

环境电磁监测的立方体天线设计

李思墨¹ 陈 星¹

LI Simo CHEN Xing

摘 要

针对环境电磁功率监测,设计了一种全向全极化立方体天线,将平面偶极子天线折叠为立方体结构,大幅度缩小了天线尺寸,并具有对垂直/水平极化和圆极化极化,以及各方向上来波的有效接收能力。采用增加电感耦合环、寄生单元和偶极子臂末端弯折环等结构,提高了立方体天线的阻抗匹配、全向性和接收增益等性能。设计并加工制作了一只尺寸为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的立方体天线样品。测试和仿真结果吻合良好,表明所提出的天线在 $1\sim 10\text{ GHz}$ 工作频段内,具有良好的球状全向方向图,增益达到 $-1.67\sim 9.71\text{ dBi}$ 。

关键词

全向;全极化;立方体天线;高增益;环境电磁监测

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.04.033

0 引言

随着无线通信技术的迅速发展和普及,无线通信设备的种类和数量快速增加,大量电磁器件和电子信息设备在生产生活中被广泛使用,形成了日益繁复的电磁环境^[1],引发了频谱管理的新挑战。环境电磁监测是频谱资源管理的有效手段和必要基础,对纷扰的环境进行电磁监测已经成为电子通信领域不可或缺的基础^[2]。考虑到环境电磁信号在类型、频率和功率上表现出复杂多样化的特点,本文针对电磁信息难以综合分析和环境趋势难以预测等需求问题和技术难点,设计了一款全向全极化立方体天线。

目前,已经有很多针对MIMO天线研究的立方体结构^[3-5],这些立方体上安装了多个天线,每个天线由不同的端口馈电。本文设计的立方体天线仅由一个端口馈电达到了全向性。偶极子曲折线结构已经被广泛应用于减小天线的尺寸^[6-8],文中进一步对偶极子臂折叠成立方体形状减小了天线的高度和侧面尺寸。文献[9]提出可以使用遗传算法来优化偶极子弯折线的形状,以改善天线的驻波特性,本文进一步改善了天线的增益与尺寸。

本文提出的小型化立方体天线的设计,基于平面偶极子天线,折叠成立方体结构。整只天线使用一个馈电端口,使得天线六个侧面的偶极子臂结构均可接收电磁信号。由于采用了增加电感耦合环、寄生单元和偶极子末端弯折环等结构,实现了全向全极化高增益超宽带接收天线。本文所提出的立

方体环境电磁监测天线设计旨在集全向辐射方向图、全极化、高增益于一体。立方体天线的设计有潜力成为一个3D超低成本的结构设计,用于实现环境电磁监测天线。

1 天线结构设计

偶极子曲折线结构可以被用来减小天线的尺寸^[9-11]。同时,偶极子臂通常被折叠,以减小偶极子的高度或是侧面尺寸^[12]。正如文献[10]中讨论的,遗传算法可以用于优化偶极子曲折线的形状。图1(a)中展示了一个普通的偶极子平面天线,将偶极子臂弯折成图1(b)的形状是为了增强天线的带宽与增益性能。仿真发现当偶极子臂末端的电流变为0时,在靠近电流最集中的馈电元件处弯折越少,天线性能越好。其中,曲折线的水平段不会提高天线的辐射功率,因为线电流会互相抵消。此外,通过将曲折集中在偶极子臂的末端可以实现最小化的水平长度,以及更大的阻抗带宽和更高的效率。使用立方体结构与曲折线偶极子臂的目的是在改善增益和辐射特性^[13]的同时进一步降低高度和整体尺寸。

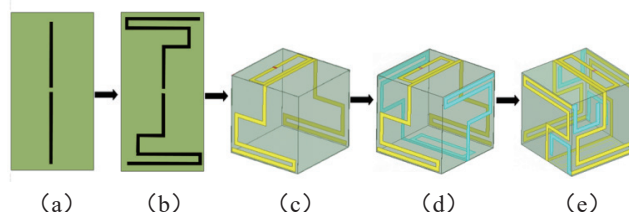


图1 立方体天线设计进程

在分析立方体结构之前,首先对平面曲折偶极子天线进行分析。平面天线图如图1(b),偶极子臂的弯折使得天线的整体长度变小。该天线的辐射方向图为典型的环形图。平

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 (No.WBC2312008)

面天线在尺寸小型化方面有一定的优势，但辐射方向图无法达到全向性，对于接收电磁信号也无法达到全极化。于是，将天线结构折叠成立方体后进行分析研究。

将图 1（b）平面弯折偶极子天线折叠成图 1（c）立方体结构。弯折偶极子天线折叠在立方体结构两侧时，由于立方体两侧弯折线之间的耦合阻抗会变为容性。天线两侧的偶极子臂具有 180° 的异相电流，充当电容器。为了消除电容，在立方体上方添加了电感耦合环作为馈电结构，并调整参数使其输入阻抗达到最优匹配。增加结构后，电感耦合和电容相互抵消，但此时的辐射方向图仍然未能达到全向。

为实现天线的全向性，增加了与原结构完全对称的寄生单元来改善辐射方向图，天线模型见图 1（d），图中蓝色部分为寄生单元。天线的顶部和底部的结构是相同的，只是底部元件没有激励端口，是纯寄生结构。寄生元件耦合到被激励元件，使得天线产生的辐射效率增加，并且充分利用立方体的六个侧面产生全向辐射方向图。天线的每只偶极子臂的形状也是相同的，只是不同面的偶极子臂朝向不同，结构中的对称结构很重要，经过仿真验证，当对称结构被破坏时将会对天线辐射效率产生负面影响。

为了进一步提高天线增益，在偶极子臂的末端增加了弯折环结构。优化后的最终立方体天线结构参数值见表 1，天线模型如图 2，立方体的每个边长均为 10 cm，金属铜箔厚度为 0.15 mm。图中天线顶部红色处为馈电端口，弯折环位于偶极子臂末端的相邻立方体面，在延长电流路径的同时与另一只偶极子臂产生了耦合，从而提高了整体天线的增益，下一节中将展示增益对比。

表 1 环境电磁监测立方体天线结构参数值

参数	L1	L2	L3	L4	W1	W2	HL	HW
数值/cm	5.15	3.6	1.5	2.5	9.8	4	9.6	2.3

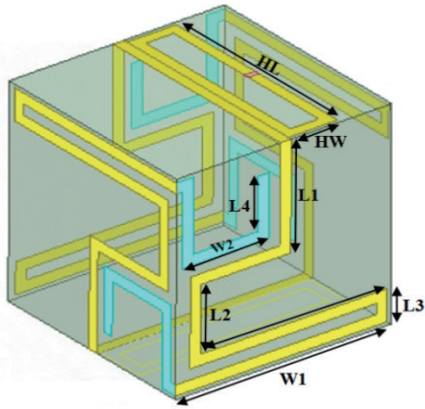


图 2 新型环境电磁监测立方体天线

本文设计的全向全极化环境电磁监测立方体天线如图 2

所示。新型立方体天线基于弯折线偶极子平面天线，通过折叠形成了立方体结构。使用遗传算法对偶极子臂的弯折形状优化得到了最佳结构，同时增加了电感耦合环和偶极子臂末端弯折环等结构，实现了天线辐射方向图的全向性，接收电磁信号的全极化性，以及高增益超宽带接收特性。

2 仿真分析

2.1 天线增益

采用电磁仿真软件对上述天线结构进行建模仿真，仿真所得的图 1（d）与图 1（e）中天线实际峰值增益曲线对比如图 3 所示。增加弯折环结构后与未增加弯折环结构相比，增益在工作频段 1 ~ 10 GHz 范围内提升了 4 dBi 左右，最高提升了 6 dBi。

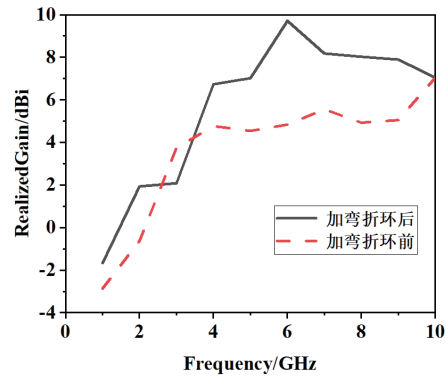


图 3 增加结构前后增益对比

2.2 方向图

仿真分析了天线在关键频点 2 GHz、4 GHz、8 GHz、10 GHz 处的 3D 方向图如图 4 所示，对应的最大增益分别为 3.81 dBi、6.17 dBi、8.35 dBi、7.04 dBi。从图中可以看出，3D 方向图呈近球形，表明天线具有较好的全向性。

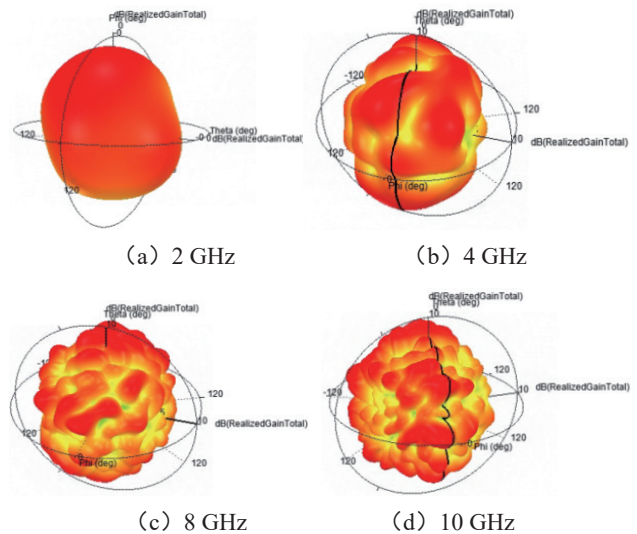


图 4 仿真 3D 方向图

2.3 VSWR 分析

天线仿真的驻波比 VSWR 如图 5 所示, 本文设计的天线为纯接收天线, 天线不会因能量反射而烧毁发射源, 因此可以不用要求驻波比表现良好。

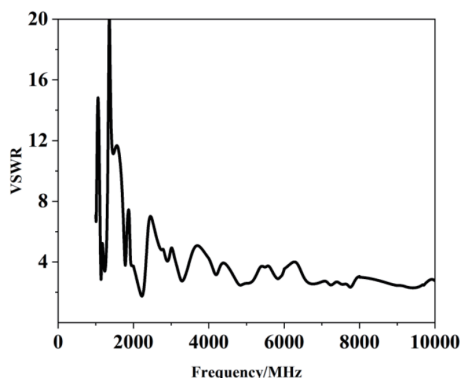


图 5 仿真 VSWR

3 加工与测试

为了验证本设计的有效性和可靠性, 加工制作了一款天线样品。加工的实物图片如图 6, 天线总体尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 贴片金属铜箔厚度为 0.15 mm 。

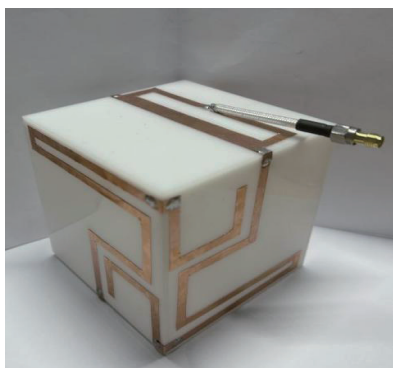
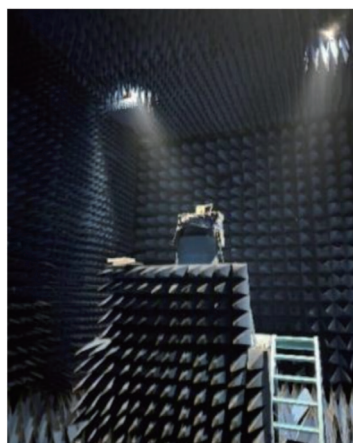


图 6 加工实物

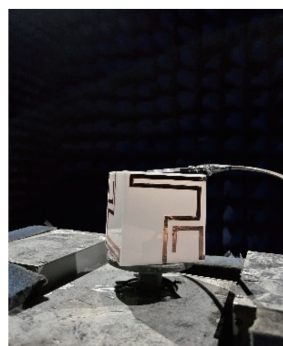
图 6 中金属条是通过首先在平面铜箔上进行光刻, 然后再将其粘贴在立方体有机玻璃上。天线的内部支撑结构选择了六块有机玻璃 PMMA 粘合而成的立方体, 该材料具有较低的介电常数和损耗角正切, 对整体天线性能的影响较小, 使用有机玻璃壳制作立方体支撑结构的优点是其增强了机械稳定性的同时可以更方便粘贴天线结构。

天线使用同轴电缆进行馈电, 将同轴线的内导体焊接到馈电口的一端, 外导体焊接到馈电口的另一端。采用同轴线馈电结构加工方式十分简单, 同时对于实物测试的电缆连接也十分方便。

天线增益与方向图是在微波暗室中测试的, 通过旋转天线并测量其接收信号的强度从而获取不同方向上的辐射特性数据, 绘制出天线的方向图以及增益, 图 7 为天线的实测场景。



(a) 实测整体场景



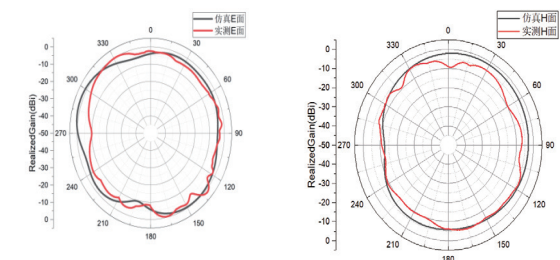
(b) 测试 X_0Y 面时



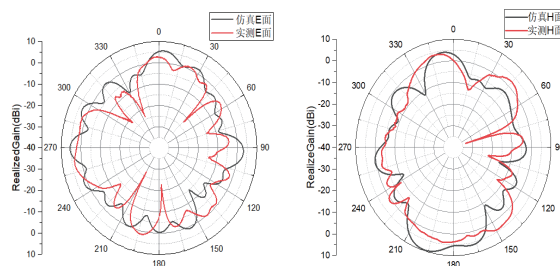
(c) 测试 Y_0Z 面时

图 7 天线实测场景

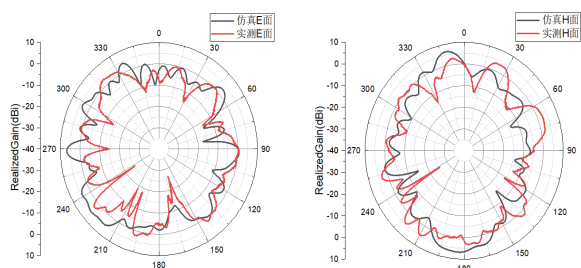
实测与仿真的关键频点 2 GHz 、 6 GHz 、 10 GHz 处 2D 方向图对比如图 8 所示, 两者基本吻合, 立方体天线的辐射方向图呈近圆形, 是全向的。这些结果表明, 无论电磁信号的方向如何, 极化方式如何, 立方体天线都可以监测环境电磁信号。



(a) 2 GHz



(b) 6 GHz



(c) 10 GHz

图7 仿真与实测 2D 方向图对比

该天线在 1 ~ 10 GHz 范围内实测的增益与仿真的增益对比如图 8 所示,可以看出仿真与实测结果较为吻合。仿真与测试的差异可能是因加工误差和测试误差所致。

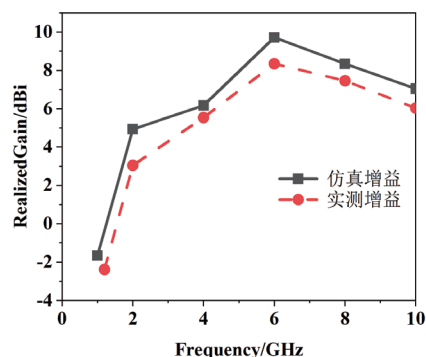


图8 仿真与实测最大增益对比

4 结语

本文设计了一款用于环境电磁监测的立方体接收天线。该天线基于曲折偶极子天线,折叠成立方体结构,旨在集全向性、全极化、高增益于一体。由于对偶极子臂的弯折形状优化、使用了电感耦合匹配技术以及增加了偶极子末端弯折环等结构,实现了天线辐射方向图的全向性以及接收电磁信号的全极化性,同时在全向与全极化特性的基础上提高了天线增益。通过加工立方体天线样品,将仿真结果与实物测试的结果对比,该天线的仿真性能与实测性能吻合较好,验证了该天线设计的可行性。

参考文献:

- [1]CONSTABLE C. Earth' s electromagnetic environment[J]. Surveys in geophysics, 2016, 37(1): 27-45.
- [2]FUELLEKRUG M, FRASER-SMITH A C. The earth' s electromagnetic environment[J]. Geophysical research letters, 2011, 38(21): 3-7.
- [3]CHIU C Y, MURCH R D. Design of a 24-port MIMO cube[C]// 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium,v.1. Piscataway: IEEE,2007:2397-2400.
- [2]GETU B N, ANDERSEN J B. The MIMO cube-a

compact MIMO antenna[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2002,4:112-114.

- [3]NEMETH A, SZUCS L, NAGY L. MIMO cube formed of slot dipoles[C]// 2007 Proceedings of the 16th IST Mobile and Wireless Communications,v.1.Piscataway:IEEE,2007:1-5.
- [4]AHN J S , HA D H , KIM K S. Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2005,53:3870-3876.
- [5]LI Y, BASAT S S, TENTZERIS M M.Design and development of novel inductively coupled RFID antennas[C]// 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Piscataway: IEEE, 2006:1035-1038.
- [6]SON H W, PYO C S. Design of RFID tag antennas using an inductively coupled feed[J]. Electronics letters, 2005,41:994-996.
- [7]MARROCCO G. Gain-optimized self-resonant meander line antennas for RFID applications[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2003,2:302-305.
- [8]LI Y, SERKAN B S, TENTZERIS M M. Design and development of novel inductively coupled RFID antennas[C]// 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium.Piscataway:IEEE/IEE Electronic Library,2006:1035-1038.
- [9]MARROCCO G. The art of UHF RFID antenna design: impedance-matching and size-reduction techniques[J]. IEEE antennas and propagation magazine, 2008,50:66-79.
- [10]WANG Y, TSAO H Y, SAUBER N, et al. Micro-machined 3D cube antenna for X-Band communication ICs[C]//2021 IEEE 21st Annual Wireless and Microwave Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2021:1-3.
- [11]DIAO J, LIU L. Receiving antenna realized gain understood by the poynting streamline method[C]// 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Piscataway:IEEE, 2022:1240-1241.
- [14]李明洋. HFSS 天线设计 [M]. 北京:电子工业出版社, 2014.
- [15]LUO J W, PAN Y M, ZHENG S Y, et al. A planar angled-dipole antenna with quasi-isotropic radiation pattern[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68(7): 5646-5651.

【作者简介】

李思墨(1998—),女,辽宁人,硕士研究生,研究方向:天线设计。

陈星(1970—),男,四川巴中人,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:2024-01-11)