

一种槽线扰动的基片集成波导双模滤波器

李荣强^{*①②} 肖绍球^②

^①(成都信息工程学院电子工程学院 成都 610225)

^②(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

摘要: 该文提出一种新型小型化基片集成波导(SIW)双模滤波器。通过使用正交的输入输出馈线,和一段倾斜的槽线来扰动腔体的两个简并模,滤波器能产生两个传输零点(TZ)。采用该方法设计了一个中心频率为15 GHz,带宽为350 MHz的基片集成波导双模滤波器。该滤波器结构简单,成本低廉,易于加工。测试结果和仿真结果吻合,较好地验证了设计的可行性和有效性。

关键词: 滤波器; 基片集成波导(SIW); 双模; 传输零点

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)11-2791-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01665

A Substrate Integrated Waveguide Dual-mode Filter with a Slot Line Perturbation

Li Rong-qiang^{①②} Xiao Shao-qiu^②

^①(School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

^②(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In this paper, a novel miniaturized Substrate Integrated Waveguide (SIW) dual-mode filter is presented. By adopting an orthogonal input and output feed line, and an inclined slot line for disturbing two degenerate modes, two Transmission Zeros (TZs) are created. A 15 GHz SIW dual-mode filter with 350 MHz bandwidth is designed and fabricated using the proposed method. The filter has a very simple structure, low cost and is easily fabricated. The measured results are in good agreement with the simulated results, which show that the design of the proposed filter is correct and effective.

Key words: Filter; Substrate Integrated Waveguide (SIW); Dual-mode; Transmission Zero (TZ)

1 引言

现代无线通信系统要求滤波器具有高性能和紧凑的尺寸。金属波导滤波器由于具有高Q值和高功率容量而具有极好的性能。然而,它们的体积偏大,不易与微波平面电路进行集成。金属波导双模滤波器通常利用对谐振腔体切角或添加调谐螺钉来实现模式扰动。文献[1]提出一种矩形金属波导双模滤波器,该滤波器不使用扰动元件,而是通过输入输出激励与腔体中心线的偏移来获得双模工作。通过调整谐振腔的边长,它能在通带任一边产生一个传输零点(Transmission Zero, TZ)。

近年来,基片集成波导滤波器由于具有低成本,

低损耗且易于与其它平面电路集成而被广泛地研究^[2,3]。其中,基片集成波导双模滤波器被广泛关注,与单模滤波器相比,它能减少将近一半的尺寸。此外,与多层基片集成波导滤波器相比^[4,5],单层滤波器具有低成本和容易构造的优点^[6-14]。双模滤波器设计的关键是产生一对简并模,通过扰动两个模式及调整两个模式的耦合量能产生一到两个传输零点。模式扰动可以分为两种情况,一种情况是不需要扰动元件,只需改变输入输出馈线与谐振腔中心线的偏移量以及腔体的长宽比^[6-8]。另一种情况是使用扰动元件,这又分为两种实现方式。第1种方式是使用金属化通孔来扰动两个简并模^[9-11]。文献[9]介绍了两类双模基片集成波导滤波器,它们通过放在谐振腔角落或中心轴上的两个金属化通孔来产生扰动。文献[10]使用一个位于腔体角落的金属化通孔来进行扰动。文献[11]则利用与正交的输入输出馈线相对应的两个金属化通孔来扰动双模。第2种方式是利用槽线作为扰动元件^[12-14]。文献[12]提出一

2013-10-29 收到, 2014-05-15 改回

中国博士后科学基金(2014M562292)和四川省教育厅科研项目(13ZB0078)资助课题

*通信作者: 李荣强 liyq2011@cuit.edu.cn

种利用槽线扰动的双模滤波器，该滤波器能产生两个传输零点，但由于微弱的源和负载耦合，滤波器上阻带的传输零点会远离通带。文献[13]提出一种利用交叉槽线来减小体积的基片集成波导双模滤波器。文献[14]利用交指型槽线在双模滤波器中实现源和负载的混合耦合来改善滤波器的频率选择性。与金属化通孔相比，槽线作为扰动元件有如下优点：首先，槽线的位置和尺寸的调整比金属化通孔更灵活，它能有效地调整两个简并模之间的耦合。其次，对于同样的谐振频率，利用槽线作为扰动元件的谐振腔将会有更小的尺寸，这有利于滤波器的小型化。

本文提出了一种利用倾斜槽线扰动的单层基片集成波导双模滤波器，通过调整槽线的尺寸和位置参数，滤波器能产生两个传输零点，它们分别位于通带的两边。与已知文献中报道的滤波器相比，提出的滤波器具一定的优势。例如，与利用金属化通孔扰动的滤波器相比^[11]，腔体的尺寸有明显的减小；与文献[12]提出的槽线滤波器相比，它有更好的频率选择性，而与文献[13,14]中的滤波器相比，它具有更简单的结构。本文对提出的小型化基片集成波导滤波器进行了理论研究和实验验证。

2 滤波器分析和设计

2.1 滤波器分析

图1给出基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)双模滤波器的结构。在腔体一角长为 L_s ，宽为 W_s 的倾斜槽线被用来扰动腔体的简并模 TE_{102} 和 TE_{201} 。此外，该滤波器使用正交的输入输出馈线，长为 L_t ，宽为 W_t 的槽线用来实现 $50\ \Omega$ 输入输出微带线与SIW谐振腔之间的过渡。槽线均被刻蚀在SIW腔体的上层金属面上，因此不会增加SIW腔体的体积，反而能实现简单紧凑的结构。SIW腔体的初始尺寸由滤波器的中心频率确定。根据文献[6]，SIW谐振腔的简并模 TE_{m0n} 和 TE_{p0q} 的谐振频率为

$$f_r = \frac{c_0}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{n}{l_{\text{eff}}}\right)^2} = \frac{c_0}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p}{a_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{q}{l_{\text{eff}}}\right)^2} \quad (1)$$

其中 a_{eff} 和 l_{eff} 为双模SIW腔体的有效宽度和长度， m, n, p, q 为模式指数， ε_r 为基片的相对介电常数， c_0 是自由空间中的光速。注意，在双模工作条件下需满足限制条件： $m \neq n, p \neq q$ 。根据式(1)，对于正方形SIW谐振腔体，它的 TE_{102} 和 TE_{201} 模将谐振在同一频率。

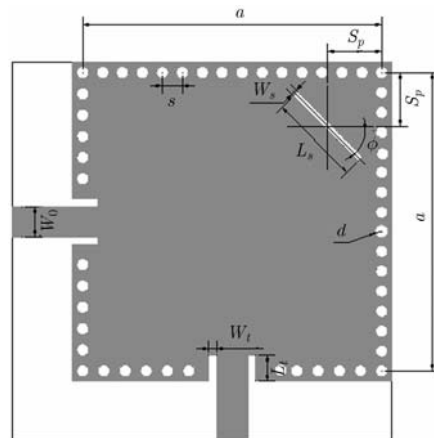


图1 SIW双模滤波器结构示意图

图2为图1中滤波器的耦合原理，图中的谐振器1和谐振器2分别代表 TE_{102} 和 TE_{201} 模。低通等效原型具有式(2)形式的耦合矩阵。

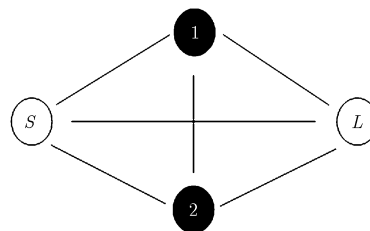


图2 SIW双模滤波器的耦合原理

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & M_{S1} & M_{S2} & M_{SL} \\ M_{S1} & M_{11} & M_{12} & M_{1L} \\ M_{S2} & M_{12} & M_{22} & M_{2L} \\ M_{SL} & M_{1L} & M_{2L} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中， M_{S1} 和 M_{S2} 代表源和每一个谐振模 TE_{102} 和 TE_{201} 的耦合， M_{1L} 和 M_{2L} 代表负载和每一个谐振模 TE_{102} 和 TE_{201} 的耦合，而 M_{12} 为谐振模 TE_{102} 和 TE_{201} 之间的耦合。此外，对角元件 M_{11} 和 M_{22} 用来描述两个谐振模与滤波器中心频率之间的差异。

下面给出一个双模SIW滤波器的设计实例，它的主要指标为：中心频率为15 GHz，回波损耗为22 dB，带宽为350 MHz，在14.1 GHz和16.5 GHz分别产生两个传输零点。根据文献[15]给出的耦合矩阵提取方法，该滤波器可能的耦合矩阵如式(3)所示。由耦合矩阵得出的理想电路响应如图3所示。图3中实线表示滤波器的 S_{11} 参数，虚线为 S_{21} 参数。它们均满足滤波器的设计指标。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & -0.889 & 1.103 & -0.022 \\ -0.889 & -2.070 & 0.621 & 1.167 \\ 1.103 & 0.621 & 2.081 & 0.802 \\ -0.022 & 1.167 & 0.802 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 滤波器设计

滤波器初始尺寸和耦合系数的关系可以利用文献[16]中的方法来获得。经过仿真软件Ansoft HFSS优化，就能够得到满足设计指标的最终尺寸。它的尺寸参数如图1所示，具体值为： $a=15\text{ mm}$ ， $d=0.6\text{ mm}$ ， $s=1\text{ mm}$ ， $S_p=2.7\text{ mm}$ ， $W_s=0.3\text{ mm}$ ， $L_s=4.6\text{ mm}$ ， $\phi = 45^\circ$ ， $W_0 = 1.55\text{ mm}$ ， $W_t=0.4\text{ mm}$ ， $L_t=1.3\text{ mm}$ 。

根据滤波器理论，从输入到输出的两条信号流会引起交叉耦合效应，从而使滤波器产生两个传输零点。通过调整图1中用于扰动的倾斜槽线的尺寸参数(L_s 和 W_s)和位置参数(S_p 和 ϕ)，两个传输零点的位置能够进行调整。图4和图5给出了滤波器关于不同的 L_s 和 S_p 的变化关系。由图4可以看到，在其它尺寸参数不变的情况下改变 L_s ，将影响通带左边传输零点的位置。当 L_s 从4.6 mm增大为4.8 mm，左边的传输零点远离通带中心频率，而右边的传输零点基本不变，相应地滤波器的通带宽度变宽。由图5可以看到，在其它参数不变的情况下改变 S_p 的大小，将影响通带右边传输零点的位置。当 S_p 从2.7 mm增大为3.0 mm，右边的传输零点远离通带中心频率，而左边的传输零点基本不变，相应地滤波器的通带宽度变宽。可见，通过调整倾斜槽线的参数，本文能够获得想要的传输零点。

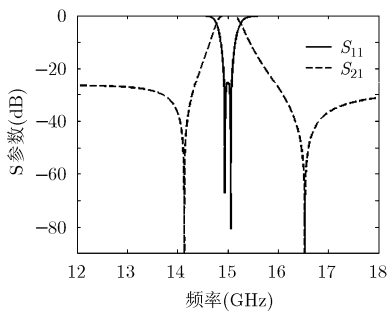


图3 SIW双模滤波器的理想电路响应

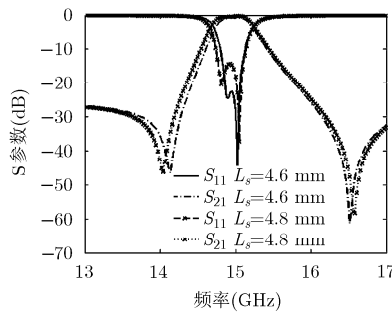


图4 SIW双模滤波器关于不同 L_s 值的仿真频率响应

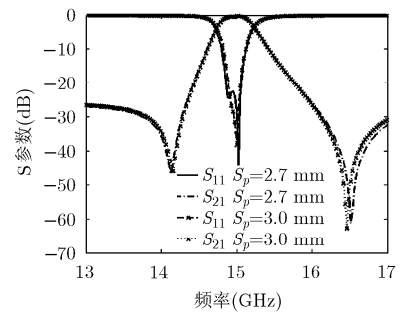


图5 SIW双模滤波器关于不同 S_p 值的仿真频率响应

3 实验结果与讨论

根据仿真优化结果，加工了SIW双模滤波器实物，如图6所示。使用的基板为Rogers 5880，该基板的相对介电常数为2.2，介质损耗角正切为0.0009，厚度为0.508。采用罗德史瓦兹公司的ZVB20矢量网络分析仪对滤波器的S参数进行了测量。与仿真结果对比，如图7所示。实测的中心频率为14.8 GHz，相对于仿真频率15.0 GHz有一定的频偏，可能是由基片的介质参数容差和加工工艺引起的。测量的带内回波损耗大于15.6 dB，带内插入损耗大约为2.0 dB，与仿真的插入损耗1.0 dB有一定的差异，可能是由于导体损耗、介质损耗和辐射损耗引起的。此外，分别位于14.1 GHz和16.5 GHz附近的两个传输零点能被明显地识别出来。

4 结束语

本文设计了一种利用倾斜槽线扰动的新型小型化双模基片集成波导滤波器。与金属化通孔扰动简并模的滤波器相比，它具有更小的尺寸。与已知的其它槽线扰动的滤波器相比，它有更好的性能或更简单的结构。由于提出的滤波器在通带两边具有两个可控的传输零点，因而具有良好的频率选择性。

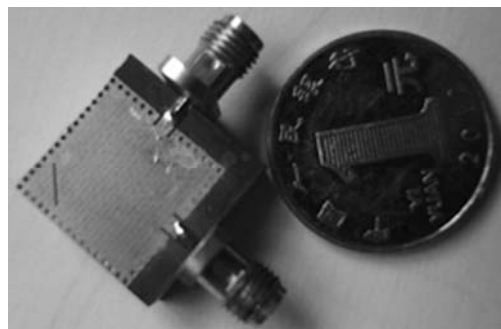


图6 SIW双模滤波器的实物照片

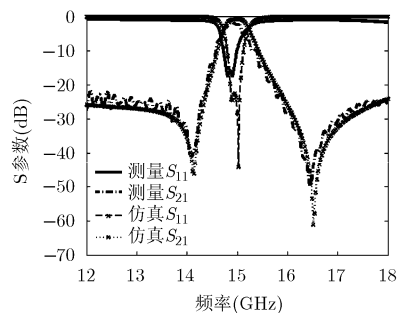


图7 SIW双模滤波器仿真和测试结果

此外，该滤波器结构简单紧凑，成本低、便于构造，易于与平面电路集成。

参考文献

- [1] Guglielmi M, Jarry P, Kerherve E, *et al.* A new family of all-inductive dual-mode filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(10): 1764-1769.
- [2] 翟国华, 洪伟, 吴柯, 等. 集成宽带折叠半模基片集成波导带通滤波器[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 825-829.
Zhai Guo-hua, Hong Wei, Wu Ke, *et al.* Compact wideband folded half mode substrate integrated waveguide bandpass filters[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(4): 825-829.
- [3] 张忠海, 管伯然. 采用新型介质集成波导的小型双频滤波器[J]. 电波科学学报, 2012, 27(2): 321-325.
Zhang Zhong-hai and Guan Bo-ran. Novel compact dual-band bandpass filter adopting SIW cavity[J]. *China Journal of Radio Science*, 2012, 27(2): 321-325.
- [4] Wei Q F, Li Z F, and Shen H G. Dual-mode filters based on substrate integrated waveguide by multilayer LTCC technology[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, 50(11): 2788-2790.
- [5] Liu X X, Yu X, Cheng F, *et al.* Double-layer dual-mode SIW filters using via perturbation[C]. IEEE International Workshop on Electromagnetics; Applications and Student Innovation (iWEM), Chengdu, China, 2012: 1-4.
- [6] Chen X P, Hong W, Cui T J, *et al.* Symmetric dual-mode filter based on substrate integrated waveguide (SIW)[J]. *Electrical Engineering*, 2006, 89(1): 67-70.
- [7] 张胜, 王子华, 肖建康, 等. 基于基片集成波导(SIW)的双模带通滤波器[J]. 微波学报, 2007, 23(2): 55-59.
Zhang Sheng, Wang Zi-hua, Xiao Jian-kang, *et al.* Dual-mode bandpass filters based on substrate integrated waveguide (SIW)[J]. *Journal of Microwave*, 2007, 23(2): 55-59.
- [8] 秦培元, 石小林, 梁昌洪, 等. 一种新型 X 波段基片集成波导双模带通滤波器[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(5): 831-834.
Qin Pei-yuan, Shi Xiao-lin, Liang Chang-hong, *et al.* Novel X-band dual-mode bandpass filter based on the substrate integrated waveguide[J]. *Journal of Xidian University*, 2009, 36(5): 831-834.
- [9] Chang C Y and Hsu W C. Novel planar, square-shaped, dielectric-waveguide, single-, and dual-mode filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(11): 2527-2536.
- [10] Huang T H, Chang C S, Chen H J, *et al.* Simple method for a K-band SIW filter with dual-mode quasi-elliptic function response[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2007, 49(6): 1246-1249.
- [11] Li R Q, Tang X H, and Xiao F. A novel substrate integrated waveguide square cavity dual-mode filter[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2009, 23(17/18): 2523-2529.
- [12] Guan X H, Wang B, Liu H W, *et al.* Design of a dual-mode substrate integrated waveguide filter with slot line perturbation[C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Chengdu, China, 2012: 1-4.
- [13] Chen L N, Jiao Y C, Zhang Z, *et al.* Miniaturized substrate integrated waveguide dual-mode filters loaded by a series of cross-slot structures[J]. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2012, 29: 29-39.
- [14] Xu Z Q, Shi Y, Xu C Y, *et al.* A novel dual mode substrate integrated waveguide filter with mixed source-load coupling(MSLC)[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2013, 136: 595-606.
- [15] Amari S, Rosenberg U, and Bornemann J. Adaptive synthesis and design of resonator filters with source/load-multi-resonator coupling[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(8): 1969-1978.
- [16] Hong J S and Lancaster M J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*[M]. New York: Wiley, 2001: 235-271.
- 李荣强: 男, 1977年生, 副教授, 研究方向为微波无源器件和天线理论与技术。
- 肖绍球: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为天线理论与技术、超宽带电磁学及其应用、计算电磁学等。