

文章编号: 1005-0523(2024)04-0073-07



基于双模槽线谐振器的宽带滤波介质谐振器天线

王传云¹, 江晓锋¹, 张永华², 胡伟康¹, 樊启磊¹

(1. 华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 比亚迪股份有限公司, 广东 深圳 518118)

摘要:【目的】为满足车联网等无线通信系统对小型化、多功能介质谐振器天线(DRA)的应用需求。【方法】设计了一种基于微带-双模槽线谐振器馈电结构的宽带滤波介质谐振器天线。在天线设计中,利用双模槽线谐振器来代替微带-槽线耦合馈电结构中的传统槽线,形成一种新型微带-双模槽线谐振耦合馈电网络;该馈电网络中的双模槽线谐振器可作为能量耦合结构,从而有效激励DRA的基模(TE_{111});同时,也可产生两个槽线谐振模式参与天线谐振,拓宽天线带宽。此外,通过在微带馈线上引入马刺线以及槽线谐振器自身谐振特性,可以在天线通带两侧分别产生一个辐射零点,在增益曲线上呈现准椭圆滤波响应。【结果】为了进一步验证天线设计性能,对天线进行了加工、测试,测试与仿真结果基本一致。该天线中心频率为4.12 GHz,阻抗带宽为53.40%(3.02~5.22 GHz),带内平坦增益为5.7 dBi。【结论】满足5G和车联网等无线通信系统的应用需求。

关键词: 介质谐振器天线;微带-槽线谐振器;滤波;宽带

中图分类号: U285

文献标志码: A

本文引用格式: 王传云, 江晓锋, 张永华, 等. 基于双模槽线谐振器的宽带滤波介质谐振器天线[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(4): 73-79.

Wideband Filtering Dielectric Resonator Antenna Based on Dual Mode Slotline Resonator

Wang Chuanyun¹, Jiang Xiaofeng¹, Zhang Yonghua², Hu Weikang¹, Fan Qilei¹

(1. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. BYD Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: 【Objective】To meet the application requirements of miniaturized and multifunctional dielectric resonator antennas (DRA) in wireless communication systems, such as the Internet of Vehicles (IoV). 【Method】A wideband filtering dielectric resonator antenna based on a microstrip-dual mode slotline resonator feeding structure is proposed. In the antenna design process, the traditional slotline of the microstrip-slotline coupled feeding structure was replaced by a dual mode slotline resonator, forming a novel microstrip-dual mode slotline resonator coupling feeding network. This dual mode slotline resonator served as an energy coupler in the feeding network, which effectively excited the TE_{111} resonant mode of the DRA; At the same time, two slotline resonant modes could also be generated to participate in antenna resonance, broadening the antenna bandwidth. Additionally, by introducing a spur line on the microstrip feedline and combining the intrinsic resonance characteristics of the slotline resonator, a radiation null can be produced on both sides of the antenna passband, showing a quasi-elliptical filter response on the gain curve. 【Result】To further verify the performance of the antenna design, a pro-

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(62261022, 62361025); 江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ2200609)

prototype FDRA was fabricated and measured, and the measurement and simulation results were generally consistent. The central frequency of the antenna is 4.12 GHz, the impedance bandwidth is 53.40 % (3.02~5.22 GHz), and the in-band flat gain is 5.7 dBi. **【Conclusion】**The antenna meets the application requirements of wireless communication systems, such as 5G and telematics.

Key words: dielectric resonator antenna; microstrip-slotline resonator; filtering; wideband

Citation format: WANG C Y, JIANG X F, ZHANG Y H, et al. Wideband filtering dielectric resonator antenna based on dual mode slotline resonator[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 73-79.

【研究意义】第五代移动通信技术(5th generation mobile communication technology, 5G)在车联网等无线通信系统应用的快速发展,对射频器件小型化和多功能集成提出了更高的要求,滤波天线应运而生^[1-3]。介质谐振器天线(dielectric resonator antenna, DRA)因其低损耗、多模辐射和设计自由度高^[4-6]等显著优点,成为了备受关注的研究焦点。

【研究现状】目前,滤波DRA主要有两种设计方法:综合设计方法和融合设计方法。综合设计方法是将介质谐振器(DR)作为滤波器的最后一级谐振器^[7-10]。例如,LIU H W等^[8]提出一种宽带滤波DRA,三模谐振器作为矩形双模DRA的馈电网络,同时三模谐振器在通带边缘产生了3个辐射零点,提高了边带的选择性。王传云等^[9]在双频DRA的馈电网络中引入四模支路负载环形谐振器,实现了双频滤波响应。BALLAV S等^[10]采用带宽可调阶梯阻抗谐振器作为DRA的馈电网络,实现了具有准椭圆滤波响应的滤波DRA设计。然而,综合设计方法不可避免地会增加插入损耗。融合设计方法主要通过引入寄生元件来实现,主要集中在天线设计上^[11-14]。LIU N W等^[12]通过在微带馈线和侧壁金属带之间创建交叉耦合结构,产生了2个辐射零点,实现了良好的带通滤波响应。LIU Y T等^[13]提出一种低剖面的全向DRA,在圆柱形DRA中引入3组短路针,产生了两个辐射零点以及对模式的扰动,在不增加额外滤波电路的情况下实现了良好的宽带、滤波响应。HU P F等^[14]在DR内部加载导电环结构,形成的磁场与DRA内部的磁场相互抵消,获得了良好的滤波效果。然而,融合设计方法设计复杂度高。近年来,微带-槽线耦合馈电结构因其馈电方式的多样性和设计自由度高而被广泛用于设

计滤波DRA^[15-17]。为了充分利用微带-槽线耦合馈电结构的优点,ZHAO C X等^[17]设计了一种集耦合滤波功能于一体的微带-槽线馈电网络。

【创新特色】为满足无线通信系统对多功能DRA的应用需求,本文基于融合设计理念,通过改进传统综合设计方法,提出一种基于微带-双模槽线谐振器耦合馈电网络的宽带滤波DRA设计方法。该天线充分利用了传统微带-槽线耦合馈电结构的优势,利用双模槽线谐振器代替传统槽线,形成一种新型微带-双模槽线谐振耦合馈电网络。该网络既可作为耦合馈电结构,也可以参与天线谐振,从而实现天线的宽带效果。同时,利用双模谐振器的谐振特性以及在微带馈线引入马刺线,提高带外选择性。仿真和测试结果表明,该天线具有较宽的相对带宽和5.7 dBi的最大增益。

【关键问题】所提出的设计方法不增加额外的电路尺寸,有利于天线设计的小型化、多功能集成,可满足5G和车载Wi-Fi等无线通信需求。

1 天线设计

1.1 天线结构

基于微带-双模槽线谐振器耦合馈电网络的宽带滤波DRA,主要由介质基板、介质谐振器和微带-槽线耦合馈电结构组成,见图1。介质基板相对介电常数为 $\epsilon_r=4.4$,损耗正切角为 $\tan\delta_1=0.02$,尺寸为 $g*g*h$ 。介质谐振器相对介电常数为 $\epsilon_2=10$,损耗正切角 $\tan\delta_2=0.003$,尺寸为 $a*b*d$ 。DRA的主要参数见表1。 ϵ_r 为相对介电常数, $\tan\delta$ 为损耗正切角。

1.2 工作原理

为了阐明所设计的宽带滤波DRA的工作原

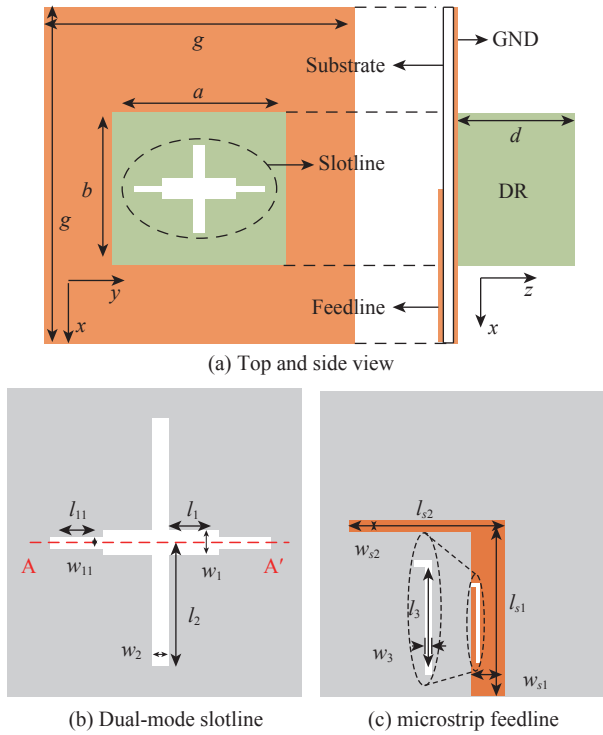


图1 基于双模槽线谐振器的宽带滤波 DRA 结构图
Fig. 1 Structure diagram of wideband filter type DRA based on two-mode slotline resonator

理,对其双模槽线谐振器结构进行深入分析。如图1(b)所示,由于该槽线谐振器关于AA'对称,故可以采用奇偶模方法对其进行分析。图2(a)和图2(b)给出了奇偶模等效电路,从图中可以看出:垂直槽线将对奇、偶模的谐振频率均有影响,而水平耦合槽线只对奇模谐振频率产生影响。如图2(c)呈现了天线 S_{11} 曲线图,经分析:模式 I 和 III 分别对应槽线谐振器的偶模和奇模谐振模式,模式 II 对应于 DRA 的 TE_{111} 模式,具体分析见 1.3 节所述。 S_{11} 为天线回波损耗。

1.3 参数分析

为了验证双模槽线尺寸变化对所提天线谐振模式的影响,分析槽线 l_{11}, l_2 变化与天线谐振模式的

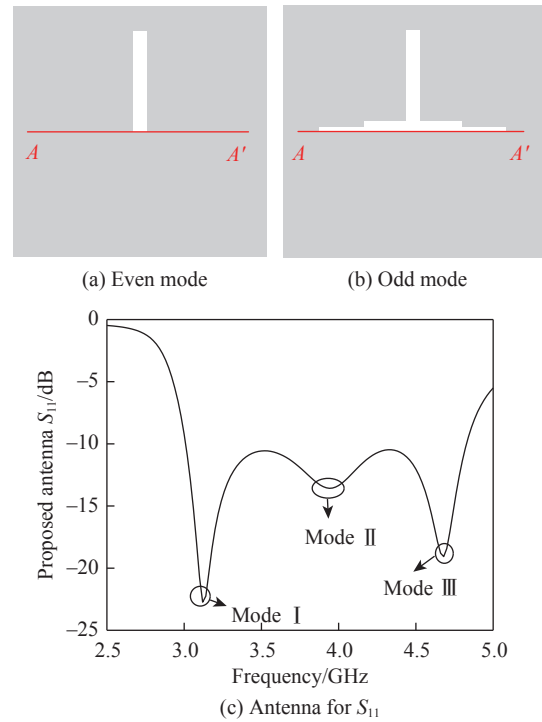


图2 双模槽线谐振器等效电路
Fig. 2 Dual-mode slotline resonator equivalent circuit

关系。图3(a)显示,随着耦合槽线长度 l_{11} 的增加,模式 III (槽线谐振器的奇模谐振模式)向低频移动,而其他两个模式基本保持不变。如图3(b)所示,随着加载槽线长度 l_2 的增加,模式 I (槽线谐振器的偶模谐振模式)和模式 III (槽线谐振器的奇模谐振模式)都有规律地向低频移动,而模式 II 则基本保持不变。图4为模式 I 和模式 III 地面电场分布图,模式 I 的能量主要聚集在加载槽线,而模式 III 的能量主要聚集在耦合槽线以及加载槽线上,与上述分析吻合。因此,可以验证:天线的模式 I 和模式 III 主要由槽线谐振器的偶模和奇模控制。

为了进一步验证模式 II 是 DRA 的 TE_{111} 模式,文中分析了 DR 高度 d 变化对天线模式的影响。如图5(a)所示,随着 DR 高度 d 的增加,天线的 3 种模式频率都发生了变化,并且都向低频移动,模式 II

表1 天线主要设计参数/mm
Tab.1 Main design parameters of antenna/mm

g	a	b	d	h	l_1	l_2	l_{11}	w_1	w_2	w_{11}	l_{s1}	l_{s2}	w_{s1}	w_{s2}	l_3	w_3
30	18.82	18.82	11.4	0.762	9	11	2	1	0.6	0.2	16	6	1.4	0.4	8	0.1

Note: g is the length and width of the ground, a is the length of the DR, b is the width of the DR, d is the height of the DR, h is the height of the dielectric substrate, l_1 and l_{11} are the length of the coupling groove line, w_1 and w_{11} are the width of the coupling groove line, l_2 is the length of the loading groove line, w_2 is the length of the loading groove line, l_{s1} and l_{s2} are the length of the microstrip feeder, w_{s1} and w_{s2} are the width of the microstrip feeder, l_3 is the length of the spur line, and w_3 is the width of the spur line.

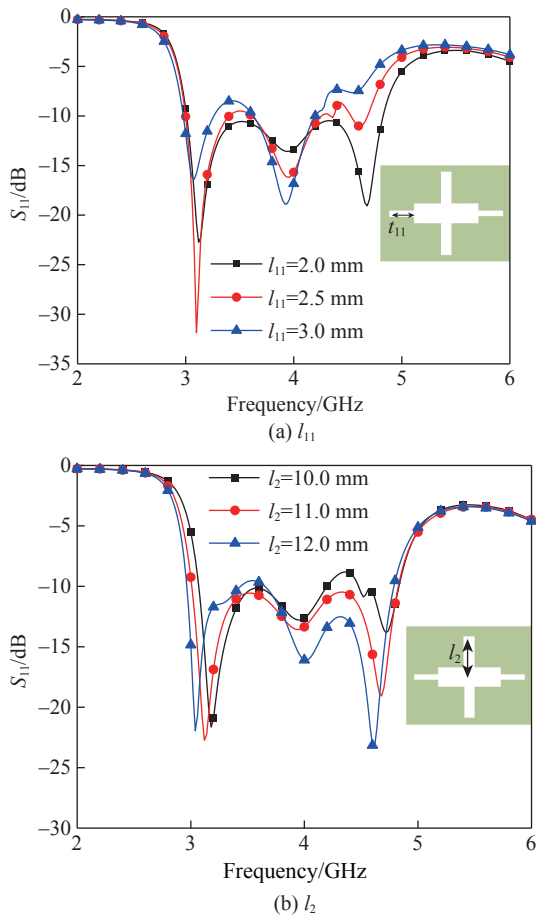


图3 S_{11} 随 l_{11} 和 l_2 的变化曲线
Fig. 3 Variation curves of S_{11} with l_{11} and l_2

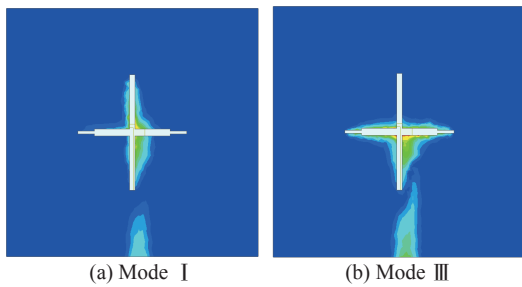


图4 模式 I 和模式 III 的地面电场分布
Fig. 4 Distribution of ground electric field for mode I and mode III

的电场矢量分布如图6所示,可以得出模式 II 为 DRA 的主模 TE_{111} 模,从而验证了分析结果的正确性。此外,由于 DR 的长度 a 、宽度 b 对天线模式的影响与高度 d 基本一致,限于篇幅不再赘述。如图 5(b)所示,天线在增益曲线上有 2 个辐射零点 f_{n1} 和 f_{n2} 。根据 1.2 节分析,槽线谐振器自身谐振特性会在低频处产生 1 个辐射零点 f_{n1} ;为了提高天线通带高

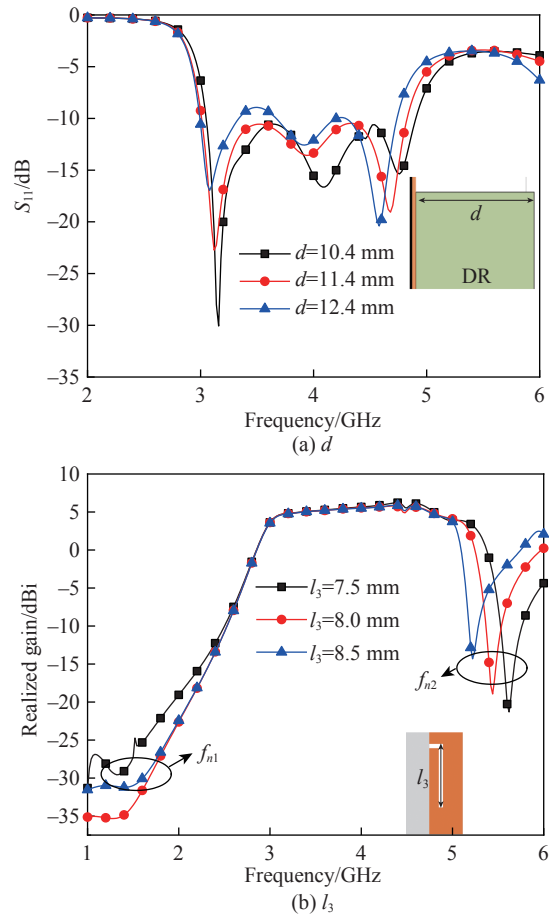


图5 S_{11} 和增益随 d 和 l_3 的变化曲线
Fig. 5 S_{11} and gain variation curves with d and l_3

频侧的带外抑制效果,在微带馈线上引入马刺线,产生辐射零点 f_{n2} 。为了验证高频辐射零点 f_{n2} 是引入的马刺线产生的,对马刺线长度 l_3 变化进行分析。如图 5(b)所示,随着马刺线长度 l_3 的增加,辐射零点 f_{n2} 向低频移动,而 f_{n1} 保持不变。图 7 为辐射零点 f_{n2} 的电流分布。可见,在 5.5 GHz 处,电流主要集中在马刺线上,由于电流相互抵消,从而形成了辐射零点 f_{n2} 。 f_{n1} 为天线增益曲线低频辐射零点, f_{n2} 为天线增益曲线高频辐射零点。

2 结果

图 8 和图 9 为滤波 DRA 的实物加工图以及测试结果与模拟结果的对比如。如图 9 所示,该天线的相对带宽为 53.40 % (3.02~5.22 GHz),通带内存在 3 种模式:槽线偶模 (3.16 GHz)、DRA 的基模 TE_{111} 模 (4.54 GHz) 以及槽线奇模 (5.00 GHz)。测试结果表明,该天线的峰值增益可达 5.78 dBi,带内平

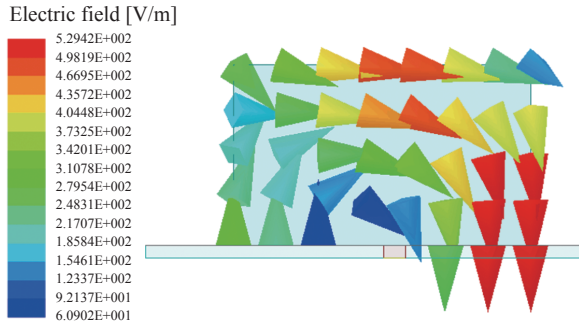


图6 模式II的电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of Mode II

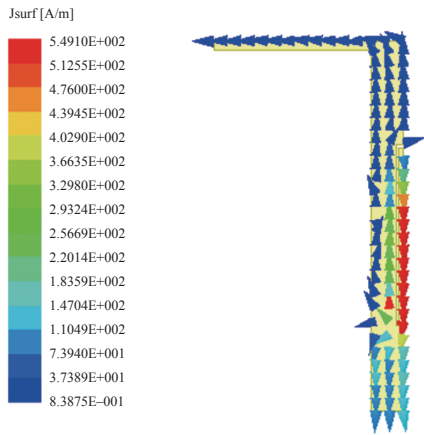


图7 马刺线上的电流分布

Fig. 7 Current distribution on the spur line

坦增益为5 dBi。由于在天线通带高频侧5.44 GHz处产生了一个辐射零点,提高了边带滚降率,带外抑制水平高于25 dB。图10给出了DRA在3.16,4.54 GHz和5.00 GHz时的辐射方向图。可以看出,天线在主辐射方向上性能稳定,交叉极化低于15 dB, dB为天线增益单位。

表2列出了现有的一些研究的DRA与所设计的

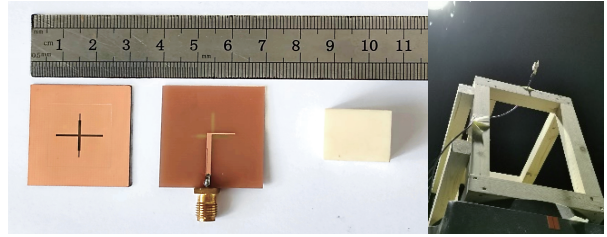


图8 滤波DRA加工实物

Fig. 8 Filtering DRA manufacturing physical object

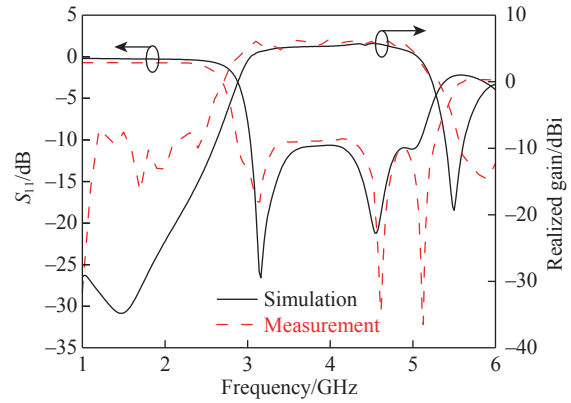


图9 测试与仿真 S_{11} 参数、增益曲线对比

Fig. 9 Comparison of S_{11} -parameters and gain curves in measurement and simulation

天线的对比分析。很明显,与文献[19]和[20]中提出的天线相比,该天线不仅具有更宽的阻抗带宽,而且还实现了滤波功能。对比分析结果表明,该天线在带宽、尺寸、增益和频率选择性方面实现了良好的平衡。

3 结论

本文采用融合设计的理念,设计了一种基于微带-双模槽线谐振器耦合馈电网络的宽带滤波介质

表2 所设计天线与其他天线的性能对比

Tab.2 Performance comparison of the designed antenna with other antennas

References	Centre frequency/GHz	Size	Impedance band width	Gain/dBi	Number of radiation nulls
[13]	2.40	$1.06\lambda_0 \times 1.06\lambda_0 \times 0.12\lambda_0$	41.2 %	~1.00	2
[14]	2.44	$0.89\lambda_0 \times 0.89\lambda_0 \times 0.15\lambda_0$	4.1 %	5.10	2
[19]	2.96	$1.63\lambda_0 \times 1.01\lambda_0 \times 0.18\lambda_0$	13.5 %	6.10	0
[18]	5.60	$1.12\lambda_0 \times 1.68\lambda_0 \times 0.68\lambda_0$	13.7 %	12.00	2
[20]	3.60	$0.96\lambda_0 \times 0.96\lambda_0 \times 0.14\lambda_0$	38.9 %	5.60	0
[21]	2.85	$0.61\lambda_0 \times 0.61\lambda_0 \times 0.22\lambda_0$	20.1 %	6.60	2
Proposed	4.12	$0.41\lambda_0 \times 0.41\lambda_0 \times 0.15\lambda_0$	5.34 %	5.78	2

Note: λ_0 is the free-space wavelength of the center frequency.

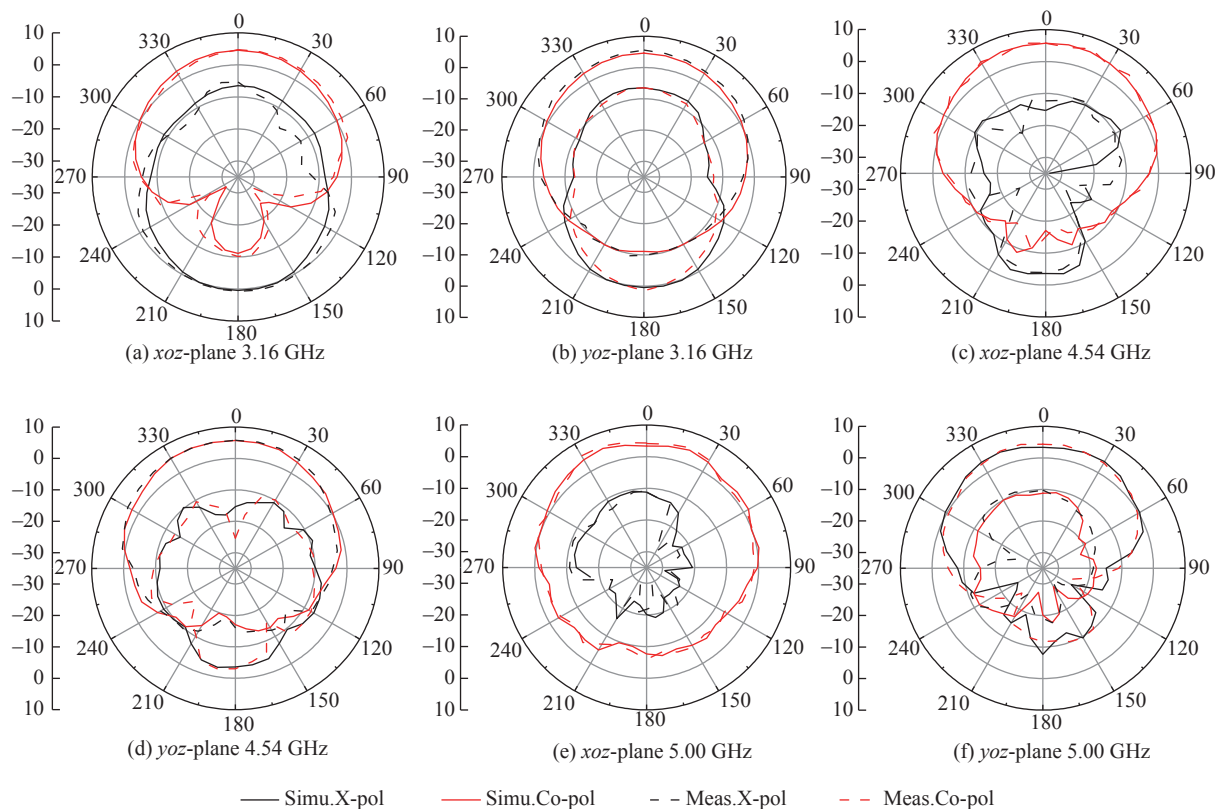


图 10 宽带滤波 DRA 的辐射模式

Fig. 10 Radiation pattern of the wideband filtering DRA

Note: Co-pol is the main polarization of the antenna radiation pattern, X-pol is the cross-polarization of the antenna radiation pattern.

谐振器天线,具有平坦的带内增益和良好的带外抑制特性。

1) 微带-双模槽线谐振耦合馈电网络是对传统滤波天线综合设计方法的改进,将其由水平级联改进为垂直级联方式,从而实现了小型化、多功能的新型耦合馈电网络。

2) 所设计天线的工作频段可以满足车载天线高速、稳定和可靠的通信要求,实现更稳定、更安全的车联网通信,为智能交通系统的发展提供支持。

参考文献:

- [1] 孙海静,陈强,周方明,等.适用于无线通信系统的滤波天线集成设计[J].传感器与微系统,2020,39(11):74-77.
SUN H J, CHEN Q, ZHOU F M, et al. Integrated design of filter antenna for wireless communication system[J]. Sensors and Microsystems, 2020, 39(11): 74-77.
- [2] WANG Y, CHEN Y L, QIAN J F, et al. A dual-mode resonator-fed gap coupled filtering antenna with improved selectivity and bandwidth[J]. Progress In Electromagnetics

Research Letters, 2019, 87: 137-143.

- [3] BALDAZZI E, ALI A R, CICHETTI R, et al. A high-gain dielectric resonator antenna with plastic-based conical horn for millimeter-wave applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(6): 949-953.
- [4] SYMON K, PODILCHAK, JOHNSTONE C, et al. A compact wideband dielectric resonator antenna with a meandered slot ring and cavity backing[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 15: 909-913.
- [5] CHEN Z K, ZHENG L, WENG Z, et al. Wideband wide-beam hybrid dielectric resonator antenna using uniaxial material[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 22(1): 124-128.
- [6] 闵学良,张厚,杨波,等.基于SRR-DGS新型高选择性带通滤波器的设计[J].微波学报,2016,32(6):49-52.
MIN X L, ZHANG H, YANG B, et al. Design of a new high-selectivity bandpass filter based on SRR-DGS[J]. Journal of Microwave, 2016, 32(6): 49-52.
- [7] LIU H W, TIAN H L, LIU L, et al. Co-design of wideband filtering dielectric resonator antenna with high gain

- [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 69(3): 1064-1068.
- [8] LIU H W, TIAN H L, DU C, et al. Dual-band filtering dielectric antenna using high-quality-factor Y3Al5O12 transparent dielectric ceramic[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(8): 2100115.
- [9] 王传云, 王丽娜, 韩志文, 等. 基于阶梯阻抗谐振器的滤波介质谐振器天线[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(9): 93-96.
- WANG C Y, WANG L N, HAN Z W, et al. Filter dielectric resonator antenna based on stepped impedance resonator [J]. Sensors and Microsystems, 2023, 42(9): 93-96.
- [10] BALLAV S, SARKAR G A, PARUI S K. High-selective filtering dielectric resonator antenna by integrating band-rejection resonators in Feedline[J]. Sādhanā, 2021, 46: 1-8.
- [11] GAO Y, JIAO Y C, WENG Z B, et al. A filtering dielectric resonator antenna with high band-edge selectivity[J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2020, 89: 63-71.
- [12] LIU N W, LIANG Y D, ZHU L, et al. A low-profile, wide-band, 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.
- [13] LIU Y T, LEUNG K W, REN J, et al. Linearly and circularly polarized filtering dielectric resonator antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 3629-3640.
- [14] HU P F, PAN Y M, ZHANG X Y, et al. Broadband filtering dielectric resonator antenna with wide stopband[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 2079-2084.
- [15] WANG C Y, ZHANG Y H, HAN Z W, et al. A novel single-feed filtering dielectric resonator antenna using slotline-loaded coupling structure[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64(4): 750-754.
- [16] WANG C Y, HAN Z W, LIU H W, et al. A novel single-feed filtering dielectric resonator antenna using slotline stepped-impedance resonator[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(11): 3426-3430.
- [17] ZHAO C X, PAN Y M, SU G D. Design of filtering dielectric resonator antenna arrays using simple feeding networks[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(8): 7252-7257.
- [18] XU H, CHEN Z, LIU H, et al. Single-feed dual-circularly polarized stacked dielectric resonator antenna for K/Ka-band UAV satellite communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(4): 4449-4453.
- [19] CHEN T W, YANG W W, KE Y H, et al. A circularly polarized hybrid dielectric resonator antenna with wide bandwidth and compact size[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(3): 591-595.
- [20] LA D S, ZHANG C, ZHANG Y J, et al. A wideband filtering dielectric resonator antenna based on the HEM₁₁₆ mode[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(8): 1552-1556.

通信作者:王传云(1977—),男,教授,博士,硕士生导师,研



究方向为射频和微波电路,天线理论与技术。E-mail: wangcy@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:李根)