

6G(B5G)毫米波通信用高选择性低损耗小型化 LTCC滤波器设计与测试方法

刘 唤¹, 李 彬¹, 蔡捷玓¹, 骆新江¹, 胡元云², 游 彬¹, 徐魁文¹, 宋开新^{1*}, 李文钧¹

(1. 杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江杭州 310018; 2. 嘉兴佳利电子有限公司, 浙江嘉兴 314003)

摘 要: 随着第五代(5th Generation, 5G)移动通信向第六代(6th Generation, 6G或Beyond 5th Generation, B5G)移动通信毫米波频段演进, 通信网络面临频谱重构与系统性能挑战. 毫米波通信因具备带宽充足和高速率优势, 已成为支撑高容量、低时延服务的关键技术. 作为射频链路中的核心无源器件, 带通滤波器承担通带信号选择与带外干扰抑制的重要功能. 在高频高密度通信环境中, 滤波器需兼顾频率复用、高集成度与紧凑封装, 实现高选择性、低插入损耗与小型化的协同优化, 这对结构与封装技术提出更高要求. 低温共烧陶瓷(Low-Temperature Cofired Ceramics, LTCC)工艺因具备多层三维集成、高精度结构控制及优异介电性能, 成为无源器件封装与集成的重要技术路径. 基于LTCC工艺, 本文提出了一种新型高选择性、低损耗且小型化的毫米波带通滤波器. 该滤波器采用弯折式半波长与四分之一波长阶梯阻抗谐振器(Stepped Impedance Resonators, SIRs), 并利用LTCC的多层集成优势有效减小其尺寸. 为提高选择性, 在部分交叉耦合拓扑的基础上引入额外交叉耦合路径, 构建全向交叉耦合拓扑, 并通过耦合矩阵综合和等效电路进行理论分析, 实现通带附近形成三个传输零点. 为降低损耗, 滤波器选用低介电损耗的K7的LTCC材料, 并通过金属化通孔侧壁构建屏蔽结构, 以抑制表面波泄漏与寄生辐射. 为验证滤波器设计方法的有效性, 基于多层LTCC工艺, 采用HFSS软件对工作于毫米波段的滤波器结构进行仿真和优化, 并完成原型器件的制造和测试. 测试结果表明: 滤波器在中心频率28 GHz处的插入损耗仅为0.9 dB, 通带内最小损耗低至0.61 dB; 通带两侧边频滚降分别达到25.5 dB/GHz和10.47 dB/GHz, 频率选择性显著增强. 器件有效电路尺寸仅为1.44 mm × 1.0 mm (0.134 λ_0 × 0.093 λ_0), 实现毫米波频段下的小型化. 针对毫米波表面贴装(Surface-Mount Technology, SMT)式LTCC滤波器测试中难以准确提取本征性能的问题, 本文引入多线式通-反射-线(Multiline-Thru-Reflect-Line, MTRL)校准测试方法. 通过在测试板上安装LTCC滤波器, 并结合自制MTRL标准件, 将其编辑为矢量网络分析仪校准算法文件, 可有效消除互连过渡带来的系统误差, 从而获得更加准确可靠的S参数测量结果. 该方法为毫米波LTCC无源器件的性能评估提供了一种通用且有效的解决方案. 综上, 本文展示了一种6G(B5G)毫米波通信用LTCC滤波器, 基于耦合矩阵综合和等效电路, 详细阐述了滤波器的设计原理. 该滤波器采用全向交叉耦合拓扑和弯折式半波长与四分之一波长SIRs谐振器设计, 实现了小型化、低损耗和高选择, 还通过引入MTRL测试方法解决了毫米波滤波器本征性能的提取难题. 该研究为6G毫米波通信系统中的高性能无源器件开发提供了有益的技术参考.

关键词: 6G/B5G; 毫米波; 交叉耦合; 低温共烧陶瓷; 带通滤波器

基金项目: 国家自然科学基金(No.52161145401); 广西科技重大专项(No.桂科AA24263001)

中图分类号: TN713.5; TN713.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)09-3223-10

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250710

Design and Testing Method of A Miniaturized LTCC Filter with High-Selectivity and Low-Loss for 6G (B5G) Millimeter-Wave Communication

LIU Huan¹, LI Chen¹, CAI Jie-ding¹, LUO Xin-jiang¹, HU Yuan-yun²,
YOU Bin¹, XU Kui-wen¹, SONG Kai-xin^{1*}, LI Wen-jun¹

(1. College of Electronics Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. Jiaxing Glead Electronics Co., LTD., Jiaxing, Zhejiang 314003, China)

收稿日期: 2025-08-14; 录用日期: 2025-09-24; 责任编辑: 朱梅玉

*通讯作者: 宋开新

Abstract: As fifth-generation (5G) mobile communications evolve toward sixth-generation (6G or B5G) millimeter-wave bands, communication networks face challenges of spectrum reconfiguration and system performance enhancement. Owing to its abundant bandwidth and high data rate, millimeter-wave communication has become a key technology to support high-capacity and low-latency services. As a core passive component in the RF front end, the bandpass filter plays a vital role in selecting in-band signals and suppressing out-of-band interference. In high-frequency and high-density communication environments, filters must balance frequency reuse, high integration, and compact packaging, achieving coordinated optimization of high selectivity, low insertion loss, and miniaturization, which places higher demands on structural design and packaging technologies. Low-temperature cofired ceramic (LTCC) technology, featuring multilayer three-dimensional integration, precise structural control, and excellent dielectric properties, has become an important approach for passive device packaging and integration. Based on LTCC technology, this paper presents a novel millimeter-wave bandpass filter with high selectivity, low loss, and compact size. The proposed filter employs bent half-wavelength and quarter-wavelength stepped impedance resonators (SIRs), and its size is effectively reduced by leveraging the multilayer integration capability of LTCC. To enhance selectivity, an omnidirectional cross-coupling topology is constructed by introducing additional cross-coupling paths on the basis of partial cross-coupling, and the design is theoretically analyzed through coupling matrix synthesis and equivalent circuit modeling, resulting in three transmission zeros near the passband. To minimize loss, a low-dielectric-loss K7 LTCC material is adopted, and metallized via sidewalls are employed to construct a shielding structure that suppresses surface-wave leakage and parasitic radiation. To verify the effectiveness of the proposed design method, a multilayer LTCC-based prototype operating in the millimeter-wave band was simulated and optimized using HFSS software, followed by fabrication and experimental verification. The measured results demonstrate that the filter exhibits an insertion loss of only 0.9 dB at the center frequency of 28 GHz, with a minimum in-band loss of 0.61 dB. The roll-off rates at both edges of the passband reach 25.5 dB/GHz and 10.47 dB/GHz, respectively, indicating significantly improved frequency selectivity. The effective circuit size of the device is only $1.44 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ ($0.134 \lambda_0 \times 0.093 \lambda_0$), achieving compactness in the millimeter-wave band. To address the difficulty in accurately extracting the intrinsic performance of Surface-Mount Technology (SMT) LTCC filters during millimeter-wave testing, this paper introduces a multilayer thru-reflect-line (MTRL) calibration method. By mounting the LTCC filter on a test board and combining it with self-fabricated MTRL standards, the method integrates calibration data into the vector network analyzer algorithm, effectively eliminating systematic errors caused by interconnection transitions. This approach provides a general and efficient solution for performance evaluation of millimeter-wave LTCC passive devices. In summary, this article presents an LTCC-based filter for 6G (B5G) millimeter-wave communication. The filter design is elaborated based on coupling matrix synthesis and equivalent circuit theory. Featuring an omnidirectional cross-coupling topology and bent half-/quarter-wavelength SIRs, the proposed filter achieves miniaturization, low loss, and high selectivity. Furthermore, by introducing the MTRL calibration technique, the intrinsic performance extraction problem of millimeter-wave filters is effectively addressed. This work offers valuable technical insight for the development of high-performance passive components in 6G millimeter-wave communication systems.

Key words: 6G/B5G; millimeter-wave; cross-coupling; low-temperature cofired ceramics; bandpass filter

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.52161145401); Guangxi Science and Technology Major Project (No.GuikAA24263001)

1 引言

随着第五代移动通信(5th Generation, 5G)系统向第六代(6th Generation, 6G 或 Beyond 5th Generation, B5G)移动通信毫米波频段演进,通信网络正面临频谱资源重构与系统性能挑战.毫米波通信因其带宽资源丰富、数据传输速率高,已成为支撑大容量、低时延通信服务的关键技术路径^[1].然而,由于其高路径损耗及易受遮挡等特性,毫米波信号覆盖范围受限,传输稳定性降低,从而对射频前端器件在结构小型化、损耗控制与频谱利用效率等方面提出更为严苛的设计要求.作为射频链路中的关键无源器件,带通滤波器承担通带

信号选择与带外干扰抑制的核心功能^[2,3].在毫米波系统中,为应对高频、高密度的通信环境,滤波器需兼顾频率复用、高集成度与紧凑封装等应用需求,实现高选择性、低插入损耗与小型化的协同优化,对其结构与封装制造提出了新的挑战.

低温共烧陶瓷(Low-Temperature Cofired Ceramics, LTCC)封装工艺因具备多层三维集成能力、高结构精度以及优异的介电性能与热稳定性,已成为无源器件封装与集成的优选方案^[4].该工艺可在单一流程中集成导体、电介质及腔体结构,有效降低器件组装复杂度与封装体积,提升系统的电磁兼容性与热-机械可靠性,已广泛应用于 5G-Sub6G 通信、雷达和卫星通信等

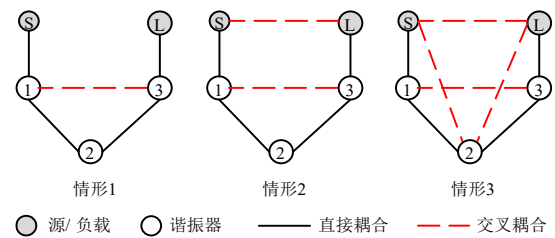
领域^[5-8].

当前,基于LTCC带通滤波器的结构设计日益丰富,国内外学者提出了多种实现方法.文献[9]基于集总元件,采用高阻抗线螺旋电感与垂直叉指电容技术,设计了一种工作于60 MHz的小型化带通滤波器,尽管其结构紧凑,但插入损耗高达1.95 dB,限制了其在毫米波频段的应用前景.基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)结构因其金属通孔侧壁提供良好的电磁屏蔽能力,展现出较低的插入损耗优势^[10-12].文献[10]通过将双脊结构与金属带集成于SIW腔体,实现了在28 GHz下插入损耗为0.8 dB的带通滤波器.该设计引入双传输零点提升了边频选择性,并通过人工四模谐振器减小尺寸至4.95 mm × 2.57 mm,然而受限于SIW腔体结构,整体体积仍难以满足更高集成度要求.分布式电路因其更紧凑结构布局和灵活的布线方式受到广泛关注^[13-18].文献[13]结合谐振器间耦合与源-负载耦合,实现了四个传输零点,所设计的2.45 GHz高选择性LTCC滤波器尺寸小至2.48 mm × 2.02 mm × 0.6 mm,但其相对带宽仅为10.8%,难以满足毫米波系统对宽带特性的需求.文献[14]通过开路/短路耦合线结构实现了23%相对带宽,并通过两个传输零点提升了通带选择性.文献[15]则采用嵌入式阶梯阻抗谐振器(Stepped Impedance Resonators, SIRs)设计了中心频率为3.5 GHz的带通滤波器,实现了高选择性、较低插入损耗(1.35 dB)与紧凑尺寸(6.1 mm × 6.8 mm × 1.0 mm).总体来说,目前在毫米波频段实现高选择性、低损耗与小型化的LTCC滤波器研究仍较为有限,亟需提出新型结构设计方案.此外,当前LTCC滤波器多以贴片(Surface-Mount Technology, SMT)形式集成于系统电路板中,其端接与封装方式与探针测试存在差异,难以准确提取其本征电性能参数.因此,建立适用于SMT式毫米波LTCC器件的通用测试方法,成为实现其高性能应用的关键前提.

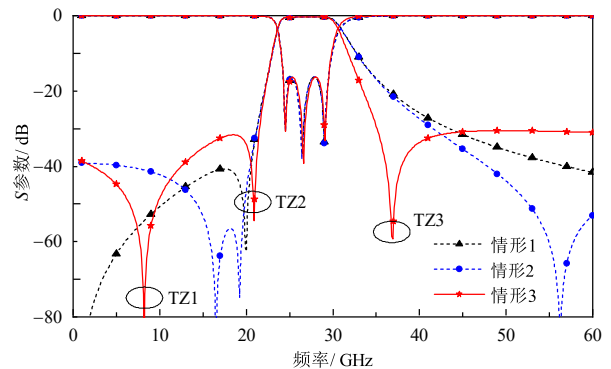
本文针对6G毫米波通信的应用需求,基于LTCC封装技术,提出了一种兼具高选择性、低损耗与小型化的新型LTCC滤波器设计与测试方法.首先,结合LTCC多层工艺,在传统部分交叉耦合拓扑的基础上引入额外交叉路径,构建一种全向交叉耦合拓扑结构,以增强滤波器的通带选择性.所设计的谐振器采用弯折的半波长与四分之一波长阶梯阻抗谐振器(SIRs)结构,并利用LTCC的多层结构减小器件尺寸.其次,通过金属化通孔构建的金属侧壁和低损耗陶瓷介质,降低器件插入损耗.针对测试中本征参数难以准确提取的问题,提出了多层测试板及多线式通-反射-线(Multiline-Thru-Reflect-Line, MTRL)校准件测试方法,为高频器件本征性能的准确提取提供了支持.为了验证设计方案的有效性,最终加工成功并测试了带通滤波器样品.

2 理论分析

图1展示了三种不同交叉耦合方式下三阶滤波器的拓扑结构及其综合后的S参数响应.情形1为传统的单层滤波器拓扑结构,情形2在此基础上引入了源端与负载端的交叉耦合.本文进一步基于LTCC多层结构,在谐振器2与源、负载之间引入交叉耦合,实现了谐振器之间的全向交叉耦合(情形3).通过CST Studio Suite软件对三种耦合结构进行了S参数综合.结果表明,情形3所采用的全向交叉耦合结构在通带附近引入了三个传输零点,提升了滤波器的选择性性能.



(a) 具有不同交叉耦合的三阶滤波器拓扑结构

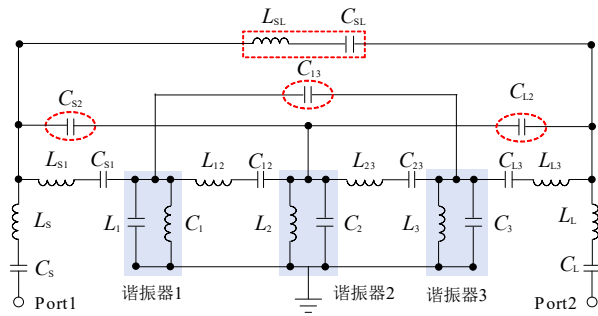


(b) 三种拓扑情形下综合的S参数

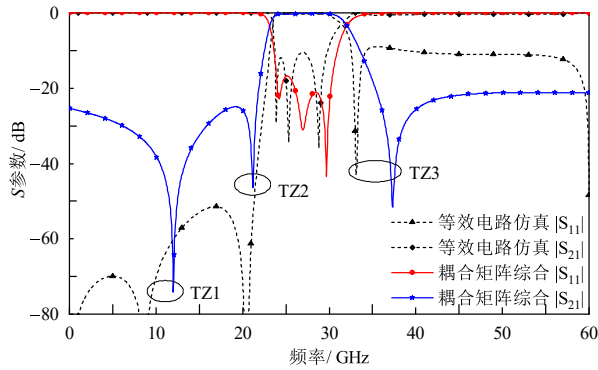
图1 具有不同交叉耦合的三阶滤波器的拓扑结构和综合的S参数

鉴于6G毫米波通信具备大带宽特性,为满足多个6G毫米波频段(n258、n257、n261)的通信需求,滤波器需具备较宽的通带覆盖能力.因此,本设计设定的滤波器性能指标如下:2 dB通带范围为23.4~30.45 GHz,回波损耗优于15 dB,20 dB阻带抑制范围覆盖DC~21.85 GHz及35.35~60 GHz频段.依据上述性能指标,本文构建了如图2(a)所示的全向交叉耦合滤波器等效电路模型,其对应的拓扑结构如图1(a)情形3所示,对应的耦合矩阵如式(1)所示:

$$M = \begin{bmatrix} & S & 1 & 2 & 3 & L \\ S & 0 & 1.03 & -0.06 & 0 & 0.027 \\ 1 & 1.03 & 0 & 0.9 & -0.17 & -0.19 \\ 2 & -0.06 & 0.9 & 0 & 1.12 & -0.06 \\ 3 & 0 & -0.17 & 1.12 & 0 & 1.07 \\ L & 0.027 & -0.19 & -0.06 & 1.07 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$



(a) 等效电路



(b) 耦合矩阵综合和等效电路仿真的S参数

图2 提出的滤波器等效电路仿真与综合的S参数

该等效电路模型整体由13个电容和11个电感组成. 其中, 电感 L_{1-3} 和电容 C_{1-3} 分别并联形成三个谐振器(谐振器1~3), 串联的 L_s 和 C_s 元件为源/负载馈电. 串联的电感 L_{s1} (L_{l3})和电容 C_{s1} (C_{l3})表示输入(输出)和谐振器1(谐振器3)的直接耦合, 串联的电感 L_{12} (L_{23})和电容 C_{12} (C_{23})表示谐振器1(谐振器2)和谐振器2(谐振器3)的直接耦合, C_{s2} (C_{l2})表示输入(输出)和谐振器2的交叉耦合, C_{13} 表示谐振器1和3之间的交叉耦合, 串联的电感 L_{sl} 和 C_{sl} 表示源和负载之间的交叉耦合. 两条 $50\ \Omega$ 的馈线作为输入输出端口. 该等效电路仿真和综合的S参数响应如图2(b)所示, 可以观察到, 该结构在通带附近产生了三个传输零点, 在带内产生了三个传输极点, 且电路仿真与综合的S参数结果具有较好的一致性, 验证了全向交叉耦合技术的可行性. 最终优化后的电感和电容数值如下: $L_1 = L_3 = 0.043\ \text{nH}$, $L_2 = 0.166\ \text{nH}$, $L_s = L_l = 0.14\ \text{nH}$, $L_{s1} = L_{l3} = 0.79\ \text{nH}$, $L_{12} = 0.42\ \text{nH}$, $L_{23} = 0.7\ \text{nH}$, $L_{sl} = 0.4\ \text{nH}$, $C_1 = C_3 = 0.59\ \text{pF}$, $C_2 = 0.119\ \text{pF}$, $C_s = C_l = 0.073\ \text{pF}$, $C_{s1} = C_{l3} = 0.069\ \text{pF}$, $C_{12} = 0.01\ \text{pF}$, $C_{23} = 0.01\ \text{pF}$, $C_{13} = 0.001\ \text{pF}$, $C_{s2} = C_{l2} = 0.042\ \text{pF}$, $C_{sl} = 0.001\ \text{pF}$.

3 滤波器设计

3.1 结构设计

本文基于LTCC多层工艺, 所用LTCC材料(K7)的相对介电常数为7.4, 损耗正切角约为 1.56×10^{-4} . 结构设计采用弯折的四分之一波长阶跃阻抗谐振器和对称弯折的半波长阶跃阻抗谐振器. 首先, 提取端口耦合系数、垂直耦合系数及水平耦合系数, 并与综合耦合系数进行对比分析, 以确定初始结构参数. 随后, 基于此参数进行全波优化仿真. 其中, 两个相邻或非相邻谐振器 i, j 之间的耦合系数 $k_{i,j}$ 通过对归一化耦合矩阵 M 中的相应元素进行反归一化计算得到^[19], 具体表达式如下:

$$k_{i,j} = \text{FBW} \times M_{i,j} \quad (2)$$

其中, FBW表示相对带宽, 其值为设定带宽 $(f_2 - f_1)$ 与中心频率 $(f_1 + f_2)/2$ 的比值. 在本文中, f_1 和 f_2 分别为23.4 GHz和30.45 GHz.

外部品质因数 Q_e 的计算方法如下:

$$Q_e = \frac{1}{M_{s,1}^2 \cdot \text{FBW}} \quad (3)$$

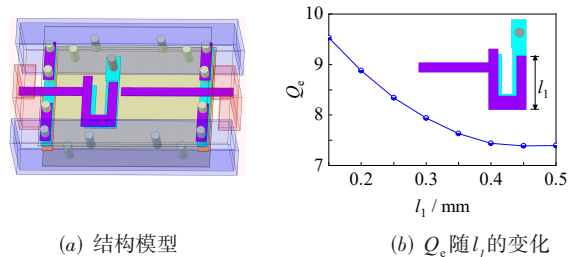
其中, $M_{s,1}$ 代表源端S和谐振器1之间归一化的耦合系数.

(1) 端口耦合系数提取

为提取端口耦合系数, 建立了源端与谐振器1耦合的结构模型, 如图3(a)所示. 通过改变馈电尺寸 l_1 , 利用Ansys HFSS软件结合式(4)提取滤波器的外部品质因数 Q_e , 结果如图3(b)所示. 可见, 随着馈电长度 l_1 的增大, 外部品质因数 Q_e 逐渐减小.

$$Q_e = \frac{\omega_0 \cdot \tau_{S_{11}}(\omega_0)}{4} \quad (4)$$

其中, $\tau_{S_{11}}(\omega_0)$ 表示在中心角频率 ω_0 处的群时延.



(a) 结构模型

(b) Q_e 随 l_1 的变化图3 外部品质因数 Q_e 的提取

(2) 垂直耦合系数提取

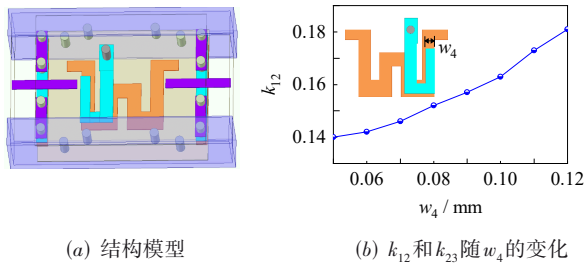
为了提取谐振器1和2, 谐振器2和3垂直(直接)耦合的耦合系数, 建立了谐振器1和2耦合的结构模型, 如图4(a)所示. 通过改变谐振器1或3的宽度 w_4 , 如图4(b)所示, 利用Ansys HFSS仿真并结合式(5)

和式(6)提取滤波器的直接耦合系数 k_{12}/k_{23} . 可见,随着谐振器1宽度 w_4 的增大,耦合系数逐渐减小. 相关提取公式如下所示:

$$k_{ij} = \frac{f_{ci}^2 - f_{cj}^2}{f_{ci}^2 + f_{cj}^2} \quad (5)$$

$$k_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_{ni}}{f_{nj}} + \frac{f_{nj}}{f_{ni}} \right) \sqrt{\left(\frac{f_{ci}^2 - f_{cj}^2}{f_{ci}^2 + f_{cj}^2} \right)^2 - \left(\frac{f_{ni}^2 - f_{nj}^2}{f_{ni}^2 + f_{nj}^2} \right)^2} \quad (6)$$

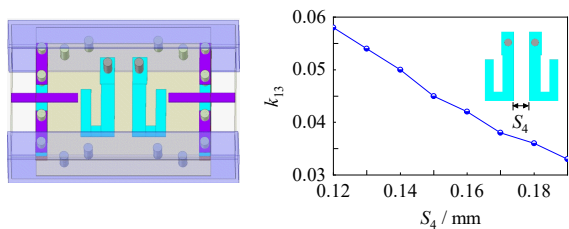
其中,当两个谐振器耦合时,谐振频率用 f_{ci} 和 f_{cj} 表示;当两个谐振器不发生耦合时,谐振频率用 f_{ni} 和 f_{nj} 表示.



(a) 结构模型 (b) k_{12} 和 k_{23} 随 w_4 的变化
图4 耦合系数 k_{12} 和 k_{23} 的提取

(3)水平耦合系数提取

为提取谐振器1与谐振器3之间的水平(交叉)耦合系数,建立了相应的结构模型,如图5(a)所示. 通过改变二者之间的间距 S_4 ,如图5(b)所示,利用Ansys HFSS仿真并结合式(5)和式(6)提取耦合系数 k_{13} . 可见,随着间距 S_4 的增大,交叉耦合系数 k_{13} 逐渐减小.



(a) 结构模型 (b) k_{13} 随 S_4 的变化
图5 耦合系数 k_{13} 的提取

基于理论分析、全向交叉耦合技术与LTCC工艺,本文设计了一种基于阶跃阻抗谐振器(SIRs)结构的毫米波LTCC带通滤波器,其具体结构如图6所示. 该滤波器由8层陶瓷介质层堆叠而成,每层厚度为 $49 \mu\text{m}$,金属层厚度均为 $10 \mu\text{m}$. 从上到下依次为接地金属层、源/负载馈电层、弯折的四分之一波长谐振器层、对称弯折的半波长谐振器层、接地金属层以及底部接地基板. 滤波器外围布设有金属化通孔,连接各金属层,形成金属屏蔽侧壁结构,可有效降低表面波泄漏与寄生辐射,减小损耗. 器件最终封装为贴片式结构,具备良好的集成与安装兼容性. 优化后的整体物理尺寸为 $2.0 \text{ mm} \times 1.25 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$,具体几何参数如表1所示.

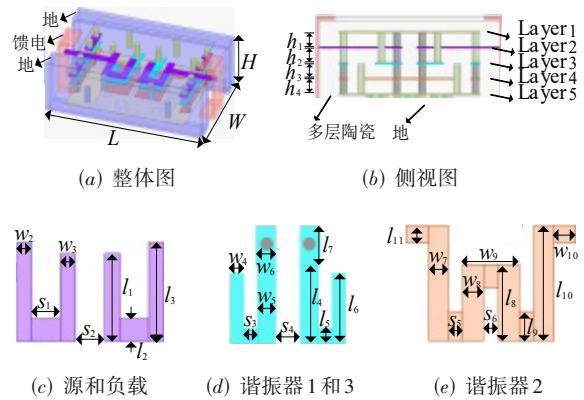


图6 滤波器结构图

表1 LTCC SIR滤波器主要尺寸 单位:mm

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
w_1	2.000	w_9	0.340	l_7	0.250	S_2	0.160
w_2	0.080	w_{10}	0.135	l_8	0.440	S_3	0.090
w_3	0.080	l_1	0.465	l_9	0.170	S_4	0.160
w_4	0.090	l_2	0.120	l_{10}	0.665	S_5	0.080
w_5	0.120	l_3	0.465	l_{11}	0.100	S_6	0.090
w_6	0.130	l_4	0.495	l_{12}	0.260	h_1	0.098
w_7	0.120	l_5	0.100	l_{13}	0.346	h_2	0.098
w_8	0.125	l_6	0.445	S_1	0.155	h_3	0.098

注: $h_1=h_2=h_3=h_4$.

3.2 测试板与校准件设计

3.2.1 测试板设计

为了对3.1节设计的LTCC贴片式滤波器进行性能测试,需要将器件安装至测试印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)上. 因此,需设计与之匹配的PCB测试板. 由于滤波器尺寸较小,其馈电电线的宽度仅为 0.24 mm ,单层PCB已无法满足机械强度与电气性能要求,故采用三层介质结构的多层测试板. 所设计的测试板由三层介质层构成:顶层为Rogers RO3003,底部两层为FR4. 金属层均为铜,顶部和底部厚度为 $45 \mu\text{m}$,中间层为 $35 \mu\text{m}$. 器件安装到测试板后的结构如图7所示,其中,测试板主要几何尺寸如下: $L_m = 6.545 \text{ mm}$ 、 $L_{\text{PCB}} = 14.7 \text{ mm}$ 、 $W_{\text{PCB}} = 16.675 \text{ mm}$ 、 $h_R = 0.127 \text{ mm}$ 、 $h_{F1} = 0.546 \text{ mm}$ 、 $h_{F2} = 0.13 \text{ mm}$.

值得注意的是,当LTCC滤波器安装至PCB测试板进行测试时,PCB本身的引入损耗将影响测量准确性,造成滤波器本征性能数据的偏差. 为消除该干扰,需要对测试板进行去嵌处理,即设计与测试板对应的校准件,为后续的测试进行配套的校准,以从测量数据中提取出LTCC SIR滤波器的本征S参数数据.

3.2.2 校准件设计

对于工作在毫米波段的高频高速器件,为了准

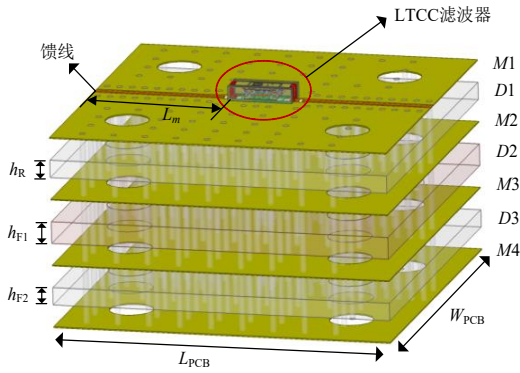


图7 多层PCB测试板爆炸图

确获取其本征特性,测试过程中需要进行去嵌入校准。常用的去嵌算法包括短路-开路-负载-直通(Short-Open-Load-Thru, SOLT)和直通-反射-线(Thru-Reflect-Line, TRL)方法。其中,TRL校准具有更高的精度,能够将测试参考面准确推至器件的本征平面,同时对校准件的结构要求相对宽松,具备更高的测试灵活性。

考虑到本研究所涉及的频率范围较宽,传统TRL方法在宽频带下可能出现校准不连续等问题,因此本文设计多线式通-反射-线(Multiline-Thru-Reflect-Line, MTRL)算法进行校准件设计。MTRL算法利用多条长度不同的传输线作为校准件,可有效改善传统TRL在宽带校准中的不连续性问题,提升对未知参数的求解精度。基于上述优势,本文将自制MTRL校准件,并将其转化为矢量网络分析仪可识别的校准算法文件,实现从原始测试数据中准确提取滤波器本征S参数,可为高频LTCC器件的精确测试提供重要参考。

根据LTCC滤波器的工作频段,校准件的设计要求如下:

频率范围:2~70 GHz;介质材料:Rogers RO3003;阻抗:50 Ω 。

(1)直通校准件设计

由于从连接器至参考面的距离为6.545 mm,零长度直通(Thru)校准件的总长度应为13.09 mm,以确保双向等效路径。

(2)反射校准件设计

反射(Reflect)校准件可采用短路或开路结构,常选用开路。其物理长度取为Thru校准件的一半,即6.545 mm。

(3)传输线校准件数目判断

根据频率比要求 $8:1 < f_2:f_1 < 64:1$,在2~70 GHz的宽带条件下,理论上需配置两条不同长度的传输线校准件以实现有效校准。然而,为提升在宽频带内的校准精度,本文设计了三条传输线校准件,其频率覆盖范围分别如下:校准件1:2~10 GHz;校准件2:10~40 GHz;校准件

3:40~70 GHz。因此,采用基于三条校准线的MTRL算法进行去嵌入校准。

(4)传输线校准件设计

根据每条校准线中心频率处的四分之一波长($\lambda/4$)进行物理长度设计。校准件1(中心频率5.8 GHz): $\lambda/4 = 8.574$ mm;校准件2(中心频率23.1 GHz): $\lambda/4 = 1.983$ mm;校准件3(中心频率54.5 GHz): $\lambda/4 = 0.895$ mm。据此完成的三条传输线校准件的结构模型如图8所示,其关键尺寸如下: $L_m = 6.545$ 、 $L_1 = 13.09$ 、 $L_o = 6.545$ 、 $L_{i1} = 21.664$ 、 $L_{i2} = 15.073$ 、 $L_{i3} = 13.985$ (单位:mm)。上述设计流程为MTRL校准件的系统设计与制作提供了依据,同时为毫米波宽带S参数测试中本征特性的准确提取提供了方法指导。

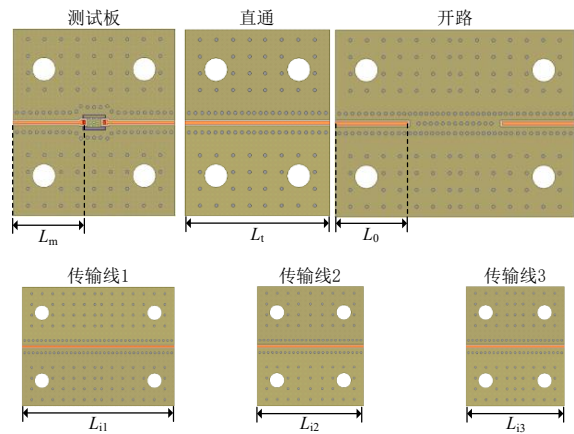


图8 多层校准板俯视图

4 仿真与测试

4.1 仿真结果

4.1.1 仿真优化结果

根据3.2.1节所设计的PCB测试板,将贴片式LTCC SIR滤波器安装到测试板上方,并进行全波仿真优化,优化的S参数结果如图9(c)所示。通过建立互连过渡结构模型,可以提取其损耗特性,如图9(a)和图9(b)所示。在此基础上,利用T矩阵法^[20],结合安装在PCB上的整体滤波器S参数与互连过渡的S参数,可进一步去嵌得到LTCC滤波器的本征S参数。从仿真结果(图9(c))可见,LTCC滤波器安装到PCB测试板后,其S参数响应与未安装到PCB测试板时具有很好的一致性,整体性能满足期望设计指标,说明LTCC滤波器与测试板之间实现了良好的阻抗匹配。

4.1.2 工作机理

图10展示了在不同传输极点频率下的谐振器表面电流分布情况。观察可知,在24.56 GHz处,传输极点主要由R1与R2的谐振产生。其中,R1表面电流分布强度较高,R2电流主要集中于左半部分。在26.12 GHz处,

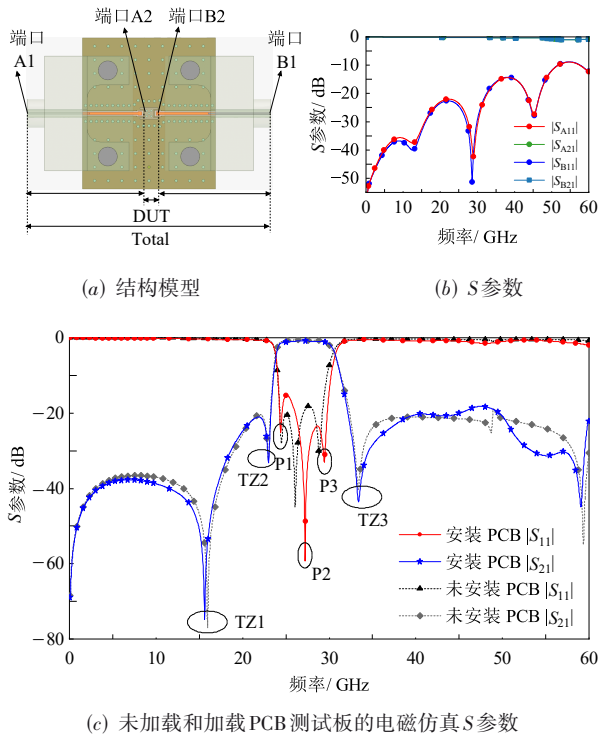


图9 互连过渡结构模型、对应的S参数以及未加载和加载PCB测试板的电磁仿真S参数

R2表面电流明显减弱,而R1与R3表面均表现出较强的电流分布,说明该传输极点主要源于R1和R3之间的耦合谐振.在28.94 GHz处,R1、R2与R3三个谐振器表面均出现显著电流,表明此频率点的传输极点由三者的联合谐振共同作用形成.综上可知,不同传输极点分别由不同谐振器及其耦合关系主导,其协同作用拓宽了滤波器的带宽,并可通过改变相应谐振器的尺寸调控对应的谐振频率.

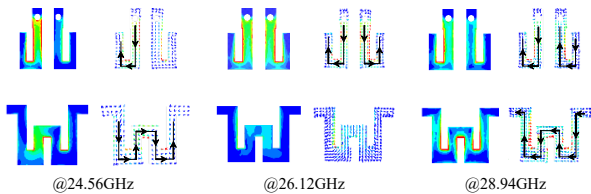


图10 LTCC滤波器谐振器表面电流分布

4.1.3 通带性能调控

基于3.1节中对耦合系数提取分析可知,改变源端和负载之间距离(S_2)可调节其交叉耦合系数;同时,调整谐振器1或3的宽度(w_4)可调控其与相邻谐振器之间的直接耦合强度.为深入理解这两个物理参数对通带性能的具体影响,分析了结构尺寸 S_2 和 w_4 对滤波器S参数响应的调控规律,结果如图11所示.图11(a)显示了随着源端和负载之间距离 S_2 的增加,交叉耦合逐渐

减弱.观察可见,通带左侧的近端传输零点(Transmission Zero, TZ)位置变化较小,而远端左侧TZ及通带右侧的TZ均逐步远离通带,但滤波器整体的通带带宽及插入损耗变化较小,说明此结构参数主要影响TZ位置而非带宽性能.具体而言,左侧远端TZ的调谐范围约为10.34 GHz(-80 dB)~15.98 GHz(-72 dB),右侧TZ的调控范围约为27.21 GHz(-43 dB)~33.40 GHz(-38 dB).此外,图11(b)展示了谐振器1宽度 w_4 对S参数的影响.随着 w_4 增大,通带的带宽基本保持不变,但通带左侧两个TZs逐步向低频远离通带,而右侧TZ则向通带靠近.可知,通过改变谐振器1的宽度 w_4 ,下阻带的近通带TZ的调节范围约为22.28 GHz(-30 dB)~23.59 GHz(-30 dB),上阻带TZ的调节范围约为32.96 GHz(-40 dB)~33.78 GHz(-38 dB).综上,通过对结构参数 S_2 和 w_4 的调节,可实现对传输零点位置的有效控制,进而实现带外抑制能力与通带边缘选择性的优化,从而满足不同通信系统对滤波器性能的多样化需求.

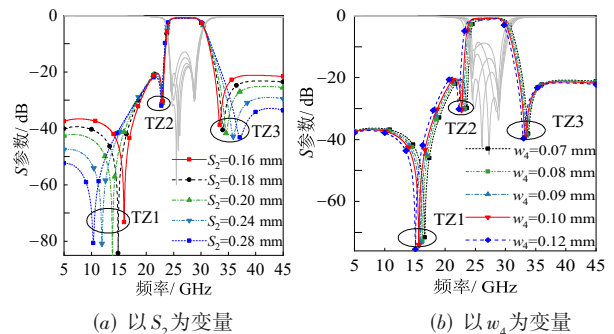


图11 LTCC SIR中 S_2 和 w_4 对S参数影响

4.2 测试结果

4.2.1 测试校准算法步骤

LTCC滤波器通常包含复杂的多层互连与端口过渡结构,而本文所设计的器件又具备高频大宽带特性.针对这一需求,本文引入MTRL方法用于宽频LTCC器件的本征参数提取.为此,本文自主制作了MTRL校准件,并将其编写为矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)的专用校准算法文件,以在宽频范围内消除过渡效应,从而准确提取LTCC滤波器的本征S参数.MTRL校准算法的具体步骤如下:

(1)设置源功率

通常将VNA的源输出功率设置为-5 dBm,以防止激励过强对被测器件造成非线性或损伤.

(2)设置测试频率参数

根据校准件和连接器的适用频段,选择合适的测试频率范围和步长.本文所设计的MTRL校准件频率范围为2~70 GHz,所用连接器支持DC~65 GHz.因此,为提高测试准确性,实际测量频率范围选为2~70 GHz,

最终结果选取 2~60 GHz.

(3) 确定校准算法并计算延时参数

采用 MTRL 校准方法,并编辑校准件文件,设置相关校准参数.具体操作如下:

首先,设置直通标准 Tru 的延迟参数为 0;其次,根据传输线标准 Line 的频率范围(2~10 GHz, 10~40 GHz, 40~70 GHz),分别计算其对应的四分之一波长中心频率的延时值 t ,计算式如(7)所示:

$$t = \frac{1}{4f_0} \quad (7)$$

其中, f_0 为三段频率范围的中心频率,记作 f_{01} 、 f_{02} 、 f_{03} ,它们的值分别为 6.25 和 55 GHz,对应的延时 t_1 、 t_2 、 t_3 的值分别为 41.67、10.00 和 4.55 ps.

(4) 执行校准流程

将上述校准参数输入至 VNA 校准设置界面,依次连接并测量三种校准标准件:传输线(line)、反射(reflect)、直通(thru),完成 MTRL 算法校准过程.图 12 展示了 LTCC 滤波器校准方法流程.

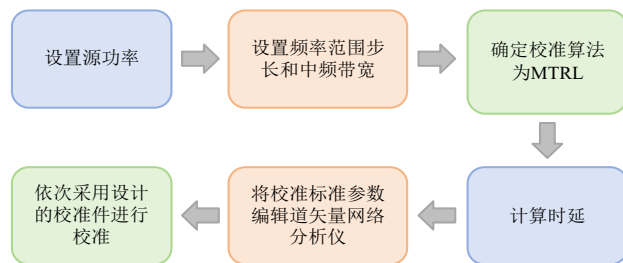
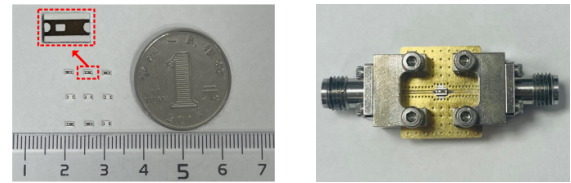


图 12 LTCC 滤波器的 MTRL 校准方法

4.2.2 样品测试与结果分析

为验证所设计 LTCC 滤波器的实际性能,对其进行了加工与测试,如图 13 所示.图 13(a)为滤波器实物的正面、反面和放大图,图 13(b)展示了将 LTCC 滤波器焊接于多层测试板上,并安装连接器以进行测试.图 14 对比了实测与仿真的 S 参数结果,二者具有较好的一致性.实测中心频率为 28 GHz,相较于仿真值(27.6 GHz)略有偏移,可能源于器件加工过程中实际收缩率高于预期.测试结果显示,该滤波器在中心频率 28 GHz 处的插入损耗为 0.9 dB,最小插入损耗为 0.61 dB(含焊接损耗).滤波器具有较宽的通带,相对带宽达到 24.2%,覆盖 n257、n258 及 n261 三个 6G(B5G)毫米波通信频段.通带两侧共引入三个传输零点,增强了滤波器的选择性.两侧边频滚降分别达到 25.5 dB/GHz 和 10.47 dB/GHz,具体阻带抑制度表现为:下阻带在 DC~23.7 GHz 范围内抑制优于 20 dB,上阻带在 33.5~60 GHz 内抑制优于 19 dB.与现有工作的毫米波带通滤波器进行带内性能、带外

性能以及尺寸等多方面对比(如表 2 所示),本文提出的 LTCC 滤波器在毫米波段实现了低插入损耗、高选择性、紧凑尺寸以及宽阻带抑制的协同优化,充分展示了新型 LTCC 滤波器在 6G 毫米波移动通信的应用潜力.



(a) 滤波器正面和反面实物 (b) 安装 PCB 测试板的滤波器实物图

图 13 LTCC 滤波器实物

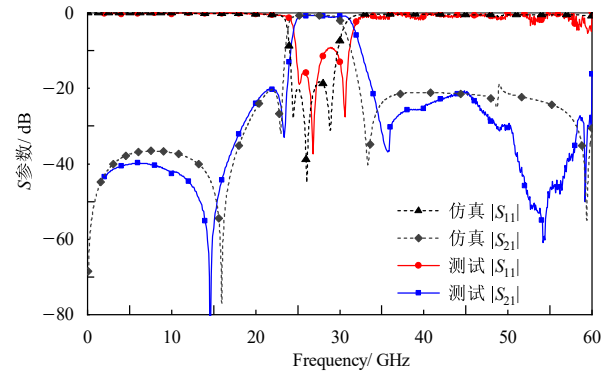


图 14 LTCC 滤波器仿真和测试结果

此外,为进一步评估 LTCC 滤波器内部电路和整体尺寸的加工情况,采用 X 射线衍射形貌术(X-Ray diffraction Topography, XRT)对滤波器的实物进行了三维结构扫描.图 15 展示了滤波器的关键层结构和整体三维形貌特征.图 15(a)~图 15(c)依次显示了馈电结构层、谐振器 1 层与谐振器 3 层以及谐振器 2 层,从图中可见,电极图案完整,未发现明显缺陷或裂纹,金属化通孔连接良好,为滤波器的高频性能提供了可靠互连保障.图 15(d)~图 15(f)给出了滤波器的整体三维结构及尺寸分析,结果显示实物有效电路尺寸为 $1.44 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ ($0.134 \lambda_0 \times 0.093 \lambda_0$),整体体积 $1.94 \text{ mm} \times 1.22 \text{ mm} \times 0.66 \text{ mm}$,略小于仿真体积 $2.06 \text{ mm} \times 1.31 \text{ mm} \times 0.69 \text{ mm}$.尺寸偏差可能源于陶瓷材料实际烧结过程中的收缩率偏差或加工公差,进一步解释了测试中心频率的值略高于仿真值的原因.因此,在实际工程应用中,建议采用多组膜层厚度接近的 LTCC 结构进行设计与加工,以补偿加工误差对频率性能带来的影响,提升测试结果与仿真设计的一致性,从而更好地满足毫米波系统对 LTCC 滤波器精度的需求.

表 2 毫米波带通滤波器对比

现有工作	中心频率/GHz	空载品质因数	插入损耗/dB	零点个数	滚降/(dB/GHz)	尺寸/(mm × mm)	工艺
文献[21]	32.8	195	1.55	3	*4.48/23.7	7.86 × 7.66	Sing. PCB
文献[22]	28	102	1.30	3	21.5/7.31	1.5 × 1.5	Multi. PCB
文献[23]	31	27.4	2.4	1	*0.54/0.86	0.09 × 0.27	0.13- μm SiGe
文献[10]	28	235	0.8	2	*9/15	4.95 × 2.57	LTCC
文献[24]	20.2	/	1.4	2	*29/24	4.7 × 5.2	LTCC
文献[25]	27.3	/	1.2	2	*4.7/12	0.77 × 1.32	LTCC
本文工作	28	220	0.61	3	25.5/10.47	1.44 × 1.0	LTCC

注:*表示文献中没有提供准确的数据,它们是估计数据。

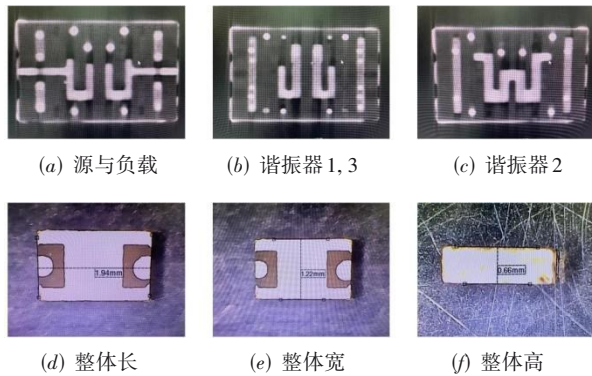


图 15 LTCC 滤波器实物 XRT 扫描图

5 结论

本文基于 LTCC 封装工艺和全向交叉耦合技术,设计并实现了一款用于 6G 毫米波通信的带通滤波器。通过构建交叉耦合拓扑结构和等效电路模型,详细分析了滤波器的设计原理。采用全向交叉耦合拓扑结构和 1/2 波长及 1/4 波长阶梯阻抗线谐振器,构建了结构紧凑的三维 LTCC 滤波器。为准确测试高频 SMT 贴片式滤波器性能,提出了基于多层 PCB 测试板与 MTRL 校准件的测试方法,实现了滤波器本征参数的准确提取。实测结果表明,该滤波器具有插入损耗低、选择性高和尺寸小等优势。本研究为高性能毫米波 LTCC 滤波器的设计与精准测试提供了系统化的技术参考。

参考文献

- [1] WANG X, KONG L H, KONG F X, et al. Millimeter wave communication: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1616-1653.
- [2] QIN M J, LI Z M, LIU P Z, et al. A review of on-chip adjustable RF bandpass filters: Adjustable on-chip filters[J]. IEEE Microwave Magazine, 2024, 25(1): 14-36.
- [3] 张薇, 吴永乐, 王卫民, 等. 一种新型基于交指电容和微带电感的单层低成本宽带带通滤波器[J]. 电子学报, 2023, 51(6): 1413-1420.
- [4] ZHANG W, WU Y L, WANG W M, et al. A novel single-layer low-cost broadband bandpass filter based on interdigital capacitors and microstrip inductors[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(6): 1413-1420. (in Chinese)
- [5] VARGAS-MILLALONCO F, MARTÍNEZ-LEDESMA M, REEVES R, et al. Cryogenic characterization of LTCC material in millimeter-wave frequencies[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14(6): 1007-1014.
- [6] CHOU H T, CHOU S J, DENG J D S, et al. LTCC-based antenna-in-package array for 5G user equipment with dual-polarized endfire radiations at millimeter-wave frequencies[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(4): 3076-3081.
- [7] SICKINGER F, WEISSBRODT E, VOSSIEK M. 76-81 GHz LTCC antenna for an automotive miniature radar frontend[C]//2017 European Radar Conference. Piscataway: IEEE, 2018: 374-377.
- [8] 徐仲麟, 吴林晟, 余胜团, 等. 面向低轨卫星通信的 K 波段 LTCC 多通道集成接收前端模块[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1389-1398.
- [9] XU Z L, WU L S, SHE S T, et al. A K-band LTCC multi-channel integrated receiving front-end module for low earth orbit satellite communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(6): 1389-1398. (in Chinese)
- [10] YU Z, CHEN C, CHEN W D, et al. A low-profile LTCC phased array antenna with wideband and high-gain for X-band satellite communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(1): 659-664.
- [11] ZHOU B, SHENG W X, ZHENG Y Y. Miniaturized lumped-element LTCC filter with spurious spikes suppressed vertically-interdigital-capacitors[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(10): 692-694.
- [12] HUANG X L, ZHANG X Y, ZHOU L, et al. Low-loss self-packaged ka-band LTCC filter using artificial multi-

- mode SIW resonator[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023, 70(2): 451-455.
- [11] LIU H, CHEN L, WU S, et al. A new electric coupling and its applications on millimeter-wave SIW filter with high selectivity and controllable TZs[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2024, 173: 154989.
- [12] QIU L, ZHU X W, YANG X L. Compact multilayer SIW bandpass filter with cross coupling and source-to-multi-resonator coupling[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14(12): 2331-2338.
- [13] DAI X, ZHANG X Y, KAO H L, et al. LTCC bandpass filter with wide stopband based on electric and magnetic coupling cancellation[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2014, 4(10): 1705-1713.
- [14] FENG W J, GAO X, CHE W Q, et al. LTCC wideband bandpass filters with high performance using coupled lines with open/shorted stubs[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2017, 7(4): 602-609.
- [15] ZHAO W, WU Y L, YANG Y H, et al. LTCC bandpass filter chips with controllable transmission zeros and bandwidths using stepped-impedance stubs[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(4): 2071-2075.
- [16] WEI X B, WANG P, GAO P, et al. Compact tri-band bandpass filter using open stub loaded tri-section $\lambda/4$ stepped impedance resonator[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(8): 512-514.
- [17] KANAPARTHI V P K, VELIDI V K, RAJKUMAR R, et al. A compact ultra-wideband multimode bandpass filter with sharp-rejection using stepped impedance open stub and series transformers[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(12): 4824-4828.
- [18] SHANKAR E, PHANI KUMAR K V, KRISHNA VELIDI V, et al. Miniaturized dual-band bandpass filter with wide inter stopband for 5G applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(10): 4461-4465.
- [19] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. Hoboken: Wiley, 2001.
- [20] WANG R T, LI C G, WANG Y. An improved through-only de-embedding method for 110-GHz on-wafer RF device characterization[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(10): 1219-1222.
- [21] ZHU X C, HONG W, WU K, et al. Design and implementation of a triple-mode planar filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(5): 243-245.
- [22] RAO Y B, QIAN H J, ZHOU J, et al. Miniaturized 28-GHz packaged bandpass filter with high selectivity and wide stopband using multilayer PCB technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(6): 664-667.
- [23] CHAKRABORTY S, YANG Y, ZHU X, et al. A broad-side-coupled meander-line resonator in 0.13- μm SiGe technology for millimeter-wave application[J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(3): 329-332.
- [24] ZHANG R, WU X L, JIN H Y. Design of a miniaturized K-band SIW filter based on LTCC process[C]//2024 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. Piscataway: IEEE, 2024: 1-3.
- [25] ZHAO W, WU Y L, XU Z Y, et al. Suppression-enhanced edge-coupling capacitors for microwave and millimeter-wave LTCC on-chip single-ended and differential filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2025, 73(10): 7743-7756.

作者简介



刘 唤 女, 1994年10月出生于河南省周口市. 现为杭州电子科技大学博士后. 主要研究方向为射频/毫米波滤波器、天线设计与集成、微波电介质材料设计与应用等领域.
E-mail: huanliu66@hdu.edu.cn



宋开新 男, 1977年9月出生于福建省南平市. 现为杭州电子科技大学电子信息学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为微波电介质材料与射频电子元器件、光电与储能材料等. 中国电子学会会员编号: E190197668M.
E-mail: kxsong@hdu.edu.cn