

基于微带 SIR 的单环及双环双模滤波器设计

程维伟^{1,2,3}, 尹治平^{1,3}, 吕国强^{1,3}

(1. 合肥工业大学 特种显示技术教育部重点实验室, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 合肥工业大学 光电技术研究院 安徽 合肥 230009)

摘要 采用阶跃阻抗方环代替传统的均匀阻抗方环结构, 设计一种基于阶跃阻抗谐振器的微带双模滤波器。为增强滤波器的带外抑制和谐波抑制特性, 将双模滤波器从单环结构扩展到双环, 两环之间通过偏馈微带线耦合。通过一个中心频率为 2.5 GHz、带宽约 300 MHz 的滤波器设计和仿真, 证实了基于 SIR 的方环双模滤波器不但具有尺寸上的优势, 而且能通过级联获得传输零点多、带外抑制高、谐波抑制好的优点。

关键词 双模谐振器; 带通滤波器; 微扰结构; 阶跃阻抗谐振器

中图分类号 TN713⁺.2 **文献标识码** A **文章编号** 1007-7820(2012)09-075-04

Study of Single-loop and Double-loop Dual-mode Filters with Microstrip SIR

CHENG Weiwei^{1,2,3}, YIN Zhiping^{1,3}, LÜ Guoqiang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Special Display Technology, Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
3. Academy of Opto-electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract A type of microstrip dual mode filter based on the step-impedance resonator is designed, which consists of the step-impedance square-loop instead of the conventional uniform impedance square-loop. To enhance the out-band and harmonic suppression, the structure of this filter is extended from single loop to double loop coupled by the bias-feeding microstrip. The design and simulation of a filter with a 2.5 GHz operating frequency and 300 MHz passband shows that the double-loop dual mode filter with SIR shows superiority in size and has such advantages as multiple transmission zeros and good out-band and harmonic suppression.

Keywords dual-mode resonator; band pass filter; perturbation structure; step impedance resonator (SIR)

滤波器是电子通信系统中必不可少的器件之一。使用单模或双模谐振器来实现微波带通滤波器的方法已广为所知, 其中微带双模滤波器以其性能优、尺寸小、重量轻、易于加工等优点而获得了广泛关注^[1-9]。双模滤波器是利用单个谐振腔里的两个可分离的简并谐振模式来设计滤波器。双模谐振器具有双调谐回路的特性, 即同时可产生两个谐振频率点, 经过特殊设计的扰动之后, 这两个谐振频率可以适当地分开并相互耦合, 使得滤波器设计所需要的固有阶数可以减小 1/2, 便于设计出紧凑的结构, 从一定程度上解决了滤波器的小型化问题^[1]。1972 年 Wolff 首次将双模的概念应用到微带环形谐振器, 成功地设计了一种双模带通滤波器^[2]。此后有大量文献研究提出各种新型的双

模结构, 除了结构上的创新^[3-4,9], 也有诸多文献关注性能的优化, 如抑制谐波^[5]、减小插损^[6]、缩小体积^[6-7]、传输零点分析^[8]等。

尽管经历了多年的研究, 双模滤波器仍未形成完善的分析和设计理论, 但鉴于目前三维电磁仿真软件强大的模拟仿真能力, 使得在定性分析指导下的双模滤波器的设计、仿真和研制都变得便捷。文中采用传统的微带方环结构谐振器, 设定目标中心频率为 2.5 GHz, 定量计算出方环大致尺寸, 然后用阶跃阻抗线结构代替均匀阻抗线结构, 再利用基于电磁场有限元方法的高频电磁仿真软件 HFSS 分别对传统 UIR 结构滤波器和新型 SIR (Step Impedance Resonator) 结构滤波器进行仿真, 对比了两者的尺寸和性能, 并研究了各种参数对其性能的影响, 最后将 SIR 结构的方环谐振器进行级联, 获得更多的传输零点和更好的带外抑制。

1 单环双模滤波器设计和仿真

图 1 和图 2 分别是传统均匀阻抗方环双模带通滤

收稿日期: 2012-04-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2011HGQC1001); 合肥工业大学博士学位人员专项基金资助项目 (2011HGBZ0943)

作者简介: 程维伟 (1987—), 男, 硕士研究生。研究方向: 射频微波电路。

波器^[3]和文中采用的阶跃阻抗方环双模带通滤波器^[9]。输入输出方式采用非对称的正交耦合馈电,这样可以在带外产生一对对称的传输零点,提高阻带的抑制特性。

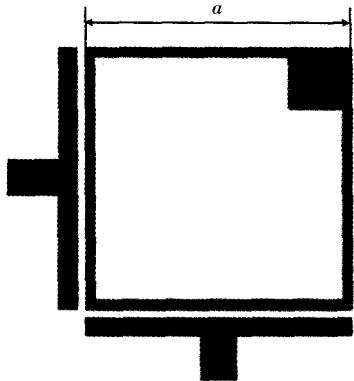


图1 传统的方环谐振器双模滤波器

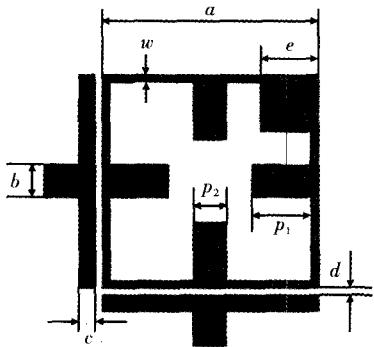


图2 采用 SIR 结构的方环双模滤波器

1.1 SIR 结构

图3揭示了阶跃阻抗谐振器(SIR)的基本结构,即为文中采用的滤波器的基本结构。SIR 结构具有在不减小无载 Q 的情况下缩短谐振器长度的能力。它由两段不同特征阻抗的传输线组成。从开路端看进去的输入导纳 Y_i 的表达式为^[10]

$$Y_i = j Y_2 \frac{\tan \theta_2 + R_z \tan \theta_1}{1 - R_z \tan \theta_1 \tan \theta_2} \quad (1)$$

Z_1, Z_2, θ_1 和 θ_2 分别为两段不同阻抗的传输线的特征阻抗和电长度; R_z 为阻抗比, 定义为

$$R_z = Y_1 / Y_2 = Z_2 / Z_1 \quad (2)$$

设 $Y_i = 0$, 那么谐振条件为

$$\tan \theta_2 + R_z \tan \theta_1 = 0 \quad (3)$$

相对于对应 UIR 的电学长度, 归一化谐振器长度可定义为

$$L_n = (\theta_1 + \theta_2) / \pi \quad (4)$$

替换相关参数, 式(4)可进一步转换为

$$L_n = \left(\theta_2 + \tan^{-1} \left(-\frac{\tan \theta_2}{R_z} \right) \right) / \pi \quad (5)$$

当 $R_z = 1$ 时, 谐振器的归一化长度 $L_n = 1$, 即为 UIR。当 $R_z > 1$ 时, $L_n < 1$ 。这时, 相比 UIR 长度的谐振器, 其长度有所减小, 从而达到尺寸小型化的目的。

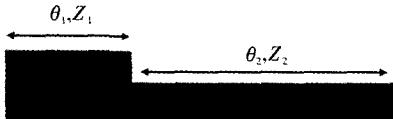


图3 阶跃阻抗结构

1.2 两种结构的建模及仿真

为方便设置相关参数的初始值, 取设计的带通滤波器中心频率为 2.5 GHz, 输入和输出的特性阻抗为 50 Ω。微带线中导波波长 λ_g 由相速 u_p 和频率 f 共同决定, 而相速 u_p 又与相对介电常数 ϵ_r 有关, 关系如下^[11]

$$\lambda_g = \frac{u_p}{f} \quad (6)$$

$$u_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

ϵ_r 的具体数值取决于微带介质基本厚度 h , 导体带宽度 w 和介质的相对介电常数 ϵ_r ,

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} \quad (8)$$

采用介质基板的相对介电常数为 6.15, 厚度 1.27 mm。根据式(8)计算导波波长 λ_g 为 60 mm。对于方环谐振器, 第一个谐振频率发生在

$$(a_{\text{外}} + a_{\text{内}})/2 \approx \lambda_g/4 \quad (9)$$

其中, $a_{\text{外}}$ 和 $a_{\text{内}}$ 分别为方环外周和内周的边长, 假设线宽 $w = a_{\text{外}} - a_{\text{内}} \ll a_{\text{外}}$, 式(9)可进一步简化为

$$a_{\text{外}} \approx \lambda_g/4 \quad (10)$$

于是初步取方环边长为 1/4 个 λ_g , 即 15 mm。按此尺寸在 HFSS 中建立 SIR 结构的模型, 经过大量的微调和优化仿真, 选取了一组数据 $a = 13$ mm, $b = 2$ mm, $c = 1$ mm, $d = 0.1$ mm, $e = 3$ mm, $p_1 = 3.5$ mm, $p_2 = 2$ mm, $w = 0.5$ mm, 具有良好的通带效应, 并将传统结构和 SIR 结构滤波器的仿真 S 参数加以比较, 如图 4 所示。两款滤波器性能相当, 中心频率为 2.5 GHz, 通带 2.35 ~ 2.65 GHz, 相对带宽 12%, 带内插入损耗 0.3 dB, 反射 < -15 dB, 上下边带各有一个传输零点, 抑制达到 -60 dB, 较大地提高了带外抑制能力。从中得知, 在同一中心频率下, 当采用传统的等阻抗传输线时, 边长 a 为 15.5 mm, 与初始计算值很接近; 当采用阶跃阻抗线时, a 为 13 mm, 尺寸减小到 16%, 不但达到了小型化的目的, 通过仿真曲线还能看到, 它比传统结构具有更好的带外抑制和带内反射效果。

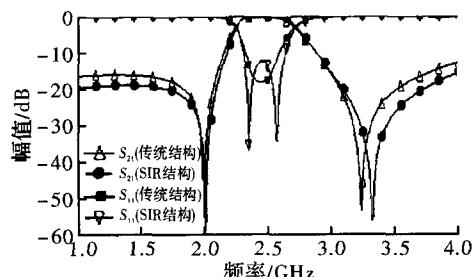


图 4 传统结构和 SIR 结构的频率响应曲线

1.3 各个参数对滤波器的影响

图 5 和图 6 分别为各参数在其他参数不变的情况下,两个主要参数对滤波器性能的影响。由于边长 a 决定了谐振腔的总尺寸,进而决定谐振器的大体谐振频率,因此并无特殊研究的必要。对于 SIR 结构除了边长,阻抗比也能影响谐振频率的位置。结构中固定阻抗 Z_2 ,即固定线宽 w ,而通过改变 p_1 的大小来改变阻抗比。图 5 为不同阻抗比的条件下谐振频率的变化。该图表明,随着阻抗比的提高,中心频率降低,符合上文的分析结果。基于此,当采用该结构设计双模滤波器时,可选取偏小的边长来获得高于设计目标的中心频率,再通过提高两段传输线的阻抗比获取目标中心频率,从而实现减小滤波器尺寸的目的。

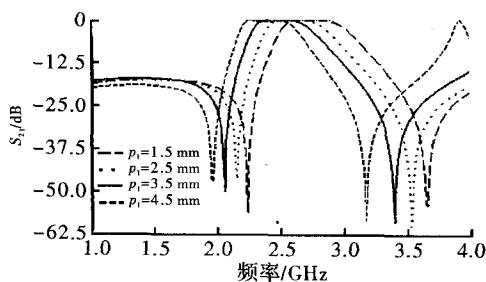
图 5 p_1 对滤波器中心频率的影响

图 6 表明了微扰大小的变化对滤波器性能的影响。随着微扰的增大,造成的模式扰动随之增大,两简并模分离的程度越高,滤波器的带宽也随之增大,传输零点的位置也随着偏移。

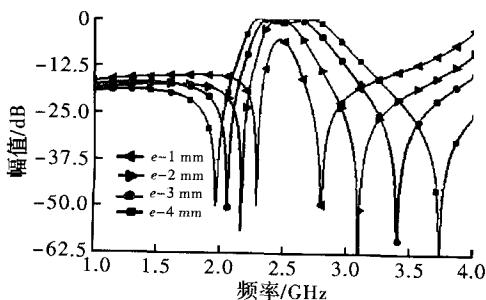


图 6 微扰尺寸对滤波器带宽的影响

2 双环双模滤波器的设计和仿真

尽管单环结构滤波器能够获得较好的通带响应和传输零点,但它对远端阻带的抑制却并不理想,如图 7 所示。文中通过级联两个相同的谐振器获得 4 阶滤波器,达到提高阻带抑制的目的,结构如图 8 所示。两个相同的 SIR 方环谐振器用 H 型耦合枝节连接,这种结构较好地抑制了高次谐波,并提高了对高阻带的抑制。值得注意的是,多级双模滤波器并不只是简单地将几个相同的单环结构级联,因为它不但包括单个谐振腔内部简并模的分离和耦合,还涉及到不同谐振器之间不同模式间的耦合^[8]。于是,为增加调试的自由度,双环结构引入一个特殊的参数:馈线的偏移,这里包括输入输出耦合馈线的偏移 s_1 和 H 形耦合枝节横向连接馈线的偏移 s_2 。从仿真结果如图 9 所示,不同的偏移量 s_1 和 s_2 对带内匹配影响有限,但会大幅影响传输零点的数量和位置,以及对谐波的抑制。从结构上分析,偏馈造成两个谐振环的非对称响应,从而在带外产生不重合的传输零点,亦增强了高次谐振点的分离。为比较双环的 4 阶滤波器与单环的 2 阶滤波器的性能,采用第一节单环结构的基本尺寸和介质基板,经过适当微调,确定一组参数: $a = 13 \text{ mm}$, $c_1 = 1 \text{ mm}$, $c_2 = 0.6 \text{ mm}$, $d_1 = 0.1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.1 \text{ mm}$, $e = 4 \text{ mm}$, $p_1 = 3.5 \text{ mm}$, $p_2 = 2 \text{ mm}$, $s_1 = 0.5 \text{ mm}$, $s_2 = 0.3 \text{ mm}$, $w_1 = 0.5 \text{ mm}$, $w_2 = 2 \text{ mm}$, $w_3 = 2 \text{ mm}$ 。经仿真的频率响应曲线如图 10 所示。

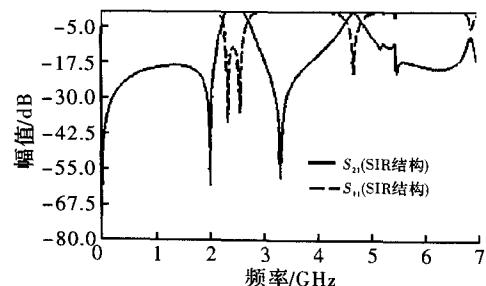


图 7 SIR 单环滤波器的远端频率响应曲线

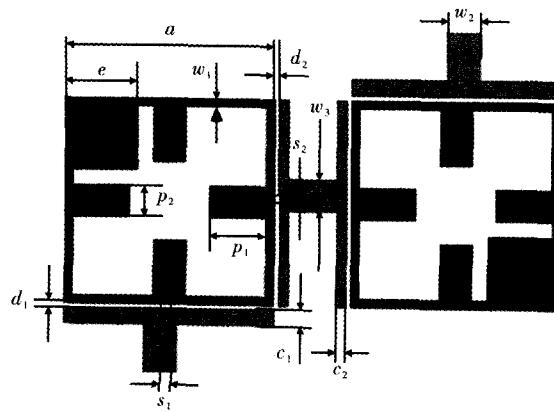


图 8 双环 SIR 双模滤波器结构

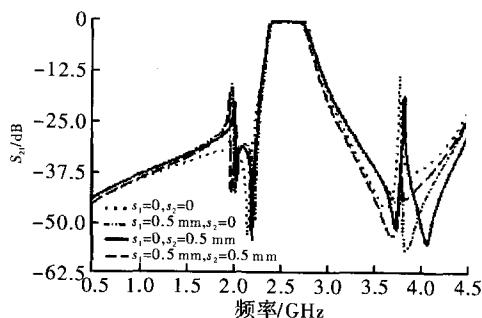
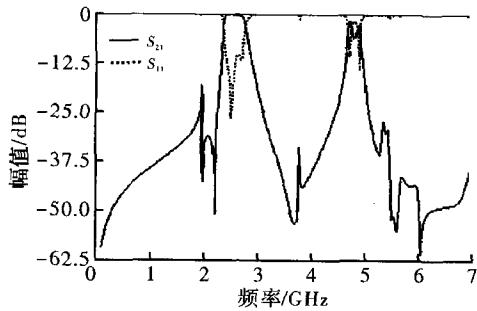
图9 不同偏移量 s_1 和 s_2 对响应曲线的影响

图10 双环滤波器的远端 S 频率响应曲线

从仿真结果可以看出,该滤波器的中心频率为 2.56 GHz,带宽 2.40 ~ 2.72 GHz,相对带宽 12.5%,带内插入损耗 0.5 dB,反射 < -15 dB,几乎与单环结构的仿真值一致。可见,在单个谐振腔尺寸和微扰大小不变的情况下,单级与多级滤波器的通带响应保持不变。在通带两侧,双环滤波器各观察到了两个传输零点,与滤波器的阶数一致,大幅提高了滤波器的矩形响应系数。而且它对阻带的抑制明显优于单环滤波器,可以看到,阻带内除了高次谐波点有明显的尖峰难以消除外,其他频段都得到了较好的抑制。通过增加滤波器的阶数,不但增加了两侧的传输零点数量,提高了边带陡峭度,还增强了对谐波的抑制,提高了滤波器性能。

3 结束语

采用微带 SIR 谐振器设计了平面双模带通滤波器。基于 2.5 GHz 的中心频率,通过比较 SIR 方环结构和传统的 UIR 结构的滤波器的尺寸和性能,得出前者具有尺寸上的优势和性能上的提高,并研究了相关参数对滤波器特性的影响。另外,采用 H 形耦合枝节对 SIR 谐振器进行双环级联获得两 4 阶滤波器,仿真得到了更多的传输零点和更好的带外抑制,提高了滤

波器性能。SIR 结构中阻抗比的引入不但增加了调节中心频率的自由度,还能一定程度上减小滤波器的尺寸,加之其具有较低的带内插损并通过级联获取良好的阻带,因此该滤波器具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] HONG J S, LI S. Theory and experiment of dual-mode microstrip triangular patch resonators and filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(4): 1237–1243.
- [2] WOLFF I. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator [J]. Electronics Letters, 1972, 8(12): 302–303.
- [3] HONG J S, LANCASTER M J. Bandpass characteristics of new dual-mode microstrip square loop resonators [J]. Electronics Letters, 1995, 31(11): 891–892.
- [4] MAO Ruijie, TANG Xiaohong. Novel dual-mode bandpass filters using hexagonal loop resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(9): 3526–3533.
- [5] KARACAOGLU U, SANCHEZ H D, ROBERTSON I D, et al. Harmonic suppression in microstrip dual-mode ring-resonator bandpass filter [C]. San Francisco, CA: IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1996.
- [6] ZHU L, WECOWSKI P M, WU K. New planar dual-mode filter using cross-slotted patch resonator for simultaneous size and loss reduction [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(5): 650–654.
- [7] JAWAD K A. A new miniaturized fractal bandpass filter based on dual-mode microstrip square ring resonator [C]. Amman: 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2008.
- [8] ERYILMAZ G M, KARPUZ C, GORUR A. Dual-mode microstrip filters with adjustable transmission zeros [J]. Microwaves Antennas & Propagation, 2008, 2(8): 839–847.
- [9] ZHANG Qiuhong, DONG Yuliang, CAO Jigang. Dual-mode bandpass filter using microstrip SIR at Ka band [C]. Singapore: Asia-Pacific Microwave Conference, 2009.
- [10] JARUEK J, THAMMARAT M, SARAWUTH C, et al. A microstrip bandpass filter using a line periodically loaded with unbalanced SIRs for size reduction and spurious suppression [C]. Yokohama: Asia-Pacific Microwave Conference, 2006.
- [11] 黄振兴. 微波传输线及其电路 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2010.

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>