $B$  进行归一化处理, 因为耦合器上下左右都不对称, 不能采用普通的奇偶模分析法。考虑到带状线定向耦合器的耦合强弱和两条带状线的交错宽度  $w_0$  紧密相关, 根据文献[12]的计算公式, 可以采用等效电路法进行近似求解。

交错耦合带状线的偶模阻抗  $Z_{0e}$  和奇模阻

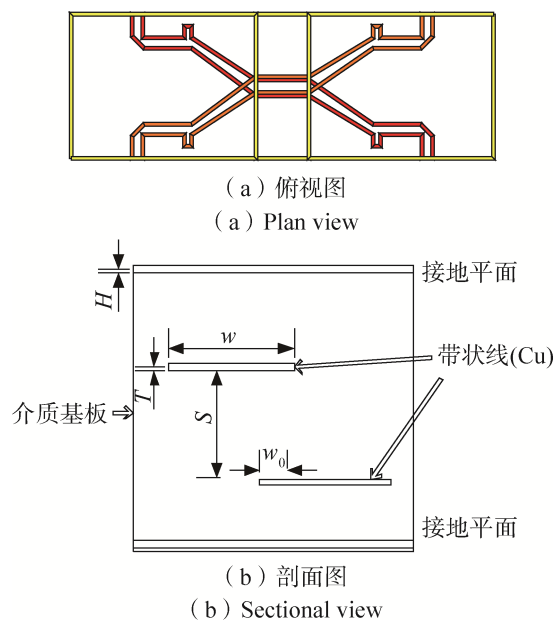


图 1 交错带状线耦合器

Fig.1 Offset parallel-stripline coupler

抗  $Z_{0o}$  为

$$\begin{cases} Z_{0e} = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{C_e} \\ Z_{0o} = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{C_o} \end{cases} \quad (1)$$

奇偶模阻抗和耦合度关系如下

$$\begin{cases} k = 10^{-(c/20)} \\ Z_{0e} = 50 \times \sqrt{(1-k)/(1+k)} \\ Z_{0o} = 50 \times \sqrt{(1+k)/(1-k)} \end{cases} \quad (2)$$

强耦合条件为

$$\begin{cases} w/(1-s) \geq 0.35 \\ w_0 \geq 0.7 \end{cases} \quad (3)$$

在强耦合条件下, 两条带状线之间的偶模电容  $C_e$  和奇模电容  $C_o$  为

$$\begin{cases} C_e = 2w \left( \frac{1}{1-s} + \frac{1}{s} \right) + \frac{1}{\pi} \left\{ -\frac{2}{1-s} \log(s) + \frac{1}{s} \log \left[ \frac{pr}{(p+s)(1+p)(r-s)(1-r)} \right] \right\} \\ C_o = \frac{2w}{1-s} + \frac{1}{\pi} \left\{ -\frac{2}{1-s} \log(s) - 2\log(s) + 4\log(s+pr) - \log[pr(p+s)(1+p)(r-s)(1-r)] \right\} \\ r = \frac{p + \frac{1+s}{2}}{1+p \left( \frac{1+s}{2s} \right)} \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} A = \frac{(1+pr/s)^2}{(pr/s)} \\ B = \frac{pr}{s} \\ p = \frac{(B-1) \left( \frac{1+s}{2} \right) + \sqrt{\left( \frac{1+s}{2} \right)^2 (B-1)^2 + 4sB}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

根据文献[7]的能量等分条件, 带状线定向耦合器的耦合强度  $c$  和相位差  $\alpha$  需要满足

$$\begin{cases} c = -8.34 \text{ dB} \\ \alpha = \pi/8 \end{cases} \quad (6)$$

选用介电常数  $\epsilon_r$  为 8.9 的 AlN(氮化铝)作为介质基板材料, 根据式(1)~式(5)和能量等分条件式(6)可以求出, 定向耦合器的介质基板的尺寸为  $4 \text{ mm} \times 11.82 \text{ mm} \times 2.068 \text{ mm}$ , 带状线之间的垂直距离  $0.508 \text{ mm}$ ,  $50 \Omega$  导线的线宽为  $0.294 \text{ mm}$ 。

## 1.2 结构特性分析

带状线定向耦合器的结构本质是置于两个接地导体平面之间的传输导线, 在导线和接地平面之间填充有均匀电介质。带状线定向耦合器具有以下优势:

① 功率容量高。因为信号传输损耗的能量会转化成热量, 这些热量会通过介质基板和外导体与外界形成热传导, 当热传导达到动态平衡时, 器件的温度不再上升。为了提高功率容量, 可以采用导热系数高的材料作为介质基板, 而且传输线两侧都通过导热介质进行热传导, 而微带线结构散热方式为一侧热传导, 另一侧与空气热对流, 而热传导的散热效率要远远高于热对流, 因此平面微带线比带状线的散热效率要差, 热量也更容易聚集。

② 结构紧凑。与平面向定向耦合器相比, 交错带状线耦合器通过将耦合区域进行分层, 大大提高了器件的空间利用率, 体积尺寸减少了 15% 以上; 带状线固定在两个介质板中间, 结构简单稳定性较高。

③ 合成效率较高。耦合带状线的奇模和偶模相速一致性比耦合微带线高, 功率分配/合成时相位一致性高, 可以提高合成效率。而且, 带状线接地导体平面的宽度比中心导体的宽度大很多, 电磁波在介质中的辐射损耗少, 合成效率高。

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 带状线定向耦合器

仿真模型如图 2 所示。图中①端口为输入端口, ②端口为输出端口, ③端口为耦合端口, ④端口为隔离端口。

考虑到两带状线交错(偏移)的宽度与耦合强弱紧密相关, 可以通过优化  $w_0$  的尺寸来调节带状线耦合器的耦合强度, 如图 3(a)所示。从图中可

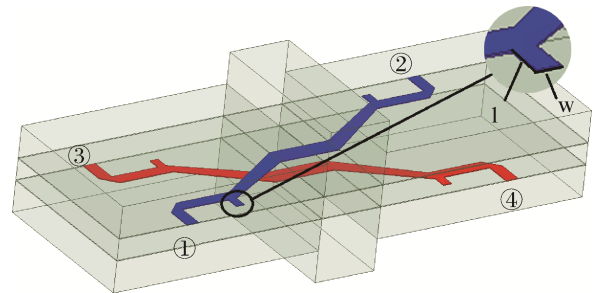


图 2 带状线定向耦合器仿真模型

Fig.2 Stripline directional coupler simulation

以看出, 随着交错宽度的增加, 带状线耦合器的耦合度会随之恶化, 为了得到所需的耦合强度, 需要对  $w_0$  的尺寸进行优化。

图 3 中可以看出, 带状线耦合器的耦合度受频率的影响比较大, 原因是带状线宽度的不连续导致能量在连接处也存在不连续性, 这种不连续性

产生的附加电感, 频率越高对耦合度和方向性的恶化越严重<sup>[13]</sup>。因此, 可以在带状线宽度不连续处添加补偿枝节来消除寄生电感, 通过调节匹配枝节的位置(距离过渡点的距离  $d$ )以及尺寸(长度  $l$  和宽度  $w$ ), 来获得更优的耦合度<sup>[14]</sup>, 如图 3(b)和图 3(c)所示。

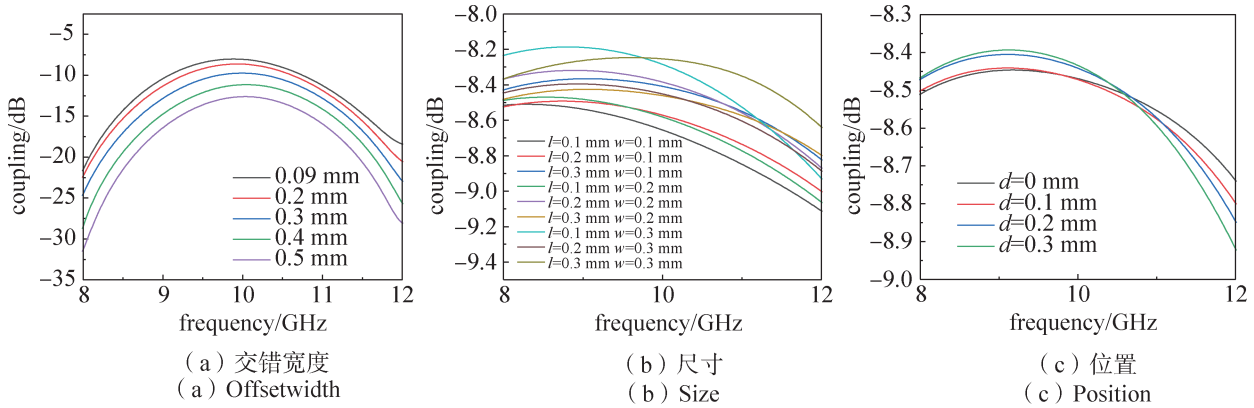


图 3 不同交错宽度  $w_0$ 、匹配枝节长度  $l$ 、宽度  $w$  以及位置  $d$  对应带状线定向耦合器耦合度仿真曲线

Fig.3 Coupling of coupler with different offset widths  $w_0$ , match sizes  $l$ , widths  $w$  and positions  $d$

通过结构尺寸优化, 单级耦合器带状线之间交错距离为 0.09 mm, 枝节尺寸为 0.3 mm×0.2 mm 时, 频带内的耦合度与设计要求契合最好。

图 4 给出了优化后的单级耦合器直通端和耦合端的相位差, 从图中看出, 单级耦合器的耦合度和传输相位差都满足功率等分条件。

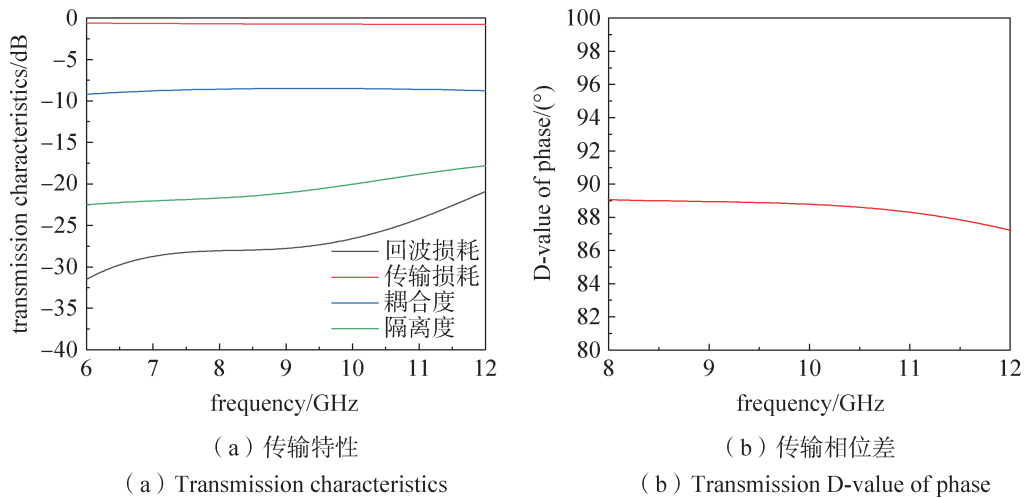


图 4 单级耦合器仿真结果

Fig.4 Coupler simulation measurement diagrams

### 2.2 带状线 3 dB 电桥

带状线 3 dB 电桥通过将两个带状线定向耦合器交错级联实现, 如图 5 所示。

图 6 给出了 3 dB 电桥的仿真模型, 其中①端口为输入端口, ②、③端口为输出端口, ④端口为隔离端口, 信号从①端口等功率分配给②端口和③端口。

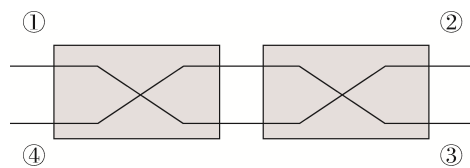


图 5 3 dB 电桥级联结构示意图

Fig.5 3 dB bridge structure



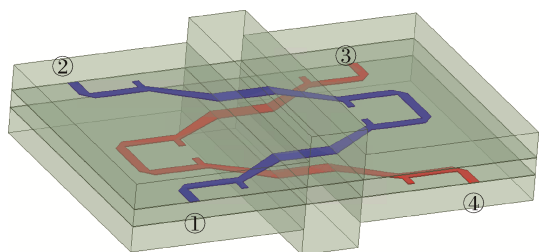


图6 3 dB带状线电桥仿真模型

Fig.6 3 dB stripline bridge simulation model

图7给出了带状线电桥的传输参数曲线，可以看出在8 GHz~12 GHz的频率范围内，电桥耦合度 $\geq -3.36$  dB，耦合平坦度为 $\pm 0.36$  dB，隔离度 $< -17.8$  dB，驻波比 $< 1.27$ 。

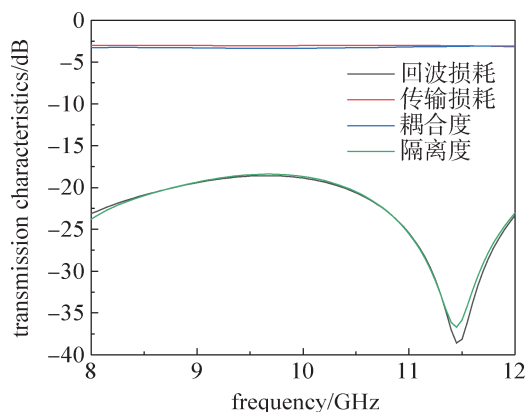


图7 3 dB带状线电桥传输特性

Fig.7 3 dB stripline bridge transmission characteristics

### 2.3 四路功率合成器

四路功率合成模块采用的是三个带状线3 dB电桥二级级联方案，仿真模型如图8所示，其中①端口为输入端口，②、③、④、⑤端口为输出端口，⑥、⑦、⑧端口为隔离端。信号从①端口进入时，⑥、⑦、⑧端口接匹配负载，信号功率四等分后从②、③、④、⑤四个端口输出。

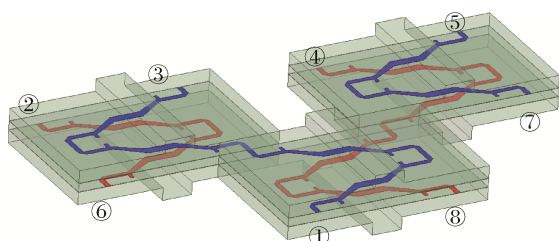
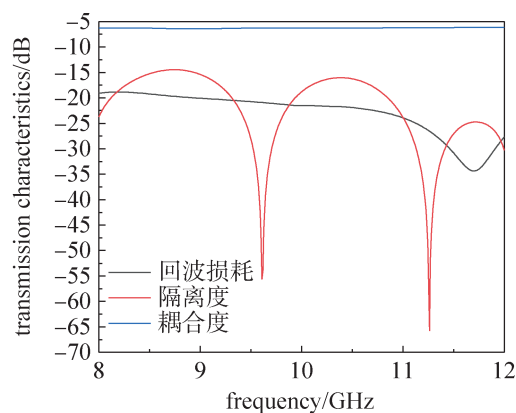


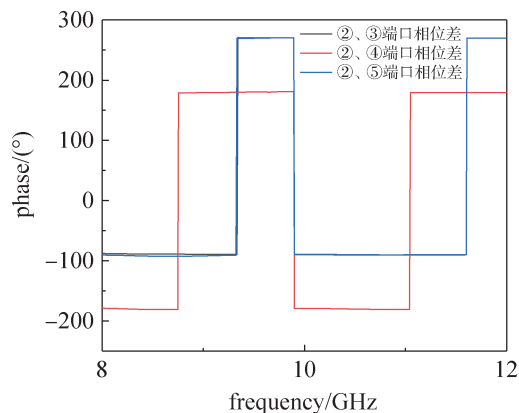
图8 四路功率合成器仿真模型

Fig.8 4-way combiner simulation model



(a) 传输特性

(a) Transmission characteristics



(b) 传输相位差

(b) Transmission D-value of phase

图9 四路功率合成器仿真结果

Fig.9 4-way power combiner simulation results

图9 (a) 给出了四路功率合成模块的传输参数曲线，可以看出在8 GHz~12 GHz的频率范围内，合成网络端口隔离度 $< -15$  dB，端口回波损耗 $< -19$  dB。图9(b)给出了四路合路器中，③、④、⑤端口分别对②端口的相位取差，从图9 (b)的相位差曲线可以看出，各个端口的相位一致性较好。

## 3 实物测试

### 3.1 四路功率分配-合成器实物测试

根据仿真验证，将两个功率合成器的四个输入端口背靠背连接，加工生产了一个四路功率分配-合成模块，实物模型如图10所示，产品的实物尺寸为 $52\text{ mm} \times 38\text{ mm} \times 5.5\text{ mm}$ 。功率分配-合成器原理如图11 (a)所示，实验系统如图11 (b)所示，隔离端接匹配负载后，使用矢量网络分析仪测试功率分配-合成模块的插入损耗和端口隔离度。

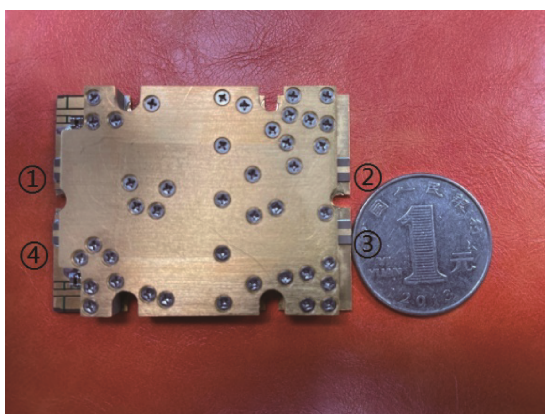
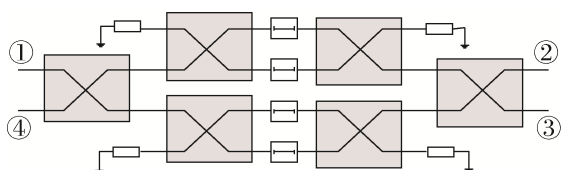


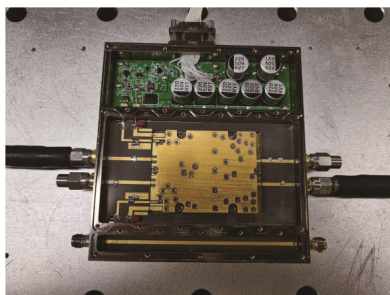
图 10 产品实物图

Fig.10 Physical model



(a) 测试原理图

(a) Experiment schematic



(b) 试验系统

(b) Experimental system

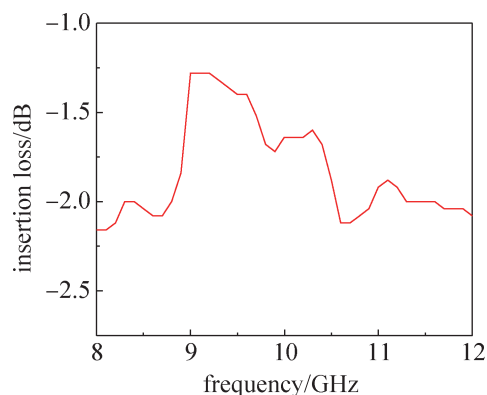
图 11 四路功率分配-合成器测试

Fig.11 4-way divider-combiner experiment

四路功率分配-合成模块测量结果如图 12 所示。由图 12 (a) 可以看出, 功率分配-合成器在带内的插入损耗 $\leq -2.08$  dB, 端口回波损耗 $< -15$  dB, 合成效率 $> 78.7\%$ 。从图 12 (b) 可以看出, 在 8 GHz~12 GHz 频率范围内四路功率分配-合成网络的隔离度 $< -19$  dB。

### 3.2 X 频段功率放大器实物测试

经过验证, 依据前面设计的结构尺寸加工制造了一个四路合成的大功率功放, 选用的功率放大器芯片的工作频段为 5 GHz~12 GHz, 最大输出功率为 47 dBm, 带内的饱和输出功率可以达到 44 dBm 以上, 稳定性较好。



(a) 插入损耗

(a) Insertion loss



(b) 隔离度

(b) Isolation

图 12 四路功率分配-合成模块测量结果

Fig.12 4-way power divider-combiner measurements

功率放大器芯片和四路功放的功率测试结果如图 13 所示。从图 13 中可以看出, 四路合成功率放大器带内的输出功率最高可以达到 52.2 dBm, 四路合成效率 $> 71.6\%$ , 插入损耗 $< 1.4$  dB。

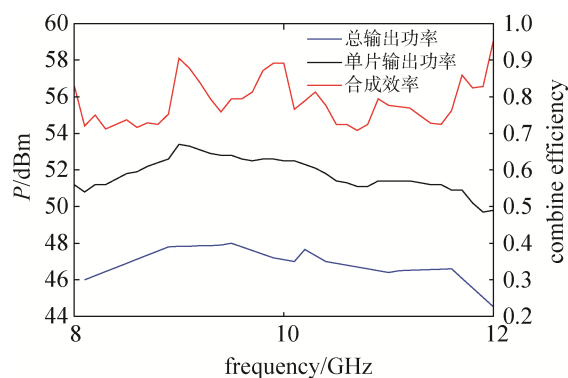


图 13 四路功放输出功率测试图

Fig.13 Simulation measurement diagram of 4-way output

## 4 结束语

本文基于交错耦合带状线结构,通过宽带级联设计了一款8 GHz~12 GHz的四路功率合路器。带状线3 dB电桥的设计方案采用了交错级联的方式,使得结构更紧凑,体积更小,并添加匹配补偿枝节解决带状线不连续带来的寄生效应,耦合器的耦合度更高。实测结果显示:功率分配-合成模块的尺寸为52 mm×38 mm×5.5 mm,四路合成效率>78.7%,输入端口回波损耗<-19 dB,隔离度<-15 dB。以此为基础设计的四路合成功率放大器在8.0 GHz~12.0 GHz最大输出功率达到52.2 dBm(40%占空比)。与传统平面结构3 dB电桥级联相比,这种交错带状线定向耦合器的结构更紧凑,最大输出功率更高,隔离度更好,可以用于卫星通信、雷达和电子对抗等领域。

### 参考文献

- [1] 王斌.毫米波波导空间功率合成关键技术研究[D].石家庄:电子科学研究院,2018.
- [2] 姚云龙.固态宽带功放合成技术研究[D].绵阳:西南科技大学,2020.
- [3] 孟航.V/U波段超宽带3 dB正交定向耦合器小型化设计及研究[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [4] 清华大学«微带电路编写组».微带电路[M].北京:清华大学出版社,2017.
- [5] DAVID M P.微波工程[M].谭云华,周乐柱,吴德明,等译.北京:电子工业出版社,2019.
- [6] SHELTON J P. Impedances of offset parallel-coupled strip transmission lines[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1966, 14(1): 7-15.
- [7] Kemp G, Hobdell J, Biggin J W. Ultra-wideband quadrature coupler[J]. Electron Lett, 1983, 19: 197-199.
- [8] 刘苏苏.30 MHz-512 MHz宽带带状线定向耦合器的设计与实现[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [9] 徐洋,彭龙,左艳,等.2~12 GHz超宽带带状线定向耦合器的设计[J].电子科技,2016,29(5): 16-18.  
XU Yang, PEN Long, ZUO Yan, et al. Design of a 2~12 GHz ultra-wideband stripline coupler[J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(5): 16-18.
- [10] 薛强,谢鸿全,夏祖学,等.6~18 GHz带状线渐变结构3 dB耦合器的设计[J].西南科技大学学报,2018,33(3): 76-81.
- [11] 郭垚.一款X波段功率合成器的设计与仿真[J].火控雷达技术,2022,51(1): 72-76.
- [12] MOUSAVI S M, MIRTAHERI S A, KHOSRAVANI M A, et al. Design, fabrication and test of a broadband high directivity directional coupler[C]//2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering, Tehran, Iran, 2015: 168-170.
- [13] WALKER J L B. Analysis and design of kemp-type 3 dB quadrature couplers[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1990, 38(1): 88-90.
- [14] 颜光友.6-18 GHz超宽带耦合器设计技术研究[D].成都:电子科技大学,2016.

### [作者简介]

邢成浩 1996年生,硕士研究生,主要研究方向为微波功率合成技术

祝大龙 1980年生,博士,研究员,主要研究方向为微波、毫米波电路的研究。

刘德喜 1973年生,博士研究生,主要研究方向为微波、毫米波系统的研究。

才博 1987年生,硕士,高级工程师,主要研究方向为微波功率合成技术。

(本文编辑:杨秀丽)