

UHF RFID 密集标签互耦效应的频移特性研究

彭章友 任秀方 孟春阳 李 帅 陈文涛

(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: 针对 UHF RFID 密集环境下标签性能受互耦效应影响的问题,从天线阻抗频移特性的角度对标签间互耦效应进行研究。首先基于电感耦合型标签天线的结构和电路模型,分析带有弯折辐射体结构的标签天线互相耦合时阻抗的频率特性,并通过仿真计算验证了天线阻抗向低频偏移的结论。进一步结合理论和仿真数据分析互耦效应的频率特性,得出天线阻抗的频率偏移导致目标标签的功率传输系数也相应地向低频偏移的结论,从而导致标签的读取性能不稳定。结论对密集标签的性能研究具有指导意义。

关键词: 射频识别;互耦效应;电感耦合型标签;频率偏移

中图分类号: TN 06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1015

Study of frequency shift characteristics of mutual coupling between UHF RFID tags in dense environment

Peng Zhangyou Ren Xiufang Meng Chunyang Li Shuai Chen Wentao

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

Abstract: Readability of UHF RFID tags in dense environment will be influenced by mutual coupling effect between tags. The paper study mutual coupling effect from the perspective of frequency shift characteristic of antenna impedance. First, based on the structure and circuit model of inductive coupling tag antenna, the frequency characteristic of tag antenna impedance with meander-line is analyzed, in consideration of mutual coupling. Then the simulation and calculation verify the conclusion that antenna impedance shifts to lower frequencies. Combined with theory and simulation data, frequency characteristics of the mutual coupling effect is analyzed. It is put forward that the power transmission coefficient also shifts to lower frequencies, resulting in unreliable reading performance. The conclusion has guiding significance for research on the performance of the dense tags.

Keywords: radio frequency identification; mutual coupling; inductive coupling tag; frequency shift

1 引言

超高频射频识别技术(UHF RFID)利用电场反向散射的原理进行标签识别,已经得到了广泛应用^[1-2],但是 UHF RFID 在密集布放环境下存在多标签阅读冲突问题,从而导致读取率下降^[3],使其在文档管理、图书管理等领域的应用受到制约。目前国内外针对 RFID 多标签读取的影响因素进行了深入的理论研究,实验测试证明标签间互相干扰影响了标签反射信号强度^[4],理论研究证明标签间互相耦合对标签自身性能造成了较大影响,对于不同的标签间隔和排布场景,标签性能受影响的程度也不同^[5-6],从辐射场的角度标签在不同方向上增益的变化程度也不同^[7]。

但是目前国内外还缺少对间隔小于近远场分界的密集

标签的研究,对于图书管理等标签间隔只有几厘米的场合缺少必要的理论研究。此外由于天线设计往往有着超宽带的要求,因此需要研究天线的频率特性^[8],但是目前对于 RFID 标签天线的频率特性研究还只是针对单个标签,如最大阅读距离与频率的关系^[9]以及宽频带标签的设计^[10],但是对标签间互耦时频率特性的变化却少有研究,而这对于密集标签读取性能的研究也有重要意义。

针对这个问题,本文首先针对电感耦合型标签的频率特性进行分析,提出标签间耦合导致天线阻抗频率偏移的结论,并仿真验证这一分析过程。进一步仿真计算阻抗在频率的变化带来的互耦效应,提出阻抗在频率上的变化导致功率匹配系数也随之发生变化,从而导致标签的读取性能不稳定。

2 电感耦合型标签互耦研究

2.1 标签电路模型和天线阻抗的频率分析

应用中标签天线的设计往往采用 T 型匹配^[11]、电感耦合馈电^[12]等方式进行阻抗匹配,针对常用的电感耦合馈电的标签进行分析,并研究标签密集叠放的布放场景,如图 1 所示。

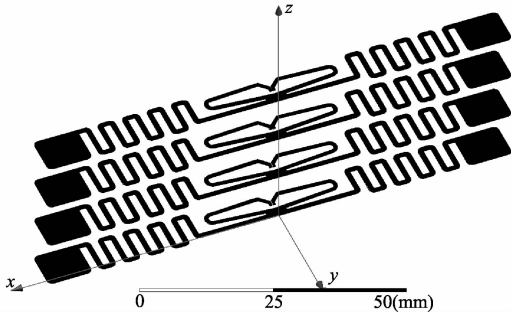


图 1 多标签密集叠放模型

根据有关文献的实验结果^[13]可知,两枚标签耦合造成的影响与多枚标签耦合造成的影响趋势是一致的,也就是说两枚标签的仿真实验所得到的结论已经能够反映某种标签的群读性能,因此针对两标签情形研究互耦效应的频率特性。

电感耦合型标签天线可以通过简化的电路模型来分析,其结构图及对应的等效电路如图 2(a)(b)所示^[14]。

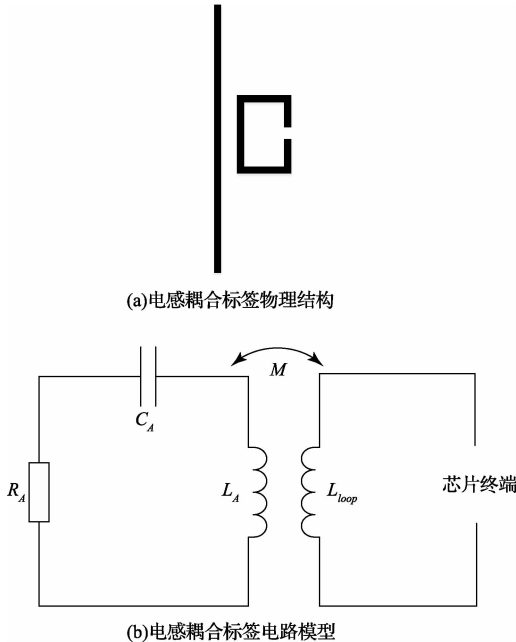


图 2 电感耦合标签物理结构及电路模型

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = Z_{loop} + \frac{(2\pi fM)^2}{Z_{rb}} \quad (1)$$

式中： M 是天线辐射体和馈电环之间的互感，表示他们之间的耦合强度； Z_{loop} 是馈电环自身的阻抗值，取决于馈电环自身的电感值，可表示为：

$$Z_{loop} = j2\pi fL_{loop} \quad (2)$$

Z_{rb} 是天线辐射体在去掉馈电环后呈现的阻抗值，由辐射体自身电阻 R_A 、电容 C_A 和电感 L_A 构成，在谐振频点 f_0 附近， Z_{rb} 可以由天线在谐振频率附近的辐射电阻 R_r 及品质因数 Q 表征。

$$Z_A = R_r + jR_rQ\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right) \quad (3)$$

则从馈电端口看进去的阻抗实、虚部为：

$$R_{in} = \frac{(2\pi fM)^2}{R_r} \frac{1}{1 + u(f)^2} \quad (4)$$

$$X_{in} = 2\pi fL_{loop} - \frac{(2\pi fM)^2}{R_r} \frac{u(f)}{1 + u(f)^2} \quad (5)$$

式中： $u(f) = Q\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)$ 。可以看出在 $f = f_0$ 频点，辐射体谐振的同时天线输入阻抗的实部达到峰值，天线输入阻抗的虚部取决于馈电环的电感。

根据单标签等效电路模型进一步分析两枚标签密集叠放的天线阻抗,将天线等效为图 3 所示的模型,图中 x 轴上的标签为目标标签,另一枚标签为干扰标签,标签处于彼此的近场区,此时天线各结构通过近场耦合互相影响,导致标签天线的输入阻抗不止是天线自身的馈电环与辐射体电感耦合的结果。

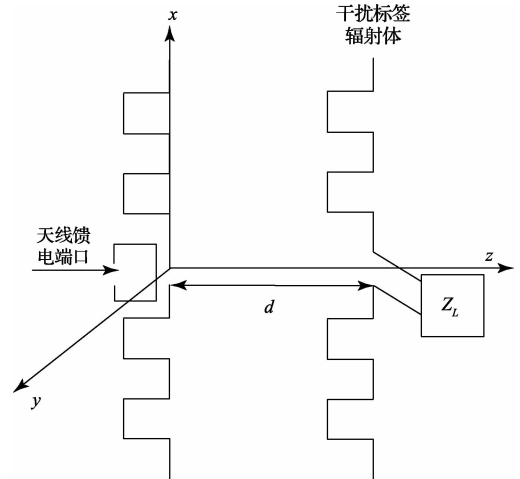


图 3 目标标签与干扰标签等效模型

此时将多标签电磁耦合分为 3 部分：

1) 干扰标签馈电环和芯片组成的环路与辐射体间耦合：由于馈电环的阻抗只有电抗分量，不起辐射作用，芯片则会消耗功率，因此实际其辐射作用的只有弯折辐射体结构。因此干扰标签可以等效为带负载的弯折天线。馈电环阻抗与芯片阻抗 Z_{IC} 组成的环路阻抗为 $Z_{loop} + Z_{IC}$ ，若与辐

基于电路模型得到从馈电口看进去的输入阻抗为：

射体耦合后,相当于辐射体中心有一个负载阻抗 Z_L :

$$Z_L = \frac{(2\pi fM)^2}{Z_{\text{loop}} + Z_C} = \frac{R_{\text{in}} |Z_{\text{rb}}|^2}{R_{\text{rb}}(Z_{\text{loop}} + Z_C)} \quad (6)$$

2) 目标辐射体与干扰辐射体间耦合,常用临近耦合标签的辐射体并不是传统的细直偶极子,而是采用弯折线等结构以实现天线设计的小型化。

根据弯折线谐振频率的计算方法^[15],图3所示的弯折线上的总电感为 m 个相同弯折上带来的电感 L_M 加上直导线 L_s 带来的电感,即:

$$L_T = mL_M + L_s \quad (7)$$

假设弯折偶极子天线与半波振子天线在谐振频率相同时的电感相等,于是由下式可以求解出辐射体的谐振频率:

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \lambda \left(\log \frac{2\lambda}{b} - 1 \right) = L_s + mL_M \quad (8)$$

可以看出相比传统偶极子,弯折线引入了较大电感使偶极子的谐振频率降低,而弯折线靠近耦合时将产生互感,假设由此使目标标签的弯折线上引入了电感 L_{MM} ,则:

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \lambda \left(\log \frac{2\lambda}{b} - 1 \right) = L_s + mL_M + L_{MM} \quad (9)$$

辐射体等效电感增加,谐振频率降低。随着标签间隔的减小,弯折线间的耦合程度将进一步增强,导致谐振频率偏移量也增大。设耦合后的目标标签辐射体阻抗为 Z_{rb}' ,则 Z_{rb}' 的实、虚部将向低频偏移。

3) 目标标签的辐射体与馈电环耦合,阻抗变为 Z_{rb}' 的辐射体与阻抗为 Z_L 的负载形成回路与馈电环耦合,最终的端口输入阻抗变为 Z_{in}' :

$$Z_{\text{in}}' = Z_{\text{loop}} + \frac{(2\pi fM)^2}{Z_{\text{rb}}' + Z_L} \quad (10)$$

由于在谐振频率附近的较小频率范围内 $(2\pi fM)^2$ 变化幅度较小,因此 Z_{rb}' 在谐振频率附近的偏移将对天线输入阻抗造成较大影响, Z_{rb}' 向低频偏移也将导致天线输入阻抗向低频偏移的结果。

2.2 天线阻抗频率偏移的仿真验证

采用 ANSOFT HFSS13.0 进行密集标签建模,求解标

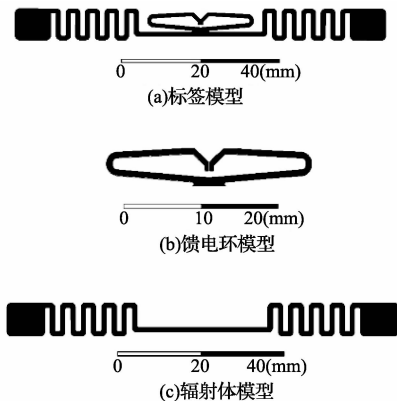


图4 单标签及分割部分仿真模型

签天线的输入阻抗以验证理论分析过程。图4(a)所示的电感耦合型的标签,其馈电环和辐射体仿真模型如图4(b)(c)所示,天线端口连接 Monza5 芯片,该芯片可等效为 1800Ω 电阻与 1.07 pF 电容并联。阅读频率 f_{read} 为 920 MHz 时,仿真得端口输入阻抗 $Z_{\text{in}}(f_{\text{read}})$ 为 $8 + j168$,芯片阻抗 $Z_C(f_{\text{read}})$ 为 $14 - j160$,达到了很好的共轭匹配。在 920 MHz ,独立的馈电环阻抗约为 $j151$ (实部接近0,可以忽略);弯折辐射体从中心看进去输入阻抗为 $Z_{\text{rb}} = 30 - j64$ 。根据式(1)可以求出互感 M 约为 6 nH 。

本文的频率分析考察 $0.8 \sim 1.2 \text{ GHz}$ 范围,在该频段内仿真得到馈电环输入阻抗如图5所示,可以近似写出其阻抗表达式为:

$$Z_{\text{loop}} = j(2.24 \times 10^{-7} f - 52.35) \quad (11)$$

芯片等效电阻和电容为 R 和 C ,则阻抗为:

$$Z_C = \frac{R}{1 + (2\pi fRC)^2} - j \frac{2\pi fR^2C}{1 + (2\pi fRC)^2} \quad (12)$$

将 Z_{loop} 和 Z_C 代入式(6)可以计算得 Z_L 。

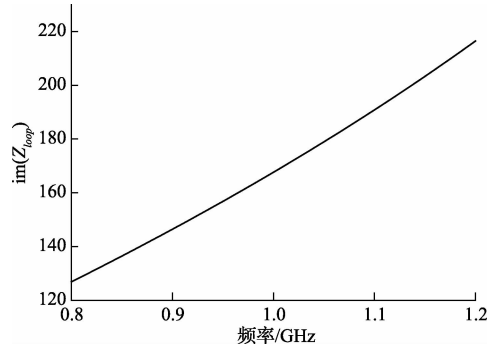


图5 馈电环阻抗(虚部)随频率变化

为了验证互耦时标签天线阻抗的偏移现象,采用图6所示的仿真模型,下面的是目标标签的辐射体,上面的是干扰标签的辐射体,中心设置了集总负载为 Z_L 。仿真得耦合的辐射体阻抗虚部如图7所示。可以看出,单标签的辐射体的谐振频点为 1 GHz ,两标签辐射体的阻抗虚部向低频偏移,在标签间隔为 10 mm 时,偏移至 0.93 GHz ,频率偏移量达到 70 MHz 。

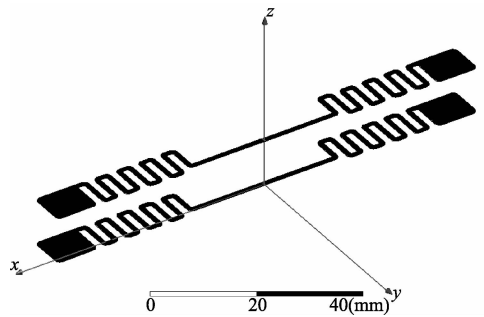


图6 两辐射体叠放仿真模型

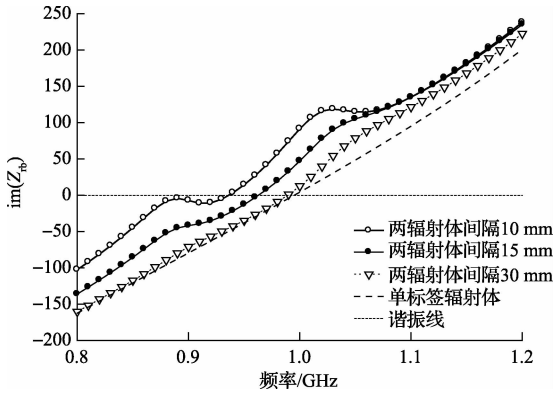


图 7 辐射体阻抗(虚部)随频率变化

进一步将辐射体阻抗的仿真结果及负载值代入式(10), 计算得该标签受互耦影响后的天线输入阻抗 Z_{in}' 。为了对比, 采用图 8 所示的原标签叠放仿真模型, 可以直接获得天线输入阻抗的仿真值。 Z_{in}' 虚部的计算值与仿真值如图 9 所示, 可以看出间隔相同时计算值与仿真值的变化曲线非常接近, 证明了采用图 3 所示模型计算具有较高的准确性。

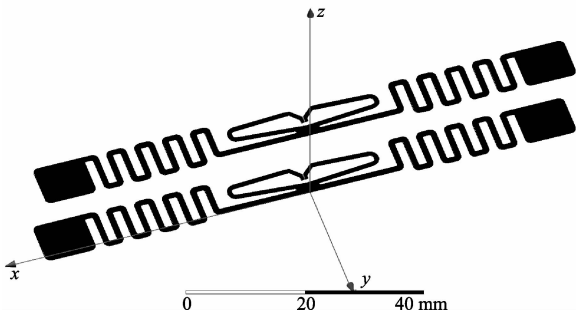


图 8 原标签叠放仿真模型

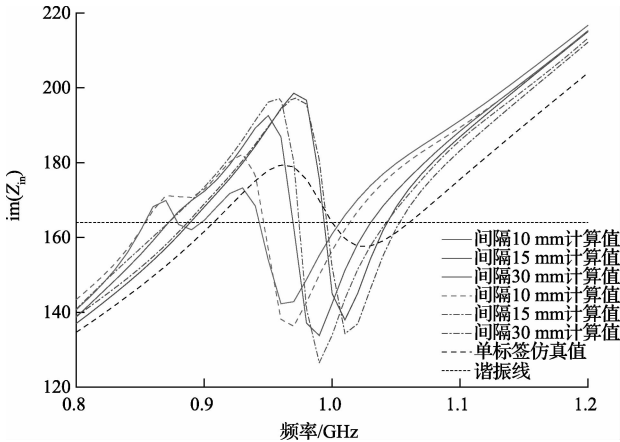


图 9 天线输入阻抗随频率变化

可以看出天线输入阻抗同样发生了频率偏移, 且偏移量与辐射体阻抗频率偏移量近似, 单标签时为 1 GHz, 间隔为 10 mm 变为 0.94 GHz。

由此验证了本文的分析过程, 即弯折辐射体间互相耦合导致标签天线阻抗向低频偏移, 从而导致标签馈电口看进去的输入阻抗发生了频率偏移。虽然标签天线的弯折幅

射体的设计有利于降低天线谐振频率, 从而有利于天线的小型化设计, 但也造成天线间互耦程度增加, 且随着间距的减小, 互耦更加严重。

3 互耦效应的仿真及分析

在阅读器天线远场区, 标签芯片获得的能量可表示为:

$$P_{\text{tag}} = \frac{P_i G_r \lambda^2}{4\pi R^2} G_t \tau \quad (13)$$

式中: P_i 为阅读器发射功率, G_r 为阅读器天线增益, λ 为波长, R 为标签到阅读器天线的距离, G_t 为标签天线增益, τ 为功率传输系数。

单个标签的功率传输系数为:

$$\tau(f) = \frac{4R_{in}(f)R_{ic}(f)}{|Z_{in}(f) + Z_{ic}(f)|^2} \quad (14)$$

密集时目标标签的功率传输系数为:

$$\tau'(f) = \frac{4R_{in}'(f)R_{ic}(f)}{|Z_{in}'(f) + Z_{ic}(f)|^2} \quad (15)$$

由于芯片阻抗的实虚部在 0.8~1.2 GHz 频段内变化较平缓, 因此密集时目标标签的功率传输系数的变化主要取决于标签天线阻抗的变化, 如图 10 所示。

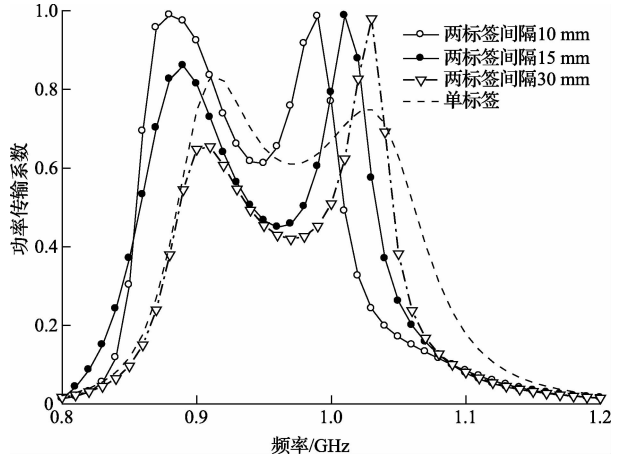


图 10 功率传输系数的频率偏移情况

可以看出相比单个标签, 密集标签受互耦效应影响时功率传输系数也随着阻抗的频率偏移而呈现偏移的趋势, 同时幅度也发生了不同程度的变化。

RFID 系统进行标签读取时一般对阅读器设置固定的读取频率, 图 11 给出了读取频率为 920 MHz 时功率传输系数随标签间隔变化的曲线, 包括两个标签和图 1 所示的四个标签(底层标签为目标标签)的仿真结果。可以看出天线输入阻抗的频率偏移导致在固定读取频率时标签的功率传输系数相比单个标签下降了很多, 且由于不同标签间隔对应的阻抗偏移量不同导致功率传输系数对间隔因素敏感, 这将导致相同的标签在相同发射功率情况下传递给芯片的功率 P_{tag} 不稳定, 甚至会难以激活。

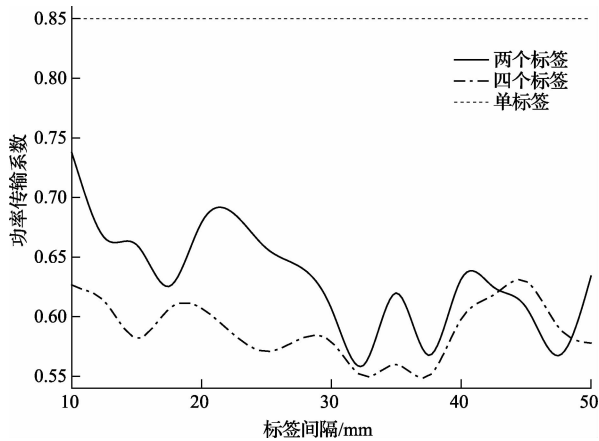


图 11 功率传输系数在读取频率(920 MHz)随间隔变化情况

4 结 论

针对电感耦合型标签在密集情况下受互耦效应的影响,从天线输入阻抗在频率上的变化展开分析,提出弯折辐射体间互相耦合导致天线输入阻抗不同程度地向低频偏移,并仿真验证了分析过程。根据本文理论分析和仿真数据,可以看出采用弯折辐射体结构的标签天线不利于在密集环境下的群读,弯折线间互相耦合,谐振频率偏移较大,导致目标标签的性能也随频率变化。虽然这种频率偏移并不一定会导致标签性能恶化,但是必将导致标签性能不稳定,对标签间隔等因素较敏感,从而不利于标签的密集群读。

由于密集标签的实际布放场景较复杂,并且多标签辐射场也较复杂,仅选择天线阻抗频率特性这个角度来分析密集标签的性能,为了更全面、更精确的分析密集标签性能,还需要研究复杂排布的场景,并需要研究标签天线增益的频率特性。

参考文献

- [1] 谈宇奇,王雪,刘长. 物联网室内运动目标协作信息融合跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 352-358.
- [2] 肖春华. 基于 RFID 多功能烟酒防伪装置设计与实现[J]. 电子测量技术[J]. 2014, 37(4): 64-67.
- [3] 张利,袁猛猛. 卫星 RFID 多碰撞位联合锁位动态可调整算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8): 773-780.
- [4] CHOI J S, KANG M, ELMASRI R, et al. Investigation of impact factors for various performances of passive UHF RFID system [C]. 2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), Sitges, 2011: 152-159.
- [5] ASL S E, GHASR M T, ZAWODNIOK M, et al. Preliminary study of mutual coupling effect on a passive RFID antenna array[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE

International, Minneapolis, 2013: 138-141.

- [6] 佐磊,何怡刚,李兵,等. 标签密集环境下天线互耦效应研究[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 441021-441029.
- [7] LU F, CHEN X S, YE T T. Performance analysis of stacked RFID tags [C]. IEEE International Conference on RFID, Orlando, 2009: 330-337.
- [8] 宋祖勋,毋宝玉,张朋. 一种应用于近场测试系统的小型化超宽带 Vivaldi 天线设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6): 99-102.
- [9] 谢晶晶,赵东东. UHF RFID 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
- [10] 王善进,杨雷,陈琼,等. 一种宽带 UHF 印刷偶极子天线的设计[J]. 微波学报, 2013, 29(2): 31-34.
- [11] BJORNINEN T, SYDANHEIMO L, UKKONEN L, et al. Advances in antenna designs for UHF RFID tags mountable on conductive items[J]. Antennas and Propagation Magazine, IEEE, 2014, 56(1): 79-103.
- [12] SUN X B, XIE J, CAO M Y. RFID tag antenna design based on an improved coupling source shape [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 532-534.
- [13] 肖芳鑫,张雪凡,李帅,等. 密集布放环境下 RFID 标签受限链路[J]. 上海大学: 自然科学版, 2014, 20(5): 624-632.
- [14] HE Y, ZHAO B. A Novel UHF RFID dual-band tag antenna with inductively coupled feed structure[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Shanghai, 2013: 2739-2743.
- [15] HU Z, COLE P H, ZHANG L. A method for calculating the resonant frequency of meander-line dipole antenna[C]. 2009. 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Xi'an, 2009: 1783-1786.

作者简介

彭章友,教授。主要研究方向为无线通信技术、通信信号处理、交通信息工程与控制。

E-mail: zypeng@mail.shu.edu.cn

任秀方,硕士研究生。主要研究方向为 UHF RFID 标签天线研究与设计。

E-mail: 954149658@qq.com

孟春阳,硕士研究生。主要研究方向为 UHF RFID 标签和阅读器天线的设计。

E-mail: mcy61346688@163.com

李帅,硕士研究生。主要研究方向为 UHF RFID 标签测试方法及测试平台的搭建。

E-mail: lishuai0214@139.com

陈文涛,硕士研究生。主要研究方向为 UHF RFID 小信号处理。

E-mail: wtwtchen@163.com