

用于多模卫星导航信号接收的半球形阿基米德螺旋天线

宋朝晖，张 健，刘美佳

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院，哈尔滨 150001)

摘要：平面阿基米德螺旋天线具有双向辐射特性，在实现单向辐射时会降低效率。将平面阿基米德螺旋天线共形到局部半球上可以得到一种新型结构的半球形阿基米德螺旋天线，分析了这种天线的结构特点，进行了仿真与实验，研究结果表明，在覆盖多模卫星导航信号工作频率的1.1~1.7 GHz频段内，反射损耗小于-10 dB，增益大于3.9 dB，前后比大于3.6 dB，相位中心稳定度小于2 mm，可满足宽频带圆极化多模卫星导航共用接收天线的设计要求。

关键词：多模卫星定位导航；宽带天线；阿基米德螺旋天线；相位中心

中图分类号：TN82 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1328(2010)02-0391-06

DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2010.02.015

0 引言

随着GPS技术的广泛应用，高精度的卫星导航系统在交通、军事、航天、测量等领域的地位越来越重要，为了不仅仅依赖于GPS系统并使得导航定位有着更高的精度和完备性，许多国家和地区相继开始研制开发新型的、独立的全球定位导航系统，俄罗斯的GLONASS系统、欧洲的GALILEO系统及我国正在开发的“北斗二代”定位导航系统就是其中的典型代表^[1]。随着集成电路技术的迅速发展，可以同时接收处理多个卫星导航系统信号的多模卫星导航接收机技术是未来的发展趋势^[2]。这几种卫星定位导航系统的工作方式也为实现多模一体化接收机提供了可能性；工作频段相近（共有10个频段，均为L波段），信号极化方式均为右旋圆极化，系统定位原理相似等^[3]。相位中心稳定的宽频带圆极化天线是实现多模卫星导航接收机的关键技术之一，常用的GPS接收天线为四臂螺旋天线和微带天线，这些天线都具有圆极化方向图宽、体积小、相位中心稳定的优点，但其工作频带窄^[4]，为了实现双频或多频接收，对四臂螺旋天线通常采用不等长臂或级联方式实现双频或多频效果，对微带天线常采用加入多个

短路探针、开槽或多贴片层叠结构等形式^[5]，但上述结构难以满足多系统组合对天线宽频带的要求。阿基米德螺旋天线是一种典型的圆极化超宽带天线，工作带宽可以达到几十个倍频程，多被用于电子侦察、反辐射制导等领域，它是多模卫星导航接收天线的可能形式之一，但该天线有双向辐射特性，通常采用的加吸收背腔的方法实现单向辐射，会使增益损失一半，效率大大降低^[6,7]。

为了得到高效率、圆极化、具有稳定相位中心的宽频带天线，本文设计了一种新型半球形阿基米德螺旋天线。应用CST Microwave Studio软件对半球形阿基米德螺旋天线辐射特性和相位中心特性进行仿真计算，制作了天线，并对天线的阻抗特性、方向图特性、增益和轴比特性进行了测量。

1 半球形阿基米德螺旋天线设计

平面阿基米德螺旋天线属于超宽带天线，它的极坐标方程为：

$$r = r_0 + a(\varphi - \varphi_0) \quad (1)$$

式中， r 为曲线上任意一点到极坐标原点的距离， φ 为方位角， φ_0 为起始角， r_0 为螺旋线起始点到原点的距离， a 为螺旋增长率。分别令 $\varphi_0 = 0$ 和 $\varphi_0 =$

π , 即可得到两条对称阿基米德螺旋线, 以这样的两条阿基米德螺旋线为两臂, 就构成了平面阿基米德螺旋天线, 它具有超宽带工作特性。周长约为一个波长的那些环带就形成了平面阿基米德螺旋天线的有效辐射区。工作频率改变时, 有效辐射区沿螺旋线移动, 但方向图基本不变。螺旋线外径 D 取决于下限频率对应的波长 λ_{\min} , 一般应使其周长 $C = \pi D \geq 1.25\lambda_{\min}$ 。螺旋线内径 $2r_0$, 一般应取 $2r_0 < \lambda_{\max}/4$, λ_{\max} 是上限工作频率对应的波长。该天线双向辐射, 最大辐射方向在螺旋线平面的两个法线方向上, 分别辐射左旋和右旋圆极化波。在实际应用中往往需要单向辐射的特性, 阿基米德螺旋天线实现单向辐射的常用方法有两种: 加吸收腔或加反射器, 前者会损失天线 3 dB 的增益, 后者会降低天线的阻抗和轴比带宽。

本文借鉴锥形等角螺旋天线工作原理, 提出一种半球形阿基米德螺旋天线的设计方法, 提高天线辐射的前后比, 即使用吸收背腔实现单向辐射, 也可以保证较高的天线效率。

将臂宽为 3 mm 的互补形式平面双臂阿基米德

$$\begin{cases} r_n = \left(\arcsin \frac{r_1 + na\phi/\pi}{R} - \arcsin \frac{r_1}{R} \right) R & \phi \in (n\pi, (n+1)\pi) \\ r'_n = \left(\arcsin \frac{r_2 + na\phi/\pi}{R} - \arcsin \frac{r_2}{R} \right) R & \phi \in (2n\pi, 2(n+1)\pi) \end{cases} \quad (3)$$

其中 n 为螺旋线圈数, $n = 1, 2, \dots, N$, r_1 和 r_2 分别为半球形阿基米德螺旋线的第一半周和第二半周(由圆心向外), 因为这两个半周的螺旋线矢径较小, 曲线一周内高度变化很小, 因此可以用平面阿基米德螺旋线近似表示。

平面阿基米德螺旋天线共形到球面上, 天线臂长度增加, 其长度与球面的曲率半径 R 、球壳底面半径 r 、投影前的平面天线的螺旋增长率 α 有关。例如将 $r_0 = 3$ mm、 $\alpha = 6/\pi$ 、外径为 65 mm、螺旋线长 $l = 1244.1$ mm 的平面阿基米德螺旋天线共形到曲率半径 $R = 70$ mm、底面半径 $r = 65$ mm 的球上, 螺旋线长为 $l' = 1367.9$ mm, 增加 123.8 mm。平面阿基米德螺旋天线和球壳底面半径相同时, 天线曲率半径越小, 天线臂越长。对于阿基米德螺旋天线而言, 天线外径相同时, 螺旋臂总长度越大, 终端效应越小, 低频段性能越好。因此半球形阿基米德螺

螺旋天线共形到半径为 R 、高度为 H 的局部半球上, 如图 1 所示, 主辐射方向为 $+z$ 方向。

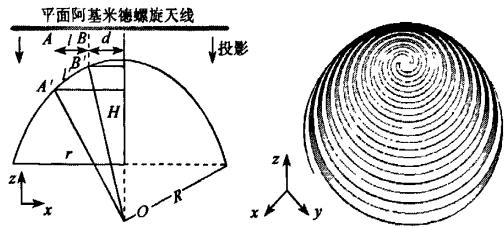


图 1 半球形阿基米德螺旋天线的形成

Fig. 1 Formation of hemispherical Archimedean spiral antenna

平面阿基米德螺旋天线上角度相同、相距为 l 的 AB 两点, 共形到半径为 R 的球面上, 投影点 A' 、 B' 沿球面间距 l' 为:

$$l' = \left(\arcsin \frac{d + l}{R} - \arcsin \frac{d}{R} \right) R \quad (2)$$

因此半球形的阿基米德螺旋线可以近似展开为一条平面的渐开螺旋线, 由于其螺旋线一般变化规律为螺旋线每绕过半周, 半径就变化一次, 则可以得到的平面渐开线的极坐标方程为:

旋天线可以有效改善天线低频段性能。

2 天线性能分析

首先对底面半径 r 相同, 曲率半径 R 不同的天线进行仿真并比较其性能。选取 $r = 70$ mm, 曲率半径分别为 75 mm, 86 mm, 100 mm 的半球形阿基米德螺旋天线进行仿真, 得到天线的增益、轴比、前后比及阻抗特性的曲线如图 2 所示。

由图 2a) 可以看到天线的前向辐射增益随频率升高而减小, 但在 1.0 – 4.0 GHz 频段内增益均大于 5 dB。随着天线曲率半径的增大, 天线低频段正向辐射增益减小, 而且曲率半径越大, 天线正向辐射增益随频率变化越平缓, 增益一致性较好。由图 2b) 可知, 曲率半径小的天线圆极化性能相对较差, 而曲率半径较大的天线则可以在 1.0 – 4.0 GHz 频段内保持很好的圆极化特性。由图 2c) 和图 2d) 中的阻

抗特性曲线可知,天线在低频段阻抗实部和虚部变化较大,随频率升高逐渐趋于平稳;并且天线的曲率半径越大,阻抗实部变化越平缓,阻抗虚部越小,天线越容易实现匹配。由图2e)中前后比曲线可以看出在低频段天线的前向辐射较大,天线的前后比随曲率半径增大而逐渐减小,高于2.0 GHz以后天线的后向辐射逐渐增大。这是由于半球形阿基米德螺旋天线也具有平面阿基米德天线的非频变特性,周长约为一个波长的环带构成有效辐射区,由于低频段的有效辐射区空间上位于高频辐射区的下方,低频辐射区的切面与高频辐射区夹角大于90°,则对高频段的后向辐射电场反射,从而使高频段的后向辐射波瓣变得很窄,后向增益升高,前后比减小。

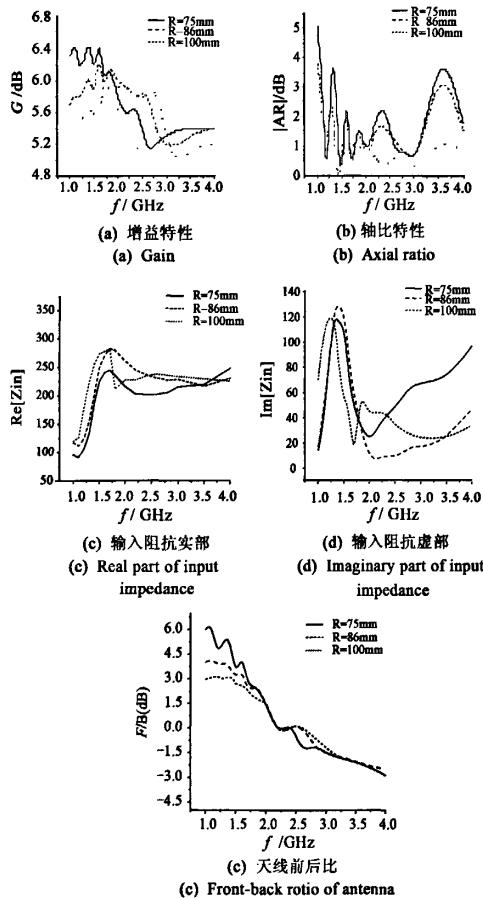


图2 曲率半径不同的天线性能比较

Fig.2 Comparison of antenna performance with different curvature radius

由以上分析可知,曲率半径大的天线阻抗特性良好,易于实现匹配,所以在曲率半径 $R = 100\text{ mm}$

的基础上分析相同曲率半径时天线底面半径对天线性能的影响。分别取 r 等于60 mm, 65 mm, 70 mm的天线进行仿真,得到天线增益、轴比、前后比及阻抗性能如图3所示。

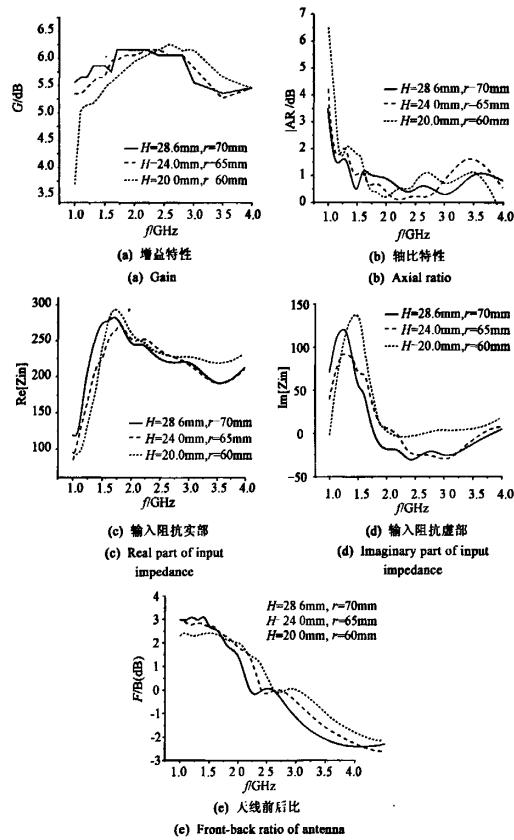


图3 底面半径不同的天线性能比较

Fig.3 Comparison of antenna performance with different bottom radius

由上图可见,曲率半径相同情况下,底面半径 r 越大,天线低频段增益特性和圆极化特性都会变好,低频段的前后比会变大,但阻抗的虚部在 $r = 65\text{ mm}$ 时会低一些。

根据上述的仿真计算与分析,把一个工作在1.0 – 4.0 GHz频段的平面阿基米德螺旋天线投影到半球表面,选择合适的设计参数,所形成半球形阿基米德螺旋天线在1.1 – 1.7 GHz频段(覆盖了四种卫星定位导航系统信号频段),具有大于3.0 dB的前后比、小于3.0 dB轴比等优良特性,满足卫星导航接收天线的技术要求。

3 天线相位中心性能分析

天线的相位中心,是指远区辐射场的等相位面与通过天线轴线的平面相交的曲线的曲率中心。如果我们把天线远场看做球面波,则天线的相位中心即是该球面波的球心。绝大多数的天线没有唯一的相位中心,但是许多天线可以找到一个参考点,使得在天线主瓣的某一范围内场的相位保持相对恒定,则这个参考点称之为“视在相位中心”^[8]。通常用 PCV(相位中心偏移),DEV(天线相位中心稳定度,是表征天线各个切面相位中心离散程度的量),及 PCO(天线的平均相位中心)来表示相位中心的变化。

在卫星导航定位中观测值以接收天线的相位中心为准,但实测时天线的相位中心瞬时位置与理论上值有所不同,其偏差可达数毫米至数厘米,这对于精密定位的影响不容忽视^[9]。

根据以上对半球形天线性能分析,综合考虑增益、阻抗、轴比、尺寸等指标,确定半球形阿基米德螺旋天线的曲率半径 $R = 100$ mm,底面半径 $r = 65$ mm,平面阿基米德螺旋天线原形选择臂宽为 3mm 的双臂互补形式。

应用 CST Microwave Studio 软件计算出这种半球形阿基米德螺旋天线在各个定位导航系统中心频率的平均相位中心 PCO 值,如表 1 所示。相应的相位中心偏移 PCV 和相位中心稳定度 DEV^[10] 随天顶角变化的曲线如图 4 所示。

表 1 半球形阿基米德螺旋天线不同频率的平均相位中心

Table 1 The PCO of hemisphere Archimedean spiral antenna in various frequencies

f /GHz	PCO/mm
1.189	(-0.199, -0.871, 16.094)
1.207	(-0.475, -0.794, 16.055)
1.227	(-0.609, -0.434, 16.001)
1.251	(-0.619, 0.863, 16.130)
1.268	(-0.589, 0.260, 16.217)
1.280	(-0.568, 0.349, 16.243)
1.561	(-0.378, -0.117, 17.085)
1.575	(-0.443, -0.03, 17.113)
1.609	(-0.441, 0.204, 17.156)

从图中可以看出半球形天线在各中心频点处相位中心稳定,相位中心偏移 PCV 均小于 1.5 mm,在部分频点其 PCV 小于 1 mm。各频点的相位中心稳定度 DEV 随天顶角增大而增大,在天线 5°仰角以上(天顶角

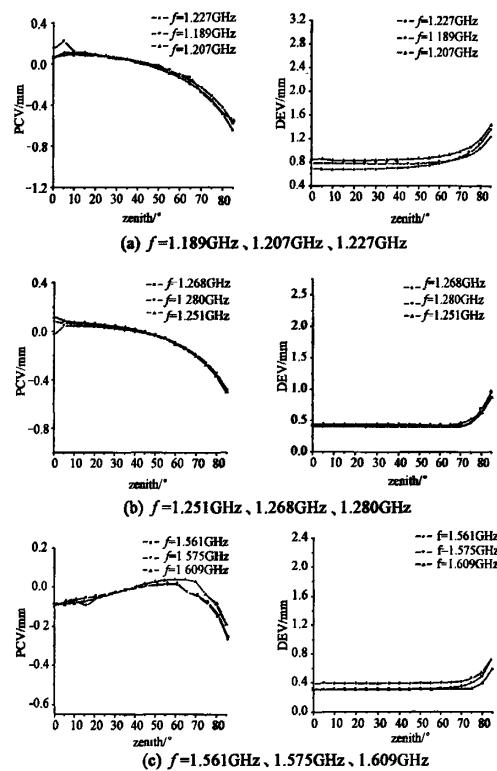


图 4 天线的 PCV 和 DEV 特性随天顶角变化关系
仿真曲线

Fig. 4 The simulation results of PCV and DEV property with various zenith angles

小于 85°)范围内小于 2 mm,部分频点小于 1 mm,可见半球形阿基米德螺旋天线具有较稳定的相位中心。

4 测试结果

根据仿真与计算结果,制作了双臂半球形阿基米德螺旋天线,金属天线臂绕制在一个半球形的塑料壳体外表面,如图 6 所示。底面半径为 65 mm,高 24 mm,采用文献[11]的方法设计的宽频带巴伦进行馈电。

采用 Anritsu 37247D 网络分析仪测量天线反射损耗特性,结果如图 7 示,在覆盖四个定位导航工作频段的 1.1~1.7 GHz 范围内,天线的反射损耗小于 -10 dB。在暗室中对天线远场方向图进行了测试,为验证天线的辐射特性,没有在后方加装吸波材料。测试结果为:各频段轴向增益均在 3.9 dB 以上,轴比在 3.5 dB 以内,低频段的前后比在 3.6 dB 以上,与水平面成 5°以上的可视区间增益在 -4.6 dB 以上,归一化测试方向图如图 7 所示,由于篇幅有限,只给出了部分频点的天线方向图。

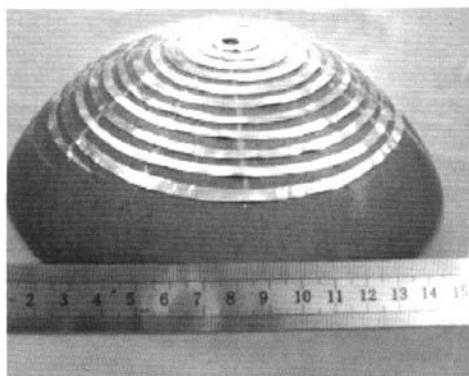


图5 半球形阿基米德螺旋天线实物图

Fig.5 Photograph of the antenna

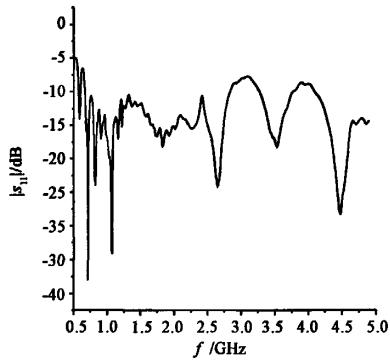


图6 天线反射损耗测量结果

Fig.6 The results of antenna reflection loss

5 结论

本文提出了一种半球形阿基米德螺旋天线的设计方法:把平面阿基米德螺旋天线投影到一个局部半球的表面上,得到的天线仍具有较好的宽频带特性,在工作频带的低频段具有一定的单向辐射特性。通过仿真计算得出了天线辐射特性与半球的曲率半径、底面半径等参数之间的变化关系,测试结果也验证了天线的宽带特性和方向特性,这样即使添加吸收背腔,仍能使天线前向辐射有较高的增益,从而保证天线的效率。采用商业软件计算分析了这种天线的相位中心特性,相位中心稳定度在2 mm以内。该天线工作频带覆盖了GPS、GLONASS、GALILEO系统及“北斗二代”定位导航系统的工作频段,且具有右旋圆极化、单向辐射、相位中心稳定等特点,为多模卫星导航共用接收天线设计提供了一种参考方法,还可以用于电子侦察、反辐射制导等天线设计。

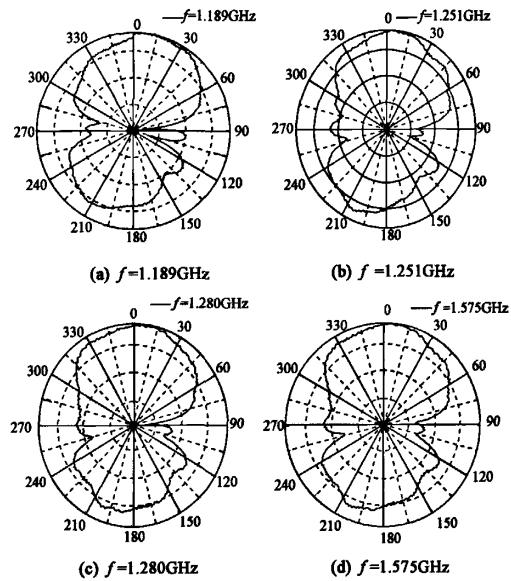


图7 方向图测试结果

Fig.7 Results of pattern

参考文献:

- [1] Stuart Riley. An integrated multichannel GPS/GLONASS receiver [J]. Proceedings of ION GPS - 1999, 1999, 6: 463 - 471.
- [2] 丛丽, 秦红磊. JTIDS/BA/INS/GPS组合导航处理器软件设计与仿真[J].宇航学报, 2008, 29(4): 1233 - 1238. [CONG Li, QIN Hong-lei. Design and simulation of JTIDS/BA/INS/GPS navigation processor software [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4): 1233 - 1238.]
- [3] 邓方林, 梁勇. 北斗/罗兰C组合导航系统研究[J]. 宇航学报, 2005, 23: 881 - 882. [DENG Fang-lin, LIANG Yong. Research on beidou pLoran C integrated navigation system [J]. Journal of Astronautics, 2005, 23: 881 - 882.]
- [4] Ho-yong kim, Ying-an lee. Design of compact dual and microstrip patch antenna for GPS/K-PCS operation [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2004: 3529 - 3532.
- [5] 王倩. 多频段卫星导航天线设计[D]. 西安:西安理工大学, 2008. [WANG Qian. Multi-band satellite navigation antenna design [D]. Xi'an: Xi'an University Of Technology, 2008.]
- [6] Kinezov C, Ungvichian V. Ultra-wideband circular polarized microstrip Archimedean spiral antenna loaded with chip-resistor[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003 (3): 612 - 615.
- [7] 张勇虎, 周力, 欧刚. 四臂平面缝隙螺旋天线的设计与实现[J]. 微波学报, 2007, 23(6): 3. [ZHANG Yong-hu, ZHOU Li, OU Gang. The design and realization of a fourarm spiral slot antenna [J]. Journal of Microwaves, 2007, 23(6): 3.]
- [8] Menge F, Seeber G. Results of absolute field calibration of GPS antenna PCV[J]. in Proc. ION GPS. 1998, 11: 31 - 38.

- [9] CAO Yu-ping. The determination of antenna phase center for GPS receiver[J]. CSAO Publications, 2001, 12:121 - 125.
- [10] 郭际明, 史俊波. 天线相位中心偏移和变化对高精度 GPS 数据处理的影响[J]. 武汉大学学报, 2007, 32(12): 1143 - 1145.
[GUO Ji-ming, SHI Jun-bo. Impact of antenna phase center off set and variation for high precision GPS data processing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(12): 1143 - 1145.]
- [11] SONG Zhao-hui, QIU Jing-hui. Study of two-arm spiral antenna im-
pedance transformer[J]. 2004 China-Japan Joint Meeting On Micro-waves, 2004:61 - 64.

作者简介:宋朝晖(1970 -),博士,哈尔滨工业大学电子与信息工程学院教授,研究方向为超宽带天线、天线小型化理论与技术、RFID 理论与技术等。

通信地址:哈尔滨工业大学 341 信箱(150001)

电话:(0451)86402170

E-mail:songzh@hit.edu.cn

Hemispherical Archimedean Spiral Antenna for Multi-mode Satellite Navigation Signals Receiving

SONG Zhao-hui, ZHANG Jian, LIU Mei-jia

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Planar Archimedean spiral antenna has the property of bidirectional radiating, the radiation efficiency will fall down when it realizes unidirectional radiation. By conforming the planar Archimedean spiral antenna to a hemisphere, a new type of Archimedes spiral antenna is manufactured, in this work, structural characteristics of the antenna has been analysed, and simulations and experiments have been carried out. The results show that in the range of 1.1 - 1.7 GHz which covers the satellite navigation signal frequency band, the reflection loss is less than - 10 dB, gain is more than 3.9dB, front-back ratio of the antenna is more than 3.6 dB, DEV is less than 2 mm, this antenna may satisfy the requirements of the wide-band multi-mode circular polarization satellite navigation receiving antenna.

Key words: Multi-mode satellite navigation; Wideband antenna; Archimedean spiral antenna; Phase center

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>