

基于印刷振子和微带贴片的双极化天线单元研究

许群^{*①②} 刘少斌^① 王云香^② 宋立众^③ 曹洪伟^③

^①(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

^②(中国航空工业济南特种结构研究所高性能电磁窗航空科技重点实验室 济南 250031)

^③(哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院 威海 264209)

摘要: 该文基于互补天线的原理,研究了一种基于印刷振子和圆形微带贴片的双极化天线单元,其中印刷振子为电流辐射源,圆形微带贴片等效为磁流辐射源,它们分别组成了两个极化端口,在空间形成双极化的辐射场。采用全波电磁仿真技术对该天线结构进行了电磁仿真和优化设计,仿真结果表明,在工作频带范围内,所设计的双极化天线的隔离度达到22 dB以上,在主辐射方向的交叉极化电平低于-20 dB。加工了双极化天线单元并进行了测试,其电压驻波比、端口隔离度和交叉极化电平均满足双极化天线的技术指标要求,验证了该双极化天线设计的可行性。

关键词: 双极化天线; 振子天线; 微带贴片天线; 辐射方向图; 交叉极化

中图分类号: TN821

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)07-1764-05

DOI: 10.11999/JEIT160758

Dual-polarized Antenna Based on Printed Dipole and Microstrip Patch

XU Qun^{①②} LIU Shaobin^① WANG Yunxiang^② SONG Lizhong^③ CAO Hongwei^③

^①(Department of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

^②(RISAC AVIC, Key Laboratory of High Performance Electromagnetic Window for Aviation Science and Technology, Jinan 250031, China)

^③(School of Information and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Based on the principle of the complementary antenna, a kind of dual-polarized antenna element is studied, which combines the printed dipole antenna and circular microstrip patch. The printed dipole antenna is the electric current radiation source and the circular microstrip patch is the magnetic current radiation source. The two polarization ports are composed of the electric and magnetic radiation resource, respectively, which radiate dual polarized electromagnetic fields. The electromagnetic simulation and optimization design of the dual-polarized antenna are carried out using the full wave electromagnetic simulation technique, and the simulation results show that the isolation of the designed antenna is above 22 dB and the cross polarization level is lower than -20 dB at the boresight direction within the operational frequency range. The measured results of the fabricated antenna indicate that the Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), port isolation degree and the cross polarization level can satisfy technical requirements.

Key words: Dual-polarized antenna; Dipole antenna; Microstrip patch antenna; Radiation pattern; Cross polarization

1 引言

数字阵列雷达天线具有波束扫描灵活、快速波束调度和多波束能力等优势。数字阵列雷达天线单元是数字阵列雷达天线阵列的组成基础,其性能直接影响着数字阵列雷达的总体工作性能。双极化天

线是指能够发射或接收两个正交极化电磁波的天线,利用双极化天线既可以从目标的散射波中获得幅度和相位信息,还可以额外获取其它信息。在雷达技术领域,极化信息已获得广泛关注^[1]。目前应用于数字阵列雷达的天线类型主要集中在印刷天线^[2,3]、波导缝隙阵天线和 Vivaldi 渐变槽线天线等。印刷天线制作成本较低^[4,5];波导缝隙天线增益高、交叉极化电平低,但成本较高;Vivaldi 渐变槽线天线拥有超宽带和高增益的特点。对于双极化天线的研究主要集中在双极化天线的辐射原理与实现方案以及工程可实现性等方面^[6-10]。通常,双极化天线

收稿日期: 2016-07-19; 改回日期: 2017-04-24; 网络出版: 2017-05-18

*通信作者: 许群 xuqun_jn@126.com

基金项目: 航空科学基金项目(20131837001)

Foundation Item: The Science Foundation of Aeronautics of China (20131837001)

是由正交放置的磁流源或电流源辐射形成的，两个极化端口分别辐射或者接收对应极化的电磁波。双极化微带贴片天线是一种适合于工程应用的双极化天线形式，微带贴片天线的辐射可以看成是贴片周围缝隙的辐射，根据电磁场的等效原理，缝隙的辐射可理解为磁流源的辐射。微带天线的两个极化端口一般均采用探针馈电，这导致探针处引入了电感；L形探针馈电的双极化微带天线是通过探针与辐射贴片之间的耦合电容来馈电；微带贴片天线还可采用边馈或角馈来实现双极化。双极化振子天线是由两个正交放置的对称振子构成，相当于正交放置的两个电流源，这种天线已广泛应用于通信基站天线等领域。双极化振子天线根据振子的形状和馈电方式有多种类型，例如，文献[11]设计了一款微带印刷领结双极化宽带天线，辐射贴片采用半个领结形状；文献[12]提出了一种倾斜倒置树状枝节的紧凑型超宽带分集单极子天线。综上所述，微带天线可看做正交磁流源的辐射，双极化印刷振子天线可看做是正交电流源的辐射，根据对偶原理，它们在空间的辐射场结构也是对偶的，随着空间角度的变化，这两种类型双极化天线的辐射场正交极化特性将发生较大的变化，且技术实现上较为成熟。

根据双极化天线辐射场的形成机理，本文提出了基于互补原理的双极化天线实现方案，该双极化天线的空间电磁场的两个极化分量由电流辐射源和

$$E_{\theta} = \frac{-jk_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \int_0^{2\pi} \int_a^{a+w} \{M(\rho) \sin(\varphi' - \varphi) - M'(\varphi') \cos(\varphi' - \varphi)\} \cdot e^{j\rho k_0 \sin \theta \cos(\varphi' - \varphi)} \rho d\rho d\varphi' \quad (4)$$

$$E_{\varphi} = \frac{jk_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos \theta \int_0^{2\pi} \int_a^{a+w} \{M(\rho) \cos(\varphi' - \varphi) - M'(\varphi') \sin(\varphi' - \varphi)\} \cdot e^{j\rho k_0 \sin \theta \cos(\varphi' - \varphi)} \rho d\rho d\varphi' \quad (5)$$

其中， a 为缝隙环的内径， w 为缝隙宽度，并且，

$$M(\rho, \phi') = M(\rho) \boldsymbol{\rho} + M(\varphi') \boldsymbol{\varphi}' = -E_{\varphi'} \boldsymbol{\rho} + E_{\rho} \boldsymbol{\varphi}' \quad (6)$$

式中， $E_{\varphi'}$ 和 E_{ρ} 分别是缝隙环产生的电场在 φ' 和 ρ 方向上的分量。需要注意的是，上述结果都是在假设接地面无限大，忽略边缘绕射场影响的情况下得到的。在巴比涅原理中，理想缝隙圆环天线和金属圆环天线远场方向图完全相同，但是电场、磁场的分量互换，因此，缝隙圆环天线可以等效成两个半波缝隙^[13,14]。

3 基于印刷振子与圆形微带贴片的双极化天线的结构与仿真

印刷振子天线^[15,16]是在介质基板上蚀刻成的距离反射地板一定距离的金属导体带条，该天线的辐射可理解为近似的振子电流的辐射。圆形微带贴片天线^[17,18]是一种结构简单的微带天线形式，根据微带天线的腔体模型，它可以近似看做圆形贴片周围

磁流辐射源分别产生，引入印刷振子天线作为电流辐射源，圆形微带贴片作为磁流辐射源。从理论上讲，基于组合电磁辐射源的双极化天线方案可获得更大的正交极化特性的辐射场空间角度范围。采用印刷电路技术分别制成印刷振子天线和圆形微带贴片天线，采用双层复合结构组合成双极化天线单元，馈电方式为同轴线底部馈电，适合于组成大规模阵列天线。

2 缝隙环天线的辐射原理

圆环缝隙天线是一种可以看做是等效磁流源辐射的天线形式，其结构示意图及坐标系如图1所示，在介质板的接地板上开一个圆环缝隙，同时在介质板上层采用开路微带线馈电。在理想情况下，圆环缝隙天线所在的金属平板可看做无穷大，因而缝隙环可等效为磁流环，磁流环上的磁流为

$$\mathbf{M}(\rho, \phi') = \mathbf{E}_a(\rho, \phi') \times \mathbf{n} \quad (1)$$

式中， \mathbf{E}_a 是口面电场， \mathbf{n} 是垂直于口面的单位矢量。

通过电矢量位法进一步计算得到缝隙环天线的远场辐射方向图，应用公式为

$$\mathbf{H}(r) = -j\omega \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{E}(r) = \eta_0 \mathbf{H}(r) \quad (3)$$

将电矢量位代入式(3)可得到电场远场的 θ 和 φ 分量为

的圆环形缝隙的辐射，即可理解为磁流的辐射。设计的双极化天线基于印刷电路技术，两个极化端口分别由印刷振子天线和圆形贴片天线组成，两种辐射单元位于不同垂直高度上，印刷振子天线位于圆形微带天线的上方。圆形微带贴片可看做印刷振子的反射地板的一部分，同时二者之间保持一定的隔离特性。在本文中，圆形微带贴片和印刷振子的介质基板均选择相对介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ ，厚度为1.5 mm的板材。圆形微带贴片天线采用同轴线底部馈电方式；印刷振子天线采用矩形金属带条，同轴电缆穿过圆形微带贴片天线的介质基板，同轴线的内导体探针与印刷振子连接在一起，外导体与圆形微带天线的地板连在一起。设计的双极化天线结构模型和参数定义如图2所示。此处，定义极化端口1为圆形微带贴片天线的馈电端口，端口2为印刷振子天线的馈电端口，印刷振子天线和圆形微带贴片天线均为印刷电路结构。

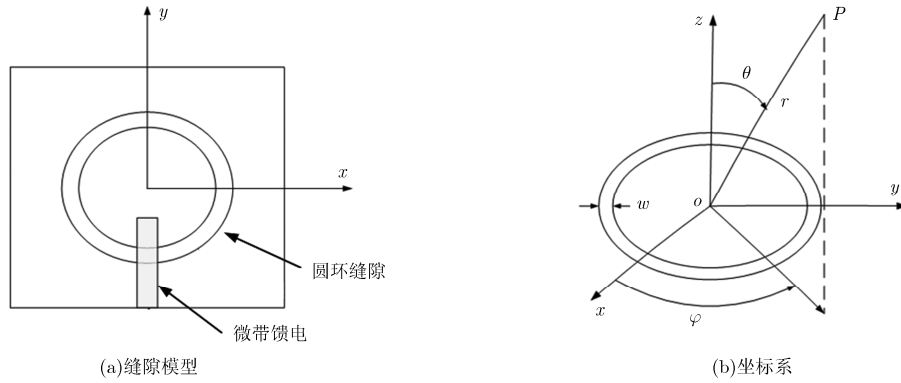


图 1 缝隙环天线

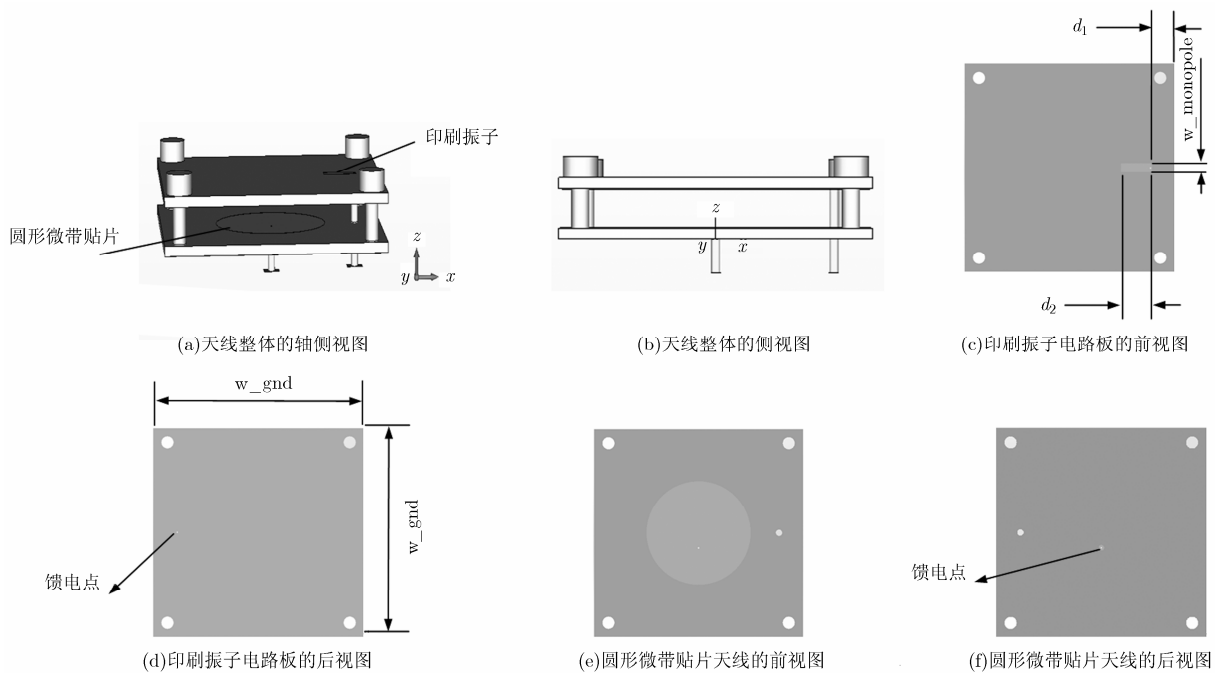


图 2 双极化天线的结构模型和参数定义

图 2 给出了印刷振子天线和圆形贴片天线的结构参数定义, 采用电磁仿真软件对天线的结构参数进行了优化, 最终得到满足要求的参数为: $w_{\text{gnd}}=44 \text{ mm}$, $w_{\text{monopole}}=2 \text{ mm}$, $d_1=4.75 \text{ mm}$, $d_2=6.5 \text{ mm}$, 圆形贴片的直径为 22 mm 。印刷振子馈电点距离地板边缘 5.05 mm , 圆形微带贴片天线的馈电点距离贴片中心 3.2 mm 。对双极化天线的电压驻波比和端口隔离度进行了仿真计算, 结果显示: 在 $4.95 \sim 5.05 \text{ GHz}$ 范围内, 两个极化端口的电压驻波比均小于 2, 极化端口的隔离度大于 20 dB ; 在中心频点 5 GHz 处, 端口 1 和端口 2 的电压驻波比分别为 1.19 和 1.25, 端口隔离度为 26.9 dB , 带宽约为 100 MHz ; 印刷振子端口阻抗带宽范围为 $4.9 \sim 5.1 \text{ GHz}$, 圆形贴片天线端口阻抗带宽范围为 $4.9 \sim 5.15$

GHz , 整个双极化天线的工作频带为 $4.95 \sim 5.05 \text{ GHz}$, 频带内端口隔离度大于 23 dB 。

对双极化天线在中心频点 5.0 GHz 处的远场辐射方向图进行了计算, 计算结果为: 端口 1 的增益约为 7.5 dBi , 主辐射方向的交叉极化电平低于 -28 dB , E 面和 H 面的波束宽度均为 74° 。端口 2 的增益在中心频点约为 5.1 dBi , 主辐射方向的交叉极化电平低于 -20 dB , 在中心频点处的 E 面方向图波束宽度约为 60° , H 面方向图波束宽度约为 117° 。

4 基于印刷振子与圆形微带贴片的双极化天线的测试与性能分析

根据设计结果, 加工组装了双极化天线样件, 如图 3(a)所示。该天线电压驻波比和端口隔离度的测试结果分别如图 3(b), 3(c)和 3(d)所示, 在中心频

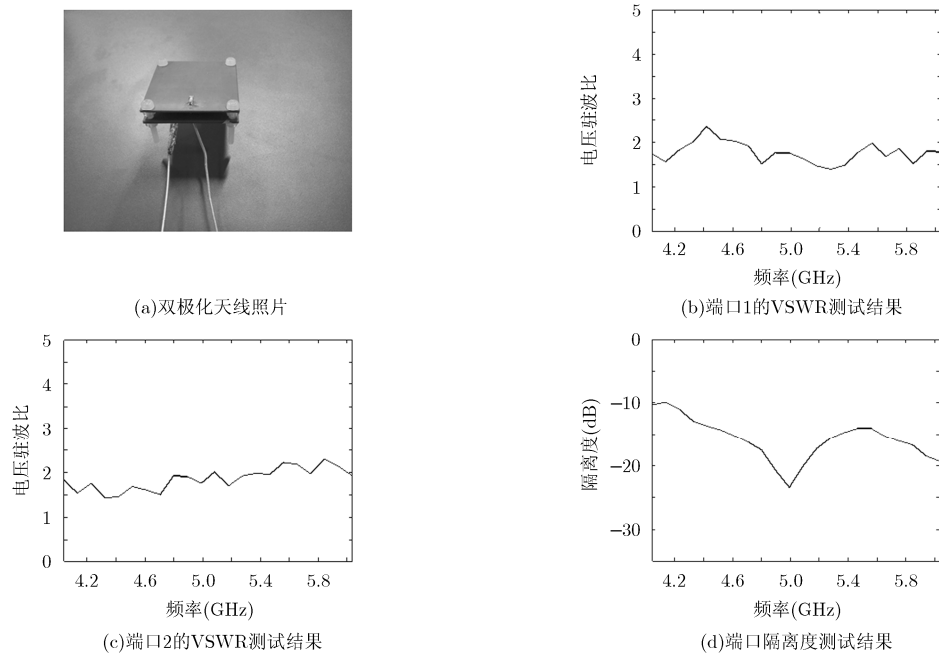


图 3 天线照片和电路特性测试结果

点上，端口 1 和端口 2 的电压驻波比分别为 1.75 和 1.76，实测结果比仿真结果略大；两个极化端口之间隔离度大于 20 dB 的带宽大于 100 MHz，与仿真结果近似。经分析认为，实测结果和仿真结果之间的差异主要是由加工精度因素引起的。

在微波暗室中对天线方向图进行了测量，图 4 和图 5 给出了中心频点的测试结果。可以看出，该双极化天线有效形成了辐射方向图，极化端口 1 的 E 面和 H 面波束宽度接近，约为 60°；极化端口 2

的 H 面波束宽度大于 E 面的波束宽度。在主辐射方向上，两个极化端口的交叉极化电平都低于 -20 dB，与仿真结果接近，能够满足实际工程的需要。测试结果验证了本文设计的天线结构的正确性，同时也表明了基于电磁辐射源的双极化天线设计方案的有效性。

5 结论

双极化天线单元作为双极化数字阵列雷达天线

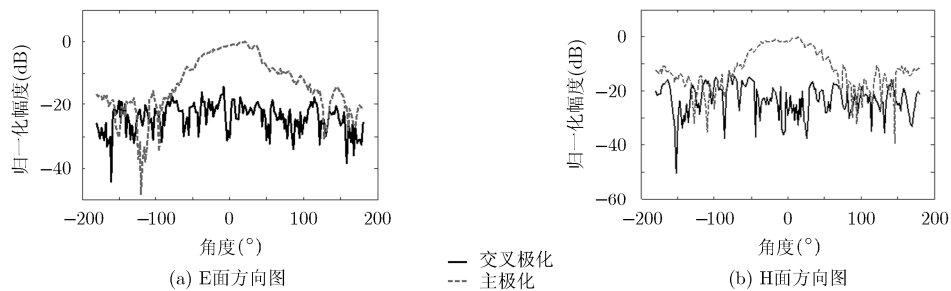


图 4 极化端口 1 的实测方向图

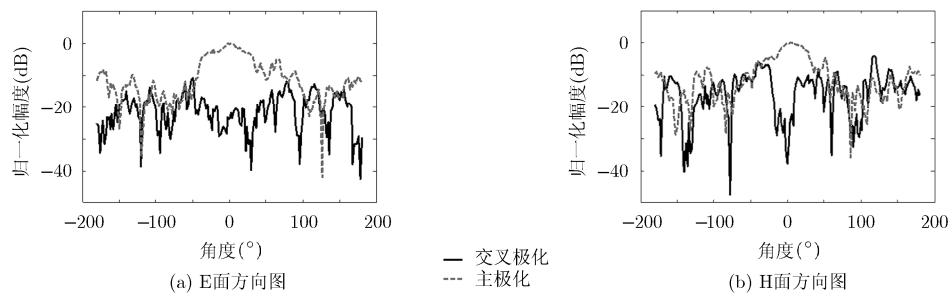


图 5 极化端口 2 的实测方向图

的基础, 其技术指标直接影响整机系统的性能。本文基于互补天线原理, 采用电流源和磁流源组合的方式设计双极化天线, 探索在工程上的实现技术及其辐射性能。设计了一种基于印刷振子和圆形微带贴片天线的双极化电磁辐射源天线, 在带宽为 4.95~5.05 GHz 范围内, 天线的端口隔离度大于 20 dB, 交叉极化电平低于 -20 dB, 技术指标可以满足通常的双极化雷达和通信系统的工作要求。本文的研究成果为其实际工程应用提供了有利的技术参考。

参 考 文 献

- [1] 吴一戎, 洪文, 王彦平. 极化干涉 SAR 的研究现状与启示[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1258-1262.
WU Yirong, HONG Wen, and WANG Yanping. The current status and implications of polarimetric SAR interferometry[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5): 1258-1262.
 - [2] ZHONG S S and YANG X X. Corner-fed microstrip antenna element and arrays for dual-polarization operation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, 50(10): 1473-1480.
 - [3] ESQUIUS-MOROTE M, MATTES M, and MOSIG J R. Orthomode transducer and dual-polarized horn antenna in substrate integrated technology[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(10): 4935-4944. doi: 10.1109/TAP.2014.2341697.
 - [4] ZHU Fuguo, GAO S, HO A T S, et al. Ultra-wideband dual-polarized patch antenna with four capacitively coupled feeds[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(5): 2440-2449. doi: 10.1109/TAP.2014.2308524.
 - [5] CHU Qingxin, WEN Dingxiang, and LUO Yu. A broadband $\pm 45^\circ$ dual-polarized antenna with y -shaped feeding lines[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(2): 483-490. doi: 10.1109/TAP.2014.2381238.
 - [6] SAMMETA R and FILIPOVIC D S. Reduced size planar dual-polarized log-periodic antenna for bidirectional high power transmit and receive applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(11): 5453-5461. doi: 10.1109/TAP.2014.2352645.
 - [7] ELSHERBINI A, WU Jiangfeng, and SARABANDI K. Dual polarized wideband directional coupled sectorial loop antennas for radar and mobile base-station applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1505-1513. doi: 10.1109/TAP.2015.2392773.
 - [8] WANG Yan and DU Zhengwei. Dual-polarized slot-coupled microstrip antenna array with stable active element pattern[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(9): 4239-4244. doi: 10.1109/TAP.2015.2452958.
 - [9] CUI Yuehui, LI Ronglin, and FU Huanzhan. A broadband dual-polarized planar antenna for 2G/3G/LTE base stations [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(9): 4836-4840. doi: 10.1109/TAP.2014.2330596.
 - [10] LEE Jungnam, LEE Kwangchun, and SONG Pyeongjung. The design of a dual-polarized small base station antenna with high isolation having a metallic cube[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(2): 791-795. doi:10.1109/TAP.2014.2379939.
 - [11] ELDEK A A, ELSHERBENI A Z, and SMITH C E. Wide-band modified printed bow-tie antenna with single and dual polarization for C-and X-band applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(9): 3067-3072. doi: 10.1109/TAP.2005.851870.
 - [12] KUMAR R and PAZARE N. Compact printed ultra-wideband diversity monopole antenna with slant inverted tree-shaped stub[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, 9(14): 1595-1604. doi: 10.1049/iet-map.2015.0113.
 - [13] FEI P, QI Y, and JIAO Y C. Design of a wideband dual-element slot loop antenna array with adjustable back-reflector[J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 1014-1017. doi: 10.1109/LAWP.2012.2214999.
 - [14] CHEN Youchieh, CHEN Shihyuan, and HSU Powen. A modified CPW-fed slot loop antenna with reduced cross polarization and size[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 1124-1126. doi: 10.1109/LAWP.2011.2171471.
 - [15] LIU Jianjun, ZHONG Shunshi, and ESSELLE K P. A printed elliptical monopole antenna with modified feeding structure for bandwidth enhancement[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(2): 667-670. doi: 10.1109/TAP.2010.2096398.
 - [16] HOANG T V, LE T T, and PARK H C. Bandwidth improvement of a circularly polarised printed monopole antenna using a lumped capacitor[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(13): 1091-1092. doi: 10.1049/el.2016.1277.
 - [17] FERDOUS S, HOSSAIN A, CHOWDHURY S M H, et al. Reduced and conventional size multi-band circular patch antennas loaded with metamaterials[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2013, 7(9): 768-776. doi: 10.1049/iet-map.2012.0582.
 - [18] HOW H, VITTORIA C, KEMPEL L C, et al. Green's function calculations on circular microstrip patch antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(3): 393-401.
- 许 群: 男, 1966 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为电磁场与微波技术。
刘少斌: 男, 1965 年生, 教授、博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理、天线技术、电磁场与微波技术。
王云香: 女, 1962 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达天线罩设计与电磁仿真。