

## 超高频射频识别小间隔双标签天线增益特性研究

彭章友 任秀方\* 孟春阳 李帅  
(特种光纤与光接入网省部共建重点实验室 上海 200072)

**摘要:** 该文针对超高频射频识别(UHF RFID)标签自身参数和标签间互相耦合对标签天线增益的影响,推导了相应的理论模型。首先从辐射场的角度将标签等效为带集总负载的对称振子天线,然后基于对称振子天线阵列的理论建立了小间隔双标签天线增益的简化模型,并对密集多标签应用场合进行了简单拓展,仿真研究验证了所建模型的有效性。最后对增益的方向性和辐射效率进行了研究,研究结果对密集标签的性能研究具有一定的指导意义。

**关键词:** 天线; 射频识别; 密集标签; 互相耦合

中图分类号: TN821+.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)07-1774-05

DOI: 10.11999/JEIT141371

## Study on Gain Characteristics of Dual Ultra-high-frequency Radio Frequency Identification Tag Antennas with Small Interval

Peng Zhang-you Ren Xiu-fang Meng Chun-yang Li Shuai

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

**Abstract:** Parameters of the Ultra-High-Frequency Radio Frequency Identification (UHF RFID) tags and the mutual coupling effect have great impact on antenna gain, and a corresponding theoretical model is developed. Firstly, from the perspective of the radiation field, the tag is equivalent to dipole antenna with lumped load. Then based on the theory of dipole array, a simplified gain model of dual tag antennas with small interval is derived, and application of multiple tags is expanded simply. The simulation results show that the model is effective. Finally, the directivity and radiation efficiency are studied. The results provide a theoretical guidance for the research of intensive tags performance.

**Key words:** Antenna; Radio Frequency Identification (RFID); Intensive tags; Mutual coupling

### 1 引言

在密集环境下超高频射频识别(UHF RFID)标签的辐射特性除了与天线尺寸等自身参数有关,还受到标签间互相耦合的影响<sup>[1-3]</sup>。由于UHF RFID标签天线往往结构复杂,无论是单标签还是密集标签,辐射特性的理论分析都较困难,往往需要利用有限元等仿真方法获得相关参数<sup>[4,5]</sup>。文献[6,7]将标签天线等效为类偶极子,建立了标签阵列中末端标签的电流模型,为密集标签提供了偶极子简化的思路。文献[8,9]结合二端口网络和天线散射理论推导出了密集环境下的标签天线间互阻抗计算表达式,分析了互耦效应,后者还从辐射场的角度分析了标签天线方向图,但是两者都只适用于标签处于彼此远场区即大间隔的情况。

因此还要针对小间隔标签天线的辐射特性进行

理论研究。本文将常用的电感耦合型标签等效为对称振子天线,基于对称振子天线阵列的思想<sup>[10]</sup>推导出小间隔的双标签天线增益模型,并拓展到多标签应用场合。最后仿真验证了该模型,并分析了增益的方向性和辐射效率,对密集标签的性能研究具有一定指导意义。

### 2 UHF RFID 标签等效模型

标签天线一般是基于对称振子天线来设计的,常用弯折线天线以减小天线尺寸<sup>[11,12]</sup>,如图1所示。弯折线天线的辐射特性与对称振子天线的辐射特性相近,天线上电流可以近似为正弦分布<sup>[13]</sup>。沿 $y$ 方向的垂直相反的电流产生的电场近似抵消,只有同一方向的从左向右的正弦电流才产生辐射,辐射场的方向图与对称振子天线相似。超高频段的弯折线辐射效率接近100%<sup>[13]</sup>,天线输入功率几乎全部用于辐射和负载损耗。假设弯折线的辐射场为 $\mathbf{E}_{\text{md}}(w, m, \dots, \theta)$ ,将弯折线天线等效为辐射场近似的对称振子天线,等效长度为 $2l_e$ ,即 $\mathbf{E}(l_e, \theta) = \mathbf{E}_{\text{md}}(w, m, \dots, \theta)$ 。

应用中标签天线的设计除了采用弯折线结构还

2014-10-27 收到, 2015-01-08 改回, 2015-05-11 网络优先出版

上海市科学技术委员会(12510500600)资助课题

\*通信作者: 任秀方 imnotno1@126.com

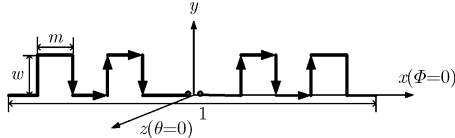


图 1 弯折线天线

常常采用 T 型匹配<sup>[14]</sup>、电感耦合<sup>[15]</sup>等方式进行阻抗匹配，本文针对电感耦合型标签进行分析，其物理结构及对应的等效电路如图 2 所示<sup>[16]</sup>。

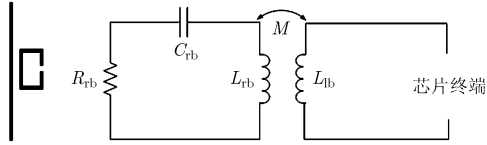


图 2 电感耦合标签物理结构及电路模型

馈电环上没有辐射电阻不产生辐射，目标标签的输入功率全部输入至辐射体中心，因此分析该天线的辐射场，可以将辐射体中心视为馈电端口，而将馈电环和标签芯片等效为端口处的负载，等效的阻抗为

$$Z_{Le} = \frac{(2\pi f M)^2}{Z_{lp} + Z_C} = \frac{R_{in} \cdot |Z_{rb}|^2}{R_{rb}(Z_{lp} + Z_C)} \quad (1)$$

其中  $M$  是天线辐射体和馈电环之间的互感，表示它们之间的耦合强度； $Z_{lp}$  是馈电环阻抗，取决于馈电环自身的电感值  $L_{lp}$ ； $R_{in}$  为馈电环端口处的输入阻抗的实部； $Z_{rb}$  为辐射体阻抗值， $R_{rb}$  是它的实部。

于是从辐射场的角度标签被等效为带有集总负载  $Z_{Le}$  的对称振子天线，单个标签天线的辐射场与等效长度有关，与负载阻抗无关。

### 3 小间隔的双标签天线增益建模与仿真验证

#### 3.1 小间隔的双标签天线增益建模

阅读器根据多标签防撞协议<sup>[17]</sup>对阅读范围内的多个标签依次读取，某时刻目标标签只有一个，其他的都是干扰标签。图 3(a)为两枚平行叠放的标签，目标标签沿  $x$  轴放置，干扰标签与目标标签的间隔为  $d$ 。这可以等效为图 3(b)对称振子天线阵列，弯折线用长  $2l_e$  的对称振子天线来等效，振子 1 端口输入功率为  $P_{in}$ ，振子 2 集总负载阻抗值  $Z_{Le}$  由式(1)求出。于是双标签天线辐射问题便转化为带负载天线阵列的辐射问题。

假设振子 1 和振子 2 上的波腹电流为  $I_{M1}$ 、 $I_{M2}$ ，输入电流为  $I_{in1}$ 、 $I_{in2}$ ，两天线的合成场为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = j \frac{60 I_{M1}}{r} e^{-jkr} f_{E/H}(\theta) \left( 1 + \frac{I_{M2}}{I_{M1}} e^{jkd \cos \theta} \right) \quad (2)$$

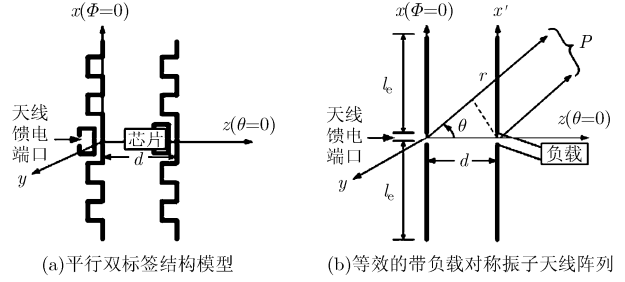


图 3 平行双标签及等效辐射模型

其中， $f_{E/H}(\theta)$  是 E 面 ( $x-z$  面) 或者 H 面 ( $y-z$  面) 等效的方向函数：

$$\left. \begin{aligned} f_E(\theta) &= \frac{\cos(kl_e \sin \theta) - \cos(kl_e)}{\cos \theta} \\ f_H(\theta) &= 1 - \cos(kl_e) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据文献[10]可以推导出双标签天线增益为

$$G(\theta) = \frac{4\pi r^2 |\mathbf{E}|^2}{P_{in} 2\eta_0} = \frac{4\pi r^2}{\frac{1}{2} |I_{M1}|^2 R_{rL}} \cdot \frac{\left| j \frac{60 I_{M1}}{r} e^{-jkr} f_{E/H}(\theta) \left( 1 + \frac{I_{M2}}{I_{M1}} e^{jkd \cos \theta} \right) \right|^2}{2\eta_0} \\ = \frac{120 f_{E/H}^2(\theta) \left| 1 - \frac{Z_{21}}{Z_{22} + Z_{Le}} e^{jkd \cos \theta} \right|^2}{\text{Re} \left( Z_{11} - \frac{Z_{21}^2}{Z_{22} + Z_{Le}} \right) \cdot \sin^2(kl_e)} \quad (4)$$

式中  $\eta_0 = 120 \pi$ ， $R_{rL}$  是归于波腹电流  $I_{M1}$  的天线阻抗的实部， $Z_{11}$  ( $Z_{22}$ )、 $Z_{21}$  ( $Z_{12}$ ) 分别为振子 1(振子 2) 归于输入电流  $I_{in1}$  ( $I_{in2}$ ) 的自阻抗和互阻抗。双标签天线增益除了与天线自阻抗有关，还与互阻抗和负载阻抗有关。

天线增益由天线辐射效率和方向性系数决定，若不考虑天线损耗功率，则天线辐射效率为

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{\frac{1}{2} |I_{in1}|^2 R_{in} - \frac{1}{2} |I_{in2}|^2 R_{Le}}{\frac{1}{2} |I_{in1}|^2 R_{in}} \\ = 1 - \frac{\left| \frac{Z_{21}}{Z_{22} + Z_{Le}} \right|^2 \cdot R_{Le}}{\text{Re} \left( Z_{11} - \frac{Z_{21}^2}{Z_{22} + Z_{Le}} \right)} \quad (5)$$

天线的方向性系数表示天线方向性的强弱，根据式(4)，式(5)可得

$$D(\theta) = \frac{G(\theta)}{\eta} \quad (6)$$

式(4)~式(6)针对平行叠放的双标签，综合考虑了标签天线自身参数(等效尺寸、标签芯片阻抗值)、

辐射体间互耦效应导致的变化参数(辐射体自阻抗和互阻抗)及阅读场景因素(阅读角度)等主要影响因素,能用来定量分析 UHF RFID 双标签的天线增益。对于排布复杂的多标签场合,标签并非平行叠放,在远场会有不同的方向函数。根据双标签天线增益的推导过程,复杂排列的  $N$  标签的增益模型可以拓展为

$$G(\theta) = \frac{4\pi r^2 |\mathbf{E}|^2}{P_{in} 2\eta_0} = \frac{120 f_{E/H}^2(\theta) \left| 1 + \sum_{n=2}^N \frac{f_n(\theta, \varphi) \mathbf{I}_{Mn}}{f_{E/H}(\theta) \mathbf{I}_{M1}} e^{jk(r_n - r)} \right|^2}{\text{Re} \left( \mathbf{Z}_{11} + \sum_{n=2}^N \frac{\mathbf{I}_{Mn} \mathbf{Z}_{1n}}{\mathbf{I}_{M1}} \right) \cdot \sin^2(kl_c)} \quad (7)$$

式中  $\mathbf{I}_{Mn}/\mathbf{I}_{M1}$  可由  $n$  端口网络求出,  $r_n$  和  $r$  分别为第  $n$  个标签和目标标签至 E/H 面上远区场点的距离。可以看出双标签天线增益除了与天线自身阻抗有关,还与互阻抗和负载阻抗有关。

由于标签天线的场点应为阅读器天线所在场点,为了满足模型推导条件  $r \gg d$ , 本文将标签间隔限定在  $w < d < \lambda/(2\pi)$ ,  $w$  为标签宽度。当  $d > \lambda/(2\pi)$  时,可根据文献[9]按远场散射分析;当标签过于密集( $d > w$ )时难以用对称振子天线理论来分析。由于标签交错放置比平行叠放的干扰小,尤其是交错角度接近  $90^\circ$  时几乎不造成干扰,并且多标签非平行叠放的情形建模较复杂,因此本文针对平行叠放的双标签具体分析。

### 3.2 标签天线仿真建模与验证

本文采用 ANSOFT HFSS13.0 进行多标签建模和仿真验证。标签原型、馈电环、辐射体如图 4 所示,标签芯片 Monza5 可等效为  $1800 \Omega$  电阻与

$1.07 \text{ pF}$  电容并联。在  $920 \text{ MHz}$  时天线增益达到  $2.1 \text{ dBi}$ 。将  $\mathbf{Z}_{in}$ ,  $\mathbf{Z}_{lp}$  和  $\mathbf{Z}_{rb}$  代入式(1)可以求出等效负载为  $\mathbf{Z}_{Le} = 76.1 + j38.1$ 。

仿真对比了辐射体和线宽为  $1 \text{ mm}$  的对称振子天线的辐射场(仿真指标  $\mathbf{rE} = r \cdot \mathbf{E}$ , 即不考虑远场距离  $r$ )。阅读频率为  $920 \text{ MHz}$  时该辐射体与长度为  $140 \text{ mm}$  的对称振子天线的辐射场方向图几乎完全重叠。

图 5(a)为平行叠放双标签仿真模型,底层标签和上层标签分别为目标标签和干扰标签,干扰标签端口处带有芯片的集总负载,该模型可以得到两标签增益仿真值。图 5(b)为对应的两个辐射体,中心都设置集总端口激励,利用这个模型获取辐射体的自阻抗值和互阻抗值。

针对标签小间隔情况,设置仿真间隔的变化范围是  $10 \sim 50 \text{ mm}$ 。根据式(4)计算  $\theta = 0^\circ$  方向的增益,与增益仿真值进行对比,如图 6(a)所示。增益的理论计算值从  $-2.55 \text{ dBi}$  变化到  $2.17 \text{ dBi}$ ,而实际仿真值从  $-4.02 \text{ dBi}$  变化到  $1.17 \text{ dBi}$ ,曲线变化趋势较一致,且几乎所有间隔对应的数据误差小于  $1 \text{ dBi}$ ,平均误差为  $0.74 \text{ dBi}$ 。仿真证明本文推导的增益模型能够用来定量地分析 UHF RFID 密集标签的天线增益。

### 4 小间隔的双标签天线增益特性研究

方向性系数和辐射效率决定了增益的大小。根据式(5),式(6)求解不同间隔的方向性系数和辐射效率,如图 6(b),6(c)所示。可以看出虽然方向性系数随间隔变化幅度较小。理论计算值从  $2.01 \text{ dB}$  变化到  $3.09 \text{ dB}$ ,相比增益变化曲线,方向性系数随间隔变化较平缓。图 6(c)所示辐射效率从  $34\%$  增加到  $80\%$ ,且变化幅度与增益较一致。通过图 6 可以得

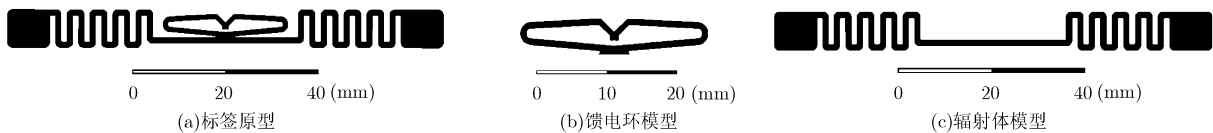


图 4 单标签及分割部分仿真模型

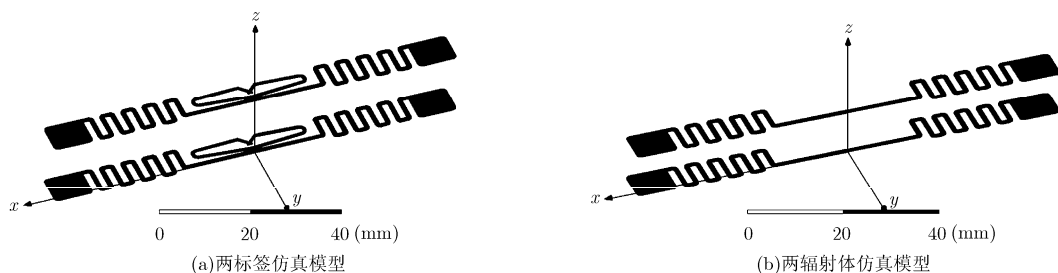


图 5 两天线平行叠放仿真模型

出：标签越近增益幅值的衰减越大，这主要源于辐射效率的衰减，即干扰标签在目标标签的场的作用下负载损耗得更多，从而降低了目标标签的辐射功率。研究密集多标签的增益幅值，可以针对辐射效率来分析。

图 7 所示双标签天线的 H 面增益方向图呈现一定的方向性。式(4)中  $\phi\left(-\frac{Z_{21}}{Z_{22} + Z_{Le}}\right)$  是两辐射体电流相位差，在  $(\pi/2, \pi)$  之间，于是  $d$  趋近于 0 时  $\frac{\partial G(\theta, d)}{\partial \theta}\bigg|_{\theta=0^-} < 0$ ， $\frac{\partial G(\theta, d)}{\partial \theta}\bigg|_{\theta=0^+} > 0$ ，出现了图 7 中标签间隔为 10 mm 时的凹点，此时干扰标签对目标标签起到反射器的作用； $kd \cos \theta$  是干扰标签相对目标标签所走过的相位差，在  $(0, 1)$  之间，随着  $d$  增

加总的相位差跳跃到  $(-\pi, 0)$  的范围，这种反射作用逐渐减弱。还可以计算出  $G(180^\circ, d) > G(0^\circ, d)$  故标签在  $\theta = 180^\circ$  的增益大于  $\theta = 0^\circ$  的增益。这解释了图 7 所示标签天线增益方向性的变化，也为密集标签群读提供了指导：结合角度、间隔、阻抗关系等确定每一枚干扰标签相对目标标签的相位差，再综合起来，可以确定目标标签在哪个方向上可以获得最大增益。

### 5 结束语

本文将标签弯折线等效为对称振子天线，同时将馈电环和芯片等效为集总负载，然后基于对称振子天线阵列的思想，推导了 UHF RFID 标签自身参数和小间隔时临近标签对天线增益影响的理论模

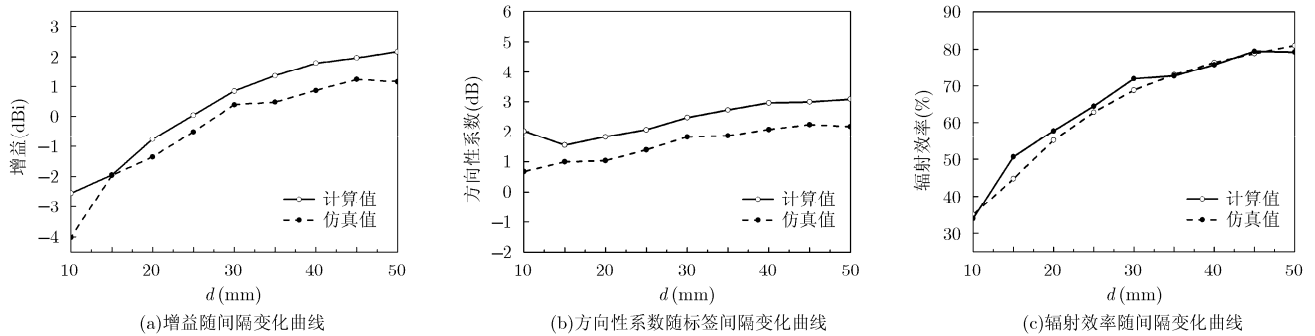


图 6 增益、方向性系数、辐射效率随标签间隔变化图

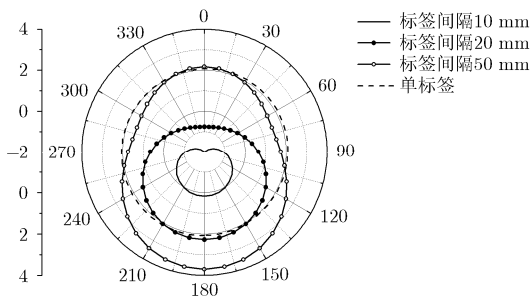


图 7 不同间隔时标签天线增益方向图

型，仿真和理论计算结果的一致性验证了该模型的有效性。增益方向性分析有助于确定标签的最佳读取方向，而研究增益幅值的衰减程度可以分析辐射效率，这对密集标签的性能研究具有指导意义。

但是本文的理论建模仍存在一定的不足之处，一方面，标签弯折线的等效长度、阻抗和互阻抗等需要利用仿真工具求得，要建立更精确的增益模型，还需要从辐射场的角度对弯折线进行深入分析；另一方面，本文最终建立的增益模型适用于电感耦合型标签天线，还需要扩展到其他类型的标签天线。

### 参考文献

- [1] Dobkin D M and Weigand S M. UHF RFID and tag antenna scattering part I: experimental results-first in a two-part series on the use of radio frequency communications to identify physical objects in the commercial supply chain[J]. *Microwave Journal*, 2006, 49(5): 170-190.
- [2] Choi J S, Kang M, Elmasri R, et al. Investigation of impact factors for various performances of passive UHF RFID system[C]. *IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications*, Sitges, Spain, 2011: 152-159.
- [3] Asl S E, Ghasr M T, Zawodniok M, et al. Preliminary study of mutual coupling effect on a passive RFID antenna array [C]. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Minneapolis, USA, 2013: 138-141.
- [4] Jain A and Harish A R. Performance study of RFID tags placed on metallic cylinders[C]. *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications*, Torino, Italy, 2013: 1052-1055.
- [5] Johnson J and Sainati R. Investigation of UHF RFID tag backscatter[C]. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Honolulu, USA, 2007: 2753-2756.

- [6] Dobkin D M and Weigand S M. UHF RFID and tag antenna scattering, part II: theory[J]. *Microwave Journal*, 2006, 49(6): 86–96.
- [7] Weigand S M and Dobkin D M. Multiple RFID tag plane array effects[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, USA, 2006: 1027–1030.
- [8] 佐磊, 何怡刚, 李兵, 等. 标签密集环境下天线互偶效应研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(4): 1021–1029.  
Zuo Lei, He Yi-gang, Li Bing, *et al.*. Theory and measurement for mutual coupling effect of ultra high frequency radio- frequency identification in dense environments[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 1021–1029.
- [9] Lu F, Chen X S, and Ye T T. Performance analysis of stacked RFID tags[C]. IEEE International Conference on RFID, Orlando, USA, 2009: 330–337.
- [10] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 83–85.  
Zhong Shun-shi. Antenna theory and technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 83–85.
- [11] Lagunes-Aranda L F, Carrion-Rivera L E, Zamora-Mejia G, *et al.*. Improvement in read range of an UHF RFID newborn hospital monitoring system using meander line antennas[C]. IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, Bogota, Colombia, 2014: 1–6.
- [12] Ma Z L, Jiang L J, Xi J, *et al.*. A single-layer compact HF-UHF dual-band RFID tag antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 1257–1260.
- [13] Endo T, Sunahara Y, Satoh S, *et al.*. Resonant frequency and radiation efficiency of meander line antennas[J]. *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, 2000, 83(1): 52–58.
- [14] Bjorninen T, Sydanheimo L, Ukkonen L, *et al.*. Advances in antenna designs for UHF RFID tags mountable on conductive items[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2014, 56(1): 79–103.
- [15] Sun X B, Xie J, and 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.
- [16] Son H W and Pyo C S. Design of RFID tag antennas using an inductively coupled feed[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(18): 994–996.
- [17] Klair D K, Chin K W, and Raad R. A survey and tutorial of RFID anti-collision protocols[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2010, 12(3): 400–421.
- 彭章友: 男, 1965 年生, 教授, 博士, 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等。
- 任秀方: 女, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为 RFID 标签天线。
- 孟春阳: 男, 1990 年生, 硕士生, 研究方向为 RFID 读写器和标签天线。
- 李 帅: 男, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为 RFID 测试平台开发。