

采用四臂螺旋结构的紧凑圆极化 RFID 读卡天线

戴海斌 王涛 张金艺

(上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室 上海 200072)

摘要: 提出了一种紧凑新型平面四臂螺旋天线,用于满足超高频(UHF)频段射频识别(RFID)阅读器小型圆极化的设计要求。天线由印制在FR4介质板的4个倒F阵元组成,通过对阵元的折叠及连续相位旋转法布阵,可以有效的减小天线的尺寸;采用改进的微带功分馈电网络及新的耦合匹配方法,提高了圆极化天线的轴比带宽和增益。天线尺寸为 $56\text{ mm}\times 56\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,在保持相当性能的同时,设计天线与相关参考文献设计天线相比,面积降低12.9%到86.1%。测试结果显示 $S_{11}<-10\text{ dB}$ 覆盖 $870\sim 950\text{ MHz}$ 频段,仿真结果显示带内轴比 $<2\text{ dB}$,峰值增益为 2.8 dB ,波束宽度 $>120^\circ$,交叉极化 $<-15\text{ dB}$ 。

关键词: 四臂螺旋天线;功分馈电网络;耦合匹配;圆极化

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.35

Design of compact circular polarization quadrifilar spiral antenna for RFID

Dai Haibin Wang Tao Zhang Jinyi

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: To meet the design requirements of the miniaturization and circular polarization of ultra high frequency (UHF) band radio frequency identification(RFID) reader, a novel compact square quadrifilar spiral antenna with right-hand circular polarization is presented. The antenna is composed of four inverted-F elements printed on the FR4 substrate, and the dimension of the antenna can be effectively reduced by array element bending and the continuous phase rotation method. The improved microstrip power-divided feeding network and a new coupling match method are used to improve the bandwidth of the axial ratio and gain of the circularly polarized antenna. The proposed antenna has a size of $56\text{ mm}\times 56\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ than the reference design reduced by 12.9% to 86%, the 3 dB beamwidth of more than 120° , the peak gain of 2.8 dBic with the axial ratio under 2 dB and the cross polarization of less than -15 dB .

Keywords: quadrifilar spiral antenna; power-divided feeding network; mutual coupling match; circular polarization

0 引言

随着现代信息技术产业的发展,物联网技术在未来互联网产业的融合与发展发挥着极其重要的作用。超高频(UHF)射频识别(RFID)技术具有诸多优点:识别距离远、识别率高、传输速率高等,已经在RFID系统应用比较成熟。UHF RFID是一种通过反向散射调制原理实现阅读器与无源电子标签之间数据采集的技术,其中阅读器天线发射和接受射频信号的能力对RFID系统的能量交互的尤为重要^[1]。UHF阅读器天线针对不同应用场景也提出了不同的设计需求。对于大型应用场景需要更好的辐射性能,同时也增加了天线的整体尺寸;对于小型运用场景则可以依据具体场景的需求设计出更小巧的阅读器天线^[2]。本文设计的小型圆极化天线针对供应链及小型货架的商品管理的运用,更注重天线的尺寸的控制。再者,由于被识别货

物摆放位置的随机性,阅读器天线需要实现圆极化以保证阅读器有更高的识别率^[3-5]。

通过大量的文献研究发现,天线设计的过程中存在着难以回避的矛盾:不断缩小的天线由于辐射效率的降低很难实现宽频带、良好的馈电网络及低成本^[6-9]。为了实现宽频带、高增益往往需要牺牲尺寸作为代价,文献[5、6]以 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的面积实现了25%的带宽;文献[7]通过缝隙耦合法为实现6 dB的高增益,1.37 dB的轴比,需要天线辐射面 $119\text{ mm}\times 119\text{ mm}$ 的介质板。文献[8、9]在微带贴片基础上开槽和切缝的形式,比传统读写器天线提高0.6 dB增益,缩小20%尺寸,但天线的平面尺寸达到 $90\text{ mm}\times 90\text{ mm}$,且这种单层贴片形式并没有达到很好的圆极化效果;可见,为了保证天线满足良好的性能,相对于系统的数字基带模块设计而言,有效减小阅读器天线的整体尺寸更为棘手。Kilgus于20世纪60~70年代提出四臂

螺旋天线^[10],但如何在低频段小尺寸的结构上实现 90°相移成为难点。Son 等人首次提出倒 F 四臂螺旋天线^[11],进而于文献[12-16]将锥形倒 F 四臂螺旋天线平面化并运用于 RFID 阅读器,如图 1 所示,很巧妙的解决了上述矛盾。在轴比带宽 30 MHz(AR<2 dB)频段内,可以达到 2.5 dBi 的增益,天线尺寸显得更有优势为 60 mm×60 mm×17 mm。

本文提出了一款改进馈电网络结构的紧凑四臂螺旋天线,根据移动/小型 RFID 阅读器的应用条件,该天线采用简单的天线结构与性价比高的 FR4 介质板,采用新的耦合匹配理论,通过结构上的创新及新的馈电网络的应用,可以减小天线尺寸,同时获得与文献[12-16]相当的性能,在我国频段 920~925 MHz 内具有 120°以上半功率波瓣宽度以及带内轴比<2 dB,天线尺寸相比于几款典型的设计缩减了 12.9%,为 56 mm×56 mm×8 mm,交叉极化<-15 dB,峰值增益为 2.8 dB。

1 天线及馈电网络的设计

1.1 天线设计

本文设计的天线结构如图 2 所示,采用 2×2 天线阵列排布,4 个完全一致的阵元均由平面倒 F 天线组成。天线采用双层架空结构,4 个天线臂印制在矩形(厚度为 1 mm,尺寸为 56×56 mm², $L_1=56$ mm, $L_2=45$ mm, $T=1.5$ mm)上表面,依次由 4 个竖立小介质板(厚度为 0.5 mm,尺寸为 10×8 mm²)做支撑,下层表面为逆时针等幅且正交相位(0°、90°、180°、270°)馈电的串联功分馈电网络,达到右手圆极化的目的。天线所有的材料均采用性价比高的 FR4 介质板,介电常数为 4.4。单个倒 F 天线产生的是线极化场,4 个天线之间的距离相同,通过改变臂的长度和宽度、短路点的位置及臂的弯折次数可以很好的调节天线的输入阻抗和谐振频率。

设计中为了减小天线尺寸,采用了 4 个天线元紧密排布(间距≤0.2λ),但相互靠近的天线端口必然导致天线互相耦合,互耦的强度与天线之间的距离成反比,最终使得天线辐射效率减小。实践证明,通过调节天线每个端口的反射系数并不能对改善互耦起到关键作用^[11,17]。

如何减小密布天线阵的互耦问题改善天线的辐射效率,一直是大家关注的热点。文献[11、12]最早于 GPS 天线中分析了紧凑四臂螺旋天线的互耦理论,经过优化后巧妙的用于分析平面四臂螺旋天线,推导出实现最佳匹配的条件:

$$\Gamma = M_{\text{far}} \quad (1)$$

式中: Γ 为每个端口的反射系数, M_{far} 为对角天线臂之间的耦合系数。

为了验证上述匹配方法,在端口 1 和端口 3 接入馈源,并在端口 2 和端口 4 接入负载电阻,如图 1 所示。端口 1 的反射系数 $\Gamma = S_{11}$,端口 1 与端口 3 之间的耦合系数为 $M_{\text{far}} = S_{31}$ 。通过仿真模型的分析,图 3 给出了本设计提出的四臂螺旋天线的 Γ 和 M_{far} 的幅度响应及相位响应的曲

线,在 920 MHz 频点,发现 Γ 和 M_{far} 的幅度响应及相位响应满足等式(1),在图 3(a)中 Γ 和 M_{far} 的幅度于 920 MHz 处都为-9 dB 左右,且在图 3(b)中 Γ 和 M_{far} 的相位曲线在同一频点相交于 100°左右。针对其他端口采用相同的分析原理,使 4 个端口之间都达到最佳互耦匹配。由此可见,图 2 给出的天线原型实现了很好的匹配条件。

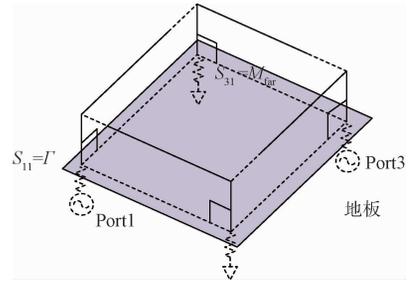


图 1 倒 F 折叠四臂螺旋天线

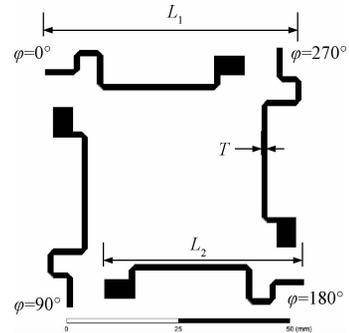


图 2 印刷 2×2 天线阵列图

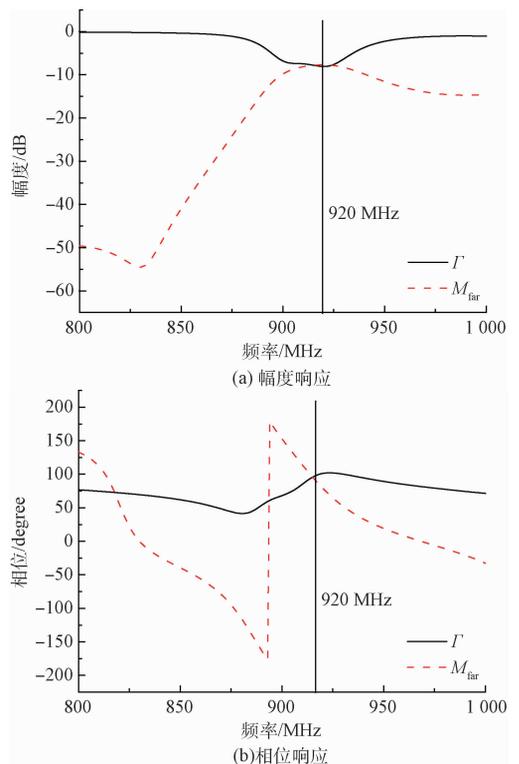


图 3 天线 Γ 与 M_{far} 的幅度响应及相位响应的仿真结果

1.2 馈电网络设计

4 个天线元的馈电幅度相等且相位保持相互正交的关系。自相移馈电和功分网络馈电是四臂螺旋天线的主要馈电方式^[4]。自相移馈电方式可以由形状各异的天线产生不同的相位大小来实现,但由于对天线结构的改变会导致输入阻抗及谐振频率的偏移,同时不同形状的天线臂使互耦的分析也变的困难,所以使用功分馈电的方式。威尔金森功分器由于自身的特性(隔离电阻)存在额外的损耗,3 dB 电桥和耦合器因结构复杂不适合阅读器的小型化^[10]。因此该处采用简单的串馈式功分器。图 4 为功分网络的结构图,采用 50 Ω 阻抗的同轴探针馈电,馈源位于馈电层的几何中心且背面接地,依次按逆时针方向为天线端口提供馈电。通过合理优化馈电网络的结构,来自馈电端口输入的能量在相位为 0°、90°、180°、270° 的馈点处所分配到的功率比为 1:1:1:1。这样来自馈源的能量均等的分配给了 4 个端口。

该天线的采用微带串联馈电功分网络结构,并给出了等效传输线模型,如图 5 所示。

根据传输线理论采用二端口网络模型对串馈功分网络分析如下:该天线的 4 个负载阻抗均为 100 Ω,图 5 中的传输线(电长度为 $\theta_1 \sim \theta_9$)均视为理想无耗传输线。特性阻抗为 Z_0 ,电长度为 θ 的无耗传输线的 A 参量矩阵为:

$$[A] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & jZ_0 \sin\theta \\ j\frac{1}{Z_0} \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

参考面 A-A' 的输入阻抗可由负载 1 与传输线 1 串联得:

$$Z_{in}^{A-A'} = \frac{AZ_i + B}{CZ_i + D} = \frac{100\cos\theta_1 + j100\sin\theta_1}{100j\frac{1}{100}\sin\theta_1 + \cos\theta_1} =$$

$$100 \frac{\cos\theta_1 + j\sin\theta_1}{j\sin\theta_1 + \cos\theta_1} = 100 \Omega \quad (3)$$

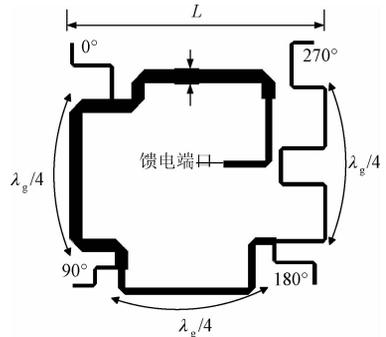


图 4 微带串馈式功分网络层

同样的,参考面 C-C', F-F', J-J' 的输入阻抗为:

$$Z_{in}^{C-C'} = Z_{in}^{F-F'} = Z_{in}^{J-J'} = 100 \Omega \quad (4)$$

当传输线输入阻抗等于特征阻抗时,可满足阻抗匹配:

$$Z_{in}^{B-B'} = Z_{in}^{A-A'} = 100 \Omega \quad (5)$$

由并联原理计算得参考面 D-D' 输入阻抗为:

$$Z_{in}^{D-D'} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{in}^{B-B'}} + \frac{1}{Z_{in}^{C-C'}}} = 50 \Omega \quad (6)$$

再递推出参考面 G-G', I-I' 的输入阻抗,分别为:

$$Z_{in}^{G-G'} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{in}^{E-E'}} + \frac{1}{Z_{in}^{F-F'}}} = 33.33 \Omega \quad (7)$$

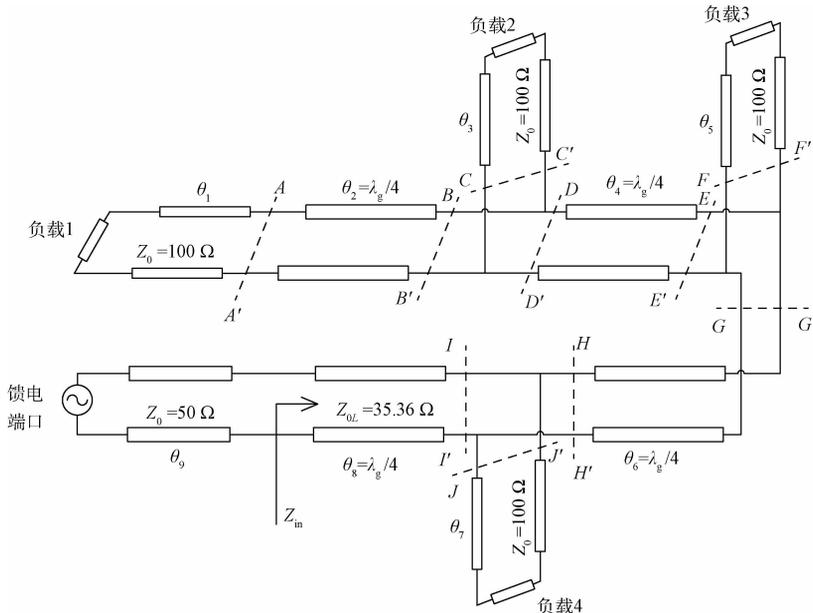


图 5 馈电网络等效传输线模型

$$Z_{in}^{I-I'} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{in}^{II-II'}} + \frac{1}{Z_{in}^{J-J'}}} = 25 \Omega \quad (8)$$

为了使馈源功率不被反射,须进一步实现 50Ω 馈源与参考面 $I-I'$ 的阻抗匹配,这里采用结构简单且易实现的 $1/4$ 波长阻抗变换器。计算出传输线的特征阻抗为:

$$Z_{0L} = \sqrt{Z_{in}^{I-I'} Z_{in}} = \sqrt{25 \times 50} = 35.36 \Omega \quad (9)$$

据微带线理论,由微带线的特征阻抗及板材参数可得出微带网络的实际参数,长和宽均为 $L=56 \text{ mm}$,微带线宽 $W_1=3.3 \text{ mm}$, $W_2=3.1 \text{ mm}$, $W_3=1.69 \text{ mm}$, $W_4=0.86 \text{ mm}$ 。又由 $\lambda_g/4$ 电长度的微带线用于端口之间互相结合,4 个天线臂便可获得等幅且相位正交的馈电,从而实现右旋圆极化。

2 仿真及实测结果

2.1 仿真和测试环境

图 6 为设计天线的软件 (Ansoft HFSS 15.0) 仿真模型。考虑到实际天线结构的安装所使用到的螺丝和焊接引入的寄生效应,为了减小误差,在仿真时尽可能多的采用多边形拟合实际结构^[17-19]。

在测试方面,首先制作了天线实物,如图 7 所示。天线尺寸为 $56 \text{ mm} \times 56 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,相对于传统阅读器天线具有很好的优势,与文献报道的几款典型设计相比,面积明显缩减。尺寸具体参数对比如表 1 所示。

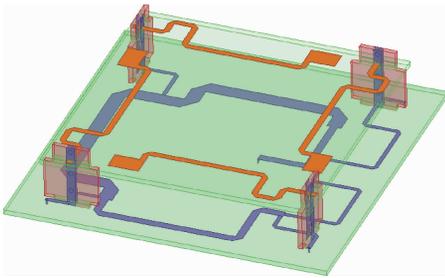


图 6 天线 HFSS 模型

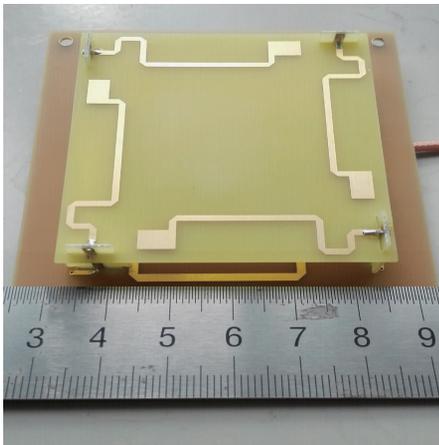


图 7 天线实物

最后,使用 E507C ENA 矢量网络分析仪测试了天线实物的 S_{11} ,测试环境如图 8 所示。

2.2 仿真和测试结果

图 9 给出了该天线仿真和实测的回波损耗对比图。可见,天线的中心频率在 920 MHz ,在国内 UHF 频段 $920 \sim 925 \text{ MHz}$ 内的实测回波损耗小于 -30 dB ,且在 $902 \sim 928 \text{ MHz}$ 内的回波损耗均在 -10 dB 以下,仿真和实测结果保持较好的一致性,可满足实际应用。

从图 10 可以看到,天线增益和轴比与频率的关系曲线,显示天线拥有 2.8 dB 的峰值增益,轴比在带内小于 2 dB 。图 11 显示了天线具有小于 -15 dB 的交叉极化可以很好的抑制多径效应,且在工作频率为 920 MHz 的波束宽度大于 120° 。因此,该天线具有很好的宽波束圆极化特性。

表 1 本文提出的天线与相关文献设计天线的参数对比

文献	设计天线尺寸/ mm^3	本设计天线相对于该文献的面积缩减比例/%	轴比带宽/ MHz
[6]	$150 \times 150 \times 32$	86.1	$891 \sim 930$
[5]	$130 \times 130 \times 28$	81.4	$850 \sim 1000$
[1]	$125 \times 125 \times 8.5$	79.9	$897 \sim 947$
[7]	$119 \times 119 \times 8$	77.9	$900 \sim 930$
[9]	$90 \times 90 \times 4.57$	61.3	$960 \sim 980$
[8]	$83 \times 83 \times 10.6$	54.5	$840 \sim 860$
[14]	$78 \times 78 \times 11.2$	48.5	$900 \sim 929$
[12]	$60 \times 60 \times 17$	12.9	$900 \sim 935$

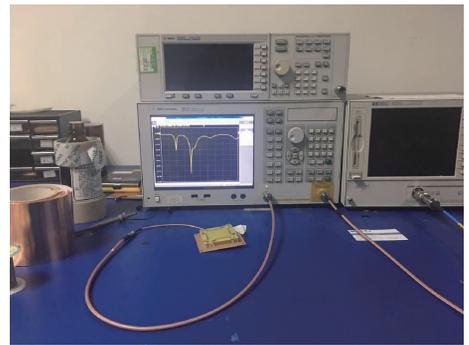


图 8 矢量网络分析仪测试

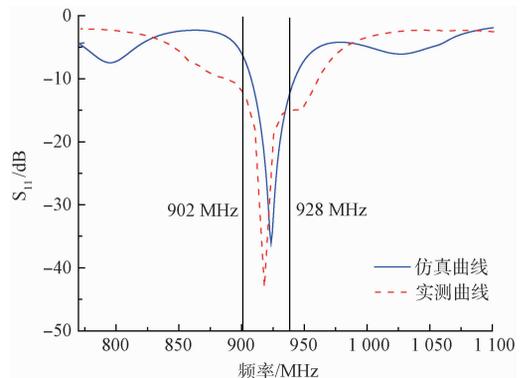


图 9 S_{11} 曲线

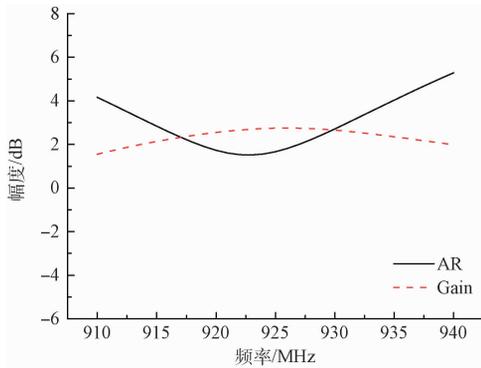


图 10 增益与轴比曲线

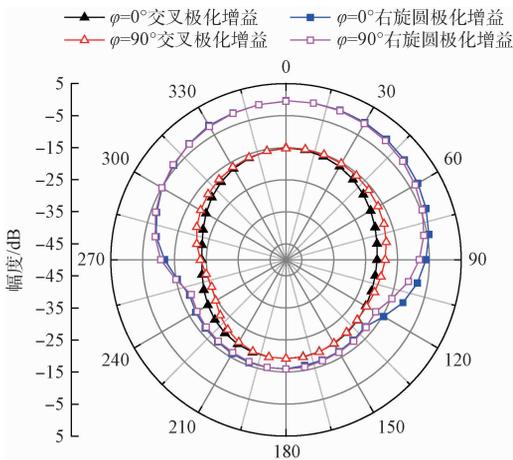


图 11 920 MHz 辐射方向

3 结 论

本文提出了一种紧凑新型圆极化四臂螺旋天线。基于一种新的耦合匹配理论,通过馈电网络的改进及天线结构的优化,仿真与实测结果表明该天线具有小尺寸、低剖面、成本低、良好的右旋圆极化增益及宽波束特性,满足 UHF 频段 RFID 系统的要求。

参 考 文 献

- [1] 彭章友, 孟春阳, 任秀方, 等. 一种宽频带 RFID 阅读器天线的设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(5): 19-23.
- [2] 谢晶晶, 赵东东. UHF Passive RFID 标签最大阅读距离的研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3): 45-49.
- [3] 于洁潇, 刘开华, 史伟光. RFID 多跳邻域定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2680-2687.
- [4] 毕杨, 王英民, 王奇. 宽带聚焦波束形成算法优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6): 951-958.
- [5] LU J H, LIN S C, HUANG P W. Planar broadband annular-ring antenna with circular polarization for

RFID system[C]. IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 2016: 345-346.

- [6] YE H C H, CHEN B S, CHEN C C, et al. L-shaped probe feed patch antenna with circular polarization radiation for UHF RFID applications[C]. IEEE Mtt-S 2015 International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications, IEEE, 2015: 214-215.
- [7] 李静, 许定国, 程胜祥. 基于 RFID 的小型圆极化天线的研究[J]. 电子科技, 2009, 22(1): 16-19.
- [8] PAKKATHILLAM J, KANAGASABAI M, ALSATHI M. A compact multiservice UHF RFID reader antenna for near field and farfield operations[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016: 1-1.
- [9] NASIMUDDIN, CHEN Z N, QING X. Asymmetric-circular shaped slotted microstrip antennas for circular polarization and RFID applications[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2010, 58(12): 3821-3828.
- [10] 徐挺威. 宽带小型化四臂螺旋天线的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [11] SON W I, LIM W G, LEE M Q, et al. Design of compact quadruple inverted-F antenna with circular polarization for GPS receiver[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2010, 58(5): 1503-1510.
- [12] SON W I, LEE H L, LEE M Q, et al. Compact square quadrifilar spiral antenna with circular polarization for UHF mobile RFID reader [C]. Microwave Conference Proceedings, IEEE Xplore, 2011: 2271-2274.
- [13] 王永强, 雷振亚, 李磊, 等. 一种 RFID 小型圆极化四臂螺旋天线[J]. 电子科技, 2013, 26(12): 47-49.
- [14] SON W I, LEE M Q, YU J W. Module integrated antenna with circular polarization for mobile UHF RFID reader[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2011, 59(4): 1157-1165.
- [15] LEE S J, LEE D J, JANG H S, et al. Planar square quadrifilar spiral antenna for mobile RFID reader[C]. Radar Conference, 2012: 618-621.
- [16] LIN Y F, WANG Y K, CHEN H M, et al. Circularly polarized crossed dipole antenna with phase delay lines for RFID handheld reader [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2012, 60(6): 1221-1227.
- [17] 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): 2372-2380.

- [18] 徐挺威, 谢拥军, 李炎红, 等. 一种带有新型馈电结构的宽带印刷角锥四臂螺旋天线[J]. 电子器件, 2010, 33(1):76-80.
- [19] 韩红斌, 刘少强. 基于 HFSS 对目标 RCS 的仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3):60-63.

E-mail:hbdai@shu.edu.cn

王涛(通讯作者), 博士, 教授, 研究方向为高能效无线通信网络优化设计、绿色通信。

E-mail:twang@shu.edu.cn

张金艺, 研究员, 研究方向为无线通信与网络通信类集成电路(SoC)设计、SoC 可测试性设计、纳米级 SoC 故障容错设计与高可靠性设计。

E-mail:zhangjinyi@staff.shu.edu.cn

作者简介

戴海斌, 硕士研究生, 研究方向为 RFID 阅读器天线及标签天线。