

一种结构简单的滤波短路贴片天线

向磊¹, 李梦洁^{1*}, 肖如奇¹, 黄奕², 杨国¹, 齐世山¹

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京

²陆军装备部驻南京地区第四军事代表室, 江苏 南京

Email: *limengjie@njust.edu.cn

收稿日期: 2021年3月6日; 录用日期: 2021年4月6日; 发布日期: 2021年4月16日

摘要

微带天线广泛应用于军事和民用领域, 将滤波功能集成到该类天线中, 实现带外信号抑制的同时可有效减小射频前端的总体尺寸。本文在微带贴片天线的基础上, 设计了一种结构简单的滤波短路贴片天线。该天线由一个刻有J形缝隙的短路辐射贴片和一个短路寄生贴片组成。J形缝隙与寄生贴片分别在低/高频带引入辐射零点, 以实现天线的滤波响应。测试结果表明, 该天线的阻抗带宽3.7% (4.76~4.94 GHz), 带内增益约5.0 dBi, E面半功率波束宽度约100°, 带外辐射抑制大于12.6 dB。

关键词

滤波天线, 短路贴片天线, 辐射零点, 微带天线, 寄生贴片

A Simple Filtering Shorted-Patch Antenna

Lei Xiang¹, Mengjie Li^{1*}, Ruqi Xiao¹, Yi Huang², Guo Yang¹, Shishan Qi¹

¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu

²Representative Office in Nanjing District of PLA Army Equipment Department, Nanjing Jiangsu

Email: *limengjie@njust.edu.cn

Received: Mar. 6th, 2021; accepted: Apr. 6th, 2021; published: Apr. 16th, 2021

Abstract

Microstrip antennas are widely used in military and civilian fields, the filtering function is integrated into this type of antenna, which can achieve out-of-band signal suppression and effectively reduce the overall size of the RF front-end. In this paper, a simple filtering shorted-patch antenna based on the microstrip patch antenna is designed. The antenna consists of a shorted driven patch with J-shaped slots and a shorted parasitic patch. Filtering response is obtained because of the radiation nulls introduced by J-shaped slots and the parasitic patch. Measured results show that

*通讯作者。

the impedance bandwidth of the antenna is 3.7% (4.76~4.94 GHz), the in-band gain is about 5.0 dBi, and the E-plane half-power beamwidth is about 100° , the out-of-band radiation suppression is more than 12.6 dB.

Keywords

Filtering Antenna, Shorted-Patch Antenna, Radiation Null, Microstrip Antenna, Parasitic Patch

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天线和滤波器是射频前端的两个关键部件，将滤波功能集成到天线中得到结构紧凑的滤波天线，可以有效减少射频前端的整体尺寸[1] [2]。微带贴片天线因其低剖面、小尺寸、易加工等特点，在航天器、卫星和导弹以及无线通信等领域有着广泛的应用[3]。故将滤波功能集成到微带贴片天线中吸引了许多学者的研究兴趣[4] [5] [6] [7]。

目前滤波天线的设计方法主要有三种。第一种是将滤波器的最后一级谐振器替代为天线辐射体[8] [9]。第二种是将滤波电路集成到天线的馈电网络中[10] [11]。但是上述两种方法滤波电路占据了较大的尺寸，同时引入了额外的损耗。第三种是引入简单寄生结构，产生带外辐射零点[12] [13]，这种方法避免了滤波电路带来的损耗。如文献[12]在常规微带天线上引入 U 形缝隙、短路过孔、以及层叠贴片产生带外辐射零点，设计了一款高增益滤波贴片天线。文献[13]在辐射贴片上添加共生贴片以及周围添加寄生贴片，设计了一款宽带微带滤波天线。但在这些滤波贴片天线中，寄生结构增大了原始天线的尺寸，且结构较为复杂。

本文基于常规的微带贴片天线，设计了一种新型的结构简单的滤波短路贴片天线。该天线具有良好的带内辐射性能，在带外存在两个辐射零点，带外辐射抑制大于 12.6 dB。

2. 短路贴片天线

2.1. 天线结构

如图 1 所示，短路贴片天线在常规微带贴片天线的基础上演化而来，其中由探针直接激励的贴片为

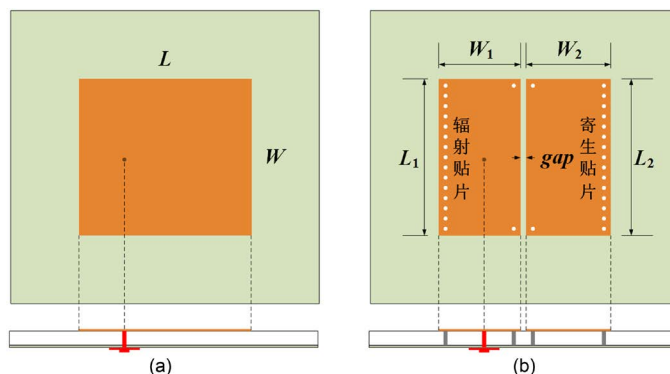


Figure 1. (a) Conventional microstrip patch antenna; (b) Shorted-patch antenna
图 1. (a) 常规微带贴片天线; (b) 短路贴片天线

辐射贴片,右贴片为寄生贴片[14]。辐射贴片的左边缘与寄生贴片的右边缘存在一系列的金属化过孔,起短路作用。为了降低H面的交叉极化,贴片横向边缘增加了4个额外的金属化短路过孔[15]。

2.2. 辐射特性

利用高频电磁仿真软件 HFSS 做仿真设计,常规微带贴片天线与短路贴片天线仿真的反射系数和增益曲线如图2所示。可知,短路贴片天线的阻抗带宽为2.2% (4.87~4.98 GHz, $S_{11} < -10$ dB),略小于常规微带贴片天线的3.4%。但常规微带贴片天线的增益在通带外下降缓慢,没有明显的滤波响应,而短路贴片天线在5.36 GHz处存在一个辐射零点,使得高频带的辐射抑制增强。

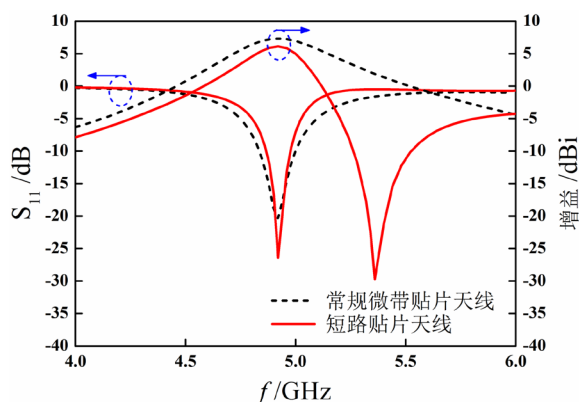


Figure 2. The S_{11} and gain curves of the conventional microstrip patch antenna and shorted-patch antenna
图 2. 常规微带贴片天线与短路贴片天线的反射系数及增益曲线

为了进一步分析短路贴片天线高频带辐射零点的产生机理,图3给出了其在谐振频率4.92 GHz和辐射零点频率5.36 GHz的表面电流矢量分布。在谐振频率4.92 GHz,辐射贴片与寄生贴片上的主要电流方向一致,故表现出良好的辐射特性。而在5.36 GHz,辐射贴片与寄生贴片上的电流方向则相反,导致远场辐射相消,即表现在天线增益曲线上出现一个辐射零点。

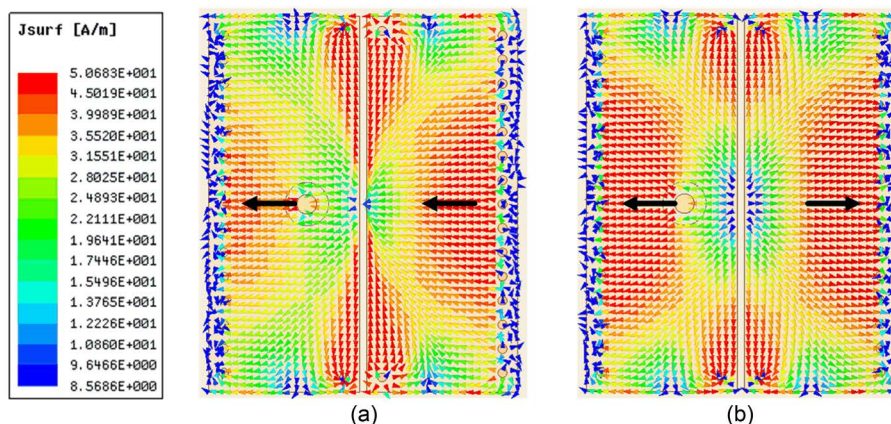


Figure 3. Current distribution on the shorted-patch antenna at. (a)4.92 GHz; (b)5.36 GHz
图 3. 短路贴片天线的表面电流分布。(a) 4.92 GHz; (b) 5.36 GHz

2.3. 参数研究

为了研究寄生贴片的宽度 W_2 对高频带辐射零点的影响,对其进行参数扫描,仿真结果如图4所示。

当宽度 W_2 增加时, 短路贴片天线的谐振频率向低频移动, 同时辐射零点亦向低频移动。与之类似, 改变辐射贴片的长度 L_1 与寄生贴片的长度 L_2 , 可以控制辐射零点的位置, 如图 5 所示。其中为了辐射贴片与寄生贴片更好的耦合, L_1 与 L_2 保持相等。上述参数扫描的结果表明, 选择合适的尺寸参数, 可以获得理想的辐射零点位置及带外辐射抑制水平。

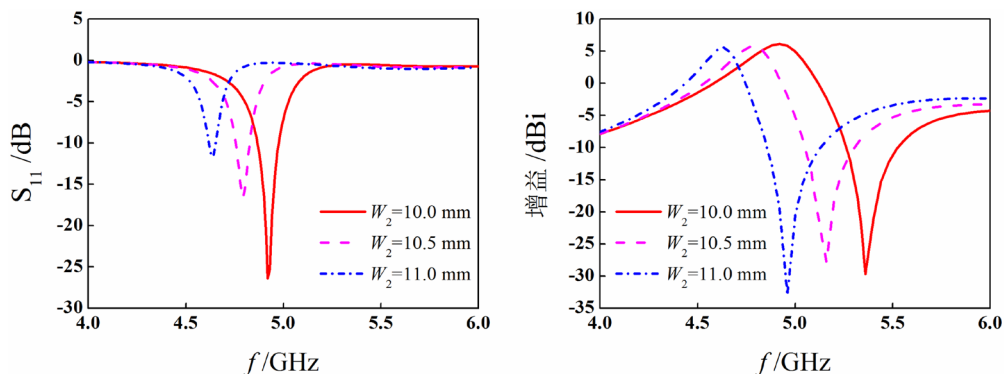


Figure 4. Simulated results of the shorted-patch antenna for different W_2

图 4. 短路贴片天线对参数 W_2 扫描的仿真结果

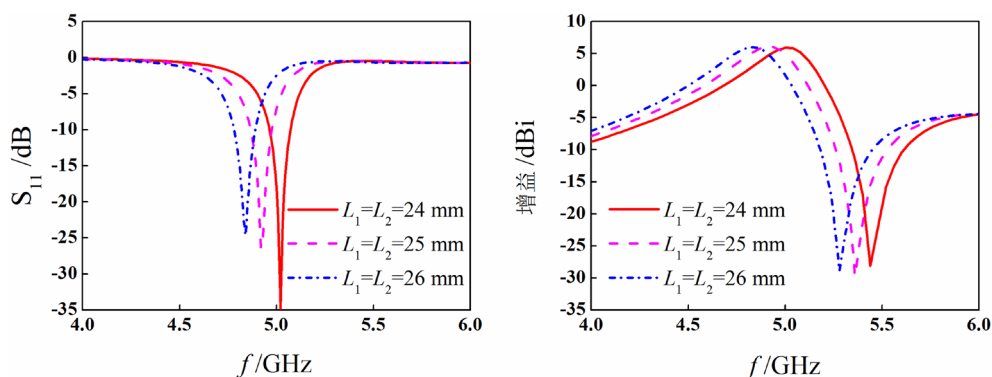


Figure 5. Simulated results of the shorted-patch antenna for different L_1 (L_2)

图 5. 短路贴片天线对参数 L_1 (L_2) 扫描的仿真结果

3. 滤波短路贴片天线

3.1. 天线结构

尽管短路贴片天线在高频带具有强烈的带外辐射抑制, 但其增益曲线在低频带仍然下降缓慢, 故需要进一步的滤波设计以增强它的滤波响应。为了在低频带引入辐射零点, 一对对称的 J 形缝隙被蚀刻到辐射贴片中, 如图 6(a) 所示。其中为了最大化保持天线原有的表面电场分布, J 形缝隙的宽度选择为 0.3 mm。选择弯折的 J 形缝隙, 而不是通常笔直的缝隙, 更多是受制于有限的贴片尺寸。

3.2. 辐射特性

图 6(b) 给出了短路贴片天线加入 J 形缝隙后仿真的反射系数与增益曲线, 可知 J 形缝隙不仅保留了短路贴片天线原有的高频带辐射零点, 同时还在低频带引入了一个新的辐射零点, 有效的增强了短路贴片天线在低频带的辐射抑制。此外, J 形缝隙还在通带内引入了新的谐振模式, 这使得短路贴片天线的带宽增加, 频率选择性提高。仿真结果表明, 滤波短路贴片天线的阻抗带宽为 3.7% (4.75~4.93 GHz), 两个带

内谐振点分别位于 4.8 GHz 以及 4.9 GHz，通带内增益变化平坦，约为 5.7 dBi。通带外两个辐射零点分别位于低频带 4.44 GHz 和高频带 5.04 GHz 处。

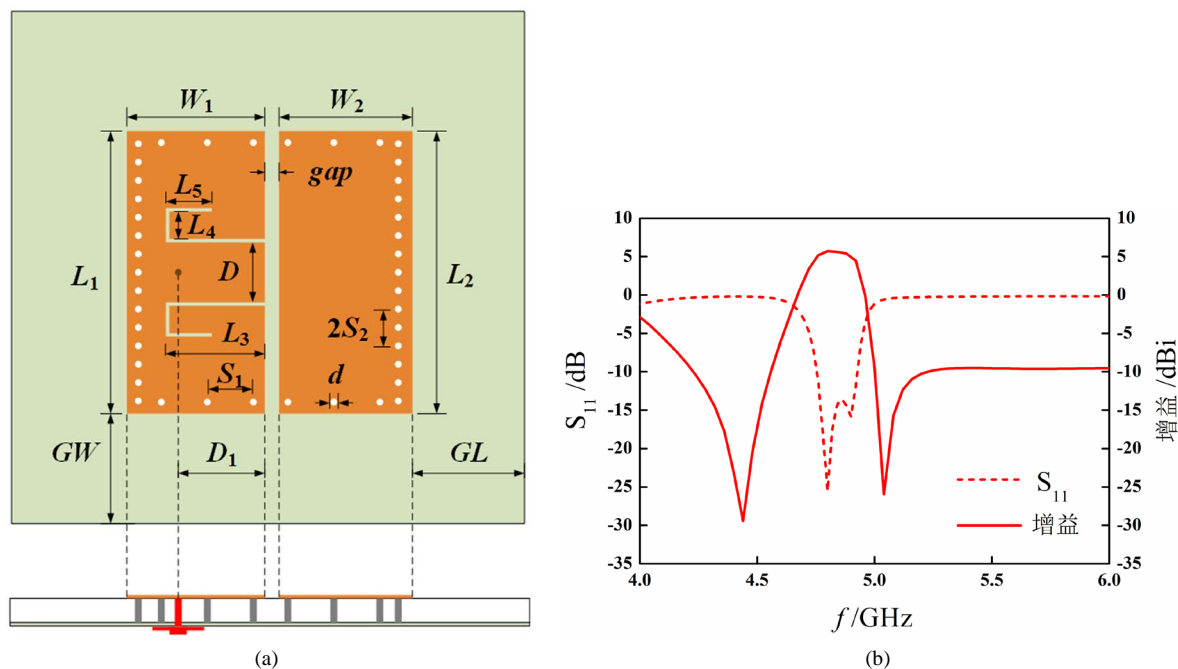


Figure 6. (a) Filtering shorted-patch antenna; (b) The S_{11} and gain curves of the filtering shorted-patch antenna

图 6. (a) 滤波短路贴片天线; (b) 反射系数及增益曲线

为了说明低频带辐射零点的产生机理，图 7 给出了滤波短路贴片天线在谐振频率 4.8 GHz 和辐射零点频率 4.44 GHz 的表面电流矢量分布。如图 7(a) 所示，在谐振频率 4.8 GHz 处，J 形缝隙的外侧电流方向与缝隙之间的电流方向一致，且与寄生贴片上的电流方向相同。这表明对称 J 形缝隙的引入，较好的保留了短路贴片天线原有的带内辐射特性。而在辐射零点频率 4.44 GHz 处，由图 7(b) 可知，J 形缝隙一方面抑制了辐射贴片对寄生贴片的耦合作用，使得寄生贴片上的表面电流幅度较低，未能形成有效的远场辐射；另一方面在辐射贴片上导致缝隙两侧的电流方向与缝隙之间的电流方向相反，使得远场辐射相消；故最终在天线增益曲线上出现一个辐射零点。

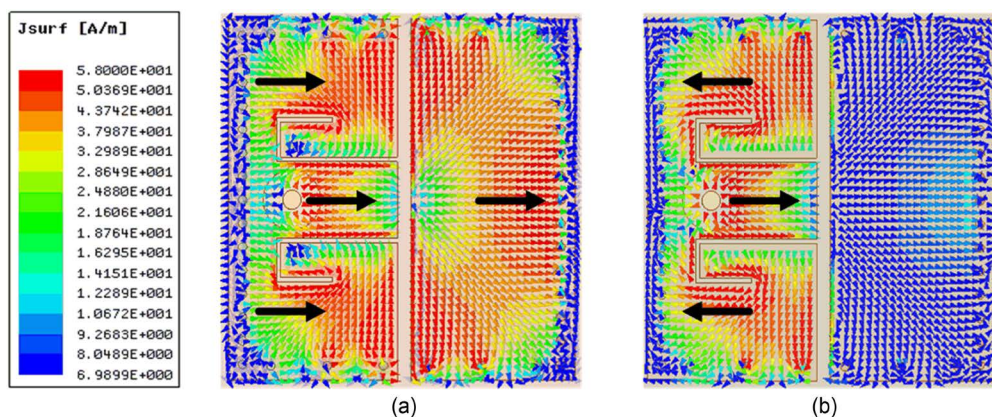


Figure 7. Current distribution on the filtering shorted-patch antenna at: (a) 4.8 GHz; (b) 4.44 GHz

图 7. 滤波短路贴片天线的表面电流分布。(a) 4.8 GHz; (b) 4.44 GHz

3.3. 参数研究

为了进一步研究 J 形缝隙的作用, 改变 J 形缝隙的长度参数 L_5 、以及缝隙间距参数 D , 扫描仿真, 增益变化曲线如图 8 所示。如图 8(a), 当 J 形缝隙的长度参数 L_5 增大时, 低频带辐射零点向低频移动; 而与之相反的是, 当 J 形缝隙彼此间的间距参数 D 增大时, 低频带辐射零点向高频移动, 如图 8(b)。值得注意的是, 无论是改变 J 形缝隙的长度参数 L_5 , 抑或是间距参数 D , 高频带辐射零点的位置并不改变, 这充分表明低频带辐射零点主要是由引入的 J 形缝隙产生。J 形缝隙对低频带辐射零点的多参数独立调控, 使得整个滤波天线的设计具有一定的灵活性。

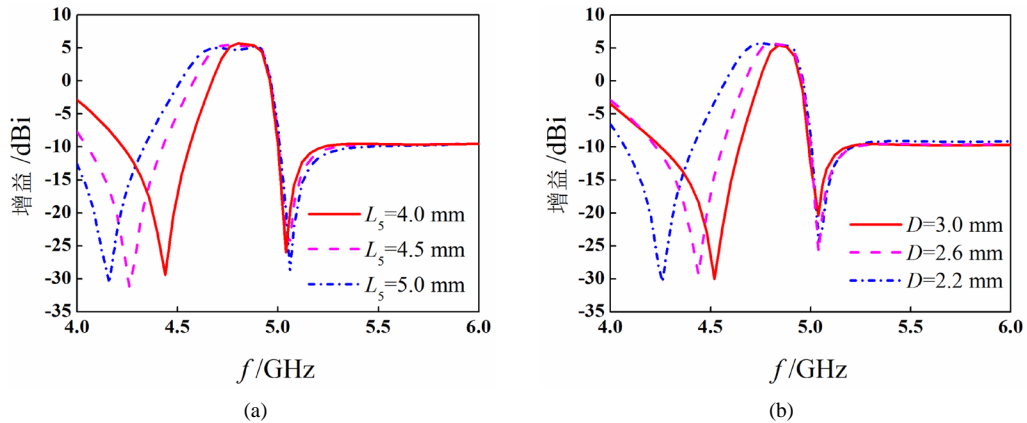


Figure 8. Simulated results of the filtering shorted-patch antenna for different. (a) L_5 ; (b) D
图 8. 滤波短路贴片天线仿真的参数扫描结果。(a) L_5 ; (b) D

4. 实物加工及测试结果

最终, 滤波短路贴片天线的具体尺寸参数如表 1 所示。该天线整体尺寸为 $44.6 \times 44.6 \times 1.524$ mm, 设计在介电常数 3.55 的 Rogers RO4003 介质基板上。图 9 为该滤波天线加工后的实物图。

Table 1. Dimensions of the filtering shorted-patch antenna
表 1. 滤波短路贴片天线的尺寸参数

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	W_1	W_2
数值(mm)	24.6	24.6	8.6	2.4	4.0	12.0	11.6
参数	gap	D	D_1	S_1	S_2	d	GL/GW
数值(mm)	1.0	5.2	7.5	4.0	1.6	0.6	10.0

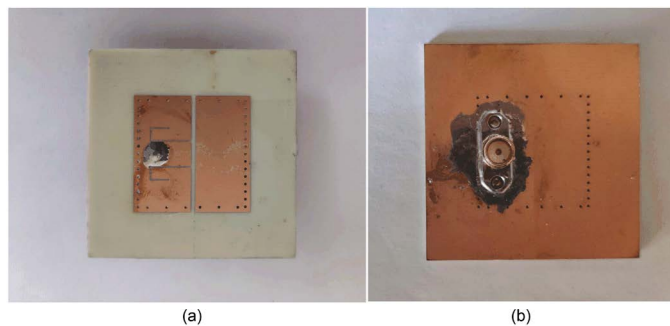


Figure 9. Photographs of the fabricated filtering shorted-patch antenna. (a) Top view; (b) Bottom view
图 9. 滤波短路贴片天线实物图。(a) 顶部视图; (b) 底部视图

图 10 给出了滤波短路贴片天线测试与仿真的反射系数及增益曲线。测试结果表明, 该天线的阻抗带宽为 3.7% (4.76~4.94 GHz), 在谐振频率 4.8 GHz、4.92 GHz 处的增益分别为 5.0 dBi 与 4.7 dBi, 测试的带内增益较仿真结果略有偏低, 可能是加工、焊接、测试误差导致。低频带 4.48 GHz 处与高频带 5.06 GHz 处的两个辐射零点使得该天线具有良好的带外辐射抑制。由图 10(b)可知, 在低频带 4.2~4.64 GHz 频段, 测试的带外增益低于-7.6 dBi; 在高频带 5.02~5.4 GHz 频段, 测试的带外增益低于-10.0 dBi。

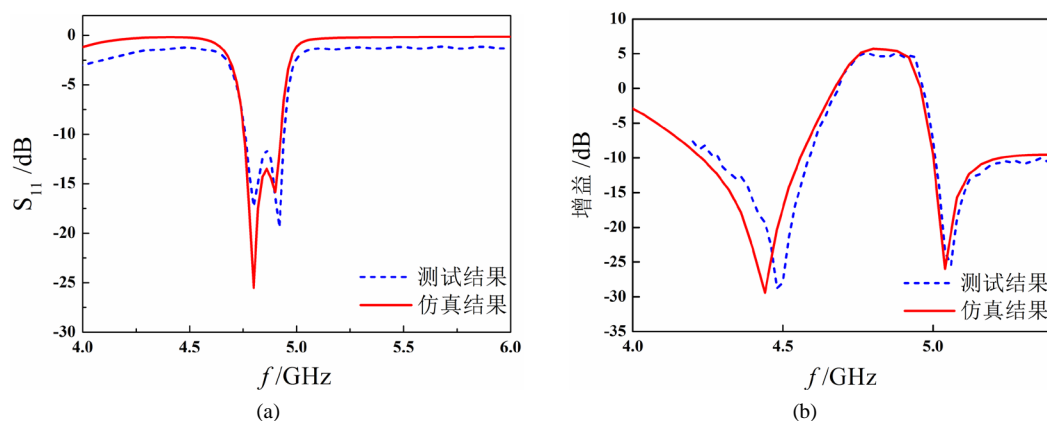


Figure 10. Simulated and measured results of the filtering shorted-patch antenna. (a) Reflection coefficients; (b) Gains
图 10. 滤波短路贴片天线的仿真与测试结果。(a) 反射系数; (b) 增益

图 11 给出了滤波短路贴片天线在 4.8 GHz 测试与仿真的辐射方向图。测试结果表明, 该天线 E/H 面的半功率波束宽度为 99.8°/73.5°, 在对应的波束范围内, 交叉极化抑制大于 17 dB。

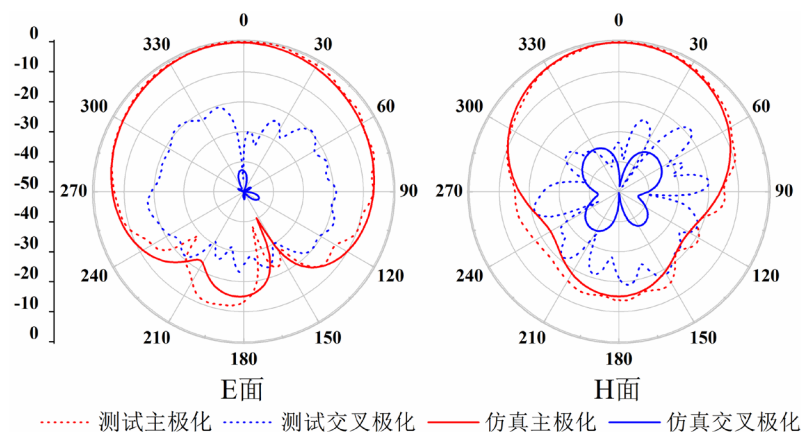


Figure 11. Simulated and measured radiation patterns at 4.8 GHz

图 11. 在 4.8 GHz 仿真和测试的方向图

5. 小结

本文设计了一种新型的结构简单的滤波短路贴片天线。没有额外的滤波电路, 利用 J 形缝隙与寄生短路贴片在通带外引入辐射零点, 滤波功能被有效的集成到微带贴片天线中。测试结果与仿真结果具有良好的一致性, 该天线的阻抗带宽为 3.7%, 带内平均增益约 5 dBi, 带外辐射抑制大于 12.6 dB。

基金项目

国家自然科学基金 61771242。

参考文献

- [1] Cao, Y.F., Zhang, Y. and Zhang, X.Y. (2020) Filtering Antennas: From Innovative Concepts to Industrial Applications. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, **21**, 116-127. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1900474>
- [2] 曹云飞, 杨圣杰, 章秀银. 面向 5G 移动通信的滤波天线及阵列[J]. 中国科学基金, 2020, 34(2): 154-162.
- [3] Balanis, C.A. (2016) *Antenna Theory: Analysis and Design*. 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 783-784.
- [4] Jin, J.Y., Liao, S.W. and Xue, Q. (2018) Design of Filtering-Radiating Patch Antennas with Tunable Radiation Nulls for High Selectivity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 2125-2130. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2804661>
- [5] Qian, J.F., Chen, F.C., Chu, Q.X., et al. (2018) A Novel Electric and Magnetic Gap-Coupled Broadband Patch Antenna with Improved Selectivity and Its Application in MIMO System. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 5625-5629. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2860129>
- [6] Hu, P.F., Pan, Y.M., Zhang, X.Y., et al. (2019) A Filtering Patch Antenna with Reconfigurable Frequency and Bandwidth Using F-Shaped Probe. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 121-130. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2877301>
- [7] Yang, W.C., Zhang, Y.Q., Che, W.Q., et al. (2019) A Simple, Compact Filtering Patch Antenna Based on Mode Analysis With Wide Out-of-Band Suppression. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 6244-6253. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2922770>
- [8] Lin, C.-K. and Chung, S.-J. (2011) A Filtering Microstrip Antenna Array. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **59**, 2856-2863. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2160986>
- [9] Wu, W.J., Yin, Y.Z., Zuo, S.L., et al. (2011) A New Compact Filter-Antenna for Modern Wireless Communication Systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **10**, 1131-1134. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2171469>
- [10] Zhang, Y., Zhang, X.Y. and Pan, Y.M. (2018) Low-Profile Planar Filtering Dipole Antenna with Omnidirectional Radiation Pattern. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 1124-1132. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2790169>
- [11] Hu, P.F., Pan, Y.M., Zhang, X.Y. and Hu, B.J. (2019) A Compact Quasi-Isotropic Dielectric Resonator Antenna With Filtering Response. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 1294-1299. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2883611>
- [12] Zhang, X.Y., Duan, W. and Pan, Y.M. (2015) High-Gain Filtering Patch Antenna without Extra Circuit. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **63**, 5883-5888. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2481484>
- [13] Yang, D., Zhai, H.Q., Guo, C.Z. and Li, H.K. (2020) A Compact Single-Layer Wideband Microstrip Antenna With Filtering Performance. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **19**, 801-805. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2980631>
- [14] Wood, C. (1980) Improved Bandwidth of Microstrip Antennas Using Parasitic Elements. *IEE Proceedings H (Microwaves, Optics and Antennas)*, **127**, 231-234. <https://doi.org/10.1049/ip-h-1.1980.0049>
- [15] Liu, N.W., Zhu, L., Fu, G., et al. (2018) A Low Profile Shorted-Patch Antenna with Enhanced Bandwidth and Reduced H-Plane Cross-Polarization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 5602-5607. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2855730>