

基于 PCB 工艺的 X 波段嵌入式铁氧体微带环行器设计

高原, 林杰, 锁爱林

(中国航空工业集团公司 雷华电子技术研究所, 江苏无锡 214063)

摘要: 提出了一种基于印制电路板(PCB)工艺的嵌入式微带环行器设计思路。以相应的结环行器设计理论为基础, 通过电磁仿真软件进行仿真优化, 设计了一种基于 PCB 工艺的嵌入式 X 波段双结微带环行器。对实验样机进行了测试, 结果显示该微带环行器在 8~12 GHz 范围内具有良好的环行性能: 端口电压驻波比小于 1.4, 单结隔离度大于 17 dB, 单结传输损耗小于 0.5 dB, 双结传输损耗小于 1.2 dB, 双结隔离度大于 28 dB, 证明了该嵌入式微带环行器设计思路的可行性。在系统集成化水平越来越高的今天, 该设计具有一定的应用潜力。

关键词: 微带铁氧体环行器; 嵌入式; PCB 工艺; 性能

中图分类号: TN621

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)02-0039-03

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.02.009

The design of X-band drop-in microstrip ferrite circulator based on PCB technology

GAO Yuan, LIN Jie, SUO Ai-lin

AVIC Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214063, China

Abstract: In this paper, a design idea of drop-in microstrip ferrite circulator based on PCB technology is proposed. According to design theory of the corresponding junction circulator, a drop-in X-band double-junction microstrip circulator based on PCB technology is designed. Simulation optimization is carried out by electromagnetic simulation software. The test results of the sample show that, the circulator has a good circulation performance between 8 and 12 GHz, with a VSWR of less than 1.4, single-junction isolation of more than 17 dB, single-junction insertion loss of less than 0.5 dB, double-junction isolation of more than 28 dB, and double-junction insertion loss of less than 1.2 dB. The feasibility of the design idea for drop-in microstrip circulator is proved. With the increasing integration of the system, the design has great potential for application.

Key words: microstrip ferrite circulator; drop-in; printed circuit board (PCB); performance

1 引言

在氮化镓微波芯片、单片微波集成电路、共形阵列、数字阵列、多输入多输出和综合射频系统等领域不断发展和成功应用的背景下, 有源相控阵雷达系统表现出前所未有的优势和巨大的发展潜力, 成为雷达系统的主流发展方向之一。微带环行器作为连接系统收发通道与天线的重要器件, 成为当前微波铁氧体器件研究热点之一。现在大多成熟的固态有源系统中微带环行器作为 T/R 组件的一部分与多层陶瓷电路相连, 如今这一方式制约着系统的发展。基于上述理由, 摆在面前的一个难题就是如何提高微带环行器在系统当中的集成度, 以及增强设

计的灵活性。其中一个研究方向是将微带环行器与低温共烧(LTCC)多层陶瓷电路或微带天线等其它系统部件直接集成在一起, 本文着眼于微带环行器与微带天线的直接集成, 常见的微带天线很多都是基于 PCB 工艺在覆铜板上加工制作, 因此研究基于 PCB 工艺的嵌入式微带环行器具有现实意义^[1-3]。

2 原理与结构

2.1 设计原理

本文涉及基于 PCB 工艺嵌入式微带环行器的理论计算和设计方法, 主要借鉴成熟的带线/微带环行器的设计理论^[4-5], 一般将微带环行器作为带线环行

收稿日期: 2019-06-21 修回日期: 2019-08-21

通讯作者: 高原 E-mail: jianhaixinzhou@163.com

器一种非对称的情况，理论依据主要有场理论、散射矩阵理论、本征值理论等，同时随着电磁仿真软件不断发展，一些详细的参数通过仿真计算得出。本文的 X 波段微带环行器是一种低场器件，即铁氧体内场接近为 0，铁氧体材料的归一化饱和磁化强度 P 选择范围在 0.5~0.6，针对全带宽 X 波段全铁氧体微带环行器 P 值选择为 0.55^[6]。

环行器在环形结沿磁化方向由铁氧体和覆铜板介质两部分组成，如图 1 所示。因此磁导率张量中所涉及的对角分量 μ 和非对角分量 κ 必须进行适当修正，修正后分别定义为 μ' 和 κ' ，修正因子 q 定义为 h/H ，其中 h 为铁氧体厚度， H 为覆铜板厚度，具体为：

$$q = \frac{h}{H} = \frac{0.5}{0.635} \approx 0.79 \quad (1)$$

$$\frac{\kappa'}{\mu'} = \frac{q\kappa}{(1-q) + q\mu} = \frac{\kappa}{(1/q - 1) + \mu} \quad (2)$$

同时，环行器相对工作带宽 2δ 与 κ'/μ' 有以下关系：

$$2\delta \approx \frac{\kappa'}{\mu'} \quad (3)$$

对于低场器件在刚好饱和磁化状态下可认为 $\mu \approx 1$ ，因此在器件相对带宽 2δ 不变的情况下对 P 值选择应当修正为 P/q ，修正后 P 值约为 0.69，从而得铁氧体材料饱和磁化强度约为 2500 G，本设计采用饱和磁化强度为 2500 G 的锂系铁氧体材料。

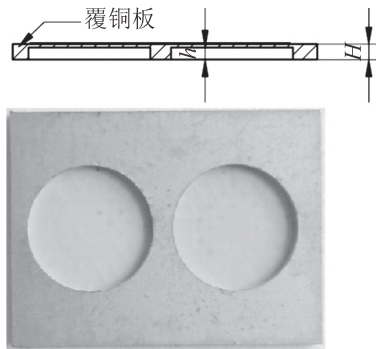


图 1 嵌入式微带环行器覆铜板示意图

2.2 结构组成

基于 PCB 工艺的嵌入式 X 波段双结微带环行器的结构如图 2 所示，主要由以下几部分组成：(1)覆铜板，利用在介质厚度 0.635 mm 的双面覆铜板 (Arlon AD1000)的一面制作电路图形，另一面制作平底孔，本设计采用梳状结图形结构，梳状结采用结

内引入阻抗的方式虽然相对复杂，但其结阻抗设计具有较大的灵活性，为减小器件的平面尺寸提供了更多可能；(2)铁氧体，根据器件带宽等技术指标要求选择相应材料类别和饱和磁化强度；(3)永磁体，选择表面场大小适合的钕钴磁体为铁氧体提供磁化外场；(4)不锈钢底板，选择导磁的不锈钢底板增高器件强度的同时，提供磁体磁场屏蔽，对不锈钢底板应当进行镀银处理以使接地良好；(5)薄膜电阻，选择 50 Ω 薄膜电阻匹配其中一个端口。

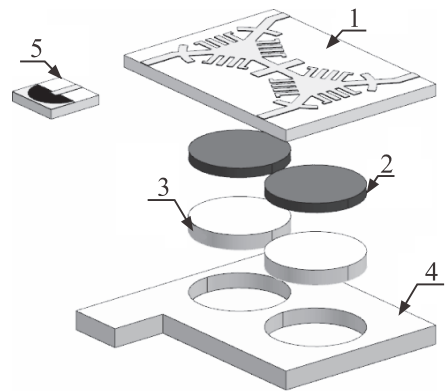


图 2 嵌入式微带环行器结构组成示意图

3 仿真与测试结果

3.1 仿真结果

采用三维电磁仿真软件对环行器进行仿真计算，端口阻抗均按 50 Ω 设计，两块铁氧体磁化方向设置相反，为使问题简化，设置铁氧体沿外场方向均匀磁化且内场为 0，仿真模型如图 3 所示。环行方向设置为端口 1→端口 2→端口 3，第四个端口匹配 50 Ω 薄膜电阻。

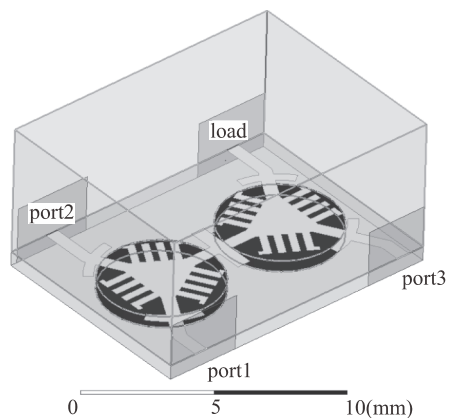


图 3 嵌入式微带环行器仿真模型

具体在实际仿真过程中可以先对单结环行器进行仿真，然后再对双结环行器进行仿真计算。并需

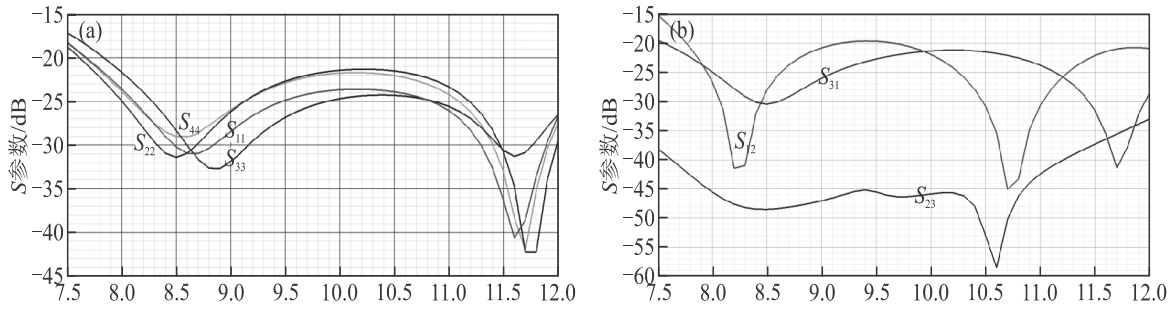


图 4 嵌入式双结微带环行器的(a)回波损耗及(b)隔离度仿真结果

要充分考虑微带电路各个尺寸对公差敏感程度以减少在加工装配过程中的容错性。

仿真分析结果如图 4 所示，表明环行器的四个端口回波损耗均大于 20 dB，单结隔离度 S_{12} 大于 20 dB，双结隔离度 S_{23} 大于 30 dB，满足设计要求。

3.2 器件性能

在器件加工装配方面，采用 PCB 光刻工艺制作微带电路，利用机械加工方式制作覆铜板上的平底圆孔，圆孔与铁氧体圆盘尺寸应当达到紧配合状态，铁氧体圆盘底部应当进行金属化处理，磁体半径应当比铁氧体半径略大以使得铁氧体磁化更加均匀，不锈钢底板表面进行镀银处理并与其他零件用导电胶粘接起来以使接地良好。最终不包括薄膜电阻尺

寸整个测试样件为 12.4 mm×9.5 mm(薄膜电阻尺寸为 3 mm×3 mm)，高度小于 1.8 mm。

环行器的性能测试结果如图 5 所示，表明在 8~12 GHz 频率范围内，端口 1、端口 2、端口 3 的端口电压驻波比均小于 1.4，单结隔离度 S_{12} 大于 17 dB，单结传输损耗 S_{21} 小于 0.8 dB，双结隔离度 S_{31} 均大于 28 dB，双结传输损耗 S_{32} 小于 1.5 dB。由于测试工装的限制，系统校准未能将 SMA 转接头的因素扣除掉，因此上述传输损耗包含两个 SMA 连接器自身损耗，根据 SMA 连接器产品资料显示的信息，单个 SMA 连接器的损耗约 0.15 dB，因此需要将上述有关传输损耗的结果修正为单结传输损耗 S_{21} 小于 0.5 dB，双结传输损耗 S_{32} 小于 1.2 dB。

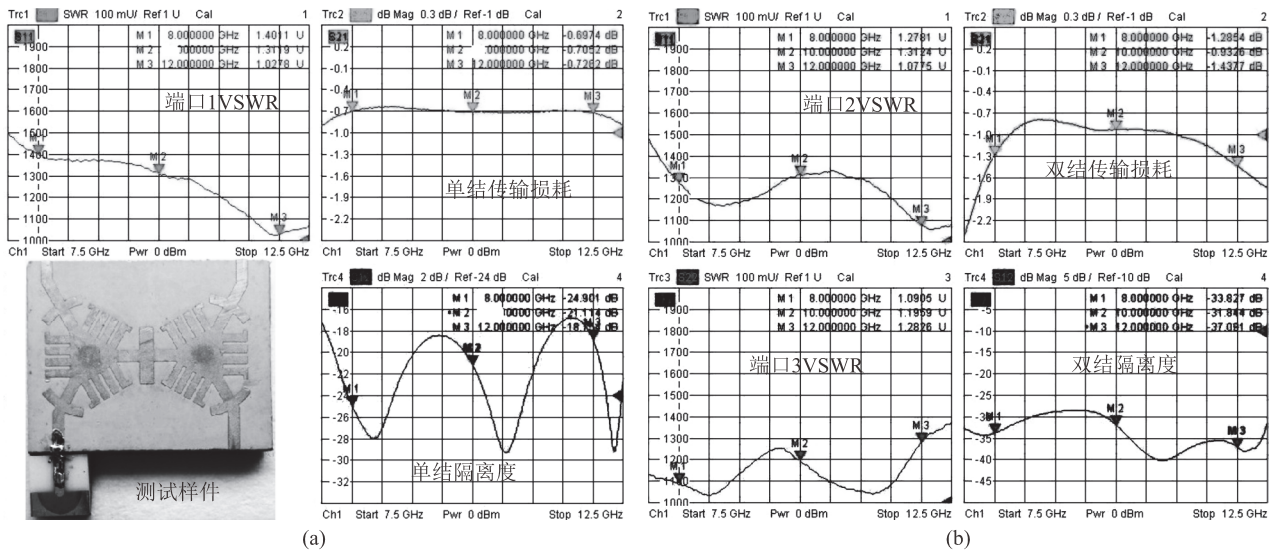


图 5 嵌入式 X 波段双结微带环行器测试结果：(a)单结测试结果，(b)双结测试结果

4 结论

本文首先介绍嵌入式微带环行器的设计思路，提出一种基于 PCB 工艺的嵌入式微带环行器的制作方法，接着对基于 PCB 工艺的嵌入式 X 波段双结微带环行器在三维电磁仿真软件进行了仿真计算，测试结果表明基于 PCB 工艺的 X 波段双结微带环行器

性能优异。

所设计环行器的特点在于：(1)在双面覆铜板上制作微带电路代替铁氧体上制作微带电路，降低了整个器件制作成本，使得器件可以按更大规模去制作电路；(2)充分发挥嵌入式微带环行器的优势，将磁体置于器件底部进一步降低器件高度和减小磁体

(下转 46 页)