

基于超表面的宽带滤波天线设计

王璐,陈新伟*

(山西大学 物理电子工程学院,山西 太原 030006)

摘要:本文提出了一种基于超表面的宽带滤波天线。通过分割 3×3 的超表面,引入了新的谐振点,有效改善了阻抗匹配带宽;另外,通过在馈线上加载阶跃阻抗谐振器(SIR),在工作频带两边分别引入一个辐射零点,而且,在通带内高频段引入了另一个谐振点,进一步展宽了带宽;为了改善低频段的选择性,在地面上刻蚀四个中心对称的U型缺地陷结构(DGS),引入一个辐射零点。仿真表明,设计的滤波天线工作在4.93 GHz~6.88 GHz,−10 dB阻抗带宽达到33.1%,在4.06 GHz、4.4 GHz、7.5 GHz、8.75 GHz产生四个辐射零点,提高了滤波天线的选择性。

关键词:超表面;缺地陷结构;辐射零点;滤波天线

中图分类号:TN822

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)05-1062-06

Design of Wideband Filtering Antenna Based on Metasurface

WANG Lu, CHEN Xinwei*

(School of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In this paper, a wideband filtering antenna is proposed based on metasurface. By dividing the 3×3 metasurface, a new resonance is introduced to improve the impedance matching bandwidth. In addition, by adding a step impedance resonator (SIR) to the feed line, a radiation zero is introduced on each of two sides of the working band. Moreover, a new resonance is introduced into the high frequency band of the passband, causing the bandwidth to be further widened. In addition, in order to improve the selectivity of the low frequency, a new radiation zero is introduced by etching four central symmetric U-shaped DGS on the ground. Simulated results show that the designed filtering antenna has the fractional bandwidth of 33.1% (4.93 GHz—6.88 GHz) for $S_{11}<-10$ dB, and has four radiation zeros at 4.06 GHz, 4.4 GHz, 7.5 GHz and 8.75 GHz, respectively.

Key words: metasurface; DGS; radiation zero; filtering antenna

0 引言

随着无线通信领域的发展,对射频前端的通信设备功能的要求越来越多,对器件的体积要求越来越小,滤波器和天线作为射频前端必备的两部分,将它们集成在一个器件里,同时获得滤波和辐射的功能,并且减少占用空间是十分必要的。

近些年,滤波天线得到了国内外学者的广泛关注,各种结构的滤波天线被设计^[1]。Dhwaj、Lin等^[2-3]将天线作为滤波器的最后一级谐振器,构成了滤波天线;Xiang等^[4]采用滤波器的综合理论将滤波器和天线协同设计,实现了双极化的偶极子滤波天线。Chen^[5]通过在贴片上刻蚀两对缝隙,在上下边带引入了可控的辐

收稿日期:2022-12-26;接受日期:2023-05-05

基金项目:国家自然科学基金(62071282);山西省自然科学基金(202203021211295);山西省留学基金(2021-006)

作者简介:王璐(1997-),男,山西运城人,硕士生,研究方向为射频电路与天线。E-mail:1449327787@qq.com

* 通信作者:陈新伟(CHEN Xinwei),E-mail:chenxw@sxu.edu.cn

引文格式:王璐,陈新伟.基于超表面的宽带滤波天线设计[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(5):1062-1067.

DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023096

射零点,提高了天线的选择性;Li等^[6]通过加载多个短路销钉,在通带附近引入三个可独立控制的辐射零点,提高了天线的选择性。Tian等^[7-8]通过添加堆叠贴片和寄生贴片,在通带上引入了辐射零点,提高了天线的选择性。Li等^[9]通过在差分馈电的馈电网络中引入阶跃阻抗谐振器(SIR)来引入辐射零点。

研究发现,超材料应用于微带天线能够有效改善天线的带宽和提高天线增益^[10-13]。Liu等^[10]验证了均匀分布的方形贴片具有超材料特性,将超材料贴片放置于辐射贴片上方可提高天线增益。Pan等^[12]采用非均匀金属贴片作为上层超表面,在通带内引入新的谐振模式,最终带宽达到了28.4%;Liu等^[13]通过结合超表面的三种模式和缝隙的模式,在多模共振下实现了宽频带。Ding等^[14]设计出特殊的超表面,在实现圆极化的同时引入新的谐振,展宽了带宽。Yousfi等^[15]借助特征模分析,选择超表面具有正交电流的两种模式实现了宽带圆极化天线,相对带宽达到25%。Yang等^[16]通过在单元超表面上刻蚀“U”形缝隙以及加载缺地陷结构(DGS)用来产生低频带的辐射零点,随后将共面寄生贴片加载在超表面单元周围,用来产生上边缘辐射零点,同时引入新的谐振,从而实现宽频带、高增益的滤波天线,相对带宽达到17.8%。综上所述,利用超表面引入新的谐振可以有效展宽带宽;在天线上刻蚀U型槽、加载DGS结构、馈线上加载SIR谐振器等可以引入辐射零点,提高滤波天线的选择性。为了满足日益完善的通信系统的要求,进一步提高滤波天线的带宽和选择性,可以改进超材料的结构,进一步展宽天线带宽,结合提高选择性的方法,设计出带宽更宽,选择性更佳的滤波天线。

本文设计了一种基于超表面的宽带滤波天线,通过切割均匀超表面,在通带内引入新的谐振;在馈线上加载SIR结构,引入辐射零点的同时在通带内引入新的谐振点;在地面上刻蚀四个中心对称的U型DGS,引入另一个辐射零点。实

现了33.1%阻抗带宽和双辐射零点的滤波天线。

1 天线设计

1.1 天线结构

设计的滤波天线如图1所示,滤波天线分为两层,顶层是蚀刻在介质基板1上的超表面,底层是蚀刻在介质基板2上的微带缝隙耦合馈电电路。顶层的超表面是将方形贴片均匀地分割成 3×3 的阵列,再将外侧的3块超表面单元分别均匀切割成3块,每块的大小为 $L_2 \times W_2$,内侧的3块超表面单元按1:2分别切割成两块,两块大小分别为 $L_2 \times W_2$ 和 $(2L_2 + W_{S2}) \times W_2$ 。底层的上表面是蚀刻有为顶层超表面馈电的缝隙和四个中心对称的U型缺陷地结构,底层的下表面是微带馈线,馈线两侧加载一对阶跃阻抗枝节。顶层和底层的介质基板采用相对介电常数为4.4的FR4材料,厚度分别为2 mm和0.8 mm,天线各部分的尺寸参数如表1所示。

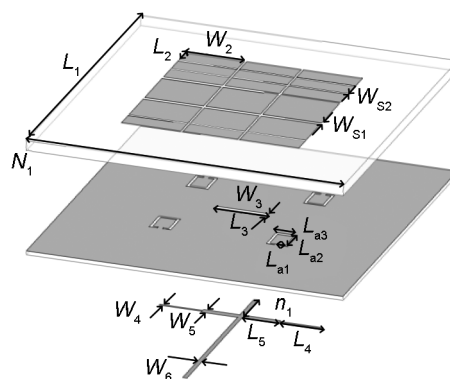


图1 天线结构

Fig. 1 Configuration of antenna

1.2 宽带滤波天线设计

为了解释设计滤波天线的工作原理,用四个参考天线作为参考,如图2所示,分别是天线I:微带线耦合馈电的 3×3 超表面天线;天线II:在天线I的基础上对超表面单元再次切割;天线III:在天线II的基础上,馈线上加载一对SIR;天线IV:在地面上刻蚀U型DGS,得到最终设计的天线。

表1 天线各部分的尺寸

Table 1 The sizes of different parts of the antenna

参数	L_1	W_1	L_2	W_2	L_3	W_3	L_4	W_4	L_5	W_5	W_6	W_{S1}	W_{S2}	n_1	l_{a1}	l_{a2}	l_{a3}
数值/mm	59	59	3.3	10.3	9.8	1	8	0.2	7	1	0.8	0.7	0.1	7.7	5	5.6	1

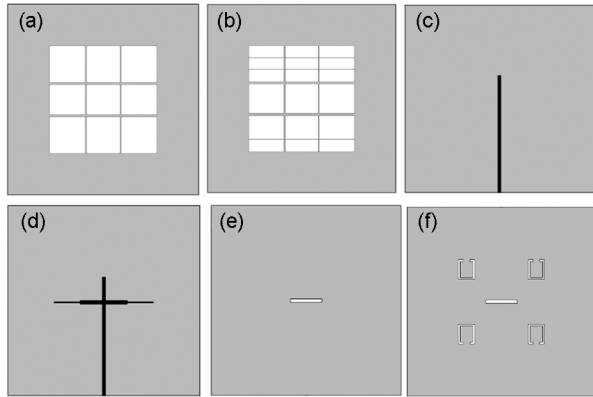


图2 天线的辐射贴片与馈电结构

(a) 天线 I 的超表面贴片; (b) 天线 II、III、IV 的超表面贴片; (c) 天线 I、II 的微带馈线; (d) 天线 III、IV 的微带馈线; (e) 天线 I、II、III 的接地面; (f) 所提出天线的接地面

Fig. 2 Radiation patch and feed structure of antenna

(a) Metasurface patch of antenna I; (b) Metasurface patch of antennas II, III and IV; (c) Microstrip feed line of antennas I and II; (d) Microstrip feed line of antennas III and IV; (e) Ground plane of antennas I, II and III; (f) The ground plane of the proposed antenna

图3和图4给出了设计天线和参考天线的反射系数和辐射增益。如图3(a)所示,天线 I 在 4.56 GHz、5.50 GHz、5.97 GHz、6.10 GHz 和 7.00 GHz 有 5 个谐振点,但 5.50 GHz、5.97 GHz、6.10 GHz 三个频率匹配较差。为了改善天线的匹配,将 3×3 超表面继续切割成更小的单元,由于各贴片单元之间的电容耦合,使得天线的阻抗匹配得到很好地改善,如图 3(a)所示,天线工作在 5.22 GHz~6.4 GHz,相对带宽达到 20.3%,天线

的阻抗带宽得以展宽。

为了提高天线选择性,在天线馈线上加载了一对 SIR,通过调节谐振器的阻抗比和长度比,使其在谐振在 4.2 GHz 和 7.2 GHz 附近,从而在天线通带的两侧分别产生一个辐射零点,如图 4 所示。而且 SIR 结构的引入,在 6.8 GHz 附近激励起新的谐振^[17],展宽了天线的带宽,使得天线工作在 4.97 GHz~6.91 GHz,相对带宽达到了 32.5%。

如图 4 所示,天线的下边带的带外抑制效果不是很好,仅为 7 dB,为了进一步改善下边带的带外抑制,在接地面上刻蚀了四个中心对称的 U 型缺地陷结构,通过调节缺地陷结构尺寸,在天线的下边带引入一个新的辐射零点,使得下边带附近产生两个辐射零点,有效地改善了下边带的选择性,带外抑制达到 14 dB。而且缺地陷结构的引入还能对天线起到阻抗改善的作用,使得天线能够工作在 4.93 GHz~6.88 GHz,带宽达到 33.1%。

2 参数分析

通过分析天线各参数对反射系数和天线增益的影响,发现顶层超表面贴片之间的缝隙 W_{s1} 、内侧贴片切割的方式是影响天线阻抗匹配的主要因素。阶跃阻抗谐振器的长度和 U 型 DGS 缺陷地的长度是影响天线辐射零点的主要因素。分析某个参数的影响时,其他参数保持不变。

图 5 给出了超表面贴片之间的间隔 W_{s1} 对

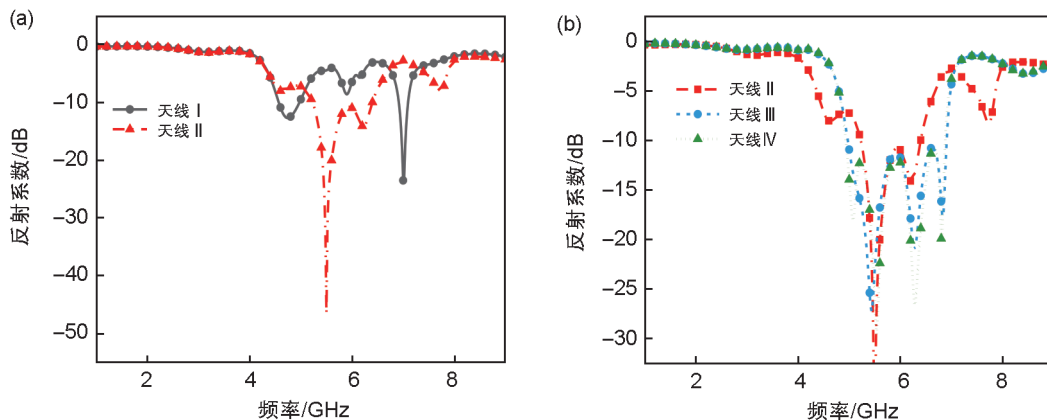


图3 反射系数仿真结果对比

(a) 天线 I、II 的反射系数, (b) 天线 II、III、IV 的反射系数

Fig. 3 Comparison of simulation results of reflection coefficient

(a) reflection coefficients of antennas I and II, (b) reflection coefficients of antennas II, III and IV

天线的影 响。从图中可以看出,随着 W_{S1} 的增大,通带高频段的匹配较好,随着 W_{S1} 的减小,通带低频段的匹配较好,只有 $W_{S1}=0.7$ mm 时,整个通带内的匹配都比较好。而且 W_{S1} 的改变主要影响第二个谐振点的频率,随着 W_{S1} 的增大,第二谐振点向高频移动。

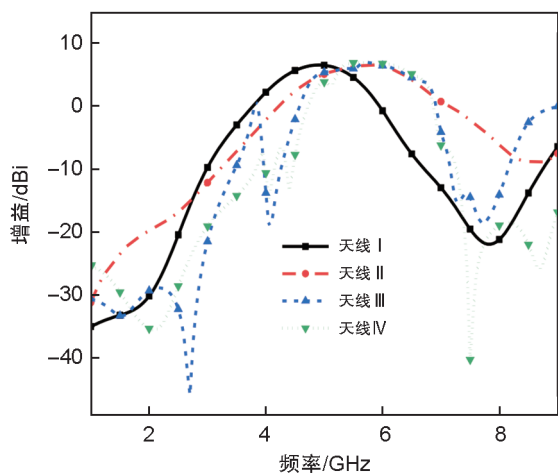


图4 不同结构下的增益曲线

Fig. 4 Realized gain responses at different structures

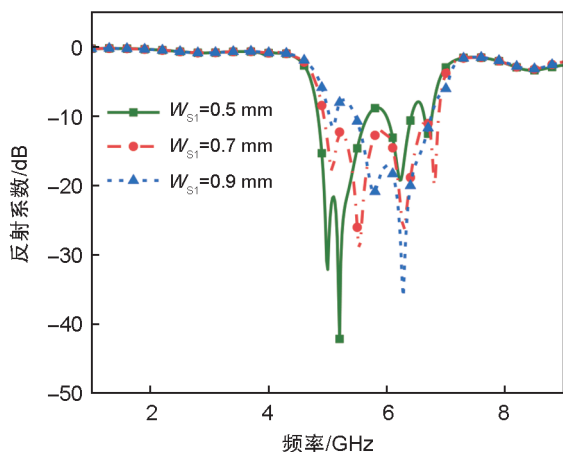


图5 不同 W_{S1} 下的反射系数

Fig. 5 The reflection coefficient with different W_{S1}

图6给出了内侧贴片切割方式改变对天线性能的影响。 $n=0$ 表示内侧贴片未进行切割, $n=1$ 表示按照1:2的比例切割、 $n=2$ 表示按照1:1:1三等分切割。从图中可以看出,只有 $n=1$ 时,能够改善低频段的匹配,同时通带内的第4个谐振点匹配最佳。

图7给出了U型缺地陷结构中长度 L_{a3} 对辐射零点的影响。从图中可以看出,通过 L_{a3} 长度的增加,辐射零点逐渐向低频移动,而由SIR阶

跃谐振器产生的4.06 GHz和7.5 GHz处辐射点基本不变。

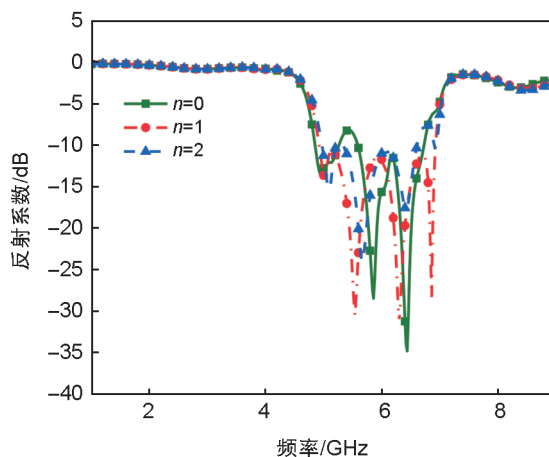


图6 不同切割方式下的反射系数

Fig. 6 The reflection coefficient with different dividing methods

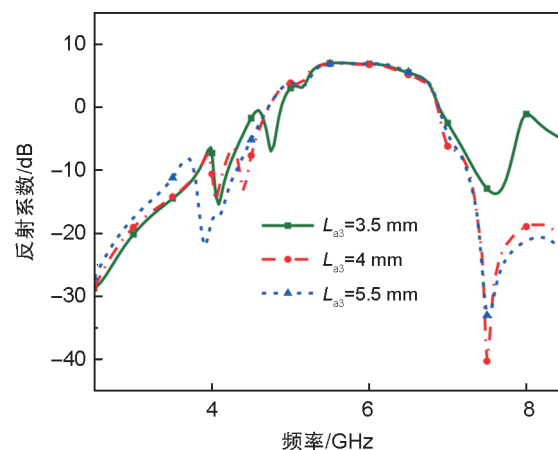


图7 L_{a3} 对辐射零点的影响

Fig. 7 The influence of L_{a3} on radiation null

图8给出了SIR结构中长度 L_4 变化对辐射零点的影响。随着 L_4 增加,上下边带外的辐射零点都向低频移动,而由DGS产生的4.4 GHz处辐射零点基本保持不变。所以两个结构可以独立调节辐射零点的位置。

3 仿真结果

图9给出了天线仿真的反射系数与增益。从图中可以看出,天线工作在4.93 GHz~6.88 GHz,相对带宽达到33.1%;天线的最大增益达到了6.94 dBi,在4.06 GHz、4.4 GHz、7.5 GHz、8.75 GHz处产生了辐射零点,8.75 GHz处的辐射零点由馈线结构产生^[18],下边带带外抑制达到14 dB,上边带带外抑制达到27 dB。

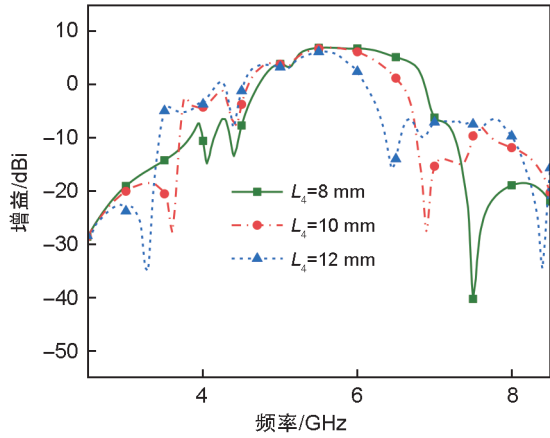


图8 L_4 对辐射零点的影响

Fig. 8 The influence of L_4 on radiation null

图10给出了天线通带内四个谐振点的归一化辐射方向图。从图中可以看出每个谐振点E面和H面在最大辐射方向上主极化与交叉极化相差30 dB以上;在6.28 GHz和6.82 GHz,出现了E面偏转和背向辐射增大,出现这种情况是由于超表面上电流主要集中在贴片的外侧而不是辐射贴片的正中心,使得E面方向图发生了偏转。而且由于在馈线上加载了SIR结构后引入

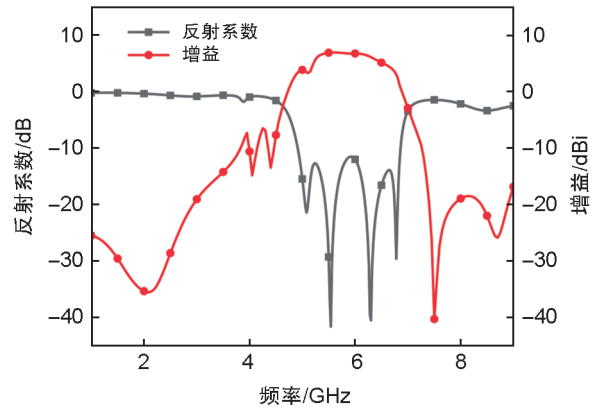


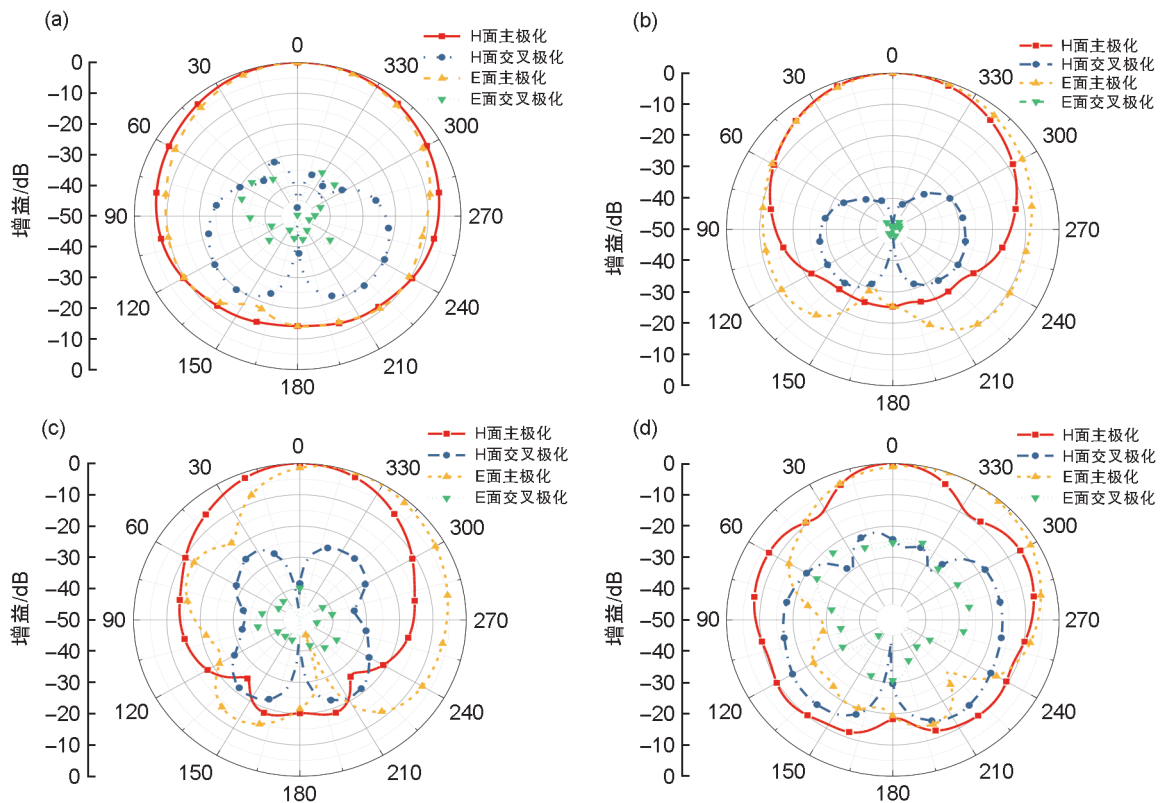
图9 设计天线的反射系数与增益

Fig. 9 The reflection coefficient and gain of proposed antenna

了高频处的谐振点展宽了频带,所以有部分能量集中在馈线上,导致了6.82 GHz的辐射方向图后瓣增大,而主辐射方向上的增益有所减小。

4 结论

本文设计了一种基于超表面的宽带滤波天线。通过对顶层的超表面结构进行切割和馈线上加载SIR结构,在通带内引入了新的谐振点,



(a) 5.1 GHz, (b) 5.52 GHz, (c) 6.28 GHz, (d) 6.82 GHz

图10 辐射方向图

Fig. 10 The directional radiation patterns

改善了阻抗带宽,使得天线带宽达到了33.1%。仿真结论表明:设计的滤波天线工作在4.93 GHz~6.88 GHz;天线的最大增益达到了6.94 dBi,在上下边带各引入了一个辐射零点,提高了选择性。

参考文献:

- [1] MAO C X, ZHANG Y, ZHANG X Y, *et al.* Filtering Antennas: Design Methods and Recent Developments[J]. *IEEE Microw Mag*, 2021, **22**(11): 52–63. DOI: 10.1109/MMM.2021.3102199.
- [2] DHWAJ K, TIAN H Z, ITOH T. Low-profile Dual-band Filtering Antenna Using Common Planar Cavity[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, **17**(6): 1081–1084. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2832631.
- [3] LIN X J, XIE Z M, ZHANG P S, *et al.* A Broadband Filtering Duplex Patch Antenna with High Isolation[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2017, **16**: 1937–1940. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2689324.
- [4] XIANG K R, CHEN F C, TAN Q, *et al.* Design of Novel Printed Filtering Dipole Antennas[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2021, **69**(5): 2537–2545. DOI: 10.1109/TAP.2020.3030983.
- [5] CHEN C L. A Wideband Coplanar L-probe-fed Slot-loaded Rectangular Filtering Microstrip Patch Antenna with High Selectivity[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2022, **21**(6): 1134–1138. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3159230.
- [6] LI L, WU S X, PANG D, *et al.* A Fifth-order Single-layer Dual-band Half-mode SIW Filtering Antenna with a Multifunctional Single Slot[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, **20**(9): 1676–1680. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3093062.
- [7] TIAN M, YAN N N, LUO Y, *et al.* A Low-cost High-gain Filtering Patch Antenna Using SISL Technology for 5G Application[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, **20**(12): 2270–2274. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3106908.
- [8] WANG T, YAN N, YIAN M, *et al.* A Low-Cost High-Gain Filtering Patch Antenna With Enhanced Frequency Selectivity Based on SISL for 5G Application[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2022, **21**(9): 1772–1776. DOI:10.1109/LAWP.2021.3106908.
- [9] LI Y P, ZHAO Z P, TANG Z Y, *et al.* Differentially Fed, Dual-band Dual-polarized Filtering Antenna with High Selectivity for 5G Sub-6 GHz Base Station Applications [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2020, **68**(4): 3231–3236. DOI: 10.1109/TAP.2019.2957720.
- [10] LIU Y H, GUO X J, GU S, *et al.* Zero Index Metamaterial for Designing High-gain Patch Antenna[J]. *Int J Antennas Propag*, 2013, **2013**: 1–12. DOI: 10.1155/2013/215681.
- [11] DE DIEU NTAWANGAHEZA J, SUN L G, LI Y J, *et al.* A Single-layer Planar Low-profile Wideband Microstrip Line-fed Metasurface Antenna[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, **20**(9): 1641–1645. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3092016.
- [12] PAN Y M, HU P F, ZHANG X Y, *et al.* A Low-profile High-gain and Wideband Filtering Antenna with Metasurface[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2016, **64**(5): 2010–2016. DOI: 10.1109/TAP.2016.2535498.
- [13] LIU S H, YANG D Q, CHEN Y P, *et al.* Low-profile Broadband Metasurface Antenna under Multimode Resonance[J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2021, **20**(9): 1696–1700. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3094302.
- [14] DING C, DONG J, MO J J. A Low-profile Broadband Polarization Conversion Antenna Using Metasurface[C]// 2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). New York: IEEE, 2020: 1–3. DOI: 10.1109/IWS49314.2020.9359983.
- [15] EL YOUSFI A, LAMKADDEM A, ABDALMALAK K A, *et al.* A Broadband Circularly Polarized Single-layer Metasurface Antenna Using Characteristic-mode Analysis[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2023, **71**(4): 3114–3122. DOI: 10.1109/TAP.2023.3239104.
- [16] YANG W C, CHEN S, XUE Q, *et al.* Novel Filtering Method Based on Metasurface Antenna and Its Application for Wideband High-gain Filtering Antenna with Low Profile[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2019, **67**(3): 1535–1544. DOI: 10.1109/TAP.2018.2889028.
- [17] NIE N, TU Z H. Wideband Filtering Dumbbell-shaped Slot Antenna with Improved Frequency Selectivity for both Band-edges[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 121479–121485. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3006243.
- [18] HU P F, PAN Y M, ZHANG X Y, *et al.* A Compact Filtering Dielectric Resonator Antenna with Wide Bandwidth and High Gain[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2016, **64**(8): 3645–3651. DOI: 10.1109/TAP.2016.2565733.