

文章编号: 0255-8297(2009)06-0612-04

用SIR型开路枝节实现低通滤波器小型化和宽阻带

王华红, 杨雪霞, 高艳艳, 孙晓萌

上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

摘要: 该文提出一种新型阶跃阻抗谐振器(SIR)型低通滤波器. 设计SIR开路枝节结构, 使之具有二阶低通滤波器的特性, 从而达到损耗低、阻带宽、结构紧凑, 能很好地改善带外抑制, 提高频率选择性. 实验测得通带内的插入损耗均在 -0.3 dB以内, 插入损耗大于 15 dB的阻带宽度达到 9 GHz, 而 3 dB截止频率是 7.2 GHz. 这种谐振器可广泛用于各种微波系统中. 给出了该二阶低通滤波器的等效电路和电路参数, 电路仿真、全波电磁仿真和实测结果基本上吻合. 为了进一步增加阻带带宽, 抑制高次谐波, 又提出一种带SIR开路枝节和倒T型开路枝节的三阶低通滤波器, 它具有更宽的阻带特性.

关键词: SIR开路枝节; 集总元件等效模型; 谐振器; 低通滤波器

中图分类号: TN713 **文献标志码:** A

Realization of Miniaturization and Band Broadening of Lowpass Filter Using SIR Open-Stub

WANG Hua-hong, YANG Xue-xia, GAO Yan-yan, SUN Xiao-meng

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract: A novel two-order lowpass filter with a stepped impedance resonator (SIR) open-stub is proposed. The filter improves performance of out-band rejection and cutoff frequency response by using an SIR open-stub, having advantages of low loss, wide stop band and compact structure. The measured insertion loss in pass band is below -0.3 dB and the rejection bandwidth at insertion loss greater than 15 dB is 9 GHz. The measured 3 dB cutoff frequency of the two-order lowpass filter is 7.2 GHz in the pass band. It can be widely used in various microwave systems. Circuit simulation results, EM simulation, and experimental results of the two-order lowpass filter are in good agreement, showing feasibility of the lumped-element equivalent circuit. In order to broaden stop band and suppress high order spurious signals, a three-order lowpass filter loaded with open SIR-stub and reverse T-stub is also proposed.

Keywords: SIR open-stub, lumped elements equivalent circuit, resonator, lowpass filter

在各种微波系统中, 如射频终端、多通道MIMO系统等, 迫切需要具有低损耗、宽阻带、结构紧凑等特性的低通滤波器来抑制谐波信号. 选择合适的谐振器是平面滤波器设计的关键. 为了实现小型化, 可选择阶梯阻抗谐振器(SIR)^[1-2]和SIR谐振器的变形结构^[3], 开环谐振器^[4-6], 双模谐振器^[7], 以及缺陷地(DGS)结构^[8-9]等等. 大多数谐振器需要通过增加阶数来增加阻带带宽, 以提

高频率选择性, 但是, 增加谐振器的阶数也相应增大了谐振器的体积和插损. SIR开路枝节的谐振器是二阶开环谐振器的变形结构, 相比二阶开环基本结构, 在阻带带宽和频率选择性等方面更具优势.

本文提出并设计制作了新型的SIR开路枝节的低通滤波器. SIR开路枝节起到增加阻带带宽的作用. 首先对提出的带SIR开路枝节的低通滤波器进行等效电路分析,

收稿日期: 2008-12-19; 修订日期: 2009-10-19

基金项目: 上海市重点学科和科委重点实验室项目基金(No.S30108, No.08DZ2231100)资助

通信作者: 杨雪霞, 教授, 博导, 研究方向: 微波输能、计算电磁学、微带天线, Email: xxyang@staff.shu.edu.cn

然后与二阶开环结构进行比较，并设计制作了带SIR开路枝节的二阶低通滤波器。该低通滤波器具有宽阻带、小型化等优点。EM仿真结果和实测结果基本吻合。为了进一步增加阻带带宽，能够很好地抑制高次（二次、三次）谐波，又提出了三阶低通滤波器，但尺寸基本没有增加。

1 二阶开环谐振器的等效电路分析

带开路枝节的二阶谐振器基本结构和带SIR开路枝节的谐振器结构分别如图 1(a)和(b)所示。可以将带SIR开路枝节的二阶谐振器结构看作二阶开环谐振器结构，左右两个谐振器由虚线区分，单独的一阶谐振器结构可以简单地等效为一个并联谐振电路，其结构图和集总元件等效电路如图 2(a)和(b)所示。其中 C_s 和 L_s 分别表示等效电容和等效电感， Z_0 表示馈电特性阻抗。等效电容 C_s 和等效电感 L_s 可以分别用式(1)和(2)表示^[8]。

$$C_s = \frac{5f_c}{\pi(f_s^2 - f_c^2)} \tag{1}$$

$$L_s = \frac{250}{C_s(\pi f_s)^2} \tag{2}$$

式中， f_c 和 f_s 分别表示3 dB截止频率和谐振频率， C_s 的单位为pF， L_s 的单位为nH。

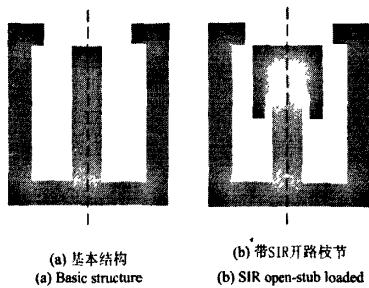


图 1 二阶谐振器
Figure 1 Two-order resonator

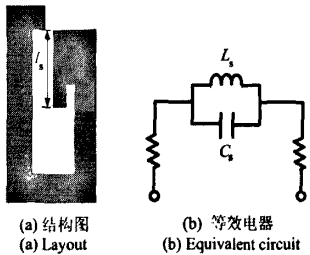


图 2 一阶谐振器
Figure 2 One-order resonator

仿真发现，枝节 l_s 的长度可以改变传输零点的位置，如图 3 所示，取 l_s 值为2.0 mm，2.8 mm，3.4 mm，谐振频率分别为13.75 GHz，13.10 GHz，12.60 GHz。随着枝

节 l_s 的增加，谐振频率 f_s 逐渐减小。根据仿真的谐振频率，由式(1)和(2)计算得到谐振器等效电路的等效电容和等效电感值，如图 4 所示。随着枝节 l_s 的增加，等效并联电容 C_s 和并联电感 L_s 变化趋势不明显， C_s 略微增大。

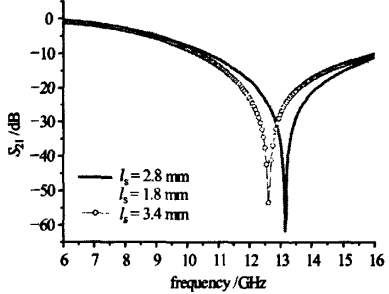


图 3 不同 l_s 值对应的传输曲线
Figure 3 Variation of transmission curve against stub length l_s

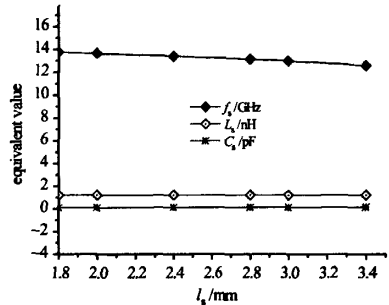


图 4 不同 l_s 值对应的等效电路元件值
Figure 4 Variation of equivalent value against stub length l_s

2 带SIR开路枝节二阶低通滤波器

带基本开路枝节的二阶低通滤波器可等效为两个并联LC和一个串联LC，其结构图和等效电路图分别如图5(a)和(b)所示。其中 C_s 和 L_s 分别表示等效并联电容和并联电感， C_p 和 L_p 分别表示等效串联电容和串联电感， L_g 表示微带线 W_2 的等效电感。

新型的带SIR开路枝节的二阶低通滤波器如图 6(a)所示，其中 $L_1 = 5.80$ mm， $L_2 = 4.55$ mm， $L_3 = 2.40$ mm， $W_1 = 0.60$ mm， $W_2 = 2.10$ mm， $W_3 = 0.90$ mm， $W_4 = 1.30$ mm。相比基本二阶低通滤波器具有更宽的阻带带宽，其 S_{21} 对比曲线如图 7 所示。其中 C_s 和 L_s 分别表示并联等效电容和等效电感， L_p 和 L_g 分别表示微带线 W_3 和 W_4 的等效电感， C'_p 和 C''_p 分别表示 W_2 和 L_3 的等效电容。所以，带SIR开路枝节的二阶低通滤波器的串联等效电容 $C_p = (C'_p \times 2 \times C''_p) / (C'_p + 2 \times C''_p)$ 。传输线等效电感 L_g 可通过近似公式(3)计算^[10]

$$L_g = b \times h \times 0.1 \times (4 \times \sqrt{a/h} - 4.21) \tag{3}$$

式中, a 和 b 分别表示微带线的宽和长, h 表示介质板的厚度, L_g 单位为nH.

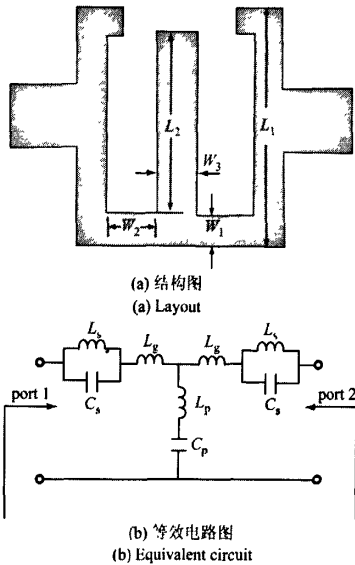


图 5 基本二阶低通滤波器
Figure 5 Conventional two-order LPF

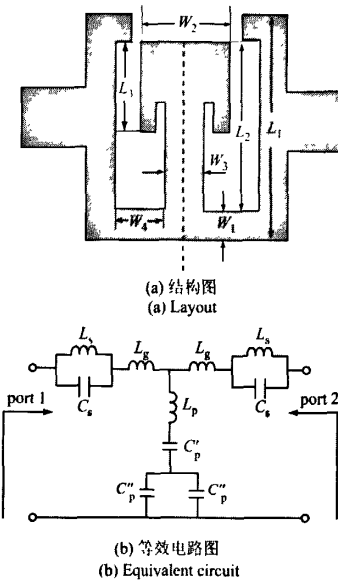


图 6 带SIR开路枝节二阶低通滤波器
Figure 6 Proposed two-order LPF

图 6(b)是带SIR开路枝节的二阶低通滤波器的集总元件等效电路图.加工制作的介质板,相对介电常数为2.78,厚度 $h=0.8\text{ mm}$.带SIR开路枝节的二阶低通滤波器的频率响应 S_{21} 仿真结果如图 7 所示,谐振频率 $f_{s1}=8.2\text{ GHz}$, $f_{s2}=15.0\text{ GHz}$, 3 dB截止频率 $f_c=7.2\text{ GHz}$.计算的二阶低通滤波器的集总元件

等效值列于表 1.图 8 是该低通滤波器的电磁仿真结果、电路仿真结果和实验测量结果,仿真和实测结果基本上一致,也验证了等效电路的有效性.该滤波器的尺寸仅有 $9.33\text{ mm}\times7.90\text{ mm}$.

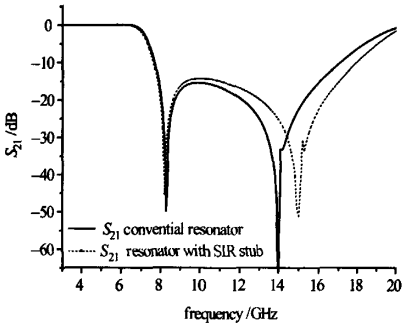


图 7 基本和带SIR开路枝节低通滤波器的阻带特性
Figure 7 Rejection performance of resonator with conventional stub and SIR stub

表 1 带SIR开路枝节的二阶低通滤波器的等效集总元件值
Table 1 Equivalent values of the two-order LPF with SIR stub

集总元件	C_s/pF	L_s/nH	L_p/nH	C_p/pF	L_g/nH
等效值	0.066	1.707	2.140	0.176	0.077

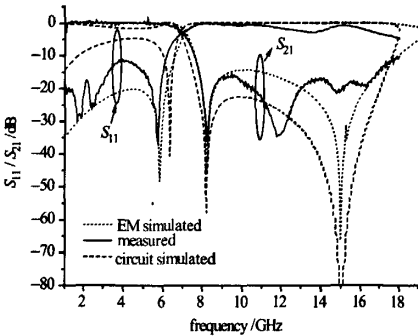


图 8 带SIR开路枝节低通滤波器频率响应仿真与实测结果
Figure 8 Comparison of simulation results and measured results

3 带SIR开路枝节和倒T型开路枝节的三阶低通滤波器

为了进一步增加阻带带宽,抑制高次谐波,提出了一种带SIR开路枝节和倒T型开路枝节的三阶低通滤波器,如图 9(a)所示.可等效为两个并联LC和两个串联LC相连,其集总元件等效电路图如图9(b)所示,其中 C_s 和 L_s 分别表示并联等效电容和并联电感, C'_{p1} 和 L_{p1} 表示SIR开路枝节的等效串联电容和串联电感, C'_{p2} 和 L_{p2} 表示倒T型开路枝节的等效串联电容

和串联电感， L_g 是微带 W_4 的等效电感， C'_p 和 C''_p 分别是 W_2 和 L_3 的等效电容。

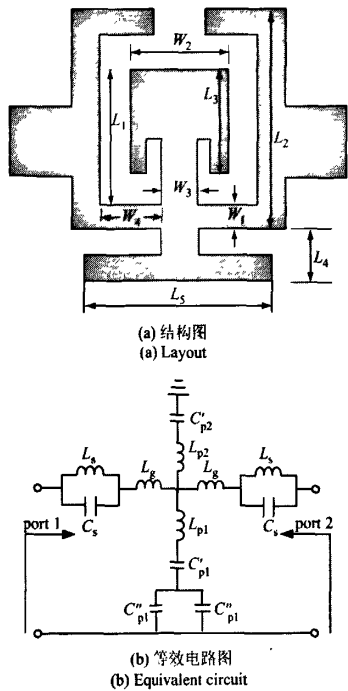


图 9 新型的三阶低通滤波器

Figure 9 Proposed three-order LPF

带SIR开路枝节和倒T型开路枝节的三阶低通滤波器相比带SIR开路枝节的二阶低通滤波器，增加了一个谐振器，在约18 GHz频率上增加了一个传输零点，提高了阻带带宽和带外抑制度。其频率响应电磁仿真结果如图 10 所示。通带回损以及带外抑制都有明显的改善，能够很好地抑制高次（二次、三次）谐波，但是尺寸基本没有增大。

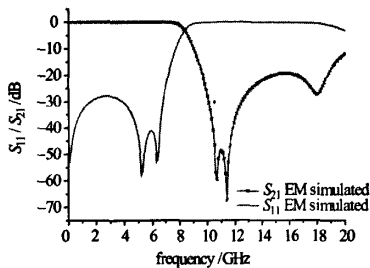


图 10 三阶低通滤波器频率响应仿真结果

Figure 10 EM simulation results of the three-order LPF

4 结 语

本文提出并设计了带SIR开路枝节的二阶低通滤波器，分析了其集总元件等效电路模型。通过对比电磁仿真和电路仿真，验证了等效电路模型的有效性。带SIR开路枝节的二阶低通滤波器具有小型化、宽阻带、易集成等优点。为了进一步增加阻带带宽，抑制高次谐波，又提出了一种带SIR开路枝节和倒T型开路枝节的三阶低通滤波器。

参考文献：

[1] HSIEH L H, CHANG Kai. Compact elliptic-function low-pass filters using microstrip stepped-impedance hairpin resonators[J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, Part 1, 2003, 51(1): 193-199.

[2] CHEN Jianxin, XUE Quan. Compact microstrip lowpass filter using slow-wave resonator[C]//*Microwave Conference, 2005 European*, 2005, 2: 2.

[3] YANG M H, XU J. Design of compact, broad-stopband lowpass filter using modified stepped impedance hairpin resonators[J]. *Electronics Letters*, September 25, 2008, 44(20): 1198-1199.

[4] MONDAL P, MANDAL M K. Design of dual-band band-pass filters using stub-loaded open-loop resonators[J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 2008, 56(1): 150-155.

[5] TANG Chingwen, LIANG Hueihung. Parallel-coupled stacked SIRs bandpass filters with open-loop resonators for suppression of spurious responses[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2005, 15(11): 802-804.

[6] TSENG Jandong, CHANG Weigeo. Planar rectangular split ring shape band-pass structure[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2007, 49 (10): 2520-2523.

[7] CHEN J X, YUM T Y, Li J L, XUE Q. Dual-mode dual-band bandpass filter using stacked-loop structure[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, 16(9): 502-504.

[8] WU Bian, LIANG Changhong, QIN Peiyuan, Li Qi. Compact dual-band filter using defected stepped impedance resonator[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, 18(10): 674-676.

[9] WANG Hang, ZHU Lei. Microstrip bandpass filter with ultra-broad rejection band using stepped impedance resonator and high-impedance transformer[C]//*Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International*: 684-686.

[10] HONG Jiasheng. *Microstrip filter for RF/microwave application*[M]. New York: Wiley, 2001: 90-99.

(编辑：欧阳丽霞)

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, 致力和专注于微波、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/>