

# 基于 CQ 拓扑的三通带滤波器的设计

马明明, 唐宗熙

(成都电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:**提出和设计了一个三通带通滤波器,采用 CQ 拓扑和缺陷地结构,产生了 8 个传输零点,获得了高频率选择和带间隔离。半波长阶梯阻抗谐振器(SIR)设计为同时谐振在第 1、2 和 3 通带的公共谐振器,公共谐振器和分别谐振在第 1、3 通带的 1/4 波长谐振器(QWR)组合构成 CQ 拓扑结构。同时,阴刻在地表面的缺陷地结构提高了调节耦合系数的自由度,便于调节耦合系数来满足特定要求。设计、加工和测量了工作在 2.4 GHz、3.4 GHz 和 5.5 GHz 的三通带滤波器,测试结果和仿真结果的一致性证明了提出的设计方法的可靠性。

**关键词:**缺陷地结构;阶梯阻抗谐振器;1/4 波长谐振器;传输零点;耦合系数

**中图分类号:**TN713.5 **文献标识码:**A

## Design of Tri-Band Filter Based on CQ Topology

MA Mingming, TANG Zongxi

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** A tri-band band-pass filter is proposed and designed in this paper. By employing CQ topology and the defected ground structure (DGS), eight transmission zeros (TZs) are generated and high frequency selectivity and inter-band isolation are obtained. The two-section half wavelength stepped impedance resonators (SIRs) are carefully designed as common resonators which resonate at the first three passband simultaneously, the quarter wavelength resonators (QWRs) that resonate at the first and third passband respectively are added to assemble quadruplet filters. Meanwhile, the defected ground structure (DGS) is etched on ground surface to adjust the coupling coefficients flexibly for specified demands. The tri-band band-pass filter operating at 2.4, 3.4, and 5.5 GHz simultaneously is designed, fabricated and measured. The good agreement between measured and simulated results verifies the the reliability of the proposed design method.

**Key words:** defected ground structure; stepped impedance resonator; quarter wavelength resonator; transmission zeros; coupling coefficients

### 0 引言

无线通信技术的发展和通信标准的不断提出,如 GPS, WLAN, 2G, 3G, 4G 和 WiMax,使有限的频谱资源更拥挤,多通带滤波器已成为现代微波电路和系统的重要器件之一。作为多频无线通信系统中的重要组件之一,三通带滤波器获得了广泛关注<sup>[1-4]</sup>。Chen C F 和 Chu Q X 综合并设计了基于阶梯阻抗谐振器(SIR)组成的多通带滤波<sup>[5-6]</sup>。新加坡的祝雷教授研究了短路枝节在 K 变换器中的应用,设计了四阶和六阶的带通滤波器<sup>[7-8]</sup>。利用 SIR 或加载短路/开路枝节构成的多模谐振器常用于设

计多通带滤波器,但其难以同时满足每个多通带滤波器对于耦合系数的要求。缺陷地结构的引入成为设计带通滤波器的新方法<sup>[9]</sup>。

滤波器采用 CQ 拓扑和缺陷地结构(DGS),每个通带两边引入了 2 个传输零点,获得了高频率选择性和很高的带外隔离。半波长 SIR 设计为公共谐振器,公共谐振器的阻抗比  $R > 1$ ,获得了较小的频率比  $f_2/f_1$  (其中,  $f_1$  为第 1 通带的中心频率;  $f_2$  为第 2 通带的中心频率),谐振在第 1、3 通带的 1/4 波长谐振器(QWR)与公共谐振器组成两个相互独立的横向交叉耦合传输路径。同时,引入缺陷地结构来调整耦合系数且不影响滤波器顶层版图布局。

收稿日期:2016-08-06

作者简介:马明明(1995-),男,安徽亳州人,硕士生,主要从事微波无源器件的研究。唐宗熙(1956-),男,重庆人,教授,博士生导师,从事电磁场与微波技术、微波毫米波电路与系统、微波毫米波集成电路与系统、微波测试技术及仪器、超导电子学等方面的科学研究。

### 1 滤波器的设计

#### 1.1 谐振器的设计

如图 1 所示,半波长 SIR 由两端开路的传输线组成。传输线的特性阻抗分别为  $Z_1$  和  $Z_2$ ,电长度分别为  $\theta_1$  和  $2\theta_2$ 。半波长 SIR 的输入导纳为

$$y_{in} = jY_1 \cdot [2(M - \tan \theta_1 \tan \theta_2)(\tan \theta_1 + M \tan \theta_2) \tan 2\theta_1 \tan 2\theta_2] / \{2M - (M^2 + 1) \tan 2\theta_1 \tan 2\theta_2\} \tan \theta_1 \tan \theta_2 \}^{-1} \quad (1)$$

式中:  $Y_1 = 1/Z_1$ ;  $M = Z_1/Z_2$ 。

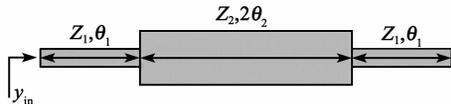


图 1 半波长 SIR

半波长 SIR 谐振时,  $y_{in} = 0$ 。当  $\theta_1 = \theta_2$  时,可得半波长 SIR 的基模谐振频率  $f_{0,SIR}$  对应的电长度  $\theta_{f,SIR}$  为

$$\theta_{f,SIR} = \tan^{-1} \sqrt{M} \quad (2)$$

前两个杂散谐振频率  $f_{s1}$ 、 $f_{s2}$  与基模谐振频率  $f_{0,SIR}$  的关系为

$$\begin{cases} \frac{f_{s1}}{f_{0,SIR}} = \frac{\pi}{2 \tan^{-1} \sqrt{M}} \\ \frac{f_{s2}}{f_{0,SIR}} = \frac{\pi - \tan^{-1} \sqrt{M}}{\tan^{-1} \sqrt{M}} \end{cases} \quad (3)$$

图 2 为 QWR 结构,QWR 由一端开路,另一端短路的传输线组成。由开路端看进去,QWR 的输入导纳为

$$y_{in,QWR} = -jY_3 \frac{K - \tan \theta_3 \tan \theta_4}{K \tan \theta_3 + \tan \theta_4} \quad (4)$$

式中  $K = Z_3/Z_4$ 。当  $K \neq 1$  时,图 2 表示 1/4 波长阶梯阻抗谐振器(QWSIR);当  $K = 1$  时,图 2 表示 1/4 波长均匀阻抗谐振器(QWUIR),这里统称 QWR。QWR 谐振时,  $y_{in,QWR} = 0$ 。由此可得 QWR 基模谐振频率  $f_{0,QWR}$  对应的电长度  $\theta_{f,QWR}$  为

$$\theta_{f,QWR} = \tan^{-1} \sqrt{K} \quad (5)$$

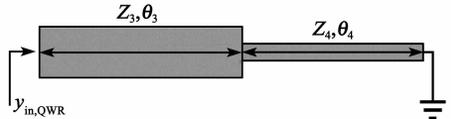
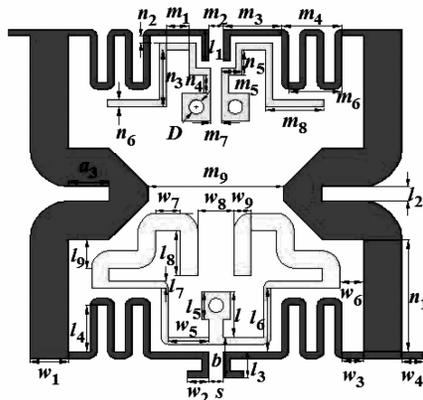


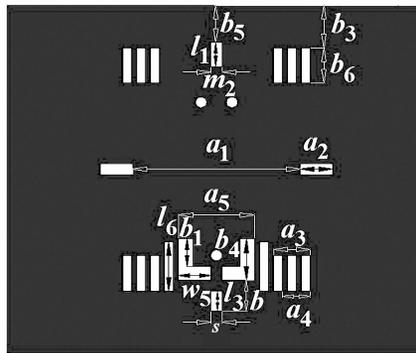
图 2 QWR

图 3 为滤波器的版图。其详细尺寸如下:  $\omega_0 = 1.52 \text{ mm}$ ,  $\omega_1 = 2.2 \text{ mm}$ ,  $\omega_2 = 1.2 \text{ mm}$ ,  $\omega_3 = 1.2 \text{ mm}$ ,  $\omega_4 = 1.2 \text{ mm}$ ,  $\omega_5 = 2.3 \text{ mm}$ ,  $\omega_6 = 1 \text{ mm}$ ,  $\omega_7 = 1.1 \text{ mm}$ ,  $\omega_8 = 2 \text{ mm}$ ,  $\omega_9 = 1.0 \text{ mm}$ ,  $m_1 =$

$1.3 \text{ mm}$ ,  $m_2 = 0.2 \text{ mm}$ ,  $m_3 = 3.4 \text{ mm}$ ,  $m_4 = 3.4 \text{ mm}$ ,  $m_5 = 0.9 \text{ mm}$ ,  $m_6 = 3 \text{ mm}$ ,  $m_7 = 0.6 \text{ mm}$ ,  $m_8 = 2.72 \text{ mm}$ ,  $a_1 = 11.4 \text{ mm}$ ,  $a_2 = 2.3 \text{ mm}$ ,  $a_3 = 2.6 \text{ mm}$ ,  $a_4 = 2 \text{ mm}$ ,  $a_5 = 5.4 \text{ mm}$ ,  $b_1 = 2.1 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 5.23 \text{ mm}$ ,  $b_3 = 6.1 \text{ mm}$ ,  $b_4 = 3.1 \text{ mm}$ ,  $b_5 = 5.7 \text{ mm}$ ,  $b_6 = 2.6 \text{ mm}$ ,  $D = 0.8 \text{ mm}$ ,  $l_1 = 1.8 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $l_3 = 1.5 \text{ mm}$ ,  $l_4 = 2.6 \text{ mm}$ ,  $l_5 = 1.6 \text{ mm}$ ,  $l_6 = 3.6 \text{ mm}$ ,  $l_7 = 0.4 \text{ mm}$ ,  $l_8 = 2.5 \text{ mm}$ ,  $l_9 = 1.6 \text{ mm}$ ,  $n_1 = 6.3 \text{ mm}$ ,  $n_2 = 0.4 \text{ mm}$ ,  $n_3 = 3.2 \text{ mm}$ ,  $n_4 = 1 \text{ mm}$ ,  $n_5 = 1.4 \text{ mm}$ ,  $n_6 = 1.52 \text{ mm}$ ,  $b = 2.0 \text{ mm}$ ,  $s = 0.2 \text{ mm}$ 。



(a) 顶层版图



(b) 底层版图

图 3 滤波器的版图

由图 3(a) 可见,滤波器由半波长 SIR 和 QWR 组成。半波长 SIR 同时谐振在第 1~3 通带的中心频率,QWR 分别谐振在第 1 和第 3 通带的中心频率。由式(2)~(5)可得谐振器的初始尺寸。

#### 1.2 CQ 耦合结构的设计

滤波器采用的两路 CQ 交叉耦合路径如图 4 所示。CQ 结构可在阻带引入一对传输零点,提高频率的选择性和带外抑制。其中,R 表示谐振器,上标 I 和 III 表示谐振器的谐振频率,下标表示谐振器的序数。滤波器的 3 dB 带宽分别为 11.6%,3.2% 和 3.8%。根据滤波器的中心频率和相对带宽,获得滤

波器的耦合系数。第 1 通带的耦合系数如下: $m_{12}^I = 0.038, m_{23}^I = -0.036, m_{34}^I = 0.038, m_{14}^I = 0.0201$ ;第 3 通带的耦合系数如下: $m_{12}^{III} = 0.107, m_{23}^{III} = -0.076, m_{34}^{III} = 0.107, m_{14}^{III} = 0.007$ 。

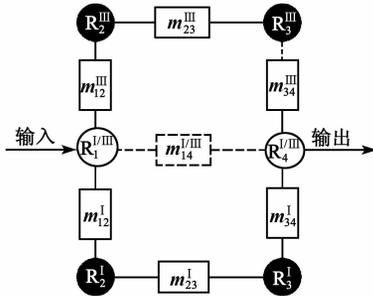


图 4 滤波器的耦合路径图

图 5 为滤波器的等效电路模型。通过调整谐振器之间的距离提取对应的耦合系数。另外,由图 3(b)可见,引入 DGS 调节耦合系数。由于慢波效应<sup>[10]</sup>,DGS 可以改变谐振器的自谐振频率。

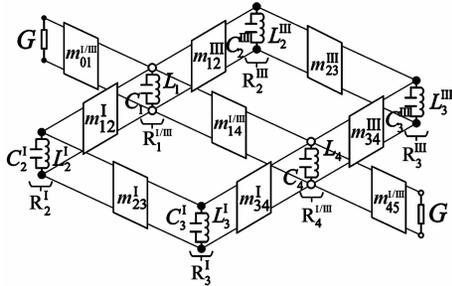


图 5 滤波器的等效电路

根据

$$m = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (6)$$

可有效调节耦合系数。DGS 蚀刻在地表面不会改变顶层版图。图 6 为耦合系数  $m_{12}^I$  (谐振器 1、2 之间的耦合系数)和  $b_6$  的函数关系。当  $b_6$  从 0.2 mm 改变到 3 mm,耦合系数  $m_{12}^I$  从 0.074 改变到 0.019。由此可得,DGS 的引入,可以有效减小耦合系数。

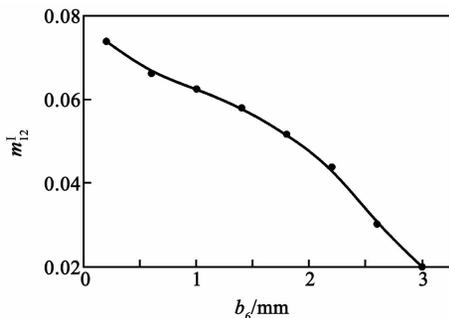


图 6 耦合系数  $m_{12}^I$  和  $b_6$  的函数关系

## 2 测试结果分析

如图 7 所示,滤波器的基板为 Rogers 5880 (介质损耗  $\tan \delta = 0.0009$ ,基板的厚度  $h = 0.508$  mm,基板的介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ ),滤波器占用尺寸为  $0.248\lambda_g \times 0.214\lambda_g$  (其中,  $\lambda_g$  为波导波长 @2.4 GHz)。滤波器的测量结果如图 8 所示。

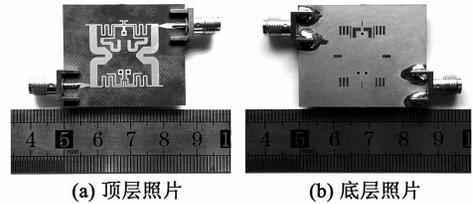


图 7 滤波器实物图

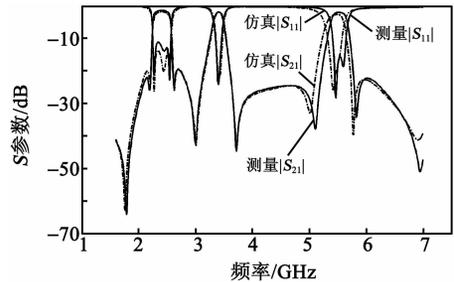


图 8 仿真结果和测量结果

由图 8 可见,在 2.40 GHz 处测量的插入损耗小于 1.56 dB,回波损耗大于 11.36 dB;在 3.40 GHz 处测量的插入损耗小于 2.02 dB,回波损耗大于 21 dB;在 5.50 GHz 处测量的插入损耗小于 2.04 dB,回波损耗大于 16.2 dB。引入的 8 个传输零点位于 1.79 GHz, 2.19 GHz, 2.62 GHz, 2.99 GHz, 3.71 GHz, 5.10 GHz, 5.82 GHz 和 6.94 GHz。因此,获得了高频率选择性和很好的带外隔离。

表 1 为近期三通带滤波器的研究状况。由表可见,本文提出的设计方法产生了更多的传输零点,获得了更高的频率选择性和更好的带外抑制。

表 1 三通带滤波器对比

参考文献	中心频率/ GHz	3 dB 相对 带宽/%	传输零点 的个数
[1]	1.59/3.12/4.02	15.7/12.7/5.7	5
[2]	3.48/4.18/5.52	7.0/5.0/6.0	5
[3]	1.80/2.40/5.80	8.9/12.5/5.3	3
[4]	1.80/3.50/5.80	7.0/5.0/3.5	6
本文工作	2.40/3.40/5.50	11.6/3.2/3.8	8

### 3 结束语

基于交叉耦合结构和缺陷地结构,提出了一种设计三通带滤波器<sup>[11]</sup>的方法。采用半波长 SIR 和 QWR 构成双交叉耦合路径,产生了 8 个传输零点,获得了高频率选择性和很好的带外抑制。通过研究证明,DGS 可便于调节耦合系数。最后设计并加工了一个三通带的滤波器,测量的结果验证了提出的方法的可靠性。

### 参考文献:

- [1] ZHANG S, ZHU L. Compact tri-band bandpass filter based on  $\lambda/4$  resonators with U-folded coupled-line [J]. IEEE Microw Wirel Compon Lett, 2013, 23(5): 258-260.
- [2] KUMAR N, SINGH Y K. Compact tri-band bandpass filter using three stub-loaded open-loop resonator with wide stopband and improved bandwidth response[J]. Electron Lett, 2014, 50(25):1950.
- [3] MO Y, SONG K, FAN Y. Miniaturized triple-band bandpass filter using coupled lines and grounded stepped impedance resonators[J]. IEEE Microw Wirel Compon Lett, 2014, 24(5):333-335.
- [4] LI Q, ZHANG YH, FENG X, et al. Tri-band filter with multiple transmission zeros and controllable bandwidths[J]. Int J Microw Wirel Tech, 2016, 8(1): 9-13.
- [5] CHEN C F, HUANG T Y, WU R B. Design of dual- and triple-passband filters using alternately cascaded multiband resonators[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006, 54(9):3550-3558.
- [6] CHU Q X, LIN X M. Advanced triple-band bandpass filter using tri-section SIR[J]. Electron Lett, 2008, 44(4):295-296.
- [7] ZHANG S, ZHU L. Synthesis method for even-order symmetrical chebyshev bandpass filters with alternative  $J/K$  inverters and  $\lambda/4$  resonators[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2013, 61(2):808-816.
- [8] ZHANG S, ZHU L. Synthesis design of dual-band bandpass filters with  $\lambda/4$  stepped-impedance resonators [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2013, 61(5): 1812-1819.
- [9] 冯梦璐,杨曙辉,陈迎潮. 基于 H 型缺陷地结构的超宽带带通滤波器设计[J]. 压电与声光, 2016, 38(4): 647-650.
- FENG Menglu, YANG Shuhui, CHEN Yinchao. Design of a ultra wideband bandpass filter using H shaped DGS[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(4): 647-650.
- [10] KIM H M, LEE B. Bandgap and slow/fast-wave characteristics of defected ground structures (DGSs) including left-handed features [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006, 54(7):3113-3120.
- [11] 田树林. 基片集成波导和带隙结构的带通滤波器[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2010(6):52-55.
- TIAN Shulin. Bandpass filter of substrate integrated waveguide and band gap structure [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2010(6):52-55.
- 
- (上接第 560 页)
- [3] LI Shiyang, JIANG Wenhua, ZHENG Limei, et al. A face-shear mode single crystal ultrasonic motor[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(18): 183512-183512-4.
- [4] 徐家跃,金敏. 新型弛豫铁电晶体:生长、性能及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008:149-153.
- [5] FRISWELL M I, ALI S F, ADHIKARI S, et al. Non-linear piezoelectric vibration energy harvesting from a vertical cantilever beam with tip mass[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2013, 23(13):1505-1521.
- [6] 曾一致. 振动能量收集器优化设计研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2013.
- [7] LIU Gang, JIANG Wenhua, ZHU Jiaqi, et al. Electromechanical properties and anisotropy of single- and multi-domain  $0.72\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.28\text{PbTiO}_3$  single crystals[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(16):162901-1629013.
- [8] NYE J F. Physical properties of crystals; their representation by tensors and matrix[M]. Oxford: Oxford University Press, 1985:20-29.
- [9] 陈纲,廖理儿,陈伟. 晶体物理学基础[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2007:1-38.
- [10] ANSI/IEEE Standard 176-1987, IEEE Standard on Piezoelectricity[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988.
- [11] ZHANG Shujun, LI Fei, JIANG Xiaoning, et al. Advantages and challenges of relaxor- $\text{PbTiO}_3$ , ferroelectric crystals for electroacoustic transducers-a review [J]. Progress in Materials Science, 2015, 68(3):1-66.
- [12] ZHENG Limei, LU Xiaoyan, SHANG Hengshan, et al. Hysteretic phase transition sequence in  $0.67\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.33\text{PbTiO}_3$  single crystal driven by electric field and temperature[J]. Physical Review B 2015, 91(18):184105.