

## Ka 波段基片集成波导窄带带通滤波器设计

葛俊祥\* 李浩 杨现志 汪洁

(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

(江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044)

**摘要:** 该文针对传统滤波器在 Ka 波段难以同时实现窄带与集成的问题, 采用基片集成波导结构(SIW)设计了一款 Ka 波段平面窄带带通滤波器。该滤波器采用双模圆腔与椭圆腔级联的结构, 在上下边带分别产生一个传输零点, 具有频率高选择特性。测试结果表明, 该滤波器中心频率 35 GHz, 相对带宽 2.85%, 插入损耗约为 3.4 dB, 带内回波损耗大于 15 dB, 与仿真结果吻合较好, 在毫米波系统中具有很好的应用价值。

**关键词:** 窄带带通滤波器; Ka 波段; 基片集成波导; 双模腔

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1245-05

DOI: 10.11999/JEIT160647

## Design of a Ka-band Filter with Narrow Pass Band Based on Substrate Integrated Waveguide

GE Junxiang LI Hao YANG Xianzhi WANG Jie

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In view of the difficulty of implementing the narrow band and integration simultaneously for the traditional Ka-band filter, a Ka-band filter with narrow pass band is designed based on Substrate Integrated Waveguide (SIW). The filter adopts the structure with dual-mode circle cavity and ellipse cavity cascaded, which achieves the advantages of high frequency selectivity due to the transmission zeros both in upper and lower sideband. The measured results show that the filter has a relative bandwidth of 2.85%, insertion loss of 3.4 dB, and return loss is more than 15 dB at a center frequency 35 GHz, and the results are in good agreement with the simulation results. The measured results verify that the filter has great application value in millimeter system.

**Key words:** Narrow-band filter; Ka-band; Substrate Integrated Waveguide (SIW); Dual-mode cavity

### 1 引言

近年来, 毫米波由于具有频带宽、波长短、空间分辨率高等优点, 在雷达、通信系统中的应用越来越广泛, 其中, 毫米波窄带滤波器通常是系统中不可或缺的重要器件, 尤其当系统中有用射频信号频率与谐波或杂波频率非常相近时, 设计具有较窄带宽的毫米波滤波器显得至关重要。传统的毫米波波导滤波器往往体积较大, 不易与外围电路集成, 不满足现代毫米波系统中对于器件小型化、集成化的要求<sup>[1-3]</sup>。微带滤波器由于微带结构的品质因数

(Q 值)较低, 在毫米波波段很难实现窄带设计, 而且通常损耗较大, 往往不满足系统设计需求。

基片集成波导(SIW)作为一种不同于传统波导与微带线的导波结构, 通常由上下两面金属层和连接金属层的紧密排列金属通孔组成。它同时具有传统波导和微带传输线的一些优点, Q 值较高, 损耗较小, 同时又属于平面结构, 易于加工, 易于集成, 被广泛地应用于平面滤波器的设计中, 尤其是在毫米波波段, 可以弥补传统滤波器结构的不足<sup>[4,5]</sup>。

基片集成波导滤波器一般仅利用腔体的主模设计滤波器<sup>[6]</sup>, 如果利用腔体内多种模式同时工作, 则一个腔体可以得到等价于多个主模腔体的选择性, 同样性能下可以显著减小滤波器的体积<sup>[7-10]</sup>。

结合 SIW 的上述特点, 本文选择具有传输零点的 SIW 双模圆腔与椭圆腔作为谐振结构, 分别设计了 SIW 双模圆腔滤波器与 SIW 双模椭圆腔滤波器, 并对两者的特性进行讨论。最后设计出具有高选择

收稿日期: 2016-06-16; 改回日期: 2016-12-08; 网络出版: 2017-02-09

\*通信作者: 葛俊祥 jxge@nuist.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61372066), 江苏省双创团队人才计划

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61372066), Jiangsu Innovation & Entrepreneurship Group Talents Plan

特性的双模滤波器，在 Ka 波段实现了平面窄带带通滤波器的设计。

### 2 SIW 双模圆腔、椭圆腔的基本原理

SIW 双模圆腔的工作模式为  $TM_{110}$  模， $TM_{110}$  模的场分布在不同方向都代表不同的模式，且所有模式都可以由两个正交模线性组合，所以这两个正交模为简并模式。在椭圆腔中，当椭圆长短轴相近时，场分布与圆形腔类似，一般称作准  $TM_{110}$  模。

对于简并模，在一定条件下，模式间可以通过互耦产生双模振荡。对于腔体来说，当满足式(1)时，会产生模式互耦<sup>[11]</sup>。

$$\oint_S \mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{H}_2 dS \neq 0 \tag{1}$$

式中， $\mathbf{H}_1$ ， $\mathbf{H}_2$  分别表示两个模式， $S$  表示腔体壁。如果腔体留有合适的耦合缝隙，由于缝隙中能量的损耗，则可满足耦合的条件。腔体的耦合缝隙如图 1 所示，当两个缝隙位置  $J_1$ ， $J_2$  共轴对称时(如图 1(a))，任意边界条件时都难以激发双模；当两个缝隙位置  $J_1$ ， $J_2$  非共轴不对称排列且边界条件为阻抗特性时(如图 1(b))，可以激发双模<sup>[12-14]</sup>。

### 3 窄带带通滤波器设计

本文滤波器的设计指标为中心频率 35 GHz，带宽 1 GHz，带外衰减大于 20 dB，两个传输零点分别位于 34.2 GHz 与 35.8 GHz。仿真设计工具选用电磁仿真软件 HFSS。

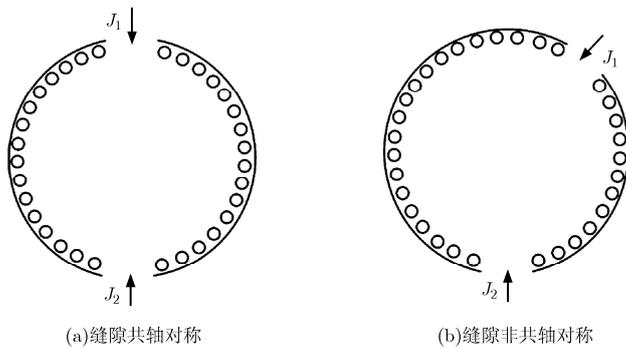


图 1 腔体耦合缝隙布局

### 3.1 SIW 双模圆腔滤波器

SIW 双模圆腔滤波器的结构如图 2 所示，其中， $d$  为 SIW 通孔的直径， $t$  为相邻通孔的间距， $\alpha_1$  为耦合缝隙边缘与圆心的夹角， $\alpha_2$  为两个耦合缝隙之间的夹角， $w_1$ ， $w_2$ ， $L_1$ ， $L_2$  分别为 SIW 与微带线过渡部分的参数。输入输出端的耦合缝隙、过渡部分尺寸参数完全相同。

SIW 双模圆腔滤波器的频率响应曲线如图 3 所示，由图可知该滤波器会在带外产生两个传输零点  $Z_1$ ， $Z_2$ ，带内产生两个极点  $P_1$ ， $P_2$ 。两个极点可以控制带宽特性，零点可以改变带外的选择性。

从图 3 可以看出，SIW 双模圆腔滤波器具有非对称的选择性，其中零点  $Z_1$  位于上边带通带附近，使得上边带具有高选择性。零点  $Z_2$  位于下边带，但远离通带，下边带选择性较差。

零点  $Z_1$  的场分布如图 4 所示，它是一个空间稳定的单模场，其波节正好位于输出端耦合缝隙的正中，对负载的总激励效果为零，腔体不能通过互耦激起另一个模式。腔内场分布与圆腔本征模场分布十分类似，不受耦合缝隙的影响，所以该零点的频率几乎等于本征模  $TM_{110}$  的频率，且基本不随耦合量而改变。

零点  $Z_2$  产生的原因是在远离谐振频率的模式上，腔体和馈电波导中的总场为驻波。在某频率上，腔内驻波的波节恰好位于输出端耦合缝隙位置，于

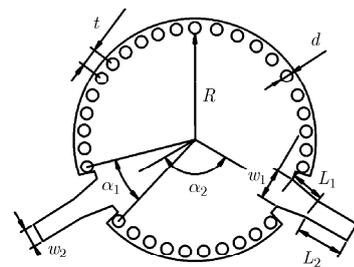


图 2 SIW 双模圆腔滤波器结构

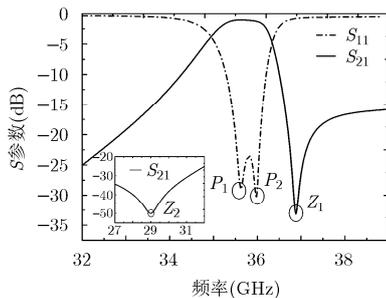


图 3 SIW 双模圆腔滤波器频响特性

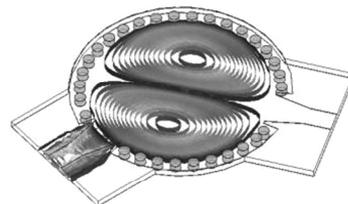


图 4 SIW 双模圆腔零点场分布

是产生一零点<sup>[12]</sup>。通过调整两耦合缝隙夹角 $\alpha_2$ , 该零点可以产生于下边带或上边带。如果使 $Z_2$ 离通带较近, 则 $\alpha_2$ 取值接近 $90^\circ$ , 此时两模式间耦合变弱, 不能实现良好的通带特性, 所以圆腔无法利用零点 $Z_2$ 实现下边带的高选择性。

SIW 双模圆腔滤波器的零极点主要与几何参数 $\alpha_1, \alpha_2, R$ 有关, 其中 $\alpha_1$ 决定耦合缝隙的大小;  $\alpha_2$ 决定抽头位置, 且 $\alpha_2 \neq 180^\circ$ ; 圆腔半径 $R$ 决定了SIW 本征模 $TM_{110}$  频率 $f_e$ 。文献[15]给出的 $f_e$ 如式(2)所示。

$$f_e = f_{110} = \frac{0.610 \cdot c}{r \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (2)$$

其中,  $c$ 为光速,  $r$ 为 SIW 圆腔的等效半径。  $r$ 与 SIW 圆腔物理半径 $R$ 的关系为

$$r = R - d + 0.268p^{0.326} \quad (3)$$

其中,  $d$ 为金属通孔直径,  $p$ 为 $d$ 与通孔间距比。

在 $f_e$ 取 36 GHz,  $d$ 取 0.4 mm,  $p$ 取 1.45, 即 $R$ 为 3.53 mm 时, 本文通过 HFSS 软件建模仿真, 说明了 SIW 双模圆腔滤波器零极点 $Z_1, P_1, P_2$ 与 $\alpha_1, \alpha_2$ 的关系, 如图 5 所示, 其中零极点频率分别对 $f_e$ 做归一化处理。

从图 5 可以看出, 圆腔零点 $Z_1$ 比本征模频率稍低, 且基本保持恒定, 几乎不受 $\alpha_1, \alpha_2$ 影响, 与前面所述一致; 在 $\alpha_2$ 一定的情况下, 极点频率随着耦合缝隙 $\alpha_1$ 角度的增大而减小, 且两个极点相互接近直至合并;  $\alpha_2$ 越大, 两个极点越分离, 带宽越大, 但上边带陡峭程度越轻。

### 3.2 SIW 双模圆腔滤波器

SIW 双模圆腔滤波器虽然可以在上下边带都产生传输零点, 但只能在上边带拥有较高的选择性。为了实现下边带的高选择性, 特选择 SIW 双模椭圆腔滤波器。

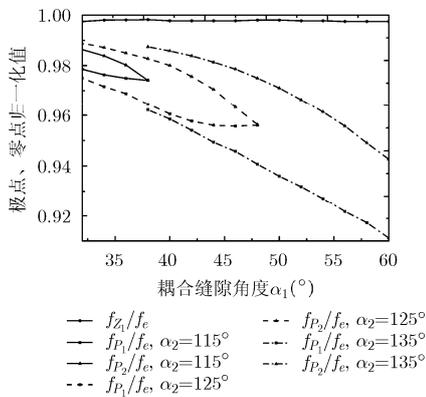


图 5 SIW 双模圆腔零极点 $Z_1, P_1, P_2$ 与 $\alpha_1, \alpha_2$ 的关系

SIW 双模椭圆腔滤波器的结构如图 6 所示,  $d, t$ 与 SIW 双模圆腔中 $d, t$ 相同,  $R_a$ 为长轴,  $R_b$ 为短轴,  $k$ 为轴比且 $k$ 小于 1,  $\alpha_3, \alpha_4, w_3, w_4, L_3, L_4$ 分别类似于圆腔中的 $\alpha_1, \alpha_2, w_1, w_2, L_1, L_2$ 。

SIW 双模椭圆腔滤波器的频率响应曲线如图 7 所示, 同样具有非对称的选择性, 在带外存在两个传输零点 $Z_1, Z_2$ , 带内存在两个极点 $P_1, P_2$ 。零点 $Z_1, Z_2$ 的性质类似于圆腔中的零点 $Z_1, Z_2$ , 只是椭圆腔中零点 $Z_1$ 存在于下边带, 使得椭圆腔在下边带具有高选择性。

在 $R_a$ 取 3.7 mm,  $\alpha_3$ 取 $35^\circ$ ,  $\alpha_4$ 取 $125^\circ$ 时, 图 8 显示了零极点 $Z_1, P_1, P_2$ 频率与椭圆轴比 $k$ (小于 1)的关系曲线。

从图 8 可以看出, 随着 $k$ 的增大, 零点 $Z_1$ 、极点 $P_1$ 以及两者间距都稍有下降, 但幅度不大, 而极点 $P_2$ 下降较为明显。该特性说明可以通过调节 $k$ 值来调节带宽同时又能保证下边带的陡峭程度基本不变。

图 9 探究了在轴比 $k$ 、长轴 $R_a$ 一定时零极点位置与 $\alpha_3, \alpha_4$ 的关系。

当 $\alpha_4$ 不变,  $\alpha_3$ 增大时, 零极点的变化规律与图 8 所示相似, 零点 $Z_1$ 、极点 $P_1$ 变化不大, 而极点 $P_2$ 下降明显。当 $\alpha_4$ 增大时, 极点 $P_1, P_2$ 之间的间距以及极点 $P_1$ 、零点 $Z_1$ 之间的间距同时在减小, 极点 $P_1$ 频率稍有增加, 这说明滤波器带宽与过渡带带宽都随着 $\alpha_4$ 的增大而减小。

### 3.3 高选择性 SIW 双模窄带滤波器设计

前面分别论述了 SIW 双模圆腔与双模椭圆腔滤波器的特性, 可分别在上下边带产生引起过渡带陡峭的传输零点。为实现 Ka 波段窄带带通滤波器的设计指标, 可以选择将两种结构级联耦合, 同时保证上下边带的高选择性, 具体结构如图 10 所示。

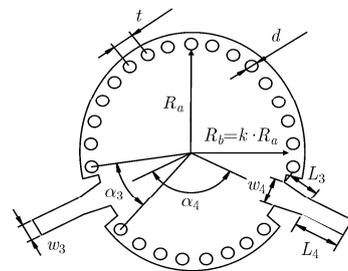


图 6 SIW 双模椭圆腔滤波器结构

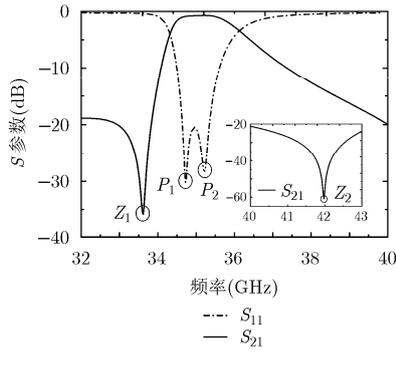


图 7 SIW 双模椭圆腔滤波器频响特性

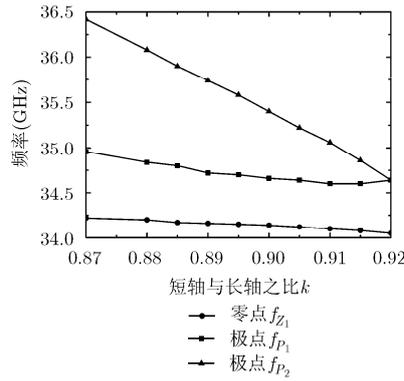


图 8 SIW 双模椭圆腔零极点与轴之比  $k$  的关系

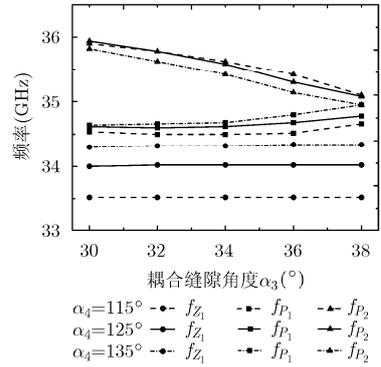


图 9 SIW 双模椭圆腔零极点与  $\alpha_3, \alpha_4$  的关系

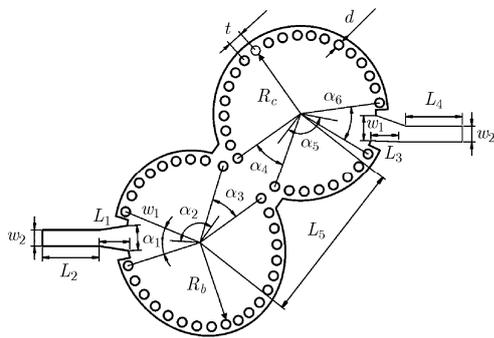


图 10 高选择性 SIW 双模窄带滤波器结构

在电磁仿真软件 HFSS 中建立图 10 所示模型，介质基板选用 Rogers RT5880 ( $\epsilon_r = 2.2, \tan \delta = 0.0009$ )，厚度 0.254 mm，过孔直径  $d$  取 0.4 mm，过孔间距  $t$  取 0.6 mm。利用前述滤波器性能与抽头位置、几何参数的变化关系，不断收敛优化，最终得出的几何参数如表 1，表 2 所示 ( $k = 0.914$ )。

表 1 滤波器优化后参数 1

参数	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
数值( $^\circ$ )	37.4	128.0	34.0	38.0	118.0	35.0

表 2 滤波器优化后参数 2

参数	$R_a$	$R_b$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$w_1$	$w_2$
数值(mm)	3.77	3.59	1.00	1.90	5.00	5.00	7.20	1.20	0.76

### 4 测试结果与讨论

对仿真设计的 Ka 波段 SIW 双模带通滤波器进行了实物加工，并利用 Agilent E8363C 矢量网络分析仪对其进行测试，输入输出端口选 2.92 mm 接头。扣除接头及传输线的损耗后，测试与仿真结果如图 11 所示。

通过图 11 可以看出，测试带内插损为 3.4 dB，大于仿真的 2 dB；回波损耗带内大于 15 dB；相对带宽约为 2.85%，实现了窄带设计。中心频率与零点的位置与设计基本吻合。

分析仿真测试结果，可以发现，插入损耗偏高，可能有以下原因：(1)滤波器工作在 Ka 波段，由于频率较高，介质的损耗正切角已经大于仿真默认值(通常为 10 GHz 测试值)；(2)SIW 结构中，金属通孔形成的波导壁电导率不是无限大，会带来欧姆损耗，甚至存在少量辐射损耗；(3)加工、测试装配等误差原因。

### 5 结论

本文利用基片集成波导双模圆腔与椭圆腔，设计了一款具有高选择性的 Ka 波段窄带带通滤波器，相对带宽 2.85%，实现了毫米波段平面窄带滤波器的设计。该滤波器带宽窄，与波导窄带滤波器相比，体积小，具有平面结构，易于集成，易于加工，在现代毫米波集成电路系统中有很好的应用价值。

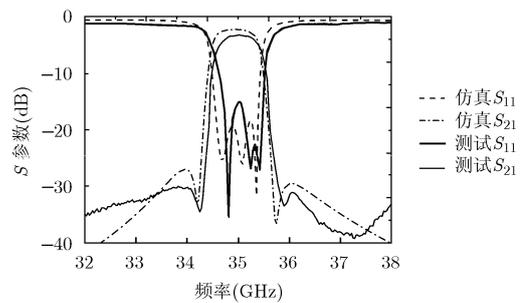


图 11 滤波器仿真与测试结果

## 参考文献

- [1] DESLANDES D and WU Ke. Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters[J]. *IEEE Microwave Theory and Techniques*, 2003, 51(2): 593-596. doi: 10.1109/TMTT.2002.807820.
- [2] 寇鑫, 肖中银, 黄春艳, 等. 基于频率变换的双通带腔体滤波器研究[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(6): 1489-1493. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01151.  
KOU Xin, XIAO Zhongyin, HUANG Chunyan, *et al.* Design of dual-band davity filter using frequency transformation method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(6): 1489-1493; doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01151.
- [3] HONG J S and LANCASTER M J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. New York: Wiley, 2001: 235-271.
- [4] 张胜, 王子华, 肖建康, 等. 基片集成波导(SIW)的双模带通滤波器[J]. *微波学报*, 2007, 23(2): 55-61.  
ZHANG Sheng, Wang Zihua, XIAO Jiankang, *et al.* Dual-mode bandpass filters based on substrate integrated waveguide (SIW)[J]. *Journal of Microwaves*, 2007, 23(2): 55-61.
- [5] GUGLIELMI M, JARRY P, KERHERVE E, *et al.* A new family of all-inductive dual-mode filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2001, 49(10): 1764-1769. doi: 10.1109/22.954782.
- [6] JANG Y, KIM J, KIM S, *et al.* Design and fabrication of a compact 3-dimensional stacked type dielectric ceramic waveguide bandpass filter[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, 24(10): 665-667. doi: 10.1109/LMWC.2014.2341016.
- [7] ZHU Xicheng, HONG Wei, WU Ke, *et al.* Design and implementation of a triple-mode planar filter[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2013, 23(5): 243-245. doi: 10.1109/LMWC.2013.2253313.
- [8] 李荣强, 肖绍球. 一种槽线扰动的基片集成波导双模滤波器[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(11): 2791-2794. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01665.  
LI Rongqiang and XIAO Shaoqiu. A substrate integrated waveguide dual-mode filter with a slot line perturbation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2791-2794. doi: 10.3724/SP.J.1146. 2013.01665.
- [9] ARANI A K, RAVI S, and MRINAL K M. Dual-mode bandpass filter using via less substrate integrated waveguide technology[C]. International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP), Dhanbad, 2015: 1-2. doi: 10.1109/ICMAP.2015.7408702.
- [10] SU Yiwen, HUANG Tingyi, TSAI Hanyun, *et al.* Design of 2-in-1 bandpass filter using common dual mode resonators[C]. Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Nanjing, China, 2015: 1-3. doi: 10.1109/APMC.2015.7413350.
- [11] FEI Cheng, XIAN Qilin, MICHAEL L *et al.* A dual-mode substrate integrated waveguide filter with controllable transmission zeros[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25(9): 576-578. doi: 10.1109/LMWC. 2015.2451362.
- [12] 汤红军. 毫米波前端集成新技术研究[D]. [博士学位论文, 东南大学, 2006.  
TANG Hongjun. Advanced integration technology for millimeter wave fronted[D]. [Ph.D. dissertation], Southeast University, 2006.
- [13] MORTEZA R and AMIR R A. A novel dual mode dual band SIW filter[C]. 2014 44th European, Microwave Conference (EuMC), Rome, 2014: 853-856. doi: 10.1109/EuMC. 2014.6986569.
- [14] WAHAB N A, KHAN Z I, SALLEH M K M, *et al.* Multilayer dual-mode dual-band bandpass filter[C]. Antennas and Propagation Conference (LAPC), Loughborough, 2014: 549-552. doi: 10.1109/LAPC.2014.6996447.
- [15] POZAR D.M. Microwave Engineering[M]. New York: Wiley, 2005: 350-380.
- [16] LI R Q, TANG X H, and XIAO F. Substrate integrated waveguide dual-mode filter using slot lines perturbation[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(12): 845-846. doi: 10.1049/el.2010.0629.
- 葛俊祥: 男, 1960年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁场理论、微波毫米波理论与技术、天线理论与技术、雷达系统.
- 李浩: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为毫米波电路与系统.
- 杨现志: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为微波器件与电路.
- 汪洁: 男, 1988年生, 硕士生, 研究方向为太赫兹大气传输、天线技术.