

标签分布疏密状态变化情形下超高频天线设计方法研究

佐磊^{*①②} 曹雪兵^① 朱良帅^① 丁雨晴^① 孙梦婷^①

^①(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

^②(合肥工业大学可再生能源接入电网技术国家地方联合工程实验室 合肥 230009)

摘要: 针对标签分布疏密程度的变化会导致其天线与负载的阻抗匹配关系改变进而影响系统性能的问题。该文结合电磁波传播理论和射频识别(RFID)工作原理, 导出了标签分别处于稀疏和密集分布状态下的RFID系统通信链路模型; 结合变压器模型和二端口网络分析方法, 推导了标签密集分布状态时标签天线的互阻抗表达式; 利用功率传输系数和反向散射调制因子, 分析了标签分布疏密程度对RFID系统性能的影响; 基于加载条匹配原理, 提出一种适用于分布疏密状态变化情形的标签天线优化设计方法。仿真实验和实际测量结果表明, 标签密集分布时, 改进标签的性能较原型标签提升16%; 标签稀疏分布时, 改进标签的性能达到原型标签的96%。

关键词: 天线; 天线设计; 射频识别; 分布状态; 耦合效应

中图分类号: TN828; TP391.45

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)01-0158-10

DOI: 10.11999/JEIT211281

Research on the Design Method of UHF Antenna under the Condition of Changing Tag Distribution Density

ZUO Lei^{*①②} CAO Xuebing^① ZHU Liangshuai^①

DING Yuqing^① SUN Mengting^①

^①(Institute of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

^②(National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Access to Grid Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In view of the problem that the change of the density of the label distribution will lead to the change of the impedance matching relationship between the antenna and the load, and then affect the system performance. Based on the theory of electromagnetic wave propagation and the working principle of Radio Frequency Identification (RFID), the communication link models of RFID system with sparse and dense tags are derived. Based on the transformer model and the two-port network analysis method, the mutual impedance expression of the tag antenna in the dense distribution state is derived. Using power transmission coefficient and backscattering modulation factor, the influence of tag density on RFID system performance is analyzed. Based on the principle of loading bar matching, an optimal design method for label antenna is proposed. Simulation and actual measurement results show that the performance of the improved tag is 16% higher than that of the prototype tag when the tags are densely distributed. When the tags are sparsely distributed, the performance of the improved tags reaches 96% of that of the prototype tags.

Key words: Antenna; Antenna Design; Radio Frequency Identification (RFID); Distribution Status; Coupling Effect

1 引言

无源超高频(Ultra High Frequency, UHF)射

频识别(Radio Frequency Identification, RFID)系统利用电磁波反向散射实现信号的传播, 具有成本低、体积小、同时识别等优点, 在物流、仓储与零售等领域中获得了广泛应用。根据无源UHF RFID工作原理, 标签分布疏密程度的变化会导致其天线与负载的阻抗匹配关系改变, 进而影响系统性能^[1]。目前, 对于区分标签分布状态的标签间距临界值尚无明确定义。文献[2,3]通过理论分析和实际测量表

收稿日期: 2021-11-17; 改回日期: 2022-05-17; 网络出版: 2022-05-27

*通信作者: 佐磊 benzl0313@162.com

基金项目: 国家自然科学基金(61971175, 51777050)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61971175, 51777050)

明, 标签间耦合效应对系统性能的影响程度随标签间距增大而减小; 当标签间距小于1.5倍系统工作波长时, 标签间的耦合效应对系统性能影响较大, 标签处于密集分布状态; 标签间距大于1.5倍系统工作波长时, 标签间的耦合效应对系统性能影响较小, 标签处于稀疏分布状态。

标签疏密分布状态变化时, 标签间互耦效应产生的互阻抗会改变标签天线与负载的阻抗匹配关系, 进而影响RFID系统性能。文献[4]给出单标签环境下UHF RFID系统链路计算模型, 指出标签天线与负载的阻抗匹配关系是制约RFID系统性能的关键因素, 但未考虑标签密集分布时互耦效应对系统性能的影响。在互耦效应作用下, 密集分布标签的天线增益、阻抗及其雷达反射截面积等参数均会发生改变。文献[5,6]从标签天线的增益特性与雷达反射截面积两个角度出发, 建立了标签互耦时两种参数计算模型, 并分析了耦合效应对这两者的影响; 在此基础上, 若干学者也从不同方面研究提升标签在密集环境下传输性能的方法。文献[7]提出了基于反向链路调制特性的系统性能分析方法。文献[8]推导出标签密集分布时标签天线互阻抗表达式, 并分析了互耦效应对系统性能的影响。文献[9]基于变压器模型推导了密集分布标签位于彼此近场区的互阻抗表达式, 并在此基础上研究了密集标签频率偏移问题。

优化标签天线结构是改善标签天线性能的一种有效途径。文献[10]对UHF无源标签天线的常用设计方法做了研究和总结, 并通过实例对标签天线阻抗匹配的方法进行了阐述。文献[11]对缝隙天线的理论进行了论述, 并设计了一款采用半缝隙结构、可集成在板状金属结构上的小尺寸标签天线; 测试结果表明所设计标签可实现与传统天线相同的性能。文献[10,11]提出的设计方法提升了标签性能, 但仅适用于标签稀疏分布情形。文献[12]通过引入间隔较近的反向电流的设计方法, 使标签近场区的磁场分布均匀, 提高标签在近场区耦合时的读写性能, 但也带来标签识别距离过短的问题。文献[13]基于八木阵列天线理论, 提出一种适用于密集分布情形标签天线互阻设计方法, 并基于此方法设计了一款应用于密集布放环境下的天线。但所设计的标签天线只适用于密集布放环境, 并未考虑标签处于稀疏分布的情形。

综上所述, 目前对RFID系统标签阻抗匹配特性的讨论及所提出的标签天线设计方法仅针对标签处于稀疏或密集的单一分布状态。然而在实际应用中, 单个标签经常工作于不同分布状态。例如, 某

标签贴附的商品在仓储、上架等环节处于密集分布情形, 而在支付时则处于稀疏分布情形。仅针对单一分布状态设计的标签, 在其分布状态改变时, 会导致系统性能的显著下降。

本文利用变压器模型和二端口网络分析方法, 推导了标签处于稀疏和密集分布状态时的RFID系统链路模型; 基于加载条匹配原理, 提出了一种适用于不同分布情形下的标签设计方法; 以Alien9662标签为原型示例, 在HFSS软件和微波暗箱及室内开阔环境下, 对所提出的设计方法进行了仿真实验与实际测量。

2 无源UHF RFID系统链路模型

2.1 标签稀疏分布时的链路模型

RFID系统链路可分为阅读器至标签的信号通路为前向链路和标签至阅读器的通信链路为反向链路。标签处于稀疏分布状态时其性能接近单标签情形, 因此假设阅读器发射天线与标签天线的增益分别为 $G_r(\theta, \varphi)$ 与 $G_t(\theta, \varphi)$, 阅读器天线的发射功率为 P_{r-t} , 设定阅读器天线与标签间的间距为 d , 系统工作频率波长为 λ , 那么标签天线在自由空间下接收功率 P_{t-r} 为^[14]

$$P_{t-r} = P_{r-t} G_r(\theta, \varphi) G_t(\theta, \varphi) \lambda^2 / (4\pi d)^2 \quad (1)$$

定义反射系数 ρ 为

$$\rho = (Z_L - Z_a^*) / (Z_L + Z_a) \quad (2)$$

其中, Z_a^* 为天线阻抗 Z_a 的共轭, Z_L 为天线负载阻抗, 由文献[8]可知, 标签芯片接收到的功率 P_{ic-r} 为

$$P_{ic-r} = P_{t-r} \tau = \frac{P_{r-t} G_r(\theta, \varphi) G_t^2(\theta, \varphi) R_a R_L \lambda^2}{4\pi^2 d^2 |Z_a + Z_L|^2} \quad (3)$$

标签功率传输系数 τ 与反射系数 ρ 有

$$\tau = 1 - |\rho|^2 = 4R_a R_L / |Z_a + Z_L|^2 \quad (4)$$

在反向链路中设阻抗匹配因子为 $K = 4R_a^2 / |Z_a + Z_L|^2$ ^[15], 则标签天线的反向散射功率 P_{t-b} 为

$$P_{t-b} = P_{t-r} K G_t(\theta, \varphi) = \frac{P_{r-t} G_r(\theta, \varphi) G_t^2(\theta, \varphi) R_a^2 \lambda^2}{4\pi^2 d^2 |Z_a + Z_L|^2} \quad (5)$$

标签通过改变阻抗匹配状态来完成信号调制。设调制因子 $\Delta\rho = |\rho_m - \rho_s|^2$, 则阅读器接收功率 P_{re} 为^[8]

$$P_{re} = \frac{P_{r-t} G_r^2(\theta, \varphi) G_t^2(\theta, \varphi) \lambda^4}{(4\pi d)^2} \Delta\rho \quad (6)$$

2.2 标签密集分布时的链路模型

2.2.1 密集环境下标签天线互阻抗

标签密集分布时, 由电磁波的传播机制可知,

标签间距的改变伴随着标签从彼此的感应近场区变化到辐射远场区。当两个标签位于彼此的近场区时, Friis功率传输公式将不再适用^[9]。因此本文将基于变压器模型和Friis传输方程, 并结合二端口网络分析法分别推导出不同场区下标签间的互阻抗表达式^[16]。

为简化分析过程, 以双标签为例推导标签天线间的互阻抗公式。图1(a)所示为典型的双标签密集分布情形, 其中标签1为目标标签, 标签2为干扰标签, 二者相对方向天线增益分别为 $G_1(\theta_{12}, \varphi_{12})$ 和 $G_2(\theta_{21}, \varphi_{21})$; 图1(b)为双标签等效二端口网络, V_1, V_2 为标签天线1, 2单独位于阅读器天线辐射场区时的感应电压, V_{12}, V_{21} 分别为标签2, 1散射电磁波在标签天线1, 2上产生的感应电压, Z_{12}, Z_{21} 为标签天线间的互阻抗, 标签1,2的自阻抗分别为 $Z_{11} = Z_{a11} + Z_{L11}$, $Z_{22} = Z_{a22} + Z_{L22}$, Z_{a11} , Z_{a22} 为标签天线的阻抗, Z_{L11}, Z_{L22} 为标签的负载阻抗, I_1, I_2 为流经 Z_{a11}, Z_{a22} 上的感应电流。

图1(b)中, $V_{12} = Z_{12}I_2$, $V_{21} = Z_{21}I_1$ 有

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

当标签位于彼此的感应近场区时, 根据文献^[9]可知标签2对标签1天线部分的耦合功率为

$$P_{12} = \frac{U_2^2 |wM_{12}|^2}{32R_{L22}R_{a22}R_{L11}} = \frac{(I_2 |Z_{a22} + Z_{L22}|)^2}{32R_{L22}R_{a22}R_{L11}} |wM_{12}|^2 \quad (8)$$

标签2对标签1天线部分的耦合有功功率被其天线电阻消耗, 因此 P_{12} 也可表示为

$$P_{12} = \left(\frac{U_{12}}{|Z_{a11} + Z_{L11}|} \right)^2 R_{a11} = \left(\frac{I_2 |Z_{12}|}{|Z_{a11} + Z_{L11}|} \right)^2 R_{a11} \quad (9)$$

结合式(8)、式(9)可得

$$\left. \begin{aligned} |Z_{12}| &= \frac{|Z_{a11} + Z_{L11}| |Z_{a22} + Z_{L22}|}{\sqrt{32R_{L22}R_{a22}R_{L11}R_{a11}}} |wM_{12}| \\ \angle(Z_{12}) &= \phi_{12} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

不失一般性, 当 n 个标签密集分布且均处于彼此辐射近场区时, 任意两个标签之间的互阻抗 Z_{ij} 为

$$\left. \begin{aligned} |Z_{ij}| &= \frac{|Z_{a11} + Z_{L11}| + |Z_{a22} + Z_{L22}|}{\sqrt{32R_{L22}R_{a22}R_{L11}R_{a11}}} |wM_{ij}| \\ i, j &\in N, i \neq j \\ \angle(Z_{ij}) &= \phi_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

当标签位于彼此的辐射远场区时, 标签天线1, 2间的互阻抗由Friis传输方程可得^[17]

$$\left. \begin{aligned} |Z_{12}| &= \sqrt{R_{a11}R_{a22}G_1(\theta_{12}, \varphi_{12})G_2(\theta_{21}, \varphi_{21})/(2\pi d_{\lambda 12})} \\ \angle(Z_{12}) &= \phi_2 + 2\pi d_{\lambda 12} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中, 标签1、标签2的相对方向天线增益分别为 $G_1(\theta_{12}, \varphi_{12}), G_2(\theta_{21}, \varphi_{21})$, $d_{\lambda 12} = d_{12}/\lambda$ 为波长数。

不失一般性, 当 n 个标签密集分布且均处于彼此辐射远场区时, 任意两个标签之间的互阻抗 Z_{ij} 为

$$\left. \begin{aligned} |Z_{ij}| &= \sqrt{R_{a11}R_{a22}G_i(\theta_{ij}, \varphi_{ij})G_j(\theta_{ji}, \varphi_{ji})/(2\pi d_{\lambda ij})} \\ \angle(Z_{ij}) &= \phi_j + 2\pi d_{\lambda ij}, i, j \in N, i \neq j \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

2.2.2 密集环境下系统链路模型

标签密集布放时在目标标签的前向链路中由式(3)知标签1芯片的接收功率为

$$P_{ic-r1} = P_{t-r1}\tau_1 = \frac{P_{r-t}G_r(\theta, \varphi)G_{t1}^2(\theta, \varphi)R'_{a11}R'_{L11}\lambda^2}{4\pi^2 d^2 |Z'_{a11} + Z'_{L11}|^2} \quad (14)$$

由于标签间的互耦效应产生的互阻抗使得标签的功率传输系数改变, 此时 τ_1 为

$$\tau_1 = 4R'_{a11}R'_{L11}/|Z'_{a11} + Z'_{L11}|^2 \quad (15)$$

在后向链路中, 由式(5)可得, 标签2天线散射功率为

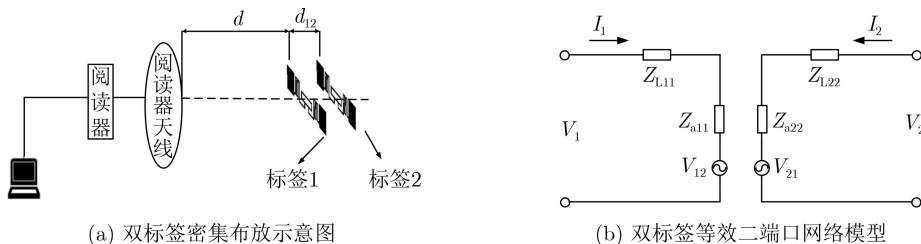
$$P_{t-b2} = \frac{P_{r-t}G_r(\theta, \varphi)G_{t2}^2(\theta, \varphi)R_{a22}^2\lambda^2}{4\pi^2(d + d_{12})^2 |Z_{a22} + Z_{L22}|^2} \quad (16)$$

由式(1)标签1接收到标签2天线散射电磁波功率为

$$P_{r12} = P_{t-b2}G_1(\theta_{12}, \varphi_{12})G_2(\theta_{21}, \varphi_{21})\lambda^2 / (4\pi d_{12})^2 \quad (17)$$

则阅读器接收到的功率为

$$P'_{re} = \frac{(P_{r-t1} + P_{r12})G_r^2(\theta, \varphi)G_{t1}^2(\theta, \varphi)\lambda^4}{(4\pi d)^2} \Delta\rho' \quad (18)$$



(a) 双标签密集布放示意图

(b) 双标签等效二端口网络模型

图1 双标签密集布放及其等效二端口网络模型

当 n 个标签密集布放时, 天线总阻抗为 $Z_{ai} = \sum_{j=1}^n Z_{ij} (i = 1, 2, \dots, n)$, 则标签 i 的调制因子修正为

$$\Delta\rho_i = |\rho_{mi} - \rho_{si}|^2 = 4 \left| \frac{Z_{aai}^* \text{Re}(Z_{ai})}{Z_{ai}(Z_{aai}^* + Z_{ai})} \right|^2 \quad (19)$$

3 标签多分布状态时功率传输系数分析

标签布放疏密程度改变时, 标签间互耦效应产生的互阻抗会导致系统前向链路中功率传输系数的变化进而导致系统性能的不稳定。

3.1 标签互阻抗对功率传输系数的影响

3.1.1 稀疏分布时标签的功率传输系数

仿真设置扫频中心频率为 920 MHz, 标签间距变化为 500~1000 mm, 步进值为 25 mm。仿真结果根据式(4)计算得出。

如图2, 标签之间的距离大于 $d_{12} > 1.5\lambda$ (500 mm), 此时标签处于稀疏分布状态, 互耦效应已经可以忽略, 标签的功率传输系数接近于1性能接近于单标签的情形。

3.1.2 密集分布时标签的功率传输系数

当环境中存在 n 枚标签, 且标签间的距离小于 1.5λ ^[7] 即标签密集分布时, 需要考虑到标签间电磁场的辐射干扰, 标签天线阻抗此时分为天线的自阻抗与互耦效应产生的互阻抗^[12], 则标签天线 i 的阻抗 Z_{aai} 变为

$$Z'_{aai} = R'_{aai} + jX'_{aai} \quad (20)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} R'_{aai} &= R_{aai} + \text{Re} \sum_{j=1}^{n-1} Z_{ij} (i \neq j) \\ X'_{aai} &= X_{aai} + \text{Im} \sum_{j=1}^{n-1} Z_{ij} (i \neq j) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

当标签密集布放时, 标签间的互耦作用导致功率传输系数 τ_i 变化, 此时 τ_i 修正为

$$\begin{aligned} \tau_i &= \frac{4R'_{aai}R_{Lii}}{|Z'_{aai} + Z_{Lii}|^2} \\ &= \frac{4R_{Lii}\text{Re} \left[Z_{ii} - \sum_{j=1}^{n-1} (Z_{ij}^2 / (Z_{jj} + Z_L)) (i \neq j) \right]}{\left| Z_{Lii} + Z_{ii} - \sum_{j=1}^{n-1} (Z_{ij}^2 / (Z_{jj} + Z_L)) (i \neq j) \right|^2} \end{aligned} \quad (22)$$

令 $R'_{aai} = x$, $\tau_i = f(x)$, 式(22)化为一般数学形式

$$f(x) = \frac{4R_{Lii}x}{|x + jX'_{aai} + Z_{Lii}|^2} \quad (23)$$

对 x 求导可得

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{4R_{Lii}(jX'_{aai} + Z_{Lii} - x)}{(x + jX'_{aai} + Z_{Lii})^3} \quad (24)$$

又标签 i 与标签 j 间的互阻抗为 $|Z_{ij}| = \sqrt{R_{aai}R_{ajj}e^{j(2\pi d_{\lambda ij})}}$, 其中 $e = G_i(\theta_{ij}, \varphi_{ij})G_j(\theta_{ji}, \varphi_{ji})$, 波长数 $d_{\lambda ij} = d_{ij}/\lambda$, d_{ij} 为两枚标签间的距离, 假设标签耦合时, 标签天线增益与阅读器增益均保持不变, 且标签天线的阻抗相等, 那么有 $x = 4\pi^2 d_{\lambda ij}^2 (Z_{ij})^2$, 代入式(24)可得

$$\begin{aligned} \frac{df(x)}{dx} &= \frac{4R_{Lii} \left[jX'_{aai} + Z_{Lii} - 4\pi^2 d_{\lambda ij} (Z_{ij})^2 \right]}{(x + jX'_{aai} + Z_{Lii})^3} \\ &= \frac{4R_{Lii} \left[(X'_{aai} + X_{ij} + X_{Lii})^2 + R_L^2 - 4\pi^2 d_{\lambda ij} (Z_{ij})^2 \right]}{(x + jX'_{aai} + Z_{Lii})^3} \end{aligned} \quad (25)$$

由于 $X'_{aai} = -X_{Lii}$, 有 $f'(x) < 0$, 功率传输系数是一个关于 R'_{aai} 的单调递减函数, 由式(21)和式(25)知互阻抗越大 R'_{aai} 越大, 相应的功率传输系数越小。

仿真设置扫描中心频率为 920 MHz, 标签间距 0~500 mm, 步进值为 25 mm。仿真结果由式(22)计算得到。

如图3所示, 当标签间距 $d_{12} < \lambda/2\pi$ (50 mm) 时,

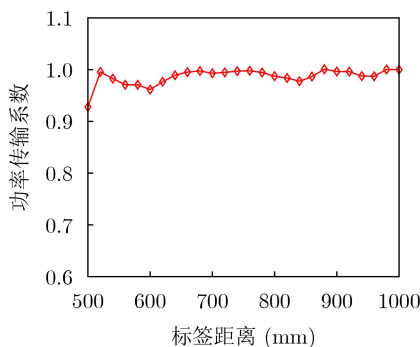


图2 标签稀疏布放时传输系数与标签间距关系

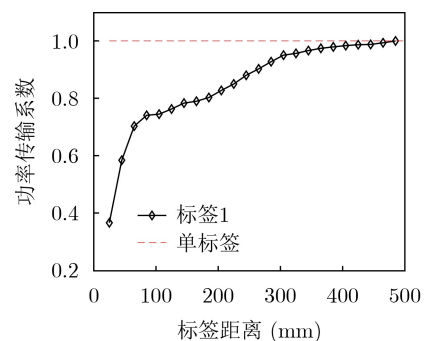


图3 标签密集布放时传输系数与标签间距关系

标签处于彼此的近场区, 此时的互耦效应作用最强, 标签的阻抗严重失配, 功率传输系数低于0.5。当标签之间的间距逐渐增大时, 标签间的互耦效应也逐渐减弱, 功率传输系数也逐渐增大并逐渐接近于单标签情形, 结果与分析相符。

3.2 功率传输系数对标签天线反向散射功率的影响

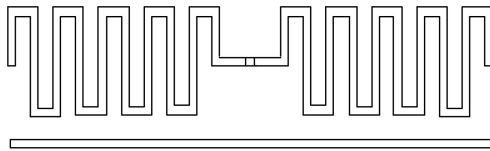
在反向链路中, 将上文式(4)代入式(5)可得反向散射功率 P_{t-b} 与功率传输系数 τ 的关系为

$$P_{t-b} = P_{t-r} G_t(\theta, \varphi) (2 - \tau - \sqrt{1 - \tau}) \quad (26)$$

P_{t-b} 对 ρ 求导得

$$\frac{dP_{t-b}}{d\rho} = P_{t-b} G_t(\theta, \varphi) \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \tau}} - 1 \right) \quad (27)$$

由式(27)可知, 当 $\tau \in [0, 1]$ 时, $P'_{t-b} > 0$, 即标签天线的后向散射功率与功率传输系数 τ 呈单调变化关系。



(a) 加载条匹配天线模型图

4 适用于多分布环境的天线设计

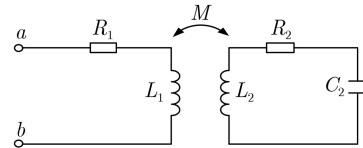
标签分布由稀疏变为密集时, 标签间的互耦效应产生的互阻抗使标签天线的阻抗增大, 造成标签在密集环境下性能严重下降。一般使用调节天线阻抗的方法来调整标签在密集环境下的性能^[18]。通常的阻抗匹配方法, 需要重新设计标签天线的外形。本文选择了在不完全破坏标签外形并保持原有天线性能基础上的标签天线设计方法, 即加载条匹配的方法。

4.1 适用于多分布环境的天线设计方法

4.1.1 基于加载条匹配的标签天线等效电路模型

基于加载条匹配的设计方法给标签天线添加了一条加载条后天线模型如图4(a)所示, 其等效电路可类比于变压器等效电路^[19], 如图4(b)所示。

设 $E = \omega L_2 - 1/\omega C_2$, 则标签天线受到加载条耦合影响下的等效阻抗为



(b) 标签天线的等效电路

图4 基于加载条匹配的天线模型及等效电路

$$\begin{aligned} Z_{ab} &= Z_{11} + (\omega M)^2 Y_{22} = Z_{11} + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + 1/j\omega C_2 + j\omega L_2} \\ &= Z_{11} + \frac{(\omega M)^2 (R_2 - jE)}{R_2^2 - E^2} \end{aligned} \quad (28)$$

不失一般性, 本文采用常见的印刷偶极子天线Alien 9662作为天线分析模型, 因此, 在Alien 9662基础上添加加载条后的天线仿真模型如图5所示。对长为 a 宽为 b 的加载条而言, 其电感 L_2 与宽度有

$$L_2 \propto a [\ln(a/b) + 0.2a/b - 0.3] \quad (29)$$

可以发现, 电感 L_2 与加载条长度有关, 且呈对数关系, 但电感值变化范围较小, 因此在加载条长度不变的条件下可将加载条的电感值视为一定值。加载条的电容 C_2 与加载条宽度关系为

$$C_2 \propto b \quad (30)$$

由式(30)可知加载条的电容值与其宽度线性相关, 因此可以通过调节加载条的宽度值来改变其电容值。

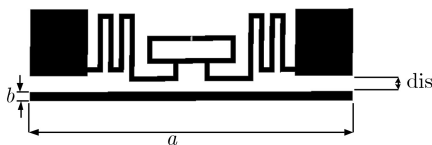


图5 标签天线仿真模型图

4.1.2 加载条的设计方法及性能分析

固定加载条与天线间的距离为2 mm, 加载条宽度变化为2~6 mm, 步进值为2 mm, 设置扫频中心频率为920 MHz。如图6(a)所示, 仿真结果表明随着加载条宽度增加, 天线阻抗实部和虚部也增大, 在谐振频率920 MHz时, 标签天线的输入阻抗的实部仅增加了几欧姆, 而虚部则增加了几十欧姆, 加载条宽度的变化主要影响天线输入阻抗的虚部。

固定加载条的宽度为2 mm, 加载条距天线本体距离变化为2~6 mm, 步进值为2 mm, 扫频中心频率设置为920 MHz。如图6(b)所示, 随着加载条与天线本体间距离增加, 标签天线的阻抗值减小。调节加载条宽度和加载条与天线本体间的距离, 可实现对标签阻抗的精细调节, 基于加载条匹配的天线自阻抗实部可在原型天线实部的基础上调节 $(-5, 5)\Omega$, 虚部阻抗可在原虚部阻抗基础上调节 $(-10, 20)\Omega$ 。

4.2 仿真实验及结果分析

本文采用仿真软件ANSYS HFSS 15.0做标签建模与仿真实验。原型标签采用Alien9662, Monza-5芯片, 基于加载条匹配的改进标签为图5所示, 设置 $a=73$ mm, $b=2$ mm, $dis=2$ mm。为便于论述

Alien9662以下称为标签1，根据本文方法改进的Alien9662以下称为标签2。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^[19]，图7(a)为加载条匹配标签平行叠放的双标签仿真模型。调整两枚标签间距离，使两枚标签的垂直距离从 $\lambda/300$ 增加到 3λ ，并由公式(22)计算工作频率内标签的功率传输系数值。

如图7(b)所示，当标签间的距离 $d_{\lambda 12} < 1.5$ 时，标签为密集布放状态，标签2的功率传输系数始终高于标签1；而当标签天线间的距离 $d_{\lambda 12} > 1.5$ 时，标签处于稀疏状态，彼此间的互耦效应已经可以忽略，标签1和标签2的功率传输系数都已接近于1，仿真结果与上述分析相符。

标签天线的调制因子是反映反向链路传输性能的重要参数^[20]。如图8(a)所示，当标签间距 $d_{12} < 1.5\lambda$ 时，标签2的调制因子相较于标签1的调制因子的波动范围要大，但整体的取值范围更接近于1。而当 $d_{12} > 1.5\lambda$ 时，标签1的调制因子相较于标签2更接近于1。图8(b)为调制因子的计算值，与仿真结果基本吻合。

5 实验结果与分析

实验中采用深圳YND公司的UHF RFID系统，包括阅读器YND3002及阅读器天线YND9028，其中阅读器天线YND9028为圆极化面天线，工作频率为840~960 MHz，增益为9.2 dBi，驻波比小于

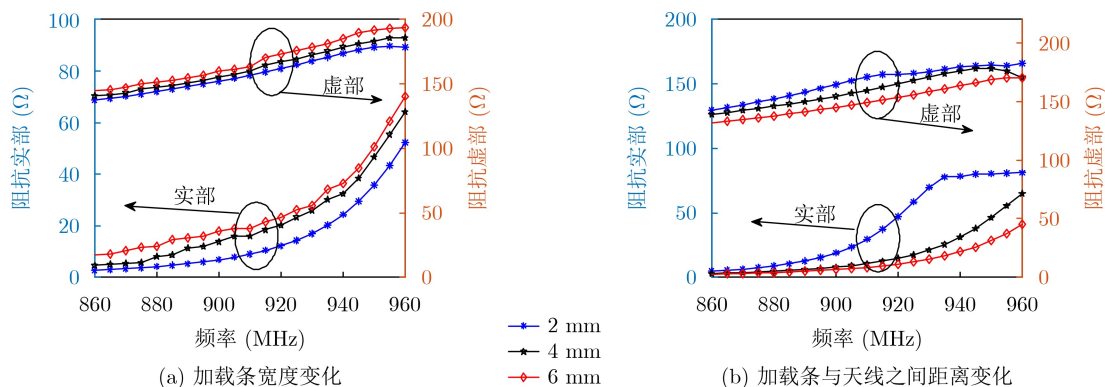


图6 加载条参数变化对天线的影

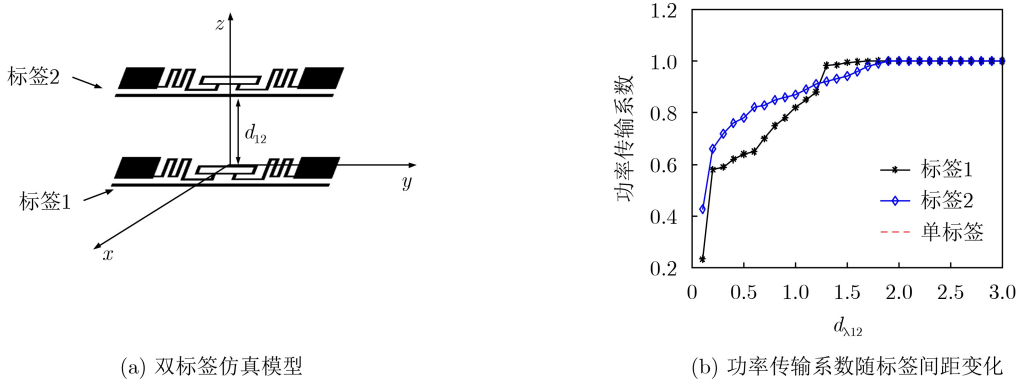


图7 双标签仿真模型及仿真结果

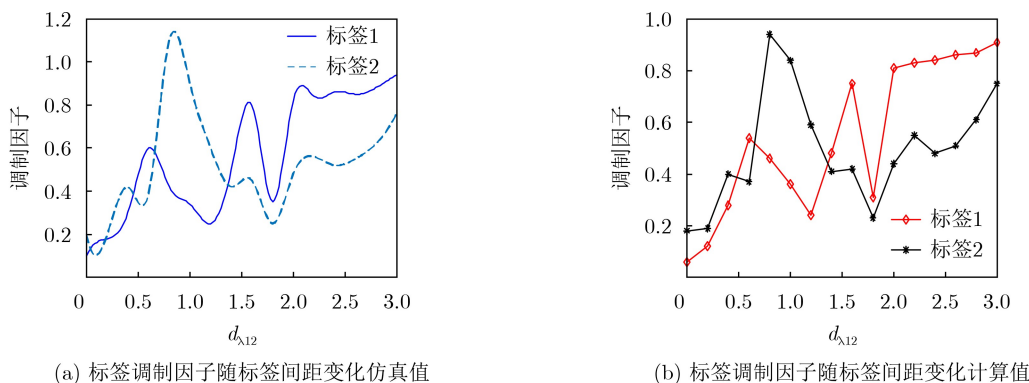


图8 标签调制因子随标签间距变化图

1.3. 选用的对比标签分别为Alien9662(标签1), 根据本文方法改进Alien9662(标签2)与文献[13]中提出的应用于密集环境中的标签(以下称标签3), 系统工作频率设置为920 MHz。

5.1 双标签性能测试

由式(27)知标签天线的后向散射功率 P_{t-b} 与传输系数 τ 为单调变化关系, 因此标签布放状态改变时, 标签间的互耦效应对标签天线传输系数的影响在实验测试中可以用返回信号强度(RSSI)的变化来反映。双标签实验测试场景如图9所示, 限于微波暗室的尺寸, 标签处于稀疏分布状态时, 实验设置在空旷的室内。

由文献[9]可知标签彼此之间角度 $\theta > 75^\circ$, 标签间的影响可忽略不计。因此本文只研究标签间的夹角 θ 分别为 0° 和 45° 时双标签系统的性能变化。阅读

器天线与目标标签之间 $d_1 = 100$ cm, 设置阅读器的发射功率为1 W(30 dBm)。干扰标签与目标标签间距为 d_2 , d_2 从0增加至100 cm, 步进值为1 cm。分别设置两枚标签间的夹角为 $\theta = 0^\circ, 45^\circ$, 实验结果如图10所示。如图10(a), 标签2和标签3的返回信号强度始终大于标签1, 随着间距的增大, 标签1的返回信号强度逐渐上升, 标签2和标签3的性能有所波动但仍高于标签1。当标签分布状态由密集变为稀疏, 如图10(b)所示, 相较于标签1, 标签2的性能有所下降, 但比标签3性能稳定, 此时标签3的性能严重恶化。

由图10(c)和图10(d)可知, 标签间角度变化时, 3种标签的性能变化保持一致, 即分布状态改变时标签2的性能始终介于标签1和标签3之间。且标签间的夹角越小, 标签间的互耦效应越强且作用距离变短。

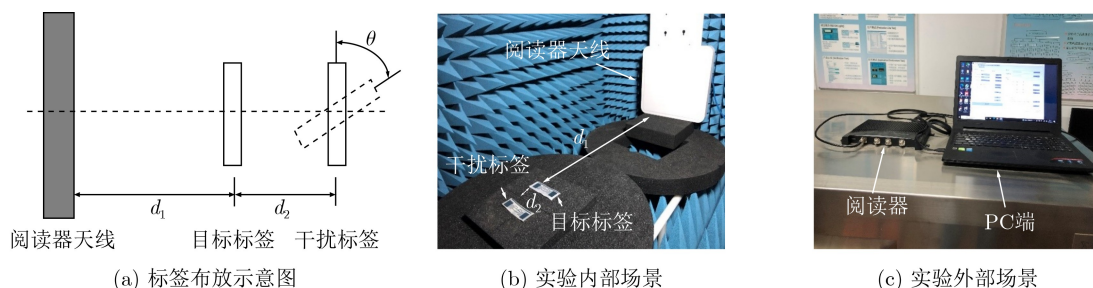


图9 标签性能测试实验场景

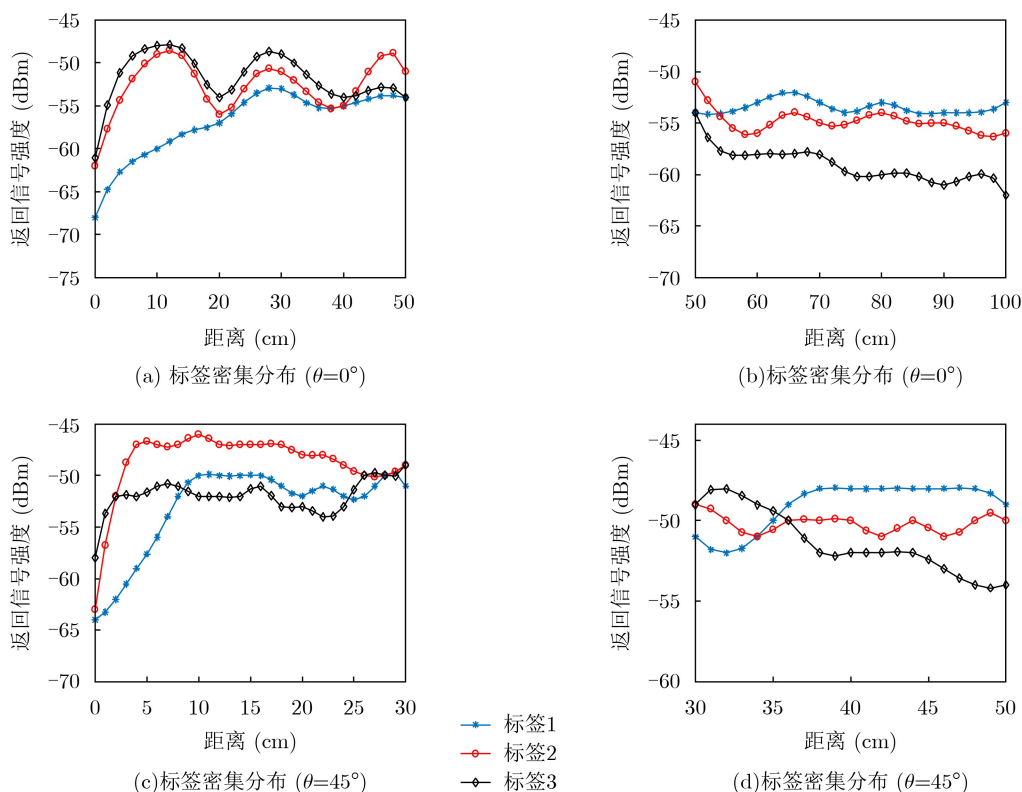


图10 标签返回信号强度随 θ 的变化

实验结果表明基于加载条改进的标签可以平衡稀疏环境下普通标签和专门应用于密集环境下的标签之间的性能，即同时满足标签在不同分布状态下的使用条件。

5.2 多分布状态下标签群读实验

在空旷的室内环境中，对3种标签做读取对比实验，实验场景布置如图11所示，相邻标签水平及垂直间距均为 d 。设置 $d=5\text{ cm}$ ， 10 cm 即让标签分别处于密集和稀疏状态，设置阅读器的发射功率为 1 W ，阅读器天线至最近标签的距离固定为 1 m 。

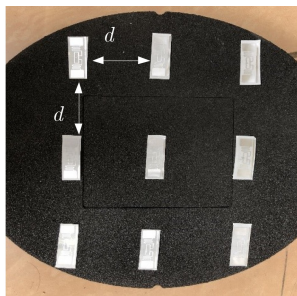


图 11 标签群读实验

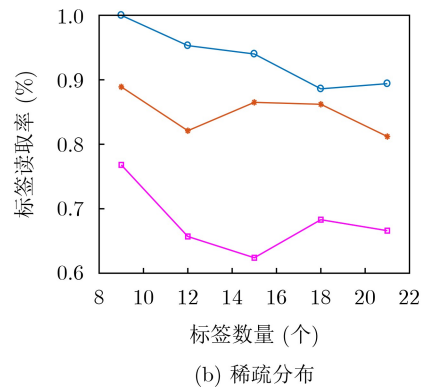
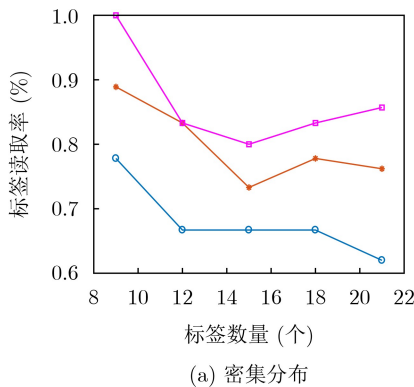


图 12 标签读取率

由图12(a)可知标签密集布放时标签1的读取率远低于标签2和标签3，标签2的读取率虽然低于标签3但仍保持在73%以上。当标签处于稀疏分布时，如图12(b)所示，标签3的读取率远低于标签1和标签2，而标签2的读取率虽然低于标签1但整体保持在81%以上。综上分析可知基于本文所提出的设计方法设计的标签天线在标签分布状态改变时仍保持着稳定性能，可适用于分布状态变化环境中。

6 结束语

针对标签分布疏密程度变化时，标签间的互耦效应会对标签天线性能产生影响，结合变压器模型和二端口网络分析方法，推导得到了密集环境下标签天下互阻抗和传输系数表达式，提出了基于加载条匹配的方法来调节天线的阻抗，并给出了设置加

载条之后标签天线的变压器等效模型，在此基础上推导了加载条的尺寸与其电感和电容的关系表达式以及分析了设置加载条后对标签天线性能的影响。通过实验测试基于加载条匹配后的改进标签在稀疏环境和密集环境下都可以保持稳定的性能。本文只是对设置加载条对标签天线性能的影响的初步研究，下一步需要分析更多的天线实例，总结出加载条对标签天线的阻抗的影响的一般表达式，从而使本方法能够有一定的普适性。

表 1 密集环境下标签群读实验

| 标签数量 n (枚) | 标签1 | 标签2 | 标签3 |
|--------------|-----|-----|-----|
| 9 | 7 | 8 | 9 |
| 12 | 8 | 10 | 10 |
| 15 | 10 | 11 | 12 |
| 18 | 12 | 14 | 15 |
| 21 | 13 | 16 | 18 |

表 2 稀疏环境下标签群读实验

| 标签数量 n (枚) | 标签1 | 标签2 | 标签3 |
|--------------|-----|-----|-----|
| 9 | 9 | 8 | 7 |
| 12 | 11 | 9 | 8 |
| 15 | 13 | 13 | 9 |
| 18 | 16 | 15 | 12 |
| 21 | 18 | 17 | 14 |

参考文献

[1] BUFFI A, NEPA P, and MANARA G. Analysis of near-field coupling in UHF-RFID systems[C]. 2011 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), Turin, Italy, 2011:

- 931–934. doi: [10.1109/APWC.2011.6046818](https://doi.org/10.1109/APWC.2011.6046818).
- [2] KATAGI T, OHMINE H, MIYASHITA H, *et al.* Analysis of mutual coupling between dipole antennas using simultaneous integral equations with exact kernels and finite gap feeds[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(5): 1979–1984. doi: [10.1109/TAP.2016.2537384](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2537384).
- [3] LU Feng, CHEN Xiaosheng, and YE T T. Performance analysis of stacked RFID tags[C]. 2009 IEEE International Conference on RFID, Orlando, USA, 2009: 330–337. doi: [10.1109/RFID.2009.4911194](https://doi.org/10.1109/RFID.2009.4911194).
- [4] 李忠建, 张雪凡, 叶昉, 等. 多标签环境下RFID系统的受限链路[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 9–13. doi: [10.19651/j.cnki.emt.2016.01.003](https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.2016.01.003).
LI Zhongjian, ZHANG Xuefan, YE Yang, *et al.* Link constrains in RFID with intensive tags[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(1): 9–13. doi: [10.19651/j.cnki.emt.2016.01.003](https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.2016.01.003).
- [5] 彭章友, 任秀方, 孟春阳, 等. 超高频射频识别小间隔双标签天线增益特性研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1774–1778. doi: [10.11999/JEIT141371](https://doi.org/10.11999/JEIT141371).
PENG Zhangyou, REN Xiufang, MENG Chunyang, *et al.* Study on gain characteristics of dual ultra-high-frequency radio frequency identification tag antennas with small interval[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1774–1778. doi: [10.11999/JEIT141371](https://doi.org/10.11999/JEIT141371).
- [6] 燕怒, 李达, 韩冬桂, 等. 密集环境下无源超高频系统RFID标签识别性能研究[J]. 现代电子技术, 2019, 42(14): 18–21, 26. doi: [10.16652/j.issn.1004-373x.2019.14.005](https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2019.14.005).
YAN Nu, LI Da, HAN Donggui, *et al.* Research on RFID tag recognition performance of passive UHF system in dense environment[J]. *Modern Electronics Technique*, 2019, 42(14): 18–21, 26. doi: [10.16652/j.issn.1004-373x.2019.14.005](https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2019.14.005).
- [7] 周春. 基于磁耦合UHF频段RFID近场天线研究[D]. [硕士论文], 南京航空航天大学, 2019. doi: [10.27239/d.cnki.gnhhu.2019.000441](https://doi.org/10.27239/d.cnki.gnhhu.2019.000441).
ZHOU Chun. Research on near-field RFID antenna based on magnetic coupling in UHF band[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. doi: [10.27239/d.cnki.gnhhu.2019.000441](https://doi.org/10.27239/d.cnki.gnhhu.2019.000441).
- [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): 044102. doi: [10.7498/aps.62.044102](https://doi.org/10.7498/aps.62.044102).
ZUO Lei, HE Yigang, 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): 044102. doi: [10.7498/aps.62.044102](https://doi.org/10.7498/aps.62.044102).
- [9] 何怡刚, 余培亮, 佐磊, 等. 超高频射频识别近场系统互耦效应中频率偏移研究[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 602–610. doi: [10.11999/JEIT180375](https://doi.org/10.11999/JEIT180375).
HE Yigang, SHE Peiliang, ZUO Lei, *et al.* Study on frequency shift in mutual coupling effect of ultra-high-frequency radio frequency IDentification near-field system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 602–610. doi: [10.11999/JEIT180375](https://doi.org/10.11999/JEIT180375).
- [10] MARROCCO G. The art of UHF RFID antenna design: Impedance-matching and size-reduction techniques[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2008, 50(1): 66–79. doi: [10.1109/MAP.2008.4494504](https://doi.org/10.1109/MAP.2008.4494504).
- [11] 何洋. 缝隙结构天线在新型RFID标签设计中的应用研究[D]. [硕士论文], 中国科学技术大学, 2017.
HE Yang. On the design of novel RFID tags with modified slot antenna[D]. [Master dissertation], University of Science and Technology of China, 2017.
- [12] LI Haotian, CHEN Yikai, XING Zijian, *et al.* A novel printed dual-log-periodic array antenna for UHF near-field RFID applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(12): 7418–7423. doi: [10.1109/TAP.2018.2874202](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2874202).
- [13] 彭章友, 孟春阳, 任秀方, 等. 密集布放环境下的标签互阻设计方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1304–1309. doi: [10.11999/JEIT141340](https://doi.org/10.11999/JEIT141340).
PENG Zhangyou, MENG Chunyang, REN Xiufang, *et al.* Design of stacked tags for mutual impedance in intensive distribution environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(6): 1304–1309. doi: [10.11999/JEIT141340](https://doi.org/10.11999/JEIT141340).
- [14] DOBKIN D M. The RF in RFID: UHF RFID in Practice[M]. 2nd ed. Boston: Newnes, 2013: 286–300. doi: [10.1016/C2011-0-06799-6](https://doi.org/10.1016/C2011-0-06799-6).
- [15] KRAUS J D and MARHEFKA R J. Antennas for All Applications[M]. 3rd ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2002: 158–166.
- [16] EBRAHIMI-ASL S, GHASR M T A, and ZAWODNIOK M J. A solution to low read rate problem in RFID scattering networks[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2017, 1(2): 176–184. doi: [10.1109/JRFID.2017.2768546](https://doi.org/10.1109/JRFID.2017.2768546).
- [17] EBRAHIMI-ASL S, AHMAD GHASR M T, and ZAWODNIOK M. Cooperative interference control in

- neighboring passive scattering antennas[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2018, 2(3): 152–158. doi: [10.1109/JRFID.2018.2832190](https://doi.org/10.1109/JRFID.2018.2832190).
- [18] 赵琦. 超材料无线射频能量收集RFID标签系统[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.002016](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.002016).
- ZHAO Qi. Metamaterial RFID tag system with wireless RF power harvesting[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.002016](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.002016).
- [19] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 96–100.
- ZHONG Shunshi. Antenna Theory and Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 96–100.
- [20] ZHU Jixuan, JIN Cheng, and LIU Huan. Mutual inductance modeling of two coaxial solenoid antennas with large ferrite core for underground RFID applications[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 57(8): 9400104. doi: [10.1109/TMAG.2021.3081370](https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3081370).
- 佐 磊: 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为射频识别技术、物联网技术、信号处理及智能电网等.
- 曹雪兵: 男, 硕士生, 研究方向为射频识别技术和抗金属标签天线.
- 朱良帅: 男, 硕士生, 研究方向为射频识别技术和物联网技术.
- 丁雨晴: 女, 硕士生, 研究方向为射频识别技术和信号处理.
- 孙梦婷: 女, 硕士生, 研究方向为射频识别技术和标签天线设计.
- 责任编辑: 马秀强