

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312623

宽频带的微带等角螺旋天线设计

周嘉豪 周勇 庄佳杰

(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 为了实现宽频带天线指定方向的高性能辐射,设计了一种宽频带的微带等角螺旋天线。为实现阻抗匹配,天线馈电部分设计了一种指数渐变式微带巴伦结构。经过实物测试参数,结果表明加入了指数渐变巴伦结构后天线实现了良好的阻抗匹配并具有良好的宽频带特性,其工作带宽为 1.74~4.82 GHz,回波损耗最低达 -30 dB。同时设计了一个平底型金属反射腔用于反射背向电磁波,在保持宽频带工作特性的同时,使天线具有了良好的单向辐射特性,天线在整个工作频段内的增益均大于 6 dB,与传统的螺旋天线相比,具有宽频、定向、高增益的特点,具有一定应用前景。

关键词: 宽频带;等角螺旋天线;指数渐变巴伦;金属反射腔;HFSS 软件仿真

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Design of broadband microstrip equiangular spiral antenna

Zhou Jiahao Zhou Yong Zhuang Jiajie

(School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to achieve high-performance radiation in the specified direction of a broadband antenna, a wideband microstrip equiangular spiral antenna was designed. To achieve impedance matching, an exponential gradient microstrip balun structure is designed for the antenna feed section. After physical testing parameters, the results show that the antenna with exponential gradient Barron structure achieves good impedance matching and has good broadband characteristics. Its operating bandwidth is 1.74 GHz to 4.82 GHz, with a minimum return loss of -30 dB. At the same time, a flat bottom metal reflection cavity is designed to reflect back electromagnetic waves. While maintaining broadband operating characteristics, the antenna has good unidirectional radiation characteristics. The gain of the antenna in the entire operating frequency band is greater than 6 dB. Compared with traditional spiral antennas, it has the characteristics of broadband, directional, and high gain, and has certain application prospects.

Keywords: broadband; equal angle spiral antenna; exponential gradual balun; metal reflection cavity; HFSS software simulation

0 引言

平面螺旋天线是一种十分常见的宽频带天线,它也是非频变天线的一种。非频变天线即频率无关天线,是一种工作带宽近乎没有理论限制的天线种类,这类天线的特性阻抗、极化、方向图不会随工作频率的改变而变化^[1]。实际设计中受现实物理条件的限制,天线无法在所有的工作频率上都保持着恒定不变的电特性。因为平面等角螺旋天线的结构自身十分相似,所以它能够辐射出圆极化波,因为该种天线具有良好的辐射特性,所以被工业生产广泛应用^[2]。由于该天线在很宽的频带范围内都具备非常好的辐射方向图特性、输入阻抗特性和圆极化特性^[3],诸多学者也对其进行了深入研究。邢晓俊等人设计了一种变换反射腔内部结

构以及调整辐射器中螺旋线宽比的平面螺旋天线,避免了吸波材料的使用,使得天线工作在 0.6~2.0 GHz,但天线的尺寸较大,为 170 mm×75 mm^[4]。Chen 等^[5]设计了一款圆极化平面双臂复合螺旋天线。天线工作覆盖了从 200 MHz~6 GHz 的 L 波段和 S 波段频段。在阿基米德螺旋的起点应用了等角螺旋,从而减少了馈电巴伦的横截面长度,实现了天线的小型化。任强等^[6]设计了一种用于步进频率探地雷达的平面等角螺旋天线,实现了探地雷达的超宽频带和小型化,提高了雷达接收信号的效率并且体积小,重量轻。这些天线均满足了一定的设计指标,但始终无法兼得宽频带、小型化、高增益、定向辐射的特性。在现代技术发展条件下,对于天线的体积、质量、电气特性的要求愈

收稿日期:2023-01-13

发严格,所以本文设计的天线十分有意义。

本文设计了一种带平底型金属反射腔的平面双臂等角螺旋天线,并设计了一种指数渐变巴伦以实现天线的阻抗匹配,经过仿真优化使得天线同时具有了小型化、宽频带、单向辐射及高增益的电气特性。

1 平面等角螺旋天线

1.1 等角螺旋天线基本理论

在设计时选择的角度决定了平面等角螺旋天线的实际形状。等角螺旋天线在工作时其最大辐射方向在天线所在平面的两边法线方向。通常可用极坐标的形式来表示等角螺旋天线的两个臂,曲线方程为:

$$r = r_0 e^{\alpha(\theta - \theta_0)} \quad (1)$$

在式(1)中, r_0 是起始角度 θ_0 对应的矢径,也就是螺旋臂起始点与原点之间的距离, α 是螺旋增长率,一般要求天线的螺旋臂长大于1个工作波长,半径 $r \geq 1/4$ 工作波长,等角螺旋天线可分为单臂螺旋、双臂螺旋,本文选用了双臂螺旋结构的设计^[7]。等角螺旋天线的结构示意图如图1所示,可用极坐标公式对螺旋臂中的四条边线进行表示,分别为:

$$r_1 = r_0 e^{a\theta} \quad (2)$$

$$r_2 = r_0 e^{a(\theta - \delta)} \quad (3)$$

$$r_3 = r_0 e^{a(\theta - \pi)} \quad (4)$$

$$r_4 = r_0 e^{a(\theta - \pi - \delta)} \quad (5)$$

式中: r_1 、 r_3 分别为两臂的外边缘曲线, r_2 、 r_4 为内边缘曲线, δ 是天线的角宽度,在本文里取 $\pi/2$,这种结构称为自互补结构。

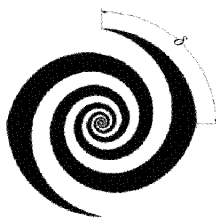


图1 平面等角螺旋天线结构

在实际设计中螺旋臂不能是无限长,电流在螺旋臂上会产生很大的衰减,所以在螺旋臂达到一定的长度之后就要进行截断,常用的等角螺旋天线的圈数设计在1.5~3圈左右,根据实际设计的工作频率来选择具体圈数,然后使用半径为螺旋线末端到圆心距离的圆弧将一条臂的内外边缘曲线末端连接起来,这种处理方式能够有效地减小螺旋臂末端的反射电流,降低天线的终端效应,使得天线近似的具有行波特性和^[8]。

通过巴俾涅原理能计算得到互补天线的阻抗关系:

$$Z_{in} Z'_{in} = \eta^2 / 4 \quad (6)$$

当天线与其互补结构相同时此天线为自互补天线,则有:

$$Z_{in} = Z'_{in} = 188.5 \Omega \quad (7)$$

在实际测试中天线的输入阻抗要比理论计算值要小一些,大约在120~140Ω的范围内^[9]。等角螺旋天线在周长和波长相等的时候圆周区域产生有效辐射,在工作频率变化时辐射区会随着波长的变化而改变,工作频率升高,有效辐射区更加靠近内圈,反之则向外圈靠近。一般情况下天线的螺旋臂越长,天线的下限工作频率就越低。设计中,常选取天线的径向长度大小为1/4的下限频率对应的波长,上限频率对应波长的1/4为 r_0 。螺旋增长率 α 影响天线的电流特性, α 越大,电流沿臂的延伸方向衰减得越慢, α 越小,辐射特性越好,一般设计中常取 α 为0.12~1.2。平面等角螺旋天线是一种双向辐射天线,为了实现单向辐射一般在背面设计反射腔体或在背部添加吸波材料^[10]。当工作频率对应波长远大于螺旋臂长时,平面等角螺旋辐射线极化波,当螺旋臂大于或接近天线工作波长时,天线辐射电磁波的极化形式由螺旋臂展开的方向来决定。

1.2 天线结构设计

本文的设计中,设定起始距离 r_0 为17mm, a 为0.272。介质基板选用FR4(玻璃纤维环氧树脂)材料,其相对介电常数为4.4,损耗正切角为0.02,天线基板厚度 H 为1.6mm, δ 为 $\pi/2$ 。

1) 微带指数渐变巴伦的设计

由于天线的实际输入阻抗在120~140Ω左右,通用的同轴线阻抗为50Ω,两者直接相连会导致阻抗不匹配,因此需要阻抗匹配设计。本文采用1/4波长指数渐变巴伦^[11]来实现天线的阻抗匹配。巴伦结构示意图如图2所示,地板面选用指数渐变线,馈电部分使用一个简单的变化平缓的梯形梯度线^[12]作为馈线,因为梯度线的频带非常宽,而且拥有很大的功率容量。由此构成一个平面等角螺旋天线的平衡——不平衡阻抗变换巴伦^[13]。巴伦从不平衡微带结构逐渐变换到平衡馈电的平行结构,最终输入阻抗从50Ω变成140Ω的输出阻抗。

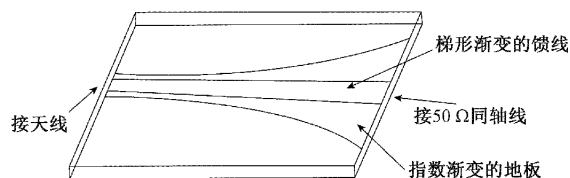


图2 指数渐变巴伦结构示意图

在加工时,本文设计的巴伦结构选用印刷电路板工艺,选用的介质基板是FR4,巴伦的具体尺寸参数为长度 L_{balun} 为24.6mm,宽度 W_{balun} 为20mm,厚度 h_{balun} 为1.6mm。梯形渐变线上底为0.26mm,下底为1.3mm,指数渐变的上底为0.26mm,下底为20mm。

2) 金属反射背腔的设计

为了实现天线的单向辐射^[14],通常在天线的一侧添加反射板、地板或反射腔^[15]。平底型反射腔是一种常见的反

射腔,腔的高度为 $\lambda/4$, λ 为天线中心频率对应的波长,反射腔的直径大小和天线的外径相同。中心频率的电磁波经过 $\lambda/4$ 的长度到达反射腔底面,再由底面反射返回,反射的电磁波会通过 $\lambda/4$ 的自由空间再次反射至天线表面,此时反射波与前向辐射的电磁波两者相位一致,使得在此工作频段的前向辐射效率翻倍,就形成天线的单向辐射,同时也提高了天线的正向增益。经过参数优化调整后,最终本文所设计的反射腔的半径与天线介质板的半径相同,为39.95 mm,深度为24 mm,在实物天线加工时使用金属面进行覆盖来实现电磁波的反射。最终本文设计的仿真模型如图3所示。

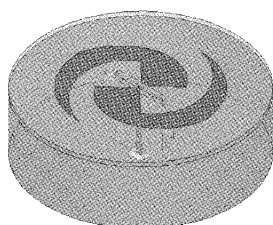


图3 设计的等角螺旋天线模型

2 仿真与实验测试

通过HFSS仿真软件建模分别仿真了无反射腔与有反射腔的天线模型,经过加工,本文设计的等角螺旋天线实物如图4所示。

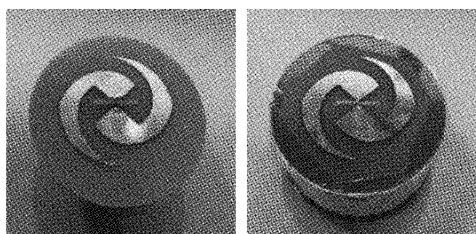


图4 实物天线模型

为了对比增加反射腔后天线的性能变化,采用高频电磁仿真软件ANSYS HFSS对设计的螺旋天线进行S参数和三维增益仿真测试,可以得到天线的各项参数,并与实际测试结果相比较。首先利用矢量网络分析仪Agilent E8363C来测量两款实物加工天线的 S_{11} ,测量环境与测试结果对比如图5、6所示。

由 S_{11} 结果图对比可以得知,两款天线的 S_{11} 低于-10 dB的频段都达到3 GHz,证明本文设计的天线在有反射腔和无反射腔的情况均能达到3 GHz左右的宽频工作带宽,两者的工作频段基本保持一致,区别在于两者的谐振点处于不同的频点,实测中天线的谐振点较仿真略有偏移,原因可能是介质板在加工时有精度误差以及反射腔壁覆盖的金属面不够平整,但是在误差允许范围之内,但对比其辐射方向图和增益则有较大区别,如图7所示。

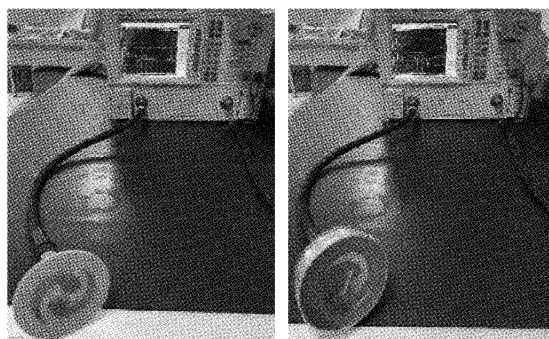
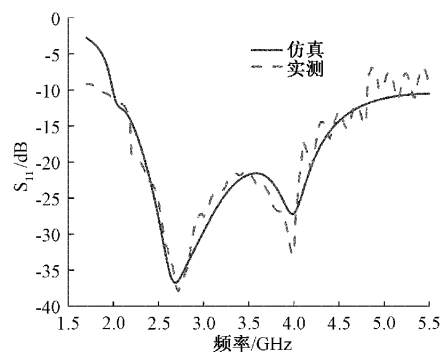
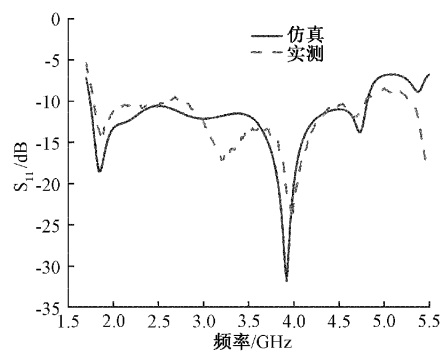


图5 网络分析仪测试S参数



(a) 无反射腔的天线



(b) 有反射腔的天线

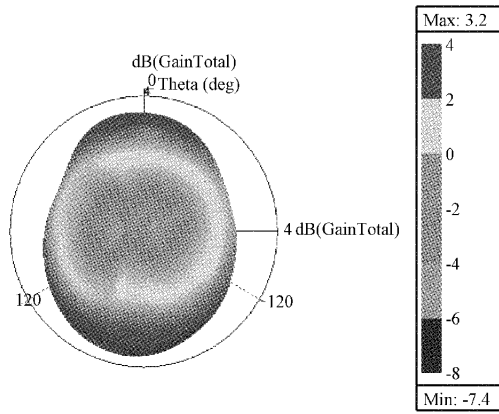
图6 天线的 S_{11} 仿真与实测对比

由三维增益方向图可知,在不增加反射腔时,天线呈现双向辐射特性,此时增益最高处只有3.2 dB,在添加反射背腔后,天线表现出良好的单向辐射特性,且在最大处增益达到8.16 dB,在同一频点下增益得到极大提高。天线在宽频带的基础上还具备了宽频带、单向辐射、高增益的性能特点,下面对添加了反射腔的天线进行进一步研究。

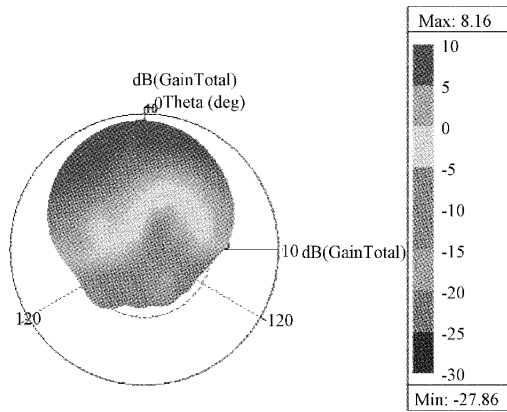
在紧缩场微波暗室对加工的螺旋天线进行方向图测量,暗室测试环境如图8所示。

在此环境下,测量计算天线在不同工作频点的二维增益方向图,得出XOZ面增益方向图如图9所示。

通过XOZ面二维增益方向图可以得知,在添加了金属反射腔之后,天线在不同的频点均实现了优异的单向辐射特性,相较于未添加反射腔的天线,其背向辐射显著减小,



(a) 无反射腔



(b) 有反射腔

图 7 4 GHz 频点天线的三维增益方向图

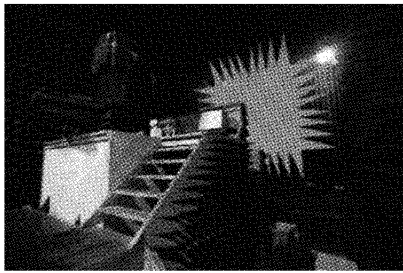
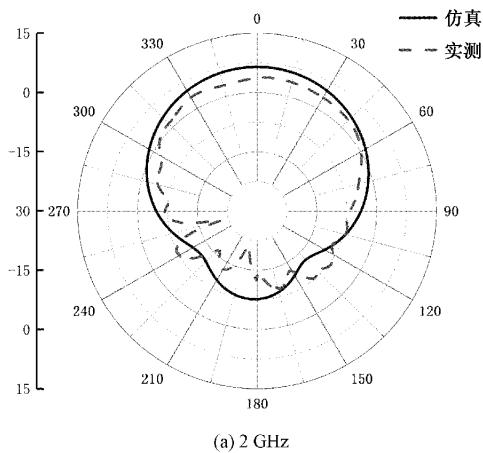
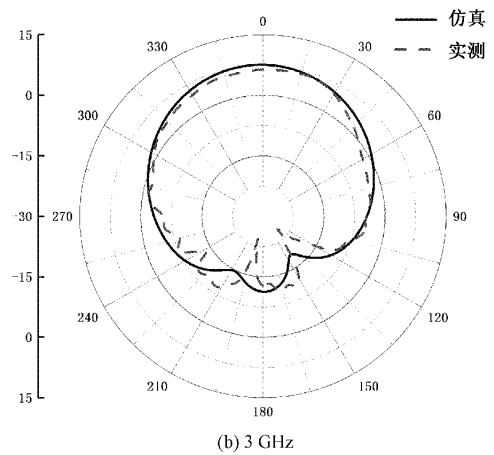


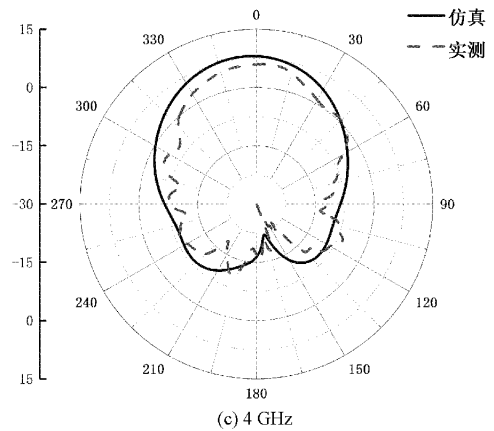
图 8 紧缩场微波暗室测试环境



(a) 2 GHz



(b) 3 GHz



(c) 4 GHz

图 9 不同谐振点下天线的 XOZ 面增益方向图

同时增益得到了极大的提升。具体而言,在 2、3、4 GHz 这几个频点处,仿真的增益分别为 6.49、7.55、8.16 dB。实际测试出来的增益分别为 3.91、6.07、6.56 dB,两者规律保持一致。尽管受到加工精度误差的影响,实际加工的天线增益略低于仿真结果,但整体的增益方向图仍然符合设计指标。

3 结 论

本文设计并实物加工测试了一种带指数渐变巴伦和金属反射背腔的平面等角螺旋天线,天线的整体框架近似为直径 39.95 mm,高 24.6 mm 的圆柱,实现了小尺寸特性。经过实物测试,结果表明天线工作在 1.74~4.82 GHz 的宽频带上,与仿真结果基本一致。与具有相同工作频宽的无反射腔天线相比,该天线具有较高的增益,在工作频带中增益均大于 6 dB,同时抑制了背向辐射,实现了单向辐射,在高增益单向辐射天线领域有着较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 孙瑶.毫米波圆极化反射阵天线的研究与设计[D].成都:电子科技大学,2022.
- [2] 高原,孙兆锋,彭斌,等.表面开槽的宽带遥测微带天线设计[J].电子测量技术,2022,45(6):14-17.

- [3] 朱文强,张爱军.一种小型化超高频段 RFID 读写器天线设计[J].国外电子测量技术,2019,38(11):142-146.
- [4] 邢晓俊,王一笑,夏翔,等.一种高增益超宽带平面螺旋天线设计[C].中国电子学会2021年全国天线年会论文集,2021.
- [5] CHEN D, ZHANG H X, XU J. A broadband planar spiral antenna design for electromagnetic signal monitoring[J]. IEEE Access, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2971135.
- [6] 任强,林曙光,陈浙澄.一种平面等角螺旋天线的设计与应用[J].中国电子科学研究院学报,2015,10(3):269-273.
- [7] YANG Y, KAI G, FEI S, et al. Generating Multiple OAM Based on a Nested Dual-Arm Spiral Antenna[J]. IEEE Access, 2019, 7:138541-138547.
- [8] 陈岩.超宽带平面螺旋天线小型化研究与设计[D].西安:西安电子科技大学,2020.
- [9] 荣建伟,杨林,赵玺,等.平面等角螺旋天线的研究与设计[C].2013年全国微波毫米波会议论文集,2013:1912-1915.
- [10] 梁志毅,张霄霖,刘磊,等.加载介质透镜的超宽带平面螺旋天线设计[J].微波学报,2022,38(3):33-35,41.
- [11] 宋立众,乔晓林,曹丙霞.微带巴伦馈电圆锥等角螺旋天线设计与实验[J].微波学报,2012,28(1):29-32,37.
- [12] 张晓辉.一种低剖面宽频带巴伦设计[J].信息通信,2018(4):40-42.
- [13] 庞靖,姜彦南.平面螺旋天线及其宽频带巴伦的设计[J].微波学报,2012,28(S3):128-130.
- [14] LIU N W, YAO Y L, ZHANG Z Y, et al. A dual-broadband circularly polarized antenna with unidirectional radiation pattern[J]. Progress In Electromagnetics Research C, 2014, 51, DOI:10.2528/PIERC14041301.
- [15] 胡泉,陈星.新型小型化 SWB 定向天线[J].电子测量技术,2021,44(4):21-24.

作者简介

周嘉豪,硕士研究生,主要研究方向为天线设计与测试。
E-mail:1286251731@qq.com