

Ka频段3 dB定向耦合器设计

杨国栋, 赵东贺, 韩国栋

中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄

收稿日期: 2022年7月23日; 录用日期: 2022年8月23日; 发布日期: 2022年9月1日

摘要

本文介绍了一种Ka频段3 dB定向耦合器的设计方法。在微带环形电桥理论分析的基础上, 实现了Ka频段带状线环形电桥的设计, 通过波导-带状线过渡的设计, 定向耦合器的所有端口为BJ400波导。仿真设计结果表明, 在34~37 GHz范围内, 定向耦合器所有端口电压驻波比优于1.2, 输出端口的传输系数均优于-3.2 dB, 隔离度大于30 dB, 设计性能达到了预期设计目标。

关键词

定向耦合器, 环形电桥, 波导-带状线过渡

Design on 3 dB Directional Coupler Operating on Ka Band

Guodong Yang, Donghe Zhao, Guodong Han

China Electronics Technology Group Corporation No. 54 Research Institute, Shijiazhuang Hebei

Received: Jul. 23rd, 2022; accepted: Aug. 23rd, 2022; published: Sep. 1st, 2022

Abstract

A design method for Ka band 3 dB directional coupler is proposed in this paper. Based on the analysis of the theoretical micro-strip hybrid ring, the design of Ka strip line hybrid ring is realized. Through the design of waveguide-strip line transition, all ports of the directional coupler are BJ400 standard waveguides. The simulation results show that in the range of 34~37 GHz, the VSWR of all ports is better than 1.2, the transmission coefficient of the output port is better than -3.2 dB, and the isolation degree is greater than 30 dB. The design performance of the directional coupler reaches the expected design goal.

Keywords

Directional Coupler, Hybrid Ring, Waveguide-Strip Line Transition

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

3 dB 定向耦合器是现代通信系统中常用的射频器件, 广泛应用于微波电路、射频测试系统、天线馈电系统中, 尤其是单脉冲跟踪天线系统、射频微波电路系统, 例如作为雷达系统的和差网络产生分路信号的和差叠加, 实现雷达方向图的和差波束; 在射频电路中实现信号的耦合、功分和合成, 用来作为系统中的“加法器”和“减法器”, 也可以结合其它器件构成反射型移相器。3 dB 电桥作为通信系统中重要的无源器件, 其性能指标[1]的优劣, 比如插入损耗、隔离度、驻波比等, 对整个系统的性能影响很大。3 dB 定向耦合器常用的结构形式主要分为两大类, 一类是平面结构, 主要包括分支线定向耦合器、环形电桥[2]和耦合线定向耦合器[3], 多数采用的是微带线、带状线的平面结构, 它的体积小, 易于与其它器件集成。但由于平面结构通常采用微波介质板传输线形式, 在高频应用时存在介质损耗较大的问题, 同时也存在与波导天线系统无法集成的缺点。另一类是基于波导结构的定向耦合器、魔 T 和波导环形电桥[4]等形式, 该类耦合器具有传输损耗小, 功率容量高的优点, 但与基于微带、带状线的耦合器相比, 存在体积大、结构不够紧凑等缺点。

针对目前常规 3 dB 定向耦合器存在的问题, 本文介绍了一种基于环形电桥的 Ka 频段 3 dB 定向耦合器的设计, 在环形电桥理论分析的基础上, 通过使用空气带线环形电桥来代替波导环形电桥, 减小耦合器的体积, 设计了波导 - 带状线过渡, 实现了输入输出端口均为 BJ400 矩形波导。通过仿真软件进行优化设计, Ka 频段 3 dB 定向耦合器在 34~37 GHz 频段范围内所有端口的电压驻波比优于 1.2, 传输系数均大于 -3.2 dB, 相位一致性小于 $180^\circ \pm 3^\circ$ 和差端口隔离度大于 30 dB, 设计性能达到了预期目标。

2. Ka 频段 3 dB 定向耦合器组成和原理

天线的小型化设计是天线工作者不变的追求, Ka 频段常用的定向耦合器通常为魔 T 或基于孔耦合的波导定向耦合器, 普遍存在尺寸较大的问题, 不利于阵列天线的集成设计。为改善这一问题, 本文提出了基于带状线环形电桥结构的 3 dB 定向耦合器形式。定向耦合器主要由带状线环形电桥和波导 - 带状线过渡两部分组成。环形电桥又称为混合环, 是一种典型的四端口 180° 混合网络。 180° 混合电桥是一种两输出端口具有 180° 相位差的四端口网络, 可以作为单脉冲天线的和差网络使用, 理想的 3 dB 180° 环形电桥的 S 矩阵通过式(1)给出。

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

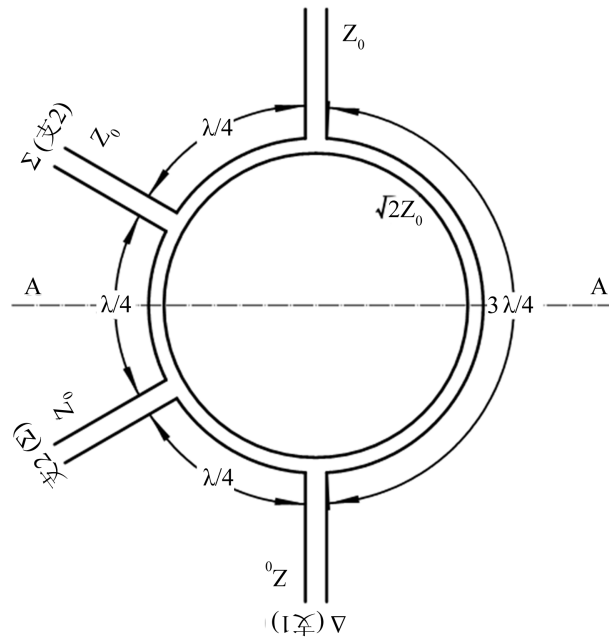


Figure 1. Schematic view of the ring type bridge
图 1. 环形电桥示意图

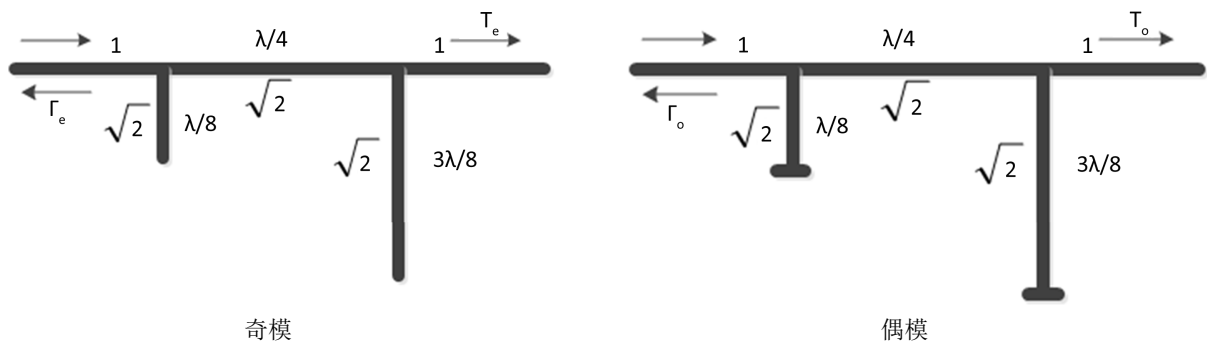


Figure 2. Schematic diagram of the ring type bridge
图 2. 环形电桥示意图

典型的环形电桥是由 1.5λ TEM 传输线(微带线、带状线)并联连接的混合网络[5]，通常由三段 $\lambda/4$ 和一段 $3\lambda/4$ 的传输线构成。对于 3 dB 环形电桥的端口特性阻抗为 Z_0 ，环形传输线特性阻抗为 $\sqrt{2}Z_0$ 。环形电桥示意图如图 1 所示。由图可以看出，环形电桥是关于 A-A 线对称的，因此可以用奇偶模分析法进行分析。为简化计算过程，对环形电桥的阻抗分布特性进行归一化处理。对电桥当端口 Σ 由单位振幅波激励时，环形电桥可以分解为偶模和奇模两种形式，如图 2 所示。偶模激励时，沿中心对称面的各点相当于开路。奇模激励时，沿中心对称面的各点相当于短路。由等效电路模型可以得出相应的 A 矩阵，根据 3 dB 环形电桥的阻抗特性对 A 矩阵进行了简化。简化后的 A 矩阵如式(2)所示。

$$[A_e] = \begin{bmatrix} 1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix} \quad [A_o] = \begin{bmatrix} -1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

从而得到两种模式下的反射系数和传输系数如式(3)所示。

$$[\Gamma_e] = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad [T_e] = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad [\Gamma_o] = \frac{j}{\sqrt{2}} \quad [T_o] = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

由上式可得环形电桥的散射系数如式(4)所示。

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{1}{2}\Gamma_e + \frac{1}{2}\Gamma_o = 0 \\
 S_{21} &= \frac{1}{2}T_e + \frac{1}{2}T_o = \frac{-j}{\sqrt{2}} \\
 S_{31} &= \frac{1}{2}\Gamma_e - \frac{1}{2}\Gamma_o = \frac{-j}{\sqrt{2}} \\
 S_{41} &= \frac{1}{2}T_e - \frac{1}{2}T_o = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

从上式可知,当信号从 Σ 端口输入时, Σ 端口无反射信号,是匹配端口, Δ 端口无信号输出,是隔离端口,输入的功率在端口支 1 和支 2 输出幅度相等,相位相等,同理可得到当信号从 Δ 端口输入时, Δ 端口无反射信号,是匹配端口, Σ 端口无信号输出,是隔离端口,输入的功率在端口支 1 和支 2 输出幅度相等,相位相差 180° 。

由于环形电桥为带状线结构,无法与波导系统的阵列天线直接连接,为使两种传输线很好的连接匹配,必须设计相应的过渡电路,波导-微带过渡结构主要有阶梯脊波导过渡[6]、耦合探针过渡[7][8][9]和孔径插槽形过渡等形式。综合考虑过渡结构的传输系数、回波损耗、带宽、易加工和与系统集成难易程度的要求,由同轴探针发展而来的微带耦合探针过渡在毫米波电路设计中得到了广泛的应用。波导-带状线过渡结构与波导-微带状线过渡结构类似。目前常用结构主要有 H 面探针和 E 面探针两种形式。这两种结构都是在波导宽边中心开一个小窗口,将一段带状线伸入波导腔中,把波导电场耦合到带状线上,将波导中传播的 TE_{10} 模转换为带状线中传播的 TEM 模。探针到波导短路面的距离一般为 $\lambda_g/4$,以保证探针在波导内处于电压最大处,即电场最强处,以实现较高的能量耦合效率。探针过渡设计的主要目标是实现波导与带状线间的最大效率电磁能量传输,这可以通过波导与带状线在设计频段内的良好阻抗匹配实现。波导-带状线过渡示意图如图 3 所示,通常采用 $\lambda_g/4$ 阻抗变换线将探针与带状线进行匹配,为改善波导-带状线过渡的匹配特性,在探针顶部增加耦合探针,耦合探针一段与波导壁短路,另外一段与探针有一定距离,通过优化探针的长度、宽度和深入波导的距离以及耦合探针的尺寸实现波导-带状线过渡的匹配。

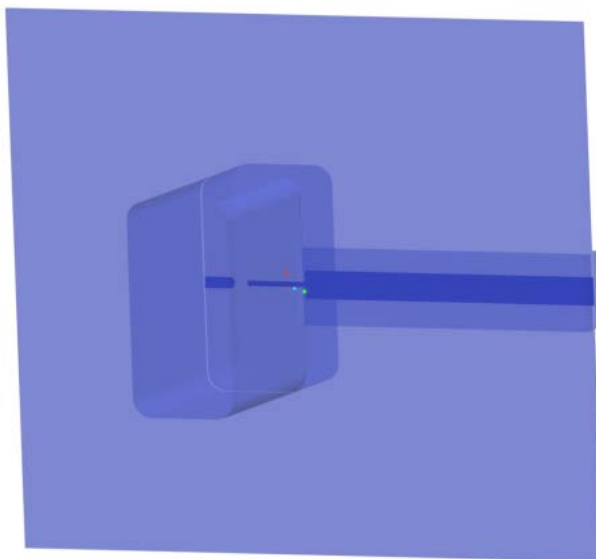


Figure 3. Structure of the waveguide-strip line
图 3. 波导-带状线结构示意图

3. Ka 频段 3 dB 定向耦合器仿真设计与分析

根据环形电桥和波导-带状线过渡的理论分析,确定初步尺寸,先对环形电桥和波导-带状线进行单独设计,通过仿真软件进行优化设计,环形电桥采用屏蔽带状线传输结构,屏蔽带状线上下接地板间距为 1 mm,左右屏蔽板间距为 2 mm,金属导带采用单层印制板的形式,印制板为介质厚度 0.1 mm 的聚四氟乙烯介质板,损耗角正切为 0.002。印制板与波导和带状线屏蔽板交叉区域为过孔结构,保证波导与屏蔽板的连续性,同时提高传输线之间的隔离度。为了便于加工,环形电桥在设计时采用矩形环的形式,波导-带状线的波导采用 BJ400 波导,分别建立仿真模型,进行仿真优化,环形电桥仿真模型和波导-带状线过渡如图 4,基本优化完成后,建立完整模型进行最终的仿真实验,完整模型如图 5 所示,1 端口为 Σ 端口,2、4 端口为支路端口,3 端口为 Δ 端口。最终得到一组满足要求的参数,矩形环长边长度 $H1$ 为 4.24 mm,宽度 $H2$ 为 2.12 mm,输出端口线宽 $w1$ 为 0.75 mm,矩形环线宽 $w2$ 为 0.4 mm,带状线探针长度 $t1$ 为 1.63 mm,探针宽度为 $tw1$ 为 0.16 mm,耦合探针长度 $t2$ 为 0.7 mm,耦合探针宽度为 $tw2$ 为 0.27 mm。

Ka 频段 3 dB 定向耦合器的仿真结果如图 6~9 所示。由图 6 可知, Ka 频段 3 dB 定向耦合器在 34~37 GHz 频率范围内四个端口的电压驻波比曲线略有差异,其中两个支路端电压驻波比基本一致,所有端口的电压驻波比优于 1.2。由图 7 可知,耦合器在工作频带内传输系数均大于 -3.2 dB,输出信号的幅度不平衡度小于 0.2 dB。由图 8 可知,耦合器的 Σ 端口和 Δ 端口的端口隔离度大于 30 dB,具有良好的隔离特性。图 9 给出了 Δ 端口输入信号时,支路端口输出信号的相位特性曲线,由曲线可知,输出信号相位不平衡性小于 $180^\circ \pm 3^\circ$ 。通过分析仿真结果可知, Ka 频段 3 dB 定向耦合器具有良好的宽带阻抗特性,在阻抗频带内具有稳定的传输特性和相位特性。由于耦合器频率较高,在后续的设计中,还应该对参数的敏感性进行验证,降低加工制造的难度。

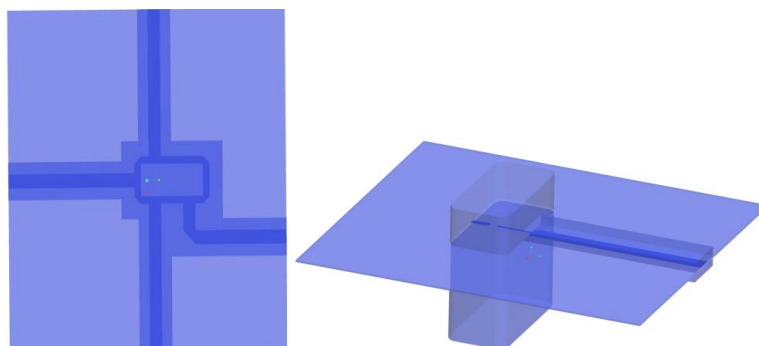


Figure 4. Models of the ring type bridge and waveguide-strip line
图 4. 环形器模型和波导-带状线过渡模型示意图

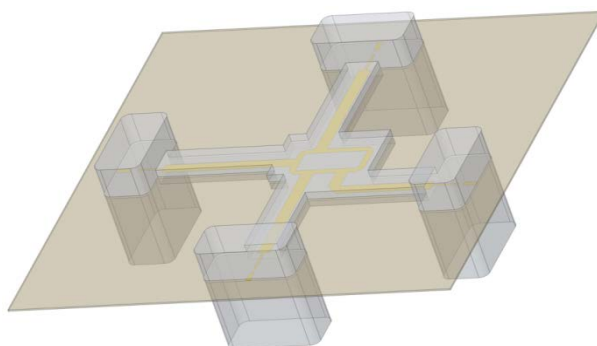


Figure 5. Whole simulated model
图 5. 完整模型仿真示意图

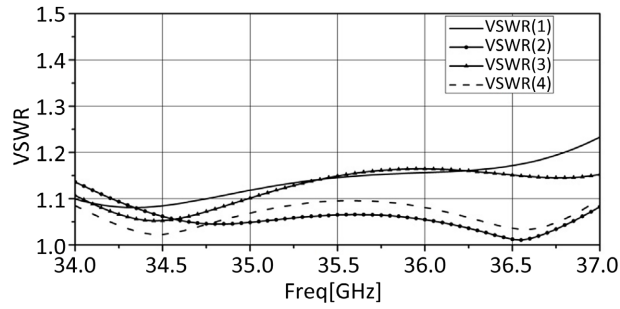


Figure 6. Simulated VSWR of the directional coupler
图 6. 定向耦合器 VSWR 仿真结果

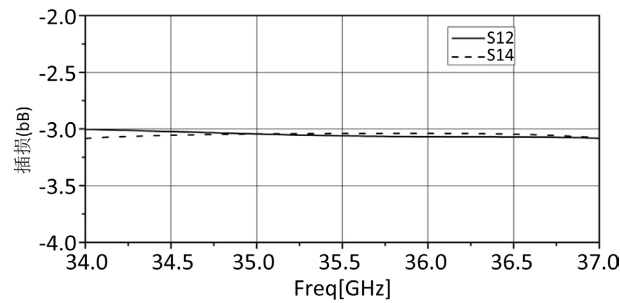


Figure 7. Simulated insertion loss of the directional coupler
图 7. 定向耦合器插损仿真结果

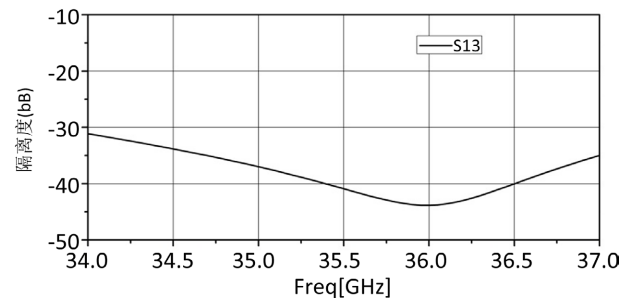


Figure 8. Simulated isolation of the directional coupler
图 8. 定向耦合器隔离度仿真结果

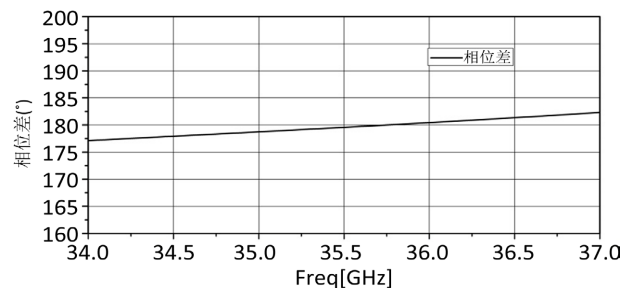


Figure 9. Simulated phase of the directional coupler
图 9. 定向耦合器相位仿真结果

4. 结论

本文介绍了一种 Ka 频段 3 dB 定向耦合器设计方法。耦合器采用带状线环形电桥的形式，减小耦合器的体积，设计了 H 面探针的波导 - 带状线过渡，实现了耦合器的数传端口为波导端口，耦合器端口为

BJ400 波导。设计结果表明 Ka 频段 3 dB 定向耦合器的传输系数、电压驻波比、相位特性和隔离度特性均优于预期目标。耦合器具有结构紧凑、加工简单、性能优良的特点,可以广泛用于毫米波频段的小型化定性耦合器或单脉冲雷达系统中使用,具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 王建武, 傅文斌. 3 dB 电桥的幅频特性和相频特性分析[J]. 空军雷达学院学报, 2005, 19(2): 24-27.
- [2] 张纬国, 何晓雄, 吴俊. 一种新型宽带环形电桥设计[J]. 合肥工业大学学报, 2017, 40(6): 784-787.
- [3] 张友俊, 王晶. 宽带非对称多节定向耦合器设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2020, 40(4): 264-268.
- [4] 邓希达, 王志刚, 延波, 等. 基于环形电桥的 W 波段四路波导功率合成系统[J]. 微波学报, 2016(8): 273-275.
- [5] 清华大《学微带电路》编写组. 微带电路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1976: 201-209.
- [6] 吴秋生, 延波, 薛良金. Ka 频段脊波导过渡的仿真与工程应用[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(2): 142-144.
- [7] Llorente-Romano, S., Dorta-Naranjo, B.P., Perez-Martinez, F., *et al.* (2002) Design Implementation and Measurements of Ka-Band Waveguide-To-Micro Strip Transitions. 2002 32nd European Microwave Conference, 23-26 September 2002, Milan. <https://doi.org/10.1109/EUMA.2002.339378>
- [8] 王健, 孙泽月, 张力维, 等. 一种 E 波段耦合微带线和矩形波导转换的设计[J]. 无线电工程, 2020, 50(120): 1063-1068.
- [9] 任田昊, 张勇. W 波段矩形波导到微带线过渡结构设计[J]. 微波学报, 2014(S1): 116-118.