

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306972

辐射零点可控的平面滤波贴片天线*

王丽黎^{1,2} 徐亚妮¹ 高智勇¹ 张衡¹

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 西安市无线光通信与网络研究重点实验室 西安 710048)

摘要:为满足射频前端器件集成化和多功能化的需求,设计了一款适用于 WLAN 5 GHz 波段的辐射零点可控的平面滤波贴片天线。该天线以同轴探针馈电的微带贴片天线为原型,上表面是由融合共生带和矩形槽的金属辐射贴片,下表面接地。其中共生条带位于辐射贴片的宽边两侧,矩形槽蚀刻在辐射贴片上,位于同轴馈电点两侧。两种结构分别在通带的低频和高频处各引入一个辐射零点,天线实现了的滤波响应和良好的辐射特性,同时两个辐射零点的位置自由可控,提高了设计的灵活性。仿真与测试结果表明:滤波天线的中心频率为 5.25 GHz,相对带宽为 14% (4.89~5.62 GHz),两个辐射零点分别位于 4.55 和 6.05 GHz 处;工作通带内增益平缓,平均增益约为 7 dBi,通带外抑制水平大于 19 dBi,测试与仿真结果较为一致。该滤波天线的设计未引入额外的滤波器网络,节省了天线的整体尺寸,且剖面低、重量轻、结构紧凑,具有良好的滤波和辐射性能。

关键词: 滤波天线;微带贴片天线;辐射零点;共生条带;矩形槽

中图分类号: TN822

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.1015

Planar filtering patch antenna with controllable radiation nulls

Wang Lili^{1,2} Xu Yani¹ Gao Zhiyong¹ Zhang Heng¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to meet the needs of integrated and multi-functional RF front-end devices, a planar filter patch antenna with controllable radiation nulls is designed for WLAN 5 GHz band. The antenna is based on a microstrip patch antenna fed by a coaxial probe. The upper surface is a metal radiation patch fused with a ribbon and a rectangular slot, and the lower surface is ground. The symbiotic strip is located on both sides of the wide edge of the radiation patch, and the rectangular groove is etched on the radiation patch and located on both sides of the coaxial feed point. The two structures introduce a radiation null at the low frequency and high frequency of the passband respectively, which makes the antenna realize the filter response and good radiation characteristics. At the same time, the position of the two radiation nulls is freely controllable, which improves the flexibility of the design. The simulation and test results show that the center frequency of the filter antenna is 5.25 GHz, the relative bandwidth is 14% (4.89~5.62 GHz), and the two radiation zeros are located at 4.55 and 6.05 GHz respectively. The average gain in the working passband is about 7 dBi, and the out-of-band suppression level is greater than 19 dBi. The test results are consistent with the simulation results. The design of the filter antenna does not introduce additional filter network, saves the overall size of the antenna, and has low profile, light weight, compact structure, and good filtering and radiation performance.

Keywords: filter antenna; microstrip patch antenna; radiation nulls; symbiotic strip; rectangular slots

0 引言

随着无线通信系统的飞速发展,无线通信前端向着小型化、集成化、低剖面方向发展,其中,滤波器和天线是无线通信前端的两个不可或缺的器件^[1-2],前者用于滤除干扰信号,后者用于接收和发射有效信号。传统的设计方法是将天线和滤波器分别独立设计,且滤波器一般放置在天线和收发射频模块之间,这种方法不仅会增加整个系统的尺寸和电路复杂度,尤其是在高频工作状态下会引入较大的额外损耗,恶化系统信噪比,导致天线在整个频率范围内辐射性能下降。

近几年来,将射频前端的天线和滤波器集成设计成为一个滤波天线^[3-4]模块问题已成为研究热点,该方法可以解决上述的辐射损耗以及尺寸消耗等问题。滤波天线模块兼具天线的辐射性能和滤波器选频功能,实现了天线集成化、辐射损耗等、小型化目标。学者们通过大量的研究提出各种滤波天线的设计方法,最简单的方法是将天线等效为负载阻抗直接级联到带通滤波器的输出端口,通过共同调节二者的参数以达到良好的阻抗匹配^[5-6],此外,也有人在微带馈线处引入滤波器^[7]、利用天线代替谐振器的最后一级^[8-9],这些方法都不可避免地引入了额外的滤波结构,无法实现天线结构简单紧凑和小型化的目的。融合滤波天线^[10]是近些年来提出的新颖的设计滤波天线的方法,该方法没有设计额外的滤波电路结构,通过在辐射器内部或外部添加寄生或共生结构引入辐射零点,实现滤波和辐射特性,如改进天线馈电结构^[11-12]、加载寄生单元^[13-14]、引入缺陷地结构(defected ground structure, DGS)^[15]改变电流的有效路径,即减小了天线的整体尺寸,又引入了频率选择功能,也有人使用多层结构^[16]、介质谐振器^[17]、超表面结构^[18]设计实现滤波天线。滤波天线的辐射零点对应了滤波器的传输零点,与滤波器传输零点类似,滤波天线辐射零点直接影响了滤波天线的频率选择特性,是滤波天线设计的核心技术指标。微带贴片天线具有易集成设计、空间尺寸小以及成本较低等优点,所以,设计一款辐射零点可控的紧凑型微带滤波贴片天线有一定的应用前景。Zhang等^[19]设计了一款具有高选择性和高增益的双层滤波天线,该天线通过在驱动贴片中与地板之间嵌入3个短路引脚以及一个U型槽结构提高了通带下边缘的频率选择性,层叠贴片的引入在上边带产生一个辐射零点,同时也增强了天线的增益。该天线在不引入额外滤波电路的情况下实现了滤波响应,但其缺点是剖面高,尺寸较大。

根据目前融合式微带滤波天线的研究和发展现状可知,其高选择性主要通过增益曲线两侧是否有辐射零点来体现,且辐射零点的位置越靠近通带边缘,意味着滤波

天线的选择性更优。本文设计了一款辐射零点可控的贴片滤波天线,该设计以微带贴片天线为基础天线,采用同轴馈电方式,通过引入共生带结构和蚀刻矩形槽缝隙在通带两侧引入2个辐射零点,提高了天线的边缘频率选择性,通过调节共生带和矩形槽的长度能够独立控制两个辐射零点的位置。天线最终的尺寸为38 mm×24 mm×2 mm,相对带宽为14%(4.89~5.62 GHz),在工作频段内获得7 dBi的平均增益,通带外频率抑制性能能达到19 dBi,且天线在通带内具有良好的阻抗匹配和辐射特性。

1 滤波天线设计与分析

1.1 微带贴片天线尺寸估算

微带天线是20世纪中后期的新兴天线,以其独特的结构展现出重量轻、剖面低、易集成和易加工等优势,它的结构由介质基板、辐射体和接地板组成。介质基板材料的不同是影响天线性能的主要因素,若微带矩形辐射金属贴片的工作频率为 f ,且中间介质基板所用材料的介电常数为 ϵ_r ,那么微带矩形金属辐射贴片的宽度 w 为:

$$w = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: c 是光速。

在做微带辐射金属贴片的估算时,其长度正常情况下取为 $\lambda/2$,在这里 λ_e 是在介质基板内部辐射的导波波长,即为:

$$\lambda_e = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2)$$

从理论出发,微带矩形辐射贴片单元的长度 l 为:

$$l = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L \quad (3)$$

式中: ϵ_e 是有效介电常数, ΔL 是无穷大的面积上同相激励的一对等效辐射缝隙的长度。两者可用下列公式计算,即为:

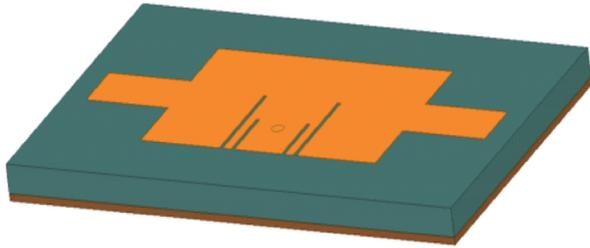
$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3)(w/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(w/h + 0.8)} \quad (5)$$

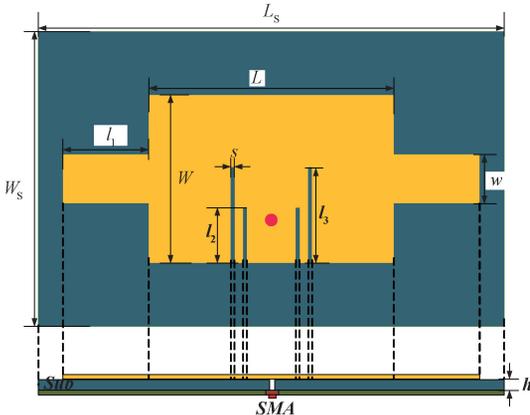
1.2 滤波天线结构

本文的滤波天线为单层介质基板结构,介质基板选用厚度为2 mm的F4B材料,介电常数为 $\epsilon_r = 3.55$,损耗角正切 $\tan\delta = 0.0027$,天线的结构示意图和俯视图如图1所示,整体尺寸为38 mm×35 mm。介质基板上表面设有辐射贴片结构,辐射贴片馈电点两侧蚀刻了关于 x 轴对称的长条缝隙结构,贴片宽边两侧融合了两条共生带。

缝隙结构和共生带用于产生辐射零点,实现滤波性能。该天线无额外的滤波电路,达到了小型化和结构紧凑的目标。天线通过一个 $50\ \Omega$ 的 SMA 连接器进行馈电,同轴线的导体直接与地相接,内导体穿过地板和介质基板与上层辐射贴片相连接。



(a) 天线3-D结构示意图
(a) Antenna 3-D structure diagram



(b) 滤波天线俯视图与侧视图
(b) Top view and side view of filter antenna

图 1 辐射零点可控的开缝贴片滤波天线结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of slit patch filter antenna with controllable radiation nulls

1.3 滤波天线设计过程

图 2 展示了该滤波天线的演化过程。首先根据所设计天线的中心频率设计一个标准的同轴馈电微带贴片天线,辐射贴片的宽度 w 和长度 l 分别由式(1)和(3)计算得出。然后,在天线辐射贴片宽边两侧加入两条对称的共生带形成天线 2,同时在低频处引入第一辐射零点;最后,在辐射贴片上蚀刻矩形缝隙结构形成天线 3,在高频处引入第二辐射零点,提高天线的选频功能,同时对称一致的槽线长度保证槽线谐振器的中心频率不发生偏移。

利用仿真软件 ANSYS HFSS 按照设计流程对 3 款天线进行建模仿真,仿真得到的 S 参数和增益结果分别如图 3(a)和(b)所示。天线 2 的相对带宽仅为 5.6%,而天线 3 的相对带宽为 14%,阻抗带宽也得到了明显的改善。3 款天线通带内的匹配增益都约在为 7 dBi 左右,共生带

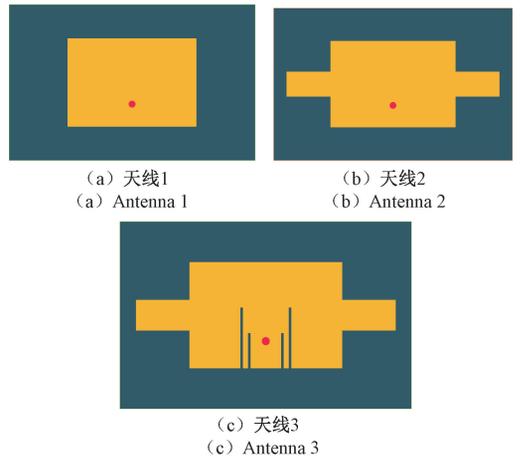
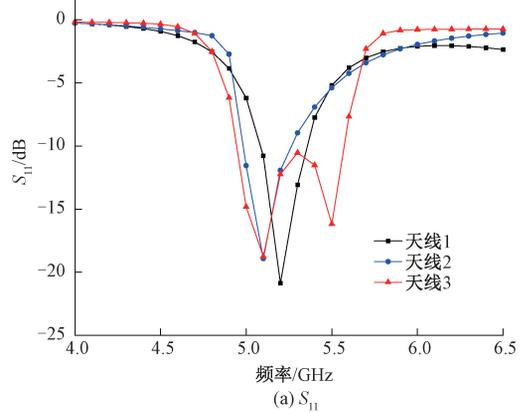


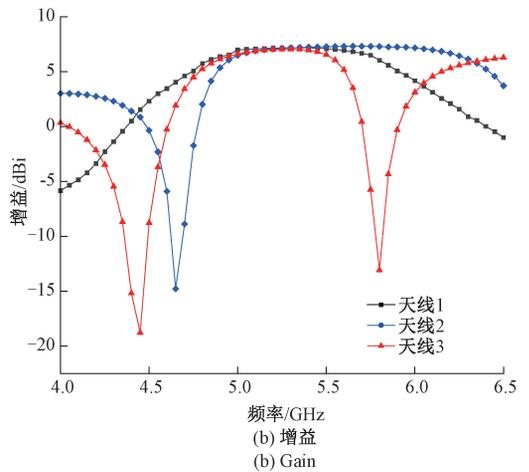
图 2 天线演变过程的俯视图

Fig. 2 Top view of the evolution process

和矩形分割槽的引入分别形成了通带两侧的辐射零点,对带外干扰产生抑制作用。



(a) S_{11}



(b) Gain

图 3 天线 1,2,3 仿真结果对比

Fig. 3 Simulated results of the designed antennas 1, 2 and 3

1.4 辐射零点分析

由上文可知,该滤波天线辐射零点的实现来源于两

种不同结构的引入,接下来将对第一辐射零点和第二辐射零点处的贴片电流进行分析。图4分别展示了天线2和天线3在辐射零点处的电流分布情况。图4(a)为天线2在第一辐射零点处的电流分布,从图中可以看出,电流主要分布在贴片两侧的共生条带表面,微带贴片表面的电流较弱,在 x 轴两侧电流分别向 $-y$ 和 $+y$ 方向流动,方向相反且两侧电流强度基本一致,电流抵消从而在该频点处产生一个辐射零点;图4(b)是天线3在第二辐射零点处的表面电流分布示意,从图中可以观察到,电流集中在同轴馈电点周围和两个矩形槽线的边缘,且槽线两侧的电流流向相反,相互抵消后在该频点产生一个辐射零点。上述现象在图2(b)的天线增益性能对比中可以更直观地看到。此外,矩形槽的引入在通带内产生额外的谐振点,在不影响天线辐射性能的前提下拓展了带宽。

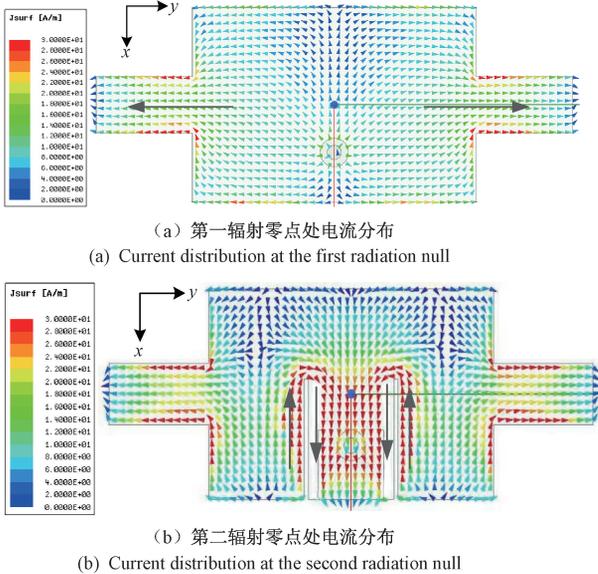


图4 贴片滤波天线辐射零点处的电流分布

Fig. 4 Current distributions of patch filtering antenna at radiation nulls

根据所设计的贴片滤波天线的宽带需求和选频性能对相关结构参数进行仿真,分析不同结构参数对贴片滤波天线的 S 参数、辐射零点和增益等性能的影响。调整共生条带结构中的长度 l_1 ,仿真得到的对比曲线如图5和6所示。由图5可知,当 l_1 由6.3 mm增加到7.3 mm, $S_{11} < -10$ dB的通带右侧有明显变化,阻抗带宽变宽。随着 l_1 的增加,通带左侧的曲线无明显变化。由图6可知,随着 l_1 的增加,增益曲线中第一辐射零点向着低频处移动,辐射零点处增益有所下降,左侧增益曲线变平缓;而第二辐射零点位置和增益无明显变化。这说明第一辐射零点的位置由共生条带结构控制,通过改变共生条带结构中的参数 l_1 调节第一辐射零点的位置,灵活控制天线

通带左侧频率选择性能。

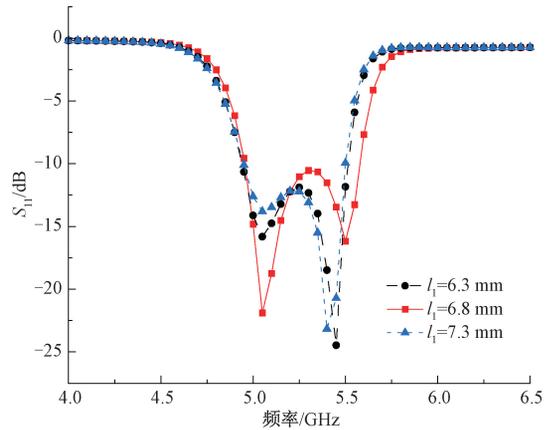


图5 l_1 对滤波天线 S_{11} 的影响

Fig. 5 Effect of the l_1 on the S_{11} of patch filtering antenna

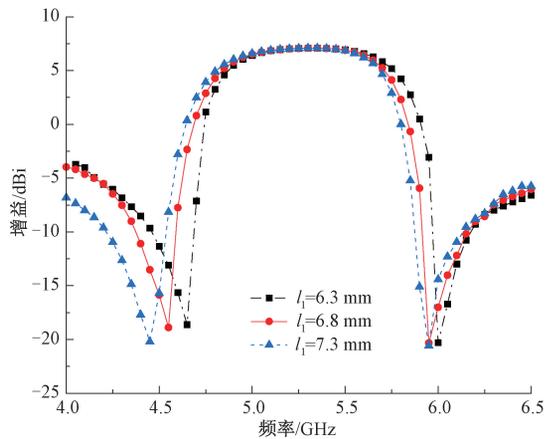


图6 l_1 对滤波天线增益的影响

Fig. 6 Effect of the l_1 on the gain of patch filtering antenna

调整矩形长条缝隙结构的长度 l_3 ,仿真得到的 S 参数和增益对比曲线如图7和8所示。由图7可知,当 l_3 从7 mm增加到7.6 mm时,5.5 GHz附近的 S_{11} 逐渐变好, -10 dB 阻抗带宽变化微小。对于增益曲线,如图8所示。随着 l_3 的增加,第二辐射零点位置向高频处移动,辐射零点处增益增加,通带右侧增益曲线变缓;而第一辐射零点位置几乎不变。这说明了第二辐射零点的位置由矩形长条形对称缝隙结构控制,调节 l_3 的长度即可控制第二辐射零点的位置,使滤波贴片天线获得最佳的频率选择性。

根据对相关参数的优化与结果分析可以发现,通过改变相应的参数导致天线一侧的辐射零点变化时,另一侧的零点位置几乎不变。因此,本设计实现了对两个辐射零点的独立控制,有效地验证了辐射零点灵活独立可控的技术原理。最终优化后的滤波天线尺寸参数如表1

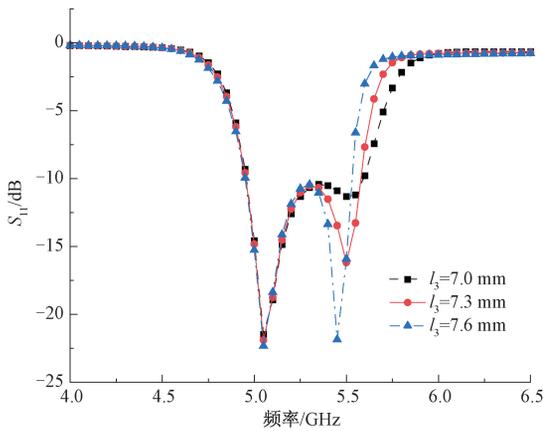


图 7 l_3 对滤波天线 S_{11} 的影响

Fig. 7 Effect of the l_3 on the S_{11} of patch filtering antenna

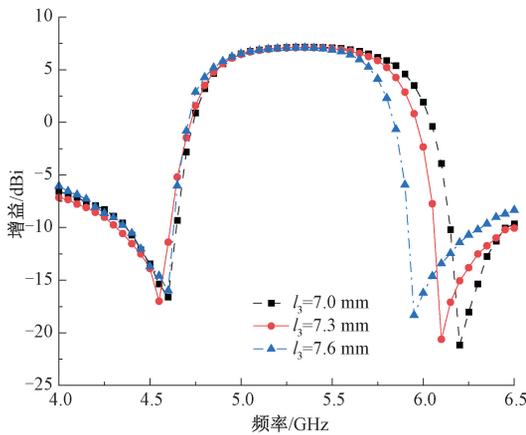


图 8 l_3 对滤波天线增益的影响

Fig. 8 Effect of the l_3 on the gain of patch filtering antenna

所示,设计的天线由 HFSS 电磁仿真软件仿真实现。

表 1 贴片滤波天线几何尺寸

Table 1 Patch filtering antenna loaded with metal frame

参数	数值/mm	参数	数值/mm
L_s	38	l_2	4.5
W_s	24	l_3	7.3
L	20	w	4
W	13.7	s	0.3
l_1	6.8	h	2

2 实物加工与仿真测试结果

2.1 实物加工

为了验证所设计的平面滤波天线的有效性 with 实用价值,对天线进行了加工制作,优化后的天线实物如图 9 所

示,天线通过 50 Ω 的 SMA 同轴接头馈电。基于微波仿真软件 HFSS 2019,对滤波天线的辐射性能如回波损耗、增益、辐射方向图进行仿真对比。对于加工的天线实物在 4~6.5 GHz 的频率范围内对天线回波损耗和辐射方向图等性能进行测量,采用 Agilent E8361C 矢量网络分析仪对天线的回波损耗进行测量。采用微波暗室测试系统对天线的增益和辐射方向图进行测量。

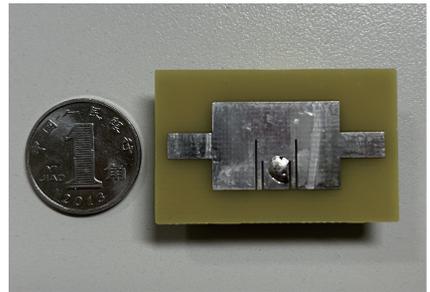


图 9 滤波天线的实物图

Fig. 9 The prototype of the filter antenna

2.2 结果分析

图 10 是 S_{11} 参数和增益仿真与测试结果对比。由图 10 可以看出,仿真与测试的结果较为一致,滤波天线的中心频率为 5.25 GHz, -10 dB 工作频段为 4.89 ~ 5.62 GHz,在整个工作频段内实现了良好的阻抗特性。3 dB 增益带宽为 4.64 ~ 5.88 GHz,约为 23.6%,滤波天线通带内增益较为稳定,在中心频率处测得的增益为 7.3 dBi,通带内平均增益约为 7 dBi,下边带和上边带辐射零点分别位于 4.55 和 6.05 GHz 处,带外抑制性能够达到 19 dBi 以下。仿真与测试结果相比有轻微差异,一方面是由于实物加工制造误差,另一方面可能是测量仪器所造成的测量精度不够等不可避免因素,但总体结果对天线性能响应影响不大。

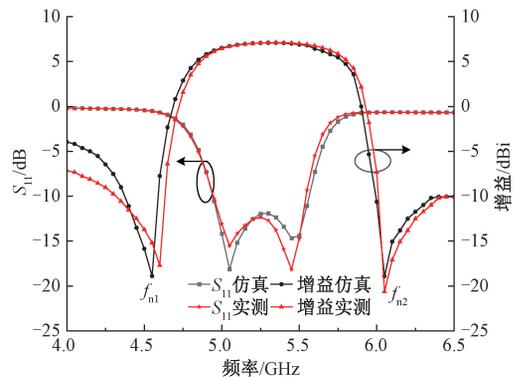


图 10 滤波天线的仿真与测试结果

Fig. 10 Simulated and measured results of the proposed filtering antenna

滤波天线在工作频段内应具备良好的辐射特性以满足现代通信的实际应用要求。图 11 分别展示了滤波贴片天线在 5.1、5.25 GHz 处 E 面和 H 面辐射方向的仿真与测试值对比,从图中可以看到,滤波天线在通带内保持良好的辐射特性,增益的最大值基本稳定在轴线方向,最大值约为 7.3 dBi。测试与仿真结果有一定偏差,但基本一致。仿真和测试的误差主要来源于天线加工的精度和微波暗室吸波材料的老化等。

拥有更紧凑的结构,大大提高了设计的灵活性,适用于 WLAN 5 GHz 通信系统中。

表 2 与其他滤波天线性能比较

Table 2 Performance comparison with other filtering antennas

文献	滤波结构	可控辐射零点个数	增益/dBi	抑制水平/dBi	尺寸/ λ_0^2
[6]	半波长偶极子,寄生单元	0	2.4	-10	0.48×0.06
[11]	4个矩形槽	2	7.0	-15	0.7×0.6
[16]	介质谐振器	0	3.0	-14	1.1×1.1
本文	共生带,矩形槽	2	7.0	-19	0.6×0.4

注: λ_0 为天线中心频率的自由空间波长

3 结论

为了适应通信系统高性能、小型化、多功能化和低成本的应用需求,本文设计了一种适用于 WLAN 5 GHz 的单层微带贴片滤波天线,同时实现了天线辐射功能和滤波选频功能,尺寸大小为 38 mm×24 mm×2 mm,通过融合共生带和矩形槽结构提高了滤波天线的集成度,且通带边缘处两个辐射零点独立可控,增加了天线边缘频率选择的自由度。仿真与测试结果显示,该天线在 4.89 ~ 5.62 GHz 具有 14% 的相对带宽,通带内平均增益达到 7.1 dBi。除此之外,相较其他已有的微带滤波天线,本文设计的天线中间没有填充任何空气层,具有良好的辐射性能和选频滤波效果,同时该滤波天线剖面高度低、结构简单紧凑,在射频前端系统中有广泛的应用前景。

参考文献

[1] 全梦寒. 高性能微带滤波天线的设计与研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
TONG M H. Design and research of high performance microstrip filter antenna[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

[2] 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.
CHEN P Y. Design of filter antenna based on coupled patch array [D]. Chengdu: University of Electronics Science & Technology of China, 2021.

[3] MAO C X, ZHANG Y, ZHANG X Y, et al. Filtering antennas: Design methods and recent developments[J]. IEEE Microwave Magazine, 2021, 22(11): 52-63.

[4] 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 P F, ZHANG H F, ZHU H B. A wideband differential microstrip filter antenna applied to 2.4 GHz[J]. Radio Communication Technology, 2020, 46(4):

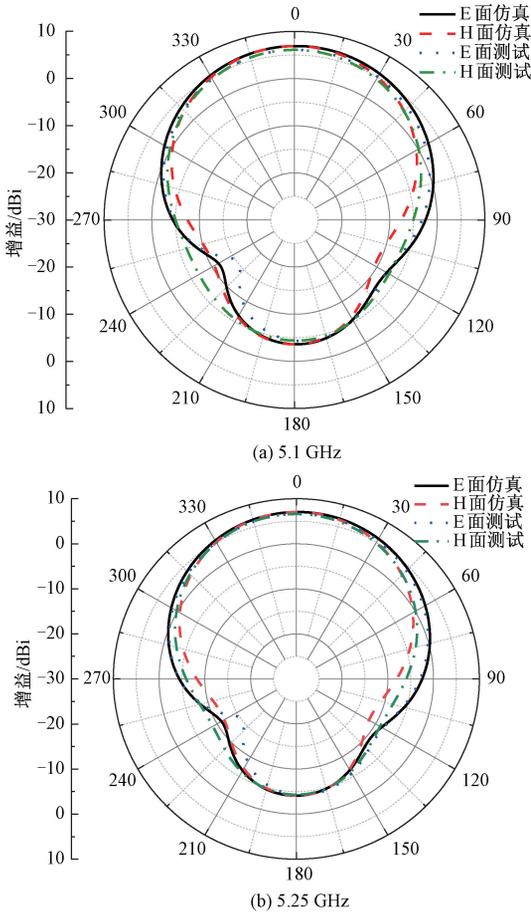
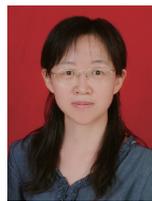


图 11 滤波天线在不同频点处的辐射方向图
Fig. 11 Simulated and measured radiation patterns of the filter antenna at different frequency

为进一步说明本章所设计的滤波天线的优良性能,在表 2 中对比了相关参考文献中的滤波贴片天线性能参数。从表中可以看出,与文献[6]和[16]相比,本章所用的滤波结构较为简单,平均增益和带外抑制水平均有所改善,但尺寸大于文献[11]中的天线;与文献[11]设计的天线相比,在平均增益相近的前提下,本章设计的天线有更小的尺寸和更优的带外抑制水平。总的来说,本文设计的滤波天线在小型化和带外抑制水平方面有明显的优势,在保证 7.1 dBi 的带内平均实际增益和超过 19 dBi 的带外抑制水平下实现了两个辐射零点独立可控,同时

- 471-474.
- [5] SUN W, LIU S X, ZHU X, 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.
- [6] CHEN C L. A compact wideband filtering omnidirectional dipole antenna without extra circuits [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(3): 1729-1739.
- [7] CAO Y F, ZHANG X Y, XUE Q. 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.
- [8] ZHANG Y Q, YANG W C, XUE Q, 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.
- [9] WU Z X, ZHANG A X, CHEN J D, et al. Co-design of low profile single-fed circularly polarized filtering antenna with high out-of-band rejection [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2019, 102: 99-104.
- [10] 曹云飞,张垚,章秀银. 滤波天线:从创新概念到工业应用 [J]. Frontiers of Information Technology Electronic Engineering, 2020, 21(1): 116-128.
CAO Y F, ZHANG Y, ZHANG X Y. Filtering antennas: From innovative concepts to industrial applications [J]. Frontiers of Information Technology Electronic Engineering, 2020, 21(1): 116-128.
- [11] LI M, TIAN S J, TANG M C. 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.
- [12] HOU R, REN J, ZUO M, et al. Magnetolectric dipole filtering antenna based on CSRR with third harmonic suppression [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(7): 1337-1341.
- [13] DENG J, HOU S. A reconfigurable filtering antenna with integrated bandpass filters for UWB/WLAN applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(1): 401-404.
- [14] JI S, DONG Y, FAN Y. Filtering dual-patch antenna with flat gain response using F-shaped feeding structure [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(10): 3342-3350.
- [15] LA D, ZHAO J, LIU H, et al. A wideband high-gain high-selectivity filtering antenna with two adjustable radiation nulls [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2021, 142: 154010.
- [16] LIU N W, LIANG Y D, ZHU L, et al. A low-profile wideband, filtering-response, omnidirectional dielectric resonator antenna without enlarged size and extra feeding circuit [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(7): 1120-1124.
- [17] LIU N W, LIANG Y D, ZHU L. A low-profile, wideband, filtering-response, omnidirectional dielectric resonator antenna without enlarged size and extra feeding circuit [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(7): 1120-1124.
- [18] YANG W, 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 Propagation, 2019, 67 (3): 1535-1544.
- [19] ZHANG X Y, DUAN W, PAN Y M. High-gain filtering patch antenna without extra circuit [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(12): 5883-5888.

作者简介



王丽黎, 1990 年于北京邮电大学获得学士学位, 2006 年于西安理工大学获得硕士学位, 现为西安理工大学教授, 主要研究方向为微波与天线系统、先进导航技术。
E-mail: wanglili@xaut.edu.cn

Wang Lili received her B. Sc. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 1990, M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2006. Now she is now a professor at Xi'an University of Technology. Her main research interests include microwave and antenna system advanced navigation technology.



徐亚妮(通信作者), 2021 年于西安理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为微带滤波天线。
E-mail: xuyani0803@163.com

Xu Yanni (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2021. Now she is a M. Sc. candidate at Xi'an University of Technology. Her main research interest includes microstrip filter antenna.