

文章编号:1007-2861(2008)06-0581-04

小型化平面螺旋天线及其宽频带巴伦的设计

朱玉晓¹, 钟顺时¹, 许赛卿^{1,2}, 张丽娜¹

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072; 2. 浙江正原电气股份有限公司, 浙江 嘉兴 314003)

摘要: 介绍一种小型化的平面螺旋天线, 该天线具有很宽的频带, 在频段 0.95 ~ 15.20 GHz 内, 实测反射损耗均小于 -10 dB, 同时在频段 1.4 ~ 10.2 GHz 内有较好的圆极化辐射特性(轴比小于 4 dB)。与普通平面螺旋天线比较, 该天线较大程度减小了天线横向尺寸, 同时通过在天线下放置一圆台背腔, 有效增宽了天线 3 dB 波瓣宽度(达 130°)。设计了一种指数渐变的微带线到双线的非平衡-平衡阻抗转换巴伦, 仿真和实测结果显示, 天线具有良好的圆极化和宽频带特性。

关键词: 平面螺旋天线; 小型化; 巴伦; 背腔

中图分类号: TN 82 文献标志码: A

Design of Miniaturized Planar Spiral Antenna and Its Wideband Balun

ZHU Yu-xiao, ZHONG Shun-shi, XU Sai-qing, ZHANG Li-na

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Zhejiang Zhengyuan Electric Co., Ltd., Jiaxing 314003, Zhejiang, China)

Abstract: This paper introduces a miniaturized planar spiral antenna with a very wide bandwidth. In the frequency range from 0.95 GHz to 15.20 GHz, the measured return loss is less than -10 dB. Good circular polarization performance (axial ratio < 4 dB) is obtained between 1.4 GHz and 10.2 GHz. Compared with the conventional spiral antenna, the proposed antenna significantly reduces the size and efficiently broadens the 3 dB beam width to about 130° by adding a conical back cavity beneath the antenna. Moreover, a wideband balun is designed using an exponentially tapered microstrip parallel-line wire. Simulation and experimental results show that the proposed antenna is of good circular polarization and wideband characteristics.

Key words: planar spiral antenna; miniaturization; wideband balun; back cavity

早在 20 世纪 50 年代, Rumsey 等人提出了平面螺旋天线, 该类天线的外形仅由角度决定, 它们的方向图和阻抗特性在相当宽的频带范围内与频率无关, 称其为频率无关天线^[1,2]。由于螺旋天线具有超宽的频带、稳定的增益和较低的轴比, 并且易于平

装, 因此使螺旋天线在军事和民用方面有着广泛的应用。

平面螺旋天线的主要辐射区取决于其工作频率。对于等角螺旋天线, 当螺旋臂长为一个波长或略大于一个波长时, 天线的阻抗和辐射方向图开始趋

收稿日期: 2007-09-03 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60571053); 上海市重点学科建设资助项目(T0102)

通信作者: 钟顺时(1939 ~), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代天线理论与技术等。E-mail: shshzhong@163.com

于不变.但是当工作于较低频率时,这类天线的横向尺寸相当大.因此,对于平面螺旋天线如何减小其尺寸是当前研究的热点.本工作将等角螺旋与阿基米德螺旋相结合,经过复杂变形,增长了天线电尺寸,有效实现了天线的小型化.仿真和实测结果均显示了该设计的有效性.

1 平面螺旋天线设计

1.1 平面螺旋天线

平面螺旋天线一般有两种,即阿基米德螺旋天线和等角螺旋天线.阿基米德螺旋天线的半径随角度的变化均匀增加,其曲线方程为

$$r = r_0 + a\phi, \quad (1)$$

式中, r_0 是起始半径, a 为螺旋增长率, ϕ 是幅角,以弧度表示.双臂阿基米德螺旋天线如图 1(a)所示.在螺旋的周长为一个波长附近的区域,形成平面螺旋的主要辐射区.主要辐射区随频率的变化而变动,但方向图基本不变.对应最低工作频率,天线外端至少要有 1.25λ 的周长.

平面等角螺旋天线的曲线方程为

$$r = r_0 e^{a(\phi - \phi_0)}, \quad (2)$$

式中, r_0 是对应 ϕ_0 时的矢径, a 为螺旋增长率, ϕ_0 为螺旋的起始角.平面等角螺旋天线如图 1(b)所示.当 a 减小时,螺旋臂曲度增大,电流沿螺旋臂衰减变



图1 平面螺旋天线

Fig. 1 Planar spiral antennas

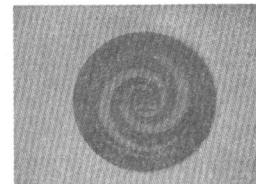
快.通常 a 取值范围为 $0.12 \sim 1.20$.当螺旋臂长等于或大于一个波长时,天线开始呈现出非频变天线特性.通常要求臂长大于一个波长,天线半径 R 则至少等于 $\lambda/4$.

1.2 天线设计

为了减小天线尺寸,本研究采用了一种经过复杂变形的平面螺旋天线^[3].由平面螺旋天线基本理论知,对于等角螺旋天线,当螺旋臂长大于一个波长时,天线才开始呈现出非频变特性.而阿基米德螺旋天线的主辐射区在螺旋的周长等于一个波长处,这样当工作于较低频率时,这两种天线尺寸都比较大.从阿基米德螺旋和等角螺旋的几何特点出发(如图 1),同样的螺旋臂长,等角螺旋天线的矢径 r 将远远大于阿基米德螺旋天线的矢径 r .因此,将两者结合,在天线中心采用等角螺旋,天线外端采用多段复杂的阿基米德螺旋,整个天线具有等角螺旋天线的特性,即螺旋臂长大于一个波长后将呈现非频变特性.同时由于外端采用阿基米德螺旋,使得螺旋臂长等于一个波长时,矢径 r 仍具有较小尺寸,从而使整个天线尺寸大大减小.天线结构如图 2 所示.



(a) 结构图



(b) 实物图

图2 天线结构

Fig. 2 Geometry of the spiral antenna

螺旋天线的辐射是由螺旋臂中的电流及臂间的磁流共同辐射构成.由仿真电流图分布可知,当螺旋臂臂宽较宽时,电流沿臂衰减很快.因此,本设计在外端采用了多段复杂的阿基米德螺旋,使得螺旋臂宽逐渐变宽,从而使电流沿螺旋臂迅速衰减,在末端衰减至相当小的程度.同时对螺旋臂末端逐渐消尖,

大大减小其末端反射电流,构成行波电流.

本工作设计平面螺旋天线直径为 $\varnothing 96$ mm, 基板材料厚度为 1 mm, 相对介电常数为 4.5. 天线初始半径为 2 mm, 内圈等角螺旋天线螺旋增长率为 a 取 0.221, 外端阿基米德螺旋天线螺旋增长率取 1.65 和 1.43.

1.3 宽频带巴伦及背腔设计

对于一个互补结构的天线,由巴俾涅原理知,具有两个臂无限大结构的互补结构天线,其输入阻抗值约为 188.5Ω . 同时由于该螺旋天线是平衡双线对称结构,其馈电也应采用平衡馈电方式. 同轴线是传统的超宽带馈电线,但其馈电方式为非平衡馈电,同时一般同轴线特性阻抗为 50Ω ,由于该设计天线并非完全互补结构,其仿真输入阻抗值约为 106Ω ,因此需要增加相应的非平衡-平衡阻抗转换巴伦设计.

本工作采用了一种指数渐变的微带线到双线的非平衡-平衡阻抗转换巴伦^[4],其原理如图 3 所示.

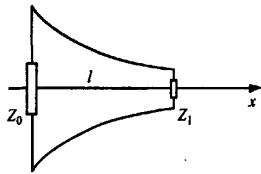


图 3 指数渐变线阻抗匹配原理图

Fig. 3 Impedance matching of exponentially tapered line

图 3 中, l 为总长度, Z_0 为始端阻抗, Z_1 为终端阻抗. 设渐变线各个部分阻抗、导纳是坐标 x 的函数, 分别为 $Z(x)$, $Y(x)$, 由渐变线上的电压、电流的关系得到以下方程:

$$\frac{dV}{dx} = -ZI, \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dx} = -YV. \quad (4)$$

如果已知渐变线各点的阻抗 $Z(x)$ 和导纳 $Y(x)$, 就可以得到电压 V 和电流 I . 因此使用以下方程:

$$Z(x) = Z(0)e^{\delta x}, \quad (5)$$

$$Y(x) = Y(0)e^{-\delta x}, \quad (6)$$

式中, δ 是指数线阻抗变化参量. 由式(5)和(6)得到的阻抗渐变线称为指数阻抗渐变线. 与贝塞尔、切比雪夫及双曲线等其他渐变线相比较, 当 $l/\lambda > 0.5$ 时, 指数渐变线反射系数最小, 而且频带极宽.

设计馈线巴伦结构如图 4 所示, 馈线尺寸

$20 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$, 基板材料厚度为 1 mm, 相对介电常数为 4.5. 其地板和微带线均采用指数渐变的方式, 地板指数线参数 δ 取 0.08.

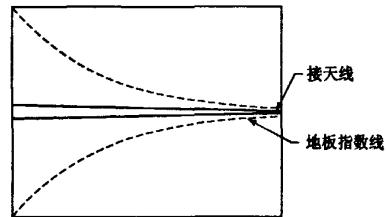


图 4 巴伦结构示意图

Fig. 4 Geometry of the designed Balun

为获得单向辐射, 通常在天线一边安装一反射腔去掉不希望的辐射. 反射腔一般采用平底腔, 腔深约为 $\lambda/4$, 腔体直径与天线外径相同. 由于反射腔长度的固定, 改变了螺旋天线的非频变特性, 因此通常在反射腔底部和侧壁加吸收材料来减小谐振效应, 但是这样将损失大约 3 dB 的增益^[5-7]. 本工作采用一种圆台背腔设计^[8], 圆台顶端距螺旋天线的距离 h 为最高工作频率波长的 $1/4$, 低端距螺旋天线的距离 H 为最低工作频率波长的 $1/4$, 低端直径与天线外径相同, 结构如图 5 所示.

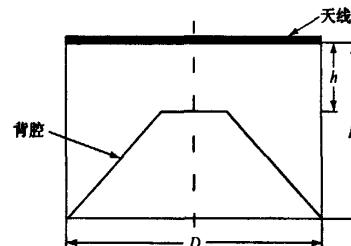


图 5 圆台背腔结构侧剖图

Fig. 5 Cross section of the conical back cavity

2 仿真与实验结果

在上述馈线下天线的实测反射损耗如图 6 所示. 图中可见, 在频段 0.9 ~ 16.0 GHz 内, 其反射损耗均小于 -10 dB . 增加圆台背腔后, 在频段 0.95 ~ 15.20 GHz 上, 其反射损耗均小于 -10 dB .

天线的轴比、方向图的仿真及测试结果如图 7 和图 8 所示. 由图知, 该天线在频段 1.4 ~ 10.2 GHz 内有较好的圆极化辐射特性(轴比小于 4 dB), 其中仅 1.40 ~ 1.45 GHz 和 8.8 ~ 10.2 GHz 内频段轴比超过 3 dB. 一般平面螺旋天线 3 dB 半功率波瓣的最佳宽度为 90° , 如图 8 所示. 该天线无背腔时, 3 dB 半

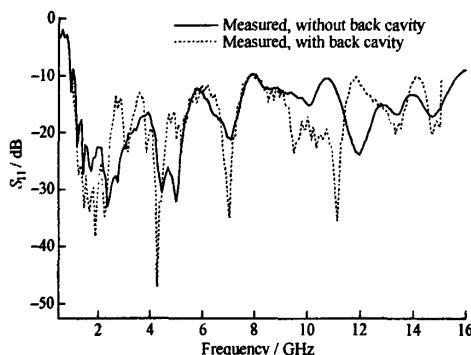


图6 驻波比特性
Fig. 6 Measured VSWR

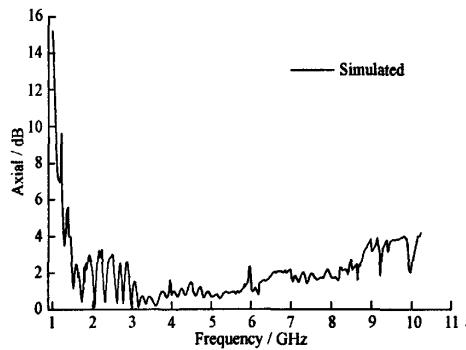


图7 轴比特性
Fig. 7 Simulated axial ratio

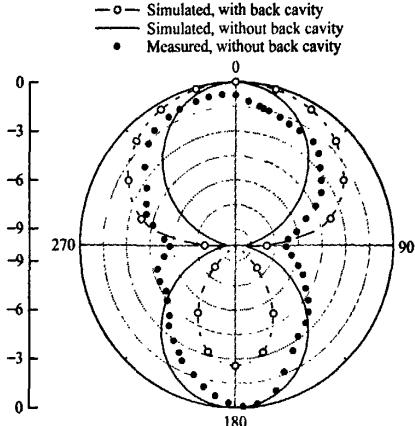


图8 方向图特性(1.575 GHz)
Fig. 8 Simulated and measured radiation pattern at 1.575 GHz

功率波瓣宽度约为85°。增加背腔后，提高了低仰角

增益，降低了高仰角增益，有效地展宽天线半功率波瓣宽度至130°。

以上结果表明，该天线具有极宽的阻抗带宽和圆极化带宽。同时，由一般平面螺旋天线的设计尺寸，对应0.95 GHz天线直径 \varnothing 为 $\lambda/2 \approx 158$ mm。可见该天线降低了最低频率，有效地将天线尺寸减小到96 mm，其面积仅为前者的37%。

3 结 论

本工作介绍了一种复杂变形的小型化平面螺旋天线的制作及实验结果，该天线在0.95~15.20 GHz频带上具有很好的辐射特性，而天线面积仅为常规设计的37%。此外设计了一种指数渐变的微带线到双线的非平衡-平衡阻抗转换巴伦和一圆台背腔，保证了天线的宽频带特性，并有效地展宽了天线的波束宽度。

参考文献：

- [1] RUMSEY V H. Frequency independent antennas [R]. IRE National Convention Record, 1957:114-118.
- [2] STUTZMAN W L, THIELE G A. 天线理论与设计[M]. 朱守正, 安同一, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2006:233-239.
- [3] SONG Z H, QIU J H, LI H M. Novel planar complex spiral ultra-wideband antenna [C]// 2004 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings. 2004:35-38.
- [4] 宋朝晖, 邱景辉, 张胜辉, 等. 一种平面等角螺旋天线及宽频带巴伦的研究[J]. 制导与引信, 2003, 2(24): 36-39.
- [5] KWON D H. A wideband Balun and vertical transition between conductor-backed CPW and parallel-strip transmission line [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(4):152-154.
- [6] NAKANO H, NOGAMI K, ARAI S, et al. A spiral antenna backed by a conducting plane reflector [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1986, AP-34:791-796.
- [7] AFSAR M N, WANG Y. A new wideband cavity-backed spiral antenna [C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001, 4:124-127.
- [8] 张尉, 金素华, 程柏林. 目标航迹的参数模拟法[J]. 空军雷达学院学报, 1999, 13(2):15-18.

(编辑:刘志强)

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>