

南敬昌, 王明寰. 超宽带阶梯形微带单极子天线的设计与研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(2): 225-230. DOI: [10.13443/j.cjors.2019111701](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019111701)

NAN J C, WANG M H. Design and research of ultra-wideband stepped microstrip monopole antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(2): 225-230. (in Chinese) DOI: [10.13443/j.cjors.2019111701](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019111701)

超宽带阶梯形微带单极子天线的设计与研究

南敬昌 王明寰

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 葫芦岛 125105)

摘 要 针对当前已有超宽带 (ultra-wideband, UWB) 微带单极子天线带宽窄、尺寸大等缺陷, 设计了一款小型化 UWB 阶梯形微带单极子天线, 采用开槽的矩形辐射贴片、阶梯形微带馈电线和缺陷地面结构 (defected ground structure, DGS) 实现良好的 UWB 特性. 对天线的回波损耗、电压驻波比 (voltage standing wave ratio, VSWR)、辐射方向图及增益进行了仿真计算和优化设计, 实测显示, 天线的工作频段为 2.6~22.1 GHz, 增益最大值为 12.9 dBi, 仿真和实测结果基本吻合. 所设计天线结构简单、覆盖频率广、尺寸小、工作频带内具有良好的辐射特性, 表明该天线适用于各种 UWB 通信系统中.

关键词 小型化; 超宽带 (UWB); 阶梯形微带馈电线; 单极子天线; 缺陷地面结构 (DGS)

中图分类号 TN822⁺.8

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2021)02-0225-06

DOI [10.13443/j.cjors.2019111701](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019111701)

Design and research of ultra-wideband stepped microstrip monopole antenna

NAN Jingchang WANG Minghuan

(School of Electronics and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract Aiming at the current shortcomings of ultra-wideband (UWB) microstrip monopole antennas such as narrow bandwidth and large size, a miniaturized ultra-wideband stepped microstrip monopole antenna is designed. The good UWB characteristic is obtained by using rectangular radiation patch slots, a stepped microstrip feeder and defective ground structure (DGS). The antenna return loss, voltage standing wave ratio (VSWR), radiation pattern and gain were simulated and optimized. The measured results show that the operating frequency range of antenna is 2.6–22.1 GHz, and the maximum gain is 12.9 dBi. The simulation and measurement results basically match. The antenna has simple structure, wide coverage frequency, compact size and good radiation characteristics in the operating frequency band, indicating that it is suitable for various UWB communication systems.

Keywords miniaturization; ultra-wideband(UWB); stepped microstrip feeder; monopole antenna; defective ground structure(DGS)

引 言

随着数据通信的迅速发展, 低成本无线系统已成为人们的首选. 特别是在短距离通信中, 超宽带 (ultra-wideband, UWB) 无线系统因具有功耗低、

保密性好、天线结构简单、数据传输速率高、系统设计简单和成本低等优点, 常被用于短距离通信、遥感等^[1]. 平面天线, 特别是单极子天线, 由于其频带宽、体积小、数据传输率高、易与射频电路集成等优点而受到广泛的关注^[2]. 通常, 平面微带天线

收稿日期: 2019-11-17

资助项目: 国家自然科学基金 (61971210); 辽宁特聘教授项目 (551806006); 企业合作项目 (基于物联网的矿山车辆智慧防碰撞系统研究)

联系人: 王明寰 E-mail: 944959060@qq.com

附着在一个薄介质基板上,一面附上金属薄层作为接地板,另一面用光刻腐蚀方法制成一定形状的金属贴片^[2].金属贴片可以是矩形^[3]、三角形^[4]、圆形^[5]或其他形状^[6-8].尽管微带贴片天线具有许多吸引人的特性,但也存在一些缺点.例如,窄带或有限带宽的微带贴片天线,不适合现代无线通信的应用^[9].目前,为了提高平面微带贴片天线的带宽,采用最多的是天线结构开槽方法,这种方法具有结构简单、对工作频段内阻抗匹配影响较小和不会增加天线尺寸等优点^[10].然而,目前国内外大多数 UWB 天线设计的工作频段通常为 3~12 GHz,且体积较大^[11],很少有带宽较大但尺寸较小的天线.

文献[12]采用结构为圆形的辐射贴片,FR4 介质基板,尺寸 42 mm×50 mm×1.5 mm,来实现 2.7~10.1 GHz 的 UWB 特性.文献[13]采用在辐射贴片开三角形槽和矩形槽,增加 U 形短接线和部分接地平面开矩形槽的方法,Taconic RF-30 介质基板,尺寸 40 mm×40 mm×1.5 mm,实现 3.2~11.5 GHz 的 UWB 特性.文献[14]采用叉子形辐射贴片,FR4 介质基板,尺寸 30 mm×30 mm×1.6 mm,实现 3.4~12 GHz 的 UWB 特性.上述天线带宽较小且尺寸较大.

针对上述文献中天线设计存在的不足,本文提出一种阶梯形微带线馈电的小型平面单极子 UWB 天线设计方案,该天线的尺寸仅为 13 mm×22 mm×0.8 mm,通过采用阶梯形微带线馈电,具有三角形缺槽的矩形辐射贴片和缺陷地面结构(defected ground structure, DGS),使得天线可以工作在 2.6~22.1 GHz 的频段内,来提高带宽的同时实现天线小型化.

1 天线设计

1.1 天线模型

紧凑型 UWB 天线,其部分设计参数可以利用与 UWB 天线低频段边缘频率 2.6 GHz 相对应的波长 λ_L 来计算.

矩形辐射贴片长度 L_p 满足

$$\frac{\lambda_L}{8} \leq L_p \leq \frac{\lambda_L}{4}. \quad (1)$$

天线的有效长度为矩形辐射贴片长度 (L_p) 与阶梯形微带馈电线长度 ($L_1+L_2+L_3$) 之和,且满足

$$L_p + L_1 + L_2 + L_3 \approx \frac{\lambda_L}{3}. \quad (2)$$

馈电间隙的长度为部分接地平面长度 L_g 与阶

梯形微带馈电线长度 ($L_1+L_2+L_3$) 之差^[15],且满足

$$0.01\lambda_L \leq (L_1 + L_2 + L_3 - L_g) \leq 0.02\lambda_L. \quad (3)$$

介质基板厚度 H 为

$$H \approx 0.01\lambda_L. \quad (4)$$

该天线是由 50 Ω 阶梯形微带线馈电的带有三角形缺槽的矩形平面和 DGS 组成的平面单极子天线.天线结构的设计演变过程如图 1 所示.图 2(a) 和图 2(b) 分别为天线的正面和背面结构.通过 HFSS15.0 仿真软件,对 UWB 天线结构中的各个参数进行优化设计,最终确定天线尺寸为 13 mm×22 mm×0.8 mm.其他参数如表 1 所示.

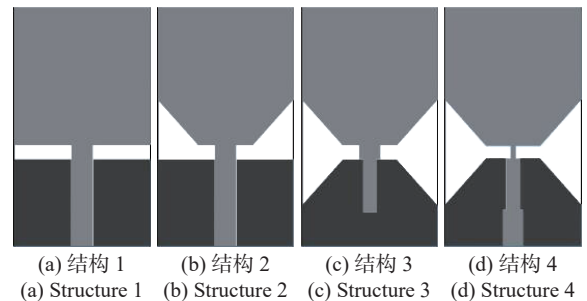


图 1 天线结构的设计演变过程

Fig. 1 The design evolution of the antenna structure

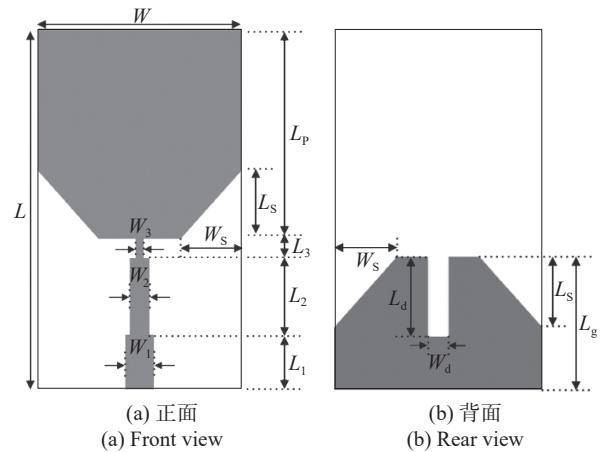


图 2 天线结构图

Fig. 2 The antenna structure

表 1 天线的尺寸

Tab. 1 Size of the antenna

mm

参数	取值	参数	取值	参数	取值
L	22	W	13	H	0.8
L_p	12	W_1	1.5	W_2	1.3
W_3	1	L_1	3	L_2	5
L_3	2	L_s	4.2	W_s	3.5
L_g	8.7	L_d	3.7	W_d	1.3

1.2 天线结构分析

使用电磁仿真软件 ANSYS HFSS15.0 对天线进行建模、仿真和优化,所得图1中四种天线结构的回波损耗 S_{11} 如图3所示。

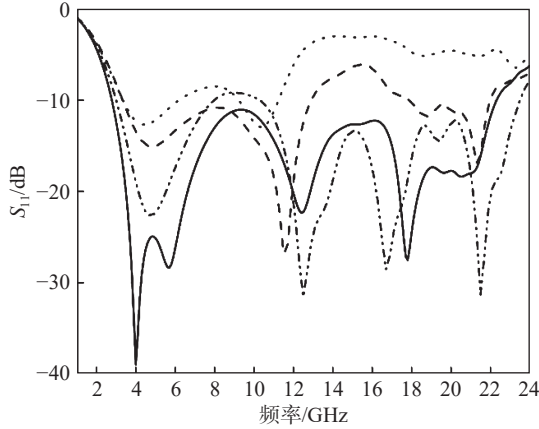


图3 四种天线结构的回波损耗

Fig. 3 The S_{11} of four structures

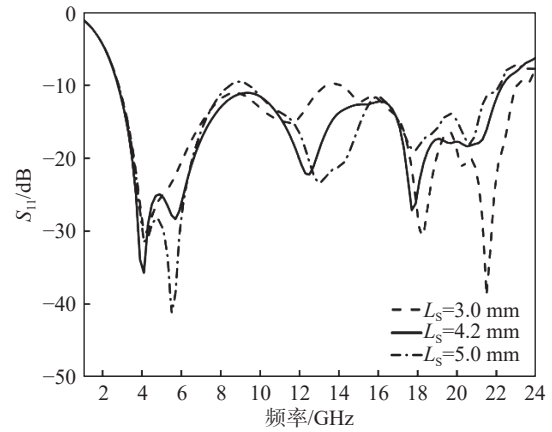
常见的微带单极子天线多采用矩形辐射贴片结构。从图3可以看出:结构1的带宽为3.4~6.1 GHz,通过对结构1中的矩形辐射贴片进行下边缘去三角形处理,增大了天线表面电流路径,使结构2的带宽增大至3.4~12.9 GHz;进一步对结构2的部分接地平面进行开矩形槽和上边缘去三角形处理,使结构3的带宽为3~7.9 GHz和10.3~23.6 GHz,8~10.2 GHz的 S_{11} 大于-10 dB,导致整体的带宽变小;最后将结构3中的矩形微带馈电线改为阶梯形,使结构4在4 GHz和6 GHz上产生谐振,8~10.3 GHz内的 S_{11} 小于-10 dB,带宽增大为2.8~22.3 GHz。

结构1到结构4的设计演变过程说明,对天线的辐射贴片、微带馈电线和部分接地平面进行开槽和结构改变可有效提高天线的带宽。下面将对影响天线带宽的参数及其原理做进一步分析。

1.3 DGS对天线性能的影响

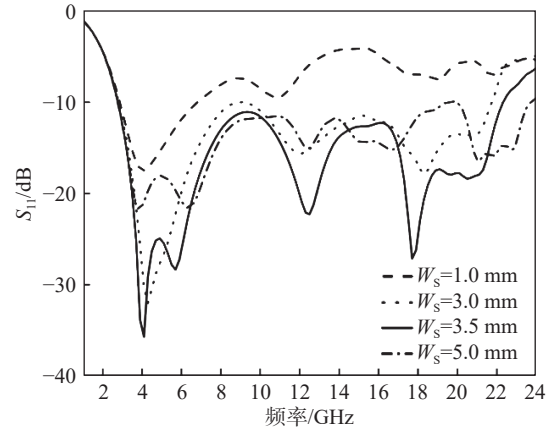
为了研究 DGS 对天线回波损耗的影响,在其他参数不变的情况下,图4(a)和(b)分别给出截去的三角形长和宽不同时的天线回波损耗。从图4(a)可以看出:当 L_s 为3 mm和5 mm时,在2.8~22.3 GHz内存在大于-10 dB的频段;而当 $L_s=4.2$ mm时,实现了最大带宽以及良好的阻抗匹配。从图4(b)可以看出:当 $W_s=3$ mm时,在9.1 GHz的 S_{11} 大于-10 dB;当 $W_s=5$ mm时,在19.5~19.9 GHz内的 S_{11} 大于-10 dB;而当 $W_s=3.5$ mm时,实现了最大带宽以及良好的阻抗匹配。图5为矩形槽长不同时的天线回波损耗。从图5可以看出:当 L_d 为3.7 mm和4 mm时,带宽近

似;但是当 $L_d=3.7$ mm时,在14~22 GHz内的 S_{11} 更小,可避免在实际测试中因 S_{11} 接近-10 dB而使得实测的带宽与仿真结果相差较大。因此,得到天线的最优参数为 $L_s=4.2$ mm、 $W_s=3.5$ mm和 $L_d=3.7$ mm。



(a) 不同 L_s

(a) Different L_s



(b) 不同 W_s

(b) Different W_s

图4 截去的三角形长和宽不同时的天线回波损耗

Fig. 4 The S_{11} in different width of triangle W_s

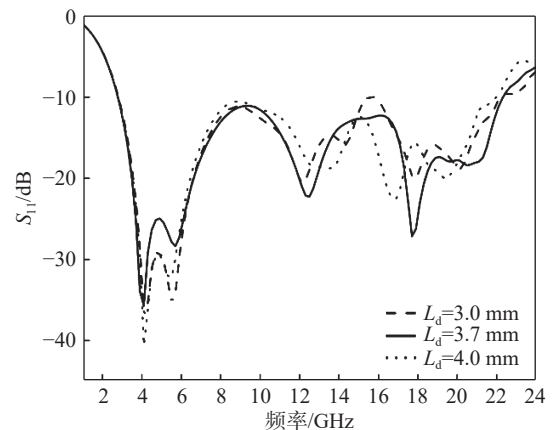


图5 不同矩形长 L_d 对应的天线回波损耗

Fig. 5 The S_{11} in different length of rectangle L_d

2 实验结果分析

2.1 实测结果

制作天线实物如图6所示. 采用F4B介质基板, 介电常数 $\epsilon_r=2.2$, 损耗角 $\tan \delta=0.001$, 厚度 0.8 mm. 将SMA接头连接到天线阶梯形微带馈电线的末端, 使用矢量网络分析仪对天线进行实际测试, 回波损耗和电压驻波比 (voltage standing wave ratio, VSWR) 仿真与测试曲线如图7所示. 从图7(a)可以看出: 仿真 $S_{11}<-10$ dB的带宽为 2.8~22.3 GHz; 实测 $S_{11}<-10$ dB的带宽为 2.6~22.1 GHz. 从图7(b)可以看出, 仿真与实测的VSWR在整个工作频段内都小于2, 实测结果与仿真结果基本吻合. 实测与仿真结果存在误差可能是由于在仿真过程中, 未考虑到SMA接头及使用的介质基板材料对天线性能的影响.

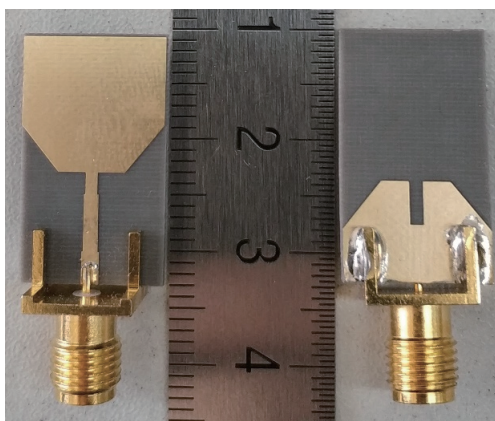
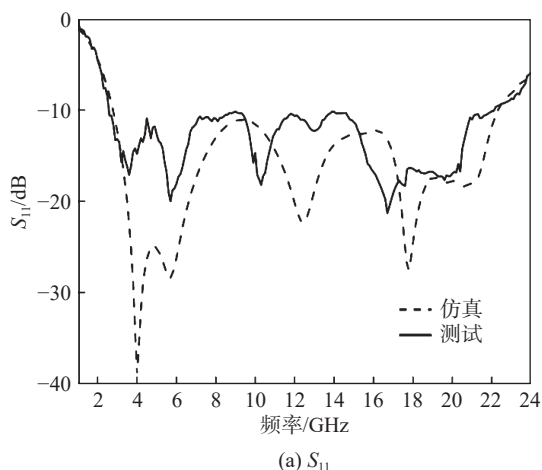
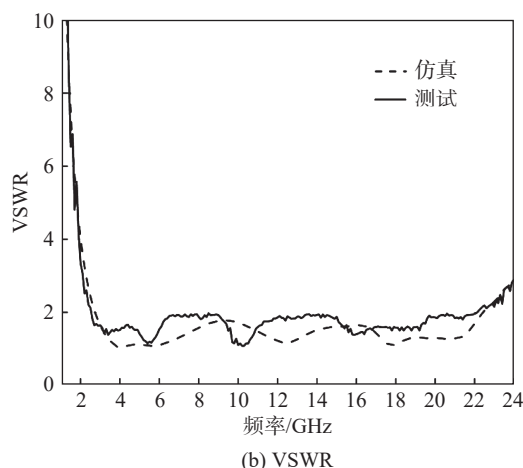


图6 天线实物图

Fig. 6 Prototype of the antenna



(a) S_{11}



(b) VSWR

图7 回波损耗和VSWR仿真与测试对比

Fig. 7 The simulation and measurement comparison of S_{11} and VSWR

2.2 宽带实现原理分析

为了进一步理解宽带实现的原理以及阶梯形微带馈电线、截去的边缘三角形和矩形槽与带宽之间的对应关系, 对天线表面辐射贴片和部分接地平面的电流分布进行仿真. 图8为在通带内5 GHz、10 GHz、15 GHz和20 GHz频率下天线的电流分布情况. 由接地平面电流的变化可知, 地面截去的三角形和矩形槽的大小控制着平面微带单极子天线回波损耗的好坏. 由图8可知, 在5 GHz处高强度电流主要聚集在阶梯形微带馈线上. 随着频率的升高, 阶梯形微带馈线上的高强度电流集中在每个阶梯段上, 在截去边缘三角形的矩形辐射贴片

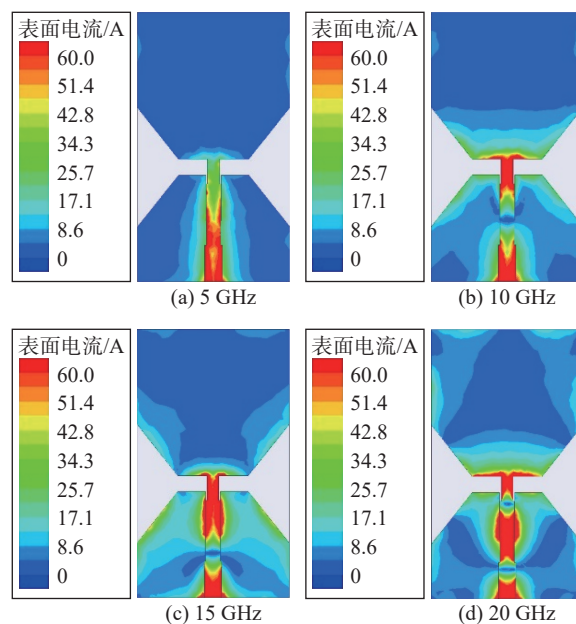


图8 不同频率下天线表面电流分布

Fig. 8 The current distribution in antenna surface at different frequencies

上电流分布明显扩宽, 能量可以辐射到外部空间, 这意味着通过增大天线表面电流路径, 可使天线的带宽有所提高, UWB 天线可以实现正常工作.

2.3 辐射特性及增益分析

为了满足实际应用要求, UWB 天线不仅仅需要具有较大的带宽, 还需要在通带范围内具有全向辐射特性. 在天线的通带内选取 4 个频点, 分别为 5 GHz、10 GHz、15 GHz 和 20 GHz, 对其远场 E 面和 H 面进行仿真, 结果如图 9 所示. 从 (a) 和 (b) 可以看出: 在 E 面上可以观察到形状为“8”字的定向辐射方向图; 在 H 面上可以观察到近似圆形的全向辐射方向图. 从 (c) 和 (d) 可以看出: 在高频率模式下, 天线的辐射方向图虽然会产生形状退化和变形的现象; 但在 E 面仍然呈现定向辐射特性, H 面仍然具有全向辐射特性, 符合 UWB 系统的工作要求, 可应用于各种 UWB 通信系统中.

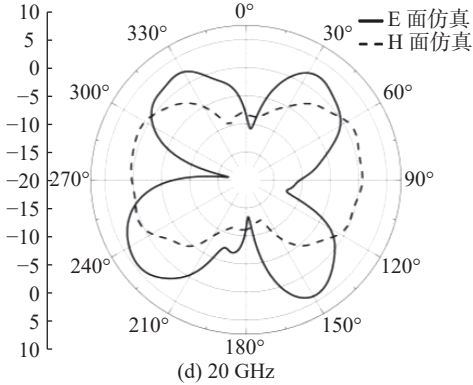
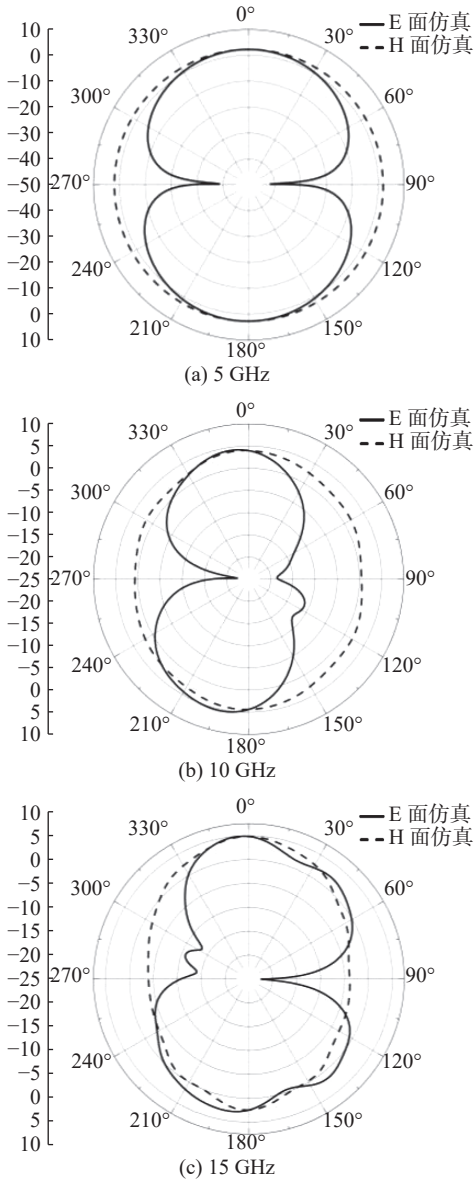


图 9 天线方向图仿真结果

Fig. 9 The simulation results of antenna patterns

图 10 给出了天线增益的仿真与实测结果. 可以看出, 实测和仿真结果基本吻合. 在低频点 2.6 GHz 处, 天线的测试增益为 -1.9 dBi. 随着频率的增加, 增益增大, 并逐渐趋于平缓, 在 22 GHz 处达到 12.9 dBi. 说明在整个通带范围内, 在减小天线尺寸的同时, 能够保持良好的增益和 UWB 特性.

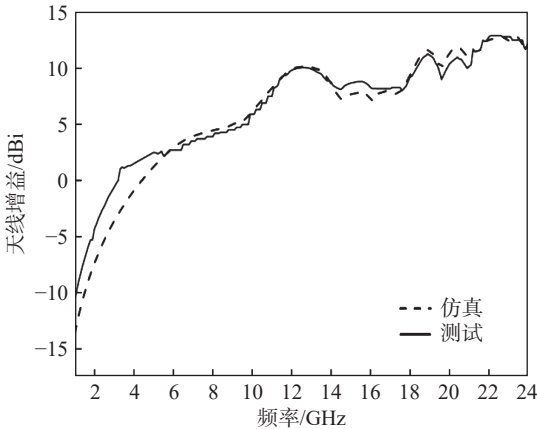


图 10 天线增益仿真与测试对比

Fig. 10 The simulation and measurement comparison of antenna gain

最后, 将本文天线与文献 [1]、[11]、[12]、[13]、[14] 中所提出的 UWB 天线从尺寸、带宽、增益三个方面进行了详细对比分析, 对比结果如表 2 所示.

表 2 本文与文献中天线参数对比

Tab. 2 Comparison of antenna parameters among references and this paper

文献	尺寸	带宽/GHz	增益/dBi
[1]	47 mm×35 mm×1.6 mm	2.6~12.0	0.9~5.8
[11]	24 mm×12 mm×1.0 mm	3.1~13.0	-2.0~5.0
[12]	42 mm×50 mm×1.5 mm	2.7~10.1	-7.0~7.0
[13]	40 mm×40 mm×1.5 mm	3.2~11.5	0~8.0
[14]	30 mm×30 mm×1.6 mm	3.4~12.0	0~4.6
本文	13 mm×22 mm×0.8 mm	2.6~22.1	-1.9~12.9

从表 2 可以看出: 对比文献中的 UWB 天线, 本文设计的 UWB 天线在保证较小尺寸的前提下, 带宽更宽; 文献 [1] 设计的 UWB 天线, 增益虽好但尺寸近乎是本文设计的两倍, 且带宽小于本文设计; 文献 [11] 设计的 UWB 天线尺寸与本文设计相近似, 但是带宽要小于本文设计。

3 结 论

通过仿真计算和设计优化, 提出了一种尺寸为 $13\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 阶梯形微带线馈电的小型平面单极子 UWB 天线。该天线不仅结构简单、价格低廉、体积小, 符合当前通信设备日益小型化的需求, 且带宽更宽, 覆盖范围远远超出 FCC 授权的 UWB 频带。该天线还具有良好的辐射特性和增益, 非常适合于无线通信, 可为实际通信设备提供优化方案, 具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] LIANG J, GUO L, CHIAU C C, et al. Study of CPW-fed circular disc monopole antenna for ultra wideband applications[J]. *IEE proceedings: microwaves, antennas and propagation*, 2005, 152(6): 520-526.
- [2] AZIM R, ALDHAHERI R W, SHEIKH M M, et al. An effective technique based on off-set fed patch to enhance the bandwidth of microstrip planar antenna[J]. *Microwave and optical technology letters*, 2016, 58(5): 1221-1226.
- [3] 唐志军, 何怡刚, 詹杰, 等. 紧凑型共面波导馈电的超宽带印刷天线设计[J]. *电波科学学报*, 2012, 27(3): 572-577.
TANG Z J, HE Y G, ZHAN J, et al. Design of coplanar waveguide fed printed antenna with compact size for ultra-wideband wireless applications[J]. *Chinese journal of radio science*, 2012, 27(3): 572-577. (in Chinese)
- [4] ZARRABI F B, SHIRE A M, RAHIMI M, et al. Ultra-wideband tapered patch antenna with fractal slots for dual notch application[J]. *Microwave and optical technology letters*, 2014, 56(6): 1344-1348.
- [5] LI Z Y, ZHU X S, YIN C Y, et al. A broadband circularly polarized monopole antenna[J]. *International journal of RF and microwave computer-aided engineering*, 2019, 29(6): e21687.
- [6] ZHAI H, OU J, LI T, et al. A compact ultrawideband antenna with two band-notches[J]. *Microwave and optical technology letters*, 2013, 55(3): 583-586.
- [7] 胡章芳, 胡银平, 罗元, 等. 具有陷波特性的改进 Sierpinski 分形超宽带天线[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(6): 1520-1524.
HU Z F, HU Y P, LUO Y, et al. Modified Sierpinski fractal UWB antenna with band-notched characteristic[J]. *Journal of electronics & information technology*, 2017, 39(6): 1520-1524. (in Chinese)
- [8] 曹新宇, 张金玲, 杨虹蓁. 新型小尺寸双陷波超宽带天线设计[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(3): 548-551+566.
CAO X Y, ZHANG J L, YANG H Z. New small size ultra-wideband antenna having two frequency bands notch function[J]. *Chinese journal of radio science*, 2014, 29(3): 548-551+566. (in Chinese)
- [9] TIWARI R N, SINGH P, KANAUIA B K. A modified microstrip line fed compact UWB antenna for WiMAX/ISM/WLAN and wireless communications[J]. *AEU-international journal of electronics and communications*, 2019, 104: 58-65.
- [10] 南敬昌, 刘银玲, 高明明, 等. 具有双陷波特性的蜂窝结构分形超宽带天线[J]. *电波科学学报*, 2019, 34(2): 172-179.
NAN J C, LIU Y L, GAO M M, et al. Beehive fractal ultra-wideband antenna with dual band-notched characteristics[J]. *Chinese journal of radio science*, 2019, 34(2): 172-179. (in Chinese)
- [11] 钱祖平, 周锋, 彭川, 等. 一种小型平面超宽带天线的设计与实现[J]. *电波科学学报*, 2010, 25(5): 920-924.
QIAN Z P, ZHOU F, PENG C, et al. Design and realization of compact planar ultra-wideband antenna[J]. *Chinese journal of radio science*, 2010, 25(5): 920-924. (in Chinese)
- [12] LIANG J, CHIAU C C, CHEN X, et al. Study of a printed circular disc monopole antenna for UWB systems[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2005, 53(11): 3500-3504.
- [13] 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.
- [14] PERAM A, REDDY A S R, PRASAD M N G. Miniaturized single layer ultra wide band (UWB) patch antenna using a partial ground plane[J]. *Wireless personal communications*, 2019, 106(3): 1275-1291.
- [15] KUNDU S. Experimental study of a printed ultra-wideband modified circular monopole antenna[J]. *Microwave and optical technology letters*, 2019, 61(5): 1388-1393.

作者简介

南敬昌 (1971—), 男, 河南人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为射频电路与器件、多媒体信息编码、通信系统仿真等。

王明寰 (1997—), 男, 辽宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信。