

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208978

# 基于并联负载发夹型谐振器的四阶带通滤波器<sup>\*</sup>

吴熊伟 方婷

(南昌理工学院 南昌 330044)

**摘要:** 针对现代无线通信系统中平坦带通滤波器的需求,提出了一种并联负载的发夹型谐振器,并利用提出的谐振器构建了四阶平坦带通滤波器。首先,通过在发夹型谐振器磁场最强的位置(中心位置)设置电阻,设计了一种新的并联型谐振器,从而可以通过改变电阻值来灵活地调整固有品质因数;其次,采用具有高、低固有品质因数的耦合拓扑来构建四阶平坦带通滤波器。最后,在印刷电路板上制备了一个具有传输零点和平坦带通的四阶带通滤波器。实验结果表明,该四阶带通滤波器的实测结果与仿真结果吻合较好,与其他多阶带通滤波器相比,该四阶带通滤波器具有可灵活控制的固有品质因数和小于0.2 dB通带平坦度。

**关键词:** 带通滤波器;发夹型谐振器;并联负载;平坦带通;传输零点

**中图分类号:** TN713.5   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 510.50

## Fourth-order bandpass filter based on parallel load hairpin resonator

Wu Xiongwei Fang Ting

(Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330044, China)

**Abstract:** Aiming at the requirement of flat bandpass filter in modern wireless communication system, a hairpin resonator with parallel load is proposed, and a fourth-order flat bandpass filter is constructed by using the proposed resonator. Firstly, a new parallel resonator is designed by setting a resistor at the strongest magnetic field (central position) of the hairpin resonator, so that the inherent quality factor can be flexibly adjusted by changing the resistance value. Secondly, the fourth-order flat bandpass filter is constructed by using the coupling topology with high and low intrinsic quality factors. Finally, a fourth-order bandpass filter with transmission zero and flat bandpass is fabricated on the printed circuit board. Experimental results show that the measured results of the fourth-order bandpass filter are in good agreement with the simulation results. Compared with other multi-order bandpass filters, the fourth-order bandpass filter has the inherent quality factor that can be flexibly controlled and the passband flatness is less than 0.2 dB.

**Keywords:** band pass filter; hairpin resonator; parallel load; flat bandpass; transmission zero

## 0 引言

由于频率资源有限,当前无线系统大多需要采用插入损耗低、抑制带衰减大、通带平坦的带通滤波器<sup>[1-2]</sup> (bandpass filters, BPF)。超导滤波器具有优良的频率特性,可以满足低插入损耗、高滚降系数和平坦通带的要求。然而,超导滤波器很难像普通电子器件那样使用,因为需要高质量的低温冷却器。声表面波(surface acoustic waveguide, SAW)滤波器<sup>[3-4]</sup>具有良好的频率特性,结构紧凑,但其工作频率是有限制的。目前,对于较高工作频率的无线系统来说,缺乏具有平坦通带和良好选择性的合适射频 BPF。尽管基片集成波导<sup>[5-6]</sup> (substrate integrated

waveguide, SIW)滤波器也有良好的性能,但是使用 SIW 的谐振器的面积通常比较大。

近期,研究人员开始使用具有更好反射特性的非均匀 Q 谐振器技术<sup>[7-8]</sup>来实现平坦通带和良好选择性。但是,这种技术需要通过谐振器或谐振器之间的耦合来控制损耗。例如, Basti 等<sup>[9]</sup>提出了一种采用串联负载发夹型谐振器的六阶 BPF,具有较好的平坦带通特性。虽然它能有效地实现约 3~30 的固有品质因数,但不能灵活地控制固有品质因数。然而,灵活控制固有品质因数是非常重要的。此外,对于配置多阶平坦 BPF 来说,采用单模谐振器来控制通带平坦特性和带外抑制特性比多模谐振器更方便。

收稿日期:2022-02-08

<sup>\*</sup> 基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ191025)、南昌市智能制造电子装配创新开发重点实验室(2021-NCZDSY-018)项目资助

因此,本文提出了一种新型的单模发夹型谐振器,并利用所提出的谐振器构成了具有平坦通带特性的四阶BPF。利用印刷电路板(printed circuit board,PCB)对该带通滤波器进行了实际制作,并测量了其频率特性。

### 1 并串联型的发夹型谐振器

#### 1.1 并联型的谐振器设计

并联型(所提谐振器)和串联型发夹型谐振器<sup>[10-11]</sup>的原理图如图1所示,两种发夹型谐振器的等效电路模型如图2所示。

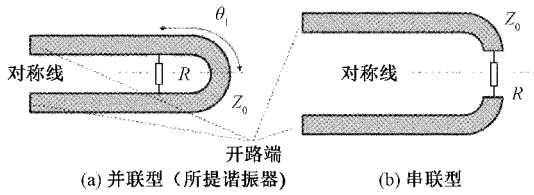


图1 两种发夹型谐振器的原理图

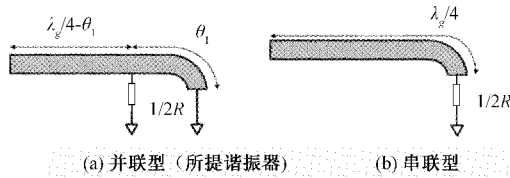


图2 两种发夹型谐振器的等效电路模型

图1和2中 $R$ 表示电阻, $\theta_1$ 表示 $R$ 与发夹型谐振器圆角部分之间的电气长度, $Z_0$ 表示传输线的特性阻抗, $\lambda_g$ 表示波导波长。图1(a)和(b)分别被定义为并联型和串联型。在本研究中, $R$ 是用片式电阻器来实现的。在图1(b)中,为了实现低固有品质因数 $Q_u$ ,在发夹型谐振器磁场最强的位置<sup>[12]</sup>(中心位置)设置了电阻。具有并联和串联 $R$ 的 $Q_u$ 计算方式分别如式(1)和(2)所示。

$$Q_u = \left( \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_R} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{\frac{\pi R}{8Z_0 \sin^2 \theta_1}} \right)^{-1} =$$

$$\left( \frac{1}{Q_0} + \frac{8Z_0 \sin^2 \theta_1}{\pi R} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$Q_u = \left( \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_R} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{\frac{\pi Z_0}{2R}} \right)^{-1} =$$

$$\left( \frac{1}{Q_0} + \frac{2R}{\pi Z_0} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中, $Q_R$ 为由 $R$ 引起的固有品质因数, $Q_0$ 表示原始发夹型谐振器的固有品质因数。 $R$ 的值是根据E24标准系列确定的<sup>[13]</sup>。可以看出,由于具有两个变量 $Q_0$ 和 $R$ ,所以并联型比串联型具有更宽的控制范围。当 $Q_0$ 等于244.5时,对于并联和串联类型, $R$ 和归一化 $Q_u$ 之间的关系如图3所示。

由图3可以看出,对于并联型的情况,归一化 $Q_u$ 的结

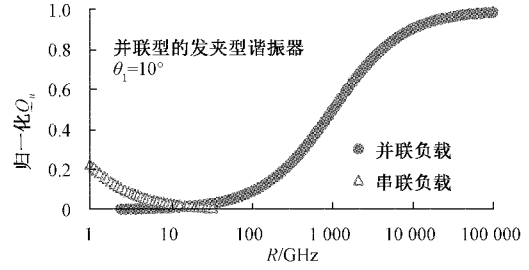


图3 并联型和串联型归一化 $Q_u$ 的比较。

果可以从0.01改变到0.998,而在图3中,串联型的结果限制在0.01~0.228之间,这意味着并联型比串联型更灵活。

#### 1.2 电磁仿真分析

使用电磁仿真软件<sup>[14-15]</sup>(Sonnet 15.4版本)计算出并联型的 $Q_u$ 。并联型的电磁仿真模型如图4所示。用于电磁仿真的微带线模型参数如表1所示。

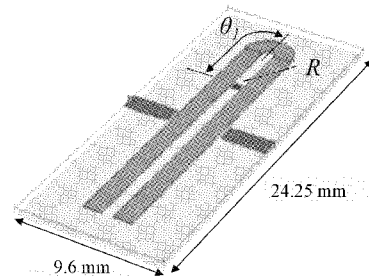


图4 并联型的电磁仿真模型

表1 微带线模型参数

参数	数值
相对介电常数 $\epsilon_r$	3.2
$\tan \delta$	0.001
介质基板的厚度/mm	0.5
导体的电导率/( $S \cdot m^{-1}$ )	$5.8 \times 10^7$
导体的厚度/ $\mu m$	18

为了实现2.4 GHz的谐振,发夹型谐振器的总长度为20.25 mm。原始发夹形谐振腔的固有品质因数 $Q_0 = 244.5$ 。 $Z_0$ 和 $R$ 分别等于50  $\Omega$ 和1 k $\Omega$ 。式(1)与电磁仿真计算结果的比较如图5所示。

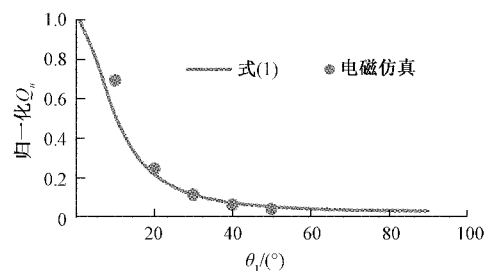


图5 式(1)与电磁仿真计算结果的比较

图 5 示出了  $\theta_1$  和  $Q_u$  之间的关系。图 5 中的实线表示当  $R$  等于 1 k $\Omega$  时的归一化  $Q_u$  (相对于 1  $\Omega$ )。结果表明, 归一化  $Q_u$  可以在 0.01~0.998 之间变化, 可以看出理论值与电磁模拟结果吻合良好。

### 2 平坦通带滤波器的耦合矩阵

平坦通带滤波器的设计规格如表 2 所示。

表 2 平坦通带滤波器的设计规格

参数	数值
中心频率 $f_0$ /GHz	2.4
通道带宽 $BW$ /MHz	200
分数带宽 $FBW$	0.83
平坦度 /dB	< 0.2

平坦度定义为  $|S_{21}|$  的最大值和最小值之间的差值。本文采用了图 6 所示的耦合拓扑来配置平坦 BPF。

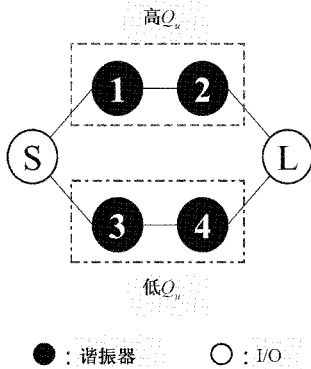


图 6 平坦 BPF 的耦合拓扑

图 6 中 S、L 和黑圈分别表示 BPF 的源、负载和谐振器。图 6 所示耦合拓扑有一个独有的特点, 即它被分成用于高  $Q_u$  路径和低  $Q_u$  路径的两个部分。通过结合高  $Q_u$  路径和低  $Q_u$  路径来构成四阶平坦 BPF。设平坦 BPF 的导纳矩阵  $A$ ,  $A$  与耦合矩阵  $M$  的关系<sup>[16]</sup> 如下:

$$A = \Omega U - jR + M \quad (3)$$

$$\Omega = \frac{1}{FBW} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (4)$$

其中,  $U$  和  $R$  表示 0 项不同的单位矩阵。

### 3 四阶平坦带通滤波器设计

采用具有高、低固有品质因数的耦合拓扑来构建四阶平坦带通滤波器, 即通过结合高  $Q_u$  路径和低  $Q_u$  路径来构成四阶平坦 BPF。该结构是通过对比电磁仿真和公式计算得到的  $s$  参数来确定的。两种并联方式的谐振频率均为 2.394 GHz, 在谐振频率附近的结果一致。四阶平坦 BPF 的结构如图 7 所示。

图 7 中 Port 1 为低  $Q_u$  路径的结构, 经过优化后, 低  $Q_u$  路径的结构 (Port 2) 中  $\theta_1$  和  $Z_0$  分别为 87.9° 和 52.6  $\Omega$ 。低

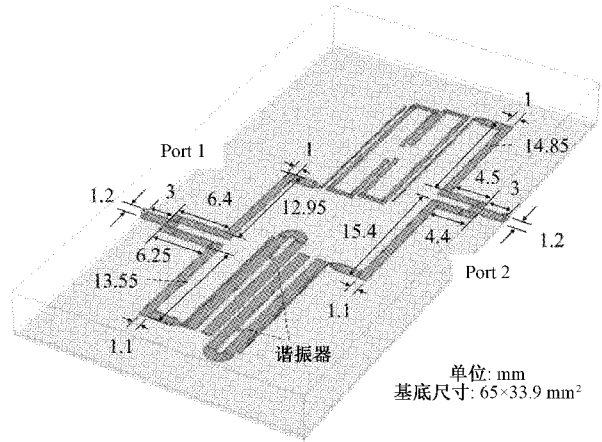


图 7 四阶平坦带通滤波器的结构

$Q_u$  路径的结构如图 8 所示。

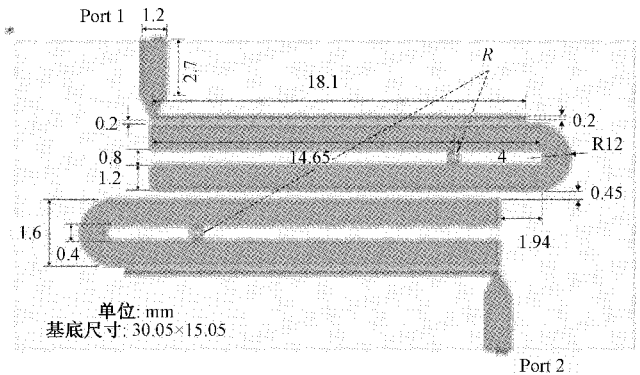


图 8 低  $Q_u$  路径的结构

图 7 中 Port 2 为高  $Q_u$  路径的结构。由于高  $Q_u$  路径的结构采用发夹型谐振器无法实现第一腔和第二腔之间的耦合系数, 因此采用半波开环谐振器构成高  $Q_u$  路径。经过优化后, 高  $Q_u$  路径的结构 (Port 1) 中  $\theta_1$  和  $Z_0$  分别为 89.3° 和 54.4  $\Omega$ , 高  $Q_u$  路径的结构如图 9 所示。

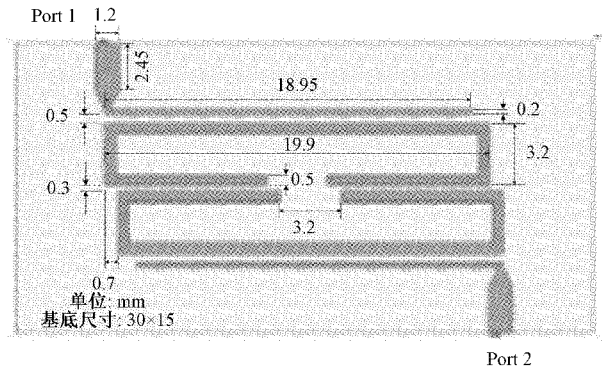


图 9 高  $Q_u$  路径的结构

### 4 实验结果与分析

为了验证所提四阶平坦 BPF 在可控固有品质因数和通带平坦度两个方面的性能, 对其进行实际测试, 并将测试

结果与仿真结果进行了对比。RO4003C 基底尺寸为  $65\text{ mm} \times 33.9\text{ mm}$ 。BPF 中  $1.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  的电阻选用了片式薄膜电阻 ERA-2AEB102X。波导波长  $\lambda_g$  为  $78.1\text{ mm}$ 。相对介电常数  $\epsilon_r$  为 3.2, 衬底的损耗正切  $\delta$  为 0.001, 介质基板的厚度为  $0.5\text{ mm}$ 。

所制备的四阶平坦 BPF 面积为  $0.832\lambda_g \times 0.434\lambda_g$ 。实际制备的四阶平坦 BPF 如图 10 所示。

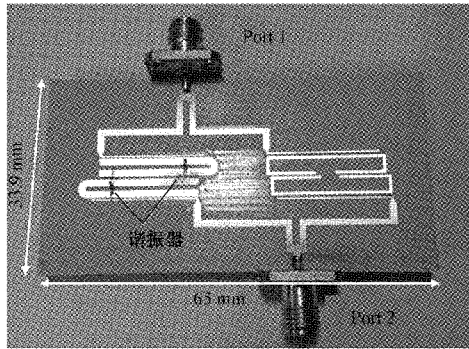


图 10 制备出的四阶平坦 BPF

使用罗德与施瓦茨 (Rohde&Schwarz) ZVR 向量网络分析仪对 BPF 进行了测量, 结果如图 11 和 12 所示。

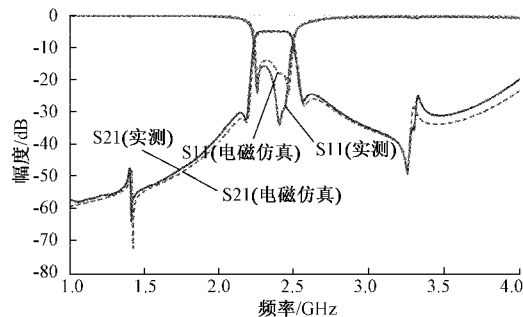


图 11 电磁仿真和测量结果

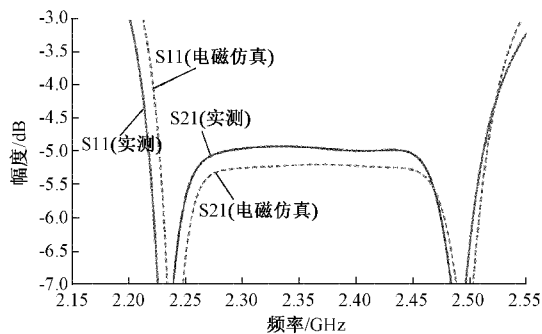


图 12 通带部分的局部放大

上述结果可以看出, 该四阶平坦 BPF 实测的 S 参数与电磁仿真结果吻合较好。考虑 PCB 的物理参数和铜箔的粗糙度, 半波谐振器的固有品质因数一般在 150 左右, 因此高  $Q_u$  路径的固有品质因数被确定为 150。实验结果表明,  $Q_u$  分别为 150 和 40 的情况下, 高  $Q_u$  路径和低  $Q_u$  路径的通频带相比其他模拟结果更平坦。

最后, 将所提四阶平坦 BPF 的整体性能与其他多阶带通滤波器<sup>[7,16]</sup>进行了对比, 对比结果如表 3 所示。

表 3 四阶平坦 BPF 的性能对比结果

参数	本文	[7]	[16]
$f_0/\text{GHz}$	2.362	2.4	2.4
BW/MHz	189	200	180
FBW	0.08	0.08	0.08
插入损耗 IL/dB	4.93	5.27	4.82
通带纹波/dB	0.06	0.08	0.06
通带平坦度/dB	<0.2	0.26	0.2
固有品质因数 $Q_u$	40, 150	220	118
尺寸/mm	$65 \times 33.9$	$58 \times 37.2$	$45 \times 28.2$

由表 3 的结果可以看出, 与文献[7,16]相比, 在中心频率、插入损耗、通道带宽 BW 和通带纹波等规格参数基本相同的条件下, 所提四阶平坦 BPF 的优点在于通过改变电阻值实现了 40 和 150 两种固有品质因数  $Q_u$ , 即实现了可灵活控制的固有品质因数。此外, 提出的四阶平坦 BPF 也具有最佳的通带平坦度, 小于 0.2 dB, 十分符合现代无线通信系统中平坦带通滤波器的需求。

## 5 结 论

本文设计了一种并联电阻负载发夹型谐振器。通过在发夹型谐振器中心位置设置电阻, 设计了一种新的并联型谐振器, 并采用具有高、低固有品质因数的耦合拓扑来构建四阶平坦带通滤波器。结果表明, 实测结果与仿真结果吻合较好。该四阶 BPF 具有良好的通带平坦性, 并利用所提谐振器实现了可灵活控制的固有品质因数。但是, 由于耦合拓扑的引入, 该四阶 BPF 的面积有一定的增加, 后续将对此问题开展进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] LUO C, JIANG Y, WEI B, et al. A wide stopband wideband hts filter using stepped-impedance resonators with interdigital capacitor structure [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 11(79):124-131.
- [2] SEKIYA N, TSURUOKA T. Improvement of filter properties of independently tunable superconducting dual-band bandpass filter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5):1-4.
- [3] 羊俊波, 曾理. 基于加权最小二乘滤波和引导滤波的铸件 DR 图像融合 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 211-220.
- [4] ZHGOON S A, SHVETSOV A S, SAKHAROV S A, et al. High temperature SAW resonator sensors: Electrode design specifics [J]. IEEE Transactions on

- Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2018(8):657-664.
- [5] QIN R, ZHANG D, DING Z, et al. Dual-band filter with high out-of-band rejection using ACSRR-SIW technology [J]. IEICE Electronics Express, 2020, 17(12):150-157.
- [6] WONG S, CHEN R S, WANG K, et al. U-shape slots structure on substrate integrated waveguide for 40 GHz bandpass filter using LTCC technology[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2017, 5(1):128-134.
- [7] GUO H, NI J, HONG J. Varactor-tuned dual-mode bandpass filter with nonuniform Q distribution [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 63(11):5197-5203.
- [8] QIU L F, WU L S, YIN W Y, et al. Hybrid nonuniform-Q lossy filters with substrate integrated waveguide and microstrip resonators [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2018, 12(1): 92-98.
- [9] BASTI A, PERIGAUD A, BILA S, et al. Design of microstrip lossy filters for receivers in satellite transponders [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2016, 62(9):2014-2024.
- [10] KHANDELWAL M K, ADITYA A, SACHIN K, et al. Dual band double negative(DNG) metamaterial with small frequency ratio[J]. Journal of Electromagnetic Waves & Applications, 2018, 14(5):1-15.
- [11] 姬娜娜,姚金杰. 基于 T 型谐振器的毫米波窄带带通滤波器设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(8):12-16.
- [12] 姚伟业,于映,付海航,等. 基于柔性衬底的微带发夹型滤波器设计与优化 [J]. 传感器与微系统, 2018, 37(6):103-104.
- [13] 张晓娜,杨录,田力,等. 超声导波谐振式传感器驱动电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(4):87-92.
- [14] SEGOVIA D, HERRAIZ FJ, UGARTE E, et al. Quad-frequency linearly-polarized and dual-frequency circularly-polarized microstrip patch antennas with CRLH loading [J]. Progress in Electromagnetics Research-PIER, 2013, 133:91-115.
- [15] 黄子军,卞雷祥,李辉,等. 高 Q 值超低功耗谐振式磁传感器的设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5):1-7.
- [16] QIU L F, WU L S, YIN W Y, et al. A flat-passband microstrip filter with nonuniform q dual-mode resonators [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26(3):1-3.

#### 作者简介

吴熊伟, 硕士, 讲师, 主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail: kv3850@163.com

方婷, 硕士, 讲师, 主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail: ey9286@163.com