

5×5 集总参数环行器的设计

杨春雷¹,徐晶晶²

(1. 南京机电职业技术学院 电子工程系,江苏 南京 211135;
2. 北京航天微电子科技有限公司 南京分公司,江苏 南京 210012)

摘 要:阐述了高场 5 mm×5 mm 集总参数环行器的设计分析,从理论上分析了集总参数环行器的工作原理,简要说明了各个材料选取的理论及实践依据,利用小线宽铁氧体来减小器件插入损耗,使用铁镍合金片对器件进行温度补偿,研制出-40℃~+115℃温度范围内指标稳定的集总参数环行器。参照已研制出 1 805 MHz~1 880 MHz 的 5 mm×5 mm 小插入损耗集总参数环行器,可以进行更高频段的小型化集总参数环行器的设计。

关键词:集总参数;小插入损耗;小型化

中图分类号:TH122 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)06-0074-03

Design of 5×5 Lumped Parameter Circulator

YANG Chunlei¹, XU Jingjing²

(1. Department of Electronic Engineering, Nanjing Vocational Institute of Mechatronic Technology, Nanjing 211135, China;
2. Nanjing Branch, Beijing Aerospace Micro-electronics Technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract: The paper describes the design analysis of lumped parameter circulator of 5 mm×5 mm in size, theoretically analyzes the working principle of lumped parameter circulator and elaborates in brief the theoretical and practical basis selected from various materials. A lumped parameter circulator with stable index in the temperature range of -40℃ - +115℃ is developed by using small wire-width ferrite to reduce insertion loss and adopting fe-ni alloy to compensate the temperature of the device. According to a developed 5 mm×5 mm lumped parameter circulator with small insertion loss from 1 805 MHz to 1 880 MHz, the design of a smaller lumped parameter circulator in higher frequency band is ready.

Keywords: lumped parameter; small Insertion loss; miniaturization

0 引言

环行器自 20 世纪 50 年代问世以来,一直是微波系统的重要组成部分,保证了微波电路的发射和接收部分之间的隔离。由带线环行器理论可知,结环行器内旋磁铁氧体圆片半径 R 与工作波场 λ 成正比。这就意味着频率越低,铁氧体半径 R 越大。为了缩小体积,集总参数环行器应运而生^[1]。

1965 年, KONISHI 提出了一种用铁氧体代替普通 Y 带线环行器中心导体网格结构的集总元件 Y 型环行器,并提出了铁氧体的电势能和张量磁导率随带宽、插入损耗和温度的变化关系理论。1995 年, TARO Miura 采用铁氧体与内导体共烧的方法,研制出了 6 mm×6 mm×3 mm 的圆环形管环行器,在 800 MHz 时插入损耗为 0.7 dB。20 世纪末,日本 TDK 公司率先推出了适合表面贴装的超小型环行器/隔离器,最新产品已经达到了 2.2 mm×2.2 mm×1 mm。到目前为止,国内产品还没有达到此水平^[2]。

照 1 端口到 2 端口再到 3 端口的方向单向传输,不会逆向传输。环行器单向传输的原理,是由于采用了铁氧体旋磁材料。这种材料在外加高频波场与恒定直流磁场共同作用下,产生旋磁特性(又称张量磁导率特性)。这种旋磁特性,使在铁氧体中传播的电磁波发生极化的旋转(法拉第效应)以及电磁波能量强烈吸收(铁磁共振)。利用这个旋磁现象,可以制作出结型隔离器、环行器^[3]。

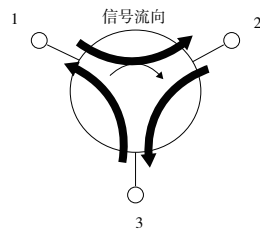


图 1 环行器环行方向示意图

1 环行器设计原理

1.1 环行器基本原理

如图 1 所示,从环行器 1 端口输入的微波信号只会按

1.2 环行器结构

集总参数式环行器实际上是一个非互易微波器件,它的基本结构是由 3 个电感器互成 120°角,彼此交叉绝缘,

置于两片高频铁氧体之间或置于一块铁氧体之上。只要在其三端各接上合适的电容器,在外加直流磁场的轴向磁化下产生旋磁效应,电感之间产生非互易耦合,在理想的情况下旋转对称构成环行器,其环行方向与磁化方向有关。如在第3端口接上匹配负载就成为通常的隔离器。集总参数环行器一般在高场区共振点以上工作,分为并联谐振和串联谐振两种形式。目前主流的集总参数环行器有两种结构:平衡型和不平衡型。平衡型采用两片铁氧体,结构如图2所示;不平衡型只有一片铁氧体,结构如图3所示。

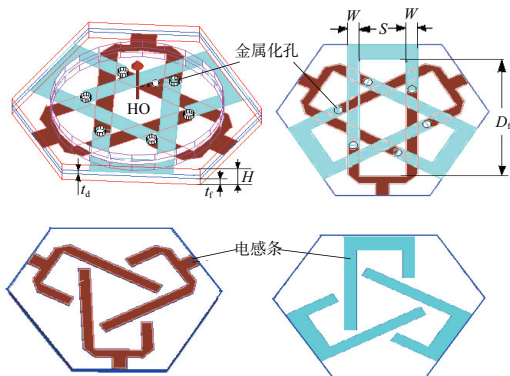


图2 印制电路板平衡型

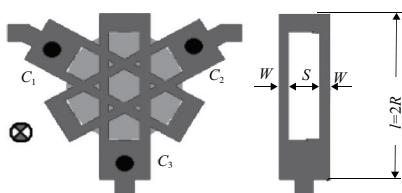


图3 电感条编网不平衡型

图3展示了金属电感条的结构及编织方法和腔体结构,这种方法工艺简单,采用1片铁氧体、3个电感条互成120°角将内导体包围其中,电感条中间用绝缘膜隔开,形成导体-绝缘膜-导体-绝缘膜-导体叠层网状电感结构。三端口处的并联电容 C_1 、 C_2 、 C_3 可以用微型电容压接在内导体上,有利于小型化设计。一般而言,并联电容 $C_1 = C_2 = C_3$,这里的微小差别是由于编网结构叠层不对称所致,用 C_1 、 C_2 、 C_3 的不一致来调整网状结构不对称,以达到三端口性能对称。此外采用导磁腔体与导磁盖板将内部堆叠的片状器件进行封闭式一体安装,不仅能提高环行器的磁路闭合能力,也减小了环行器的体积;另一方面采用整体印刷板和独立焊盘的结构,大大提高了焊接的可靠性,也能增加产品的集成度,实现小型化。

在图3所示结构的3个端口加上并联电容后,就可以得到理想环行器的两个条件:

$$\text{本征导纳 } Y_0 = \frac{\sqrt{3}}{\varepsilon L} \cdot \frac{k}{\mu}, \omega^2 LC = 1 \quad (1)$$

式中: $\frac{k}{\mu}$ 为比磁导率; ω 为工作角频率; L 为电感,其表达式为

$$L = \frac{3}{2} \mu_e L_0 \quad (2)$$

其中: μ_e 为有效磁导率; L_0 为非互易归一化电感值。

$$\text{输入导纳 } Y_{in} = Y_0 + j\omega_0 C \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (3)$$

$$\text{或者用 } Y_{in} = \frac{\sqrt{3}}{\varepsilon L} \cdot \frac{k}{\mu} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (4)$$

$$\text{有载 } Q_L = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\mu}{k} \quad (5)$$

$$\text{并联谐振电容 } C = \frac{Q_L}{\omega Z_0} = \frac{2r}{\omega Z_0 \Delta f} \quad (6)$$

对于20 dB隔离度,相当于 $|r| = 0.1$, Z_0 为环行器端口阻抗,可以看出调整电容 C 和电感 L 可以改变环行器的中心频率。环行器中,电感 L 由下式计算:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C \mu_e} \quad (7)$$

进而可以确定网状电感 L 。

1.3 环行器材料选择

微波铁氧体材料的研制已经到了成熟阶段并广泛应用到各种微波铁氧体器件中。根据使用频率、承受功率、器件插入损耗、带宽和温度稳定性等要求选用不同参数性能的铁氧体材料。例如,饱和磁矩 M_s 高的材料,可适用于高频段工作,共振线宽 ΔH 窄的材料适用于低频低场工作及宽频带设计;居里温度 T_c 高的材料,适应于高平均功率下使用,温度系数 α_T 低的材料有利于宽温条件下使用;对小损耗低功率器件宜选用 ΔH_{eff} 小的材料;自旋波线宽 ΔH_k 高的材料用于高峰值功率的条件。材料电损耗 $\tan\delta$ 大都等于 10^{-4} 量级,比起磁损耗要小一个数量级,所以它对器件损耗影响不大^[4]。本文选取了饱和磁矩为800 Gs的石榴石铁氧体, ΔH 约为15 Oe,介电常数 ε_r 为14.2。

磁路补偿的主要原理是在磁路中串或并上温度系数较大的磁补偿合金片,在一定的温度范围内,使外磁场的变化同材料的 $4\pi M_s$ 变化一致。1J30是一类低居里温度合金,其突出特点是在居里温度以下,磁感值随温度升高而急剧减小,并几乎呈现线性关系。此外作为环行器核心的铁氧体材料的饱和磁矩 $4\pi M_s$ 通常情况下有负温度系数的特征,所以工作在高场区的带线环行器常用和铁氧体材料相类似的负温度系数的锶钙恒磁体作为内置工作场。外加磁场一般使用锶钙铁氧体恒磁,它的温度系数平均为 -0.18% 左右,比材料的 $4\pi M_s$ 变化小,从而影响器件性能变化。

2 仿真与测试结果

2.1 HFSS 仿真方法及结果

图4是本器件的仿真模型,本模型编织网状电感条 L 宽为0.21 mm,并联电容 C 值约为2.5 pF,3个独立的互感条交叉120°,相互间用绝缘介质隔开,间距0.01 mm。铁氧体尺寸为 $2.2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 0.22 \text{ mm}$, $4\pi M_s = 800 \text{ Gs}$,在 $H_i = 6.1 \text{ kA/m}$ 的内磁场作用下,得到图5和图6的仿真结果^[5]。

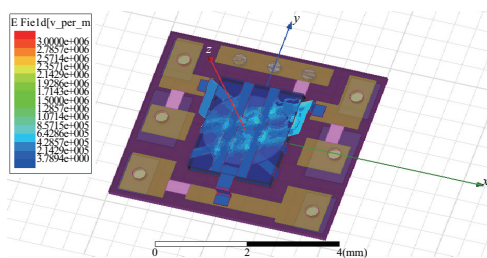


图4 仿真模型及场强分布图

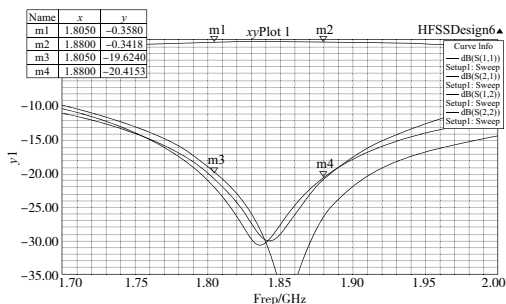


图5 HFSS 仿真 S 参数图

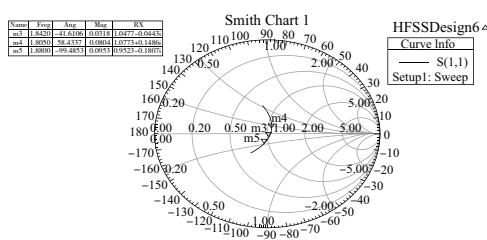


图6 HFSS 仿真 Smith 圆图

由图5可知,1 805 MHz~1 880 MHz 范围内驻波隔离度均达到-19.6 dB,插入损耗均<0.36 dB,回波损耗 S11、S22 和隔离度 S21 具有良好的一致性。由图6的Smith 曲线图可知,此时曲线是围绕匹配点1的圆弧,说明在此频段内,环行器的整个阻抗匹配是比较好的。

2.2 实验测试结果

1) 常温测试结果

如图7所示,在网络分析仪上实际测得的指标与仿真结果相差无几,在1 805 MHz~1 880 MHz 的通带范围内,回波损耗可以达到-18 dB 以下,隔离度达到-19 dB 以下,常温插入损耗在0.4 dB 左右,通过调节并联电容的大小可以使器件获得良好的一致性。

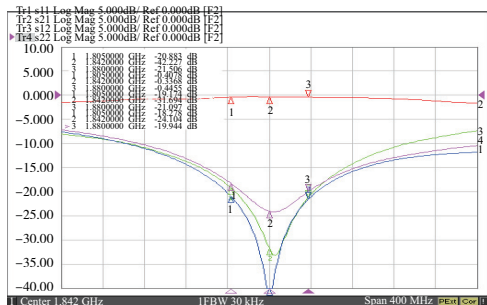


图7 网分实测 S 参数图

2) 高低温测试结果

本器件通过 1J30 合金片进行温度补偿,其温度在-40℃~+115℃ 的范围内具有良好的稳定性。图8 是基于大量实验数据下得出的器件在该温度范围内与常温状态相比较的最大插入损耗变化度。通常情况下在0.2 dB 左右,即在-40℃~+115℃ 的温度范围内插入损耗最大值为0.6 dB 左右。图9 显示了在-40℃~+115℃ 的温度范围内回波损耗的最大值在-16 dB 左右,与常温相比变化了2 dB~5 dB。本器件带宽较窄,旋磁材料饱和磁矩随温度的变化对环行器特性参数影响很大,主要是因为温度的变化引起中心频率的漂移^[6]。因此追踪曲线的中心频点1 842 MHz 点,在-40℃~+115℃ 的温度范围内中心频率变化控制在25 MHz 以下,证明其具有良好的温度稳定性。

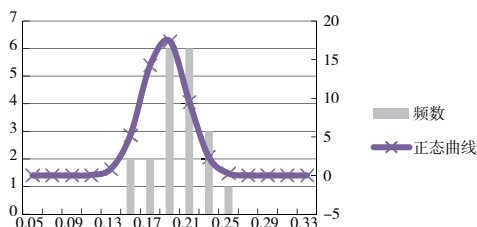


图8 高低温插入损耗变化量正态分布

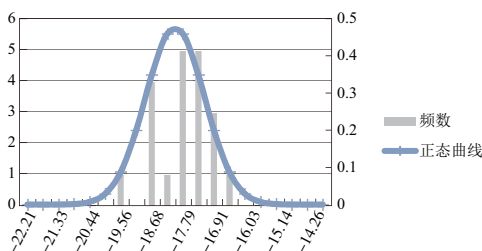


图9 高低温回波损耗最低值正态分布图

3 结语

本文主要阐述了5 mm×5 mm 集总参数环行器的设计,从设计原理到各个材料的选择,再到仿真以及温度补偿都作了简单的介绍,在减小插入损耗方面取得了重大突破。在已研制出来的1 805 MHz~1 880 MHz 频段的集总参数环行器基础上,可以研究出更高频段的小型化集总参数环行器。

参考文献:

- [1] 任传福. 集中参数环行器的设计[J]. 系统工程与电子技术, 1991, 13(2): 38-43, 50.
- [2] 刘水平,汪晓光. 微波大功率集中参数环行器的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2019.
- [3] 李宗谦,余京兆,高葆薪. 微波工程基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [4] 蒋仁培,宋淑平. 微波铁氧体器件 HFSS 设计原理·下册[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [5] 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010.
- [6] 阚敏,方从孝,李昌德. 集中参数环行器温度补偿的有效方法[J]. 磁性材料及器件, 1979, 10(4): 24-28, 36.

收稿日期:2021-07-15