

# 一种新型小型化导航四臂螺旋天线

薛玉磊\*, 黄卫平

山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2023年11月7日; 录用日期: 2023年12月12日; 发布日期: 2023年12月20日

## 摘要

四臂螺旋天线具有良好的圆极化辐射方向图, 良好的低仰角增益, 且具有结构简单紧凑的优点, 在通信、导航等领域具有广泛的应用。针对传统四臂螺旋天线一般由金属线绕制而成, 或者通过柔性基板印制后卷成圆柱形或者圆锥形所带来的复杂工艺问题, 本文采用3D打印实现了一款轻量化小型化的介质镂空型圆极化四臂螺旋天线。天线采用多馈点设计, 保证天线相位中心和几何中心的重合, 测试结果表明在1.59 GHz的轴比小于1.5 dB, 增益为1.68 dBi。该四臂螺旋天线具有潜在的实际应用价值。

## 关键词

四臂螺旋天线, 圆极化, 轴比, 多馈点

# A Novel Miniaturized Navigation Four-Arm Helical Antenna

Yulei Xue\*, Weiping Huang

School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao Shandong

Received: Nov. 7<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 12<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 20<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The four-arm helical antenna has the advantages of favorable circular polarization radiation pattern, good low elevation gain, and boasts a simple compact structure. This makes it broadly applicable in areas such as communication and navigation. In view of the complicated processing technological problems caused by the traditional four-arm helical antenna which is usually wound by metal wire or printed by flexible substrate and then rolled into a cylinder or cone shape. In this paper, a lightweight and miniaturized dielectric hollow circular polarization four-arm helical antenna is designed and realized by using 3D printing. The antenna adopts a multi-feed point design

\*通讯作者。

to ensure the coincidence of the phase center and the geometric center of the antenna. The experimental results show that in a working frequency of 1.59 GHz, the axial ratio is less than 1.5 dB, and the gain is about 1.68 dBi. The four-arm helical antenna has potential practical application value.

## Keywords

Four-Arm Helical Antenna, Circular Polarization, Axial Ratio, Multi-Feed Point

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

随着人们对通信和定位需求的日益增加,全球卫星导航系统近年来不断发展,在军事和民用方面都被广泛应用。相比于传统无线电定位,卫星导航系统具有定位精度高、响应快、覆盖范围广和全天时的突出优点,可为用户提供准确的三维坐标信息。在卫星导航系统中,测控天线用于接收地面站发射给航天器的遥控信号,以及向地面站发射航天器的遥测信号,发挥着无可替代的重要作用。

测控天线通常安装在卫星表面,多采用收发共用模式,要求具有半空间波束覆盖[1]。对于卫星导航天线来说,需要它具有良好的接收特性和辐射模式,同时满足卫星的接收频段。因此在天线的选择上,必须需要低仰角接收电磁波的能力,使其可以接收上半球面的来波。与线极化辐射相比,圆极化可以有效抑制雨雾干扰和减小多径反射,因此测控天线的辐射模式为圆极化,天线的工作带宽需全面覆盖所需要的卫星工作频段。

一般卫星导航频段都比较窄,因此通常选用螺旋天线[1]-[11]、微带天线和振子天线作为卫星导航接收天线。螺旋天线在1947年已有报道[2]。螺旋天线如四臂螺旋天线具有波束宽、增益高、尺寸小、结构紧凑等优点,在北斗与GPS卫星导航接收机[3]以及箭载天基遥测系统[4]等遥感、导航、通信中具有广泛应用。[1]设计了一种宽波束宽角轴比四臂螺旋天线。[4]设计了一种箭载天基遥测系统应用的双臂螺旋天线。[8]设计了一种LTCC圆极化螺旋天线阵列,在满足小尺寸的同时,增益达到14 dBi。[10]设计了一种宽带圆极化印刷螺旋天线,其相对带宽为40.3%,最大增益为6.4 dBi。近年来,新的螺旋天线比如蛇形结构的全向圆极化螺旋天线[5],方形四臂缝隙螺旋天线[6],圆极化法向模反转螺旋天线[7],多模螺旋天线[11]等不断涌现。随着越来越多的卫星测控系统增加了在轨高速数据传输的功能,对测控天线不仅要求具有宽波束,还要求有较高的主向增益,同时为减小星表复杂电磁环境导致的同旋矢量叠加,还要求测控天线具有优异的圆极化性能。上世纪90年代,欧洲航天局(ESA)研制的“阿丽亚娜4”运载火箭就采用三分集右旋圆极化天线,将低噪声放大器和天线集为一体。四臂螺旋天线采用自相位馈电方式,通过调整两对正交螺旋线的长度,使其输入导纳分别呈感性和容性,从而将馈电相位差调整为90度,使天线形成圆极化辐射特性。

随着无线通信技术的发展,天线结构越来越复杂,对加工精度要求越来越高,传统的天线制作方法已经无法满足当今天线设计制造的要求。3D打印技术因具有环保、生产周期短和复杂结构一体化成形等优点,为现代微波器件加工制作提供了一个良好的平台[12]-[18]。在计算机的辅助下,通过连续打印材料层来创建三维物体,3D打印技术可以精确、快速制作出任意的天线结构,因此在航空航天等领域得到广

泛应用。目前, 这种增材制造技术已用于加工微带天线、喇叭天线[12]和宽频龙勃透镜天线[13]等。[14]采用选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)一体化制造成形技术制造了四臂螺旋天线; [18]制造了毫米波宽带喇叭天线阵列。

本文利用四臂螺旋天线结构的高度对称性、优良的圆极化辐射特性、可接收低仰角电磁波等突出优点, 结合 3D 打印技术的制造优势, 设计制作了一个新型小型化、轻量化的介质内部镂空的圆极化四臂螺旋天线, 其中心频率为 1.59 GHz, 0 度轴比仅为 0.019 dB, 增益可达 1.78 dBi, 实物尺寸为  $0.13\lambda_0 \times 0.11\lambda_0$ 。

## 2. 天线的基本理论

使用基于积分方程的数值分析方法对四臂螺旋天线进行分析, 相关的参数和变量定义如图 1 所示。假定螺旋臂上的电流为正弦分布, 此时, 电流峰值点位于馈电点及终端, 而在中间点电流最小。图中辐射单元 1 的总辐射场的  $\varphi$  分量为:

$$E_{\varphi 1} = \frac{-j\omega\mu\epsilon e^{-jkr}}{4\pi r} \int_{l=0}^{l=\lambda/2} i_{\varphi} e^{jkr'\cos\varphi} dl \quad (1)$$

如果用  $\alpha$  作为积分变量, 由图 1 可得:

$$dl = \frac{r_0}{\cos\beta} d\alpha \quad (2)$$

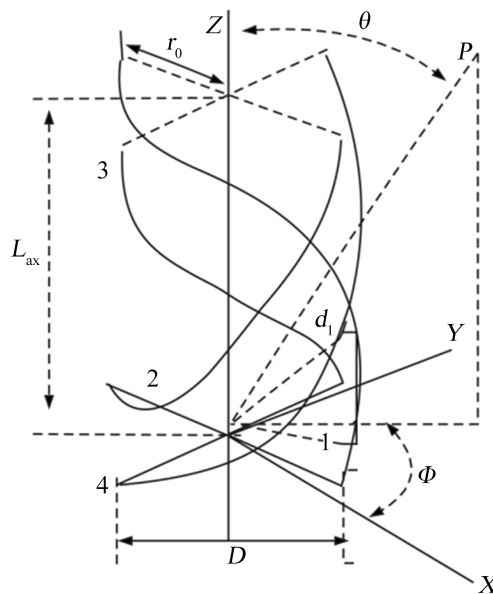


Figure 1. Parameter definition of the helical antenna  
图 1. 螺旋天线分析参数定义

将式(2)带入式(1)得:

$$E_{\varphi H} = \frac{-j\omega\mu r_0 e^{-jkr}}{4\pi r \cos\beta} \int_0^{2N\pi} i(\varphi, \alpha) e^{jkr'\cos\varphi} d\alpha \quad (3)$$

因为每个单元的电流幅度可表示为:

$$i_{\varphi}(\alpha) = I_0 \cos(kr_0) \cos\left(\frac{\alpha}{2N}\right) \cos\beta \quad (4)$$

那么单元 1 和单元 2 的电流为:

$$i_{\varphi}(\varphi, \alpha) = i_{\varphi}(\alpha) \cos(\varphi - \alpha) \quad (5)$$

单元 3 和单元 4 的电流为:

$$i_{\varphi}(\varphi, \alpha) = i_{\varphi}(\alpha) \sin(\varphi - \alpha) \quad (6)$$

单元 1 的相位项为:

$$r' \cos \varphi = \frac{\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}}{r} = r_0 \cos \alpha \sin \theta \cos \varphi + r_0 \sin \alpha \sin \theta \sin \varphi + \frac{P\alpha}{2\pi} \cos \theta \quad (7)$$

定义:

$$K = \frac{\omega \mu I_0 r_0 \cos(kr_0) e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (8)$$

则单元 1 的  $E_{\varphi}$  分量为:

$$E_{\varphi H1} = -jk \int_0^{2N\pi} \cos\left(\frac{\alpha}{2N}\right) \cos(\varphi - \alpha) e^{jk\left(r_0 \cos \alpha \sin \theta \cos \varphi + r_0 \sin \alpha \sin \theta \sin \varphi + \frac{P\alpha}{2\pi} \cos \theta\right)} d\alpha \quad (9)$$

同理可得, 单元 2 的  $E_{\varphi}$  分量为:

$$E_{\varphi H2} = -jk \int_0^{2N\pi} \cos\left(\frac{\alpha}{2N}\right) \cos(\varphi - \alpha) e^{jk\left(-r_0 \cos \alpha \sin \theta \cos \varphi - r_0 \sin \alpha \sin \theta \sin \varphi + \frac{P\alpha}{2\pi} \cos \theta\right)} d\alpha \quad (10)$$

由于正交馈电, 所以单元 3 的  $E_{\varphi}$  分量为:

$$E_{\varphi H3} = k \int_0^{2N\pi} \cos\left(\frac{\alpha}{2N}\right) \sin(\varphi - \alpha) e^{jk\left(-r_0 \sin \alpha \sin \theta \cos \varphi + r_0 \cos \alpha \sin \theta \sin \varphi + \frac{P\alpha}{2\pi} \cos \theta\right)} d\alpha \quad (11)$$

同理可得, 单元 4 的  $E_{\varphi}$  分量为:

$$E_{\varphi H4} = k \int_0^{2N\pi} \cos\left(\frac{\alpha}{2N}\right) \sin(\varphi - \alpha) e^{jk\left(r_0 \sin \alpha \sin \theta \cos \varphi - r_0 \cos \alpha \sin \theta \sin \varphi + \frac{P\alpha}{2\pi} \cos \theta\right)} d\alpha \quad (12)$$

如果螺旋臂上的电流分布与假定的电流分布基本一致, 其辐射场可分为 1/4 圈、1/2 圈和 1 圈。

对于 1/4 圈:

$$E_{\varphi R_{1,2}} = \frac{-j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} 2I_0 r_0 \cdot (\cos \varphi e^{jk \cos \theta P/4} - \sin \varphi) \quad (13)$$

$$E_{\varphi R_{3,4}} = \frac{\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} 2I_0 r_0 \cdot (\sin \varphi e^{jk \cos \theta P/4} + \cos \varphi) \quad (14)$$

对于 1/2 圈:

$$E_{\varphi R_{1,2}} = \frac{-j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} 2I_0 r_0 \cdot \sin \varphi (e^{jk \cos \theta P/2} - 1) \quad (15)$$

$$E_{\varphi R_{3,4}} = \frac{\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} 2I_0 r_0 \cdot \cos \varphi (1 - e^{jk \cos \theta P/2}) \quad (16)$$

对于 1 圈:

$$E_{\varphi R_{1,2}} = \frac{-j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} 2I_0 r_0 \cdot \sin \varphi (e^{jk \cos \theta P/2} + 1) \quad (17)$$

$$E_{\varphi R_{3,4}} = \frac{\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} 2I_0 r_0 \cdot \cos\varphi (e^{jk\cos\theta P/2} + 1) \quad (18)$$

螺旋天线上半空间的方向图如图 2 所示。从图中可以看出, 天线的螺旋臂两两之间相位相差  $90^\circ$ , 因此在上半空间形成圆极化, 且其方向图呈心形, 最大值位于轴向方向。四臂螺旋天线的轴长和圈数对天线的波束宽度、轴比、前后比等有较大影响; 旋转角对天线的阻抗、增益、前后比、波束宽度等有较大影响, 同时夹角对螺旋臂之间的互阻抗影响较大。

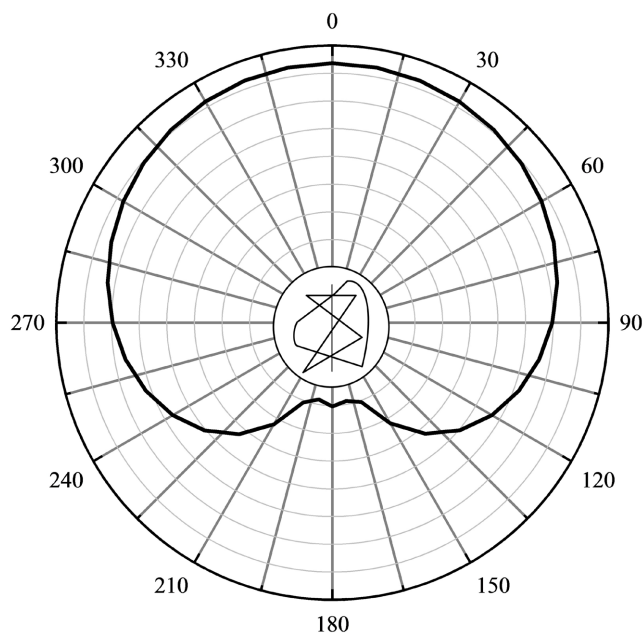


Figure 2. Upper half space pattern of the helical antenna  
图 2. 螺旋天线上半空间方向图

### 3. 天线结构设计与仿真分析

#### 3.1. 螺旋臂设计

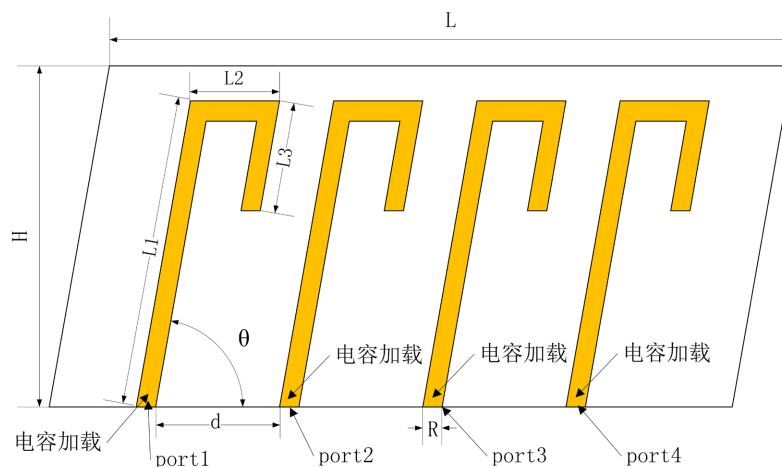


Figure 3. Side expansion of the antenna arm  
图 3. 天线臂侧面展开图

由上述螺旋天线基本原理可知, 螺旋天线的辐射场与螺旋臂的螺旋半径  $r_0$ 、螺旋臂圈数  $n$ 、螺距  $P$  等参数相关。基于上述理论, 本文设计了一种新型四臂螺旋天线, 其天线臂侧面展开图如图 3 所示。为得到良好性能, 使用电磁仿真软件 ANSYS HFSS 对螺旋臂长、螺旋轴向长度等参数进行优化。天线轴向长度为 20.5 mm, 直径为 24 mm, 内部加载介质的相对介电常数为 1, 内径 10 mm, 外径 12 mm, 天线臂的半径为 0.2 mm, 图 3 标注了天线臂上各个变量, 其值如表 1 所示。每一个天线臂都有各自的馈电口 (port), 并在馈电口出外接电容进行阻抗匹配。

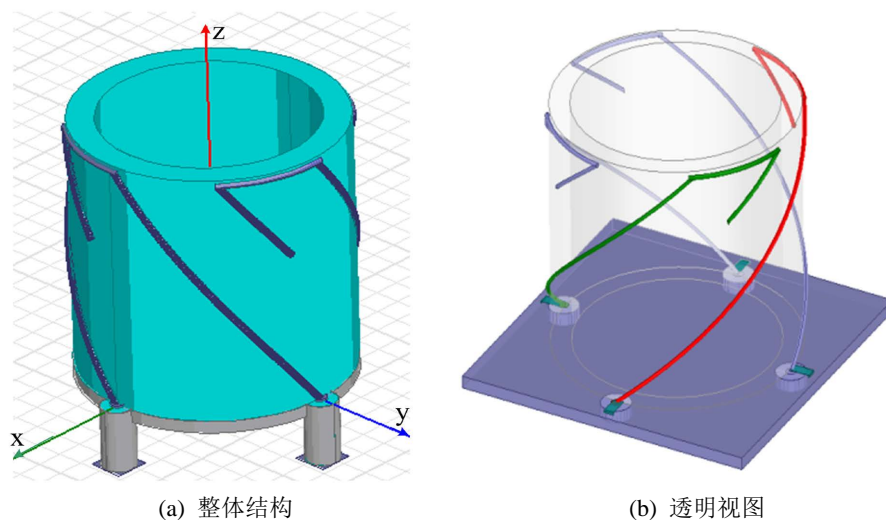
**Table 1.** Structural parameters of the antenna arm

**表 1.** 天线臂的结构参数

参数/单位	数值
$H/\text{mm}$	20.5
$L/\text{mm}$	75.4
$L1/\text{mm}$	33
$L2/\text{mm}$	10
$L3/\text{mm}$	6.8
$\theta/(\text{^\circ})$	37
$d/\text{mm}$	19
$R/\text{mm}$	0.4

### 3.2. 天线总体结构设计

小型化四臂螺旋天线的立体结构如图 4(a)所示, 它由四个顺序旋转的螺旋臂和一个金属基板组成, 为了更清楚展示圆柱侧面布局, 给出了另一个透明视图, 如图 4(b)所示。天线的总体尺寸为  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 21.5 \text{ mm}$  ( $0.16\lambda_0 \times 0.16\lambda_0 \times 0.11\lambda_0$ ), 螺旋臂绕制在厚度为 2 mm 的 3D 打印的尼龙材料 ( $\epsilon_r = 3.5$ ) 结构上, 基板由高度为 1 mm 的金属板 ( $\epsilon_r = 1$ ) 构成, 采用同轴馈电, 在馈线上增加电容进行阻抗匹配, 其电容大小为 3.6 pF。



**Figure 4.** Stereogram of the proposed four-arm helical antenna

**图 4.** 四臂螺旋天线立体图

### 3.3. 仿真参数分析

#### 3.3.1. 天线回波损耗与驻波仿真分析

使用电磁仿真软件 ANSYS HFSS 对所设计的四臂螺旋天线结构进行仿真。首先画出螺旋天线结构图, 然后设置介质材料和金属, 随后添加波端口及激励源, 还要设置空气盒子和边界辐射条件, 最后进行求解设置: 设定扫频范围、扫频间隔、求解步数等。该款天线的回波损耗与驻波比仿真结果分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示。从图中可以看出, 天线的中心工作频率为 1.59 GHz,  $S_{11}$  最大衰减为 23 dB 左右, 电压驻波比为 1.18, 10 dB 阻抗带宽约 50 MHz, 馈电端口匹配良好。螺旋天线的 3D 方向图和增益分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示。可以看到, 在  $\theta=0^\circ$  方向上, 最高增益为 1.78 dBi, 满足导航天线的抗干扰性能需求。天线具有  $120^\circ$  左右的 3 dB 波束宽度, 满足低仰角接收电磁波的能力。

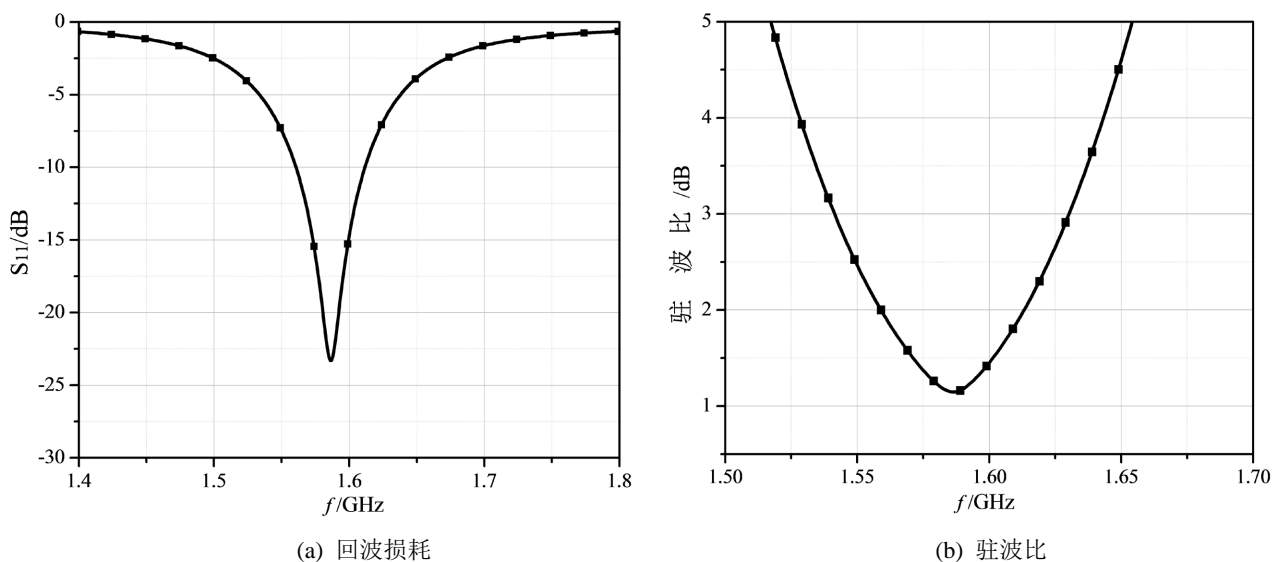


Figure 5. Return loss and voltage standing wave ratio of the four-arm helical antenna

图 5. 四臂螺旋天线的回波损耗和电压驻波比

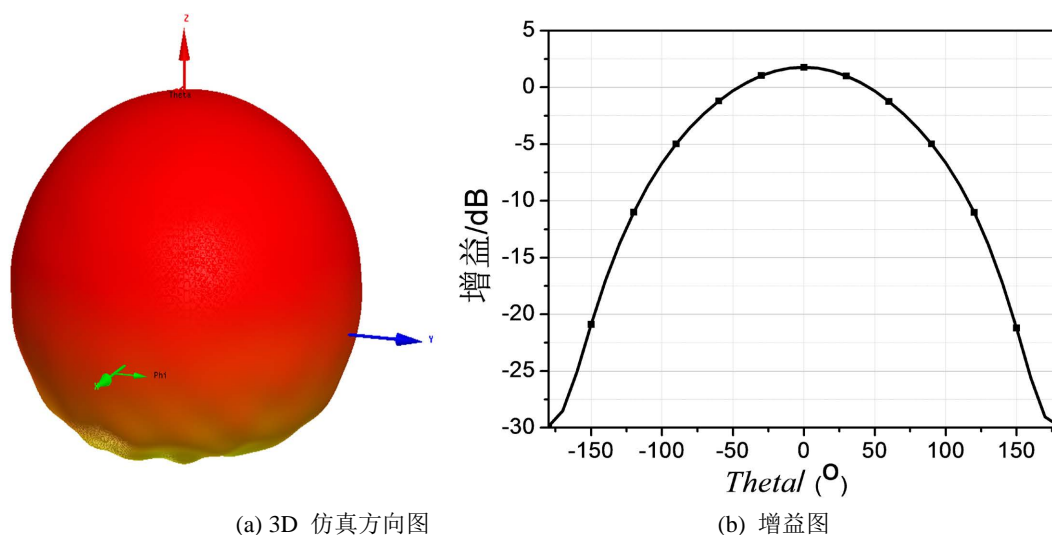
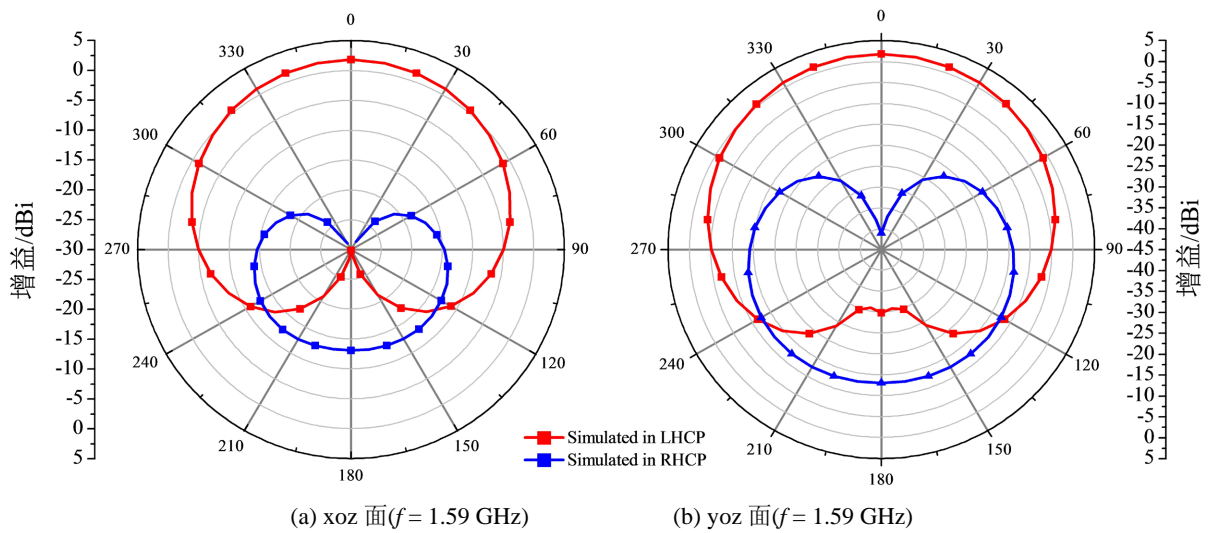


Figure 6. 3D radiation pattern and gain of the four-arm helical antenna

图 6. 四臂螺旋天线的 3D 方向图和增益



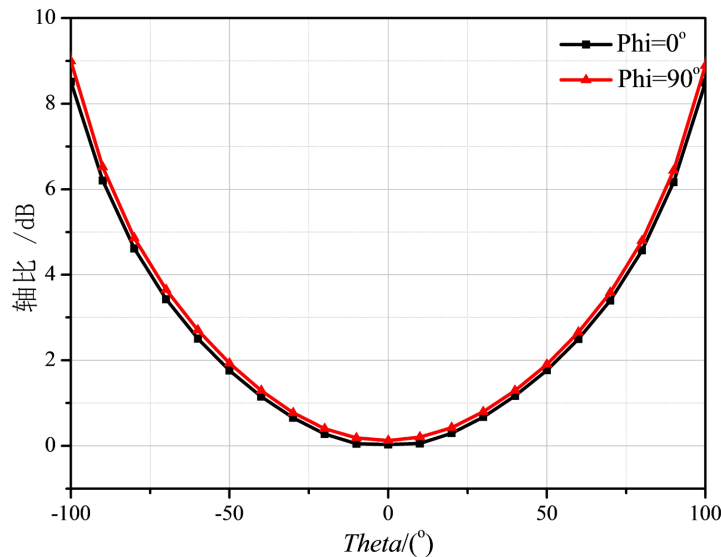


**Figure 7.** Simulation results of xoz plane and yoz plane pattern of the four-arm helical antenna  
**图 7.** 四臂螺旋天线的 xoz 面和 yoz 面方向图仿真结果

天线的 xoz 面和 yoz 面方向图分别如图 7(a)和图 7(b)所示。可以看出天线辐射心型方向图, 波束宽度几乎覆盖整个上半平面。由于方向图是完全对称形状, 我们取  $\varphi = 0^\circ$  和  $\varphi = 90^\circ$  平面右旋和左旋圆极化方向图, 可以看出天线在上半平面主要接收左旋圆极化波, 几乎接收不到右旋波; 因此具有良好的交叉极化特性。

### 3.3.2 天线轴比仿真分析

理想的四端口馈电可以为四臂螺旋天线提供精确的等幅正交馈电信号, 因此能实现良好的天线辐射性能。用同轴电缆在基板底端馈电, 相邻同轴电缆馈电相位相差  $90^\circ$ , 以此实现天线的圆极化。天线远场圆极化特性如图 8 所示, 可知  $\pm 67^\circ$  角度内的轴比都小于 3 dB, 最低点  $\theta = 0^\circ$  上的轴比仅为 0.019 dB, 说明该螺旋天线具有非常优良的圆极化性能。



**Figure 8.** Four-port feed antenna axial ratio characteristic  
**图 8.** 四端口馈电天线轴比特性



#### 4. 天线加工测试

根据表 1 的仿真优化尺寸, 对设计的四臂螺旋天线进行 3D 打印加工制作, 天线实物图如图 9 所示。用矢量网络分析仪测试了天线的驻波比, 如图 10 所示。在微波暗室中测量了天线的轴比和增益方向图, 分别如图 11 和图 12 所示。由图 10 可见, 实测的驻波参数  $VSWR \leq 1.5$ , 阻抗带宽实测为 3% (1.561~1.609 GHz, 约 50 MHz), 与前述电磁仿真结果吻合。由图 11 可见, 实测的 $\pm 60^\circ$ 角度内轴比均小于 3 dB, 与前述仿真数据接近。

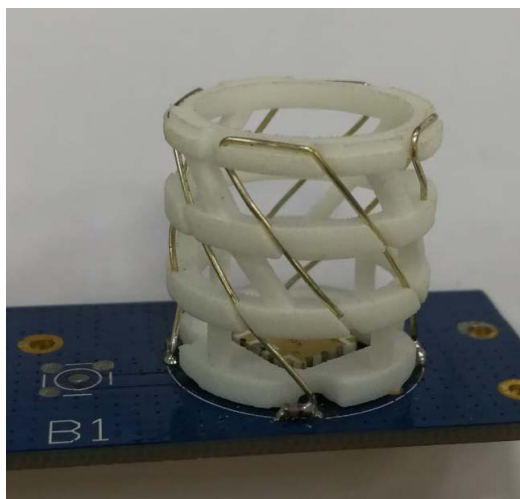


Figure 9. Fabricated antenna

图 9. 天线实物图

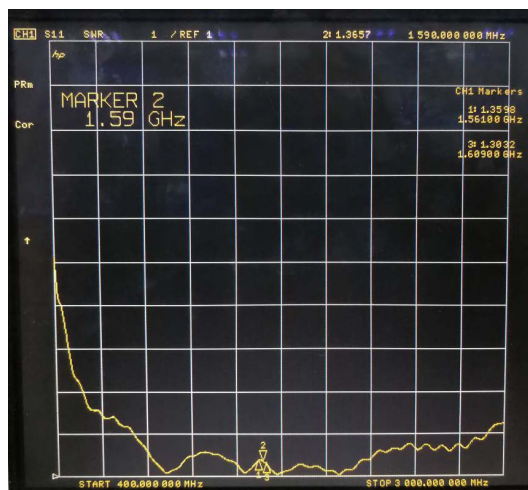


Figure 10. Measured output standing wave ratio

图 10. 实测输出驻波比

天线在 1.59 GHz 的测试方向图如图 12 所示, 图 12(a)和图 12(b)分别给出了  $xoz$  面和  $yoZ$  面的右旋及左旋增益方向图, 从图中可以看出, 该天线具有良好的定向辐射特性, 由于实际天线安装于长方形 PCB 板上, 实测增益方向图在低仰角相比仿真结果有微小凹陷, 轴比也在低仰角有略微凸起。天线的测试增益为 1.68 dBi。由于镂空介质部分为 3D 打印, 螺旋绕丝为手工制作, 因此测试误差不可避免。另外, 实际介质材料的相对介电常数和仿真设定值也可能略有偏差, 这些都会导致测量误差。

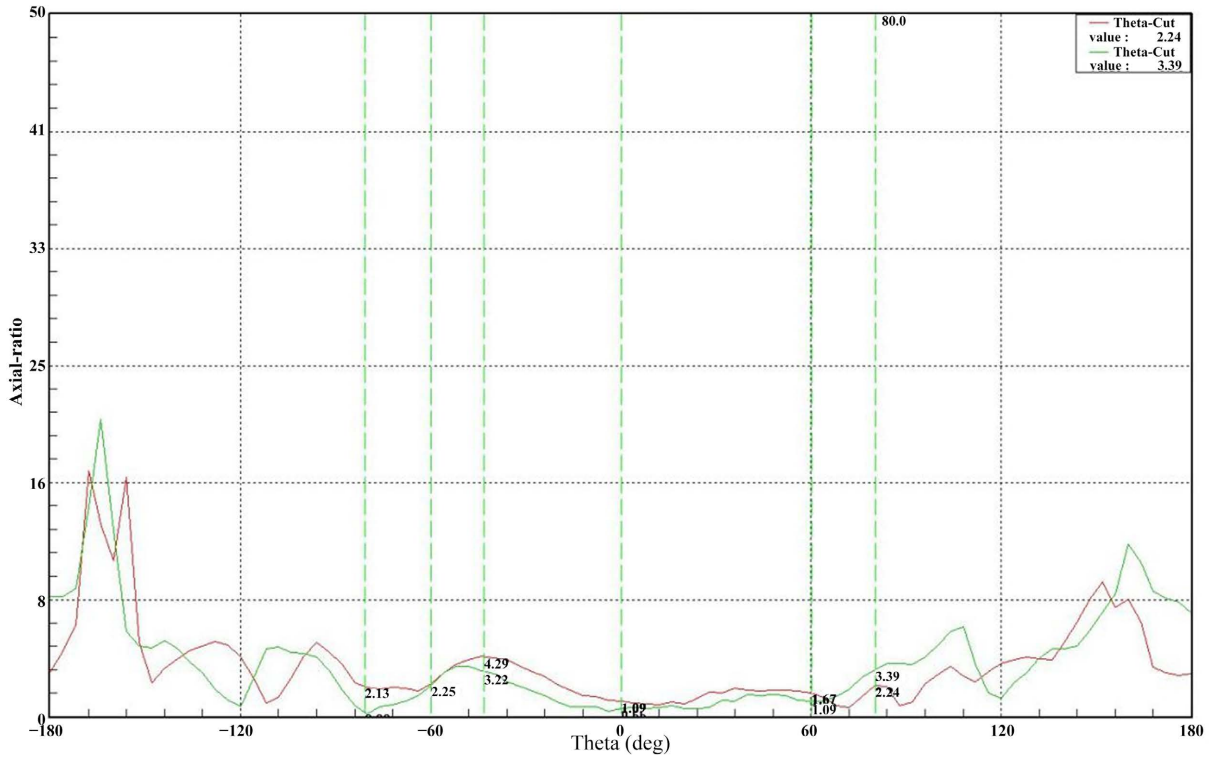
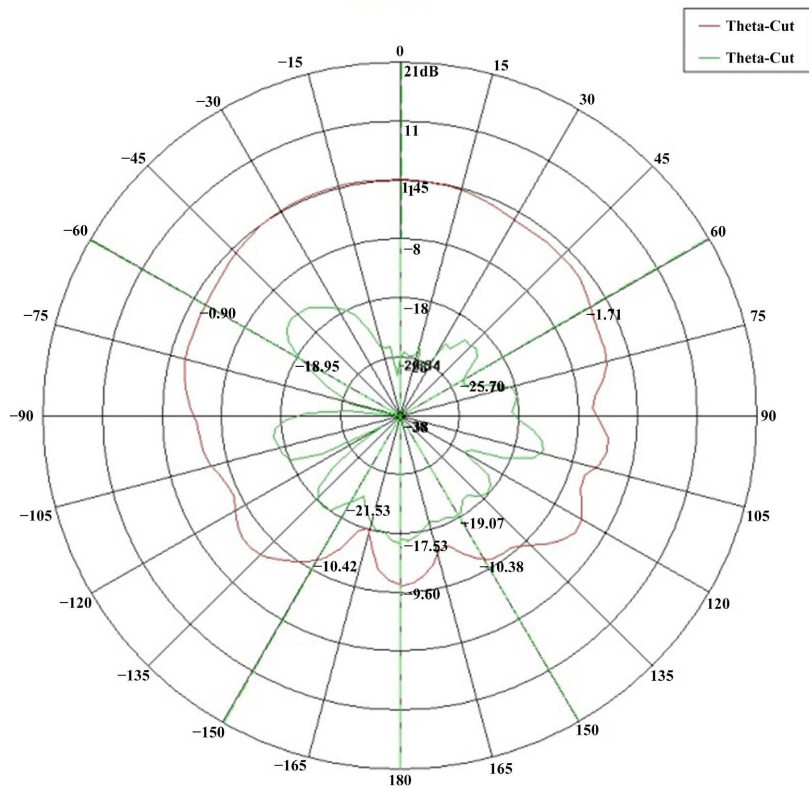
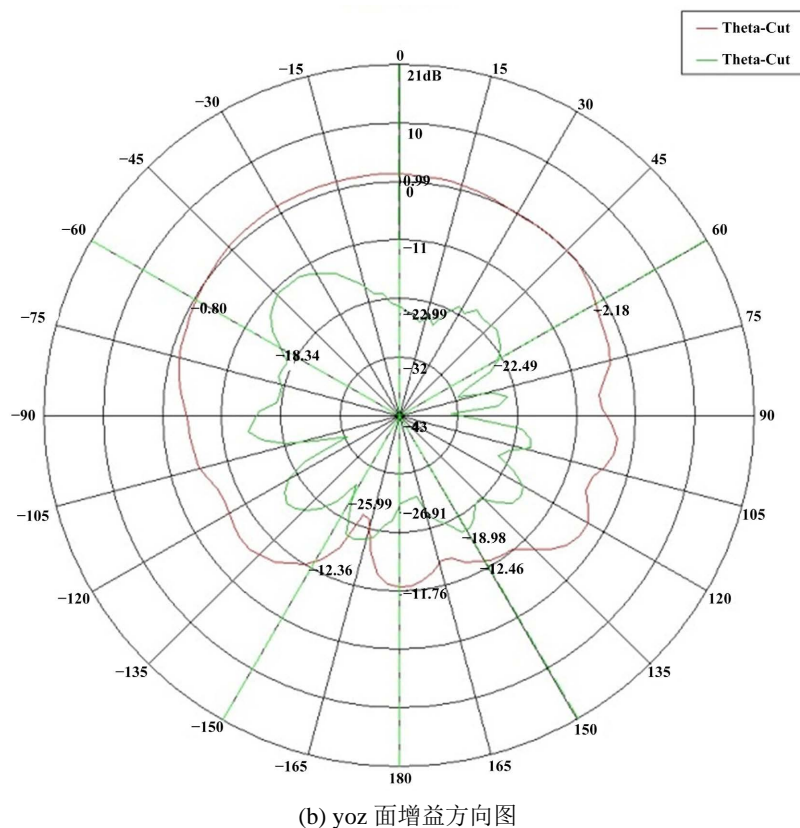


Figure 11. Axial ratio of the four-arm helical antenna when  $\varphi = 0^\circ$  and  $\varphi = 90^\circ$

图 11.  $\varphi = 0^\circ$ 、 $\varphi = 90^\circ$  轴比



(a) xoz 面增益方向图



**Figure 12.** Tested antenna gain pattern at 1.59 GHz  
**图 12.** 测试的天线增益方向图(1.59 GHz)

本文设计的新型四臂螺旋天线与其它螺旋天线的性能对比如表 2 所示。从表中数据可以看出, 本文提出的天线具有紧凑的尺寸和较好的增益, 这里  $\lambda_0$  为自由空间波长。另外, 本文的四臂螺旋天线电压驻波比小于 1.5, 可实现约 50 MHz 带宽, 具有一定的导航系统应用价值。

**Table 2.** Comparison of the design in this paper and the relevant literatures  
**表 2.** 本文设计与相关文献对比

文献	直径 $\times$ 高	工作频率(GHz)	增益(dBi)
[19]	$0.27\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$	1.56	5.8
[20]	$0.19\lambda_0 \times 0.49\lambda_0$	1.575	2.3
[21]	$0.2\lambda_0 \times 0.7\lambda_0$	1.618	1.5
[22]	$0.05\lambda_0 \times 0.08\lambda_0$	1.575	-4.3
本文	$0.13\lambda_0 \times 0.11\lambda_0$	1.59	1.78

## 5. 结束语

本文通过理论分析、电磁仿真建模和 3D 打印技术设计制作了一种新型四臂螺旋天线。采用折叠式的四臂螺旋形式减小了天线的体积; 采用 3D 打印镂空介质材料进一步降低了天线的重量; 使用集成功分馈电网络, 降低了馈电网络高度, 提高了匹配精度, 获得较好的圆极化特性。仿真与测试结果吻合良好。本文天线可广泛应用于卫星导航、通信等领域。

## 参考文献

- [1] 董楠, 赵香妮. 宽波束宽角轴比四臂螺旋天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(1): 80-84.
- [2] Wheelert, H.A. (1947) A Helical Antenna for Circular Polarization. *Proceedings of the I.R.E.*, **35**, 1484-1488. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1947.234573>
- [3] Wang, J.Y., Wang, C.F., Liang, X.W., et al. (2002) An Application Study of the Resonant Quadrifilar Helix Antenna in Low Orbit Micro-Satellite Communication. *Acta Electronica Sinica*, **30**, 1865-1866.
- [4] 王健. 基于双臂螺旋天线的箭载天基遥测系统设计[J]. 航天控制, 2023, 41(4): 54-58.
- [5] 胡振欣, 李华成, 李云楷, 叶亮华. 具有蛇形结构的全向圆极化螺旋天线[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(9): 936-941.
- [6] 邱凯翔, 袁家德. 卫星导航终端的小型化方形四臂缝隙螺旋天线[J]. 微波学报, 2020, 36(3): 31-39.
- [7] 胡振欣, 龙泳丞, 李淞, 毛伟. 一种新型圆极化法向模反转螺旋天线[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(9): 78-82.
- [8] Liu, C.R., Guo, Y.-X., Bao, X.Y. and Xiao, S.-Q. (2012) 60-GHz LTCC Integrated Circularly Polarized Helical Antenna Array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 1329-1335. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2180351>
- [9] Zhang, L., Shi, J.-W., Zhang, W.-B. and Hou, J. (2022) A Novel Circular-Polarized Helical Antenna at UHF Bands for Satellite Communication Applications. *IEEE 10th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Xiamen, 4-7 November 2022, 1-2. <https://doi.org/10.1109/APCAP56600.2022.10069711>
- [10] Akmal, M., Alieldin, A. and Eldamak, A.R. (2023) A Printed Helical Circular Polarization Antenna for GNSS Anti-Attacking System. *2023 International Microwave and Antenna Symposium (IMAS)*, Cairo, 7-9 February 2023, 135-138. <https://doi.org/10.1109/IMAS55807.2023.10066881>
- [11] Musthafa, A.M., Khalily, M., Araghi, A., Yurduseven, O. and Tafazolli, R. (2022) Compact Multimode Quadrifilar Helical Antenna for GNSS-R Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **21**, 755-759. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3144968>
- [12] 冯小明, 张盛华, 石俊峰. 3D 打印技术在喇叭天线中的应用[J]. 火控雷达技术, 2019, 48(2): 72-75.
- [13] 田小永, 吴玲玲, 殷鸣, 等. 宽频大角度新型龙勃透镜设计与快速制造[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 175-181.
- [14] 洪元, 王丹, 李立洲, 刘大勇, 迟百宏. 基于 SLM 成形的四臂螺旋天线制造及性能分析[J]. 电子机械工程, 2022, 38(1): 50-53.
- [15] Arbaoui, Y., Laur, V., Maalouf, A., et al. (2016) Full 3-D Printed Microwave Termination: A Simple and Low-Cost Solution. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **64**, 271-278. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2504477>
- [16] Rojas-Nastrucci, E.A., Nussbaum, J.T., Crane, N.B., et al. (2017) Ka-Band Characterization of Binder Jetting for 3-D Printing of Metallic Rectangular Waveguide Circuits and Antennas. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **65**, 3099-3108. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2730839>
- [17] Cheng, Y. and Dong, Y. (2023) High-Gain All-Metal 3-D Printed Lens-Horn Antenna for Millimeter-Wave Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **22**, 308-312. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3209788>
- [18] Li, Y., Ge, L., Wang, J., et al. (2019) 3-D Printed High-Gain Wideband Waveguide Fed Horn Antenna Arrays for Millimeter-Wave Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 2868-2877. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2899008>
- [19] 谢子仪, 陈万通, 韩梦凡, 等. 四臂螺旋卫星导航接收天线的设计[J]. 科学技术创新, 2021(36): 156-158.
- [20] Hebib, S., Fonseca, N.J.G. and Aubert, H. (2011) Compact Printed Quadrifilar Helical Antenna with Iso-Flux-Shaped Pattern and High Cross-Polarization Discrimination. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **10**, 635-638. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2159189>
- [21] 王果宏, 赵迎超. 宽波束四臂螺旋天线的分析与设计[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(4): 84-85.
- [22] Han, Y., Wang, H.L., Wang, Z.W., et al. (2019) Dual-Band Spiral Printed Quadrifilar Helical Antenna Miniaturized by Surface and Inner Dielectric Loading. *IEEE Access*, **7**, 49999-50006. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2902308>