

宽带微带天线阵的研究与设计

邱 玲 姚振东 刘语嫣

(成都信息工程大学 成都 610225)

摘 要: 微带天线具有轻的重量、较小的体积及散射截面等特点,可设计为无线电高度表的天线。采用组阵的方式把矩形贴片单元组成宽频带,高增益的阵列天线,增加基板厚度扩展频带,良好的多枝节阻抗匹配获得较大增益。应用此结构设计四元微带天线阵,中心频率为 4.3 GHz,带宽 $BW > 200$ MHz,采用等幅并联馈电的方式,通过 HFSS 进行仿真优化,仿真结果显示驻波比小于 2,最大增益为 11.3 dB,3 dB 波束宽度约为 46° 。实测结果为:驻波比小于 2 频带扩展到 4.08~4.52 GHz,最大增益为 10.33 dB,达到设计要求。该天线阵简单的结构,良好的特性可运用到小型飞行器高度表系统中。

关键词: 宽频带;天线阵;高增益;高度表

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research and design of broadband micro-strip antenna array

Qiu Ling Yao Zhendong Liu Yuyan

(Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The micro-strip antenna has the advantages of small size, light weight and low profile, can be designed as a radio altimeter antenna. The rectangular patches are composed of broadband and high gain antenna array, using the way of arraying. The increasing of the substrate thickness expand band and multi section impedance obtain large gains. This structure is applied to design the four element micro-strip antenna array. The center frequency is 4.3 GHz, the bandwidth is more than 200 MHz, the method of equal amplitude parallel feed is adopted. According to HFSS the simulation results show that the maximum gain is 11.3 dB, the VSWR is less than 2, and the 3 dB beam width is about 46 degrees. The bandwidth is expanded to 4.08~4.52 GHz, and the maximum gain is 10.33 dB. The structure of the antenna array is simple, and its good characteristics can be applied to the small aircraft altimeter system.

Keywords: broadband; antenna array; high gain; altimeter

1 引 言

无线电高度表是测量飞机到地面垂直距离用的机载无线电设备,是重要的飞行器仪表之一。由于其具有体积小、精度高等优势,广泛应用于各种民用以及军用、有人以及无人飞行器^[1]。它是用于测量飞机离开地面的实际高度,提供预定高度和决断高度的声音和光信号,测高数据为安全飞行提供保障,是飞行器起飞/着陆阶段保证飞行安全的重要设备^[2]。无线电高度表需要天线来进行测高信号的收发。对于小型化的飞行器而言,其天线也应具有低成本,高宽带,体积小等特点。微带天线具有结构紧凑、剖面低、容易制造等优点,非常适合与飞行器进行共行,能满足无线电高度表小型化等要求,因此成为无线电高度表常采用的天线。

因此提出通过增大基板的厚度增加天线的带宽,采用

2×2 的微带贴片矩形天线阵,在单元阵之间进行多枝节阻抗匹配,采用同轴馈电方式设计出一款体积为 $85 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 适用于 $4.3 \text{ GHz} \pm 100 \text{ MHz}$ 频带无线电高度表微带天线。

2 微带天线阵的设计

2.1 微带单元阵的设计

微带贴片天线是有介质基片、基片表面是可以导电的贴片和基片的底面是地板组成的。导电贴片可以是任意几何形状,其中矩形、圆形是最常用的形式。在相同的工作频段,矩形贴片的波瓣宽度比圆形天线的宽,两种天线方向系数几乎相同,但圆形天线的效率比矩形天线低。矩形贴片天线的带宽特性也比圆形天线的好。因此选取矩形贴片为辐射单元,辐射基本上由贴片的边缘场引起,在垂直于矩

形贴片的方向产生最大辐射,这正符合无线电高度表天线的发射和接收垂直方向电磁波的要求^[3]。

微带天线缺陷之一就是频带较窄,因此拓展微带天线的带宽是至关重要的。天线的带宽定义为:

$$BW = (VSWR - 1)/Q \sqrt{VSWR} \quad (1)$$

VSWR 为输入端的电压驻波系数,品质因素 Q 包含表面波辐射 $Q_{\text{表面波}}$ 和空间波辐射 Q_R ,通常假定 Q 约等于 Q_R :

$$Q = Q_R = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r}}{4h} \quad (2)$$

基板厚度与带宽的关系为:

$$BW = 4f^2 \frac{h}{1/32} \quad (3)$$

拓宽频带的基本方法是降低等效谐振电路的 Q 值,即降低基板的相对介电常数,增大介质基板厚度 h ,增大矩形贴片宽度 w 与长度 L 的比值以及多枝节的微带线匹配等。本设计采用多枝节的微带线阻抗匹配技术以及增大基板厚度来增加带宽,并选取介电常数较低,正切损耗很小的材料^[4]。

微带天线用基板材料应从介电常数和损耗较低的聚四氟乙烯(PTFE)、聚苯醚(PPE)氰酸酯(CE)等复合性结构材料选取。通过对比,聚四氟乙烯的正切损耗为 0.001~0.004,是以上几种材料中最低的,介电常数为 2.65,一致性好,化学性质稳定、并且价格适中,选取正切损耗以及介电常数小的聚四氟乙烯作为基板材料不仅可获得较高的增益,也拓宽了频带。

在 $BW=200$ MHz 情况下,选取 $\epsilon_r=2.65$ 的 F4B-2(聚四氟乙烯)作为基板材料,选取较厚的基板厚度 $h=3$ mm 以达到拓宽带宽的目的,与一般的微带天线相比较,此时天线的带宽扩大了 6 倍左右。

$h=3$ mm, $f=4.3$ GHz,因此矩形贴片宽度 w 为:

$$w = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (4)$$

通过式(2)~(4)计算贴片宽度 $w=23.8$ mm。

单个辐射单元的宽度不仅影响着整个天线的体积,也决定着辐射电阻以及辐射功率。

贴片的长度一般取 $\lambda_e/2$;这里 λ_e 是介质内的导波波长,即为:

$$\lambda_e = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_e}} \quad (5)$$

矩形贴片的长度 L 为:

$$L = \frac{C}{f \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L \quad (6)$$

式中: ϵ_e 是有效介电常数, ΔL 是等效辐射缝隙长度,可由式(7)、(8)求出:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3)(w/h + 0.246)}{(\epsilon_e - 0.258)(w/h + 0.8)} \quad (7)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-0.5} \quad (8)$$

由以上公式可得 $L=19$ mm^[4]。

2.2 馈电方式与阻抗匹配

微带天线只在介质基板一面有辐射单元,因此常用到是同轴馈电和微带馈电,分别称为背馈和侧馈,天线输入阻抗与 50Ω 传输线进行阻抗匹配。侧馈时,通过测量输入阻抗设计匹配阻抗器,在天线与馈线间接入匹配阻抗器,由微带线构成的匹配阻抗器不仅增加贴片的面积,也不利于天线展宽频带。而背馈采用的同轴电缆位于贴片单元的背面,减少了电缆对天线辐射的干扰。其次,不需要匹配阻抗器,馈电点的位置可以选取辐射单元的任意位置,因此在频带宽度要求较宽时采用背馈是较合适的。

微带线中心是同轴电缆,如图 1 所示,中心点左右阻抗匹配结构相同,特征阻抗 Z_0 为 50Ω ,连接二等分功分器,特征阻抗为 $\sqrt{2}Z_0 \approx 71 \Omega$,用软件 ADS 计算可得, 71Ω 特征阻抗对应的微带线宽度为 4.7 mm,优化仿真 5 mm 为最佳。T 型头的特征阻抗为 130Ω ,对应微带线宽度为 1.1 mm,微带贴片天线的边缘阻抗取为 190Ω ,对应的宽度为 0.4 mm^[5]。由于微带天线的阻抗带宽会限制其工作频带,因此采用如图 1 所示的多枝节阻抗匹配,可使带宽增大,并获得较高的增益^[5]。

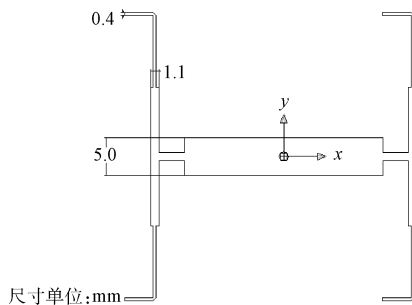


图 1 天线阵阻抗匹配

2.3 天线阵的设计

为减少对无线电高度表的影响并提高天线增益,如图 2 所示天线的辐射单元设计为四元天线阵,采用等幅同向并联馈电网络,单元天线的辐射方向相同,增加了天线的辐射强度,提高了天线的增益。

通过功率分配器,以同轴馈电点为信号输入端,将输入功率一分为二,功分器每端两个阵元,如图 2 所示。

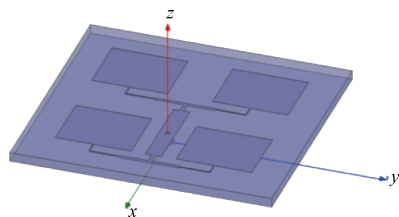


图 2 四元天线阵

阵元间的间距选取也是非常关键,贴片间距 d 一般在

$0.5\lambda_0 \sim \lambda_0$ 。 d 在此范围既控制了俯仰面的波束宽度,也抑制 E 平面不出现栅瓣^[6]。

3 优化仿真分析及测试结果

3.1 天线阵的仿真优化

天线单元和匹配网络的尺寸已确定,而天线方向图的主波瓣方位和波瓣个数由阵元间距 d 决定,仿真的重点找出合适的阵元间距 d 。 d 的范围为 $0.5\lambda_0 \sim \lambda_0$,当 $f = 4.3\text{ GHz}$ 时, $0.5\lambda_0 \approx 35\text{ mm}$ 。 d 的范围选取 $30 \sim 40\text{ mm}$,步进为 1 mm ,进行参数扫描。扫描最终结果是间距 $d = 0.55\lambda_0 = 38\text{ mm}$,增益最大为 11.4 dB ^[7]。

3.2 S 参数以及驻波

$f = 4.3\text{ GHz}$, $S_{11} \approx -16.8\text{ dB}$,达到了设计所要求的 -10 dB 。如图 4 所示在整个频带范围驻波比 < 2 。

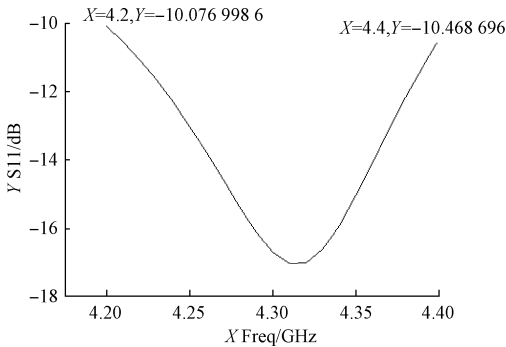


图 3 S11 曲线

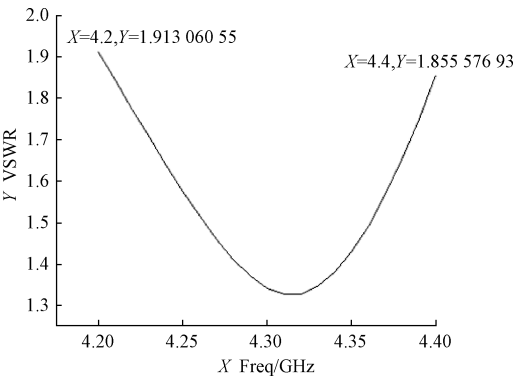


图 4 驻波比

3.3 方向图和增益

图 5 为天线方向图,在 $\varphi = 0^\circ$ 的平面上,辐射方向性是由天线单元本身的方向性决定的,由于贴片本身的辐射方向性不强,因此天线阵这平面的方向性比较弱^[7]。在 $\varphi = 90^\circ$ 的平面上,天线的方向性比较明显,主瓣比较突出,在垂直于单元贴片的方向,为阵元的最大辐射方向,多个阵元辐射同相叠加,此时天线阵的辐射最强,图 6 为天线的立体方向图,由于在垂直于贴片表面的方向上为最大辐射方向,天线辐射主要集中在 Z 方向上。天线阵由于是等幅同相

馈电,阵元的最大辐射方向均在 Z 方向上,最大增益约为 11.43 dB ^[8-9]。

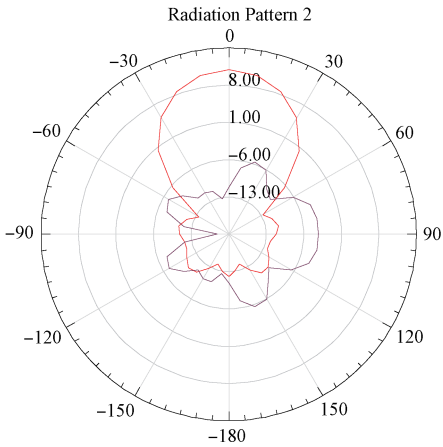


图 5 天线的平面方向

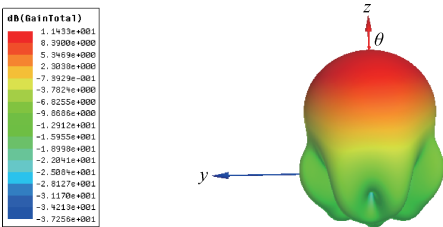


图 6 天线的三维方向

从图 7 可看出,在 $\theta = -4^\circ, \varphi = -0^\circ$ 方向上,出现天线阵的最大增益点 $G = 11.37\text{ dB}$,稍微偏离了 Z 方向,这是由于天线的匹配网络作为辐射单元进行辐射的结果,影响了天线阵的辐射。最大增益基本在 $\theta = \pm 4^\circ$ 之间,在范围之外,增益迅速下降,在 $\theta > 90^\circ$ 到 $\theta < -90^\circ$ 之间,几乎没有辐射,这是由矩形贴片本身的辐射特性决定的^[10]。

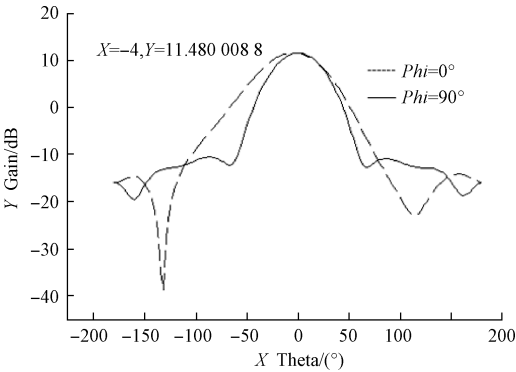


图 7 天线增益曲线

3.4 波瓣宽度

1) $d = 0.5\lambda_0$ 时如图 8 所示, E 面半功率波束宽度 $2\theta_E = 47^\circ$,增益 $G = 11.3\text{ dB}$ 。

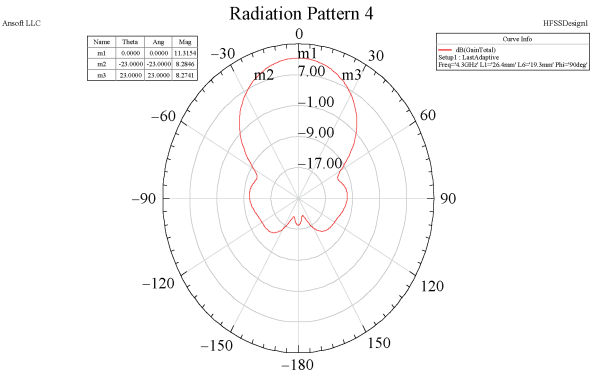


图 8 E 面方向

2) $d = 0.55\lambda_0$ 时如图 9 所示, E 面半功率波束宽度 $2\theta_E = 46^\circ$, 增益 $G = 11.9$ dB。

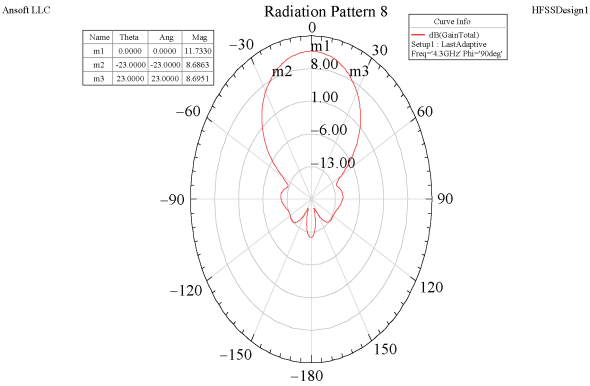


图 9 E 面方向

随着 d 增大, E 面波束宽度略微变窄, 增益有所提高, 但是方向图的旁瓣电平增大, 根据题目要求 $d = 0.55\lambda_0 = 38$ mm, 此时方向图的主瓣较大, 而旁瓣较小, 且增益也较高^[11]。

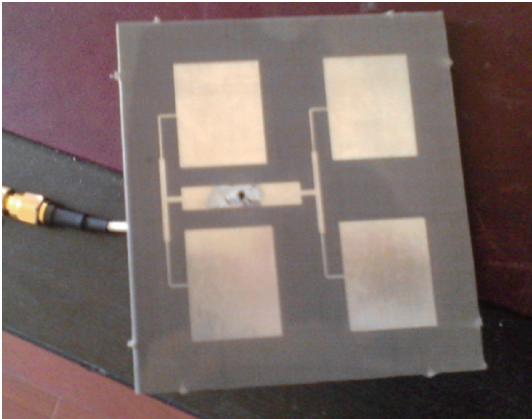


图 10 实物

3.5 天线测试

中心频率偏大, 约为 4.5 GHz, 中心频率的大小与

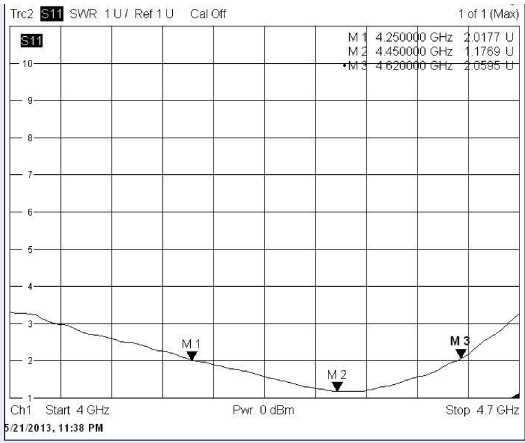


图 11 驻波测试结果

辐射贴片的长度成反比, 通过对辐射单元贴铜片, 对实物图进行改进, 增加辐射贴片的长度减小中心频率至 4.3 GHz。改进后的实物图, 如图 12 所示, 测试结果如图 13 所示。

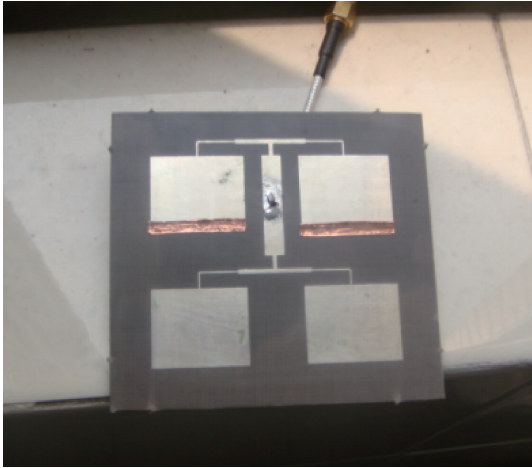


图 12 改进后实物

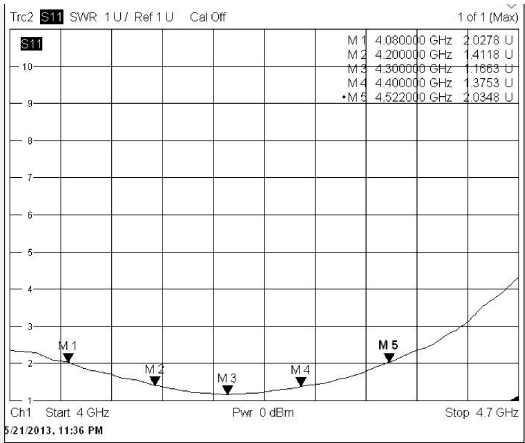


图 13 改进后驻波测试结果

中心频率为 4.3 GHz,且在 4.2~4.4 GHz 频带范围,驻波比小于 2。频带也扩展到 4.08~4.52 GHz,此时天线阵的相对带宽为 11%,展宽了频带宽度,达到设计要求。

3.6 增益的测试结果

采用比较法测试天线增益,选取增益为 11.4 dB 的标准增益天线,如图 14 所示,首先测得标准增益天线的接收功率-51.98 dBm。

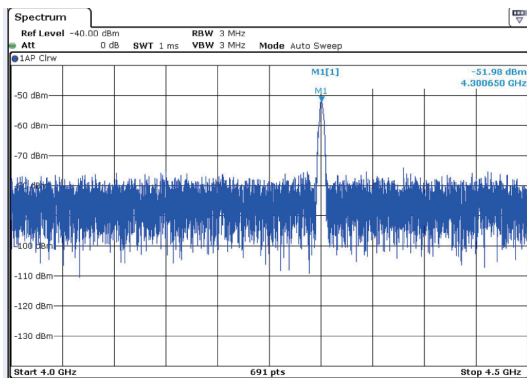


图 14 标准增益天线的接收功率

发射天线不变,将接收天线变为待测天线,此时测得接收功率为-53.05 dBm,如图 15 所示。

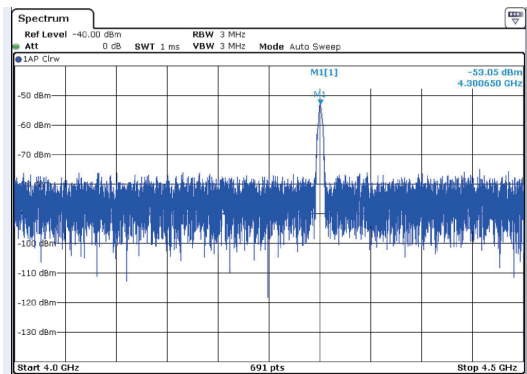


图 15 待测天线的接收功率

根据待测天线与标准天线之间关系: $G_x(\text{dB}) = G_s(\text{dB}) + 10\log P_{rx} - 10\log P_{sx}$ 可得天线的增益 $(11.4 - 53.05 + 51.98) = 10.33 \text{ dB}$,达到设计要求^[12]。

4 结 论

本文设计了一种四元微带天线阵,具有良好的增益特性和宽频带特性,并且体积较小,便于加工。根据测试结果, VSWR < 2, 天线线阵的相对带宽为 11%, 增益为 10.33 dB, 达到题目宽频带高增益要求。可应用 4.3 GHz

频段的无线电高度表系统^[10]。微带天线阵具有结构简单,高增益,宽频带,且制作方便等优点,在发展迅速的无线通信领域可得到广泛的应用。

参考文献

- [1] 丁轲佳,熊小军,贺斐,等. 新型双层结构小型化无线电高度表天线[J]. 北京航空航天大学, 2013, 34(2): 59-60.
- [2] 邸亚洲,周玉平,袁涛,等. 无线电高度表综合检查仪的设计[J]. 测控技术, 2014, 33(6): 5-6.
- [3] 李迎松,杨晓冬,刘乘源,等. 共面波导馈电的超宽带天线研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(9): 819-821.
- [4] 张宁,张霞. 基于通信卫星的非对称圆环毫米波微带天线[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(6): 79-80.
- [5] 姚远. 宽带天线与天线阵列[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2012: 73-80.
- [6] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2011: 260-290.
- [7] 陈立波,谢亚楠,谭子苗,等. 频率可重构超宽带天线[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 7-11.
- [8] 严冬,汪朋,李帅永,等. 2.45 GHz 印刷倒 F 天线的研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2376-2378.
- [9] 杨晓宇. 一种高增益微带天线阵的设计[D]. 长春:吉林大学, 2009: 30-43.
- [10] 惠鹏飞,夏颖,周喜权,等. 基于 HFSS 的 4×24 微带阵列天线的研究与设计[J]. 齐齐哈尔大学学报:自然科学版, 2010, 26(5): 10-14.
- [11] 成东林,王安国,冷文. 一种具有双频段的新分集微带天线设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(7): 19-21.
- [12] ALLIES L, BLAMPAIN E, M'JAHED H, et al. Modeling of wireless SAW temperature sensor and associated antenna[J]. Instrumentation, 2014(6): 008-014.

作者简介

邱玲, 1989 年出生, 在读研究生, 主要研究方向为气象雷达系统与应用、天线理论与设计。

姚振东, 1964 年出生, 硕士生导师, 主要研究方向为气象雷达系统及其应用、气象探测技术及应用。

刘语嫣, 1991 年出生, 在读研究生, 主要研究方向气象探测技术及应用。

E-mail: onlyqqll@qq.com