

低剖面高增益磁电偶极子天线设计

赵春悦¹ 陈 星¹
ZHAO Chunyue CHEN Xing

摘 要

针对现代通信系统的应用需求,文章提出了一种低剖面宽带多层基板集成的磁电偶极子天线。该天线采用多层印制电路板技术,通过上层对称寄生贴片与下层半圆末端辐射缝隙的耦合,并结合中央S形弯折贴片与金属化通孔的联合馈电与匹配,实现了优良的宽带性能。在此基础上,构建了基于T型功分器的1×2直线阵列。仿真与实测结果表明,该天线阵列在1.22~1.71 GHz频段内电压驻波比小于2,阻抗带宽达33.4%,在保持 $0.09\lambda_0$ (λ_0 为最低工作频率点对应波长)极低剖面的同时,实现了8.8 dBi以上的稳定增益,峰值增益达11.1 dBi,并展现出良好的定向辐射特性。

关键词

磁电偶极子天线; 低剖面; 宽带; 高增益; 定向辐射

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.025

0 引言

随着现代通信技术的飞速发展,无人机通信、卫星移动终端及便携式基站等应用场景对天线性能提出了多维度的要求。在这些应用中,不仅要求天线具备低剖面的物理特性,还要求具备高增益的辐射性能,以满足设备小型化与远距离、高质量通信的需求^[1-2]。然而,高增益通常依赖于较大的天线口径或垂直电尺寸,而低剖面设计则会压缩辐射体的有效空间,导致增益下降与带宽受限^[3]。

针对上述挑战,磁电偶极子天线展现出显著优势。其经典结构能够实现宽频带、稳定的辐射方向图、低后瓣等优良的辐射特性^[4]。然而,传统的磁电偶极子天线结构通常包含一个用于激励磁偶极子的 $\lambda/4$ 垂直短路腔,垂直高度较大,不利于低剖面设计^[5-6]。为突破这一限制,国内外学者进行了广泛而深入的研究。主要技术路线包括:采用弯折结构将垂直部分水平化以降低高度^[7];利用创新馈电方式起到降低剖面的作用^[8-9];以及加载人工磁导体等超材料表面作为反射器来缩减有效剖面^[10]。尽管这些方法在一定程度上降低了剖面,但也常常伴随着结构复杂度的增加。如立体弯折角度和AMC单元尺寸对加工误差较为敏感,从而影响天线性能的稳定性和量产成本。

基于上述背景,本文提出了一种低剖面高增益磁电偶极子天线单元。该单元采用衬底集成和半圆末端矩形窗口技术,实现了低剖面设计,同时引入中央S形弯折馈电贴片与多金属化通孔加载,协同优化了阻抗匹配与辐射特性。并且中间层使用低介电常数的PMI泡沫^[11-12]作为支撑,以

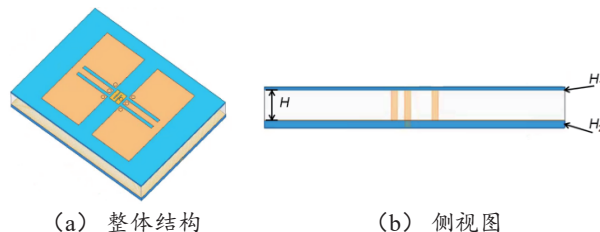
实现轻量化。在此优化的单元基础上,构建了1×2阵列,以进一步提升增益与定向辐射性能,从而满足相关应用对天线综合性能的需求。

1 天线单元结构设计与分析

1.1 结构设计

本文设计的低剖面高增益磁电偶极子天线单元的结构如图1所示。天线采用三层堆叠结构,从下至上依次为:底层介质基板、中间PMI泡沫间隔层和顶层介质基板。两层F4B介质基板的介电常数均为4.5,金属结构采用印刷电路板工艺制作。

具体设计过程如下:首先,在厚度为 $H_2 = 3.6\text{ mm}$ 的下层基板下表面印制 $50\ \Omega$ 微带馈线,在上表面印刷金属地板,并刻蚀一个半圆末端矩形辐射缝隙。其次,采用厚度 $H = 16\text{ mm}$ 的PMI泡沫作为中间支撑层。随后,在厚度 $H_1 = 1.6\text{ mm}$ 的上层基板上表面,印制一对对称的带槽矩形寄生贴片作为主要辐射体,并且在两贴片间隙的中心位置印制了一个S形弯折金属贴片,该贴片通过一个金属圆柱垂直穿过泡沫层及地板缝隙,与底层微带线连接,构成复合馈电结构。最后,对称引入六枚金属化通孔,将上层寄生贴片与底层地板连接,用于阻抗匹配调节。天线总厚度 $H_{\text{total}} = 21.2\text{ mm}$ 。优化后的关键结构参数如表1所示。



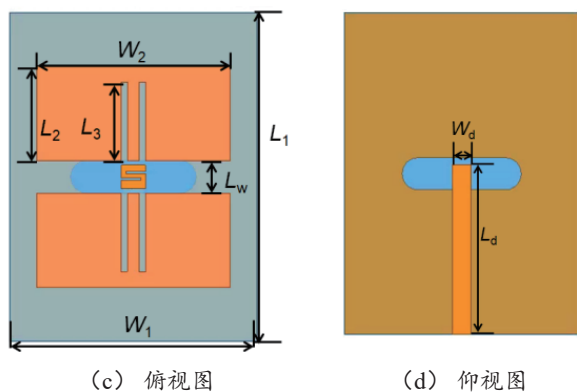


图1 天线结构图

表1 天线结构相关几何参数值 (mm)

参数	数值	参数	数值	参数	数值
L_1	160	L_2	45.8	L_3	38.2
L_w	16	W_1	120	W_2	93.8
W_d	9.5	L_d	84.6		

1.2 工作机理分析

刻蚀在地面上的半圆终端矩形窗口和顶层基板上侧的对称金属贴片分别起到磁偶极子和电偶极子的作用，二者组合而成的主辐射结构决定了天线的辐射过程。

图2给出了天线在中心频率1.5 GHz处一个完整工作周期内四个关键相位的表面电流分布图。

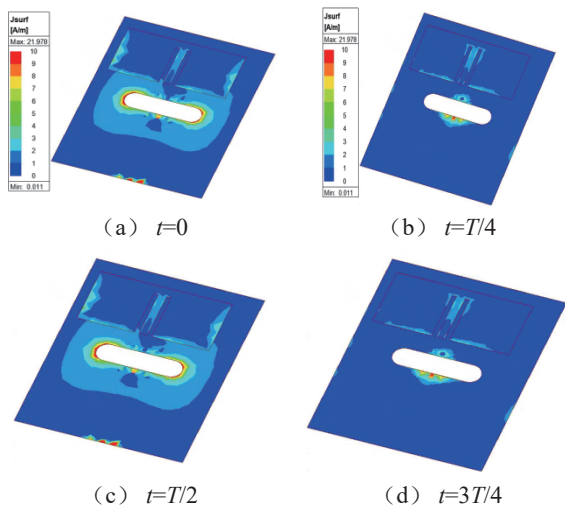


图2 天线在一个周期内的表面电流分布示意图

如图2(a)(c)所示，当 $t=0$ 和 $T/2$ 时，矩形窗口周围和金属贴片上的电流达到最大幅值。对比图2(b)(d)可观察到，此时缝隙边缘的等效磁流与贴片上的电流均显著衰减。因此，不同时刻的电流分布情况表明，半圆终端矩形窗口周围与矩形金属贴片两个结构的电流最强时刻是一致的，本天线所激励起的磁偶极子与电偶极子具有高度一致的时间

相位，同时达到强度最大值与最小值。这种同相激励机制是天线产生稳定单向辐射及对称方向图的物理基础，从而验证了其作为磁电偶极子天线的设计有效性。

1.3 参数分析

由矩形金属贴片与具有半圆形缝隙结构的金属构成的复合辐射结构，以及S形金属贴片共同主导了天线的电磁辐射特性。为探究其工作机理，本文将重点分析这两个关键结构对天线性能的作用。

如图3所示，矩形窗口的大小对驻波有不可忽略的影响。随着带有半圆末端的矩形窗口的增大，低频段驻波比逐渐降低。这是由于当缝隙增大时，有效磁偶极子变长，其工作频带向更低的频率移动，从而获得更好的阻抗匹配。因此，只要设计合理的矩形窗，比如选择较大的尺寸，以便在较低频段获得更好的阻抗匹配，天线就能够工作在相对较低的频段。这里将矩形窗口的整体长度选择为61 mm来实现整个工作频段的阻抗匹配。

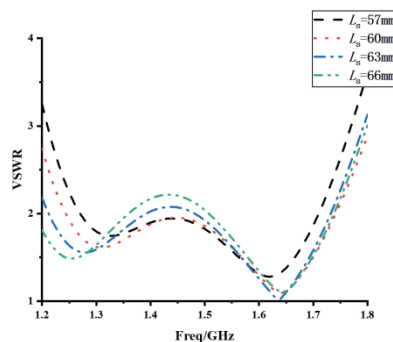


图3 不同尺寸矩形窗的驻波比

S形弯折馈电贴片作为微带馈线与上层辐射结构的阻抗变换与耦合桥梁，实现了从50 Ω微带线到辐射主体之间的宽带阻抗匹配。

为验证S形贴片对辐射性能的改善，图4对比了加载前后在1.5 GHz的方向图。加载S形贴片后，E面和H面的后瓣电平从-9.1 dB降至-11.9 dB，前后比改善了2.8 dB，证明了其在提升天线定向性方面的有效性。

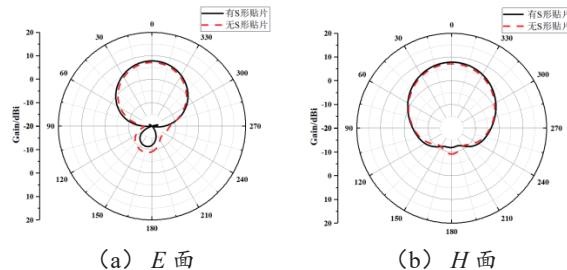


图4 1.5 GHz 二维方向图对比结果

经过系统优化，天线单元的最终仿真性能如图5所示。其电压驻波比(VSWR)<2的阻抗带宽为1.24~1.74 GHz(相

对带宽 33.6%)，在整个工作频带内保持稳定的辐射性能，增益值始终维持在 6.8 dBi 以上，峰值增益可达 8.5 dBi，验证了设计的有效性。

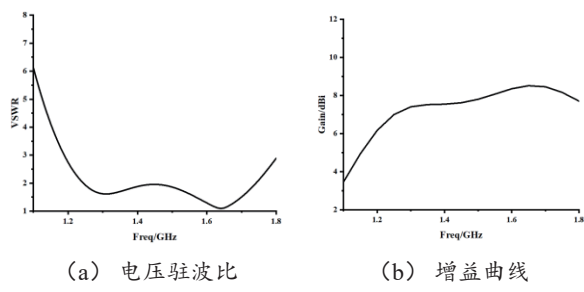


图 5 天线单元仿真结果

2 阵列天线设计

为进一步提升增益，以前述优化单元为阵元，构建了 1×2 直线阵列。阵列采用 T 型微带功分器进行等幅同相馈电，以确保阵列方向图的最大辐射方向垂直于天线板面，并且不产生偏斜。为了保证两个单元的幅度和相位一致性，微带馈线的路径长度被严格保持相等，最后经过优化，以确保在工作频带内具有良好的阻抗匹配。经过参数扫描与优化设计，确定了天线阵列的最终结构形式。最终确定的天线长度为 320 mm，最终组成的仿真模型如图 6 所示。

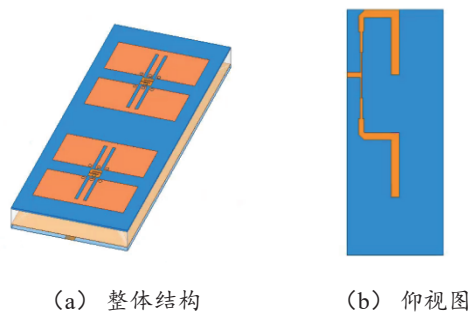


图 6 阵列天线结构图

图 7 呈现了该天线的电压驻波比、增益及辐射方向图的仿真结果。仿真数据显示，该天线在 1.22~1.71 GHz 频带范围内电压驻波比始终保持在 2 以下，相对阻抗带宽达到 33.4%。从增益特性来看，天线在整个工作频段内表现稳定，增益值始终高于 8.8 dBi，其中峰值增益达到 11.1 dBi。1.5 GHz 处的辐射方向图显示，阵列保持了良好的辐射特性，且波束宽度更窄，定向性进一步增强。

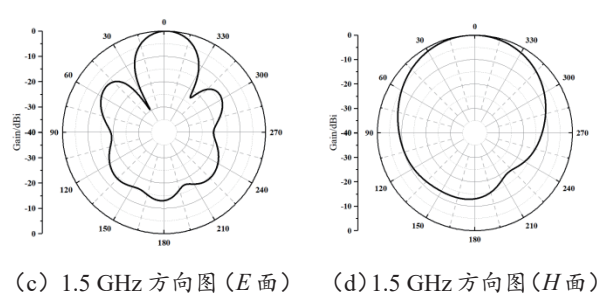
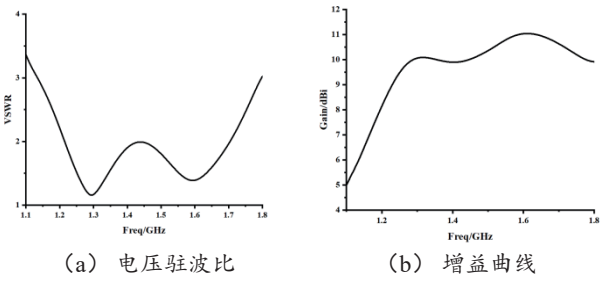


图 7 天线仿真结果

3 天线的仿真与测试结果分析

加工制作的天线实物如图 8 所示。该天线采用 50 Ω 的 SMA 同轴连接器进行馈电。实测 VSWR 与仿真结果对比曲线如图 9 所示，两者趋势一致，实测驻波中间频段略偏高，偏差主要源于介质板的介电常数公差、加工精度以及焊料的影响，在可接受范围内。

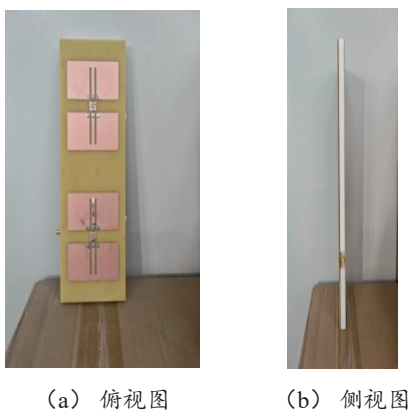


图 8 天线加工实物图

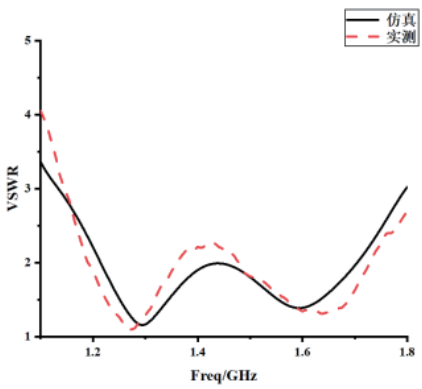


图 9 仿真与实测 VSWR 对比

为评估天线的远场辐射性能，在微波暗室中对其进行测试，本研究选取工作频段内三个频点 1.3 GHz、1.5 GHz、1.7 GHz 的两个主平面方向图分别进行测试。通过对比仿真与实测数据发现，E 面与 H 面的实测方向图与仿真结果均保持较高一致性，其中旁瓣与后瓣电平的偏差均处于可接受范围，充分验证了从设计到加工的可行性，如图 10 所示。

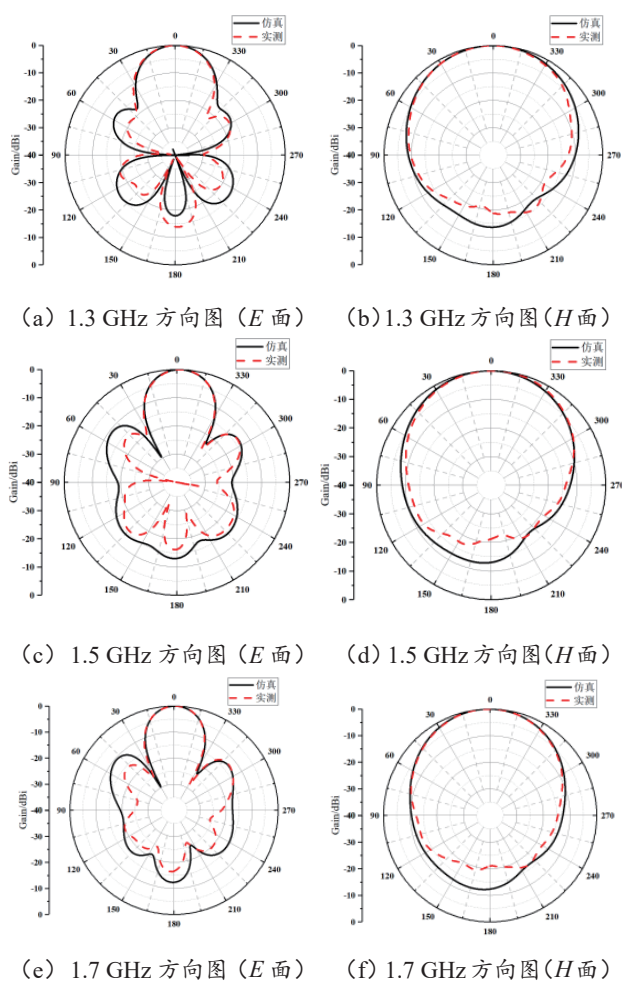


图 10 仿真与实测辐射方向图对比

4 结论

本文成功设计了一款低剖面高增益磁电偶极子天线,该天线通过采用上层寄生贴片、下层半圆末端辐射缝隙与中央 S 形弯折馈电片构成的复合结构,并结合多金属化通孔加载技术,有效协同了阻抗匹配与辐射特性。最终,该天线在仅 $0.09\lambda_0$ (λ_0 为最低工作频率点对应波长) 的低剖面高度下,实现了 33.4% 的相对阻抗带宽 (1.22~1.71 GHz) 和 11.1 dBi 的峰值增益,兼顾了宽带、高增益与低剖面特性。天线的加工实测结果与仿真设计吻合,验证了方案的可行性与工程实用价值,为对剖面有严格限制的现代通信平台提供了一种解决方案。

参考文献:

- [1] LI M, SHANG Z L, PU L, et al. Low-profile, low sidelobe array antenna with ultrawide beam coverage for UAV communication[J]. Chinese journal of aeronautics, 2025, 38(1): 103159-103159.

- [2] 李长江, 刘运林, 钟选明. 一种新型的低剖面定向宽带圆极化天线设计 [J]. 电子元件与材料, 2024, 43(1): 104-109.
- [3] 潘煥知. 高增益宽频带阵列天线设计与性能补偿 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [4] LUK K M, WONG H. A new wideband unidirectional antenna element[J]. International journal of microwave and optical technology, 2006: 35-44.
- [5] ALMEGBEL K, TONG F K. Low-profile proximity-coupled cavity-less magneto-electric dipole antenna[J]. Sensors, 2025, 25(4): 1234-1234.
- [6] GE L, LUK K M. A low-profile magneto-electric dipole antenna[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 60(4): 1684-1689.
- [7] LI J, CHEN X, HAO S J, et al. Miniaturization of a wideband magnetoelectric dipole antenna by folding[J]. Microwave and optical technology letters, 2022, 64(10): 1773-1778.
- [8] 裴俊毅, 卫永平, 胡泰洋, 等. 一种基于 SIW 馈电的毫米波宽带磁电偶极子天线设计 [J]. 微波学报, 2023, 39(S1): 103-105.
- [9] 刘丰铭, 汪敏, 王杰传, 等. 一种低剖面低 RCS 磁电偶极子天线阵列的设计 [J]. 电子技术应用, 2024, 50(9): 31-35.
- [10] 赵恩惠, 张胜, 刘海, 等. 加载超表面的低剖面磁电偶极子滤波天线 [J]. 压电与声光, 2024, 46(6): 979-984.
- [11] 燕秀林, 史昀祺, 朱丽娜. 基于新型泡沫材料的龙伯透镜天线设计 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(12): 4111-4115.
- [12] 刘秀利. PMI 泡沫在微带天线阵面上的应用研究 [J]. 复合材料科学与工程, 2022(4): 87-91.

【作者简介】

赵春悦 (2000—), 女, 吉林永吉人, 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: 2026-01-20 修回日期: 2026-03-12)