



·高功率微波技术·

一种辐射零点可控的紧凑型滤波贴片天线*

马敬伟, 周东方, 张毅, 吕大龙

(中国人民解放军战略支援部队信息工程大学, 郑州 450001)

摘 要: 提出了一种辐射零点可控的紧凑型滤波贴片天线。该滤波天线以基本的微带贴片天线为原型, 主要由一个简单的金属辐射贴片和两个对称的分割形槽组成。两个分割形槽蚀刻在金属贴片上, 使得高/低频段分别产生两个宽边辐射零点, 从而引入滤波选频功能。该结构未引入额外滤波电路和其他寄生单元, 节省了空间尺寸, 结构更加紧凑; 两个辐射零点独立可控, 提高了设计的灵活性。且在实现滤波选频功能的同时, 对天线增益的影响很小。利用 HFSS 仿真软件优化滤波天线结构, 制作了一个实物模型并进行了测试。测试结果与仿真结果基本一致。测试结果表明, 提出的滤波天线工作在 2.40 GHz, 两个独立可控的辐射零点分别位于 1.96 GHz 和 2.66 GHz, 平均实际增益约为 7.0 dBi, 带外抑制水平超过 39 dB。

关键词: 滤波天线; 微带贴片; 辐射零点; 带外抑制; 辐射零点可控

中图分类号: TN822

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220278

A compact filtering patch antenna with independent controllable radiation nulls

Ma Jingwei, Zhou Dongfang, Zhang Yi, Lü Dalong

(PLA Strategic Support Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper presents a compact filtering patch antenna with independent controllable radiation nulls. The antenna is principally composed of a simple radiation patch antenna and two split-shaped slots. Taking the basic microstrip patch antenna as the prototype, the filtering and frequency selection function is generated by adding the segmenting slot. Two broadside radiation nulls are generated by two slots in the upper/lower band respectively. According to the circuit structure, HFSS simulation software is used to optimize the structure and adjust the feeding position, and the filtering function is obtained. Without using additional filtering circuits, this design method saves space size and reduces the loss of antenna gain. For demonstration, a prototype is fabricated and tested. The simulation results agree well with the measured ones: the proposed microstrip patch filter antenna operates at 2.40 GHz; there are two radiation nulls at 1.96 and 2.66 GHz at two band-edges of the boresight gain response for improving skirt selectivity; at the same time, the frequency of the two radiation nulls can be controlled independently by controlling the length of the two split slots, increasing the flexibility of the design; the average realized gain of this filtering antenna is about 7.0 dBi and the out-of-band suppression level is more than 39 dB.

Key words: filtering antenna, microstrip patch, radiation nulls, out-of-band suppression, controllable radiation nulls

由于现代无线技术的迅速发展, 要求射频器件的小型化和集成化。作为通信网络的主要部分, 天线和滤波器是不可缺少的器件^[1-3], 它们通常被设计成两个独立的元件, 并通过额外的传输线进行级联。这种方法降低了天线的辐射性能并导致额外的尺寸消耗。在过去的几年中, 将天线和滤波器综合设计成一个滤波天线^[4-7]模块来解决辐射损耗和尺寸消耗问题, 滤波天线同时实现了天线的辐射功能和微波滤波器的频率选择功能。这种综合设计的方法相比于传统的级联设计, 实现了小型化、集成化和低辐射损耗^[8-10]。由于微带天线具有尺寸小、易集成、成本低的优势, 所以以微带天线为基本原型的滤波天线结构越来越多, 改进馈电结构, 通过多层微带结构设计滤波天线

* 收稿日期: 2022-09-02; 修订日期: 2022-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61871405)

联系方式: 马敬伟, 546310700@qq.com。

通信作者: 周东方, 13598028188@139.com。

可以获得平整的通带和较低的增益损耗^[11-12],但结构复杂,谐振器相互之间干扰较大。通过在微带天线上刻蚀槽线,通过短路柱等寄生单元的引入设计滤波天线可以减小尺寸^[13-15],但辐射零点受寄生单元影响,难以实现独立可控调节^[15],拥有独立可控的辐射零点的天线可以根据适用环境调节参数,得到期望的滤波响应。所以,设计一款辐射零点可控的紧凑型微带滤波贴片天线是有一定的应用前景。本文提出了辐射零点可控的紧凑型微带滤波贴片天线,该天线是以微带贴片天线为原型,属于平面天线。在不引入额外设计结构的情况下,天线的滤波功能是由两个不同长度的分割形槽实现的,且分别调节分割形槽的尺寸,可以独立控制两个辐射零点的位置。因此,本文提出的滤波天线具备结构紧凑及设计灵活的优势。

1 滤波天线设计与分析

1.1 滤波天线演化过程

所设计的滤波天线的演化过程如图1所示,基础贴片天线被命名为天线I。在天线I中的贴片上蚀刻U型槽从而形成天线II,通过加载U型槽可以产生一个宽边辐射零点^[13]。为了保持优良的带外抑制水平和更好的带内阻抗匹配,在天线III中设计了分割形槽代替U型槽。天线I、II和III的对比仿真结果如图2所示,在最佳匹配点,最大的宽边实际增益达到7.5 dBi。与U型槽相比,分割形槽在低频带边缘提供了更深的辐射零点,对低频带具有很好的抑制特性。此外,阻抗带宽也得到了改善。

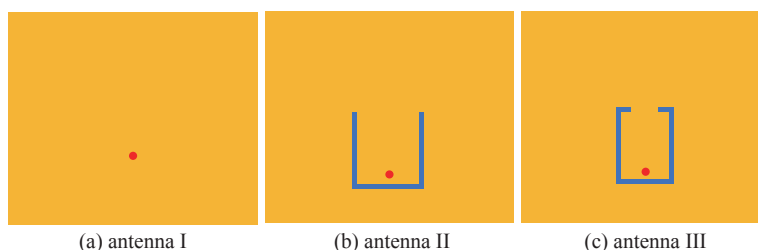


Fig. 1 Top view of the evolution process

图1 演变过程的俯视图

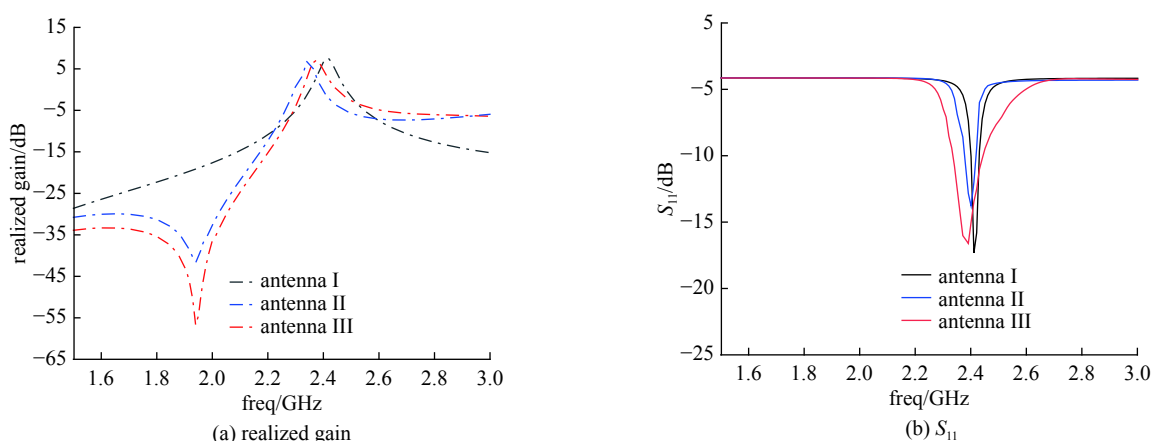


Fig. 2 Simulated results of the designed antennas I, II and III

图2 天线I, II, III的仿真结果

1.2 辐射零点原理分析

图3展示了天线II和天线III在零点频率处的电流分布。在该频点,电流主要集中在馈电点周围以及槽线的边缘,而微带贴片表面的电流很弱,天线的辐射效率很小。同时可以观察到在槽线的两侧,电流方向相反,电流强度基本一致,形成了电流的对消,进一步减弱了贴片表面可以被激励的电流强度,所以在这个频率产生了辐射零点。观察图3中电流对消的强度,天线III增加了一个y轴的电流对消的方向,使得分割形槽的表面电流对消比U型槽更强,所以分割形槽的设计可以产生更为陡峭的低频辐射零深。且从图2的实际增益对比中可以看出,天线III在分割形槽的作用下,在下边带处产生一个更深的辐射零点,较天线II增加了约-20 dB的抑制,更加有效的抑制了低频段的辐射。此外,分割槽的引入对贴片天线产生的增益损耗很小,约为0.18 dB。为了产生带通滤波辐射效果,再次利用分割形槽在上边带制造另一个辐射零点。与此同时要适当调整馈电位置,保证天线的辐射性能

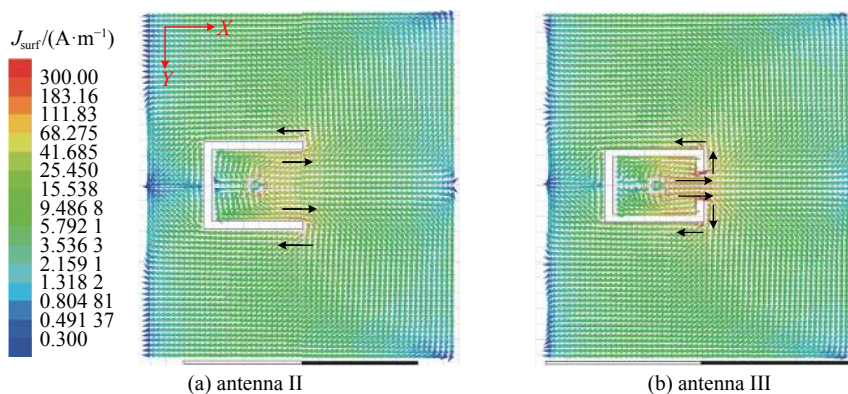


Fig. 3 Electric current distributions

图3 零点频率时电流分布

不受影响。

1.3 滤波天线模型设计

基于上述设计考虑,滤波贴片天线通过 Rogers RT5880 基片来设计实现,该基片的相对介电常数为 2.2,厚度为 1.5 mm,该天线属于金属贴片天线,在介质板的下表面印刷金属地,上表面的印刷电路为天线辐射结构。该结构包括:工作在高/低频段的不同长度的分割形槽线,金属辐射贴片。所提出的滤波天线是对称结构,工作频率为 2.4 GHz。为了达到一个紧凑的尺寸,矩形贴片由一个 50 Ω 的 SMA 连接器进行馈电。图 4 给出了滤波天线结构的俯视图。提出的滤波天线的尺寸相关参数为 $g=75$ mm, $l_p=39.2$ mm, $w_p=44.3$ mm, $l_1=16.5$ mm, $l_2=10.5$ mm, $l_3=2.5$ mm, $l_4=13$ mm, $l_5=1.7$ mm, $l_6=0.9$ mm, $l_d=1$ mm, $l_x=11.5$ mm。图 5 为滤波天线的实物模型图。

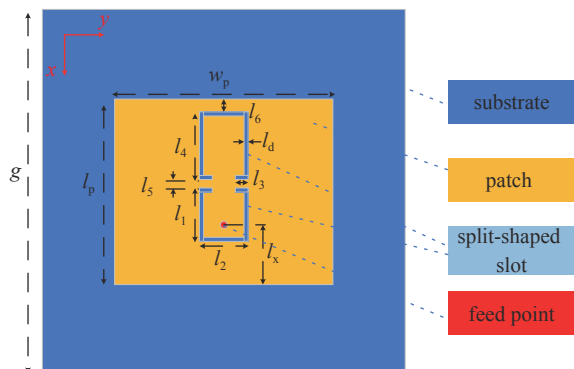


Fig. 4 Top view of the proposed filtering antenna

图4 所提出的滤波天线的俯视图

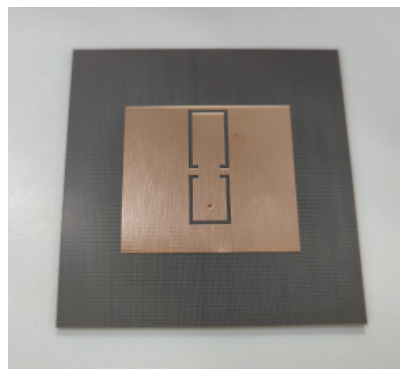


Fig. 5 Photograph of the proposed filtering antenna prototype

图5 所提出的滤波天线的实物模型图

因为辐射零点是由槽线长度独立控制的。根据相对介电常数和辐射零点频率,槽线的总长度大约等于辐射零点频率的半波长。如图 6 所示,两个槽线的长度可以独立调整以实现一侧辐射零点的位置变化。 l_1 的长度控制着低频辐射零点的频点位置, l_1 的长度增加,频点向低频方向移动。 l_4 的长度控制着高频辐射零点的频点位置, l_4 的长度增加,频点向低频方向移动。当一侧的辐射零点被单独控制时,另一侧的零点变化非常小,实现了对辐射零点的单独控制。

如图 7 所示,在工作频率($f_0=2.4$ GHz)实现了 7.4 dBi 的实际增益。此外,在下边带辐射零点频率($f_{n1}=1.96$ GHz)实现了 -59.6 dBi 的零深,在上边带辐射零点频率($f_{n2}=2.66$ GHz)实现了 -39.5 dBi 的零深,更深的辐射零点深度提升了滤波天线的阻带抑制。

2 实验验证

根据提出的滤波天线结构,设计了一个工作在 2.4 GHz 的滤波贴片天线实物模型来验证仿真结果的正确性。一个尺寸为 $0.89\lambda_0 \times 0.89\lambda_0 \times 0.018\lambda_0$ (75 mm×75 mm×1.5 mm) 的 2.4 GHz 滤波天线模型如图 5 所示。反射系数(S_{11})用安捷伦网络分析仪进行测试,天线的实际增益和辐射模式是在微波暗室中测量的。仿真和测量结果的分析如图 7 所示。天线的最大增益为 7.1 dBi,在 1.99 和 2.67 GHz,观察到两个较深的辐射零点,实现了滤波天线优异的边

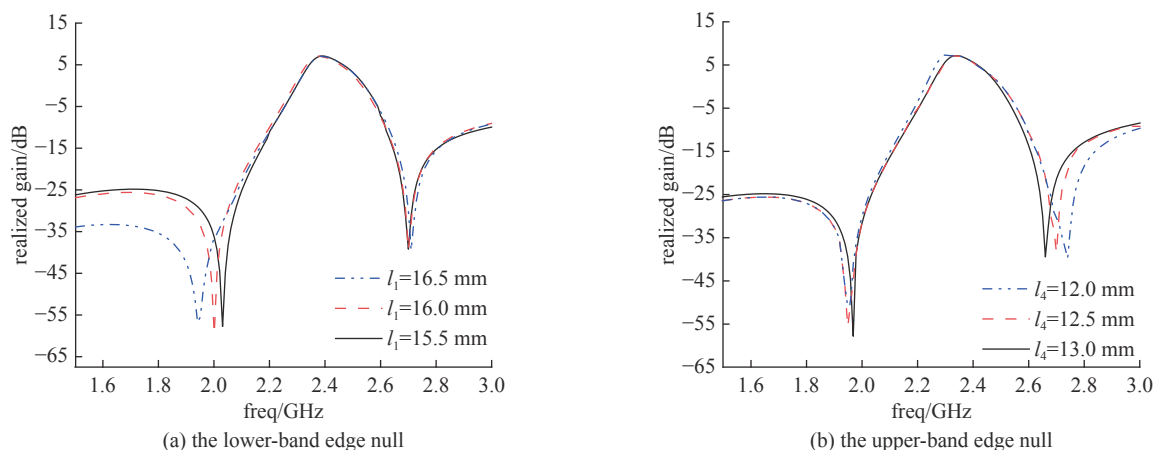


Fig. 6 Independent controllable radiation nulls of the filter antenna

图 6 滤波天线的独立可控辐射零点

带特性。所提出的滤波天线在 2.4 GHz 的 $E(xOz)$ 和 $H(yOz)$ 平面的共极化和交叉极化的辐射方向图如图 8 所示。

所测得的 E 面和 H 面的共极化场比相应的交叉极化场至少强 22 dB。由于天线的加工误差和测量系统的测量误差,实物模型测试结果和仿真结果之间有轻微的差异,但总体结果是一致的,尤其是交叉极化结果即使相对存在一定差异,但也仅是因为材料加工、测试环境等因素,对天线性能响应影响不大。为了进一步证明所提出滤波天线的优良性能,在表 1 中与其他报道的滤波贴片天线进行了性能参数比对。

对比的贴片天线通过加载槽线或其他寄生单元实现滤波功能,在文献 [13] 中,提出了一种不嵌入外部滤波电路的滤波天线。通过在贴片上蚀刻 U 形槽,产生了一个宽边辐射零点。为了引入另一边带的辐射零点,引入了三个短路探针,但这种方式增加了设计的复杂性,造成额外的冗余。同时该设计加载了两层贴片,导致多层结构复杂,增大了天线尺寸,而且不能实现对辐射零点的独立可控。而文献 [15] 通过在贴片上设计倒 F 谐振器实现滤波功能,虽然减小了尺寸消耗,但对增益的影响较大,并且依旧不能灵活控制辐射零点。在文献 [16] 中,4 个槽线被加载到一个简单的微带贴片天线上实现滤波选频功能,结构紧凑,虽然引入了可控的辐射零点但会对天线实际增益造成较大损失,同时,该天线的带外抑制水平不高,滤波效果一般。

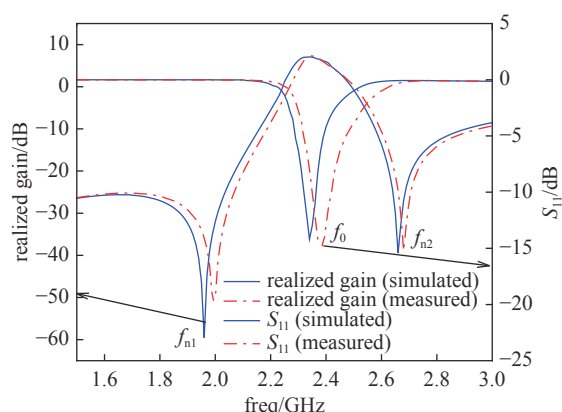


Fig. 7 Simulated/measured results of the proposed filtering antenna

图 7 所提滤波天线的仿真/测量结果

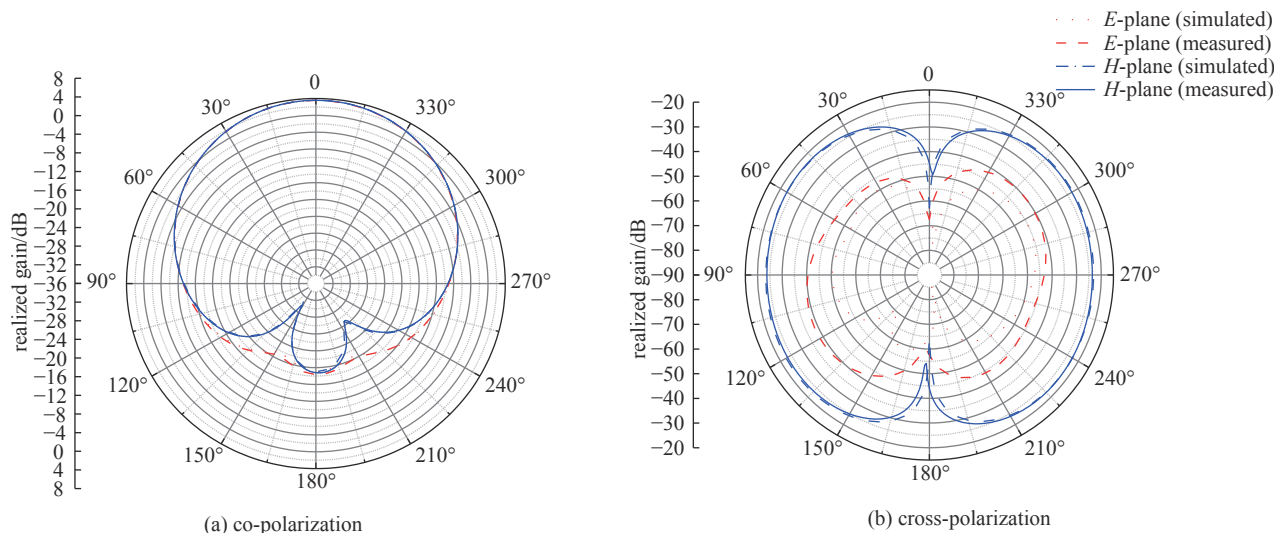


Fig. 8 Simulated and measured radiation patterns of the antenna in E -plane and H -plane at 2.4 GHz

图 8 2.4 GHz 的 $E(xOz)$ 和 $H(yOz)$ 平面的归一化辐射方向图

表 1 与其他报道的宽带滤波天线的性能比较

Table 1 Performance comparison with other reported wideband filtering antennas

	filtering structure	complexity	independent controllable radiation nulls	size	average gain/dB	suppression level/dB
Ref [12]	1 U-shaped slot, 3 shorting pins, 1 stacked patch	complex	0	$1.15\lambda_0 \times 1.15\lambda_0$	9.74	21.5
Ref [14]	1 patch radiator, 1 stub-loaded inverted-F radiator	complex	0	$0.44\lambda_0 \times 0.42\lambda_0$	6.4	16.8
Ref [15]	4 slots	simple	2	$0.7\lambda_0 \times 0.6\lambda_0$	6.6	15.0
our work	two split-shaped slots	simple	2	$0.89\lambda_0 \times 0.89\lambda_0$	7.0	39.0

对比看来,所提出的滤波天线具有更紧凑的滤波结构,在实现辐射零点独立可控的同时可以保证约 7.0 dBi 的增益和超过 39 dB 的带外抑制水平,因此,本文提出的滤波天线更具实际应用价值。

3 结 论

本文设计了一种微带滤波贴片天线,同时实现了滤波选频功能和天线辐射功能。此外,还提出了一种结构紧凑,不需要额外寄生单元的滤波结构,提高了滤波天线的集成度。通过调整所设计的分割形槽长度,两个辐射零点实现独立可控,增加了滤波选频功能设计的自由度,同时滤波结构对天线辐射的损耗也很小。2.4 GHz 的滤波贴片天线实现了 7.0 dBi 的平均增益,与其他已有研究工作相比,不仅具有结构紧凑和选频功能的优势,还保证了天线较好的带外抑制。总的来说,提出的滤波天线在简单的设计下实现了辐射零点可控的选频功能,具有较好的设计灵活度。

参考文献:

- [1] 张焱. 滤波器与天线的协同融合设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 3-21. (Zhang Yao. Research on integrated design method of filter and antenna[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 3-21)
- [2] 胡鹏飞. 滤波天线融合设计技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 5-13. (Hu Pengfei. Investigations on the fusion design of filtering antennas[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 5-13)
- [3] 陈佩瑶. 基于耦合贴片阵列的滤波天线设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 2-10. (Chen Peiyao. Design of filter antennas based on the coupled patch array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 2-10)
- [4] Yang Li, Cheong P, Han Liang, et al. Miniaturized parallel coupled-line filter-antenna with spurious response suppression[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 726-729.
- [5] Mao Chunxu, Zhang Yao, Zhang Xiuyin, et al. Filtering antennas: design methods and recent developments[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2021, 22(11): 52-63.
- [6] 王鹏飞, 张海福, 朱海波. 一种应用于 2.4 GHz 的宽带差分微带滤波天线[J]. *无线电通信技术*, 2020, 46(4): 471-474. (Wang Pengfei, Zhang Haifu, Zhu Haibo. A wideband differential-fed microstrip filtering patch antenna working at 2.4 GHz[J]. *Radio Communications Technology*, 2020, 46(4): 471-474)
- [7] Sun Wei, Liu Shuxuan, Zhu Xu, et al. A novel 1.05 GHz to 1.25 GHz filtering antenna feeding network with reconfigurable frequency and polarization[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(1): 156-166.
- [8] Chen Chunling. A compact wideband filtering omnidirectional dipole antenna without extra circuits[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 1729-1739.
- [9] Cao Yunfei, Zhang Xiuyin, Xue Quan. Compact shared-aperture dual-band dual-polarized array using filtering slot antenna and dual-function metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(2): 1120-1131.
- [10] Zhang Yingqi, Yang Wanchen, Xue Quan, et al. Broadband dual-polarized differential-fed filtering antenna array for 5G millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(3): 1989-1998.
- [11] Hu Pengfei, Pan Yongmei, Zhang Xiuyin, et al. A filtering patch antenna with reconfigurable frequency and bandwidth using F-shaped probe[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(1): 121-130.
- [12] Chuang Chaotang, Chung S J. Synthesis and design of a new printed filtering antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(3): 1036-1042.
- [13] Zhang Xiuyin, Duan Wen, Pan Yongmei. High-gain filtering patch antenna without extra circuit[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(12): 5883-5888.
- [14] Yang Wanchen, Zhang Yingqi, Chen Wenquan, et al. A simple, compact filtering patch antenna based on mode analysis with wide out-of-band suppression[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(10): 6244-6253.
- [15] Li Mei, Tian Sijie, Tang Mingchun, et al. A compact low-profile hybrid-mode patch antenna with intrinsically combined self-decoupling and filtering properties[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(2): 1511-1516.
- [16] Jin Junye, Liao Shaowei, Xue Quan. Design of filtering-radiating patch antennas with tunable radiation nulls for high selectivity[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(4): 2125-2130.