倪国旗, 陈兆祺, 范李. 一种介质埋藏异形微带八木天线的设计[J]. 电波科学学报, 2021, 36(2): 195-200. DOI: 10.13443/j.cjors.20200603 NI G Q, CHEN Z Q, FAN L. The design of dielectric embedded special-shaped microstrip Yagi antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(2): 195-200. (in Chinese) DOI: 10.13443/j.cjors.20200603

一种介质埋藏异形微带八木天线的设计

倪国旗^{1,2} 陈兆祺² 范李¹

(1.95795部队, 桂林 541003; 2. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 桂林 541004)

摘要为达到某重点项目性能要求,综合运用微带天线、八木天线和介质埋藏天线理论及设计方法,设计出了一种介质埋藏异形微带八木天线.该天线将传统八木天线的引向振子由一个改变为两个,形成"¥"形,用来规划波束方向和形成双波束;在天线贴片两旁增加"栅栏",聚集了电磁波的辐射,提高了天线增益,同时还获得了较大的相对阻抗带宽.测试表明:在Ku频段的一中心频率上,其绝对带宽为1.9 GHz,最大增益为3.92 dB;在E面具有两个主波瓣, $\theta=15°处波瓣宽度为11°, \theta=347°处波瓣宽度为10°.所设计天线在性能和功能上均满足项目需求,对该项目中信号的接收和发射起到了关键作用.此外,该天线在其他通信、侦察和干扰等场合也具有广阔的应用价值.$

关键词 介质埋藏天线;八木天线;微带天线;双波束特性;异形微带八木天线

中图分类号 TN821 文献标志码 A 文章编号 1005-0388(2021)02-0195-06 DOI 10.13443/j.cjors.20200603

The design of dielectric embedded special-shaped microstrip Yagi antenna

NI Guoqi^{1,2} CHEN Zhaoqi² FAN Li¹

(1. 95795 Force, Guilin 541003, China; 2. School of Information and Communication and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract In order to meet the performance requirements of a key project, the theory and design method of microstrip antennas, Yagi antennas and dielectric embedded antennas were used comprehensively to design dielectric embedded special-shaped microstrip Yagi antennas. This antenna changes the leading vibrator of the traditional Yagi antenna from one to two, forming a "¥" shape, which is used to plan the beam direction and form a dual-beam; adding "fences" on both sides of the antenna patch to gather electromagnetic wave radiation. The antenna gain is improved, and a larger relative impedance bandwidth is also obtained. Tests show that at a center frequency in the Ku band, its absolute bandwidth is 1.9 GHz and its maximum gain is 3.92 dB. There are two main lobes on the E plane: at θ =15°, the lobe width is 11°; at θ =347°, the lobe width is 10°, which shows that the antenna meets the project requirements in performance and function, and plays a key role in the reception and transmission of signals in the project. In addition, the antenna also has broad application value in other communication, reconnaissance and interference situations.

Keywords dielectric embedded antenna; Yagi antenna; microstrip antenna; dual beam characteristics; specialshaped microstrip Yagi antenna

引 言

随着北斗系统在我国乃至全世界导航通信等

领域中的应用与发展,其地面终端系统也随之快 速发展起来,本文研究的天线就是某国防项目中 北斗地面终端系统中的关键部件,恶劣的野外环

收稿日期: 2020-06-03 资助项目: 广西回国基金(桂科回 0991021) 联系人: 陈兆祺 E-mail: chzhq1818s@163.com 境要求天线除了自身的性能要良好外,还要求其体积小、能共形、具有双波束等.鉴于此,我们综合研究了微带天线、八木天线和介质埋藏天线的特点及应用.

目前研究较多的微带八木天线不仅有两种天 线的优点,而且还便于集成,减小了天线的体积, 改善了前后比等.但它们的共形效果不好,而介质 埋藏天线则能够很好地解决这一问题. 文献 [1] 详 细介绍了介质埋藏层对介质埋藏微带天线性能的 影响,并且给出了几种经过对比分析的介质埋藏 微带天线. 文献 [2-7] 研究了几种介质埋藏天线的 性能,这些正常形状的介质埋藏微带八木天线虽 然解决了方向性、集成性,特别是共形问题,但却 没有解决双波束特性. 文献 [8] 将引向器设计为分 段结构, 文献 [9-10] 使用等幅异相的同轴双馈模式 的馈电变异式结构,加上文献[11-12]等都给予我 们启示,本文在已有的介质埋藏微带贴片立体式 八木天线结构的基础上,提出了一种"¥"形的新 式天线结构,即将第一级、第二级引向器设计成两 个贴片,解决了双波束的实现问题.该天线不仅在 通信方面具有较好的应用前景,而且在电子侦察、 空中预警等方面也具有较大的应用价值.

1 天线结构及各参数设计

1.1 异形结构设计

由文献 [1,13-14] 知, 微带八木天线可以采用立体式结构(三明治式), 因此, 我们也用这种结构来设计异形微带八木天线.由于介质埋藏天线是将微带天线的贴片埋入介质中, 不与空气接触, 因此我们在立体式微带八木天线的每个贴片层表面都覆盖一定厚度的介质, 设计成介质埋藏异形微带八木天线, 如图 1 所示.该天线由一个激励振子、四个引向振子以及一个反射振子组成, 对文献 [15-16] 的八木天线结构进行变形, 振子采用微带贴片, 微带贴片形成人民币符号¥形.



图1 天线的立体结构图

Fig. 1 The three-dimensional structure of the antenna

天线的馈电方式采用同轴馈电,同轴外导体 与反射贴片相连接,内导体穿过介质板并与激励 振子贴片相连接,馈电位置在激励振子中央处,即 坐标(0.0).

1.2 增加了"栅栏"后的天线结构

图 1 的天线结构中,由于我们把常规八木天线 结构中的辐射振子和第一引向振子作了变形,所 以电磁波在介质中的传播情况更复杂,可能导致 引向振子没有起到应有的作用,使得电磁波从振 子贴片两侧辐射较多.因此,我们根据微带天线理 论,在每个振子两旁增加了寄生振子,这样相当于 在振子的两旁增加了"栅栏"^[3],如图 2 所示,使得 沿天线传播方向的电磁波在一条小"巷道"内传 播,从而保证电磁波不向侧面辐射,提高了其方向 性.此外,由于类似于增加了天线单元而变成了天 线阵,从而也提高了增益^[17].还有,由于增加了寄 生振子也改变了天线的阻抗特性,使阻抗带宽发 生改变.





1.3 贴片尺寸计算

由于天线贴片是埋藏在介质中的,因此我们 要考虑介质的影响,对此引入等效介电常数

$$\varepsilon_{\rm e} = \frac{\varepsilon_{\rm r} + 1}{2} + q \frac{\varepsilon_{\rm r} - 1}{2}.$$
 (1)

在这里,由于天线贴片埋藏在介质里,所以 $q \approx 1$, 因此 $\varepsilon_e \approx \varepsilon_r^{(1)}, \varepsilon_r$ 是介质的相对介电常数.

本文选用 FR4 介质作为介质板,介电常数为 4.4,损耗正切为 0.02. 介质埋藏天线是将传输线上 的导行波变换为在介质中传播的电磁波,再由介 质传播到空间.因此电磁波在介质中的波长

$$\lambda_{\rm g} = \frac{c_0}{f \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\rm r}}}.$$
(2)

式中, ん是空气中电磁波的波长.

根据自由空间中的八木天线的尺寸设计,经

HFSS 优化仿真之后,可以得到优化后的天线尺 寸,结果如表1所示.其中: d_1 为反射贴片所在的 介质基片的厚度, d_2 是其他贴片所在的介质基片 的厚度; W_1 和 L_1 分别为所用介质板的长和宽; h_1 、 m_1 是反射贴片的长和宽; h_2 、 m_2 是激励贴片的长 和宽; h_3 、 m_3 是第一级引向贴片长和宽; h_4 、 m_4 是 第二级引向贴片长和宽; s_1 为第一级两个引向贴 片之间的间距; s_2 为第二级两个引向贴片之间的 间距.

表1 天线尺寸

Tab. 1The antenna		nna size	ize mm	
参数	取值	参数	取值	
<i>d</i> ₁	4	h_4	13	
d_2	6	<i>m</i> ₁	15	
L_1	40	m ₂	9	
W_1	60	<i>m</i> ₃	9	
h_1	20	<i>m</i> ₄	9	
h_2	15	s ₁	4	
h_3	13	s2	15	

2 仿真实验及分析

2.1 天线性能参数仿真分析

利用电磁仿真软件 HFSS 对上述天线结构参数进行优化,并对改进后的天线进行仿真实验,得到天线主要性能参数:谐振频率f=15.58 GHz,增益G=5.06 dB,带宽B=2.533 GHz,驻波比 $\rho=1.24$.图 3 是天线的 E 面、H 面方向图以及主极化与交叉极化图,当天线在谐振频率达到最大增益时,对应着两个主波瓣:在 $\theta=14^\circ$ 处,波瓣宽度为15°;在 $\theta=346^\circ$ 处,波瓣宽度为16°.





Fig. 3 Plane pattern of "fence" structure antenna

值得指出的是,该天线增加了"栅栏"结构后, 其带宽和增益都有所增加,如表2所示,带宽由原 来的2.519 GHz增加到2.533 GHz;最大增益由原来 的4.16 dB,增加到5.06 dB.

表 2 有无 "栅栏" 结构天线性能参数对比

 Tab. 2
 Comparison of antenna performance parameters with or without "fence" structure

天线结构	带宽/GHz	增益/dB
无"栅栏"	2.519	4.16
有"栅栏"	2.533	5.06

2.2 天线双波束特性分析

天线的第一引向振子贴片由两个振子贴片 D1T和D1B组成(如图1所示),它们主要控制波束 的方向,图中已隐去介质层,只显示振子贴片.天 线的左半部分 R-D-D1T-D2T和右半部分 R-D-D1B-D2B存在结构干涉,天线的增益得到增强.与此同 时,左右两半部分作为各自的八木天线,各自形成 一个主波束, 左半部分 R-D-D1T-D2T 在 336°≤ θ ≤ 353°有辐射峰值, 右半部分 R-D-D1B-D2B 在 7°≤ θ ≤ 24°有辐射峰值,构成双波束特性, 如图 3(a) 所示.

3 实物天线制作及分析

3.1 天线实物制作

根据第2节得到的优化天线结构参数值,制作 天线实物,如图4所示,天线尺寸为40mm×60mm. 介质材料是FR4,其相对介电常数为4.4,用于埋藏 天线以及制作微带八木异形天线的介质基片.



图 4 天线实物照片 Fig. 4 The prototype of the antenna

主要制作步骤如下:

1)根据仿真实验的数据结果,选取所需要的 高频覆铜板,并按尺寸裁剪好形状。

2)选取上述覆铜板,采用印刷电路板(printed circuit board, PCB)制作技术,制作好各贴片形状,此形状要与前面仿真出来的形状一致.

3)焊接好馈线引出端子,并对将要叠加在其 上面的介质板钻适当孔径的孔,便于馈线的引出.

4) 按仿真实验数据要求, 开始叠加各层介质 板, 它们之间使用胶粘剂无缝隙地粘贴在一起.

由于要将天线的贴片部分完全埋藏在介质基 板中,所以介质层之间不能存在缝隙.介质基板是 多个单层的介质基板粘结在一起的,需要选择与 介质板材质相同的胶粘剂,如果选择的胶粘剂不 合适,会对电磁波在介质板和粘胶之间的传播产 生较大影响,直接影响天线的辐射,因此为了最大 程度降低黏胶带来的影响,一般选择与介质基板 相同材质的黏胶.由于市面上比较容易到购买环 氧树脂 AB 胶,所用成本较低,胶粘剂的使用材料 与 FR4 介质材料相同,因此利用环氧树脂 AB 胶将 厚度 1 mm 的介质板粘结成我们需要的厚度.

5)等待24h胶粘剂干结后,进行馈线的外端制作.

3.2 性能测试与分析

制作完天线实物后,对其进行性能测试.使用 矢量网络分析仪对介质埋藏异形八木天线的反射 系数进行测试,测试结果与仿真结果的对比如图 5 所示。

根据前文的仿真结果: $S_{11} \leq -10$ dB 的工作频率范围为 14.46~17 GHz,绝对带宽为 2.533 GHz, 天线工作的谐振频率 f=15.58 GHz,相对带宽为 16.3%. 由图 5 可知,实测 S_{11} 最低值谐振点向左偏移,出现这一结果的原因可能是在加工天线的过程中引入了无法测量的误差以及焊接 SMA 接头时引入的误差.由实测结果可知:天线的工作频率为 15.46 GHz, $S_{11} \leq -10$ dB 的频率范围为 14.67~16.57 GHz,绝对带宽为 1.9 GHz,相对带宽为 12.3%.实测结果比仿真结果差,天线带宽有所减小,经过分析可能是因为在加工天线时,介质层的粘结不够紧凑,还有FR4 板材在高频率下的介电常数不稳定,焊接过程中产生了误差等等,最终导致与仿真实验结果有些许出入.





为了能够得出天线的辐射方向图,在微波暗 室里对天线进行测试.由于微波暗室空间有限、转 台太大等测试条件的客观性,无法测试到后瓣,只 能测试到 180°的范围.又由于天线主要朝着主波 束方向辐射,而主波束方向可以被测量到,得到的 测试结果如图 6 所示.

由图 6 可见, 天线 E 面和 H 面半功率波瓣宽度 要比仿真的窄, 经分析可能是因为测试过程中不 可避免的误差对结果造成了影响. 从图 6(a) 可以得 出, 当天线在谐振频率达到最大增益的时候, 对应 着 两个 主波瓣: 在 θ = 15°处, 波瓣宽度为11°; 在 θ = 347°处, 波瓣宽度为10°. 当天线增益最大时, 对 应有两个主波瓣, 满足天线双波束的设计. 在天线 中心频率处, 实测增益为 3.92 dB, 实测值比仿真值 低 1.14 dB. 产生这一差异的原因可能是加工天线的时候,粘结介质层使用的环氧树脂胶引入了损耗,以及在微波暗室里测量的时候,测试环境不是理想环境,也存在着误差.通过以上测试和仿真结果的对比可知,天线的整体性能能满足项目性能和功能要求.







4 结 论

将微带天线埋藏于介质中,电磁波辐射在介 质中具有折射、反射等特性,而且因电磁波在介质 中的损耗等,需要用新的理论模型和新方法等开 展研究.我们经过多年的研究经验积累,综合运用 微带天线、八木天线和介质埋藏天线等理论基础, 研究出杆片置换理论、损耗设计经验值、叠层埋 藏制作工艺等.本文研究的天线正是基于以上综 合理论、设计方法、制作工艺等的初步尝试,实验 证明,该研究方向正确,所研究和设计出的天线除 了兼有微带天线和八木天线等优点外,还具有总 体积减小、保护性能好、可共形等特点,其性能和 功能完全可以媲美普通的天线.本文研究的天线 实物虽然制作成功,且设计方法和制作工艺论述 详实,但电磁波在介质中和介质与环境交界面上 的传播等机理还有待进一步研究探讨,这也是我 们下一步要努力的方向.最后可以预见,随着北斗 系统的普及、5G技术的发展、物联网的应用、智 能通信技术的产生等,该类天线的应用前景更将 广阔.

参考文献

- [1] 倪国旗. 介质埋藏微带天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] 倪国旗,高本庆,薛正辉.介质埋藏贴片对称振子天线
 [J].北京理工大学学报,2009,29(10):890-893.
 NI G Q, GAO B Q, XUE Z H. Dielectric embedded patch symmetrical dipole antenna[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(10): 890-893. (in Chinese)
- [3] 倪国旗,高本庆.一种新型的层叠式介质埋藏贴片八天线
 [J]. 电波科学学报,2009,24(2):337-340+353.
 NI G Q, GAO B Q. A novel stacked dielectric embedded patch Yagi antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2009,24(2):337-340+353. (in Chinese)
- [4] 倪国旗,张涛. 一种新型介质埋藏贴片天线阵设计[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(9): 941-945.
 NI G Q, ZHANG T. Design of a new dielectric embedded patch antenna array[J]. Journal of Beijing institute of technology, 2015, 35(9): 941-945. (in Chinese)
- [5] 倪国旗, 韩非凡, 张昱凯. 介质埋藏平面对数周期天线的设计[J]. 现代雷达, 2016, 38(6): 54-58.
 NI G Q, HAN F F, ZHANG Y K. Design of a dielectric

embedded planar log periodic antenna[J]. Modern radar, 2016, 38(6): 54-58. (in Chinese)

- [6] 倪国旗,张昱凯,刘曼霞. 一种宽波束介质埋藏微带圆极 化天线的设计[J]. 电子世界, 2017(12): 100-102.
 NI G Q, ZHANG Y K, LIU M X. Design of a dielectric embedded microstrip circular polarization antenna with wide beam media[J]. Electronic world, 2017(12): 100-102. (in Chinese)
- [7] 倪国旗, 刘曼霞. 圆柱共形介质埋藏微带天线设计与研究
 [J]. 电波科学学报, 2018, 33(2): 119-125.
 NI G Q, LIU M X. Design and research of dielectric embedded microstrip antenna with cylindrical conformal[J].
 Chinese journal of radio science, 2018, 33(2): 119-125. (in

Chinese)

- [8] 钱祖平,关东方,张颖松,等. 一种新型共形微带准八木天 线的设计[J]. 电波科学学报, 2013, 28(4): 700-704.
 QIAN Z P, GUAN D F, ZHANG Y S, et al. Design of a novel conformal microstrip quasi Yagi antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2013, 28(4): 700-704. (in Chinese)
- [9] 汤炜,袁良昊,孙铃武. 一种基于容性加载的小型化准八 木天线研究[J]. 电波科学学报, 2017, 32(4): 427-433.
 TANG W, YUAN L H, SUN L W. A novel miniaturization quasi Yagi-Uda antenna based on capacitive loading technique[J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(4): 427-433. (in Chinese)
- [10] 叶喜红,何芒,周平源.宽带宽波束圆极化微带八木天线
 [J].电波科学学报,2015,30(4):759-763.
 YE X H, HE M, ZHOU P Y. Broadband wide beam-width circularly polarized microstrip Yagi antenna[J]. Chinese journal of radio science, 2015, 30(4):759-763. (in Chinese)
- [11] KUNDU S, PATRA K. Design of reconfigurable planar Yagi–Uda antenna for dual frequency wireless communication[C]//IEEE Calcutta Conference. Kolkata, 2020: 439-443.
- [12] LIANG Z J, YUAN J. Compact dual-wideband multi-mode printed quasi-Yagi antenna with dual-driven elements[J].
 IET microwaves, antennas & propagation, 2020, 14(7): 662-670.
- [13] HUSSAIN R, JEHANGIR S S, KHAN M U, et al. Stacked

frequency reconfigurable Yagi-like MIMO antenna system[J]. IET microwaves, antennas & propagation, 2020, 14(6): 532-538.

- [14] QIU Y, HONARI M M, GHAFFARIAN M S, et al. Design and fabrication of nonplanar Yagi–Uda antennas based on a partially conductive filling method[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2019, 18(11): 2439-2443.
- [15] YANG L, ZHUANG J J. Compact quasi-Yagi antenna with enhanced bandwidth and stable high gain[J]. Electronics letters, 2020, 56(5): 219-220.
- [16] CHAUDHARI A D, RAY K P. Printed broadband Quasi-Yagi antenna with monopole elements[J]. The IET microwaves, antennas & propagation, 2020, 14(6): 468-473.
- [17] PARTHASARATHY N, ABHARI R. A compact 2 by 2 printed Yagi-Uda antenna array with enhanced isolation and gain[C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta, 2019: 1761-1762.

作者简介

倪国旗 (1964—),男,湖北人,博士,硕士研 究生导师,研究方向为微波技术与天线、微波器 件与材料.

陈兆祺 (1994—),男,湖北人,硕士研究生, 研究方向为微波器件与天线.