

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.12.014

引用格式:倪国旗,韩非凡,张昱凯. 介质埋藏平面蝶形天线的设计[J]. 电讯技术,2016,56(12):1381-1386. [NI Guoqi, HAN Feifan, ZHANG Yuka. Design of a dielectric embedded planar bow-tie antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(12):1381-1386.]

介质埋藏平面蝶形天线的设计*

倪国旗^{**1,2}, 韩非凡¹, 张昱凯¹

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004; 2. 空军空降兵学院 二系, 广西 桂林 541003)

摘 要:采用了介质埋藏的形式将平面蝶形天线埋藏于介质中,并设计了渐变的平面微带巴伦给平面蝶形天线馈电,实现了不平衡到平衡的转换;还设计了三角形微带巴伦和微带传输线一起的结构形式,进行阻抗匹配。使用电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对该天线进行了优化设计和仿真实验,与制作的实物天线性能进行对比。仿真和实测结果表明,该天线 $S_{11} \leq -10$ dB 仿真的相对带宽达到 88.7% 而实测的相对带宽为 79.3%,具有超宽带特性;在工作频率处,仿真增益为 6.9 dB,实测增益为 5.8 dB。该天线满足某工程项目的需要,可作为探地雷达系统的收发天线。

关键词:探地雷达;超宽带天线;介质埋藏平面蝶形天线;三角形微带巴伦

中图分类号:TN822 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)12-1381-06

Design of a Dielectric Embedded Planar Bow-Tie Antenna

NI Guoqi^{1,2}, HAN Feifan¹, ZHANG Yukai¹

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. The 2nd Department, Air Force Airborne Academy, Guilin 541003, China)

Abstract: The planar bow-tie antenna employing the form of dielectric embedded is buried in the substrate. A tapered planar microstrip balun is designed so as to achieve transforming unbalance to balance. In order to realize impedance matching, the structure of triangular microstrip balun with microstrip transmission line is designed. The designed antenna is simulated and optimized by Ansoft HFSS and compared with fabricated physical object. Simulated and measured results show that the relative bandwidth reaches 88.7%, while the measurement is 79.3%, which has the ultra-wideband (UWB) characteristics. At the working central frequency, the gain is up to 6.9 dB, while the measurement is 5.8 dB, which meets the need of a certain project and can be applied in the receiving and transmitting antenna of ground penetrating radar system.

Key words: ground penetrating radar; ultra-wideband (UWB) antenna; dielectric embedded planar bow-tie antenna; triangle microstrip balun

1 引 言

天线正沿着宽频带、高增益、小型化方向发展^[1]。平面蝶形天线具有宽频带、结构简洁、易于加工和小型化、方便与电路集成等特点而被越来越多的国内外学者关注^[2-6]。目前,它也是探地雷达系统中收发天线的主要形式之一,并且得到了广泛的应用^[1-2]。但是在实际应用中,天线的金属部分不可避免地裸露在空气中,很容易受到空气的氧化

* 收稿日期:2016-02-29;修回日期:2016-06-08 Received date:2016-02-29;Revised date:2016-06-08

** 通信作者:ngq157@163.com Corresponding author:ngq157@163.com

腐蚀,特别是在恶劣的环境中对天线的损伤会更大,从而使天线性能发生改变。可见,很有必要在天线的外表面加覆盖层用以保护天线的金属部分,例如:涂上油漆,可是油漆对天线的性能影响很大。基于保护天线和某种性能的需要,本文将天线的金属部分埋藏在介质中,形成一种新型的天线形式——介质埋藏天线^[7],该天线可减小天线的尺寸同时还增强天线的隐蔽性,比油漆的作用效果要好,具有较高的工程应用价值^[7]。

2 介质埋藏平面蝶形天线的设计

2.1 介质埋藏平面蝶形天线结构的设计

本设计所提出的介质埋藏平面蝶形天线采用印刷电路工艺,天线的两振子分别印刷在介质板的两侧。如图 1 所示,介质板采用 FR4,其相对介电常数 $\epsilon_r=4.4$,厚度为 $h=1.6\text{ mm}$,介质板上下两个表面铜箔厚度为 0.018 mm ,天线的长度为 L ,宽度为 W 。使用了渐变的微带三角形巴伦实现了天线的平衡馈电。不平衡端的微带线宽为 W_2 ,不平衡端接地面宽 W_1 ;平衡端的微带线宽 W_3 ;巴伦三角形侧边长为 L_2 ,底边长为 L_1 ;平行双线长为 L_3 ;渐变传输线长为 L_4 。最后,用介质把平面蝶形天线的上下表面和馈电巴伦全部埋藏起来,即构成介质埋藏平面蝶形天线。

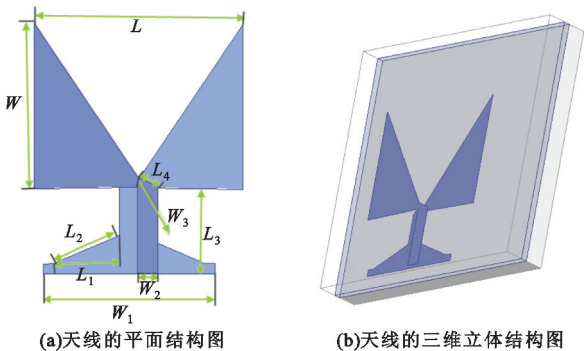


图 1 介质埋藏平面蝶形天线的结构图
Fig. 1 The structure of dielectric embedded planar bow-tie antenna

2.2 天线各主要参数的计算与优化

本文要设计的天线工作频率是 $f_0=3\text{ GHz}$,工作频段是 $1.42\sim4.08\text{ GHz}$,介质基板采用的是 $h=$

1.6 mm 的 FR4 的双面覆铜板,其相对介电常数 ϵ_r 是 4.4。

2.2.1 天线参数的计算与优化

根据介质基板的相关参数,厚度不平衡端 SMA 接头处微带线宽度为 $W_2=3.08\text{ mm}$,由文献[3]和文献[8]可知,其有效的介电常数为

$$\epsilon_{\text{eff}}=\frac{1+\epsilon_r}{2}+\frac{\epsilon_r-1}{2}\left(1+\frac{10h}{W_2}\right)^{-\frac{1}{2}}。 \tag{1}$$

由文献[2]可知,天线的有效电长度约等于天线谐振时对应工作波长的一半,即

$$L=\frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \tag{2}$$

而天线的宽度 W 则由天线每边的张角 θ 决定,天线的宽度随着 θ 的变化而变化,而 θ 的选取必须考虑天线的小型化和天线的阻抗带宽,一般由工程经验可以取为 60° ^[2]。最后,由 HFSS 的参数扫描和优化分析给出 $L=34.46\text{ mm}$, $W=27.5\text{ mm}$ 。

2.2.2 馈电结构的设计以及参数的计算与优化

如果直接采用微带线馈电,蝶形天线馈电点的阻抗一般是 $100\text{ }\Omega$ 以上,由经验公式 $Z_L=120\text{Incot}\frac{\theta}{4}$ 可以估算出来^[2],这样很难和特性阻抗为 $50\text{ }\Omega$ 的 SMA 接头匹配。为了解决这个问题,引入了传输线和渐变的三角形微带巴伦给平面蝶形天线平衡馈电。这里的巴伦有两个作用,一是实现不平衡到平衡的转换,二是实现了阻抗变换。该馈电结构包括两层,上层不平衡端微带线宽 W_2 经过平行双线 L_3 和渐变传输线 L_4 的变换转化为平衡端的微带线宽 W_3 ,下层不平衡端接地面宽 W_1 经过渐变的微带三角形巴伦变为平衡端的微带线宽 W_3 。通过调节传输线的长度和渐变三角形微带巴伦的大小可以改变馈电面的输入阻抗,达到 $50\text{ }\Omega$ 阻抗匹配的目的。由相关微带线宽 W_2 、 W_3 、 W_1 和微带线的特性阻抗是 $Z_0=50\text{ }\Omega$ 、直接馈电点的阻抗 Z_L 及天线的输入阻抗 Z_{in} (一般要求匹配到 $50\text{ }\Omega$),根据传输线的阻抗方程^[9]可求出渐变传输线的长度 L_4 :

$$Z_{\text{in}}=Z_0\frac{Z_L+jZ_0\tan\frac{2\pi L_4}{\lambda}}{Z_0+jZ_L\tan\frac{2\pi L_4}{\lambda}}。 \tag{3}$$

经过多次仿真优化计算,最终确定了天线的相关参数和馈电结构的相关参数,如表 1 所示。

表 1 天线的相关参数值

Tab. 1 The relative parameter values of the antenna

mm								
W	L	L_1	L_2	L_3	L_4	W_1	W_2	W_3
27.5	34.46	10.73	11.72	14.3	3.81	28.4	3.08	1.7

2.3 天线埋藏介质的选择

天线各层之间采用胶合剂粘接,也就是用黏合剂把埋藏的介质和天线粘成一个整体。若粘胶选择不合适,电磁波就会经过介质板和粘胶的交界面时会产生反射或者折射,进而影响天线的性能。为了最大程度减小粘接胶对天线的影 响,常采用与介质基板相同的材质的胶粘接。考虑到市面上比较常见的、价格适中的环氧树脂 AB 胶与 FR4 介质板的基本材料相同,并且相对其他板材来说,FR4 板材价格比较便宜,综合考虑设计的需要、设计成本等因素,本设计选择环氧树脂 FR4 作为埋藏介质的选择。

3 实验与天线性能分析

3.1 仿真实验与分析

根据优化得到的参数,利用电磁仿真软件 HFSS 进行建模仿真分析,仿真了介质埋藏平面蝶形天线,并把平面蝶形天线的 S_{11} 曲线和其对 比,如图 2 所示。

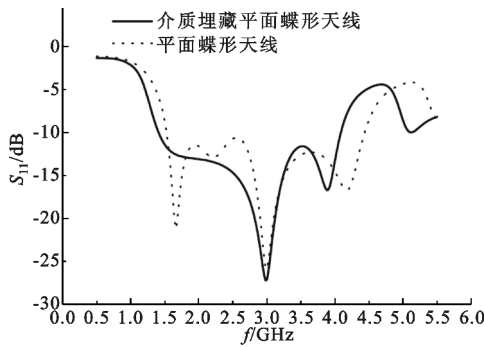
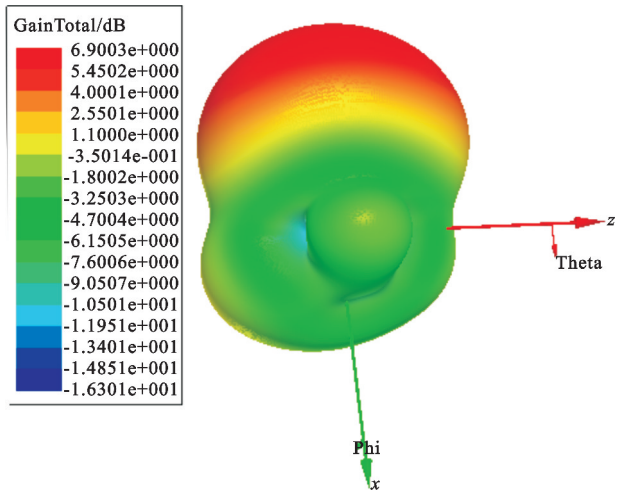


图 2 S_{11} 曲线图
Fig. 2 The curve of S_{11}

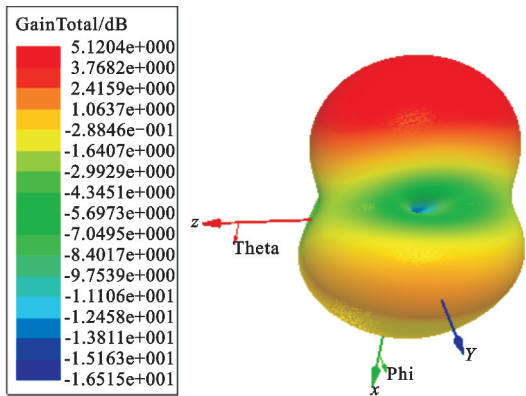
图 2 中,由实线可知,介质埋藏平面蝶形天线在 $f_0=3\text{ GHz}$ 处, $S_{11}=-27.15\text{ dB}$, $S_{11}\leq -10\text{ dB}$ 的带宽为 $1.42\sim4.08\text{ GHz}$,绝对带宽为 2.66 GHz ,相对带宽为 88.7% 。由虚线可知,平面蝶形天线在 $f_0=$

3 GHz 处, $S_{11}=-25.90\text{ dB}$, $S_{11}\leq -10\text{ dB}$ 的频率范围是 $1.54\sim4.42\text{ GHz}$,绝对带宽为 2.88 GHz ,相对带宽为 96% 。虽然介质埋藏平面蝶形天线的带宽比平面蝶形天线的要窄一些,但是所设计的天线仍然具有超宽带特性。

介质埋藏平面蝶形天线的 3D 方向图如图 3 所示,为了方便比较它和平面蝶形天线增益值的差距,这里也给出了平面蝶形天线的三维方向图。



(a) 介质埋藏平面蝶形天线



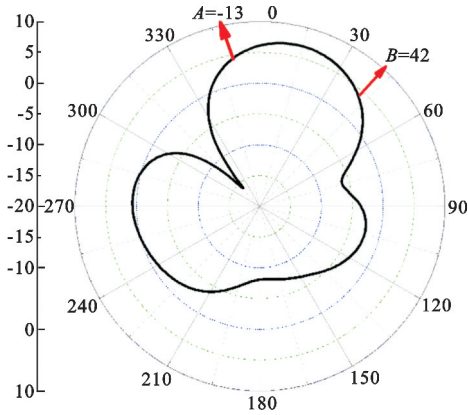
(b) 平面蝶形天线

图 3 3D 方向图
Fig. 3 3D radiation pattern

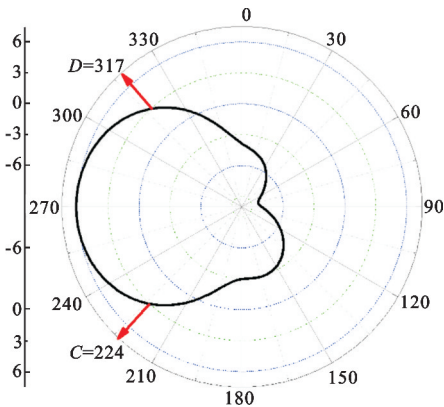
图 3 中,介质埋藏平面蝶形天线的增益为 6.9 dB 而平面蝶形天线的增益只有 5.1 dB ,前者的增益比后者高 1.8 dB 。这是由于引入了介质,起到了压制波束的作用,使得天线的方向性变好,从而有利于提高天线的增益。由电磁场理论可知,从光密向光疏媒质传播的电磁波,在两种媒质交界面的入射角大于临界角时,就会发生全反射。本文采用的介质

介电常数 $\varepsilon_r=4.4$ 大于 ε_0 , 是光密媒质, 只要满足入射角大于临界角的电磁波都被反射回。

介质埋藏平面蝶形天线的 E 面方向图和 H 面方向图、输入阻抗曲线图、驻波比曲线图如图 4 ~ 6 所示。



(a) E 面方向图



(b) H 面方向图

图 4 E 面和 H 面方向图

Fig. 4 E plane and H plane radiation patterns

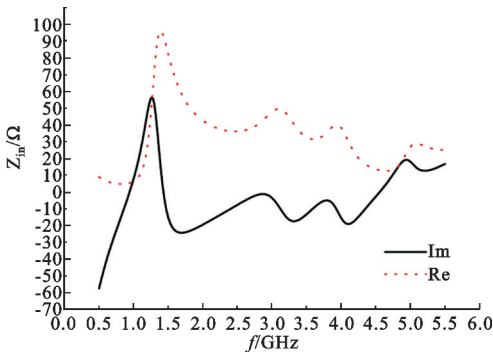


图 5 输入阻抗曲线图

Fig. 5 The curve of input impedance

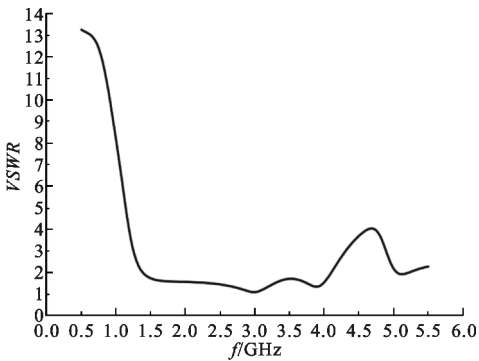


图 6 驻波比曲线图
Fig. 6 The curve of VSWR

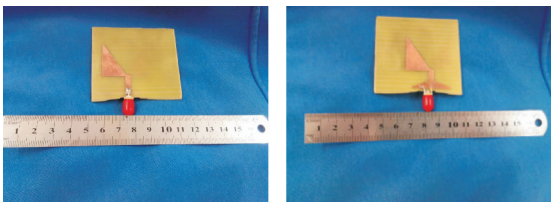
图 4 中, E 面半功率波束宽度为 55° (见图 4(a) 中 A 和 B 两点的角度差), H 面半功率波束宽度为 93° (见图 4(b) C 和 D 两点的角度差)。图 5 中, 在中心频率 3 GHz 处, 输入阻抗的实部为 $47.7\ \Omega$, 虚部为 -3.6 , 相对接近 $50\ \Omega$, 这说明介质埋藏平面蝶形天线和馈线匹配得较好。图 6 中, 介质埋藏平面蝶形天线的驻波比为 1.09, 所设计的介质埋藏平面蝶形天线的驻波性能较好, 可以满足系统的需要。介质埋藏平面蝶形天线的仿真性能参数如表 2 所示。

表 2 天线的仿真性能参数							
Tab. 2 The simulation parameters of antenna							
f_0/GHz	B/GHz	G/dB	VSWR	$\theta_{0.5E}/(^{\circ})$	$\theta_{0.5H}/(^{\circ})$	Re/ Ω	Im
3	2.66	6.9	1.09	55	93	47.7	-3.6

3.2 天线实物制作与性能测试

3.2.1 天线实物制作

综合考虑天线的设计成本和天线的性能, 利用上述仿真优化得到的天线参数, 制作了实物, 如图 7 所示。



(a) 天线的正面 (b) 天线的反面

图 7 介质埋藏平面蝶形天线的实物图
Fig. 7 The physical object of dielectric embedded planar bow-tie antenna

天线包括正反两个面, 印刷在介电常数为 4.4、厚度为 1.6 mm 的 FR4 双面敷铜板上。天线使用微

带的三角形巴伦馈电,有效地实现了不平衡到平衡的转换和阻抗匹配。在上述基础上使用环氧树脂 AB 胶把介质和天线的金属部分粘成一个整体,为了方便粘接,不留过多的缝隙,防止对天线的性能造成影响,这里特意裁剪了一个 SMA 接头的位置,以方便埋藏介质和天线的金属部分很好地粘接。

3.2.2 性能测试与分析

使用 Agilent N5230A 矢量网络分析仪对介质埋藏平面蝶形天线实物的阻抗带宽进行了调试测量,结果如图 8 所示。

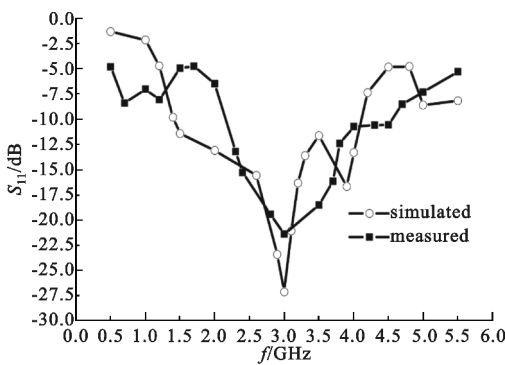


图 8 实测介质埋藏平面蝶形天线 S_{11} 曲线图
Fig.8 The measured curve of S_{11} on dielectric embedded planar bow-tie antenna

图 8 中,天线测试的 S_{11} 最低值谐振点和仿真的吻合较好。仿真数据显示, $S_{11} \leq -10$ dB 的带宽为 1.42 ~ 4.08 GHz,绝对带宽为 2.66 GHz,相对带宽为 88.7%。由实测结果可知, $S_{11} \leq -10$ dB 的带宽为 2.2 ~ 4.58 GHz,绝对带宽为 2.38 GHz,相对带宽为 79.3%。实测结果比仿真结果差,这可能与加工误差和焊接等因素的影响有关,但是都在可接受的范围内。

在微波暗室使用 NSI2000 近场测试系统进行了测量。把天线主波束方向对准发射喇叭天线的馈源,为了固定待测天线,这里使用在一个泡沫开缝的方法,把天线夹在缝中,然后用透明胶把泡沫牢牢地圈在转轴上。由于测试条件的客观性,微波暗室空间有限,转台太大,不能测试到后瓣,只能测试到 180°的范围。但是,由于所设计天线是单向辐射的,天线主要朝主波束方向辐射,而主波束方向是可以被测量到的。天线 3D 方向图、归一化的 E 面方向图和 H 面方向图分别如图 9 和图 10 所示。

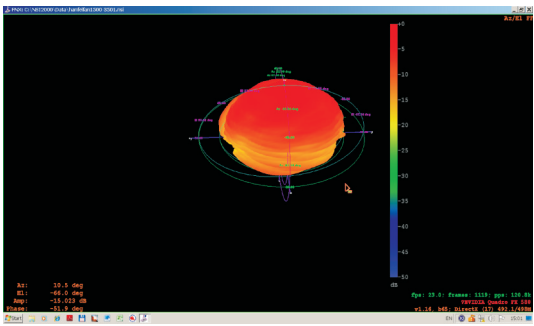
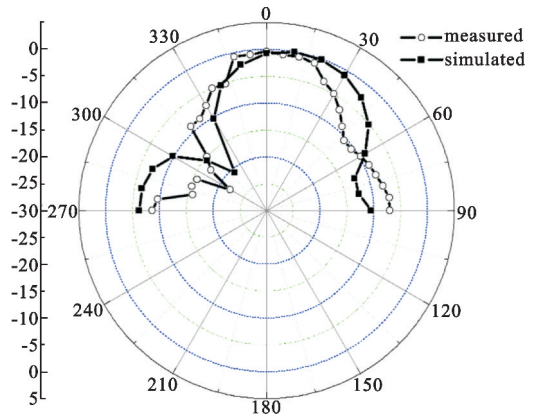
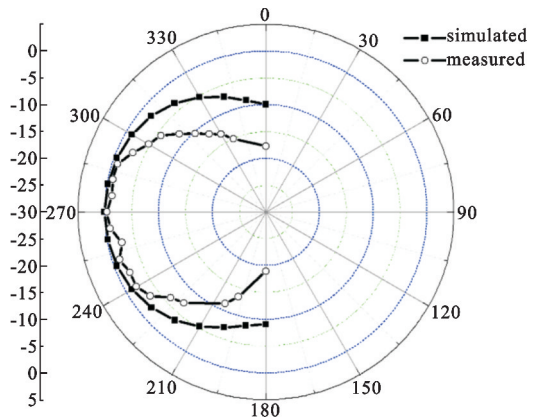


图 9 实测的 3D 方向图
Fig.9 The measured 3D radiation pattern



(a)E 面方向图



(b)H 面方向图

图 10 仿真和实测归一化的 E 面方向图和 H 面方向图
Fig.10 The simulated and measured normalized E and H plane radiation patterns

图 9 中,实测 3D 方向图没有出现裂瓣。图 10 中,实测 E 面和 H 面半功率波束宽度要比仿真的要窄,这可能是和测量过程中无可避免引入的测量误差有关。此外,通过比较法测试了天线的增益,实测增益只有 5.8 dB,比仿真值低 1.1 dB。这可能与固定天线的金属架影响以及测量误差有关,但是天线的整体性能是可以被接受的。实测和仿真性能参数

比较如表 3 所示。

表 3 实测和仿真性能参数比较

Tab.3 The contrast of the performances between simulation and measurement

结果	f_0/GHz	B/GHz	G/dB	$\theta_{0.5\text{E}}/(^{\circ})$	$\theta_{0.5\text{H}}/(^{\circ})$
实测	3	2.35	5.8	38.39	78.84
仿真	3	2.66	6.9	55.00	93.00

4 结 论

本文通过采用介质埋藏方式,设计了一种新型的介质埋藏平面蝶形天线。通过仿真实验和实物测试可以看出,所设计的天线具有宽频带特性,驻波比较低,天线的性能较好。这也为其他特型天线的埋藏设计打下了一定的基础。通过比较埋藏介质和没有埋藏介质的两种类型的天线可以知道,介质埋藏天线具有隐蔽性好、集成度高、性能不容易受环境影响等优点,因此,该天线具有良好的应用价值和广阔的发展前景,但是,其增益相对较低,可以在后续的设计中进行组阵。

参考文献:

[1] QU S W, CHAN C H, XUE Q. Ultra wide band composite cavity-backed folded sectorial bow-tie antenna with stable pattern and high gain[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(8): 2478-2483.

[2] 郭晨, 刘策, 张安学. 探地雷达超宽带背腔蝶形天线设计与实现[J]. 电波科学学报, 2010, 25(2): 221-226. GUO Chen, LIU Chen, ZHANG Anxue. Design and implementation of an UWB bow-tie antenna with back cavity for ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(2): 221-226. (in Chinese)

[3] 王安国, 陈彬, 冷文, 等. 一种小型化五频段可重构蝶形天线的设计[J]. 电波科学学报, 2013, 28(1): 87-91. WANG Anguo, CHEN Bin, LENG Wen, et al. Design of a compact bow-tie antenna with five-band reconfigurable characteristics[J]. Chinese Journal of Radio science 2013, 28(1): 87-91. (in Chinese)

[4] LI T, ZHAI H, WANG X, et al. Frequency-reconfigurable bow-tie antenna for Bluetooth, WiMAX, and WLAN applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14(5): 171-174.

[5] JALILVAND M, LI X, KOWALEWSKI J, et al. Broadband miniaturised bow-tie antenna for 3D microwave tomography[J]. Electronics Letters, 2014, 50(4): 244-246.

[6] OTHMAN M A, BAKAR S A, AZIZ M Z A, et al. Feed lines effects on UWB double sided circular disc bow-tie antenna[C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET). Bandung, Indonesia, Malaysia: IEEE, 2014: 475-478.

[7] 倪国旗, 介质埋藏微带天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012. NI Guoqi. Dielectric embedded microstrip antenna[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)

[8] 倪国旗, 余白平, 梁军. 一种改进型微带贴片八木天线的设计[J]. 电讯技术, 2011, 51(10): 104-108. NI Guoqi, YU Baiping, LIANG Jun. Design of a modified microstrip patch yagi antenna[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(10): 104-108. (in Chinese)

[9] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011. LIAO Chengen. Foundations for microwave techniques[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2011. (in Chinese)

作者简介:



倪国旗(1964—),男,湖北人,2008 年于北京理工大学获博士学位,现为教授、硕士生导师,主要研究方向为微波技术与天线、微波器件与材料;

NI Guoqi was born in Hubei Province, in 1964. He received the Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2008. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns microwave technology and antenna, microwave devices and material.

Email: ngq157@163.com

韩非凡(1988—),男,广东人,2013 年于电子科技大学中山学院获学士学位,现为桂林电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为天线技术;

HAN Feifan was born in Guangdong Province, in 1988. He received the B. S. degree from Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China, in 2013. He is now a graduate student. His research concerns antenna technology.

Email: 1302202008@mails.guet.edu.cn

张昱凯(1991—),男,山西人,2014 年于桂林电子科技大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为微带天线。

ZHANG Yukai was born in Shanxi Province, in 1991. He received the B. S. degree from Guilin University of Electronic Technology in 2014. He is now a graduate student. His research concerns microstrip antenna.

Email: 646945467@qq.com