

具有紧凑馈电网络的宽带四臂螺旋天线

褚庆昕, 蔺 炜, 林伟鑫, 杜 述

(华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640)

摘 要: 传统的自相移馈电四臂螺旋天线(QHA)由于最小回波损耗频点和最小轴比频点不在一个频率上,因此,难以在较宽的频带内同时满足良好的阻抗匹配和圆极化特性.虽然采用功分相移网络馈电可以解决上述问题,但是馈电网络尺寸普遍较大,难以应用于手持机上.本文提出了一种底部带有紧凑的功分相移馈电网络的四臂螺旋天线,可以在宽频带内实现四个输出端功率平衡输出,相位两两相差 90 度.所提出的馈电网络使得四臂螺旋天线既可以实现宽带圆极化辐射,又具有小尺寸,非常适合 GPS、北斗移动手持设备的应用需求.

关键词: 圆极化天线; 四臂螺旋天线; 功分相移馈电网络; 宽带; 移动手持设备

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)04-0722-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.04.016

Broadband Quadrifilar Helix Antenna with Compact Feeding Network

CHU Qing-xin, LIN Wei, LIN Wei-xin, DU Shu

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: Conventional self-phasing method is difficult to achieve excellent impedance matching and circularly polarized (CP) radiation simultaneously over a wide band in quadrifilar helix antenna (QHA) designs. This is because the lowest points of return loss and axial ratio cannot match. Although QHA with additional feeding network can solve the problem above, the size is too large to be used in handset applications. In this paper, we proposed a QHA attached a compact feeding network on its bottom end to achieve balanced power division and quadrature phasing in a wide bandwidth. QHA with the proposed feeding network could achieve broadband CP radiation. Moreover, the configuration is compact and very suitable for GPS/CNSS portable mobile handset applications.

Key words: circularly polarized antenna; quadrifilar helix antenna; feeding network; broadband; mobile handset

1 引言

全球卫星定位系统 GPS 自广泛商用以来得到了迅速的发展.与此同时,我国的北斗卫星导航系统也初具规模.作为北斗系统手持终端设备,接收卫星信号的天线十分重要.该系统要求天线具有圆极化辐射,带宽宽,波瓣宽度宽,结构紧凑等特点.谐振式四臂螺旋天线因结构紧凑,具有心形辐射方向图以及良好的前后比,被广泛用于 GPS、北斗以及其他的无线通讯系统中^[1,2].传统的四臂螺旋天线(QHA)是由两个相互正交放置的双臂螺旋天线(BHA)组成的.每个双臂螺旋天线可以看成是一个全波长的环天线.为了实现圆极化辐射,两个双臂螺旋天线需要用等振幅,相位相差 90°的信号馈电.传统的自相移方法实现圆极化辐射是通过设计调节两个双臂螺旋天线的谐振频率稍微偏离它们各自的中心频率,其中一个双臂螺旋天线长度稍长于谐振长度从而使其

输入阻抗产生一个 +45°的相位;而另一个双臂螺旋天线长度稍短于谐振长度从而使其输入阻抗产生一个 -45°的相位,最终使得两个双臂螺旋天线上的相位相差 90°.自相移方法由于结构紧凑很适合用于 GPS 移动手持设备中.然而,在自相移模式中,轴比跟回波损耗的最低点不能在中心频率上吻合.当轴比的最低点设计到了中心频率处,回波损耗却不是很理想,反之亦然.因此,自相移阻抗轴比带宽非常窄,很难实现宽带的圆极化辐射,并不能满足 GPS、北斗等系统应用的要求^[3~5].

实现四臂螺旋天线的宽带特性取决于外加的功分相移馈电网络.为了实现良好阻抗匹配与宽带圆极化特性,文献^[6~9]提出的功分馈电网络可以实现四个输出端口等振幅,相位两两相差 90°,作为螺旋天线的馈电网络,但是天线尺寸均较大,无法用于移动手持设备.为了减小体积,使用一种半集总元件加载可以实现宽带圆极化辐射,使得在中心频率 2.0GHz 处天线面积减小了

50%^[10].但是由于有集总元件加载这种结构不适合用于高频.

本文提出了一种采用紧凑功分相移网络馈电的四臂螺旋天线.所提出的功分相移网络能够实现四个端口输出等振幅、相位两两相差 90°的信号.整个天线结构紧凑,并且有很宽的阻抗带宽以及轴比带宽,非常适合于 GPS、北斗等移动手持设备.

2 四臂螺旋天线三种馈电方法

2.1 自相移方法

图 1 是一款介质加载的采用自相移方法馈电的半波长四臂螺旋天线.天线的直径 D 和轴长 H 依据文献 [11]设计.天线使用同轴线进行馈电,下部的巴伦起到了平衡馈电的作用.天线辐射部分由两个正交放置的全波长天线组成.天线之间 90°的相位差是通过设计两个双臂螺旋的谐振频率稍稍偏离天线中心频率来实现的.其中一个双臂螺旋高于天线中心频率,另一个低于天线中心频率,从而产生两付天线上 90°的电流相位差.图 2 显示了自相移四臂螺旋天线的回波损耗以及轴比曲线,在中心频率 2.1GHz 处,轴比达到了最低点,但是回波损耗却不是最小,带宽很窄.

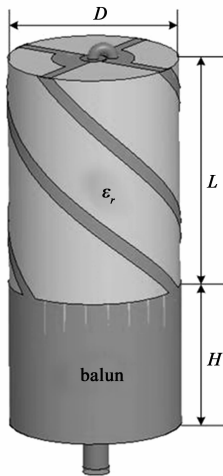


图 1 采用自相移馈电四臂螺旋天线,参数如下: $\epsilon_r=2.2, D=20\text{ mm}, L=43\text{ mm}$,以及 $H=25\text{ mm}$

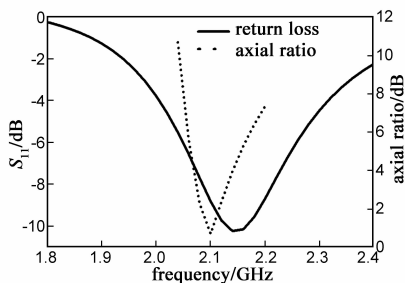


图 2 回波损耗跟轴比曲线(自相移馈电)

2.2 加载没有相移的馈电网络

图 3 是外加输出没有相移的功分馈电网络四臂螺旋

天线.除了去掉巴伦结构外,其余的参数跟上一节中介绍的天线一样.圆极化特性依然是由自相移实现.输入端馈电网络是由端口 0,两个 Wilkinson 功分器以及四个输出端口组成.端口 0 是由特性阻抗为 Z_1 的平行双线形成.两个 Wilkinson 功分器的特性阻抗为 Z_2 .四个输出端口分别为端口 1,2,3 和 4,如图 4 所示.输入端馈电结构采用平行双线实现反向激励,两个功分器实现平衡输出.因为 θ_1 和 θ_2 的电长度相等,以及对称结构,端口 1 跟 3,端口 2 跟 4 之间的相位都相差 180°.图 5 显示了采用上述馈电网络馈电的四臂螺旋天线的回波损耗以及轴比曲线.可以看出,天线的回波损耗跟轴比的最低点不重合,阻抗跟轴比带宽依然很窄.馈电网络的特性阻抗为 $Z_1 = 50\Omega, Z_2 = 25\Omega, Z_3 = 35.4\Omega, Z_4 = 25\Omega$,以及 $R = 50\Omega$.详细的特性阻抗设计过程在第三部论述.

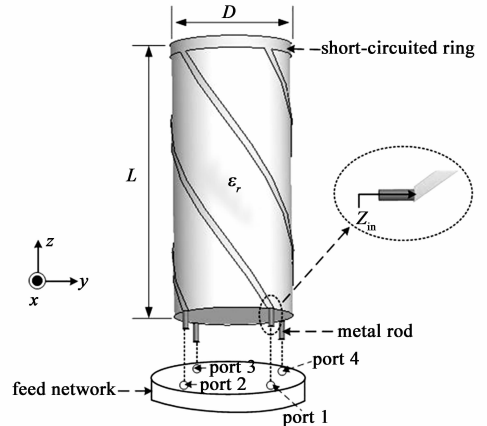


图 3 带馈电网络的四臂螺旋天线

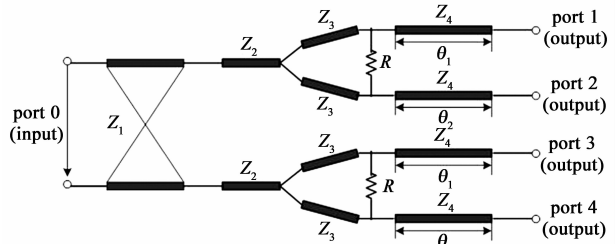


图 4 馈电网络的等效电路

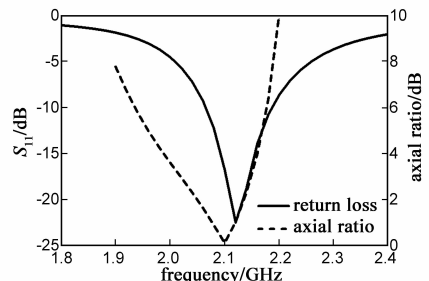


图 5 采用没有相移的功分馈电网络后的回波损耗以及轴比曲线

2.3 带 90°相移的功分馈电网络

上述两种馈电方式都有同样的缺陷,就是带宽很窄以及回波损耗与轴比曲线的最低点不能重合.最根本的原因就是自相移馈电,因此,为了实现宽带圆极

化,需要引入输出相位差两两相差 90° 的功分馈电网络,使得螺旋结构对称,两个双臂螺旋均可以在中心频率上谐振.基于图 4 的功分馈电网络,如果调节两个功分器输出端传输线 θ_1 和 θ_2 的电长度相差 90° ,就可以得到新型的 90° 相移的功分馈电网络.因为输出端口 1 跟端口 3 的相位分别滞后端口 2 跟端口 4 的相位 90° ,以及端口 1 跟端口 3,端口 2 跟端口 4 之间的相位均相差 180° ,从而实现四个端口之间相位两两相差 90° ,满足四臂螺旋天线馈电输入端的相位要求.

图 6 显示了采用该功分馈电网络的四臂螺旋天线的回波损耗以及轴比曲线.很显然,采用新型相位两两相差 90° 的功分馈电网络的四臂螺旋天线显示了良好的阻抗以及轴比带宽.

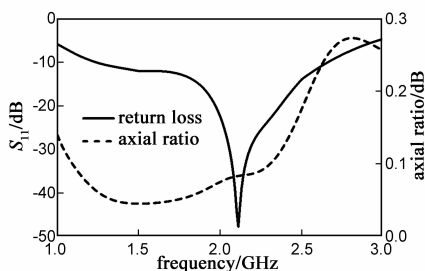


图6 采用带相移的功分馈电网络后的回波损耗以及轴比曲线

3 紧凑的功分相移网络

图 7 是本设计中新型功分相移网络的模型图.两条平行双线跟两个 Wilkinson 功分器分别对称地印制在两个介质基片上,背靠背放置共用一个金属地板.注意到在平行双线的输入端地板被去掉.上下两个功分器的结构参数半径 r ,厚度 h 以及相对介电常数 ϵ_r 都相同.功分馈电网络由同轴线进行激励,同轴线的内外导体分别连接平行双线的上下输入端.为了减小功分器的体积,对传输线进行了弯折.由于功分器两个输出端长

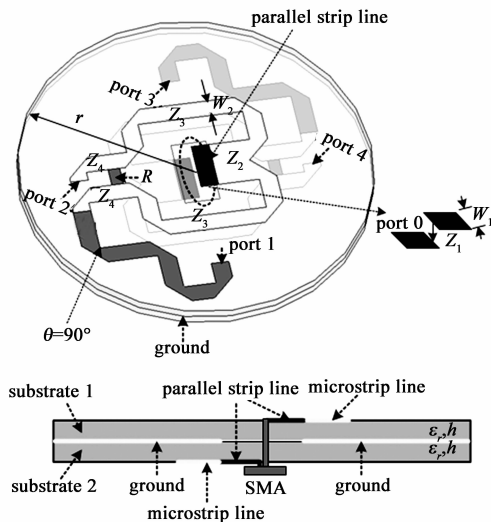


图7 新型功分馈电网络结构

度相差四分之一波长, θ_1 跟 θ_2 的电长度相差 90° .功分器的两个输出端口 1 跟端口 2 位于上面的介质基片上,另外两个输出端口 3 跟端口 4 位于下面的介质基片上.通过选择合适介电常数的介质基片进行设计,馈电网络可以与四臂螺旋相匹配,形成紧凑的功分相移网络.

平行双线的特性阻抗 Z_1 和微带传输线的特性阻抗 Z_2 满足如下公式

$$Z_1 = 2Z_2 \quad (1)$$

通常 Z_1 等于 50Ω 从而 Z_2 等于 25Ω .为了实现阻抗匹配, Wilkinson 功分器的特性阻抗满足如下公式

$$Z_3^2 = 2Z_2Z_4 \quad (2)$$

为了得到 Z_4 的特性阻抗,需要知道天线四个螺旋线的输入阻抗.假设四臂螺旋天线四个端口由等振幅,两位两两相差 90° 的信号激励,四个信号如下表示 $E_1 = e^{-j\pi/2}$, $E_2 = e^0$, $E_3 = e^{j\pi/2}$, 以及 $E_4 = e^{j\pi}$.在端口 p ($p = 1, \dots, 4$) 处的输入阻抗可以由式(3)^[12]来表示:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \sum_{i=1}^4 \frac{E_i S_{pi}}{E_p}}{1 - \sum_{i=1}^4 \frac{E_i S_{pi}}{E_p}} \quad (3)$$

其中 Z_0 表示负载阻抗.

知道了输入阻抗 Z_{in} ,在中心频率处 Z_4 的特性阻抗可以由式(4)计算:

$$Z_4 = \text{Re}\{Z_{in}(f_0)\} \quad (4)$$

其中 Re 表示输入阻抗 Z_{in} 的实部.在本设计中,如果把 Z_{in} 的实部设计为 50Ω ,天线可以实现很宽的阻抗跟轴比带宽,在下一节将会看到.因此,功分馈电网络的特性阻抗分别为: $Z_2 = 25\Omega$ 以及 $Z_1 = Z_3 = Z_4 = 50\Omega$ 对应微带线宽度 W_1 以及 W_2 .其结构参数分别为: $r = 13\text{mm}$, $h = 0.8\text{mm}$, $\epsilon_r = 4.4$, $W_1 = 4.17\text{mm}$, 以及 $W_2 = 1.52\text{mm}$.

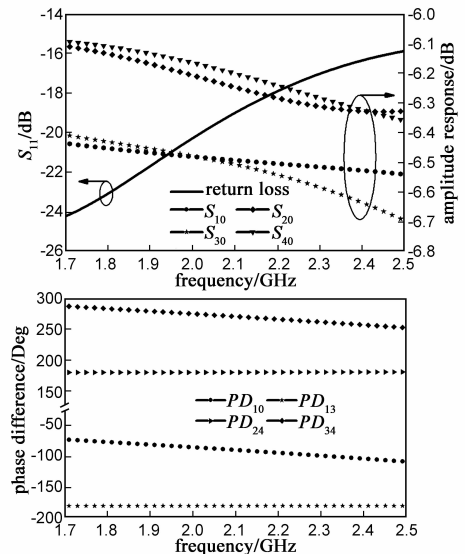


图8 功分器输出响应以及传输响应

图 8 分别显示了仿真的功分器端口的振幅跟相位响应。可以看出,输入端口的阻抗匹配非常好,四个输出端口的传输响应 S_{10} , S_{20} , S_{30} 以及 S_{40} 的变化范围很小,从 6.1dB 到 6.7dB。功分器四个端口的相位差在 1.7GHz 到 2.5GHz 的范围内为 $90^\circ \pm 10^\circ$,因此该功分馈电网络四个输出端口可以产生等振幅,相位两两相差 90° 的输出信号。

4 测试结果

图 9 是加工制作成的由功分馈电网络进行馈电的四臂螺旋天线。馈电网络印刷在 FR4 相对介电常数为 4.4 的介质基片上。可以看到馈电网络结构紧凑与四臂螺旋浑然一体。仿真结果是由 Ansoft 公司高频结构仿真软件 HFSS11.0 完成,所有的测量结果是由 Agilent N5230 网络分析仪以及天线室外远场测试系统完成。

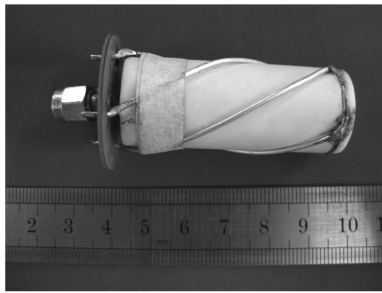


图9 加工实物照片

图 10 比较了采用本设计功分馈电网络以及采用自相移方式馈电的四臂螺旋天线的回波损耗曲线。在仿真中采用本设计功分馈电网络的四臂螺旋天线显示了 41.4% 的 10dB 带宽(回波损耗小于 10dB),从 1.59GHz

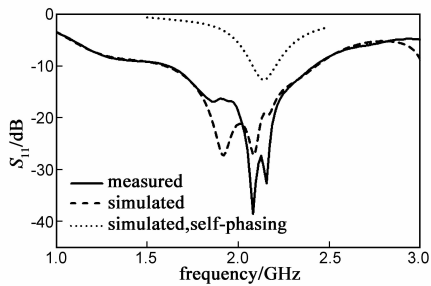
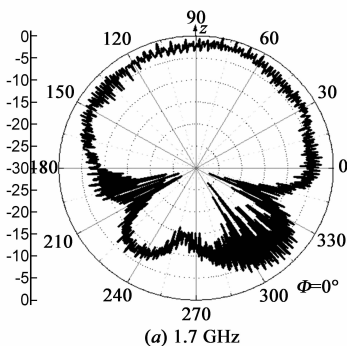
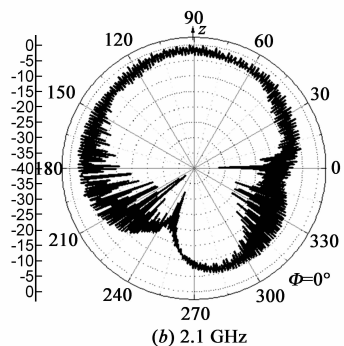


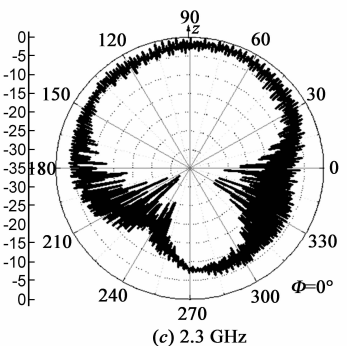
图10 阻抗带宽曲线



(a) 1.7 GHz



(b) 2.1 GHz



(c) 2.3 GHz

图13 在三个频点上的方向图

到 2.42GHz。实测中 10dB 带宽达到了 39.6%,从 1.62GHz 到 2.42GHz。然而,采用自相移方式的四臂螺旋天线阻抗带宽仅仅为 5.6%,从 2.08GHz 到 2.2GHz,远远小于采用本文提出功分馈电网络后的阻抗带宽。

图 11 比较了采用本设计功分馈电网络以及采用自相移方式馈电的四臂螺旋天线的轴比曲线。在仿真中采用本设计功分馈电网络的四臂螺旋天线显示了 82.2% 的 3dB 轴比带宽(轴比小于 3dB),从 1.04GHz 到 2.51GHz。实测中 3dB 轴比带宽达到了 72.5%,从 1.17GHz 到 2.50GHz。然而,采用自相移方式的四臂螺旋天线轴比带宽仅仅为 2.9%,从 2.07GHz 到 2.13GHz,远远小于采用本文提出功分馈电网络后的轴比带宽。

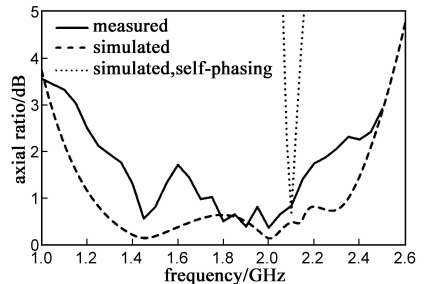


图11 轴比带宽曲线

图 12 显示了本设计四臂螺旋天线仿真与测量的最大增益曲线。可以看出,仿真的 3dB 增益带宽分别达到了 25.3%,从 1.95GHz 到 2.39GHz,最大增益达到 3.46dBi;测量的 3dB 增益带宽分别达到了 25.8%,从 1.89GHz 到 2.45GHz,最大增益达到 3.1dBi。

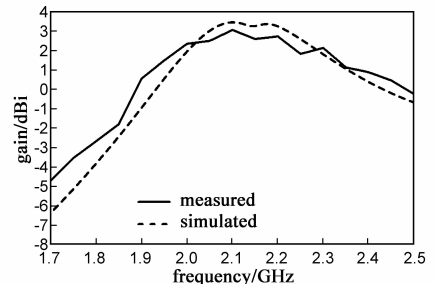


图12 峰值增益测量仿真曲线

图 13 显示了本设计四臂螺旋天线在中心频率以及

两边频率上 XOZ 平面的归一化方向图. 测量的 3dB 轴比波束宽度在中心频率以及两变频均大于 60° . 从而显示了该天线具有很好的圆极化宽带辐射特性. 在 Z 轴正方向上产生了右旋圆极化辐射.

5 结论

本文提出了一种紧凑的功分相移馈电网络, 可以实现四个输出端功率平衡输出, 且相位两两相差 90° . 该馈电网络使得四臂螺旋天线既可以实现宽带的圆极化辐射, 又具有小尺寸, 非常适合 GPS、北斗移动手持设备的应用需求. 文章详细分析了四臂螺旋天线的三种馈电方式. 并且分析了馈电网络的实现结构以及原理. 对天线进行加工制作并且测试. 测量结果与仿真吻合很好并且显示了很好的宽带特性.

参考文献

- [1] J M Tranquilla, et al. A study of the quadrifilar helix antenna for global positioning system(GPS) application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(10): 1545 - 1550.
- [2] R Cahill, et al. Performance of shaped beam quadrifilar antennas on the METOP spacecraft [J]. IEE Proceedings Microwaves, Antennas and Propagation, 1998, 145(1): 19 - 24.
- [3] C Kilgus. Resonant quadrafililar helix[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1969, 17(3): 349 - 351.
- [4] O Leisten, et al. Miniaturised dielectrically-loaded quadrifilar antenna for Global Positioning System (GPS) [J]. Electronics Letters, 2001, 37(22): 1321 - 1322.
- [5] 王家勇, 等. 低轨道小卫星通信中谐振式四臂螺旋天线的研究[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1865 - 1866.
WANG Jia-yong, et al. An application study of the resonant quadrifilar helix antenna in low orbit micro-satellite communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1865 - 1866. (in Chinese)
- [6] K Kiesi. A Small Quadrifilar Helix Antenna[D]. Helsinki, Finland; Helsinki University of Technology, 1995.
- [7] 付世强, 等. 船载海事卫星通信印刷四臂螺旋天线设计[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(2): 188 - 183.
FU Shi-qiang, et al. Shipboard printed quadrifilar helical antenna for INMARSAT satellite communication[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(2): 188 - 183. (in Chinese)
- [8] 沈仁强, 等. 圆锥印刷四臂螺旋天线的分析与设计[J]. 微波学报, 2007, 23(5): 14 - 18.

SHEN Ren-qiang, et al. Analysis and design of conical printed quadrifilar helical antenna[J]. Journal of Microwaves, 2007, 23(5): 14 - 18. (in Chinese)

- [9] 胡明春, 等. 宽带宽角圆极化贴片天线的实验研究[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1888 - 1890.
HU Ming-chun, et al. Experimental study of broad-band and wide-angle circularly polarized patch antennas[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(12): 1888 - 1890. (in Chinese)
- [10] A Sharaiha, et al. Printed quadrifilar resonant helix antenna with integrated feeding network [J]. Electronics Letters, 1997, 33(4): 256 - 257.
- [11] C Kilgus. Shaped-conical radiation pattern performance of the backfire quadrifilar helix[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1975, 23(3): 392 - 397.
- [12] O P M Pekonen, et al. Measuring the input impedance of a quadrifilar helix antenna[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1998, 17(2): 102 - 107.

作者简介



褚庆昕 男, 1958 年生于陕西, 华南理工大学电子与信息学院教授、博士生导师、天线与射频技术研究所所长. 目前主要研究领域包括无线通信中的射频电路和天线、微波集成电路的全域建模、有源集成天线与空间功率合成、计算电磁学等.

E-mail: qxchu@scut.edu.cn



蔺 焱 男, 1987 年 5 月 4 日出生, 甘肃兰州人, 华南理工大学工学硕士, 现任新加坡南洋理工大学研究员. 研究方向为天线以及射频电路.

E-mail: w.lin@mail.scut.edu.cn

林伟鑫 男, 1988 年 5 月 12 日出生, 广东揭阳人, 现为华南理工大学电子与信息学院在读硕士. 研究方向为圆极化天线.

E-mail: weixin.lin@mail.scut.edu.cn

杜 述 男, 1984 年 10 月 12 日出生, 湖北武汉人, 华南理工大学电子与信息学院 2010 年毕业硕士. 研究方向为圆极化天线.

E-mail: shu.du@mail.scut.edu.cn