

基于耦合矩阵的新型8阶SIW带通滤波器^{*}曾翰森^{1,2} 徐正^{1,2} 张鹏飞¹ 陈世龙^{1,2}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 101400; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘要: 针对传统 Ku 波段带通滤波器尺寸大以及集成难度高的问题,本文结合 LTCC 工艺,提出了一种新型 8 阶 SIW 带通滤波器。通过设计耦合矩阵并调节各腔体之间的耦合系数,使该滤波器具有良好的耦合拓扑结构,8 个 SIW 腔体间通过电磁混合耦合方式连接,具有宽带宽、高带外抑制的优点。为了减小整体体积,采用多层板 SIW 技术,将 8 个 SIW 腔体分为上下两层,每层各 4 个腔体,有效减小了滤波器的体积。在微带和 SIW 连接处采用共面波导耦合,实现了在带外具有两个传输零点,可抑制寄生通带,进一步提升带外性能。实验结果显示,该滤波器带宽约为 13.3~17.2 GHz,相对带宽 FBW26%,带内插损 <-2.2 dB,18~20 GHz 范围内带外抑制 >-20 dB。

关键词: SIW 带通滤波器;耦合矩阵;电磁混合耦合

中图分类号: TP2;TN61 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Novel 8th order SIW bandpass filter based on coupling matrix

Zeng Hansen^{1,2} Xu Zheng^{1,2} Zhang Pengfei¹ Chen Shilong^{1,2}

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China;

2. School of Electronic Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To address the issues of large size and integration difficulty in traditional Ku-band bandpass filters, this paper proposes a novel 8th-order SIW bandpass filter utilizing LTCC technology. By designing a coupling matrix and adjusting the coupling coefficients between the cavities, the filter features an effective coupling topology, with eight SIW cavities interconnected through electromagnetic hybrid coupling, achieving wide bandwidth and high out-of-band rejection. To reduce overall volume, the multilayer plate SIW technique is used, the eight SIW cavities are divided into two layers, with four cavities on each layer, the filter's volume is significantly reduced. Coplanar waveguide coupling is employed at the microstrip and SIW junctions, introducing two transmission zeros in the out-of-band region to suppress spurious passbands and further enhance out-of-band performance. Experimental results show that the filter has a bandwidth of approximately 13.3~17.2 GHz, a relative bandwidth (FBW) of 26%, an in-band insertion loss of less than -2.2 dB, and out-of-band rejection greater than -20 dB in the 18~20 GHz range.

Keywords: SIW bandpass; coupling matrix; electromagnetic hybrid coupling

0 引言

随着无线通信技术的飞速发展,传统的低频无线通信系统已经越发无法满足人们对更高的传输速率,更大的用户连接数量以及更低时延的要求。对于射频链路中的带通滤波器性能要求也不断提高,高带外抑制、高选择性和宽带宽已成为带通滤波器的基本要求^[1]。衬底集成波导(substrate integrated waveguide, SIW)因其高 Q 值,高功率容量和易于平面集成的优点,广泛应用于微波和毫米波通信中的带通滤波器设计^[2-3]。

针对 SIW 带通滤波器的高选择性和宽带宽,许多技术被提出来改善滤波器的选择性。Al-Atrakchii 等^[4]设计了一款基于 U 型槽的 5 阶带通滤波器,利用 U 型槽形成一种新的多模谐振器,从而实现高选择性带通滤波效果。然而,该论文存在高频带外抑制性能较差的问题,且 U 型槽的存在会导致一定的电磁辐射和损耗。另一方面, Lin 等^[5]提出了一款新型高选择性、紧凑型带通滤波器,通过在 SIW 腔体中混合微带谐振器来实现耦合带通。但其耦合带宽太窄,相对带宽仅为 8.6%,且滤波器受尺寸因素影响较大。目前宽带宽的滤波器设计方法主要为耦合矩阵法,通过调

节各腔体的耦合系数从而实现较宽带宽。Chu 等^[6]通过耦合矩阵设计出一款相对带宽 18.9% 的平面混合型 SIW 带通滤波器,该滤波器具有低插入损耗和高带宽的优势,但整体尺寸较大。

传统的 SIW 滤波器尺寸偏大,因此吸引了大量的研究来实现 SIW 滤波器的小型化。Moscato 等^[7]提出了一系列角馈和边馈形式的二阶四分之一模基片集成波导滤波器,该系列滤波器带宽在一定范围内灵活可控,适用于窄带滤波器的设计。但是,该系列滤波器通带附近没有传输零点,带外抑制效果较差。另一方面,有学者提出多层板 SIW 技术,Hao 等^[8]提出采用多层 SIW 基板技术设计 C 波段椭圆函数滤波器,通过将 SIW 在垂直方向多层分布,有利减小了 SIW 滤波器的体积。

本文提出了一种新型的基于耦合矩阵的高选择性和宽带宽的 8 阶 SIW 带通滤波器。通过优化耦合矩阵和调整腔体耦合系数实现了较宽带宽。采用多层 SIW 技术,将 8 个 SIW 谐振腔分布于上下两层,大大减小了滤波器的体积。在微带和 SIW 连接处采用共面波导耦合,实现了在带外具有两个传输零点,可抑制寄生通带,进一步提升带外性能。

1 滤波器结构

图 1 展示了所提出的 SIW 带通滤波器的分层爆炸视图,该滤波器从下至上依次包括 5 个部分:最底部为镀敷金属层,包括 50 Ω 微带连接线,共面波导以及 SIW 金属表面。第 2 层和第 4 层均为 AFM-6 陶瓷基板层,适用于 LTCC 工艺,每层包含 4 个通过感性金属通孔耦合的 SIW 腔体;第 3 层为金属接地层,开有耦合槽,通过耦合槽实现了上下层腔体间的电磁能量传输;最顶层同样为镀敷金属层,包括另一个微带端口。此分层结构设计可使滤波器具备紧凑的物理尺寸。

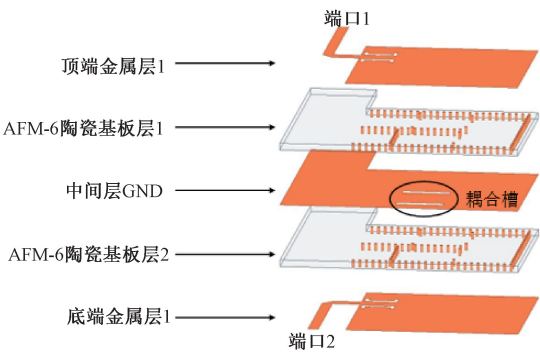


图 1 SIW 带通滤波器分层爆炸视图

Fig. 1 Exploded view of SIW bandpass filter layering

2 设计与原理

图 2 展示了本文滤波器的两次迭代过程。图 2(a)为纯平面结构的 8 阶 SIW 腔体滤波器,其整体物理尺寸较大,

耦合形式较为单一。图 2(b)为第一次迭代结果,将 8 个 SIW 腔体均匀分布于上下两层,通过耦合槽实现上下层腔体的耦合,从而显著减小滤波器的体积,也有利于后面结合耦合矩阵进行腔体尺寸调整从而实现宽带宽。图 2(c)在微带与 SIW 腔体连接处新增了共面波导结构,使滤波器在带外具有两个传输零点,进一步提升带外选择性^[6]。

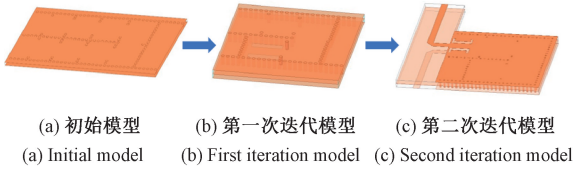


图 2 SIW 滤波器模型迭代图

Fig. 2 SIW filter model iteration diagram

滤波器的模型尺寸图如图 3 所示,图 3(a)为滤波器顶视图,包括 SIW1 到 SIW4 等 4 个腔体,展示了其在平面上的布局及耦合关系。图 3(b)为共面波导部分等效电路原理图,说明了共面波导的工作原理及其对信号传输的影响。图 3(c)为滤波器中间层视图,包括耦合槽具体尺寸和位置,图 3(d)为 SIW 滤波器的整体 3-D 视图。其具体尺寸如表 1 所示。

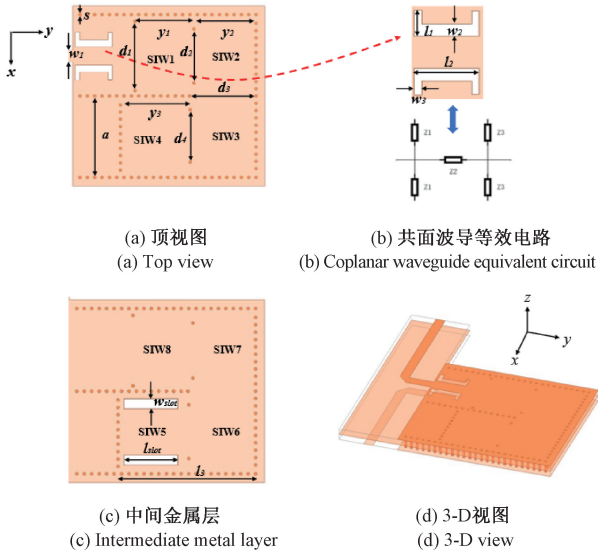


图 3 滤波器模型尺寸图

Fig. 3 Dimensioned view of the filter model

表 1 模型尺寸参数

Table 1		Model dimensional parameters		mm	
参数	值	参数	值	参数	值
s	0.1	a	5.5	w_1	12
d_1	4.78	l_{slot}	3.62	w_2	4.5
d_2	3.72	w_{slot}	0.68	w_3	0.8
d_3	4.54	l_1	1.01	y_1	4.02
d_4	4.74	l_2	1.94	y_2	4.23
ϵ_{r1}	5.9	l_3	9.24	y_3	4.49

滤波器的耦合拓扑结构如图 4(a) 所示, 该图清晰展示了各个腔体之间的耦合关系。8 阶谐振腔可以产生 8 阶谐振响应, 腔体中主要传输模式为 TE₁₀₁ 模式。如图所示, 腔体 4 与腔体 5 之间既有电耦合, 又有磁耦合, 以磁耦合为主。其余腔体之间则通过金属通孔实现电磁混合耦合^[9]。耦合位置都发生于开放边缘。通过调节金属通孔位置, 可精确控制相邻 SIW 腔体耦合强度, 从而优化滤波器性能。图 4(b) 和图 4(c) 分别展示了电磁场分布情况, 可以看出, 耦合金属通孔处的电磁场强度较高, 证明了此处的电磁耦合效果显著。通过合理设计和调节这些耦合参数, 可以实现高性能的 SIW 带通滤波器。

2.1 滤波器综合与耦合矩阵理论

传统的窄带滤波器常常采用频率变换方式得到耦合矩阵,由于耦合结构为频率独立,往往耦合矩阵可以与谐振器分开来计算。若需进行宽带滤波器设计,则耦合矩阵常常不能单独提取出来,需要多尺寸参数综合分析。

对于 SIW 谐振器,腔体之间的耦合可参考式(1),利用该公式可以近似估算出各腔体间耦合强度^[10]。

$$k = \frac{\iiint \epsilon \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 dv}{\sqrt{\iiint \epsilon |\vec{E}_1|^2 dv} \times \sqrt{\iiint \epsilon |\vec{E}_2|^2 dv}} \quad (1)$$

	S	1	2	3	4	5	6	7	8	L
S	0	0.989 2	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.989 2	0.000 4	0.665 1	-0.479 2	0	0	0	0	0	0
2	0	0.665 1	0.400 3	0	0.462 7	0	0	0	0	0
3	0	-0.479 2	0	-0.769 8	0.302 3	0	0	0	0	0
4	0	0	0.462 7	0.302 3	0.011 1	0.544 1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0.544 1	-0.008 4	0.310 3	0.457 2	0	0
6	0	0	0	0	0	0.310 3	0.756 7	0	-0.488 1	0
7	0	0	0	0	0	0.457 2	0	-0.414 9	0.658 6	0
8	0	0	0	0	0	0	-0.488 1	0.658 6	0.000 5	0.989 3
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0.989 3	3

(2)

对于 SIW 谐振器,其外部品质因数(Q_e)计算可参考式(3)^[11],利用该公式近似计算出本文滤波器品质因数 Q_e 约为 26.738。

$$Q_e = \frac{\omega_0 \cdot \tau S_{11}(\omega_0)}{4} \quad (3)$$

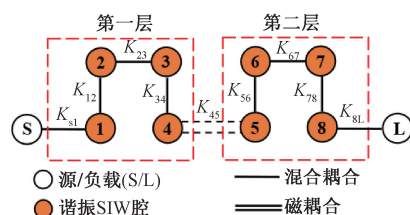
其中, $\tau S_{11}(\omega_0)$ 代表角频率 ω_0 处的群延迟。

2.2 耦合系数提取

Zhu 等^[12]提出对于 SIW 腔体滤波器,其耦合系数可通过式(4)进行滤波器尺寸确定。

$$k = \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2} \quad (4)$$

其中, f_e 代表两个谐振点中高频谐振点频率, f_m 代表



(a) 耦合拓扑结构

(a) Coupling topology

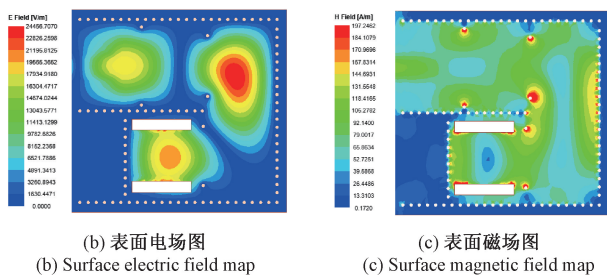


图 4 耦合形式

Fig. 4 Coupling form

本文设计的带通滤波器中心频率为 15 GHz, 带宽 13~17 GHz, 带外抑制 ≥ -20 dB。基于上述指标要求, 计算所需滤波器的外部品质因数及谐振腔间耦合系数, 将其以耦合矩阵的形式表现出来^[13-14]。八阶混合耦合滤波器的耦合矩阵如式(2)所示。

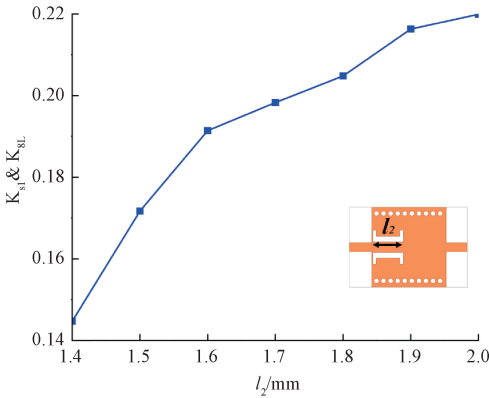
两个谐振点低频谐振点频率。

通过综合滤波器中各腔体耦合系数随尺寸因素变化趋势,提取出符合上述耦合矩阵值的尺寸参数可近似进行宽带 SIW 滤波器设计。各耦合结构和耦合系数的对应关系如图 5 所示。图 5(a)显示了耦合系数 K_{S1} 和 K_{1L} 随共面波导长度 l_2 的变化趋势图。可以观察到,随着 l_2 长度的增加,耦合系数呈现上升趋势,这表明通过增加共面波导长度可以增强腔体之间的耦合。图 5(b)显示了耦合系数 K_{45} 与耦合槽尺寸 l_{slot} 之间的关系,同样可以看出,随着 l_{slot} 的增加,耦合系数逐渐增加,说明调整 l_{slot} 尺寸可以有效增强腔体之间的耦合。图 5(c)则展示了各腔体之间耦合金属通孔的耦合系数随金属通孔间距 d 的变化,不同的

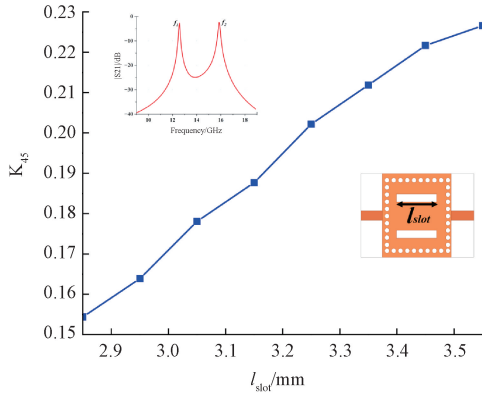
l_1 值(2.0 mm、2.2 mm 和 2.4 mm)对应不同的曲线。可以发现,随着距离 d 的增加,耦合系数也逐渐增大,并且较大的 l_1 对应更高的耦合系数。这些结果表明,通过合理调节几何参数(如 SIW 腔体长度和金属通孔间距),可以实现对 SIW 滤波器耦合强度的精确控制,从而优化滤波器性能。最终确定合适的尺寸参数如表 1 所示,此参数对应结果滤波器 S 参数结果性能较好。

3 结果与分析

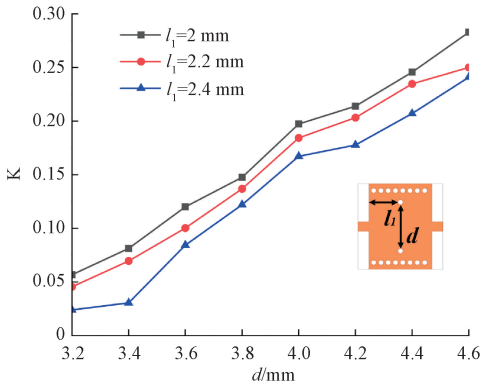
在 HFSS 中理论与仿真对比结果如图 6 所示,可以看出,该滤波器带宽约为 13.3~17.2 GHz,相对带宽(FBW)为 26%,带内插损 <-2.2 dB,且在 18~20 GHz 范围内带外抑制 >-20 dB,整体仿真与理论偏差较小,验证了设计的准确性和有效性。通过对耦合矩阵进行精确设计和优化,使得滤波器在宽频带内表现出优异的带通特性和带外



(a) 共面波导耦合系数 K_{sl} & K_{slr}
(a) Coplanar waveguide coupling coefficients K_{sl} & K_{slr}



(b) 耦合槽耦合系数 K_{45}
(b) Coupling slot coupling coefficients K_{45}



(c) 金属通孔耦合系数K
(c) Metal through-hole coupling coefficients K

图 5 耦合系数对应图

Fig. 5 Coupling coefficients correspondence

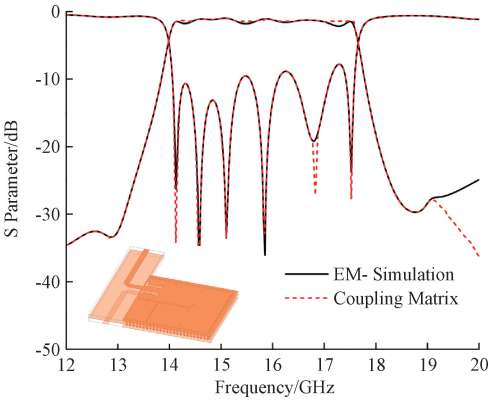


图 6 滤波器仿真与理论结果

Fig. 6 Filter simulation and theoretical results

抑制特性。仿真结果与理论分析的高度一致性进一步证明了所提出设计方法的可行性和可靠性,为 SIW 带通滤波器的优化设计提供了有力的理论支持。

为了强调所提出的滤波器创新性和各种指标参数对比,在表 2 中展示了所制造的滤波器与其他滤波器之间的比较,对比指标包括滤波器相对带宽 FBW、整体面积、带外抑制性能等,可以看出,本文提出的滤波器在带宽方面具有较大优势,相比于其他论文滤波器的带宽本文滤波器带宽更宽。整体滤波器工作中心频率较高,整体尺寸较为适中。但由于滤波器阶数较高,整体品质因数降低,使得插损 IL 值略微偏大。

表2 滤波器性能对比
Table 2 Filter performance comparison

参考文献	中心频率 f_0/GHz	插入损耗 IL/dB	相对带宽 FBW/%	阶数	带外零点数	尺寸	层数
[6]	5.5	1.8	18.9	4	2	1.1×0.56	1
[12]	10	2.04	3.5	4	2	3.7×3.77	1
[15]	8.5	1.7	16.11	3	3	1.1×1.05	2
[16]	10	1.8	22.7	4	2	0.6×0.62	1
[17]	1.056	3.4	9.45	4	2	0.2×0.13	1
本文	15	2.2	26	8	2	0.6×0.70	2

注:尺寸的单位为 $\lambda_0\times\lambda_0,\lambda_0$ 为对应频率下的工作波长。

4 结 论

本文提出了一种新型的基于衬底集成波导和共面波导混合结构的高选择性8阶带通滤波器。该滤波器具有两层介质和8个SIW谐振腔,通过微带混合共面波导的形式实现了两个带外零点。通过合理设计拓扑结构,综合耦合矩阵,滤波器实现了各腔体间谐振能量的垂直传输和交叉耦合。该滤波器具有宽带宽、高选择性的特点,同时结构紧凑、尺寸小、易于与其他射频器件集成使用。本文提出的新型滤波器考虑并结合现有的技术工艺,可以通过LTCC工艺完成滤波器制作。

实验证明了本文提出的新型8阶SIW带通滤波器设计方案的有效性,而且与其他论文进行对比,证明了该滤波器在滤波性能和带宽的优越性。因此,本文提出的这种结构紧凑、宽带宽的滤波器在无线通信中具有重要作用与意义。

参考文献

[1] 王文,邢小明,夏侯海.一种新型W波段基片集成波导带通滤波器设计[J].电子测量技术,2020,43(17):5.
WANG W, XING X M, XIA H H. A novel W-band substrate integrated waveguide bandpass filter design[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(17):5.

[2] 王强,李伟. Ku波段带通滤波器设计及其性能分析[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(5): 1234-1241.
WANG Q, LI W. Ku-band bandpass filter design and its performance analysis[J]. Journal of Electronics and Information, 2019, 41(5): 1234-1241.

[3] 陈华,张凯. 基于SIW的Ku波段滤波器设计[J]. 微波学报, 2018, 34(4): 345-347.
CHEN H, ZHANG K. SIW-based Ku-band filter design[J]. Microwave Journal, 2018, 34(4): 345-347.

[4] AL-ATRAKCHII M A, SAYIDMARIE K H, ABD-ALHAMEED R A. A band pass frequency selective surface using u-shaped slots[J]. International Journal of Microwave & Optical Technology, 2021, 16(1):36.

[5] 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, 2022, 69(4): 2051-2055.

[6] CHU P, HONG W, DAI L, et al. A planar bandpass filter implemented with a hybrid structure of substrate integrated waveguide and coplanar waveguide [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(2): 266-274.

[7] MOSCATO S, TOMASSONI C, BOZZI M, et al. Quarter-mode cavity filters in substrate integrated waveguide technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(8): 2538-2547.

[8] HAO Z C, HONG W, CHEN X P, et al. Multilayered substrate integrated waveguide(MSIW) elliptic filter [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(2): 95-97.

[9] XU X, WANG J, ZHU L. A new approach to design differential-mode bandpass filters on SIW structure[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(12): 635-637.

[10] HONG J S. Microstrip filters for RF/microwave applications[J]. IEEE Microwave Magazine, 2002, 3(3):62-65.

[11] WU X, DING R, WU Q. Design of substrate integrated waveguide (SIW) bandpass filters [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2007, 30(3):394-396.

[12] ZHU F, LUO G Q, YOU B, et al. Planar dual-mode bandpass filters using perturbed substrate-integrated waveguide rectangular cavities[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(6): 3048-3057.

[13] BASIT A, KHATTAK M I, NEBHEN J, et al. Investigation of external quality factor and coupling

coefficient for a novel SIR based microstrip tri-band bandpass filter[J]. PloS One, 2021, 16(10):e0258386.

[14] SALAH M A, ELDESOUKI E M, EL-DEEB W S, et al. Analysis and design of substrate integrated waveguide bandpass filter for 5G applications[C]. 2022 39th National Radio Science Conference (NRSC), 2022(1): 108-114.

[15] SHEN W, ZHU H R. Vertically stacked trisection SIW filter with controllable transmission zeros [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(3): 237-240.

[16] ZHENG Y, ZHU Y, WANG Z, et al. Compact, wide stopband, shielded hybrid filter based on quarter-mode substrate integrated waveguide and microstrip line resonators [J]. IEEE Microwave and Wireless

Components Letters, 2021, 31(3): 245-248.

[17] CHU Q X, WANG H. A compact open-loop filter with mixed electric and magnetic coupling[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 431-439.

作者简介

曾翰森, 硕士, 主要研究方向为 SIW 滤波器、相控阵天线等。

E-mail: zenghansen22@mails.ucas.ac.cn

徐正(通信作者), 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为数字阵列天线, 雷达系统等。

E-mail: xuzheng292@163.com

张鹏飞, 博士, 主要研究方向为相控阵天线。

陈世龙, 硕士, 主要研究方向为抗有源欺骗干扰下的参数捷变波形设计及成像处理算法研究。