

DOI: 10.11991/ykj.201903001

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20190705.1449.002.html>

一种用于 GPS 卫星导航的四臂螺旋圆极化印刷天线

崔灵菲^{1,2}, 吴秉琪³, 刘长军^{1,2}

1. 四川大学电子信息学院, 四川成都 610064
2. 无线能量传输教育部重点实验室, 四川成都 610064
3. 河北博威集成电路有限公司, 河北石家庄 050000

摘要:在 GPS 导航中, 作为非跟踪的地面站天线需要具有半球覆盖、宽波束、圆极化的特性, 结构紧凑的四臂螺旋天线可以满足该需要。提出了一种新型一体化四臂螺旋印刷天线结构, 采用四分之三波长四线螺旋线, 通过单端口中心位置馈电实现依次相差 90°的馈电网络, 形成高增益圆极化波束。实验结果表明: 该四臂螺旋印刷天线在 1 575.42 MHz 的轴比 $R_A \leq 3$ dB, 增益大于等于 5.6 dBi, 具有良好的右旋圆极化辐射特性。天线具有重量轻、尺寸小的优点, 且在低仰角时, 其圆极化性能也能满足导航系统的要求。

关键词:四臂螺旋天线; 印刷天线; 宽波束; 轴比; 圆极化; 功分相移馈电网络; 正交馈电; 卫星导航

中图分类号: TN828.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2019)06-0016-04

Design of a quadrifilar helical circularly polarized printed antenna for GPS

CUI Lingfei^{1,2}, WU Bingqi³, LIU Changjun^{1,2}

1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China
2. Key Laboratory of Wireless Power Transmission of Ministry of Education, Chengdu 610064, China
3. Hebei Bowei Integrated Circuits Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China

Abstract: As required by the non-tracking ground station antenna in GPS applications, a wide beam, circular polarized, and hemispherical coverage antenna is required. The compact quadrifilar helical antenna meets above requirements. This paper presents a novel quadrifilar helical printed antenna structure of a four-wire helix with three-quarter wavelength, which is fed by a single port at the center with 90° shifts, realizing high gain and circular polarization. Experimental results show that its axial ratio is less than or equal to 3 dB and its gain reaches or exceeds 5.6 dBi at 1 575.42 MHz. Moreover, it generates right-handed circularly polarized radiation. The antenna is light and compact. Besides, at low angle of elevation, its circularly polarized performance meets requirement of the navigation system.

Keywords: quadrifilar helical antenna; printed antenna; wide beam; axial ratio; circular polarization; power division phase shift feed network; orthogonal feed; satellite navigation

GPS 卫星导航在军民领域得到越来越多的关注和应用。该系统要求接收天线具有可以覆盖上半平面的宽波束和圆极化特性, 并能保持低仰角的性能。常见的 GPS 接收天线有微带天线和螺旋天线等^[1]。微带天线对周围环境敏感, 较难实现上半平面波束覆盖。例如文献 [2] 通过将微带天线的地改变为三维结构, 波束宽度提高到了 113°; 文献 [3] 通过在微带天线顶部加载金属圆环, 将微带天线的边射方向图和金属圆环的水平全向方向

图组合起来, 其波束宽度达到了 140°。螺旋天线则具有较宽的圆极化辐射波束, 容易实现上半平面的波束覆盖, 在较低的仰角保持了高增益, 选择适当的物理尺寸可形成不同的辐射方向图。

本文设计了一种适用于 GPS 卫星导航系统的四臂螺旋印刷天线, 由紧凑的馈电网络和小型化的天线辐射体组合而成。通过四端口依次相差 90°的馈电网络, 对卷成圆柱形的印刷四臂螺旋天线等幅馈电, 实现满足 GPS 标准的地面天线。

1 天线辐射单元设计与实现

1.1 螺旋天线的辐射特性

使用金属导体按螺旋状绕制形成天线主体的

收稿日期: 2019-03-05. 网络出版日期: 2019-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61271074).

作者简介: 崔灵菲, 女, 硕士研究生;
刘长军, 男, 教授, 博士.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjlju@scu.edu.cn.

结构, 形成螺旋天线。根据螺旋半径分为锥体和柱体天线。根据天线结构, 分为平面和立体螺旋天线^[4-5]。本文采用立体柱体螺旋天线的结构, 基本结构和几何特性如图 1 所示。

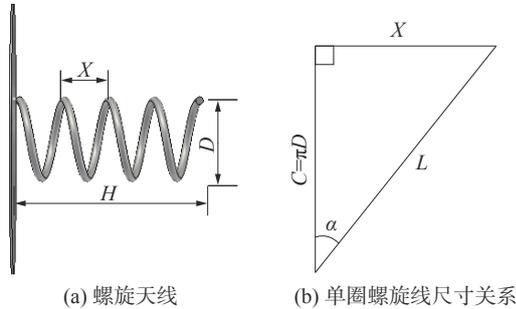


图 1 螺旋天线基本结构和几何特性

螺距角 $\alpha = \arctan(X/\pi D)$, 螺旋圈长为 $L = \sqrt{(\pi D)^2 + X^2}$, 线圈轴向长度 $H = nX$, 其中 n 为线圈的匝数。

由于螺旋天线存在多个辐射模式, 需要进行筛选运用。本文利用螺旋天线的辐射特征产生圆极化波^[6]。当 $D/\lambda \approx 2.5$ 时, 产生较好的轴向辐射。

1.2 四臂螺旋天线

谐振式四臂螺旋天线^[7]通常由 4 根螺旋臂组成。4 根螺旋臂馈电端幅度相等, 相邻螺旋臂的馈电相位相差 90° 。

四臂螺旋天线的参数由式(1)确定:

$$L_{ax} = N \sqrt{(1/N^2)(L_{cle} - Ar_0)^2 - 4\pi^2 r_0^2} \quad (1)$$

式中: L_{ax} 为四臂螺旋天线的轴向长度; N 为螺旋臂旋转的圈数; L_{cle} 为天线螺旋臂的长度。每根螺旋臂长度为 $M\lambda/4$ (M 为整数)。当 M 为奇数时, $A=1$, 天线顶端为开路; M 为偶数时, $A=2$, 天线顶端为短路。本文采用天线顶端开路的形式, 螺旋臂长为 $3\lambda/4$ 。

四臂螺旋天线由 2 个双臂螺旋天线组成, 即双臂螺旋天线之间旋转 90° 且进行正交馈电。

1.3 螺旋天线仿真建模

依据 GPS 信号中 L_1 载波段的指标要求, 本文设计一种小型化印刷四臂螺旋天线, 谐振频率为 1 575.42 MHz。具体设计指标要求见表 1。

表 1 GPS 四臂印刷螺旋天线的技术指标

工作频带/MHz	驻波比	极化	轴比/dB	增益/dBi
1 575.42±1	≤1.5	右旋圆极化	≤3	≥3

天线方向图要求为: $0^\circ \sim 70^\circ$, $G \geq -0.5$ dBi; $70^\circ \sim 80^\circ$, $G \geq -2.5$ dBi; $80^\circ \sim 85^\circ$, $G \geq -4.0$ dBi。

采用介电常数 2.65, 厚度为 0.2 mm 的 F4B 介

质板进行天线设计, 建立天线模型, 柱体直径 5 cm, 高度 4.1 cm。如图 2 所示。

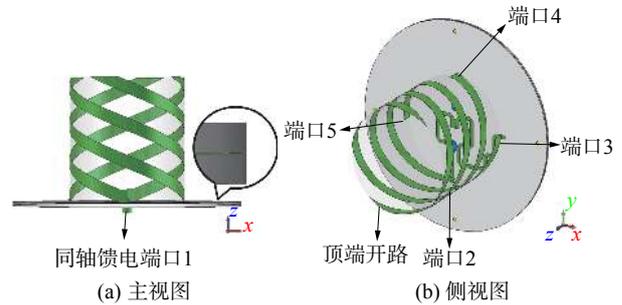


图 2 仿真模型

四臂螺旋天线的结构尺寸变化时会影响其辐射特性、输入阻抗、增益和方向性, 而轴比主要由天线的半径、轴向长度和圈数等确定。影响螺旋天线方向图的主要参数有:

- 1) 轴向长度: 当天线圈数一定, 轴向长度越长, 则轴比越小, 3 dB 波瓣宽度越宽;
- 2) 圈数: 当天线轴向长度一定, 圈数越多, 则轴比越小, 3 dB 波瓣宽度越窄;
- 3) 螺距角: 螺距角越大, 则端口输入阻抗值越小, 带宽越窄, 3 dB 波瓣宽度越窄, 增益越大。

2 馈电网络的设计与实现

馈电网络结构如图 3 所示。对于四臂螺旋天线, 形成稳定的圆极化辐射的关键是获得四路幅度一致、相位依次相差 90° 的信号。由于四臂螺旋天线 4 个端口的激励信号幅度相等, 相邻端口相位相差 90° ^[8-10], 可以将 4 个激励信号表示为: $E_1 = e^{-j\pi/2}$, $E_2 = e^j0$, $E_3 = e^{j\pi/2}$, $E_4 = e^{j\pi}$ 。

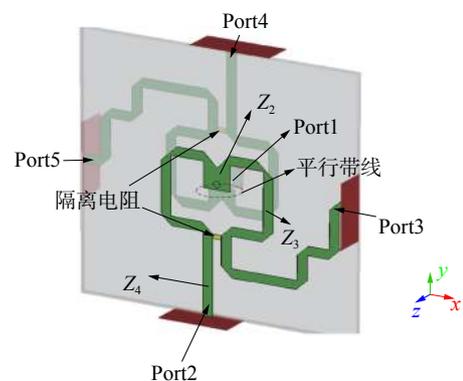


图 3 馈电网络结构

在图 3 中, 1 端口输入阻抗为

$$Z_{in} = \frac{1 + S_{11} + jS_{12} - S_{13} - jS_{14}}{1 - S_{11} - jS_{12} + S_{13} + jS_{14}} Z_0 \quad (2)$$

考虑到四臂螺旋天线的对称性, 有 $S_{12} = S_{14}$, 则:

$$Z_{in} = \frac{1 + S_{11} - S_{13}}{1 - S_{11} + S_{13}} Z_0 \quad (3)$$

采用介电常数为 3.55、厚度为 0.813 mm 的 Rogers 4003C 介质板, 建立馈电网络仿真模型, 尺寸为 5 cm × 5 cm, 如图 4 所示。

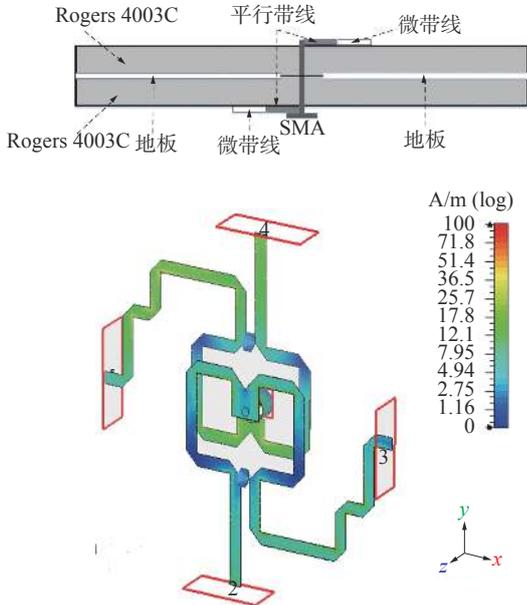


图4 馈电网络侧面示意图以及仿真模型

对于设计频率 1 575.42 MHz, 4 个输出端口相位依次差 90°, 如图 5(a) 所示; 馈电网络可以在很宽的频带内 (0~3 GHz) 保持输入相差, 如图 5(b) 所示。输出端口幅度响应变化低于 0.3 dB。

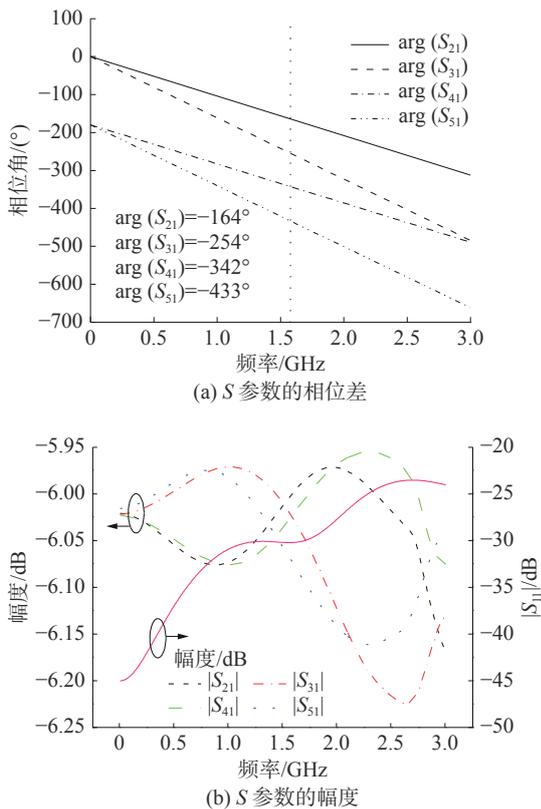


图5 馈电网络仿真

3 加工与测试

对设计好的天线模型进行加工测试。本文天线实物如图 6 所示。天线高 $H=5.3$ cm, 半径 $R=2.5$ cm。

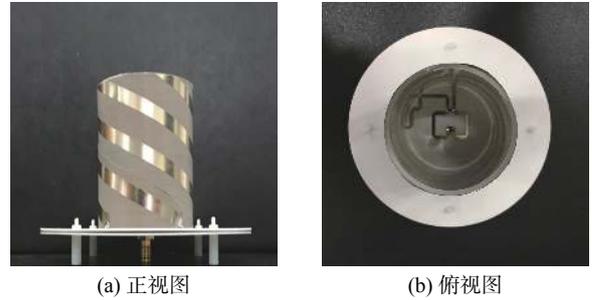


图6 天线加工实物

图 7 给出了该天线的输入反射系数 $|S_{11}|$ 以及在 1 575.42 MHz 处的轴比 R_A 的仿真与实测结果。图 8 给出了天线的仿真与实测方向图的结果。

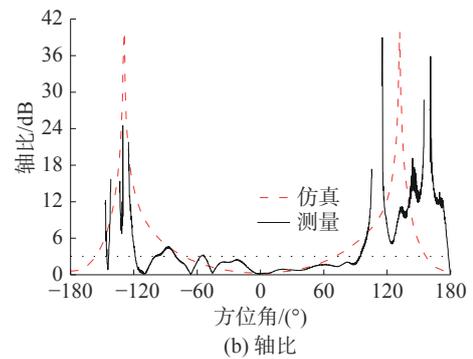
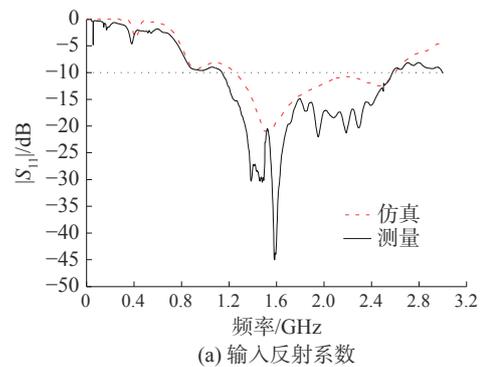
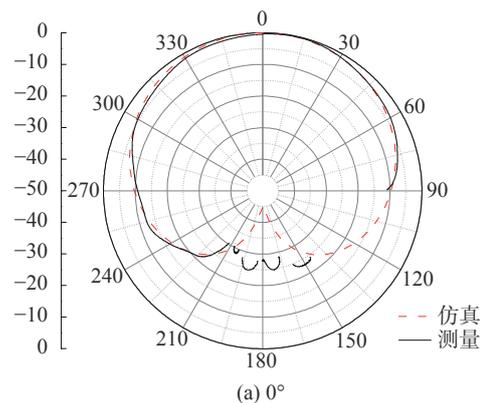


图7 输入反射系数和轴比仿真与实测对比



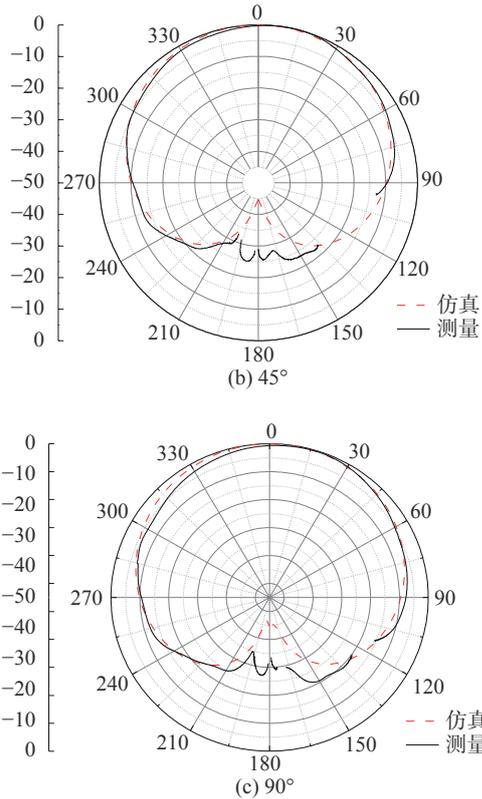


图8 天线方向图仿真与实测

汇总测量指标如表 2 所示。本文设计的印刷四臂螺旋天线满足 GPS 信号中 L_1 载波段的指标要求。

表2 指标实现情况

指标	回波损耗/dB	极化特性	轴比/dB	增益/dBi
要求	≥ 14	右旋圆极化	≤ 3	≥ 3
设计结果	45	右旋圆极化	3	5.7

天线方向图: $0^\circ \sim 70^\circ$, $G \geq -0.4$ dBi; $70^\circ \sim 80^\circ$, $G \geq -2.19$ dBi; $80^\circ \sim 85^\circ$, $G \geq -3.15$ dBi。在各角度均满足了 GPS 天线 L_1 频段的要求。

通过和其他文献对比举例汇总如表 3。

表3 天线技术对比

对比方案	介质	增益/dBi	成本	体积/cm ³	端口
文献[10]	PTFE	3.1	较高	30	2
文献[11]	空气	< 2.5	中	250	4
文献[12]	空气	1.4	中	430	4
本文	空气	5.7	较低	100	1

4 结论

本文设计了一款适用于 GPS 卫星导航的四臂

本文引用格式:

崔灵菲, 吴秉琪, 刘长军. 一种用于 GPS 卫星导航的四臂螺旋圆极化印刷天线 [J]. 应用科技, 2019, 46(6): 16-19.

CUI Lingfei, WU Bingqi, LIU Changjun. Design of a quadrifilar helical circularly polarized printed antenna for GPS[J]. Applied science and technology, 2019, 46(6): 16-19.

螺旋印刷天线, 天线的仿真和实测结果吻合。

1) 该天线具有良好的宽波束和圆极化特性, 增益高, 可以满足工程应用需求, 比文献 [10] 中的天线增益提高了 2.6 dB, 低于其使用聚四氟乙烯介质柱的成本;

2) 该天线的体积小, 分别比文献 [11]、[12] 中的天线体积减小了 60% 和 76%。而文献 [10] 采用介质填充, 并且频率为 2.1 GHz, 故尺寸较小;

3) 馈电网络紧凑, 使用单端口馈电, 具有良好的扩展性和应用价值。

参考文献:

- [1] JAMES J R, HALL P S, WOOD C. Microstrip antenna[M]. London, UK: Peter Perogrinus LTD, 1981: 1227-1255.
- [2] TANG C L, CHIOU J Y, WONG K L. Beamwidth enhancement of a circularly polarized microstrip antenna mounted on a three-dimensional ground structure[J]. *Microwave and optical technology letters*, 2002, 32(2): 149-153.
- [3] PAN Zekun, LIN Weixin, CHU Qingxin. Compact wide-beam circularly-polarized microstrip antenna with a parasitic ring for CNSS application[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2014, 62(5): 2847-2850.
- [4] KRAUS J D, MARHEFKA R J. 天线 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 196-237.
- [5] 樊际洲. 四臂螺旋天线设计与实现研究 [J]. *无线互联科技*, 2017(14): 13-14.
- [6] 王果宏, 赵迎超. 宽带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.
- [7] AMIN M, CAHILL R. Effect of helix turn angle on the performance of a half wavelength quadrifilar antenna[J]. *IEEE microwave and wireless components letters*, 2006, 16(6): 384-386.
- [8] 戴海斌, 王涛, 张金艺. 采用四臂螺旋结构的紧凑圆极化 RFID 读卡天线 [J]. *电子测量技术*, 2017, 40(10): 86-91.
- [9] 刘高辉, 刘伟. 基于小型化天线的馈电网络研究 [J]. *微型机与应用*, 2017, 36(13): 82-84.
- [10] 褚庆昕, 蔺炜, 林伟鑫, 等. 具有紧凑馈电网络的宽带四臂螺旋天线 [J]. *电子学报*, 2013, 41(4): 722-726.
- [11] LETESTU Y, SHARAIHA A. Broadband folded printed quadrifilar helical antenna[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2006, 54(5): 1600-1064.
- [12] RABEMANANTSOA J, SHARAIHA A. Small-folded, printed quadrifilar helix antenna for GPS applications[C]//Proceedings of the 14th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics & the American Electromagnetics Conference. Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2010: 1-4.