

一种新型的高抑制度波导滤波器设计

张 宇^{1,2},渠芳芳^{1,2}

(1.中国电子科技集团公司第39研究所,陕西 西安 710065;2.陕西省天线与控制技术重点实验室,陕西 西安 710065)

摘要:针对目前频谱资源拥挤所提出的频带间高隔离度需求,提出了一种新型的小型化高抑制度波导滤波器。在传统波导滤波器的非相邻谐振腔间引入新型的波导CT型感性交叉耦合结构,使其在阻带产生有限的传输零点,进一步提高带外抑制,缩小了滤波器的体积,且降低了因腔体个数而引入的损耗。同时,根据其结构的不连续性,采用模式匹配法进行优化设计,设计周期短,性能很好。

关键词:高抑制度;交叉耦合;传输零点;模式匹配法

中图分类号: TN713

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.222575

中文引用格式: 张宇,渠芳芳. 一种新型的高抑制度波导滤波器设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(7): 110-113.

英文引用格式: Zhang Yu, Qu Fangfang. Design of a novel waveguide filter with high suppression[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(7): 110-113.

Design of a novel waveguide filter with high suppression

Zhang Yu^{1,2}, Qu Fangfang^{1,2}

(1.The 39th Research Institute of CETC, Xi'an 710065, China;

2.Shaanxi Key Laboratory of Antenna and Control Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: According to the current requirements for high isolation between frequency bands caused by congested spectrum resources, a new type of miniaturized high suppression waveguide filter is proposed in this paper. Based on traditional waveguide filters, this paper introduces a new CT-type inductive cross-coupling structure between non-adjacent resonators which results in limited transmission zeros in the stopband, and further improves out-of-band rejection, reduces the size of the filter, and reduces the loss introduced by the number of cavities. At the same time, because of the discontinuity of its structure, the mode-matching technique is used to design and optimize the filter. With this method, the design cycle of filter is very short and performance is particularly good.

Key words: high suppression; cross coupling; transmission zero; mode-matching technique

0 引言

随着微波通信技术的飞速发展,频谱的日益拥挤,信道容量要求的日益提高,对滤波器的性能指标也提出了更高的要求。在满足高选择性、小尺寸、通带内低插入损耗的前提下,相邻频带之间的隔离已成为一个关键问题,这就急需低损耗、高带外抑制的带通滤波器。因此,在传统波导滤波器的基础上,本文在不相邻的谐振腔间引入额外的新型交叉耦合结构,使其在阻带产生有限的传输零点,以此来增加截止频率的陡度,提高滤波器的性能,具有十分重要的意义。

在同轴腔体滤波器的设计中,采用交叉耦合结构应用非常广泛。而在波导滤波器中,通常在传统直通波导滤波器基础上,通过增加大量的谐振腔个数^[1-2]实现,但由于腔体个数的增加,导致滤波器损耗增大,尺寸与体积也进一步增大,同时性能改善并不显著。随着性能要求的日益提高,目前也有学者陆续提出了在波导滤波器

中引入交叉耦合结构。例如在传统直通波导滤波器的非相邻谐振腔外部添加同轴线和弯头结构实现交叉耦合^[3],此结构较为简单,但设计时需通过大量仿真,且加工完成后必须经过调试,较为复杂;带交叉耦合的折叠型波导滤波器^[4-6]由于其结构的性质,没有固定的设计方法,往往在得到初始尺寸后需要进行软件优化才能得到期望的响应。这种优化由于非常耗时,从而增加了滤波器的设计周期。

本文在传统直通波导滤波器的基础上,在不相邻的谐振腔间引入新型的波导CT型感性交叉耦合结构,利用H面膜片实现磁耦合。与传统的波导滤波器相比,本文减少了滤波器的腔体个数,进一步缩小了滤波器的体积,且降低了因腔体个数而引入的损耗。同时,根据其结构的不连续性,采用模式匹配法进行优化设计,缩短了传统设计需大量仿真所耗的时间,设计周期短,加工成品无需调试,性能很好,可广泛应用于生产。

1 理论分析及设计

1.1 CT 型感性交叉耦合原理

在滤波器的分类中,除了直接耦合,交叉耦合在滤波器中也扮演着极其重要的角色。相比直接耦合,交叉耦合由于传输零点的引入,大大地提高了滤波器的带外抑制,是一种改善滤波器性能的重要方法。

一般来说,如果滤波器相邻谐振器之间既有电耦合又有磁耦合,那么由于这两种不同性质的耦合结构对信号相移特性的不同,信号在经过不同路径汇聚一处时相位便不相同。当相位在该点相互抵消为零时,就产生了一个传输零点,这就是交叉耦合的原理。因此,要有零点的产生,必须至少有两条信号路径,并且满足一定的相位差关系。

本文引入 CT 型感性交叉耦合结构,使其在通带高频处产生传输零点,进一步提高对高频的抑制度。如图 1 所示,CT 型感性交叉耦合结构由 3 个谐振腔组成,两条耦合路径为直接耦合和交叉耦合路径,通道 1:1-2-3;通道 2:1-3;感性耦合相移为 -90° 。

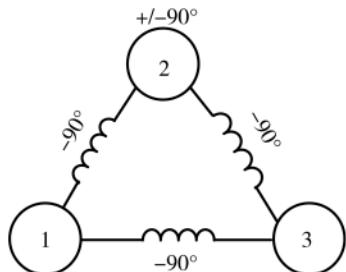


图 1 CT 型感性交叉耦合拓扑结构

由表 1 分析所得,CT 型感性交叉耦合在经过不同路径汇聚一处时,在通带低频相位相同,在通带高频相位相反。因此,该结构在高频带外处产生了一个传输零点,传输特性曲线如图 2 实线所示,无交叉耦合结构传输曲线为图中虚线所示,可以发现通过引入传输零点,带外抑制曲线下降陡峭,隔离度更高。在设计中可以通过改变非相邻谐振腔间的耦合强度及引入的交叉耦合结构数量,调整传输零点的位置及个数,实现隔离度需求。

表 1 CT 型感性交叉耦合相位分析 (°)

通道	低频	高频
通道 1-2-3	$-90+90-90=-90$	$-90-90-90=-270$
通道 1-3	-90	-90
相位	同相	反相

1.2 波导 CT 型感性交叉耦合结构

根据现代微波滤波器理论^[7],带通滤波器的等效电路如图 3 所示。用一系列的串联谐振电路作为谐振腔,谐振腔之间由 K 变换器耦合。耦合系数用 $K_{n,n+1}$ 表示,阻抗用 R 表示。

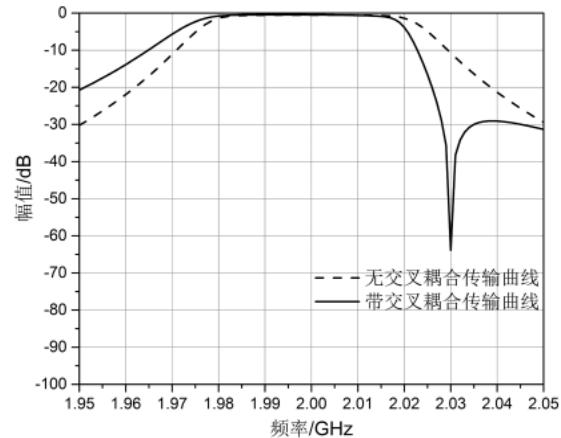


图 2 CT 型感性交叉耦合拓扑结构传输特性曲线

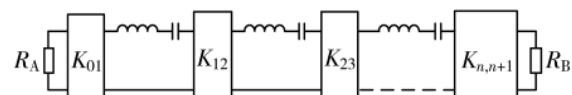


图 3 带通滤波器等效电路图

H 面膜片波导滤波器的结构如图 4 所示。膜片与主模 TE_{10} 模的磁场垂直,相邻膜片之间则构成谐振腔。它用半波导波长的波导段作为串联谐振器,每一节长度近似为 $\lambda_{g0}/2$,用电感膜片形成的并联电感作为耦合结构,每对膜片窗口的大小可以控制两串联谐振器耦合的强弱。窗口越大,两个谐振器间的耦合越强,形成的滤波器通带带宽越宽。

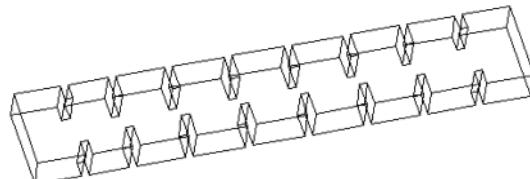


图 4 H 面膜片波导滤波器模型

波导谐振腔间的耦合结构主要是膜片耦合,一般包括电耦合和磁耦合。在波导腔电场较强处,耦合为电耦合;在磁场较强处,耦合为磁耦合。对于矩形波导腔中的 TE_{101} 模,电场垂直于宽壁,而磁场是平行于宽壁的闭合曲线。在宽壁边缘加入膜片,使得膜片处的磁场更集中,因此这种耦合属于磁耦合。

本文根据 CT 型耦合实现所需相位关系,提出了将 3 个波导谐振腔按 T 型三角放置的结构,如图 5 所示。该

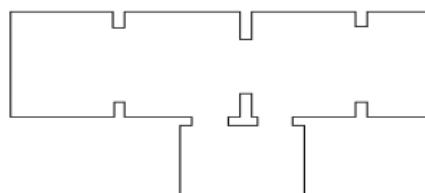


图 5 新型波导 CT 型感性交叉耦合结构

CT 结构有两路耦合路径, 其中每个相邻谐振腔间通过磁耦合实现 90°的相位差。因此会在高频带外处反相, 产生传输零点, 进一步提高带外抑制度。

1.3 H 面不连续模式匹配法

如图 6 所示, H 面双边不连续性是一种较简单的双端口网络不连续性^[8]。在该结构中, 主模 TE₁₀ 只能激励起 TE_{2m+1,0} 模, 不能激励起 TM_{mn} 模, 因此传播方向的电矢量位函数 $A_{ex}=0$ 。横向电磁场的匹配式为:

$$\begin{aligned} & \sum_{q=1}^{\infty} Q_{hq}^I (\nabla_t T_{hq}^I \times \hat{z}) (A_{hq}^{I+} + A_{hq}^{I-}) \\ &= \sum_{q=1}^{\infty} Q_{hq}^{II} (\nabla_t T_{hq}^{II} \times \hat{z}) (A_{hq}^{II+} + A_{hq}^{II-}) \\ &= \frac{1}{j\omega\mu} \sum_{q=1}^{\infty} Q_{hq}^{II} \Gamma_{hq}^I \nabla_t T_{hq}^I (A_{hq}^{I+} - A_{hq}^{I-}) \quad (1) \\ &= \frac{1}{j\omega\mu} \sum_{q=1}^{\infty} Q_{hq}^{II} \Gamma_{hq}^{II} \nabla_t T_{hq}^{II} (A_{hq}^{II+} - A_{hq}^{II-}) \quad (2) \end{aligned}$$

其中, Q_{hq} 表示 I、II 区第 q 个 TE_{2m+1,0} 模式的归一化系数, T_{hq} 表示 I、II 区第 q 个 TE_{2m+1,0} 模式的本征函数, A_{hq} 表示 I、II 区第 q 个 TE_{2m+1,0} 模式的磁矢量位函数, Γ_{hq} 表示 I、II 区第 q 个 TE_{2m+1,0} 模式的传播常数, $q=1, 3, 5, \dots$ 。

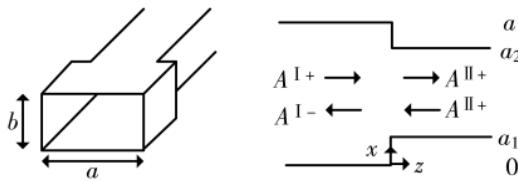


图 6 H 面双边不连续性

I、II 区第 q 个 TE_{2m+1,0} 模式的本征函数分别为:

$$T_{hq}^I = \cos\left(\frac{q\pi x}{a}\right) \quad (3)$$

$$T_{hq}^{II} = \cos\left(\frac{q\pi(x-a_1)}{a_2-a_1}\right) \quad (4)$$

I、II 区第 q 个 TE_{2m+1,0} 模式的归一化系数的表达式如下:

$$Q_{hq}^I = \frac{2}{\sqrt{ab}} \frac{\sqrt{Z_{hq}^I}}{k_{chq}^I} \quad (5)$$

$$Q_{hq}^{II} = \frac{2}{\sqrt{(a_2-a_1)b}} \frac{\sqrt{Z_{hq}^{II}}}{k_{chq}^{II}} \quad (6)$$

式中, Z_{hq}^I 、 Z_{hq}^{II} 分别为 I、II 区第 q 个 TE 模式的波阻抗。截止波数分别为:

$$k_{chq}^I = \frac{q\pi}{a} \quad (7)$$

$$k_{chq}^{II} = \frac{q\pi}{a_2-a_1} \quad (8)$$

根据模式匹配方法, 磁矢量位函数满足:

$$A_{hq}^{I+} + A_{hq}^{I-} = N_{hh}(A_{hq}^{II+} + A_{hq}^{II-}) \quad (9)$$

$$N_{hh}(A_{hq}^{II+} - A_{hq}^{II-}) = A_{hq}^{I+} - A_{hq}^{I-} \quad (10)$$

求得 I、II 区的 TE 模耦合系数:

$$N_{hh}(p, q) =$$

$$\frac{2}{\sqrt{a(a_2-a_1)}} \sqrt{\frac{\beta_{hq}^I}{\beta_{hq}^{II}}} \int_{a_1}^{a_2} \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left[\frac{q\pi(x-a_1)}{a_2-a_1}\right] dx \quad (11)$$

根据不连续处前后波的关系得到散射矩阵, 并对多个不连续处及波导段级联^[9], 获得广义散射矩阵。

本文所设计的滤波器采用 H 面不连续性结构, 因此可基于此模式匹配法进行设计, 对多个 H 面不连续台阶结构网络进行级联, 即可得到所需要的滤波器的 S 参数。利用 MATLAB 编写程序^[10]仿真优化, 快速地得到所需结构的尺寸。

与传统仿真软件设计相比, 采用模式匹配法编写程序进行分析, 一方面缩短了全波仿真所耗的大量时间; 另一方面可通过程序快速的优化, 得到满足要求的最优解, 且精度高, 为设计带来了很大的便捷。

2 新型的波导 CT 型滤波器设计实例

本文基于模式匹配法设计了一款新型交叉耦合式的 S 频段波导滤波器。工作频率为 2.1~2.25 GHz, 回波损耗 ≥ 25 dB, 在频段 2.29~2.5 GHz 频段内隔离度 ≤ -80 dB。

设计步骤:

(1) 根据指标要求, 利用广义切比雪夫理论, 反推出所需要的滤波器腔体个数为 9, 带外需要 3 个传输零点, 因此引入 3 个 CT 型交叉耦合结构, 通过电感膜片进行耦合。

(2) 根据滤波器的通带频率范围, 算出中心频率 2.2 GHz 的半波导波长, 采用半波长 95 mm 的波导段作为谐振腔的初始值。

(3) 根据滤波器的通带频率为 2.1~2.25 GHz, 选定电感膜片厚度为 2 mm。由耦合系数的大小, 选取膜片的初始宽度; 调整交叉耦合的膜片宽度, 进一步改变传输零点的位置, 改善带外抑制特性。由此, 确定膜片的初始宽度。

(4) 根据给定的初始谐振腔长度及耦合膜片的厚度、宽度, 利用 H 面不连续结构的模式匹配法进行分析, 对各个参数的初值进行优化, 得到滤波器的最终尺寸。

在满足同样指标的前提下, 本文所设计的滤波器与传统滤波器的仿真模型如图 7(a)和 7(b)所示, 加工实物如图 8 所示, 本文滤波器尺寸为原尺寸的一半。该新型滤波器采用高频电磁仿真软件 HFSS 仿真与矢量网络分析仪实测, 结果如图 9 所示。

从仿真及测试结果图 9 中可看出, 在 2.1~2.25 GHz 频带范围内, 滤波器的回波损耗优于 25 dB, 同时在频段带外高频外产生了 3 个传输零点, 获得陡峭的抑制边带, 提高了带外抑制度, 满足了在频段 2.29~2.5 GHz, 隔



(a) 新型滤波器的仿真模型



(b) 传统滤波器的仿真模型

图 7 滤波器的仿真模型

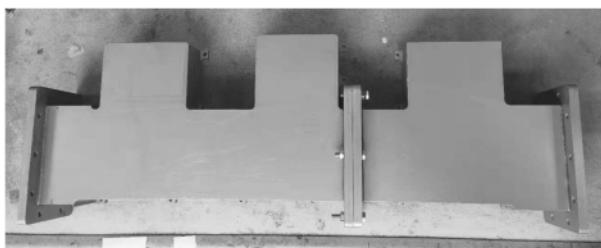


图 8 新型波导 CT 型滤波器实物图

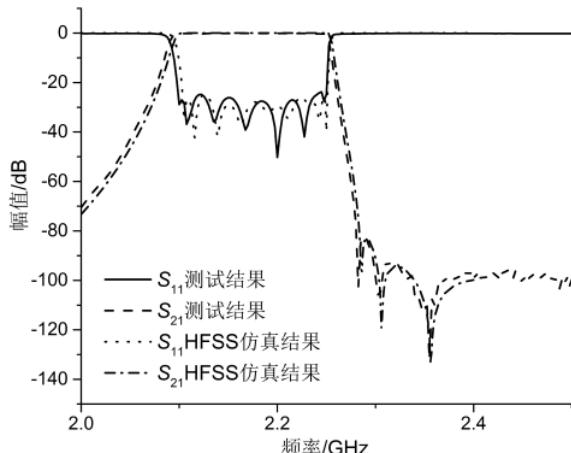


图 9 新型滤波器的仿真与实测结果

离度大于 80 dB 的指标要求。由图 9 可知, 该双工器在通带内损耗小于 0.3 dB。忽略测试仪器噪底误差及转接头影响, 滤波器驻波与隔离的仿真和实测结果吻合良好。

与传统滤波器相比, 本文所设计的新型波导双工器不仅尺寸小, 且该滤波器采用模式匹配法分析, 设计周期极短, 加工实物无需调配, 可广泛应用于工程。

(上接第 109 页)

- band Doherty power amplifier[C]//2021 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), 2021.
- [13] ESTEBSARI M, NASRI A, PIACIBELLO A, et al. 3.1–3.6 GHz 22 W GaN Doherty power amplifier[C]//2020 23rd International Microwave and Radar Conference (MIKON), 2020;

3 结论

本文在传统波导滤波器的基础上, 通过在非相邻谐振腔间引入新型的波导 CT 型感性交叉耦合结构, 在满足通带内驻波良好、插入损耗低的前提下, 使其在阻带产生有限的传输零点, 进一步提高了滤波器的带外抑制特性, 减小了滤波器的损耗, 缩小了滤波器的尺寸。同时, 根据其结构的不连续性, 采用模式匹配法进行优化分析, 缩短了传统设计需大量仿真所耗的时间, 设计周期短, 性能极佳, 具有很大的工程价值。

参考文献

- 王惠生, 李磊, 冯文文. H 面波导双工器的工程设计[J]. 电子技术, 2015(5): 79–81.
- 余剑钊, 蔡辉, 陆敏婷, 等. 一种可靠的波导滤波器分析设计方法[J]. 信息通信, 2017(12): 19–21.
- 李玉娇, 王锡良. 交叉耦合在直线型波导滤波器中的研究[J]. 电子元件与材料, 2012, 31(11): 49–51.
- 邓向科, 何松柏. Ku 波段交叉耦合波导滤波器的精确设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(5): 15–18.
- 侯飞, 钟丽, 张先荣. 电容加载波导双工器[J]. 信息与电脑(理论版), 2009(8): 123–124.
- 朱翔. H 面叠层结构波导小型化滤波器研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- 甘本祓, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- GENTILI G G. Properties of TE-TM mode-matching techniques[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(9): 1669–1673.
- UHER J. 天馈系统中波导元件: 理论与计算机辅助设计[M]. 杨乃恒, 译. 西安: 电子部十四研究所国防科技天线与微波重点实验室, 1995.
- 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

(收稿日期: 2022-01-15)

作者简介:

张宇(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 天线与微波技术。

渠芳芳(1992-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 天线与微波技术。



扫码下载电子文档

424–426.

(收稿日期: 2022-04-20)

作者简介:

蔡俊祺(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 模拟/射频 IC 设计。

卜刚(1969-), 通信作者, 男, 博士后, 教授, 主要研究方向: 集成电路设计, E-mail: bugang@nuaa.edu.cn。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所