



·高功率微波技术·

## 2.4/4.8/7.2 GHz 三频段谐波雷达天线的研究与设计

梁转转<sup>1</sup>, 王国富<sup>1</sup>, 覃觅觅<sup>1</sup>, 叶金才<sup>2</sup>, 林建强<sup>1</sup>

(1. 广西科技大学 自动化学院, 广西 柳州 545006; 2. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

**摘 要:** 研究设计了一种应用于手持式谐波雷达的三频段单极子天线。天线采用共面波导馈电, 通过在单极子天线主辐射体加载 L 型辐射枝节、在接近主辐射体的接地平面开三角形切口的方法, 使其谐振于 2.4 GHz, 4.8 GHz 和 7.2 GHz 三个频段。同时, 在距离天线 10 mm 处加载金属挡板, 使天线辐射方向性增强, 并能接收多个方向反射的电磁波。所实现的天线尺寸为 54 mm×53 mm×1.6 mm, 在三个工作频段上的带宽分别为 0.51 GHz(2.35~2.86), 1.39 GHz(4.17~5.56), 1.46 GHz(6.17~7.63), 能够有效覆盖谐波雷达全部的工作频段; 由天线的峰值增益和辐射方向图可知, 天线在工作频段内增益性能和整体辐射性能良好。

**关键词:** 谐波雷达; 微带天线; 多频段; 单极子天线

中图分类号: TN821

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220337

## Research and design of 2.4/4.8/7.2 GHz tri-band antenna of harmonic radar

Liang Zhuanzhuan<sup>1</sup>, Wang Guofu<sup>1</sup>, Qin Mimi<sup>1</sup>, Ye Jincan<sup>2</sup>, Lin Jianqiang<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;

2. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In this paper, a three-band monopole antenna for hand-held harmonic radar is designed. The antenna is fed by a coplanar waveguide. By loading L-shaped radiating branch on the main radiating body of the monopole antenna and cutting a triangular notch on the ground plane close to the main radiating body, the antenna resonates in three frequency bands: 2.4 GHz, 4.8 GHz and 7.2 GHz. At the same time, a metal baffle is loaded at a distance of 10 mm from the antenna to enhance the directionality of antenna radiation and to receive electromagnetic waves reflected in multiple directions. The size of antenna is 54 mm×53 mm×1.6 mm, and the bandwidth in the three operating frequency bands is 0.51 GHz (2.35–2.86 GHz), 1.39 GHz (4.17–5.56 GHz), 1.46 GHz (6.17–7.63 GHz), respectively. It can effectively cover all the working frequency band of harmonic radar. According to the peak gain and radiation pattern of the antenna, the gain performance and overall radiation performance of the antenna are good in operating frequency band.

**Key words:** harmonic radar, microstrip antenna, multiband, monopole antenna

天线是无线电通信、雷达、导航、微波遥控等无线电系统中重要的器件。2.4 GHz 谐波雷达发射基波(频率 2.4 GHz), 接收目标反射的二、三次谐波信号(频率 4.8 GHz 和 7.2 GHz) 以确定目标位置和属性。因此, 需要能同时覆盖谐波雷达系统收发频率 2.4, 4.8, 7.2 GHz 的多频段天线。除了谐波雷达, 多频段天线还广泛应用于无线电通信、测控及电子对抗等, 为此, 科研人员对多频段天线进行各种研究。文献 [1] 提出了一种小型化共面波导馈电开槽单极天线, 设计简单, 体积较小, 为 21 mm×14 mm×0.8 mm, 可以工作在 3.4, 5.5, 8.2 GHz 三个频段, 但其最大峰值增益仅为 2.3 dBi。文献 [2] 提出了单极天线采用分形希尔伯特曲线二分法实现 2.4, 3.5, 5.5 GHz 宽频带的三频段谐振特性。天线整体尺寸为 33 mm×20 mm×0.787 mm, 最大峰值增益为 4.6 dBi, 但其设计过程较为复杂。文献 [3] 提出了一种简单宽带圆极化单极天线, 具有良好的峰值增益 5 dBi, 但只能工作在两个频段。研究者发现单极子加谐振枝节<sup>[4-6]</sup>

\* 收稿日期: 2022-10-13; 修订日期: 2022-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62161002); 广西自然科学基金项目 (2020GXNSFAA297018)

联系方式: 梁转转, lzz13633060806@163.com。

通信作者: 覃觅觅, qinmi-328.cool@163.com。

或者将单极子辐射体开槽<sup>[7-10]</sup>可以实现多频;将单极子弯曲成L型或T型可以有效改善天线的回波损耗<sup>[11-12]</sup>;增加挡板可以增加天线增益<sup>[13-15]</sup>。

本文研究设计了一款可用于2.4 GHz谐波雷达系统的共面波导馈电的三频段印刷单极子天线。天线通过在印刷单极子天线主辐射体正面和背面加载L型辐射枝节、在接近主辐射体的接地平面开三角形切口的方法,使其谐振于2.4, 4.8, 7.2 GHz三个频段。为了增强辐射方向性,在距离天线10 mm处加载金属挡板,天线辐射方向性增强,并能接收多个方向反射的电磁波,提高谐波雷达性能。

### 1 天线结构模型

本文所研究设计的天线结构如图1所示,该天线包括一层介质板、一层接地板,其中接地板上白色部分为缝隙,灰色部分为金属。所用介质基板为FR4(聚四氟乙烯),相对介电常数为4.4,厚度 $h$ 为1.6 mm,尺寸为54 mm×53 mm。天线的单极子部分主要决定谐振频率 $f_1=2.4$  GHz,正面L型枝节路径决定谐振频率 $f_2=4.8$  GHz,高频谐振频率 $f_3=7.2$  GHz主要由背面L型枝节及接地平面三角形切口决定,共面波导传输线具有50 Ω特性阻抗。

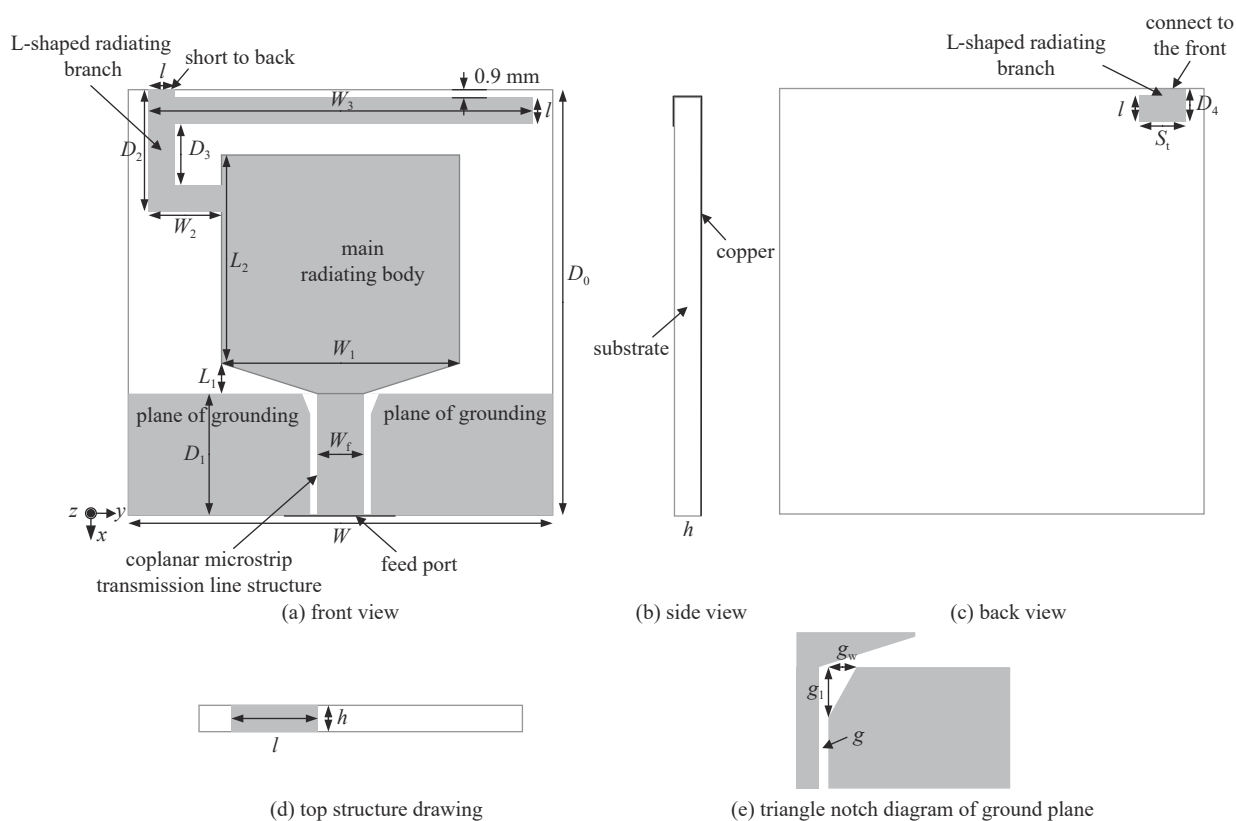


Fig. 1 Schematics of antenna structure

图1 天线结构图

### 2 仿真模拟和分析

利用电磁仿真软件 HFSS,我们对所设计的三频段单极子天线进行了仿真模拟和优化设计,最终优化的天线参数如表1所示。图2(a)给出了在保持其他参数不变的情况下,L型枝节宽度 $l$ 变化对反射系数 $S_{11}$ 的影响。由图2(a)可知, $f_2, f_3$ 随着 $l$ 的增加向高频点移动,且带宽增加, $f_1$ 谐振频率和带宽几乎不变。天线背面的L型枝节是为了增强天线高频谐振而设计的,由图2(b)可知,当 $S_t$ 的长度增加时, $f_3$ 谐振频段会向高频段移动,带宽增加,带内反射系

表1 天线的优化参数  
Table 1 Parameters of antenna (mm)

$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$L_1$	$L_2$	$W$	$W_1$
53	15	19.2	13.3	4.1	8.25	24.93	54	33.75
$W_2$	$W_3$	$W_f$	$g$	$g_1$	$g_w$	$S_t$	$l$	$h$
8.125	50	3.25	0.4	2	0.825	5	3.1	1.6

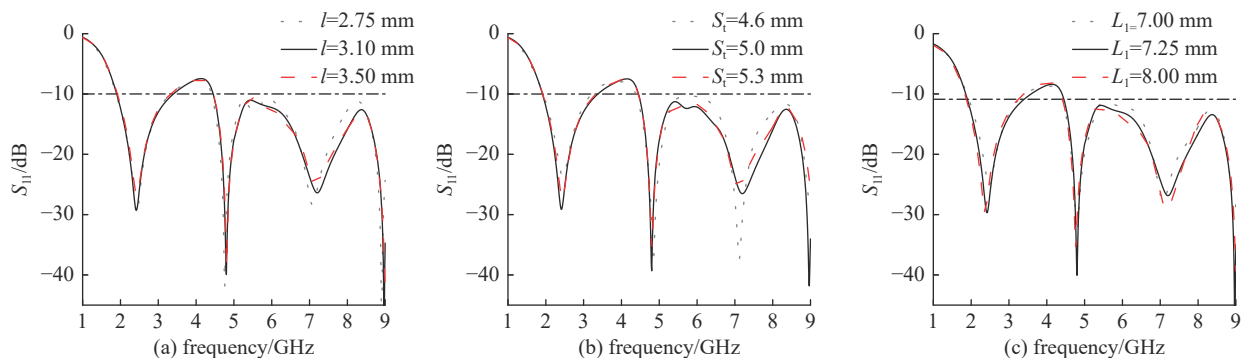


Fig. 2 The parameter  $S_{11}$  with different value of  $l, S_i, L_1$

图2 参数  $l, S_i, L_1$  对天线反射系数的影响

数曲线也会发生明显的抬升,幅度大约在 10 dB,  $f_1, f_2$  变化较小。图 2(c) 给出了  $L_1$  对天线反射系数的影响。当  $L_1$  增加时,主辐射体距离地面越远,  $f_1$  向低频段移动,带宽增加,但  $f_3$  谐振频率向高频段移动,  $f_2$  所在频带无明显变化。

图 3 给出天线谐振频率 2.4, 4.8, 7.2 GHz 的辐射方向图。  $xOz$  所在的平面为  $E$  面,  $xOy$  所在的平面为  $H$  面(参见图 1)。由图 3(a) 可知,天线在 2.4 GHz 辐射的方向,在  $E$  面、 $H$  面均呈现“8”字型。在 4.8 GHz 和 7.2 GHz 辐射的方向,在  $E$  面呈现近似“8”字型(中间突出的“8”字型辐射方向),在  $H$  面则近似两个交叉叠放“8”字型和全向辐射。

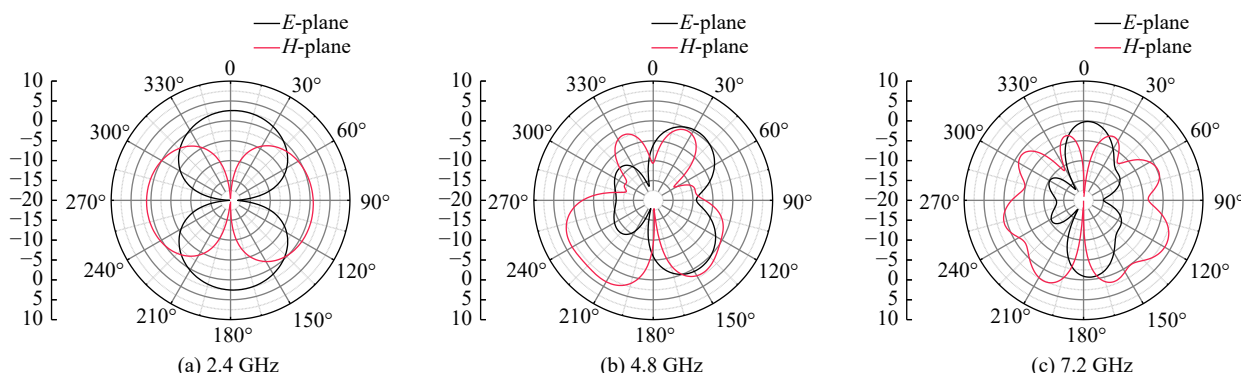


Fig. 3 Simulated radiation pattern of the antenna at different frequencies

图3 不同频率处天线辐射方向图

### 3 加载金属挡板天线

为了增强天线辐射方向性并且提高天线增益,如图 4 所示,在距离天线 10 mm 处加载一块 73 mm×37 mm 矩形金属挡板。由图 5 可见,金属挡板对反射系数并无严重影响,加载金属挡板前,天线三个谐振频点分别为  $f_1=2.4$  GHz,  $f_2=4.8$  GHz 和  $f_3=7.2$  GHz,带宽分别为 1.38 GHz(1.96~3.34 GHz), 1.19 GHz(4.47~5.66 GHz), 1.75 GHz(6.66~8.41 GHz)。加载金属挡板后,天线三个谐振频点不变,带宽分别为 0.51 GHz(2.28~2.79 GHz), 1.50 GHz(4.21~5.71 GHz), 1.39 GHz(6.58~7.97 GHz)。图 6 给出了加载金属挡板后天线的辐射方向图。可见,在  $f_1=2.4$  GHz 谐振频率,加载金属挡板

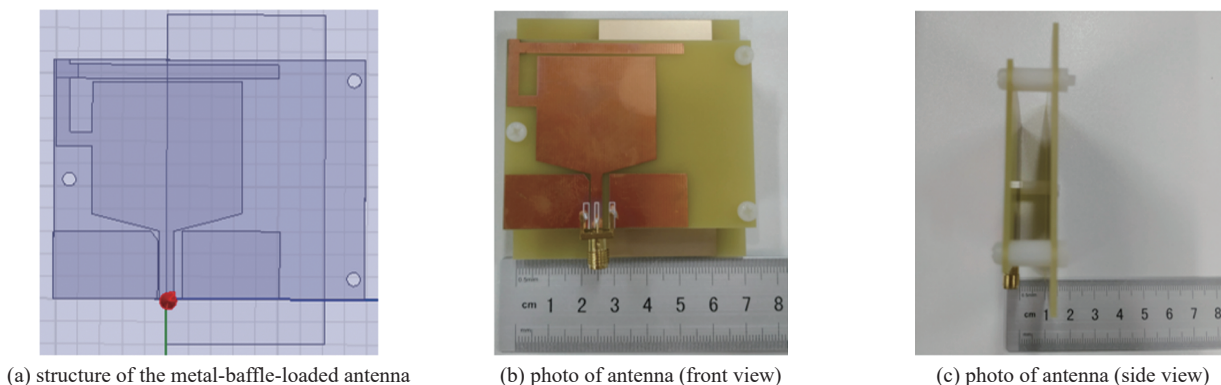


Fig. 4 Structure of the metal-baffle loaded antenna

图4 加载金属挡板天线图

后天线的辐射方向近似变为单向辐射,辐射方向性明显增强,提高了谐波雷达的性能,而在 $f_2=4.8$  GHz 和 $f_3=7.2$  GHz 谐振频率,辐射方向则和无金属挡板时的辐射方向近似相同,有利于谐波雷达向特定方向辐射 2.4 GHz 电磁波,接收多角度反射回来的 4.8 GHz 和 7.2 GHz 电磁波。图 7 则给出了天线的增益图。由图可以看到,加载金属挡板后,天线在 $f_1$ ,  $f_2$  和 $f_3$  工作频段内,峰值增益分别从 1.29, 1.31 和 9.1 dB 提升到 4.7, 18.8 和 23.6 dB。其原因主要是,增加金属挡板后,在工作频段 $f_1$  内,天线由双向辐射近似变为单向辐射,所以增益增大 2~3 倍,而在工作频段 $f_2$  和 $f_3$  内,天线辐射也由各个方向较为均匀的辐射变为少数几个方向辐射最大(参见图 3 和图 6),所以增益大幅提高。

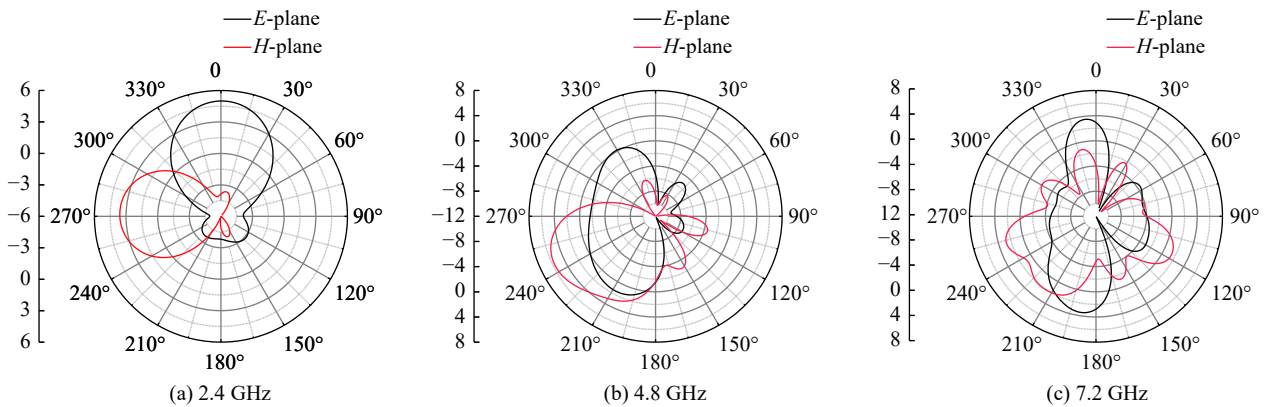


Fig. 6 Radiation pattern of the metal-baffle-loaded antenna at different frequencies

图 6 加载挡板后,不同频率处天线辐射方向图

#### 4 测试结果与分析

在仿真模拟的基础上,我们对所研究设计天线进行了加工,并利用网络矢量分析仪对有挡板和无挡板天线进行测试。加载金属挡板天线的反射系数 $S_{11}$ 结果如图 8 所示。可以看到,加载金属挡板后,与仿真谐振频点( $f_1=2.4$  GHz,  $f_2=4.8$  GHz 和 $f_3=7.2$  GHz)相比,实测天线的谐振频点稍微偏移,分别为 2.59, 4.54 和 6.75 GHz,阻抗带宽分别为 0.51 GHz (2.35~2.86), 1.39 GHz(4.17~5.56), 1.46 GHz(6.17~7.63)。在谐振频点 $f_1=2.4$  GHz,实测结果与仿真结果基本吻合,但在 4.8, 7.2 GHz 处 $S_{11}$ 的测量值比仿真提高 15~20 dB。分析原因主要是影响高频的谐振枝节需要将正反两面的金属结构连接,在实际制作过程中,使用了裁切铜箔焊接的方式来实现,由于铜箔厚度与印制电路板铜箔厚度

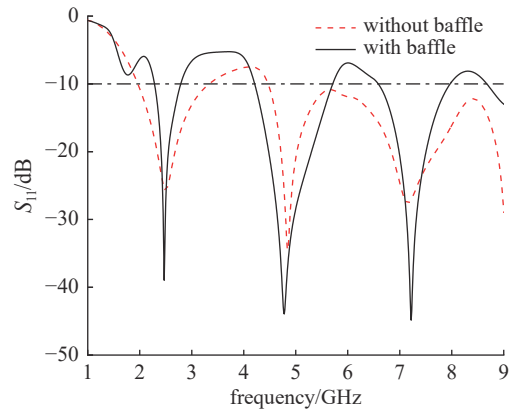


Fig. 5 The parameters  $S_{11}$  of antenna with or without baffle

图 5 挡板对天线反射系数的影响

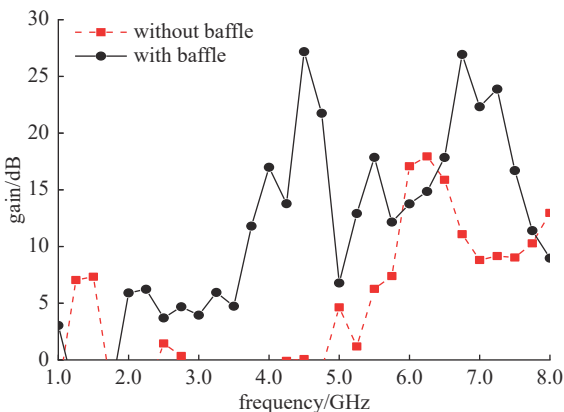


Fig. 7 Gain of antenna at different frequencies

图 7 不同频率处天线增益

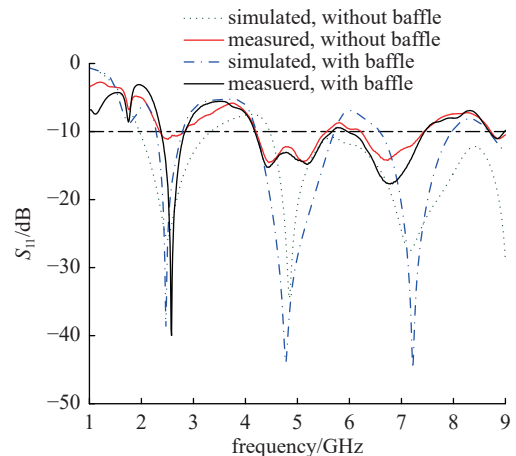


Fig. 8 Simulated and measured  $S_{11}$

图 8 天线仿真和实测的  $S_{11}$

不一致,致使焊接处光洁平滑度低,形成电磁波的主要反射点,因此反射系数增大,从而导致了在高频段  $S_{11}$  测量值比仿真值高 15~20 dB。另外电缆头(模拟仿真时没有电缆头)焊接处也会引起电磁波反射,成为  $S_{11}$  测量值增大的原因。后续研究,我们将尽量提高加工精度和质量,减少误差,提高实验和仿真数据吻合度。

## 5 结 论

本文设计了一款应用于手持式谐波雷达的三频段单极子天线。天线由  $50\ \Omega$  的微带传输线通过共面波导馈电的方式,对具有对称结构的共面波导馈电。通过加载 L 型辐射枝节及接地平面开三角形切口的方法,使天线获得多频段工作的特性。天线的尺寸较小、结构紧凑、便于集成加工,适合应用于无线通讯。

### 参考文献:

- [1] Hosseini H, Hassani H R, Amini M H. Miniaturised multiple notched omnidirectional UWB monopole antenna[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(8): 472-474.
- [2] Goswami C, Ghatak R, Poddar D R. Multi-band bisected Hilbert monopole antenna loaded with multiple subwavelength split-ring resonators[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, 12(10): 1719-1727.
- [3] Bag B, Biswas S, Sarkar P P. A wide circularly polarized dual-band isosceles trapezoidal monopole antenna with modified ground plane[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2022, 35: e5037.
- [4] 杨敏, 陈新伟, 张文梅. 基于共面波导馈电的三频单极子天线[J]. *测试技术学报*, 2015, 29(3): 195-199. (Yang Min, Chen Xinwei, Zhang Wenmei. Tri-band monopole antenna based on CPW-feed[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2015, 29(3): 195-199)
- [5] 杨洋, 刘元安, 吴帆. 一种非对称馈电的小型化高隔离度分集天线[J]. *北京邮电大学学报*, 2019, 42(3): 51-57. (Yang Yang, Liu Yuan'an, Wu Fan. An asymmetric feed compact high isolation diversity antenna[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2019, 42(3): 51-57)
- [6] Yang Yang, Liu Yuan'an, Wu Fan. A quad-band compact diversity antenna for mobile handset devices[J]. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2016, 9(6): 363-372.
- [7] 王丽黎, 杜忠红, 杨海龙, 等. 具有高隔离度的双陷波超宽带多入多出天线[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 063007. (Wang Lili, Du Zhonghong, Yang Hailong, et al. Dual band-notch ultra-wideband multiple-input multiple-output antenna with high isolation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 063007)
- [8] 王铭, 郑宏兴, 邓东民. 边缘开槽多频段天线设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2016, 14(4): 599-602,620. (Wang Lu, Zheng Hongxing, Deng Dongmin. Design of multi-band antenna slotting on the edge[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016, 14(4): 599-602,620)
- [9] Hasan M N, Chu S, Bashir S. A DGS monopole antenna loaded with U-shape stub for UWB MIMO applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(9): 2141-2149.
- [10] Du Chengzhu, Yang Zhipeng, Zhong Shunshi. A compact coplanar waveguide-fed band-notched four-port flexible ultra-wide band-multi-input-multi-output slot antenna for wireless body area network and internet of things applications[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022, 32: e23289.
- [11] 严冬, 郭琪富, 程威, 等. 一种可应用于WLAN的高隔离度双频MIMO天线设计[J]. *电子元件与材料*, 2020, 39(6): 91-96. (Yan Dong, Guo Qifu, Cheng Wei, et al. Design of a high-isolation dual-frequency MIMO antenna for WLAN[J]. *Electronic Components and Materials*, 2020, 39(6): 91-96)
- [12] 焦天奇, 孟祥余, 郝术苗. 一种基于T形槽的单极子超宽带天线: CN106876960A[P]. 2017-06-20. (Jiao Tianqi, Meng Xiangyu, Hao Shumiao. A monopole UWB antenna based on t slot. CN106876960A[P]. 2017-06-20)
- [13] Koerner M A, Rogers R L. Gain enhancement of a pyramidal horn using E- and H-plane metal baffles[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(4): 529-538.
- [14] Guo Qingyi, Wong H. A dual-polarized Fabry-Pérot antenna with high gain and wide bandwidth for millimeter-wave applications[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(4): 599-608.
- [15] 于有海, 尹波, 张晓玲, 等. 应用于体域网通信的低SAR值天线设计[J]. *电子器件*, 2020, 43(5): 978-984. ((Yu Youhai, Yin Bo, Zhang Xiaoling. A low SAR antenna designed for WBAN communications[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2020, 43(5): 978-984)