

一种改进的磁偶极子鲨鱼天线

吴建材¹ 陈 星¹

WU Jiancai CHEN Xing

摘 要

随着电子设备的密集部署,电磁环境日益复杂,天线与周围元件的相互干扰可能导致信号质量下降甚至通信中断。基于此,文章提出了一种改进的超宽带小型化定向磁偶极子鲨鱼天线,由后截断双锥辐射体(电偶极子)、磁偶极子、反射板、“同轴线+平行板”的馈电结构组成。将现有磁偶极子鲨鱼天线的上、下锥体圆弧表面改进平面结构,以及移除了包裹馈电同轴线和平等板过渡结构的 PET-100 绝缘子,变为全金属天线,不仅大幅降低了天线结构复杂度和加工难度,还增强了工程应用的环境适应性。通过结构参数优化,例如扩大锥体倾斜角,天线的超宽带和小型化特性将得到进一步提升。通过加工天线样品,测试结果表明所设计的磁偶极子鲨鱼天线可以在 1.43 GHz~20 GHz(相对带宽 173.3%)频段甚至更高频率下工作,最终天线的尺寸仅为 36.7 mm×36 mm×37.3 mm(电尺寸为 $0.175\lambda_L \times 0.172\lambda_L \times 0.178\lambda_L$, λ_L 为最低工作频点的对应波长)。2 GHz~12 GHz 天线的测试平均增益在 4.4 dBi,并且有着良好的定向辐射能力。

关键词

超宽带天线;高定向性;鲨鱼天线;小型化;磁偶极子

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.05.023

0 引言

随着通信技术的快速发展,超宽带(UWB)通信系统在提升通信速率与容量方面展现出显著优势,广泛应用于瞬态雷达^[1]和合成孔径雷达^[2]等领域。超宽带天线因其高分辨率、自适应测距等特性,成为通信设备中的关键组件。然而,随着电子设备的密集部署,电磁环境日益复杂,天线与周围元件的相互干扰可能导致信号质量下降甚至通信中断。此外,天线尺寸过大或与应用场景不匹配的问题也限制了其部署。因此,在满足超宽带性能的同时,天线的小型化设计成为研究重点。

为实现上述要求,诸多天线设计者做出了努力。Qiao 等人^[3]提出了一种 UWB 和双楔形金属脊天线,由 E 平面喇叭天线组成。双楔形金属脊增加了喇叭天线的带宽,其频率范围可以达到 2 GHz~12 GHz。Cicchetti 等人^[4]提出了一种小型化、高增益宽带介质 Vivaldi 天线,在 650 MHz~6 GHz 的频率范围内具有稳定的辐射模式和宽带阻抗匹配。双锥形天线用于方位平面上的全向辐射,并在仰角平面上具有特定的覆盖角度^[5]。因其属于非频率变化天线,双锥形天线非常适合 UWB 系统。Zhekov 等人^[6]提出了一种对称的双锥天线,每个锥体上都增加了一个圆柱和一个环。天线可以

实现 1.5 GHz~41 GHz 的 $S_{11} < -10$ dB,并获得稳定的全向辐射。最大电尺寸为 $0.29\lambda_L$,但峰值增益不超过 5 dBi。同年,He 等人^[7]提出了一种小型超宽带双锥天线,通过结合双锥天线和两个磁偶极子,实现了宽带阻抗匹配、小型化和全向辐射模式。同时,其阻抗带宽范围为 200 MHz~965 MHz,对于 $VSWR < 2.35$,天线高度为 $0.192\lambda_L$,整体直径为 $0.117\lambda_L$,然而,峰值增益低于 3 dBi。

Desrumaux 等人^[8-9]提出了一种 UWB 定向鲨鱼天线。在本设计中,双锥倾斜于主辐射方向。通过切断后半部分的结构,减弱了向后的辐射,形成了具有一定倾斜角度的半双锥。通过在背部添加反射板,增强了天线的定向辐射特性,带宽为 $S_{11} < -10$ dB 的范围从 0.8 GHz 到 21.25 GHz,总尺寸仅为 $0.39\lambda_L \times 0.22\lambda_L \times 0.21\lambda_L$ 。磁电偶极子天线因其紧凑的结构和宽带特性而受到广泛关注,Li 等人^[10]提出了一款通过折叠小型化的宽带磁电偶极子天线,使用折叠的 L 形电偶极子代替传统的半波长水平电偶极子,小尺寸的 U 型反射板取代了传统的大尺寸平面反射板,天线的带宽为 1 GHz~4 GHz(相对带宽 120%),电尺寸为 $0.25\lambda_L \times 0.25\lambda_L \times 0.12\lambda_L$ 。

传统超宽带天线通常存在尺寸较大的问题,而磁电偶极子天线能够有效实现小型化,但是带宽基本在 4 个倍频程左右。Kim 等人^[11]提出了一款超宽带小型定向天线,该天线在鲨鱼天线的基础上结合磁偶极子来使得天线的容性和电感

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610065

[基金项目] 中国电科 22 所稳定经费支持(A132304345)

性抵消，将双锥体的倾斜角度增大，在锥体尖端截断，然后切角成弧面，并在馈电结构处应用了穿通绝缘子来提高天线的高功率能力，最后天线实现了 0.207 GHz~2.60 GHz 的带宽，电尺寸仅为 $0.195\lambda_L \times 0.195\lambda_L \times 0.176\lambda_L$ 。但双锥辐射体的弧面结构复杂，对工程加工的精度要求较高，且由于包裹馈电结构的 PET-100 绝缘子为介电材料，不利于天线的长期使用。本文针对文献 [10] 的天线，将双锥尖端截断后引入的弧面改为平面结构，并将馈电处的 PET-100 绝缘子结构移除，降低了加工的难度，并且全金属的结构可以提高天线的使用寿命。通过优化天线锥体的倾斜角度等，相比原来的天线提供了更高的带宽和更小的电尺寸。

1 天线设计

文献 [11] 中的天线结构如图 1 所示。天线由后截断双锥辐射体、磁偶极子枝节、套有 PET-100 绝缘子的“同轴线+平行板”的馈电结构和反射板组成。

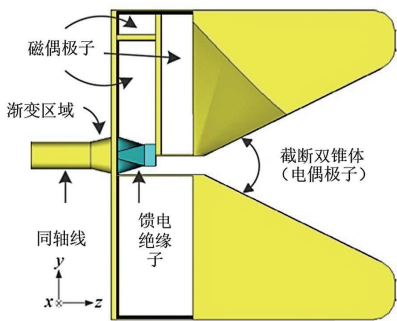
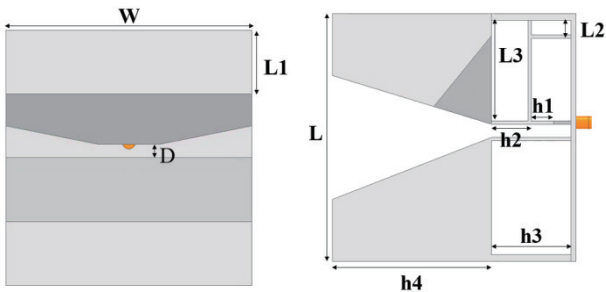


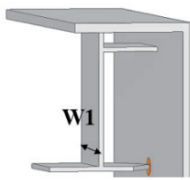
图 1 现有的磁偶极子鲨鱼天线结构

本文根据现有的磁偶极子鲨鱼天线，为降低工程加工的难度和提高对环境的耐受性，提出了一种改进的磁偶极子鲨鱼天线。可以看到将天线的双锥辐射体的曲面结构改为平面，简单的平面结构对加工的精度要求更低，方便工程加工和应用。移除馈电结构处包裹的绝缘子，获得全金属结构来增强对环境的耐受性，通过优化天线的结构参数，将锥体的倾角改变，增高反射板和锥体的间距等，来获得更低的谐振频点。天线的主要结构参数如图 2 所示，天线的物理尺寸为 $36.7\text{ mm} \times 36\text{ mm} \times 37.3\text{ mm}$ （长 $\times$ 宽 $\times$ 高），其详细参数数值如表 1 所示。



(a) 主视图

(b) 侧视图



(c) 磁偶极子细节图

图 2 改进的磁偶极子鲨鱼天线（天线 1）结构示意图

表 1 天线结构参数

单位：mm

参数	数值	参数	数值	参数	数值
W	36	W1	9	L	37.3
L1	9	L2	2.2	L3	15.2
D	2	h1	3.3	h2	6
h3	12	h4	24		

为增加天线的定向性，使期加工更为方便，直接使用如图 3 所示的同轴线到平行板的馈电过渡结构，移除原本的 PET-100 绝缘子。平行板馈电可以将更多的电场引导到双锥体喉部的目标方向，使整个天线结构变为全金属结构，增强工程应用的环境适应性。

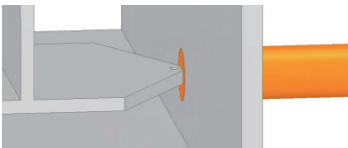


图 3 未带 PET-100 绝缘子的馈电过渡结构

改进后的磁偶极子鲨鱼天线（天线 1）如图 2 所示，为了直观地观察改进前后的带宽和电尺寸，把原文献中的天线双锥体的弧面结构改为平面，再去掉 PET-100 绝缘子（天线 2），如图 4 所示，此时天线 2 的物理尺寸为 $35\text{ mm} \times 37.3\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 。天线 1 和天线 2 的驻波比仿真对比如图 5 所示，可以看到改进后天线 1 的带宽为 1.43 GHz~26.08 GHz，相对带宽达到了 179.2%，天线的电尺寸仅为 $0.175\lambda_L \times 0.172\lambda_L \times 0.178\lambda_L$ ，相对于此前天线都有提升，而且提供了方便加工和环境耐受性的优势。而天线 2 的低频谐振点高于天线 1，不利于小型化，且中频和高频的驻波相对较差。

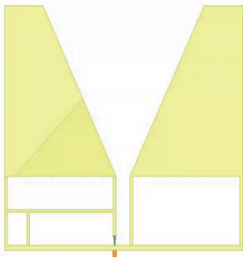


图 4 原论文天线去掉弧面和 PET-100 绝缘子（天线 2）

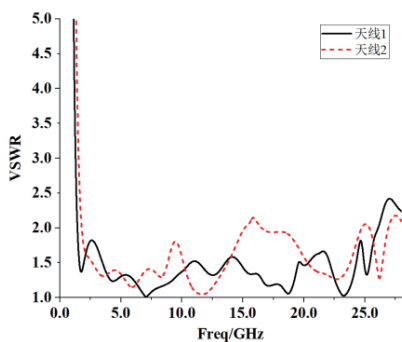
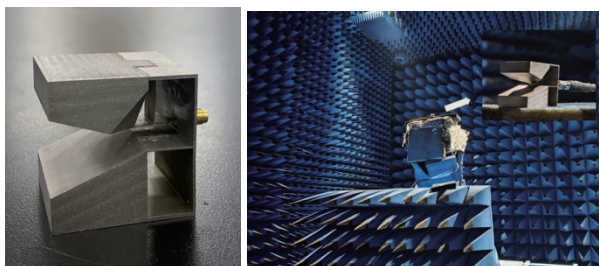


图5 天线1和天线2的驻波比对比

2 天线加工测试

将设计改进的磁偶极子鲨鱼天线进行加工并测试。如图6(a)所示,天线金属结构均使用金属铝,上下锥体用金属铝拼接并焊接。



(a) 天线实物图 (b) 测试环境

图6 天线实物图和测试环境

该天线的驻波比测试和仿真结果对比如图7所示。仿真表明其 $VSWR < 2$ 工作频段可达 $1.43 \text{ GHz} \sim 26.08 \text{ GHz}$, 测试受限于仪器设备, 驻波仅测试到 20 GHz , 测试结果显示, 该天线在 $1.43 \text{ GHz} \sim 20 \text{ GHz}$ 的频段测试驻波比与仿真结果基本吻合。需要指出的是, 由于加工误差以及金属材料焊接带来的损耗问题, 在低频端驻波比测试略高于仿真。

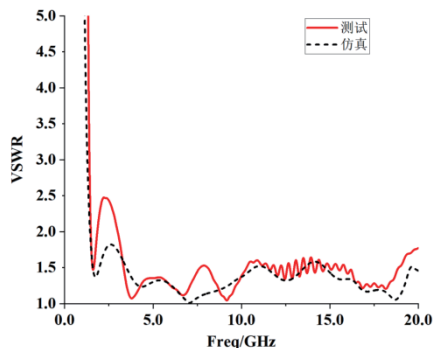
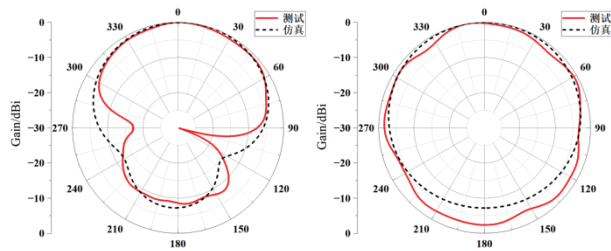


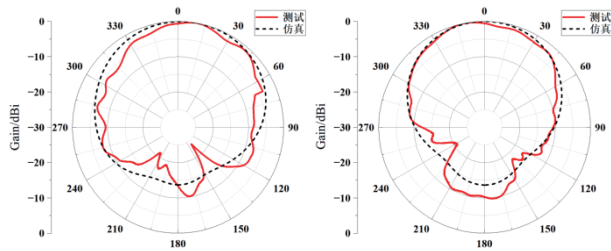
图7 天线测试与仿真驻波比

在微波暗室对本文天线进行增益与方向图的测试, 由于微波暗室的条件有限, 这里仅对 $2 \text{ GHz} \sim 12 \text{ GHz}$ 的频段进行了增益与方向图的测试。天线不同频点之间的方向图以及天线增益测试和仿真的对比如图8和图9所示。从天

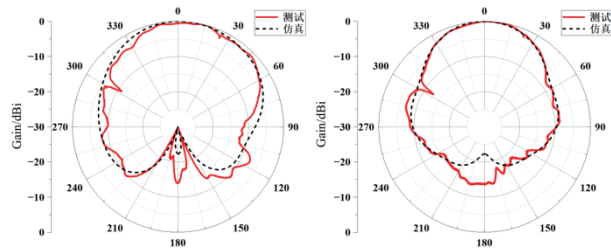
线的测试数据和仿真数据之间的对比可以看出, 二者之间的吻合性较为一致, $2 \text{ GHz} \sim 12 \text{ GHz}$ 天线的测试平均增益在 4.4 dBi , 方向图存在的偏差可能是由于加工误差以及测试误差造成的。



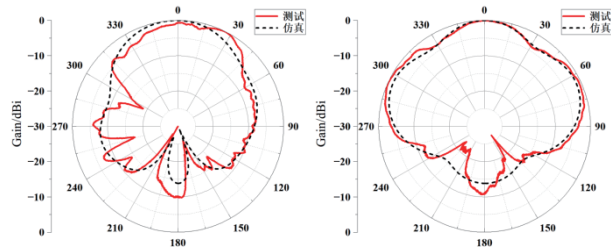
(a) 2 GHz



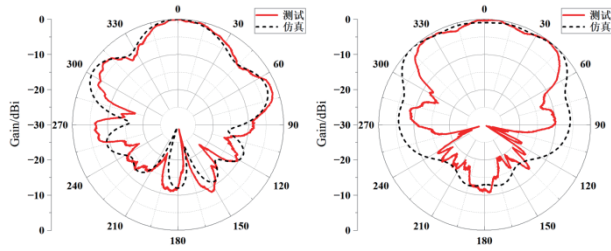
(b) 4 GHz



(c) 6 GHz



(d) 8 GHz



(e) 12 GHz

(注: 左为 E 面, 右为 H 面)

图8 不同频点的天线归一化方向图

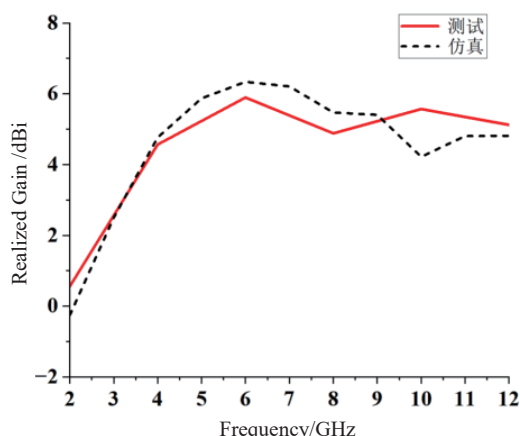


图9 天线仿真与测试增益曲线

3 结论

本文设计了一种改进的鲨鱼磁偶极子天线，为方便工程加工和提高天线在工程应用中的使用寿命，采用简单的平面结构代替弧面，且使用全金属结构构成。优化锥体倾斜角度，实现了更高的带宽和更小的电尺寸。经过仿真与加工测试结果表明，天线的带宽为 1.43 GHz~20 GHz，相对带宽有 173.3%。最终天线的电尺寸仅为 $0.175\lambda_L \times 0.172\lambda_L \times 0.178\lambda_L$ ，（ λ_L 为最低工作频点的对应波长）。有效实现了双锥天线的小型化和宽带化，很大程度上减小了加工的难度，天线在 2 GHz~12 GHz 测试的平均增益为 4.4 dBi，有着较好的定向辐射性能。

参考文献:

- [1] IMMOREEV L I, TAYLOR J D. et al. Optimal short pulse ultra-wideband radar signal detection[C]//Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics. Berlin: Springer, 2002: 207-214.
- [2] RESSLER M A. The army research laboratory ultra wideband BoomSAR[C]//IGARSS'96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE, 1996: 1886-1888.
- [3] QIAO X G, ZHAO H Z, JIANG Z N. Wideband and high gain horn antenna with lens and wedge ridge[C]//2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). Piscataway: IEEE, 2019[2024-06-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8779171>. DOI: 10.1109/COMPEM.2019.8779171.
- [4] CICCHETTI R, CICCHETTI V, FARAONE A, et al. A compact high-gain wideband lens vivaldi antenna for wireless

communications and through-the-wall imaging[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 69(6): 3177-3192.

- [5] GHOSH D, SARKAR T, MOKOLE E. Design of a wide-angle biconical antenna for wideband communications[J]. Progress in electromagnetics research, 2009, 16(16): 229-245.
- [6] ZHEKOV S S, TATOMIRESCU A, PEDERSEN G F. Antenna for Ultrawideband channel sounding[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2016, 16: 692-695.
- [7] HE S, CHANG L, CHEN Z Z. Design of a compact biconical antenna loaded with magnetic dipoles[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2016, 16: 840-843.
- [8] DESRUMAUX L, GODARD A, LALANDE M, et al. An original antenna for transient high power UWB arrays: the shark antenna[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2010, 58(8): 2515-2522.
- [9] DESRUMAUX L, LALANDE M, ANDRIEU J, et al. The SHARK antenna: a miniature antenna for transient ultra wide band applications in the frequency band 800 MHz~8 GHz[C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Piscataway: IEEE, 2010[2024-06-11]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5505884>.
- [10] LI J, CHEN X, HAO S J, et al. Miniaturization of a wide-band magnetoelectric dipole antenna by folding[J]. Microwave and optical technology letters, 2022, 64(10): 1773-1778.
- [11] KIM J S, YOON Y J, KWON H O, et al. A directive subminiature antenna for high-power Ultrawideband pulse radiation[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2014, 13: 1565-1568.

【作者简介】

吴建材（1999—），男，四川眉山人，硕士研究生，研究方向：天线设计。

陈星（1970—），男，四川巴中人，博士，教授、博士生导师，研究方向：电磁场理论与微波工程。

（收稿日期：2025-03-01 修回日期：2025-05-08）