

应用于电子侦收的小型化高增益超宽带定向天线

马新生, 郭萌*, 张正谦, 孔萌, 郭刚涛, 张石岩

西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2023年7月22日; 录用日期: 2023年8月22日; 发布日期: 2023年8月31日

摘要

为了解决电子侦收对于超宽带的定向需求, 本文提出了一种新型小尺寸、低剖面、双元蝶形超宽带(UWB)定向天线, 高度仅为 $1/5$ 波长, 宽度为 $1/2$ 波长。该天线采用 $\pm 45^\circ$ 交叉极化的双元四叶草蝶形天线, 通过两组类偶极子单元和矩形寄生枝节来扩展天线阻抗带宽, 并用同轴线过孔馈电, 最后在辐射单元底部加入反射器, 实现定向辐射。仿真和实测结果表明, 在 $2.84\sim 4.78$ GHz的工作频段内, 所设计天线满足回波损耗大于 10 dB, 在 $1.8\sim 6$ GHz频段内均满足 -5 dB以下, 基本覆盖电子侦收频段; 3 dB波瓣宽度为 94° , 阻抗带宽相对值为 60% , 带内增益为 $8.5\sim 10.5$ dBi, 峰值增益可达 10.5 dBi, 辐射效率在 70% 左右, 仿真与实测结果一致性良好, 是一种可应用于电子侦收的小型高增益超宽带(UWB)定向天线。

关键词

电子侦收, 定向天线, 交叉极化, 高增益, 小型化, 超宽带

Miniaturized High-Gain Ultra-Wideband (UWB) Directional Antenna Applied to Spying System Micro-Base Station

Xinsheng Ma, Meng Guo*, Zhengqian Zhang, Meng Kong, Gangtao Guo, Shiyan Zhang

Xi'an Aerospace Remote Sensing Date Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 22nd, 2023; accepted: Aug. 22nd, 2023; published: Aug. 31st, 2023

Abstract

In order to meet the directional demand of spying system for ultra-wideband (UWB), this paper pro-
*通讯作者。

文章引用: 马新生, 郭萌, 张正谦, 孔萌, 郭刚涛, 张石岩. 应用于电子侦收的小型化高增益超宽带定向天线[J]. 天线学报, 2023, 12(3): 29-38. DOI: 10.12677/ja.2023.123004

poses a novel small size, low profile, dual butterfly ultra-wideband (UWB) directional antenna, which is only $1/5 \lambda_0$ high and $1/2 \lambda_0$ wide. The antenna adopts a dual-element four-leaf clover butterfly antenna with $\pm 45^\circ$ cross-polarization. The impedance bandwidth of the antenna is extended by two groups of dipole-like elements and rectangular parasitic branches. The coaxial line is fed through a hole, and a reflector is added at the bottom of the radiation element to achieve directional radiation. The simulation and measurement results show that the designed antenna can meet the echo loss greater than 10 dB in the 2.84~4.78 GHz band and below -5 dB in the 1.8~6 GHz band, basically covering the spying system. The 3 dB lobe width is 94° , the relative value of impedance bandwidth is 60%, the in-band gain is 8.5~10.5 dBi, the peak gain can reach 10.5 dBi, and the radiation efficiency is about 70%. The simulation results are in good agreement with the measured results. It is a small high-gain ultra-wideband (UWB) directional antenna applied to spying system micro-base station.

Keywords

Spying System, Directional Antenna, Cross Polarization, High Gain, Miniaturization, UWB

Copyright © 2023 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

目前应对复杂的电磁环境和精准打击的要求,需要作战设备不仅具有单一的干扰、探测功能,同时还需要满足多种信息传输处理功能。而天线,是实现这一跨越式提升不可或缺的组件。而且,在实战中,一般都不能事先知道敌方雷达波的辐射方向,需要在各个方向上同时进行侦察,因此天线不仅要满足定向辐射的远场方向图特性,还应满足宽频带、低剖面、方向图稳定等诸多要求。

为了设计高效的宽带天线[1],需要增加天线尺寸,这与天线的小型化需求相矛盾,因此需要研究天线的小型化、宽带/多频段、高辐射效率的设计方法。双极化天线被广泛用于提高无线链路的信道容量和稳定性,以及用于校准。常见的双极化喇叭天线[2]、交叉偶极[3]、独立可控[4]、波导天线[5]、维瓦尔第天线[6]、准八木[7]、喇叭[8]等,这几类天线都有很好的工作带宽和定向辐射特性,但普遍存在着体积过大的缺点,使其应用受到很大的限制。因此,双极化贴片定向天线因为小型化的优势被广泛研究应用。

在许多文献中有大量[1] [2] [3] [8] [9]关于单向辐射模式宽带天线的研究报道。在文献[2]中,采用共面波导馈电结构,制作了工作频带为 3~6 GHz 的对数周期阵列天线 $|S_{11}| < -10$ dB。在文献[3]中提出了一种宽频带背腔领结天线,采用三角形领结偶极子和简单的微带向平行带的垂直过渡,使其驻波比(VSWR)带宽达到 91.4%,同时,采用大腔体和环形结构来增强单向辐射模式。在文献[5]中介绍了一种超宽带平面准八木天线,该天线采用一种新的微带到槽线的过渡结构,工作频段为 3.6~11.6 GHz,增益为 4.3~6.8 dBi。在文献[10]中提出了一种宽带单向四元天线,该天线采用集成巴伦和波纹边界的辐射单元,对驻波比具有 83.7%的宽阻抗带宽。然而,前后比(FBR)在工作频段内小于 10 dB。值得注意的是,本文提出的天线是传统四方天线[10]的演变,由四个相同的贴片(辐射元件)、一个同轴电缆巴伦(馈电结构)和一个接地面(反射面)组成,它的工作带宽为 50%。文献[11] [12]中有一些技术可以拓宽其操作波段,但是工作波段的辐射模式变得不可接受。在文献[11] [13] [14] [15] [16]中,在贴片下增加一个调谐板,并修改四个贴片,天线的工作频带为 800~2200 MHz。在波段的低端可以获得良好的单向图案,同时在波段的顶端可以观察到+z方向的倾角。

本文在已有天线小型化、宽带化、高增益技术的基础上，提出了双元蝶形小型、宽带定向天线。所设计的双极化宽带定向天线利用 $\pm 45^\circ$ 交叉极化实现 2.84~4.78 GHz 下 $|S_{11}| < -10$ dB，天线系统的两个天线单元之间的互耦在所需工作频段内均低于-20 dB，可以覆盖 1.8~6 G 频段，适用于电子侦收通信。

本文第一部分介绍双元四叶草蝶形天线的设计原理，接着介绍该天线的设计方案和天线实物及其尺寸，第三部分是测试结果展示，分为传导测试和辐射测试两部分，第四部分为结论与讨论。

2. 研究方法

2.1. 设计原理

本文采用渐变电长度路径法对于超宽带(ultra-wideband, UWB) [11]定向天线而言,要实现高带宽低反射,目的就是让天线工作在更多的谐振点上,对于一般的传统电偶极子天线而言,其总长度约为半个工作波长,即半波振子,故一个振臂的长度约为四分之一工作波长[10]。同理如图 1 所示,对于本课题研究的定向天线($\pm 45^\circ$ 交叉极化)上臂的总长度,即从馈电到辐射单元边界的长度一般略小于 1/4 工作波长 λ [13] [14]。

为了实现超宽带的特性,要让天线辐射振子上产生尽可能多的工作频点,所以一般采取渐变电流路径长度的方式,具体来说就是图中第一电长度 L_1 (略小于 λ_1 第一波长)对应产生其工作频率 F_1 , 第二电长度 L_2 (略小于 λ_2 第二工作波长)对应产生其工作频率 F_2 , 第三电长度 L_3 (略小于 λ_3 第三工作波长)对应产生其工作频率 F_3 , 以此以微分单元的想法产生大量不同的电长度 L , 一个电长度对应一个频点 F , 不断的各频点叠加连续,形成超宽带 UWB。

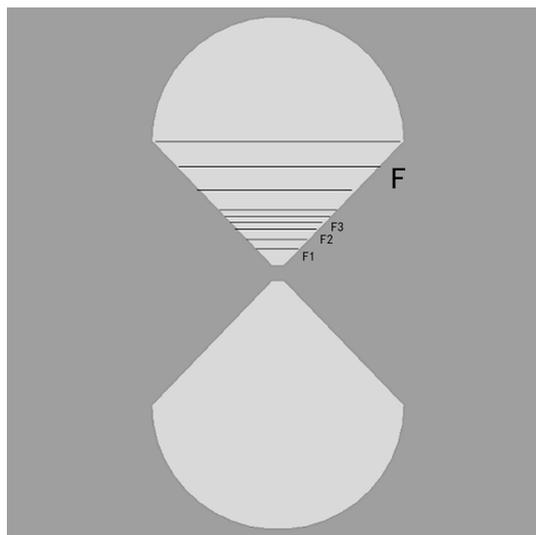


Figure 1. Tapered electrical length ultra-wideband antenna

图 1. 渐变电长度超宽带天线

2.2. 设计方案

基于上述分析,为实现小型宽带化,本文设计一种双元蝶形定向天线。提出了一种交叉馈电型,提高了天线间隔离度,通过渐变四叶草结构,不断以微分的形式逐渐增加横向电流路径长度,使四叶草结构覆盖大量工作频点,实现了天线的宽带化。同时,在四个四叶草上端引入矩形枝节,实现阻抗匹配,以进一步扩宽低频带宽,另一方面延长微带馈线长度,降低天线反射系数的同时,增加了天线的频带宽度。计算及实测结果表明,天线 $|S_{11}| \leq -10$ dB 的阻抗带宽为 2.84 GHz~4.78 GHz,实现了天线的小型化和宽带化,且具有高增益特性。

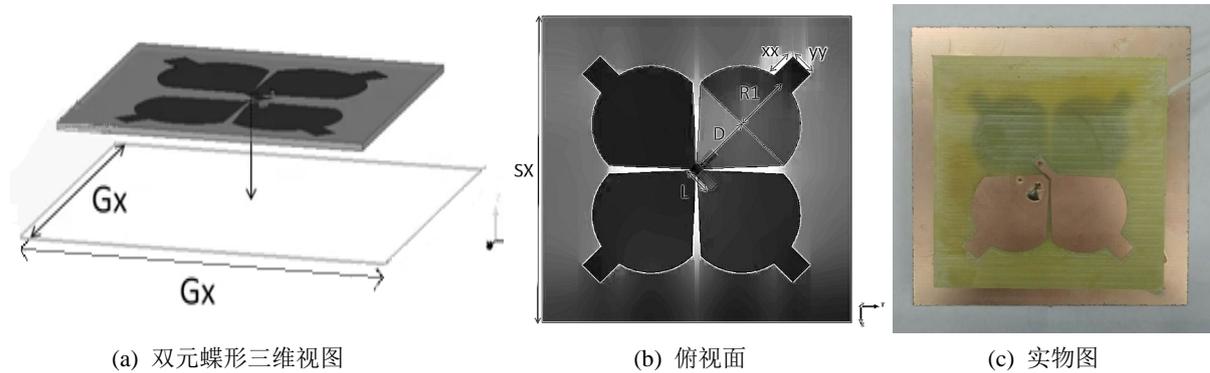


Figure 2. Structure diagrams of dual-element four-leaf clover directional antenna
图 2. 双元四叶草定向天线的结构图

图 2 给出了本文提出的宽带低剖面双元碟形定向天线的结构图示意图。该四叶草天线印刷在相对介电常数为 4.4, 损耗正切角为 0.02, 厚度为 1 mm 的 FR-4 介质板上, 介质板的尺寸为 50 mm*50 mm*1 mm, 反射面尺寸为 70 mm*70 mm*1 mm, 实现了天线的小型化和宽带化, 且具有高增益特性。

图 2(a) 为设计天线的三维视图。天线采用上下馈点交叉形结构实现天线的宽频带工作, 调整微带馈线长度 L 和宽度 W , 降低天线反射系数的同时, 找到了确保带宽的最大值; 在此结构上(依据四叶草总长度 $D + R1 + L$ 要略小于 $1/4$ 波长 λ)对辐射单元上四叶草的半圆半径 $R1$ 和三角贴片的长度 D 不断优化微处理, 并引入四叶草上端的低频矩形枝节(矩形低频枝节长度 XX 宽度 YY)以拓宽低频带宽。通过改变四叶草 4 个辐射贴片的间距及馈电位置改善天线的匹配同时增加天线带宽。四个四叶草结构在水平面均匀分布, 介质板顶部放置 2 个四叶草辐射单元, 底部放置 2 个四叶草辐射单元, 分别形成两组对称阵子结构, 作为天线辐射单元。从而实现斜 45° 双线极化。其详细结构如图 2(b) 所示。天线馈电处加载微带馈线结构等效于分布电容, 这样的加载是由于自身高度引入电感分量, 进一步调节频率的匹配。因为过近的反射板会增加 Q 值与旁瓣, 减小天线带宽和增益, 因此天线最终的优化尺寸如表 1 所示。为了进一步验证天线的性能, 根据优化尺寸制作天线实物如图 2(c) 所示。

Table 1. Parameter table of dual-element four-leaf clover antenna
表 1. 双元四叶草天线参数表

| 参数 | 长度(mm) | 参数 | 长度(mm) |
|----|--------|----|--------|
| R1 | 9.5 | SX | 50 |
| D | 9.5 | Hg | 15 |
| W | 1.5 | GX | 60 |
| D0 | 0.9 | XX | 2 |
| L | 5 | YY | 2 |

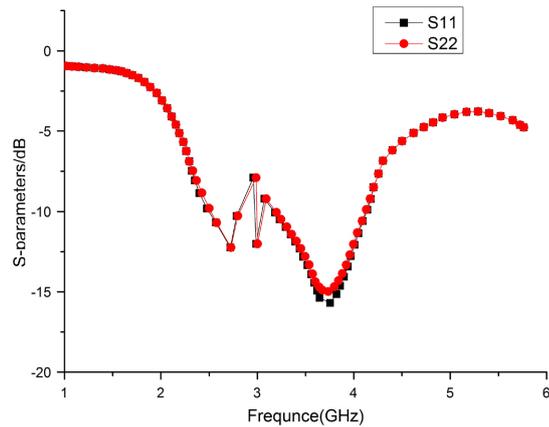
3. 仿真及实测结果

3.1. 传导测试

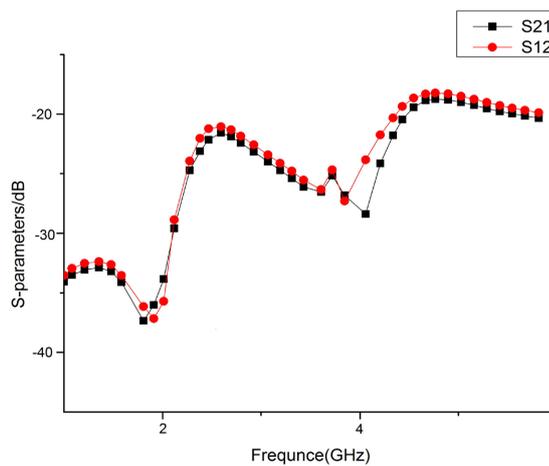
该定向天线的传导测试在 Agilent N5247A 矢量网络分析仪中进行测量, 由图 3(a) 可知, 仿真实验天线系统的两个天线单元在所需工作频段($|S_{11}|$ 为 3.06~4.67 GHz)内的反射系数低于 -10 dB, 通过优化单个四叶草辐射单元上长度 $R1$ 和 D , 得出当 $R = 9.5$ mm、 $D = 9.5$ mm 时, 符合要求。由图 3(b) 可知, 天线系统的两个天线单元之间的互耦在所需工作频段内均低于 -20 dB, 可以覆盖 2~6 G 频段。

由图 3(c)中仿真与实测结果对比,该四叶草蝶形天线实测在所需工作频段 2.84~4.78 GHz 内的反射系数均可达-10 dB 以下,在 1.8~6 GHz 频段内均满足-5 dB 以下,基本覆盖电子侦收使用要求。

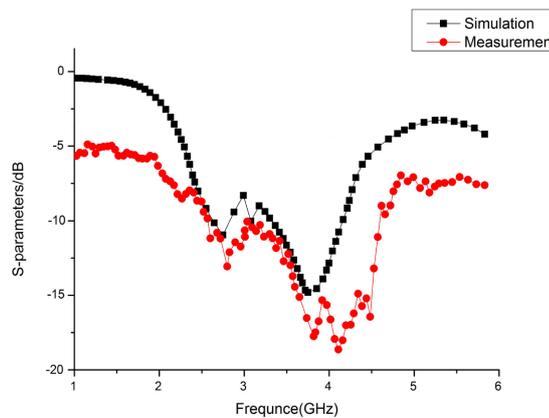
如图 3(c)是实测矢量网络分析仪的反射系数。



(a) 双端口反射系数



(b) 双端口传输系数

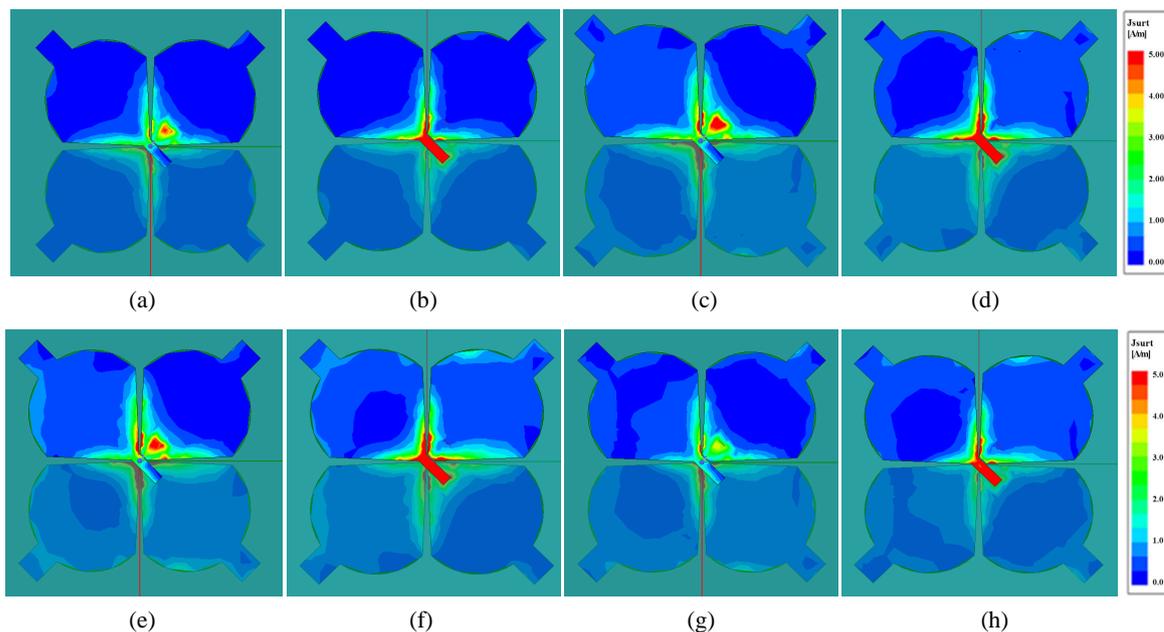


(c) 反射系数仿真与实测对比图

Figure 3. Antenna system parameters

图 3. 天线系统参数

电流分析如图 4 所示，如果对称振子的臂长超过 $0.65\lambda_0$ (λ_0 自由空间波长)，会出现旁瓣，使增益下降，这是因为臂上出现反向电流所致。所以此天线改善方法是振子形状的直线改为角形或曲线。如 V 形振子和高斯曲线振子，其思路是利用线上各点电流元之间射线的波程差的不同补偿电流的相位差。采用长度和角度可调的 V 形振子是最常用的选择，即可通过调节 V 形振子的长度和角度获得最佳的辐射特性。



正面：(a) 3.2 GHz (c); 3.65 GHz; (e) 4.0 GHz; (g) 4.5 GHz。
背面：(b) 3.2 GHz (d); 3.65 GHz; (f) 4.0 GHz; (h) 4.5 GHz。

Figure 4. Simulation results of surface current distribution on radiation patches
图 4. 辐射贴片表面电流分布仿真结果

3.2. 辐射测试

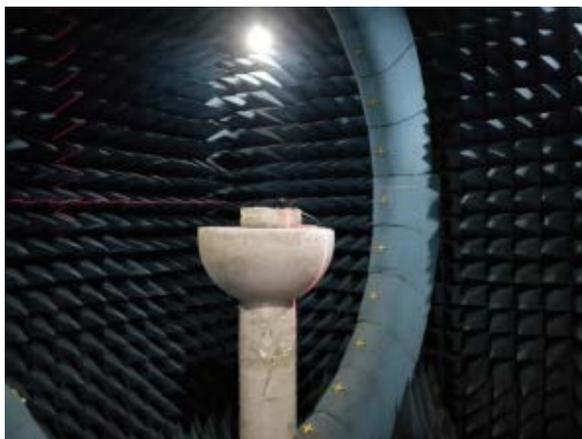


Figure 5. Radiation testing environment
图 5. 辐射测试环境

定向天线的辐射测试环境为 Satimo-SG64 Anechoic Chamber system，如图 5。天线系统在 3.65 GHz

中心频点的三维远场辐射示意图如图 6(a)所示, 两个天线单元的辐射方向图空间互补, 可以提供较好的方向图分集对抗多径衰落。图 6(b)给出了天线系统的辐射方向图, 通过优化此时天线与反射板间距 $H = 15$ mm, 该四天线系统样机在所需工作频段内增益高于 9.2 dBi。

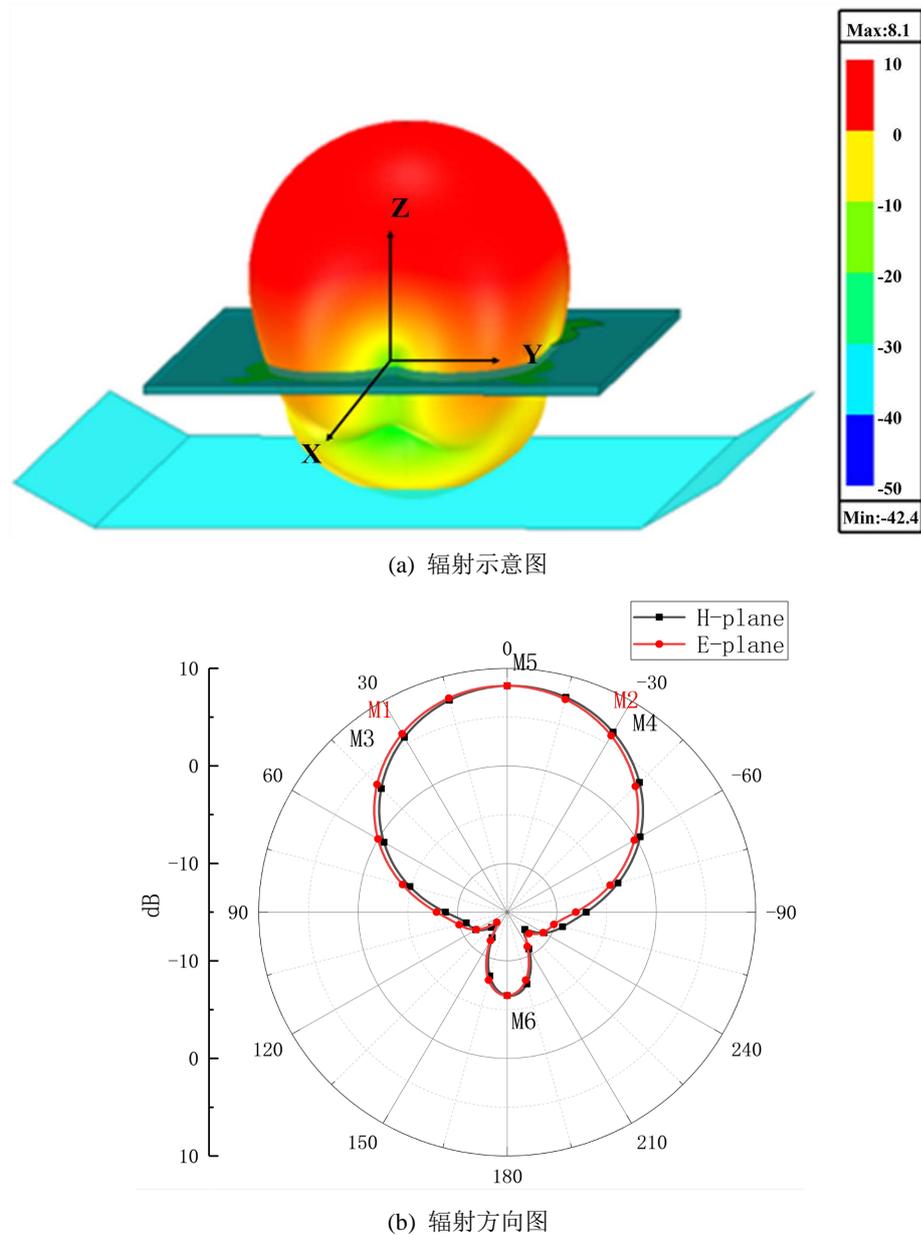


Figure 6. Far-field radiation gain and direction pattern of antenna system
图 6. 天线系统的远场辐射增益及方向图

如图 6(b)所示, 在中心频点(3.65 GHz)处双蝶形四叶草天线的 3 dB 波瓣宽度($\phi = 0^\circ$)为 94 度, ($\phi = 90^\circ$)为 93 度, 前后瓣抑制比 14.6 dB 满足接收侦收信号要求。

如图 7 所示为天线仿真和实测增益对比, 二者具有良好的一致性, 在工作频段(2.84~4.78 GHz)内增益为 7.5~10.1 dBi, 峰值增益 Gain peak 可达 10.1 dBi, 天线在大于 3.5 GHz 之后平均增益大于 8.5 dBi, 满足接收定向侦收天线增益要求。

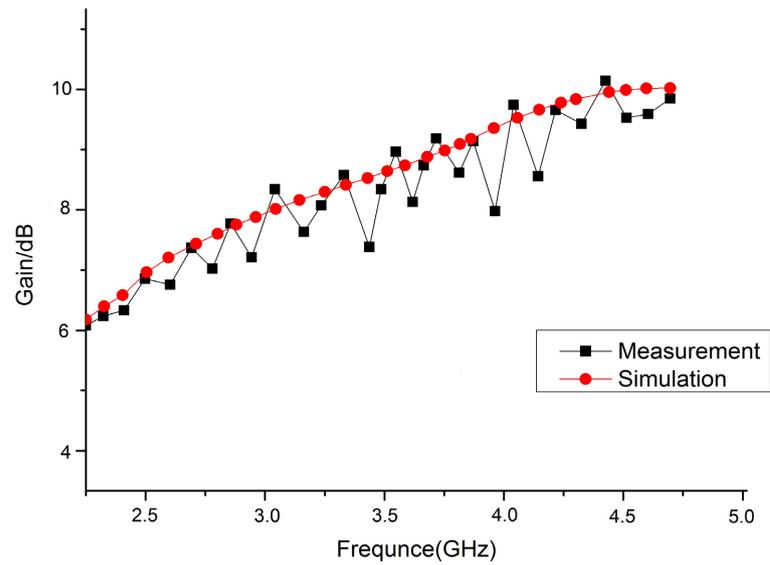


Figure 7. Simulation and measured gain

图 7. 仿真及实测增益

如图 8 所示, 该双蝶形天线在高频段(3.06~4.67 GHz)内效率大于 60%, 低频段(2.00 GHz~3.00 GHz)部分效率为 55%, 4670 MHz 处峰值效率为 85%。

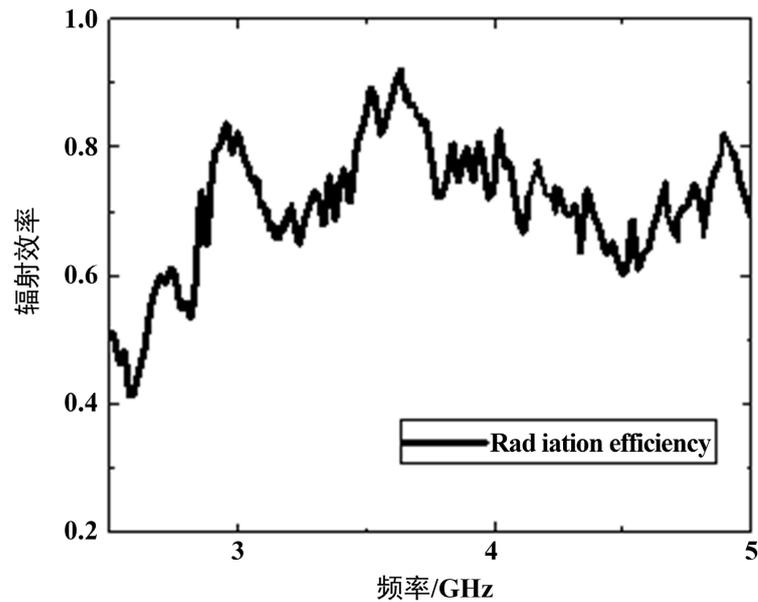


Figure 8. Measured radiation efficiency of antenna

图 8. 天线实测辐射效率

如表 2, 该天线与目前研究天线[1]相比, 更适用于电子侦收频段且结构简单, 与天线[2]相比, 该天线作为定向天线全向辐射辐射性能更好, 与天线[3]相比, 带内增益大大提高至 8.5~10.5 dBi, 与天线[4]相比, 该天线前后比提升 165%, 作为演进版更符合侦收天线要求, 与天线[6]相比, 辐射性能大大提升, 与天线[7] [8]相比, 带宽提高 139%且不存在额外倾角。故本文设计的双元四叶草蝶形天线更满足小型化、超宽带和高增益的设计需求, 适用于电子侦收天线需求。

Table 2. Final comparison of antenna parameters
表 2. 天线参数最终对比

| 文献 | 工作频段 Band/MHz | 天线尺寸 (mm) | 实测增益 Mea-gain/DBi | 峰值增益 Peak gain/DBi | 辐射效率 Eff/% | 平均辐射效率 Ave-eff/% |
|------|-------------------------------------|--------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------|
| [2] | 2300~2750 5090~6160 | 43*43*0.9 | 1.93~2.28 3.07~3.94 | 2.28 3.94 | >80.00% >73.00% | 83.60% 74.23% |
| [3] | 2260~2680 3280~4070 4750~6040 | 33*33*1 | / | 1.67 2.75 5.50 | / | / |
| [4] | 4000~5780 6830~8220 | 20*23*1.6 | 1.20~3.00 | -2.66 (5.3 G) 4.83 (9.9 G) | >90.00% | / |
| [10] | 704~1095 1640~2615 | 15*25*4 | -0.60~0.50 | 0.5 | 40.0%~53.0% 41.0%~70.0% | / |
| [12] | 824~975 1450~2825 | 15*29*1.6 | -0.9~0.8 0.8~4.2 | / | 43.0%~57.0% 44.0%~70.0% | 49.62% 54.74% |
| [15] | 2400~3940 | 100*100*30 | 6.72~9.04 | 8.5 | / | / |
| [16] | 3280~3840 4950~6020 | 56*45 | 2.00~4.50 | 4.5 | 75.0%~87.0% 72.0%~84.0% | 70.00% |

4. 结论

本文首先介绍了贴片定向天线的基本理论(渐变电长度路径法和 $\pm 45^\circ$ 交叉极化),说明了其在技术应用上的优势。然后设计了一款双极化定向天线,工作在 1.8~6.0 GHz 波段。以双蝶形为天线本体,矩形为低频寄生枝节,利用方形反射器设计了双元蝶形四叶草定向天线。基于双极化天线理论设计了一款超宽带天线,然后利用单层方形反射器实现其定向性,并将反射器加载于扇形天线下方,在所需工作频段 2.84~4.78 GHz 内反射系数低于-10.0 dB 的超宽带,并通过改变反射器的参数实现 9.2 dB 增益,天线系统尺寸小于 70*70*15 mm。通过调节辐射单元尺寸和反射板距离,证明了天线的性能。

通过本文研究可以得出,四个四叶草结构在水平面均匀分布,介质板顶部放置,在四叶草结构放置 2 个四叶草辐射单元,底部放置 2 个四叶草辐射单元。四叶草结构上端添加低频矩形枝节,再通过空间耦合,可以实现超宽带定向辐射性能。根据实测发现,该天线可以应用于电子帧收频段,根据与文件对比可知,该天线具有小型化高增益特性。

参考文献

- [1] 张需溥, 钟顺时. 蝶形微带天线的全波分析与宽带设计[J]. 电波科学学报, 2001, 16(4): 419-421, 450.
- [2] Li, H., Kang, L., Xu, Y. and Yin, Y.Z. (2016) Planar Dual-Band WLAN MIMO Antenna with High Isolation. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, **31**, 1410-1415.
- [3] Moeikham, P. and Akkaraekthalin, P. (2016) A Compact Printed Slot Antenna with High Out-of-Band Rejection for WLAN/WiMAX Applications. *Radioengineering*, **25**, 672-679. <https://doi.org/10.13164/re.2016.0672>
- [4] Awan, W.A., Zaidi, A., Hussain, N., Iqbal, A. and Baghdad, A. (2019) Stub Loaded, Low Profile UWB Antenna with Independently Controllable Notch-Bands. *Microwave and Optical Technology Letters*, **61**, 2447-2454. <https://doi.org/10.1002/mop.31915>
- [5] Aram, M.G., Aliakbarian, H. and Trefna, H.D. (2021) A Phased Array Applicator Based on Open Ridged-Waveguide Antenna for Microwave Hyperthermia. *Microwave and Optical Technology Letters*, **6**, 3086-3091. <https://doi.org/10.1002/mop.33039>
- [6] Li, D.H., Zhang, F.S., Xie, G.J., et al. (2020) Design of a Miniaturized UWB MIMO Vivaldi Antenna with Dual Band-Rejected Performance. *IEICE Electronics Express*, **17**, 1-6. <https://doi.org/10.1587/elex.17.20200233>

-
- [7] Nella, A., Bhowmick, A. and Rajagopal, M. (2021) A Novel Offset Feed Flared Monopole Quasi-Yagi High Directional UWB Antenna. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, **31**, e22653. <https://doi.org/10.1002/mmce.22653>
- [8] Yadav, S.V. and Chittora, A. (2021) A Compact Ultra-Wideband Transverse Electromagnetic Mode Horn Antenna for High Power Microwave Applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, **63**, 264-270. <https://doi.org/10.1002/mop.32570>
- [9] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [10] Ban, Y.L., Liu, C.L., Chen, Z., Li, J.L.W. and Kang, K. (2014) Small-Size Multiresonant Octaband Antenna for LTE/WWAN Smartphone Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **13**, 619-622. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2313353>
- [11] 钟顺时. 微带天线理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [12] Ban, Y.L., Liu, C.L., Li, J.L.W. and Li, R. (2013) Small-Size Wideband Monopole with Distributed Inductive Strip for Seven-Band WWAN/LTE Mobile Phone. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **12**, 7-10. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2233706>
- [13] R.F. 哈林登. 计算电磁场的矩量法[M]. 长沙: 国防工业出版社, 1981.
- [14] 张需溥, 钟顺时. 小型化蝶形微带天线的全波分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2001, 7(2): 95-99.
- [15] Jin, G., Li, L., Wang, W. and Liao, S.W. (2020) Broadband Polarisation Reconfigurable Antenna Based on Crossed Dipole and Parasitic Elements for LTE/sub-6GHz 5G and WLAN Applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, **14**, 1469-1475. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.1137>
- [16] Kundu, S. (2020) A Compact Printed Ultra-Wideband Filter with Low Dispersion for WiMAX and WLAN Interference Cancellation. *Sādhanā*, **45**, Article No. 261. <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01495-y>