

三维高集成度超宽带LTCC功分器

蒋俊毅, 王梓丞, 施 刚, 胡善文*

(南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏南京 210023)

摘要: 本文基于低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)三维封装技术, 通过将多节四分之一波长阻抗变换线进行折叠布局和垂直堆叠设计, 实现了多节宽带功分器的高度集成. 本设计将7节阻抗变换线分别放置在LTCC介质的奇数层上, 相邻阻抗变换线之间采用垂直过孔进行连接, 偶数层用来隔离阻抗变换线之间的耦合效应. 该功分器不仅实现了180%的相对带宽, 而且尺寸仅为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 1.33\text{ mm}$. 相比同样传输节数平面型功分器, 本设计的水平尺寸减小了84.6%. 在2~38 GHz的频率范围内, S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{31} 和 S_{32} 的实测值分别优于-15、-4.1、-16、-4.0和-17 dB. 该功分器同时具有超宽带特性和小型化、高度集成的优势, 可广泛应用于移动通信、雷达探测、卫星导航、工业测量等领域中.

关键词: 三维集成; 多节威尔金森功分器; 小型化; 超宽带; 低温共烧陶瓷

基金项目: 国家自然科学基金(No.61501261); 江苏省射频集成与微组装技术国家地方联合实验室研究基金(No.KFJJ20200101); 江苏省前沿技术研发计划(No.BF2024080)

中图分类号: TN626

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)06-1917-06

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250091

Highly Integrated Three-Dimensional Structure Ultra-Wideband LTCC Power Divider

JIANG Jun-yi, WANG Zi-cheng, SHI Gang, HU Shan-wen*

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: Based on the low temperature co-fired ceramic (LTCC) three-dimensional packaging technology, this paper folds and vertically stacks multiple quarter-wavelength impedance transformation lines to achieve high integration in a multi-section broadband power divider. This design places 7 impedance transformation lines on the odd layers of the LTCC medium, and vertical vias are used to connect adjacent impedance transformation lines. Even layers are used to isolate the coupling effect between impedance transformation lines. The power divider not only achieves a relative bandwidth of 180%, but also has a size of only $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 1.33\text{ mm}$. Comparing with the planar power divider with the same number of transmission sections, the horizontal size of this design is reduced by 84.6%. In the frequency range of 2~38 GHz, the measured values of S_{11} , S_{21} , S_{22} , S_{31} and S_{32} are better than -15, -4.1, -16, -4.0 and -17 dB, respectively. Since the power divider has the advantages of ultra-wideband characteristics, miniaturization and high integration, it can be widely used in mobile communications, radar detection, satellite navigation, industrial measurement and other fields.

Key words: three-dimensional integration; multi-section Wilkinson power divider; miniaturization; ultra-wideband; low temperature co-fired ceramic

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61501261); Research Fund of Jiangsu Provincial National and Local Joint Engineering Laboratory of Radio Frequency Integration and Microassembly Technology (No.KFJJ20200101); Jiangsu Provincial Frontier Technology Research and Development Program (No.BF2024080)

1 引言

功分器,作为射频与微波系统中的关键无源器件,能实现信号的精确分配与高效合成. 其中, Wilkinson 功分器因结构简单、隔离度高、匹配性能好而备受青睐,其在天线阵列馈电网络、功率放大器和无线局域网等诸多领域被广泛使用^[1]. 传统单节 Wilkinson 功分器仅能实现 10%~15% 的相对带宽,且工作在特定频率和其奇数次谐波($f_0, 3f_0, 5f_0, 7f_0, \dots$)频率处,无法工作在其偶数次谐波($2f_0, 4f_0, 6f_0, 8f_0, \dots$)频率处,因此大大限制了其应用范围. 当前,开路线结构^[2,3]、宽带耦合结构^[4]、电感^[5]和耦合线结构^[6-8]被用来拓展功分器的工作带宽,但增加了匹配电路的复杂度且无法保持输出端口之间的隔离度. 多节结构通过增加四分之一波长阻抗变换线的节数最大限度增加带宽,但是多节结构不仅增加了电路尺寸,还增大了带内插损,并且不便于器件的小型化集成^[7-11]. 电容、电感等集总参数也被用于单节和多节威尔金森的小型化设计中,但是集总电容、电感元件寄生参数较多不便于高密度集成^[12-14].

本文研究了一种基于多层三维堆叠结构的超宽带功分器,该功分器具有 7 节垂直级联四分之一波长阻抗变换传输节. 通过将每节阻抗变换线垂直放置在不同低温共烧陶瓷 (Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC) 介质层上实现功分器的小型化和高度集成. 与传统平面型 7 节威尔金森功分器相比,本设计的水平尺寸减小了 84.6% (水平方向只有 1 节阻抗变换传输节). 在 2~38 GHz 频率范围内,实测的 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{31} 和 S_{32} 值分别优于 -15、-4.1、-16、-4.0 和 -17 dB. 因本设计具有的超宽带特性和小型化、高度集成的优势,在 5G 移动通信和卫星通信领域将会有广泛的应用前景.

2 电路设计

2.1 电路拓扑结构设计

为实现 2~38 GHz 超宽带应用范围,我们采用经典多节四分之一阻抗变换线级联结构拓展工作带宽. 图 1(a) 是传统平面型多节功分器的拓扑电路图,其多节级联结构可有效实现 2~38 GHz 的工作频率,但其电路尺寸过大,不便于小型化和高度集成. 图 1(b) 是提出的新型垂直堆叠功分器,该结构将四分之一波长传输节进行堆叠布局,有效降低了功分器的水平尺寸,实现小型化,也有利于高密度封装集成. 该功分器每节阻抗变换线均采用中心频率为 20 GHz 对应的四分之一波长微带线或带状线构成,每节阻抗变换线的末端采用不同电阻值的薄膜电阻增加输出端口的隔离度. 多节级联结构设计中采用二项式多节匹配变换来确保最大平坦通带. 我们采用奇、偶模方法用于分析该功分器电路. 在奇模中,该电路本质上是多节四分之一波长阻抗

变换器. 在该情况下,使用二项式匹配函数,其公式如下:

$$\Gamma(\theta) = A(1 + e^{2j\theta}) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\tau}{2} \quad (2)$$

$$A = 2^{-N} \frac{Z_L^-}{Z_L^+} \quad (3)$$

其中, Γ 是反射系数, N 是级联的四分之一波长阻抗变换线的节数.

$$Z_{n+1} = e^{\left(\ln z_n + 2^{-N} C_n^N \ln \frac{Z_L}{Z_0}\right)}, n = 0, 1, \dots \quad (4)$$

$$C_n^N = \frac{N!}{(N-n)! n!}, n = 0, 1, \dots \quad (5)$$

将式(4)中的二项式展开,并将其等效于小反射近似得出的反射系数,可以推导并得出每节四分之一波长部分的阻抗,式(5)为二项式系数的定义. 经过上述公式的分析并借助电路仿真软件 Cadence AWR (<https://www.cadence.com>) 可以得出采用 7 节四分之一波长阻抗变换线可以实现 2~38 GHz 的频率应用范围,每节阻抗变换线特性阻抗的取整近似值分别为 66、42、36、34、36、39 和 50 Ω .

2.2 电路布局设计

为将 7 节四分之一波长阻抗变换线进行垂直堆叠,采用多层 LTCC 三维封装技术,对功分器进行垂直布局设计,新型功分器三维结构如图 2 所示. 功分器的第 1、2、3、4、5、6 和 7 节分别放置在 LTCC 介质的奇数层 (第 1、3、5、7、9、11、13 层) 上,相邻节之间采用垂直通孔进行连接;偶数介质层 (第 2、4、6、8、10、12 层) 则作为接地面,用于隔离上下相邻传输级之间的宽边耦合效应. 在偶数介质层上开凿垂直过渡结构,用于让连接相邻传输级之间的过孔通过. 另外,7 个用于隔离的镍铬薄膜电阻 ($R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7$) 也分别放置在介质奇数层 (第 1、3、5、7、9、11、13 层) 上每节阻抗变换线的末端. 最后,位于第 13 层的第 7 节阻抗变换线通过垂直过孔与位于顶层的端口 2 和端口 3 相连. 因此该功分器的信号从顶层的端口 1 进入,通过 7 节四分之一波长阻抗变换线后到达第 13 层,最后通过垂直过孔再传输到达顶层的端口 2 和端口 3 输出.

最后,整个功分器被封装在 13 层的 LTCC 介质中,单个烧结层的厚度为 0.1 mm,表面金属的厚度为 0.01 mm. 设计选用性能稳定的 Ferro-A6 LTCC 材料,介电常数和损耗切线分别为 5.9 和 0.002,且其在 0.1~40 GHz 频率范围内变化极小,从而保证了器件的宽带性能. 经过 Ansys HFSS (<https://www.ansys.com>) 软件最终电磁优化后,特性阻抗 Z_n 、线路宽度 W_n 和隔离电阻 R_n 参数的最优值如表 1 所示. 过孔半径 r 和缺陷结构半径 R 分别为 0.08 mm 和 0.22 mm.

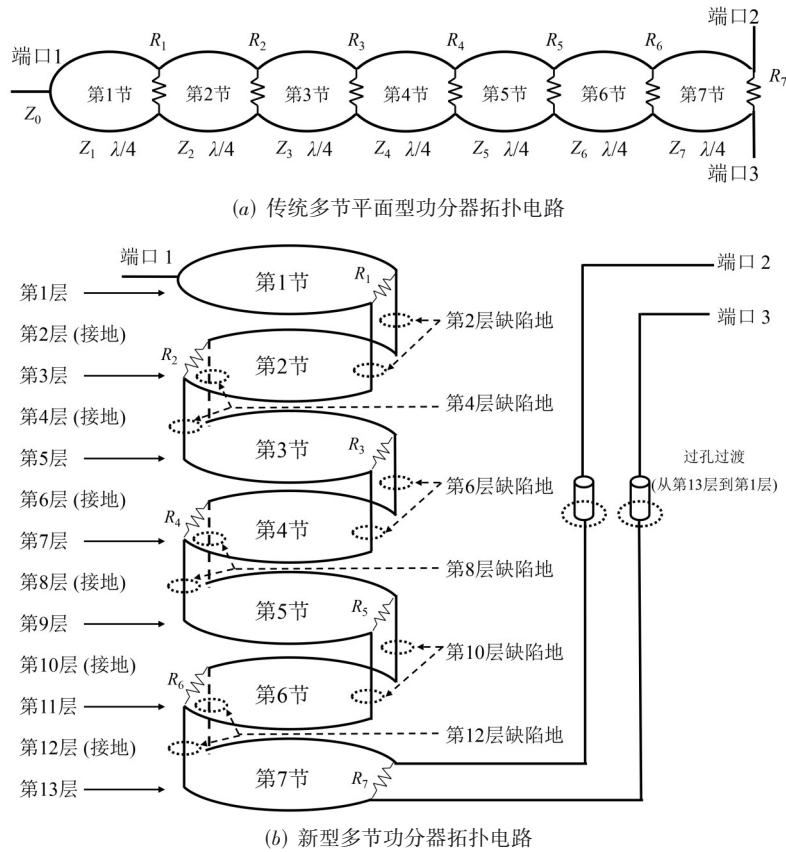


图 1 功分器拓扑电路

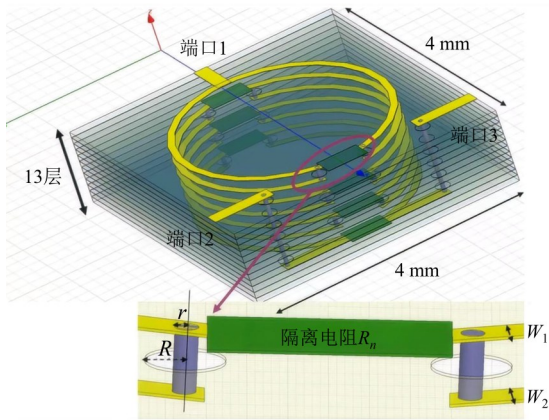


图 2 新型功分器三维结构图

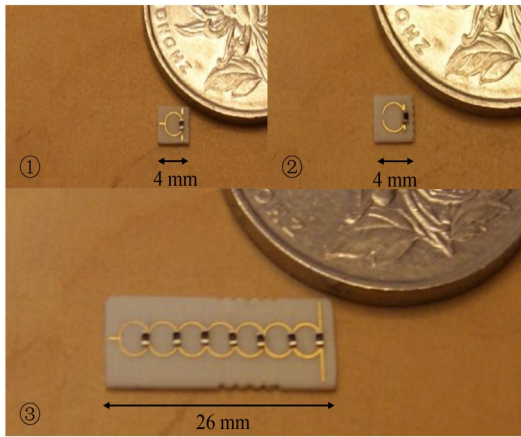
3 测试结果与讨论

新型功分器实物正面和背面照片分别如图 3 中的①和②所示. 我们也加工制作了等效的传统平面型功分器用于尺寸和性能对比, 如图 3 中的③所示. 新型功分器尺寸仅为 4 mm(长) × 4 mm(宽) × 1.33 mm(高), 等效为 $0.07 \lambda_g \times 0.07 \lambda_g \times 0.02 \lambda_g$, 其中 λ_g 是 12 层 LTCC 介质对应的导波波长. 图 3 中③的传统平面功分器的尺寸为 26 mm(长) × 4 mm(宽) × 1.33 mm(高).

表 1 新型功分器的最优参数值

传输级数 n ($n=1,2,\dots,7$)	特性阻抗 Z_n/Ω	线路宽度 W_n/mm	隔离电阻 R_n/Ω
第 1 级 (微带线)	66	0.08	72
第 2 级 (带状线)	42	0.08	120
第 3 级 (带状线)	36	0.11	241
第 4 级 (带状线)	34	0.12	362
第 5 级 (带状线)	36	0.11	555
第 6 级 (带状线)	39	0.09	685
第 7 级 (微带线)	50	0.14	791

因此新型功分器的水平尺寸减小了 84.6%, 充分实现了小型化和高度集成. 图 4 为 S 参数的仿真和测量结果, 测量由安捷伦 N5230C 网络分析仪和三端口测试夹具进行. 在 2~38 GHz 频率范围内, 新型功分器的 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{31} 和 S_{32} 的实测值分别优于 -15、-4.1、16、-4.0 和



①新型功分器正面照片;②新型功分器背面照片;
③传统平面型功分器照片

图3 新型功分器实物正面和背面照片

-17 dB. 测量结果和仿真结果高度一致,验证了设计的精确度和有效性. 在图4(b)和图4(d)中,我们可以观察到新型功分器的带内插损稍高于传统平面型功分器,这是由连接相邻四分之一波长阻抗变换线之间的垂直过孔造成的信号过渡不连续性和每个相邻传输节的方向相反引起的. 值得一提的是,将电路进行立体封装埋置在介质内部,有利于降低外界的电磁干扰,具有一定的电磁屏蔽优势.

表2列出了本设计与其他功分器在性能、尺寸、结构和实现工艺等方面的对比. 对比结果表明,本设计不仅具有最小的尺寸和最大的相对带宽,同时回波损耗和隔离度也是最优. 本设计水平方向只占用1节四分之一波长阻抗变换传输线的面积,而垂直方向上集成了7节四分之一波长阻抗变换线. 相比采用3节结构的文献[9,10],本设计在更小的尺寸内集成了更多的传输节,具有高集成度的优势.

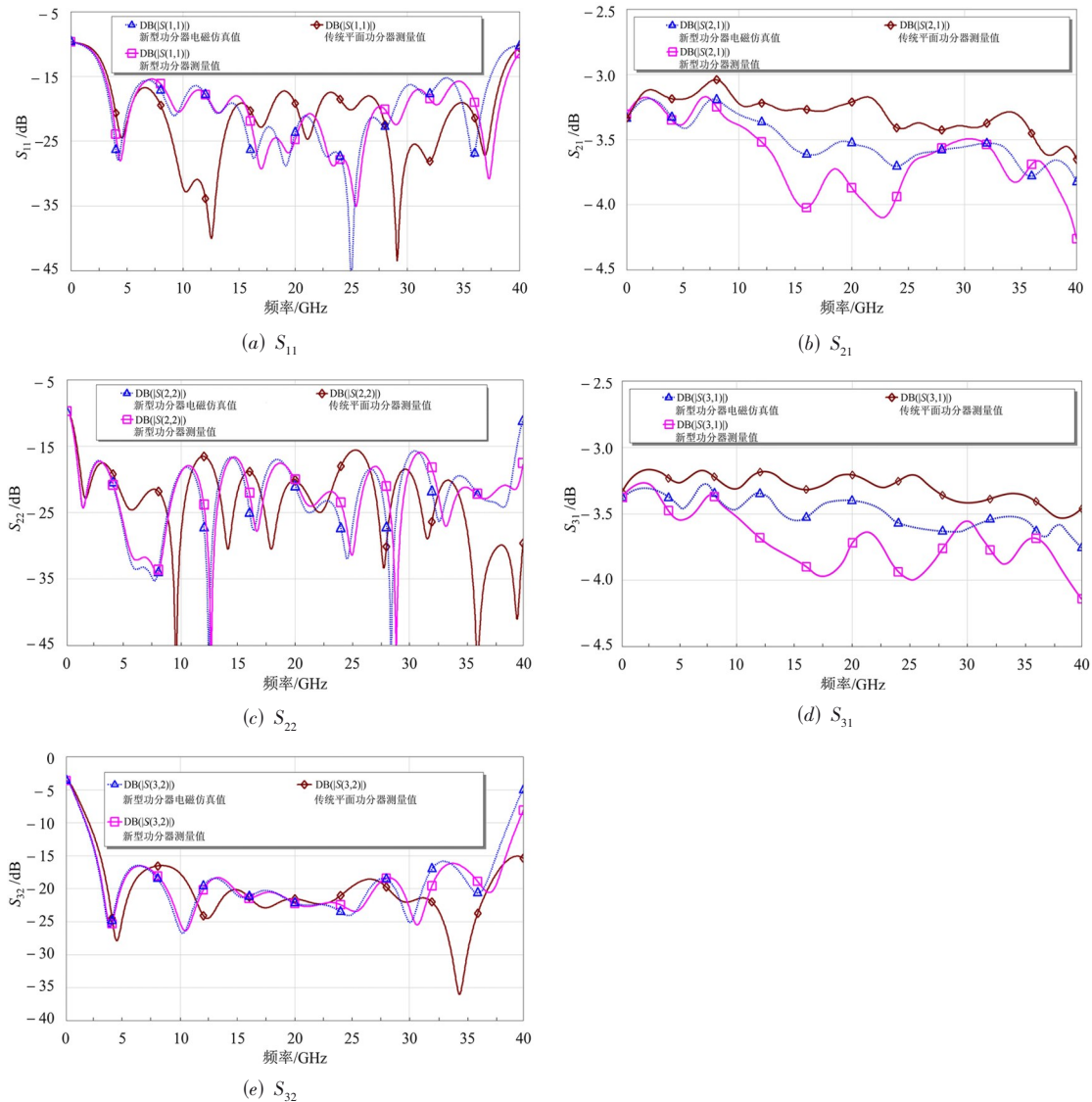


图4 功分器S参数仿真与测量的结果

表 2 本文和其他功分器的性能对比

功分器	中心频率/GHz	相对带宽/%	回波损耗/dB	隔离度/dB	尺寸/ $\lambda_g \times \lambda_g \times \lambda_g$	采用结构	工艺
文献[4]	7	57.1	>15	>10	$0.2 \times 0.19 \times 0.018$	短路线	PCB
文献[6]	10	160	>10	>10	$0.18 \times 0.1 \times 0.07$	耦合线	GaAs IPD
文献[9]	3.84	139.5	>10	>17	$1.1 \times 0.6 \times 0.01$	多节	PCB
文献[10]	2.45	126	>15	>10	$0.23 \times 0.76 \times 0.01$	多节	PCB
文献[11]	52	37	>11	>11	$0.29 \times 0.1 \times 0.11$	集总多节	CMOS
文献[13]	28	33	>15	>17	$0.07 \times 0.09 \times 0.04$	集总慢波	GaAs IPD
文献[14]	2.63	50.6	>15	>10	$0.08 \times 0.08 \times 0.03$	集总慢波	LTCC
本设计	20	180	>15	>17	$0.07 \times 0.07 \times 0.02$	多节	LTCC

4 结论

本文研究了一种基于 LTCC 三维封装技术的高集成度超宽带功分器. 通过将 7 节四分之一波长阻抗变换线进行垂直堆叠布局, 有效实现了经典多节威尔金森功分器的小型化和高度集成. 该功分器尺寸仅为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 1.33 \text{ mm}$, 相比平面型多节功分器水平尺寸减小了 84.6%, 且实现了 180% 的相对带宽. 测量与仿真结果高度吻合, 本设计验证了所提出的三维结构功分器的可行性和有效性, 该功分器可以广泛应用于 2~38 GHz 的超宽带通信应用领域.

参考文献

- [1] WILKINSON E J. An N-way hybrid power divider[J]. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1960, 8(1): 116-118.
- [2] ZHANG N, WANG X L, ZHU L, et al. A wideband band-pass power divider with out-of-band multi-transmission zeros and controllable equal-ripple levels[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(2): 1178-1187.
- [3] ABBAS S, MAQSOOD M, SHOAI B N, et al. A wideband RF power divider with ultra-wide harmonics suppression[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2023, 3(4): 1248-1257.
- [4] WANG L L, LIU C K, HUANG W H, et al. A modified Wilkinson power divider with improved in-band performance and compact size[J]. IEICE Electronics Express, 2024, 21(1): 20230498.
- [5] PAKASIRI C, WANG S. Compact Wilkinson power divider with common inductor on the IPD process[J]. IEEE Access, 2021, 9: 167699-167705.
- [6] 韩思扬, 彭思睿, 卢子焱. 基于耦合电感的超宽带小型化威尔金森功分器[J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(1): 8-12.
HAN S Y, PENG S R, LU Z Y. Ultra-wideband miniaturized Wilkinson power divider based on coupled inductance[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(1): 8-12. (in Chinese)
- [7] SONG K J, ZOU X J, ZHOU Y D, et al. Miniaturized ultrawideband reconfigurable power divider based on slotline and double-sided parallel-strip line[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(4): 2130-2137.
- [8] ZHANG Z W, ZHANG G, TAM K W, et al. Packaged wideband highly selective filtering power divider with arbitrary phase difference and power dividing ratio on multilayer stripline[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024, 72(8): 4757-4769.
- [9] GO D J, MIN B C, KIM M J, et al. Compact ultra-wideband Wilkinson power divider in parallel stripline with modified isolation branches[J]. Sensors, 2024, 24(11): 3437.
- [10] KASAR Ö. Theoretical design and implementation of equal and unequal split ultra-wide band Wilkinson power divider with Chebyshev impedance transform[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 75(5): 383-391.
- [11] 卢启军, 韩大伟, 张浩, 等. 基于阻抗补偿技术的毫米波超宽带功分器[J]. 电子学报, 2025, 53(1): 112-118.
LU Q J, HAN D W, ZHANG H, et al. Millimeter-wave ultra-wideband power divider with impedance compensation technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(1): 112-118. (in Chinese)
- [12] 杨亚洋, 吕超杰, 林宏声. 0.1~3 GHz 超宽带小型化 LTCC 功分器研究[J]. 微波学报, 2024, 40(S1): 151-154.
YANG Y Y, LÜ C J, LIN H S. Research on a 0.1~3 GHz ultra-wideband miniaturized LTCC power divider[J]. Journal of Microwaves, 2024, 40(S1): 151-154. (in Chinese)
- [13] 沈光照, 徐鹏涵, 冯文杰, 等. 一种紧凑型毫米波 IPD 片上滤波功分器[J]. 微波学报, 2023, 1: 1-6.
SHEN G X, XU P H, FENG W J, et al. A compact millimeter wave IPD on-chip filter power divider[J]. China Industrial Electronics, 2023, 1: 1-6.
- [14] ZHAO W, WU Y L, YANG Y H, et al. Novel on-chip

wideband filtering power dividers with high selectivity and ultra-wide out-of-band suppression in LTCC technol-

ogy[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(11): 4288-4292.

作者简介



蒋俊毅 男,2003年生于江苏省常州市.现为南京邮电大学电光柔学院本科生.主要研究方向为LTCC微波电路封装设计、三维电路快速仿真与高效优化算法.
E-mail: b22020226@njupt.edu.cn



施刚 男,1980年生于江苏省南京市.现为南京邮电大学电光柔学院副教授.主要研究方向为射频有源电路、低噪声放大器和混频器等.
E-mail: shig@njupt.edu.cn



王梓丞 男,2004年生于江苏省盐城市.现为南京邮电大学波特兰学院本科生.主要研究方向为射频电路与系统、滤波器、天线等无源器件设计.
E-mail: p22000109@njupt.edu.cn



胡善文 男,1984年生于安徽省安庆市.现为南京邮电大学集成电路学院副教授.主要研究方向为CMOS、InP、SiGe集成电路与系统,三维异构集成电路和电路热分析等.
E-mail: shanwenh@njupt.edu.cn