

轻量化小型宽带无人机载天线设计

杨 旭¹ 陈 星¹
YANG Xu CHEN Xing

摘 要

为满足无人机天线在不同飞行环境中的需求,文章设计了一款轻量化小型宽带无人机载天线。该天线基于传统的盘锥天线进行改进,首先,通过金属圆柱连接成梯形环替代梯形面,再将两个梯形环交叉以替代整个盘锥,实现了天线的轻量化。通过在天线的顶部加载金属圆盘实现天线的小型化。最后,将两个梯形环的斜边金属圆柱弯折 90°,以进一步减小天线的电尺寸,并拓展了带宽。测试结果表明,该轻量化小型宽带无人机载天线工作频段为 1.1~2.0 GHz,其电尺寸约为 $0.14\lambda_L \times 0.14\lambda_L \times 0.21\lambda_L$ (λ_L 为最低工作频点的对应波长),天线的相对带宽达 58.06%,增益介于 1~2.6 dBi 之间,天线整体重量仅为 28 g。

关键词

无人机载天线; 宽带; 小型化; 轻量化; 容性加载

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.023

0 引言

随着科技的不断发展,无线通信、雷达探测、卫星通信等领域对高性能天线的需求日益增长^[1-2]。天线作为无线通信系统的关键组成部分,其性能的优劣直接影响着整个系统的通信质量、覆盖范围和数据传输速率等关键指标。在复杂多变的电磁环境中,不断探索和研究新型天线技术,提升天线的性能和功能,具有极其重要的现实意义。而轻量化小型宽带无人机载天线作为无人机系统中至关重要的信息交互枢纽,正日益成为研究与开发的焦点^[3]。不仅需要有限的空间与重量限制下,实现高效的信号传输与接收,以保障无人机与地面控制站之间稳定、精准的通信,还需要其实现与无人机之间良好的共性,同时还需具有较宽的工作带宽以适应复杂多变的飞行环境,包括不同的气候条件、电磁干扰等,这就对无人机天线提出了一系列的需求,如轻量化、小型化、高增益、抗干扰能力强等^[4-10]。

为应对这些问题,诸多学者开展了系统性研究,比较常用的方法即用传统锥形天线在无人机上进行改进设计。例如 Lee 等人^[11]设计了一款用于无人机上的锥形背腔天线,虽其具有较宽的工作带宽,但其电尺寸却是达到了 $3.07\lambda_L \times 3.07\lambda_L \times 0.426\lambda_L$ (λ_L 为最低工作频点对应的波长)。在文献[12]中,Aten 等人设计了一款宽带单筒天线,通过传统的盘锥天线上利用顶部加载和引入短路引脚来实现天线

的低剖面 and 增加带宽,但其天线金属地的占地面积是天线锥体部分占地面积的 3 倍多,且天线采用金属铜制作,这在一定程度上增加了天线的重量,不适合安装在无人机上。

为满足无人机在不同飞行环境中的需求,本文设计了一款工作频段在 1.1~2.0 GHz 的轻量化小型宽带无人机载天线。该天线基于盘锥天线进行改进^[13-15],整个天线结构通过细金属圆柱和金属片拼接构成,结构简单、加工方便、重量极轻,仅 28 g。

1 轻量化小型宽带无人机载天线的分析与设计

如图 1 所示,轻量化小型宽带无人机载天线结构主要由中心的黄色金属柱、周围的细金属圆柱构成的卅字结构、顶部加载的金属圆盘和底部金属地组成。其中,金属圆柱采用铝空心圆柱体以减轻重量、顶部金属圆盘和底部金属地采用金属铝、底部矩形金属地中心挖孔以便采用 SMA 馈电。

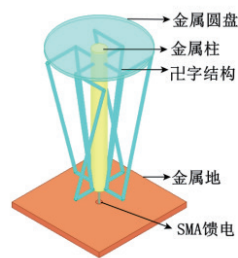


图 1 天线结构示意图

该天线的设计演变流程如图 2 (a)~(d) 所示。首先,相对于传统盘锥天线(如图 2 (a)),用细金属圆柱拼接成

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610065

[基金项目] 中国电波传播研究所稳定支持科研经费资助项目 (A132304212-006)

梯形环, 并通过将两个这样的梯形环进行十字交叉组成简易的锥形架以替代图 2 (a) 传统盘锥天线的盘锥体。锥形架中心放置一个直径为 5 mm 的空心金属圆柱作为支撑固定结构, 同时也作为天线的一部分辐射结构, 通过上述步骤构成初始天线 1 模型, 如图 2 (b) 所示。天线 1 整体形成一个镂空结构以降低天线的风阻和重量, 另外, 天线 1 底部金属片既可作为金属地, 也可作为一个金属反射面以提升天线的增益。然后, 因此时天线 1 中心的粗金属圆柱长度有限, 在顶部突然截断, 将造成电流的反射。所以为延长电流的流动路径以达到拓展天线带宽的效果, 采用了容性加载方式, 即选择在天线顶部加载金属圆盘的方式以拓展带宽, 得到天线 2, 如图 2 (c) 所示。最后, 为进一步实现天线的小型化, 将十字交叉梯形环组成的锥形架的四边金属圆柱都沿着逆时针方向弯折 90° 形成一个卅字结构, 以减小天线整体尺寸^[16]。同时底部的金属片还可作为无人机底部的金属部分^[17], 可与无人机实现良好的共形。另外, 为后续焊接馈电接头方便, 将天线的底板加厚, 最终得到天线 3, 如图 2 (d) 所示。天线 3 的具体结构参数如图 3 和表 1 所示。

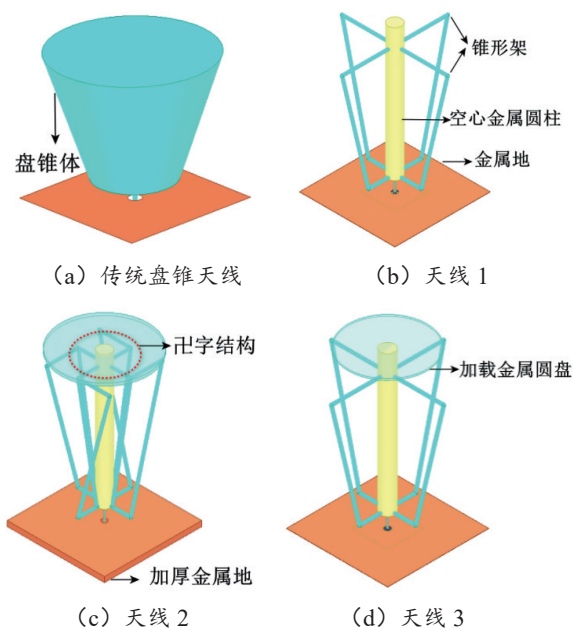


图 2 天线结构的演变过程

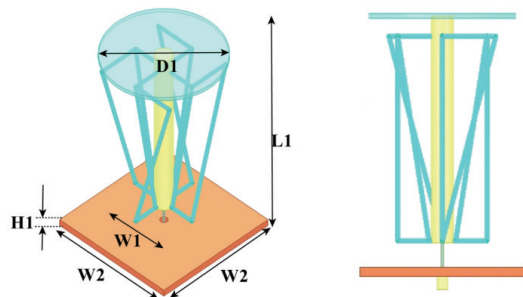


图 3 天线结构参数示意图

表 1 天线结构参数 (单位: mm)

参数	W1	W2	L1	D1	H1
参数值	20	37	57	33	2

2 无人机载天线仿真结果分析

天线 1~3 的 S_{11} 仿真结果如图 4 所示。由图 4 中天线 1 曲线可知, 天线 1 工作频率在小于 1.6 GHz 时, S_{11} 大于 -10 dB, 其对应电尺寸为 $0.3\lambda_L \times 0.21\lambda_L \times 0.21\lambda_L$ (λ_L 为最低工作频点 (1.6 GHz) 对应的波长)。

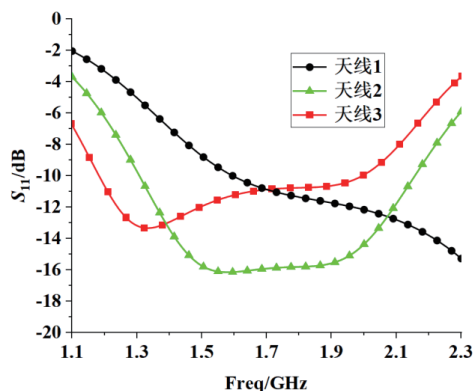
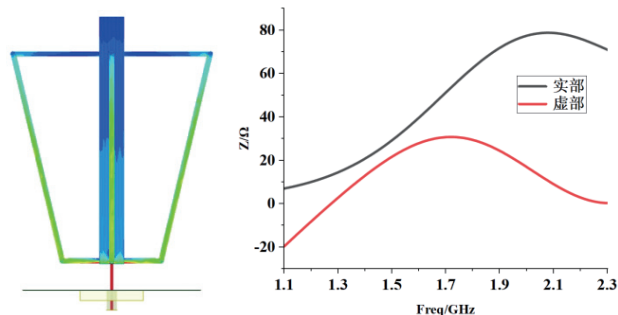


图 4 天线 1、天线 2、天线 3 S_{11} 结果对比

图 5 (a) 和 (b) 分别为天线 1 在最低工作频点的电流分布情况以及天线的输入阻抗实部和虚部。



(a) 天线 1 在 1.6 GHz 电流分布 (b) 天线 1 阻抗曲线

图 5 天线 1 在 1.6GHz 电流分布和天线 1 阻抗曲线

由图 5 (a) 中的电流分布情况可知, 此时天线 1 中心的金属圆柱顶部没有进行加载, 电流到顶部就截断了。另外, 由图 5 (b) 输入阻抗曲线可知, 天线 1 从 1.3 GHz 到 1.6 GHz 的输入阻抗虚部呈现出感性。因此, 若要实现天线 1 在 1.3~1.6 GHz 的阻抗匹配, 就需要进行容性加载来抵消这一部分的感性, 于是采用了顶部加载的方式来实现该容性加载, 即在天线 1 顶部加载了一块金属圆盘构成天线 2。从图 4 中天线 2 的 S_{11} 曲线可知, 经过顶部加载后, 该天线在 1.3~2.1 GHz 频段内的 S_{11} 小于 -10 dB, 最低工作频点从 1.6 GHz 降到了 1.3 GHz, 此时天线 2 的相对带宽达到了 47.06%, 其对应电尺寸为 $0.24\lambda_L \times 0.17\lambda_L \times 0.17\lambda_L$ (λ_L 为最低

工作频点 1.3 GHz 时对应的波长)。最后,为更进一步减小天线 2 的尺寸,采用将十字交叉梯形环构成的锥形架的四边金属圆柱弯曲的方式,得到天线 3。相比于天线 2,天线 3 可以进一步降低工作频率,实现天线的小型化。此时天线 3 工作频段为 1.15~2.0 GHz,相对带宽达到 53.97%,其对应电尺寸为 $0.22\lambda_L \times 0.14\lambda_L \times 0.14\lambda_L$ (λ_L 为最低工作频点 1.15 GHz 时对应的波长)。

3 天线加工测试

将设计的轻量化小型宽带无人机载天线进行加工并测试。如图 6 (a) 所示,整个天线先通过用模具固定好各分支金属圆柱,然后再通过焊接将所有分支固定到一起。天线的物理尺寸为 $3.7\text{ cm} \times 3.7\text{ cm} \times 5.7\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),天线的整体重量仅为 28 g。

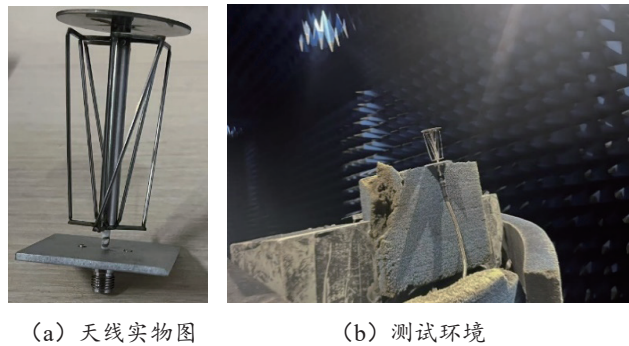


图 6 天线实物图和其测试环境

该天线的 S_{11} 仿真和测试结果对比如图 7 所示。测试结果显示,该天线的工作频段为 1.1~2.0 GHz,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 S_{11} 测试略好于仿真。

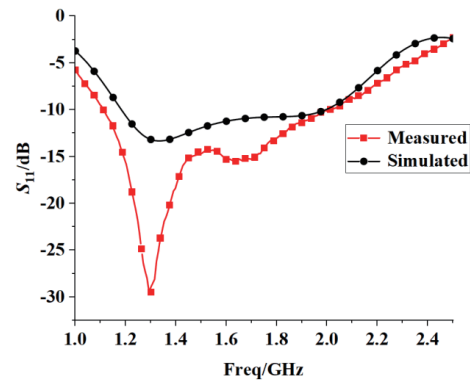


图 7 天线仿真与测试 S_{11} 曲线

该天线部分频点的仿真和测试辐射方向图结果对比如图 8~图 11 所示(图中方向图已归一化处理)。由此可知,其仿真和测试方向图基本吻合,因该天线形式是一个类单极子天线,所以其方向图也类似单极子的方向图。

该天线在工作频段内的测试增益与仿真结果对比如图 12

可知,增益的仿真与测试结果基本吻合,存在的细微差异可能是加工时和测试时的误差所导致。

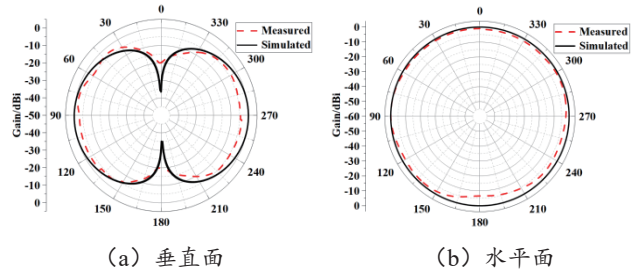


图 8 1.3 GHz 辐射方向图

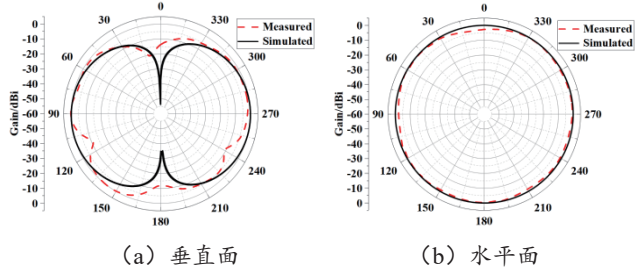


图 9 1.5 GHz 辐射方向图

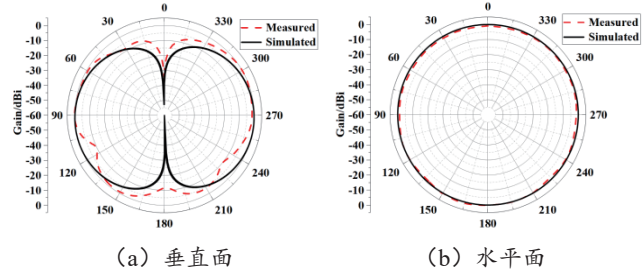


图 10 1.7 GHz 辐射方向图

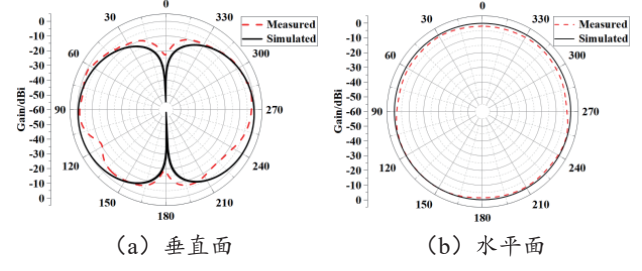


图 11 1.9 GHz 辐射方向图

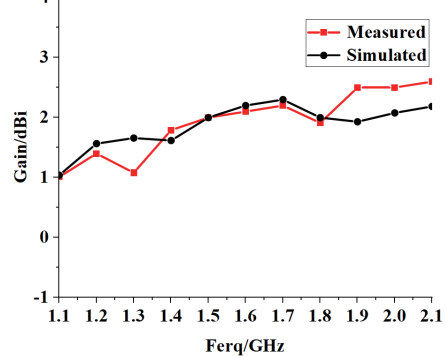


图 12 天线仿真与测试增益曲线

4 结论

本文针对无人机载天线在不同飞行环境中的需求,设计了一款轻量化小型宽带无人机载天线。该天线基于传统的盘锥天线进行改进设计,通过两个十字交叉的梯形环替代整个盘锥面,形成一个镂空结构以实现轻量化。通过顶部金属圆盘实现容性加载,进而拓展天线低频带宽,同时弯折梯形环斜边,使天线带宽拓展的同时也实现了小型化。经过仿真分析与加工测试验证,该天线具有良好的辐射特性,相对工作带宽可达 58.06%,增益介于 1~2.6 dBi 之间,其电尺寸约为 $0.14\lambda_L \times 0.14\lambda_L \times 0.21\lambda_L$ 。天线加工简单,成本低,整体重量仅为 28 g,非常轻巧,在无人机通信方面有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] AMOAH A, FU B J, KWAKU A, et al. Microwave super high frequency (SHF) antenna for (satellite communication systems, radar, aircraft navigation, radio astronomy, remote sensing and communications)[C]//2018 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (SPCEB-Boston). Piscataway: IEEE, 2018:1-8.
- [2] PRADES C F, PRESTI L L, FALLETTI E. Satellite radiolocation from GPS to GNSS and beyond: novel technologies and applications for civil mass market[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1882-1904.
- [3] VALAVANIS K P, VACHTSEVANOS G J. Handbook of unmanned aerial vehicles[M]. Berlin: Springer Publishing Company, Incorporated, 2014.
- [4] GUPTA M, KUMAR R, MAHESHWARI M, et al. Drones and networks: ensuring safe and secure operations using 5g mobile network[C]//2023 5th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N). Piscataway: IEEE, 2023: 1239-1242.
- [5] 周雷. 用于无线通信系统的高性能全向天线研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- [6] 韩海龙. 无人机机载接收机天线的设计与研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [7] 徐敏. 应用于无人机的天线设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [8] LIU Z Q, ZHANG Y S, QIAN Z P, et al. A novel broad beamwidth conformal antenna on unmanned aerial vehicle[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2012, 11: 196-199.
- [9] BADI M, CAMP J, RAJAN D, et al. Experimentally analyzing diverse antenna placements and orientations for UAV communications[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(12): 14989-15004.
- [10] MAZUMDER P, KHAN M M. Design and analysis of a multiple input and multiple output antenna for unmanned aerial vehicle[C/OL]//2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Piscataway: IEEE, 2021[2024-02-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9580132>. DOI: 10.1109/ICCCNT51525.2021.9580132.
- [11] LEE S, JEOUNG G, CHOI J. Three-dimensional-printed tapered cavity-backed flush-mountable wideband antenna for UAV[J]. Microwave and optical technology letters, 2017, 59(12): 2975-2981.
- [12] ATEN D W, HAUPT R L. A wideband, low profile, shorted top hat monocone antenna[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 60(10): 4485-4491.
- [13] WANG L, JIAO Y C, WENG Z. Wideband omnidirectional cone-shaped monopole antenna[C]//2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSRSWTC). Piscataway: IEEE, 2020: 1-3.
- [14] KEUM K, CHOI J. An electrically small top-loaded mono-cone antenna with ring slot[C]//2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Piscataway: IEEE, 2021: 555-556.
- [15] 龙文峰. 超宽带变形锥天线的分析与设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
- [16] 何昱燃, 陈星. 折叠小型化超宽带单锥天线设计[J]. 现代电子技术, 2023, 46(9): 13-17.
- [17] 李佳明. VHF/UHF 宽带车载天线研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2020.

【作者简介】

杨旭(1999—), 男, 四川邻水人, 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: 2025-01-09)