

## 三模混合集成小型化滤波器设计

马瀚洋<sup>1</sup>, 周雨进<sup>2</sup>, 周 骏<sup>2</sup>

(1.南京电子器件研究所, 江苏 南京 210016; 2.南京国博电子股份有限公司, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 提出了一种基于 LC 串联单元的三模混合集成小型化滤波器电路拓扑。该电路拓扑具有对称性, 主体由 4 个 LC 串联单元所构成的“星型”结构组成, 能够通过对其并联于地的 LC 串联单元中元件参数的调节实现对滤波器双零点的自由调节。基于奇偶模分析方法, 给出了所提出滤波器拓扑的综合设计方法, 并采用基于商业化硅基表贴电容的低成本混合集成技术研制一款具有明显小型化特性的三模多零点带通滤波器。所研制的滤波器仿真与测试结果吻合良好, 其中心频率为 2.6 GHz, 3 dB 带宽为 1.34 GHz, 插入损耗典型值为 1.6 dB, 能够在 4~12 GHz 的频带范围内实现 30 dB 的抑制能力, 其面积尺寸为 3.2 mm×1.9 mm( $0.03\lambda_0 \times 0.02\lambda_0$ )。

**关键词:** 多模谐振器; 集总参数; 小型化; 带通滤波器

中图分类号: TN713

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222676

中文引用格式: 马瀚洋, 周雨进, 周骏. 三模混合集成小型化滤波器设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 94~97, 103.

英文引用格式: Ma Hanyang, Zhou Yujin, Zhou Jun. A triple-mode bandpass filter featured with hybrid integration and tiny size[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 94~97, 103.

### A triple-mode bandpass filter featured with hybrid integration and tiny size

Ma Hanyang<sup>1</sup>, Zhou Yujin<sup>2</sup>, Zhou Jun<sup>2</sup>

(1.Nanjing Electronic Devices Institute , Nanjing 210016 , China ;  
2.Nanjing Guobo Electronics Company Limited , Nanjing 211100 , China)

**Abstract:** A circuit topology of a LC series unit based triple-mode bandpass filter featured with hybrid integration and tiny size is proposed. The main part of the symmetrical circuit is composed of a “star” structure with four LC series units. It can realize the free adjustment of the two transmission zeroes by adjusting the parameters of the LC series units connected in parallel to the ground. Based on odd-even mode analysis method, this paper presents the comprehensive design method of the proposed filter and develops a triple-mode multiple-zero bandpass filter with miniaturization characteristics by using hybrid integration technology with commercial silicon-based surface mount capacitors. The simulation and test results of the developed filter are in good agreement. The filter has a 3 dB bandwidth of 1.34 GHz at center frequency of 2.6 GHz. The typical insertion loss of the filter is 1.6 dB. The upper stopband attenuation higher than 30 dB is 4~12 GHz. It occupies only 3.2 mm×1.9 mm( $0.03\lambda_0 \times 0.02\lambda_0$ ) .

**Key words:** multimode resonator; lumped-element; miniaturized; passband filter

### 0 引言

随着现代通信技术的不断发展, 通信终端小型化的趋势日趋明显, 微波滤波器作为无线通信系统中重要的信号处理器件之一, 也面临着更加严峻的挑战, 其频率选择特性的优劣、尺寸的大小、成本及可靠性高低都是系统设计中非常重要的因素, 因此滤波器的小型化研究具有重要的意义<sup>[1]</sup>。Ragan 在 1948 年首次提出了使用双模谐振器减小腔体滤波器尺寸的可能性, 其通过耦合简并模式(具有相同谐振频率的模式)获得紧密间隔的多个谐振频率<sup>[2]</sup>。Wolff 在 1972 年提出了第一个双模谐振器微带带通滤波器<sup>[3]</sup>, 该滤波器基于封闭环形微带结构, 通过“不对称”容性结构的加载使得模式分离, 从而形成了具有双模谐振特性的环形谐振结构。

Riaz 等人在 2019 年基于中心加载开路短截线的阶跃阻抗传输线谐振器提出了一种低损耗、宽阻带的多模带通滤波器<sup>[4]</sup>。Li W 等人提出了多短截线加载的半波长多模谐振器, 并设计实现了超宽带带通滤波器<sup>[5]</sup>。虽然多模谐振器在很大程度上减小了滤波器的尺寸, 但是由分布参数元件所构成的滤波器的尺寸仍然受到波长的限制。

为了进一步提升多模滤波器的小型化能力, 本文采用集总参数设计思路, 提出了一种具有三模谐振与双传输零点特性的小型化带通滤波器, 该滤波器采用集总电感, 主体电路由 4 个 LC 串联单元组成, 能够通过对其并联于地的 LC 串联单元中元件参数的调节实现对双零点的自由调节。

## 1 滤波器

本文提出的三模多零点混合集成小型化带通滤波器拓扑结构如图1所示。电路拓扑结构具有对称性，电路主体为4路LC串联单元，呈“星型”分布。其中，上下两路并联于地的LC串联单元用于调节滤波器两个零点的位置；电容C<sub>1</sub>用于耦合馈电，C<sub>41</sub>、C<sub>42</sub>用于调节滤波器的外部品质因数。

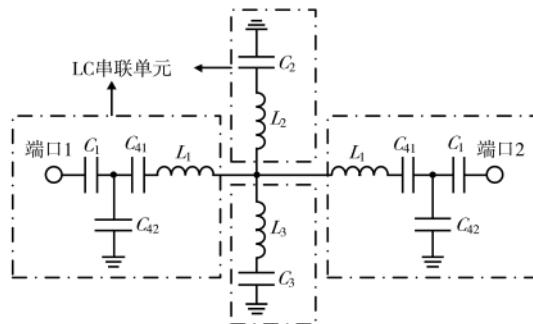


图1 滤波器拓扑结构

对图1所示的谐振器拓扑结构进行奇偶模分析。谐振器的奇模等效电路如图2(a)所示，可以求出其奇模阻抗为：

$$Z_{\text{ino}} = \frac{1}{-\frac{j\omega C_{41}}{1 - \omega^2 C_{41} L_1} + j\omega C_{42}} \quad (1)$$

偶模等效电路如图2(b)所示，它存在两个谐振频率，可以等效为两个谐振器，如图3所示。

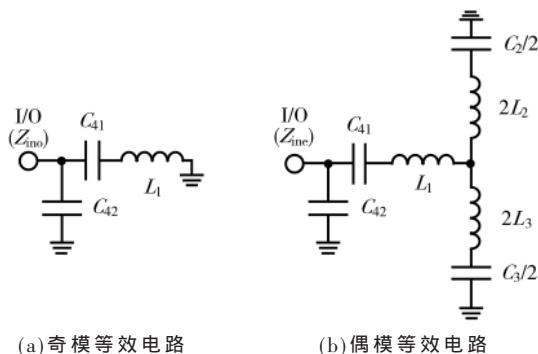


图2 奇偶模等效电路

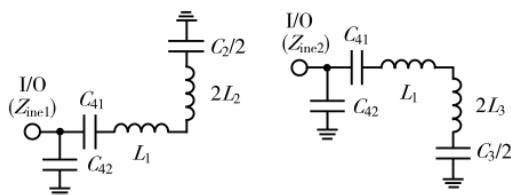


图3 用于产生偶模谐振的基础电路

两个偶模谐振模式的阻抗分别为：

$$Z_{\text{ine1}} = \frac{1}{j\omega C_{42} + \frac{1}{A_1}} \quad (2)$$

$$Z_{\text{ine2}} = \frac{1}{j\omega C_{42} + \frac{1}{A_2}} \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{j\omega C_2 C_{41}}{2C_{41} + C_2 - \omega^2 C_2 C_{41}(L_1 + 2L_2)} \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{j\omega C_3 C_{41}}{2C_{41} + C_3 - \omega^2 C_3 C_{41}(L_1 + 2L_3)} \quad (5)$$

构成谐振条件时，Z<sub>ino</sub>=0；Z<sub>ine1</sub>=Z<sub>ine2</sub>=0。根据这一条件，结合f=ω/2π，可以求出f<sub>o</sub>、f<sub>even1</sub>、f<sub>even2</sub>，其中f<sub>o</sub>为奇模谐振频率，f<sub>even1</sub>、f<sub>even2</sub>为两个偶模谐振频率。

在此基础上，分析滤波器的传输零点：

$$S_{21} = S_{12} = \frac{(Z_{\text{ine}} - Z_{\text{ino}})Z_0}{(Z_{\text{ine}} + Z_0)(Z_{\text{ino}} + Z_0)} \quad (6)$$

$$Z_{\text{ine}} = \frac{1}{j\omega C_{42} + \frac{1}{j\omega C_{41} + j\omega L_1 + B_1}} \quad (7)$$

$$B_1 = \frac{2(\frac{1}{C_2} - \omega^2 L_2)(\frac{1}{C_3} - \omega^2 L_3)}{(C_2 + C_3)/C_2 C_3 - \omega^2 (L_2 + L_3)} \quad (8)$$

在传输零点处，有S<sub>21</sub>=S<sub>12</sub>=0。根据这一条件，可以求出两个传输零点f<sub>TZ1</sub>、f<sub>TZ2</sub>。

综上所述，当各个极点和双零点满足f<sub>TZ2</sub>>f<sub>c2</sub>>f<sub>o</sub>>f<sub>c1</sub>>f<sub>TZ1</sub>时可以构成多模带通滤波器。

考虑到滤波器工作频率处于低频且带宽较大时所需要的耦合电容C<sub>1</sub>较大，因此不能忽略耦合馈电电容C<sub>1</sub>对滤波器特性的影响。同时，为了减小滤波器通带内的插入损耗，需要调整耦合电容C<sub>1</sub>使馈线与谐振器之间的损耗最小，也就是传输系数S<sub>21</sub>在通带内取最大值。

对图1所示的滤波器进行分析，计算其传输系数。输入输出端口之间的传输矩阵为M<sub>C<sub>1</sub></sub>·M<sub>C<sub>42</sub></sub>·M<sub>C<sub>41</sub></sub>·M<sub>L<sub>1</sub></sub>·M<sub>S<sub>2</sub></sub>·M<sub>S<sub>3</sub></sub>·M<sub>L<sub>1</sub></sub>·M<sub>C<sub>42</sub></sub>·M<sub>C<sub>41</sub></sub>，其中M<sub>C<sub>1</sub></sub>、M<sub>C<sub>41</sub></sub>、M<sub>L<sub>1</sub></sub>是串联电容C<sub>1</sub>、C<sub>41</sub>和串联电感L<sub>1</sub>的传输矩阵，M<sub>C<sub>42</sub></sub>是对地并联电容C<sub>42</sub>的传输矩阵，M<sub>S<sub>2</sub></sub>、M<sub>S<sub>3</sub></sub>分别是电感L<sub>2</sub>和L<sub>3</sub>的传输矩阵，它们的另一端加载了电容C<sub>2</sub>和C<sub>3</sub>。

通过传输矩阵与散射矩阵之间的关系S<sub>21</sub>=2/(A+B/Z<sub>0</sub>+CZ<sub>0</sub>+D)即可求出滤波器的传输系数S<sub>21</sub>，将C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>41</sub>、C<sub>42</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>代入即可得到关于C<sub>1</sub>的表达式，以此确定S<sub>21</sub>幅值最大时C<sub>1</sub>的值。

根据上述滤波器的综合设计方法，当各电感的值为L<sub>1</sub>=3.7 nH，L<sub>2</sub>=3.8 nH，L<sub>3</sub>=1.2 nH时，取C<sub>1</sub>=3.0 pF，C<sub>2</sub>=2.6 pF，C<sub>3</sub>=1.5 pF，C<sub>41</sub>=2.7 pF，C<sub>42</sub>=0.9 pF。以这些参数设计的滤波器的电路仿真结果如图4所示。

基于提出的电路拓扑给出了滤波器的物理结构，如图5所示。滤波器物理结构的中间部分为“星型”结构的4个圆形集总电感，其中的LC串联谐振单元由集总电感与商业化硅基表贴电容连接形成，电容采用AVX的Accu-P系列。滤波器采用介电常数为9.9、厚度为0.254 mm的陶瓷基板，最终装配完成的滤波器，尺寸为3.2 mm×1.9 mm(0.03λ<sub>0</sub>×0.02λ<sub>0</sub>)（照片如图7中所示）。

滤波器中的集总电感采用圆形结构。常见的电感结构<sup>[6]</sup>主要有曲折形、方形螺旋、圆形和八边形螺旋4种。

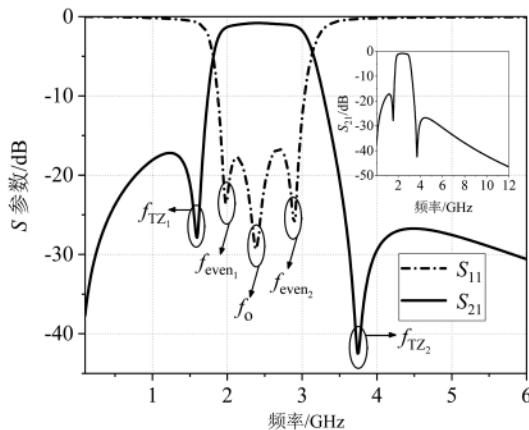


图 4 滤波器电路仿真性能曲线

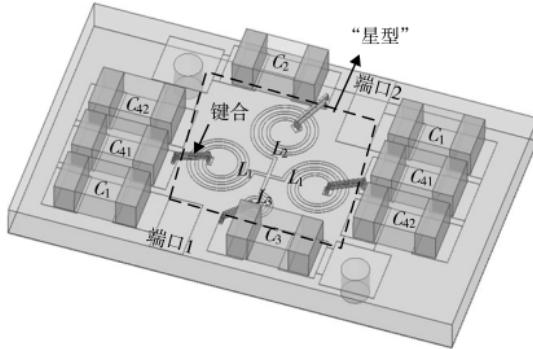


图 5 滤波器电磁仿真模型

其中曲折形和方形螺旋电感的结构比较简单，在仿真软件中也更容易完成建模和调整，不足之处在于这两种电感的自谐振频率较低。圆形和八边形螺旋电感结构虽然较为复杂，但采用这两种结构的电感自谐振频率较高，更符合要求。

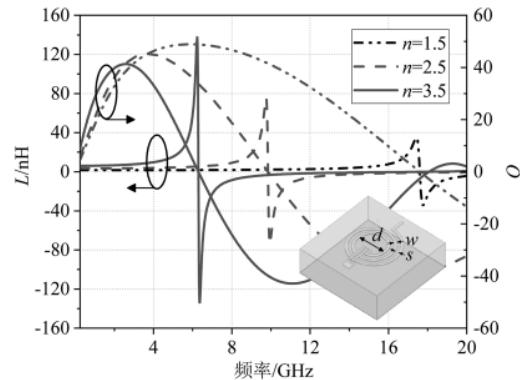
采用电磁仿真软件对圆形电感进行 EM 建模，如图 6 所示，其中  $d$ 、 $s$ 、 $w$  分别表示圆形电感的内径、线间距和线宽。对图 6 所示的圆形电感模型进行仿真，并分析内径、线间距和线宽对电感值  $L$ 、自谐振频率和外部品质因数  $Q$  的影响，其中  $L$ 、 $Q$  的提取公式如式(9)、式(10)所示。

$$L = \frac{\text{Im}(1/Y(1,1))}{2\pi f} \quad (9)$$

$$Q = \frac{\text{Im}(1/Y(1,1))}{\text{Re}(1/Y(1,1))} \quad (10)$$

图 6 还给出了圆形电感值  $L$  和品质因数  $Q$  随电感圈数  $n$  的变化情况，从图中可以发现圈数对电感各个参数的影响都较大。随着圈数  $n$  的增加，电感值变大，但自谐振频率也大幅减小，这是由于电感面积增加导致引入的寄生电容增大。 $Q$  值在达到最大值前随着  $n$  的增加而增加；达到最大之后， $Q$  值急剧下降。

电感的内径  $d$ 、线间距  $s$  和线宽  $w$  等其他参数也会对电感性能产生影响，通过对各个影响电感性能的参数进行分析，可以建立一个在需要的频段内具有较高  $Q$  值的圆形电感模型。

图 6 圆形电感模型及圈数  $n$  对电感值和  $Q$  值的影响

## 2 测试结果

对滤波器进行测试，测试结果如图 7 所示，可以发现，所研制的滤波器仿真与测试结果吻合良好，其中心频率为 2.6 GHz，3 dB 带宽为 1.34 GHz，插入损耗典型值为 1.6 dB，同时能够在 4.0~12 GHz 的频带范围内实现 30 dB 的抑制能力，具有优越的宽阻带特性。相较于纯电路仿真，EM 仿真和实测结果在 8.5 GHz 和 11.5 GHz 附近产生了一个新的零点  $f_{TZ_3}$ ，这是由电感和电容的自谐振频率引入的。

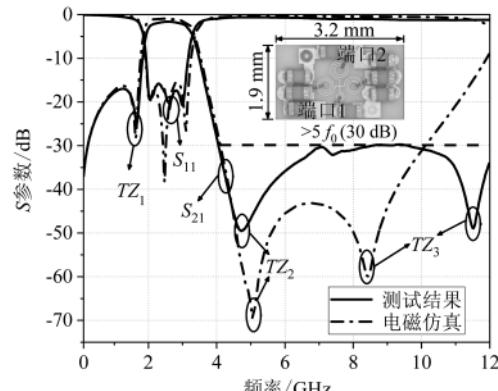


图 7 测试与仿真结果对比

表 1 为本文设计的带通滤波器与其他文献的性能对比，由此可知，研制的滤波器具有较大的带宽和较小的尺寸，性能良好。

表 1 本文与其他带通滤波器的性能对比

文献	类型	中心频率/ 带宽/GHz	插入损/ dB	尺寸/(mm <sup>2</sup> /λ <sub>0</sub> )
文献[7]	双模分布式	11.51/1.42	4.8	2.35×1.46/0.90×0.56
文献[8]	多模分布式	1.55/0.4	0.974	40×30/0.70×0.50
文献[9]	多模分布式	0.9/0.18	1.7	10×4.6/0.03×0.01
文献[10]	双模混合式	0.935/0.37	1.2	108×27/0.34×0.09
文献[11]	多模分布式	0.55/0.42	1.5	71×63/0.12×0.13
本文	三模集总式	2.6/1.34	1.6	3.2×1.9/0.03×0.02

### 3 结论

本文采用集总电感与商业化表贴电容的混合集成技术,研制了一款具有明显小型化特性的三模多零点带通滤波器。该滤波器性能良好,中心频率为2.6 GHz,3 dB带宽为1.34 GHz,插入损耗典型值为1.6 dB,能够在4~12 GHz的频带范围内实现30 dB的抑制,具有优越的宽阻带特性,其面积尺寸为3.2 mm×1.9 mm(0.03λ₀×0.02λ₀),满足5G高密度集成射频前端小型化与集成化需求。

### 参考文献

- [1] 陈邦媛.射频通信电路(第2版)[M].北京:科学出版社,2013.
- [2] RAGAN G. Microwave transmission circuits[M]. New York: McGraw-Hill, 1948.
- [3] WOLFF I. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator[J]. Electronics Letters, 1972, 8(12): 302–303.
- [4] RIAZ M, VIRDEE B S, SHUKLA P, et al. Quasi-elliptic ultra-wideband bandpass filter with super-wide stopband[J]. AEU—International Journal of Electronics and Communications, 2019, 105: 171–176.
- [5] LI W, XIAO F, YU X, et al. A novel UWB bandpass filter based on multi-stub loaded half-wavelength resonator[C]// 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference(APMC). IEEE, 2017: 821–824.
- [6] BAHL I J. Lumped elements for RF and microwave circuits[M]. Artech House, 2003.
- [7] LIN G, DONG Y. A compact, hybrid SIW filter with controllable transmission zeros and high selectivity[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs (Eaxly Access), 2022.
- [8] YEO K S K. Wideband grounded coplanar waveguide bandpass filter with novel coupling structures[C]// 2019 IEEE

(下转第103页)

(上接第93页)

为“移动式”应急监控,将固定的指挥调度中心改变为虚拟指挥调度中心,将单一应急调度模式改变为手机、PC、远程服务器等多终端关联互动的综合处置模式,特别适用于突发事件和应急场所,并能减少人力投入,是一种应急处置模式的变革。

### 参考文献

- [1] 秦婷,张长华.云计算技术项目教程[M].北京:知识产权出版社,2016:124.
- [2] 饶文碧.Hadoop核心技术与实验[M].武汉:武汉大学出版社,2017:1.
- [3] 米向荣,曹建芳,史昊.基于Hadoop的煤矿图像PCA-SIFT特征提取算法研究[J].软件导刊,2018,17(12):81–86.
- [4] 陈雁,卿济民,管才路.基于大数据技术的视频监控应用研究与探索[J].数字通信世界,2018(11):162–164.
- [5] 张敬锋,刘琼,李磊.Hadoop与ETL技术在视频数据中的应用[J].警察技术,2018(5):27–29.
- [6] 周晓庆,周智勇,高江锦,等.基于Hadoop的海量图片存储平台的设计与开发[J].电脑知识与技术:学术交流,2018,14(17):135–137.
- [7] 张春霞,王新猛,张晓熙.基于Hadoop的森林公安网络舆情监测系统设计与实现[J].信息网络安全,2018(12):87–91.
- [8] 陆俊杰,乐宇日,陈峰.基于云计算技术的视频监控系统架构设计与实现[J].现代科学仪器,2018(2):34–38.

[9] 李小华,周毅.医院信息系统数据库技术与应用[M].广州:中山大学出版社,2015:431–433.

[10] 冯亚丽,李敏,张玉华.采摘机器人AGV控制系统研究—基于云平台分布式远程监控技术[J].农机化研究,2020,42(8):255–259.

[11] 杨旭,汤海京,丁刚毅.数据科学导论(第2版)[M].北京:北京理工大学出版社,2017:168.

[12] 张一夫,陈天飞,张建松.基于树莓派的在线人脸识别考勤系统[J].电子设计工程,2019,27(22):152–156.

[13] 焦克莹.基于随机梯度优化的视频目标跟踪方法[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2017,46(5):744–748.

[14] 张静然.局部Fisher准则以及子空间分析的人脸识别算法研究[D].赣州:江西理工大学,2018.

[15] 李婧,李志强.关于PCA的人脸识别技术的研究[J].电子测试,2016(23):9–10.

[16] 亢洁,李珍,王晓东,等.基于MB\_LBP旋转不变特征的AdaBoost人脸检测算法研究[J].陕西科技大学学报,2017,35(4):164–167.

(收稿日期:2021-05-20)

### 作者简介:

张立志(1971-),女,博士,高级工程师,主要研究方向:大数据分析、图像处理。

李学文(1971-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:计算机算法分析、图像处理。



扫码下载电子文档

证后,推导出大功率器件封装外壳在实际使用和仿真中的S21存在着较大偏差的原因主要来自于辐射损耗;制备了相应的样品进行了一系列的对照试验,通过对输入输出端平面镀覆不同高度的金属层来观察S参数结果的改变,验证了辐射损耗的存在;辐射损耗会导致信号在返回路径上的信号完整性受到影响,故而针对辐射损耗对设计进行优化,S参数测试结果达到了S11≤-21 dB,S21≥-0.31 dB,与仿真结果接近;并提出相应的解决方法来实现电磁屏蔽,包括镀覆金属层和设计过孔、侧孔孔壁金属化等结构以及改良测试方法,避免辐射损耗影响最终的S参数。本研究可以为大功率器件类封装外壳的设计、测试和实际使用提供借鉴意义。

#### 参考文献

- [1] 印政,陶洪琪.X波段20 W高效率负载调制平衡放大器MMIC[J].固体电子学研究与进展,2022,42(1):5~9,21.
- [2] 付浩,刘德喜,祝大龙,等.X频段接收组件三维SiP微系统设计[J].电子技术应用,2020,46(7):7~9,14.
- [3] 张晓庆,刘德喜,祝大龙,等.DC~40 GHz通用化BGA封装的射频微系统测试技术研究[J].电子技术应用,2021,47(1):2~6,10.
- [4] CAO B,WANG H,HUANG Y,et al.A W-band low-loss and wideband LTCC transition from waveguide to microstrip[J].

IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2013, 23(11): 572~574.

- [5] 施梦侨,李永彬,龚锦林,等.基于HTCC工艺的X波段小型化双面多腔体外壳的研制[J].固体电子学研究与进展,2017,38(1):66~69.
- [6] 李永彬,周昊,钱志宇,等.一种应用于18 GHz功放模块的陶瓷外壳设计[J].固体电子学研究与进展,2016,36(5):398~401.
- [7] RUMIANYSEV A.On-wafer calibration techniques enabling accurate characterization of high-performance silicon devices at the mm-Wave range and beyond[M].The Netherlands: River Publishers, 2019: 11~35.
- [8] LEE K,JUNG H K,CHI H J,et al.Serpentine microstrip lines with zero far-end crosstalk for parallel high-speed DRAM interfaces[J].IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2010, 33(2): 552~558.

(收稿日期:2021-11-19)

#### 作者简介:

颜汇锃(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:微波、高速外壳。

施梦侨(1993-),女,硕士,工程师,主要研究方向:微波、毫米波外壳的仿真与测试。



扫码下载电子文档

(上接第97页)

- Asia-Pacific Microwave Conference(APMC).IEEE, 2019: 1038~1040.
- [9] BELYAEV B A,SERZHANTOV A M,LEKSIKOV A A,et al. Novel high-quality compact microstrip resonator and its application to bandpass filter[J].IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(9): 579~581.
  - [10] ZHANG R,PEROULIS D.Mixed lumped and distributed circuits in wideband bandpass filter application for spurious-response suppression[J].IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(11): 978~980.
  - [11] ZHANG R,LUO S,ZHU L,et al.Synthesis and design of miniaturized wideband bandpass filters with scaled trans-

mission line for spurious-response suppression[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(8): 2878~2885.

(收稿日期:2022-02-24)

#### 作者简介:

马瀚洋(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:射频滤波器技术、可重构接收机。

周雨进(1988-),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:射频无源集成技术与微系统、可重构射频前端关键技术。

周骏(1982-),男,博士,研究员级高工,主要研究方向:毫米波高密度集成与射频微系统技术。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所