

文章编号:1007-5321(2017)02-0093-04

DOI:10.13190/j.jbupt.2017.02.015

# 基于平行耦合线和开路枝节的小型带通滤波器设计

喇东升<sup>1,2</sup>, 郭经纬<sup>3</sup>, 刘妍<sup>4</sup>, 贾守卿<sup>1</sup>, 马雪莲<sup>1</sup>

(1. 东北大学 计算机科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 南京 210096;

3. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 4. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**为了解决耦合线滤波器谐波抑制问题,提出了一种新的结构简单的平行耦合线带通滤波器. 该滤波器由平行耦合线和开路枝节组成. 首先基于耦合线带通滤波器的等效电路图,通过奇偶模理论得到设计方程,并设计了带通滤波器;分析了滤波器特性与电参数之间的关系;通过仿真优化得到了滤波器的物理尺寸;制备并测试了滤波器的 $S$ 参数,仿真结果和测试结果基本一致. 该滤波器具有结构简单、面积小等优点,并通过引入传输零点实现了较宽的阻带抑制和较好的选择性.

**关键词:**带通滤波器;平行耦合线;开路枝节;奇偶模理论;半波长

中图分类号:TN713.5

文献标志码:A

## Compact Parallel Coupled Line Band-Pass Filter Design with Open Stub

LA Dong-sheng<sup>1,2</sup>, GUO Jing-wei<sup>3</sup>, LIU Yan<sup>4</sup>, JIA Shou-qing<sup>1</sup>, MA Xue-lian<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004, China;

4. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of CSR, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In order to solve harmonic suppression, a parallel coupled line band-pass filter with simple structure was proposed. The filter consists of parallel coupled lines and open stubs. Filter's equation was firstly obtained via odd-even mode analytical method, which is based on the equivalent circuit of the proposed coupled line band-pass filter, and a compact band-pass filter was designed. Secondly, the relationship between filter's resonant characteristics and its electrical parameters was analyzed. And then, the geometric parameters of the proposed band-pass filter was obtained and optimized. Finally, the proposed band-pass filter and measured its  $S$  parameters was fabricated, which were basically consistent with simulation. It is founded that the filter designed has the advantages of simple structure, small size, etc. The proposed band-pass filter also has a wide stop band rejection and better selectivity through the introduction of transmission zeros.

**Key words:** band-pass filter; parallel coupled line; open stub; odd-even mode analytical method; half wavelength

由于平行微带耦合线结构具有简单的设计流程、容易加工等优点,被广泛地应用到滤波器设计

中. Cui等<sup>[1]</sup>基于信号干扰理论提出了弯曲平行全耦合线宽带带阻滤波器设计方法,所设计的滤波器

收稿日期:2016-04-30

基金项目:国家自然科学基金项目(61501100,61601105);河北省高等学校科学技术研究项目(QN20132014,QN2015141);中央高校基本科研业务费项目(N142303003);毫米波国家重点实验室开放课题(K201705);河北省自然科学基金项目(F2015203373)

作者简介:喇东升(1980—),男,副教授, E-mail:ladongsheng@163.com.

第一寄生阻带在  $2f_0$  处. Wang 等<sup>[2]</sup>提出的自耦合环形谐振器超宽带滤波器第一寄生通带也出现在  $2f_0$  处. Wang 等<sup>[3]</sup>在自耦合环形谐振器基础上加载了  $1/4$  波长微带线结构实现了超宽带滤波器设计. Wang 等<sup>[4]</sup>通过短路和开路平行阶梯阻抗耦合线结构实现了带通滤波器设计. 虽然 Wang 等<sup>[3,4]</sup>所设计的滤波器带外抑制得到了改善,但是滤波器面积都增加了很多. 朱永忠等<sup>[5]</sup>提出了一种耦合臂 U 形谐振器滤波器,通过传输零点实现了较好的带外抑制. Zhou 等<sup>[6]</sup>通过级联平行耦合线改善了滤波器带外抑制. 李学斌等<sup>[7]</sup>提出了双频带滤波器设计方法. 到目前为止,已有的简单耦合结构滤波器谐波抑制较差. 通过加载微带线结构或级联结构可实现较好的带外抑制,但滤波器的面积会增加很多.

笔者提出了一种结构简单的平行耦合线滤波器. 该滤波器由平行耦合线和开路枝节组成. 平行耦合线和开路枝节的总长度为  $1/2$  波长. 通过奇偶模理论得到了平行耦合线滤波器的设计方程. 滤波器的中心频率由滤波器的电长度确定. 笔者分析了相对带宽、通带内损耗、耦合线阻抗、开路枝节阻抗的关系. 通过引入传输零点实现了谐波抑制,扩展了阻带带宽,同时基本不增加滤波器面积.

## 1 平行耦合线带通滤波器设计

图 1(a) 为平行耦合线带通滤波器的等效电路

$$Z_{\text{ino}(e)} = \frac{jZ_{o(e)} [(2Z_{o(e)} + Z_1)\tan^2\theta - Z_1] [Z_1 \tan^4\theta - (4Z_{o(e)} + 2Z_1)\tan^2\theta + Z_1]}{\tan\theta [Z_1 Z_{o(e)} \tan^6\theta + (8Z_{o(e)}^2 + 9Z_{o(e)} Z_1 + 4Z_1^2)\tan^4\theta - (8Z_{o(e)}^2 + 19Z_{o(e)} Z_1 + 8Z_1^2)\tan^2\theta + 4Z_1^2 + 3Z_{o(e)} Z_1]} \quad (1)$$

$$\tan\theta [Z_1 Z_{o(e)} \tan^6\theta + (8Z_{o(e)}^2 + 9Z_{o(e)} Z_1 + 4Z_1^2)\tan^4\theta - (8Z_{o(e)}^2 + 19Z_{o(e)} Z_1 + 8Z_1^2)\tan^2\theta + 4Z_1^2 + 3Z_{o(e)} Z_1] = 0 \quad (2)$$

因为平行耦合线和开路枝节的总电长度为半波长,所以  $\theta \approx 25.71^\circ$ . 因此假定  $\theta$  的范围为  $24.66^\circ \sim 26.78^\circ$ , 归一化  $Z_1$  的范围为  $0.4 \sim 1.6$ . 图 2 给出了耦合线的归一化奇模(偶模)阻抗  $Z_{o(e)}$  和电长度  $\theta$ 、开路枝节归一化阻抗  $Z_1$  的关系. 当  $Z_1$  固定时,随着  $\theta$  的增加,  $Z_{o(e)}$  减小. 当  $\theta$  固定时,随着  $Z_1$  的增加,  $Z_{o(e)}$  增加.

假设奇模谐振频率对应的  $\theta_o = 26.06^\circ$ , 偶模谐振频率对应的  $\theta_e = 25.36^\circ$ . 基于假设的  $\theta_o$  和  $\theta_e$ , 表 1 给出了 3 组归一化阻抗  $Z_1$ 、 $Z_o$  和  $Z_e$ , 其中归一化是以  $Z_0 = 50 \Omega$  为标准. 当  $Z_1$  和中心频率对应的  $\theta_0$

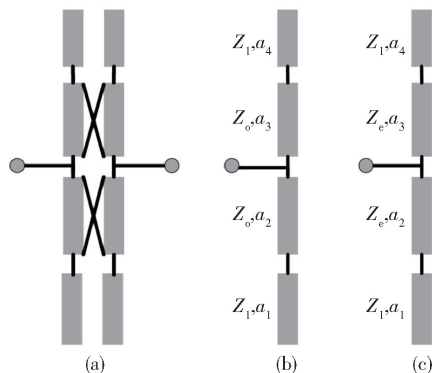


图 1 平行耦合线带通滤波器

图, 滤波器由平行耦合线和开路枝节组成. 该等效电路图是对称结构, 图 1(b) 和图 1(c) 分别为奇模等效电路图和偶模等效电路图. 微带线的电长度为  $a_1, a_2, a_3, a_4$ . 开路枝节的阻抗为  $Z_1$ . 耦合线的奇模阻抗和偶模阻抗分别为  $Z_o$  和  $Z_e$ . 为了计算简单, 假设耦合微带线的奇模相速度和偶模相速度相同 ( $\theta_e = \theta_o = \theta$ ). 为了实现对寄生通带的抑制, 电长度选取不同的值. 同时 4 个电长度可选择为一个值的整数倍数, 便于理论计算. 4 个电长度选取为  $a_1 = \theta, a_2 = a_3 = a_4 = 2\theta$ . 同时也可采用其他组合的电长度设计耦合线带通滤波器. 基于奇偶模理论, 滤波器的奇模(偶模)输入阻抗表达式如式(1)所示. 当奇模(偶模)输入阻抗为无穷大时, 对应的谐振频率为奇模(偶模)谐振频率, 如式(2)所示.

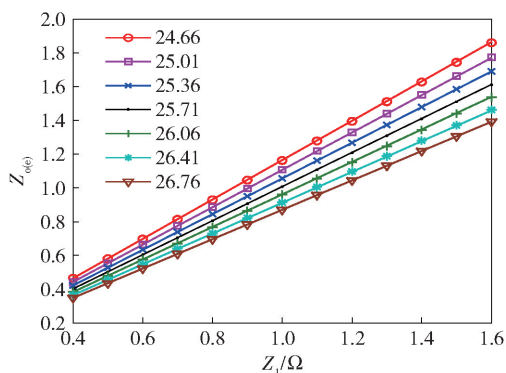


图 2  $Z_{o(e)}$  与  $\theta, Z_1$  的关系

固定时, 表 2 给出了不同的  $\theta_o - \theta_e$  (相对带宽) 对应的奇模阻抗和偶模阻抗参数. 对于对称和互易网络, 其频率相应可通过式(3)和式(4)进行求解. 基

于表 1 和表 2 所给参数, 平行耦合线带通滤波器的谐振特性如图 3 所示. 在图 3(a) 中, 随着阻抗  $Z_1$  的减小, 通带内回波损耗增加. 当  $Z_1$  减小到一定值时, 通带内回波损耗会减小. 从图 3(b) 可以看出, 当  $\theta_o - \theta_e$  (相对带宽) 增加时, 通带内回波损耗会增加. 同样当  $\theta_o - \theta_e$  (相对带宽) 增加到一定值时, 通带内回波损耗会减小. 那么当基于该结构设计滤波器时, 可根据所设计滤波器的相对带宽和图 3 中给出的规律, 选择合适的  $Z_1$ .

$$S_{11} = S_{22} = \frac{Z_{ine} Z_{ino} - 1}{(Z_{ine} + 1)(Z_{ino} + 1)}$$

(3)

$$S_{21} = S_{12} = \frac{Z_{ine} - Z_{ino}}{(Z_{ine} + 1)(Z_{ino} + 1)}$$

(4)

表 1 3 组滤波器的阻抗参数 ( $\theta_o = 25.71^\circ$ ,  
 $\theta_e = 25.36^\circ, \theta_o = 26.06^\circ$ )

滤波器序号	$Z_1/\Omega$	$Z_e/\Omega$	$Z_o/\Omega$
1	1.10	1.16	1.06
2	1.30	1.37	1.25
3	1.50	1.59	1.44

表 2 3 组滤波器的电长度和阻抗参数  
( $Z_1 = 1.3, \theta_o = 25.71^\circ$ )

滤波器序号	$\theta_e/\text{deg}$	$\theta_o/\text{deg}$	$Z_e/\Omega$	$Z_o/\Omega$
4	25.535	25.885	1.34	1.28
2	25.360	26.060	1.37	1.25
5	25.185	26.235	1.41	1.22

2 带通滤波器仿真和测试

图 4(a) 给出了带通滤波器的结构, 弯曲开路枝节是为了减小滤波器的大小. 在仿真中介质的介电常数为 2.2, 损耗正切值为 0.0009, 介质板的厚度为 0.508 mm. 基于上面给出的阻抗值和电长度, 假设滤波器的中心频率  $f_0 = 1.6$  GHz, 通过 ADS LineCalc tool 获得滤波器初步的物理尺寸. 表 3 给出了滤波器 2 的归一化阻抗参数、电长度和微带线宽度和长度的对应关系. 在表 3 中, 电长度  $\theta_e = \theta_o = \theta_0 = \theta$  决定了微带线的物理长度  $a$ , 阻抗  $Z_1$  决定了开路枝节的宽度  $c$ . 而  $Z_e$  和  $Z_o$  共同决定了宽度  $b$  和缝隙  $g$ , 耦合线和开路枝节的总长度为  $1/2$  波长, 因此  $b = c$ , 通过调节  $g$  使得满足  $Z_e$  和  $Z_o$ . 另外根据电长度的大小得到  $d + t = 2a$  和  $d + s = a$ , 选择合适的  $d$ , 使得开路枝节与耦合线之间耦合很小, 同时也可能减小电路板面积, 选取  $d = 4$  mm.

基于表 3 中滤波器 2 的初步物理尺寸, 通过三

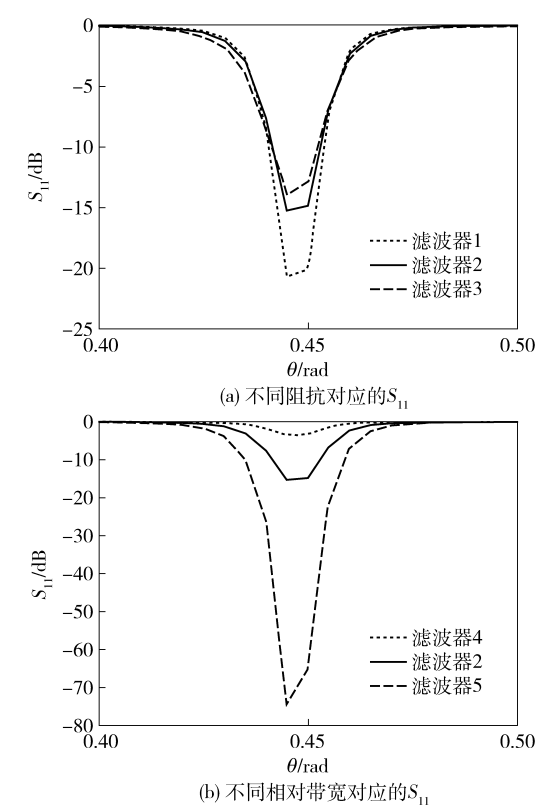


图 3 平行耦合线带通滤波器的  $S_{11}$  参数计算结果

维电磁仿真软件 (HFSS, high frequency structure simulator) 进行仿真优化, 考虑到弯曲、开路端等影响, 得到优化后的物理尺寸为  $a = 10$  mm,  $b = c = 1$  mm,  $d = 4$  mm,  $g = 1.3$  mm,  $t = 16$  mm,  $s = 6$  mm,  $w = 1.54$  mm. 然后基于 Rogers RT/duroid 5880 (tm) 制作了平行耦合线带通滤波器, 如图 4(b) 所示.

表 3 滤波器 2 的电参数和物理尺寸

$\theta_0/(^\circ)$	$Z_1/\Omega$	$Z_e/\Omega$	$Z_o/\Omega$
25.71	1.30	1.37	1.25
$a/\text{mm}$	$c/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$g/\text{mm}$
9.88	1.03	1.03	1.44

滤波器的仿真结果和测试结果如图 5 所示, 其中仿真结果为虚线, 测试结果为实线. 测试结果表明, 在通带内回波损耗大于 12 dB. 在通带外, 低频段有 2 个传输零点, 分别位于  $f = 0$  Hz 和  $f = 0.977$  GHz, 在整个低频段插入损耗大于 33.2 dB; 高频段也有 2 个传输零点, 分别位于  $f = 3.563$  GHz 和  $f = 4.216$  GHz, 在整个高频段插入损耗大于 11.5 dB. 传输零点实现了宽的阻带抑制. 测试结果和仿真结果基本一致. 微小的差别来源于材料本身误差、SMA 连接器和制作误差.

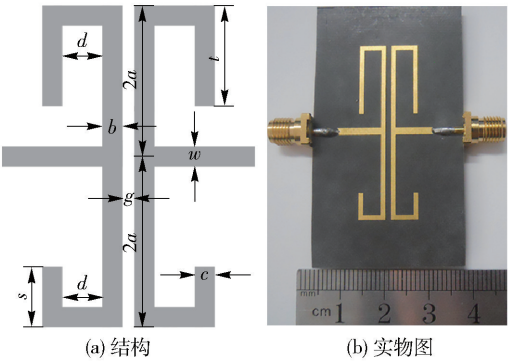


图 4 带通滤波器

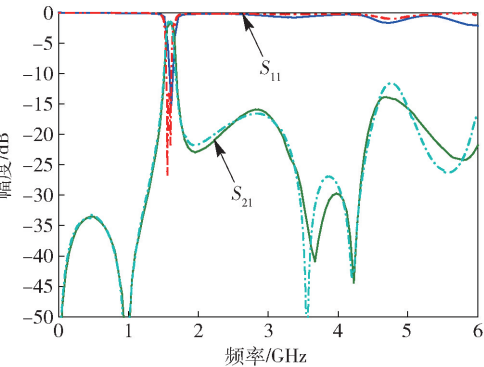


图 5 带通滤波器仿真结果和测试结果

表 4 为笔者提出的平行耦合线带通滤波器和已有文献中的滤波器主要参数比较. 从表 4 中可以看出,文献[1-2]中描述的滤波器电路面积较小,但高次谐波抑制需要改进. 文献[3-4]中描述的滤波器面积较大,谐波抑制也需要改进. 文献[6]中描述的滤波器电路面积较大,但其谐波抑制效果较好. 笔者提出滤波器的谐波抑制效果较好,同时电路面积较小,可实现小型化宽阻带带通滤波器设计.

表 4 滤波器特性参数比较

滤波器	高次谐波中心 频率/GHz	传输 零点	带外抑制/ dB	电路大小/ $\lambda_g^2$
文献[1]	$1.96f_0$	2	$>10.0$	0.015 1
文献[2]	$2.50f_0$	2	$>10.0$	0.030 0
文献[3]	$2.30f_0$	2	$>10.0$	0.499 8
文献[4]	$2.10f_0$	3	$>18.0$	0.168 1
文献[6]	$>2.70f_0$	5	$>20.0$	0.200 0
笔者设计	$>3.75f_0$	4	$>11.5$	0.027 6

3 结束语

提出了一种加载开路枝节的平行耦合线带通滤

波器. 基于奇偶模分析方法给出了滤波器的设计方  
程. 讨论了滤波器的相对带宽、通带内损耗和带外  
抑制. 基于 HFSS 软件进行仿真优化,同时制作并测  
试了滤波器的  $S$  参数. 测试结果和仿真结果基本一  
致,验证了理论的正确性. 同时该结构可应用到其  
他微波器件设计中.

参考文献:

[1] Cui Dongnuan, Liu Yuanan, Li Shulan, et al. Compact band-pass filter based on two meandered parallel-coupled lines in different lengths[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2012, 19(3): 33-36.

[2] Wang Hui, Yang Yuqian, Kang Wei, et al. Compact ultra-wideband differential band-pass filter using self-coupled ring resonator [J]. Electronics Letters, 2013, 49(18): 1156-1157.

[3] Wang Xiaohua, Hu Shen, Cao Qianyu. Differential broadband filter based on microstrip coupled line structures[J]. Electronics Letters, 2014, 50(15): 1069-1070.

[4] Wang H, Tam K W, Choi W W, et al. Analysis of coupled cross-shaped resonator and its application to differential band-pass filters design[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(12): 2942-2953.

[5] 朱永忠, 赵志远. 具有多传输零点的微带传输线滤波器设计[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(5): 77-80.

Zhu Yongzhong, Zhao Zhiyuan. Design of a microstrip transmission line filter with transmission zeros[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(5): 77-80.

[6] Zhou Jiageng, Chiang Yichyun, Che Wenquan. Compact wideband balanced band-pass filter with high common-mode suppression based on cascade parallel coupled lines [J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation, 2014, 8(8): 564-570.

[7] 李学斌, 郭建卓, 韩宇南. 基于非对称 SIR 的小型化双频带带通滤波器设计[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(2): 104-107.

Li Xuebin, Guo Jianzhuo, Han Yunan. Compact dual band-pass filter design using asymmetrical stepped-impedance resonators[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(2): 104-107.