

标签密集环境下天线互偶效应研究*

佐磊^{1)†} 何怡刚¹⁾²⁾ 李兵¹⁾ 朱彦卿¹⁾ 方葛丰³⁾

1) (湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

2) (合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

3) (电子测试技术国防科技重点实验室, 青岛 266555)

(2012年7月31日收到; 2012年8月30日收到修改稿)

基于射频识别技术原理及 Friis 传输方程, 导出了无源超高频射频识别系统链路模型, 结合二端口网络分析方法, 导出了标签密集环境下的标签天线互阻抗计算表达式. 利用单阅读器单标签时的标签阻抗匹配条件, 基于功率传输系数及调制因子, 分析了互偶效应对系统链路的影响. 在开阔室内环境中, 测试了双标签及标签单、双平面布置情形下的阅读器天线最小发射功率及系统识别率. 测试结果表明, 双标签及双平面情形下, 阅读器天线最小发射功率变化率分别为 (-7%, 11.6%) 及 (-10%, 12.5%).

关键词: 射频识别, 密集环境, 互偶效应, 互阻抗

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Hz, 43.20.Gp

DOI: 10.7498/aps.62.044102

1 引言

无源超高频 (UHF) 射频识别 (RFID) 是一种基于天线散射理论的无线传输系统. 当标签处于密集环境, 即标签间距离小于若干系统工作频率波长时, 标签天线间的互偶效应成为影响 RFID 系统性能的重要因素^[1]. 文献 [2, 3] 结合 UHF RFID 工作原理及天线散射理论, 给出了不同负载情况下标签雷达散射截面的计算及测量方法. 文献 [4] 讨论了 ISO/IEC 18000-6C 部分参数设置对标签反向散射功率的影响, 给出了参数最优组合方案. 文献 [5] 讨论了阻抗失配对系统反向链路调制系数的影响, 给出了散射调制系数的最优化区间. 文献 [2—5] 主要分析单阅读器单标签情形下系统链路及协议参数对 UHF RFID 系统性能的影响, 并未考虑标签密集环境时天线互偶效应的影响. 文献 [6, 7] 给出了偶极子天线互阻抗的普适计算方法, 但计算量大且不针对 RFID 系统. 文献 [8] 测试了标签密集面阵排列情形下的系统识别率, 但未对测试结果进行理论分

析.

目前对 UHF RFID 系统标签阻抗匹配特性的讨论及分析只适用于阅读器天线辐射场仅存在单个标签情形. 在物流、仓储及设备管理等实际应用中, UHF RFID 系统多处于标签密集环境, 标签天线间存在互阻抗, 标签芯片及天线阻抗匹配条件发生变化, 故天线互偶效应成为制约系统性能的重要因素. 本文结合单阅读器单标签无源 UHF RFID 系统链路模型及二端口网络分析方法, 导出标签天线间互阻抗表达式; 分析了互偶效应对系统性能的影响, 并在开阔室内环境进行了测试.

2 典型无源 UHF RFID 系统链路模型

典型无源 UHF RFID 系统模型及标签等效电路如图 1 所示, 其中, 标签天线阻抗 $Z_a = R_a + jX_a$, 标签负载阻抗 $Z_L = R_L + jX_L$, V , I 为标签天线感应电压及感应电流. RFID 系统通信链路分为阅读器至标签的前向链路及标签至阅读器的反向链路. 前向

* 国家杰出青年基金 (批准号: 50925727)、国家自然科学基金 (批准号: 60876022)、国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 51107034)、国防预研重大项目 (批准号: C1120110004)、湖南省科技计划 (批准号: 2011J4, 2011JK2023)、湖南省自然科学基金 (批准号: 12JJA004) 和湖南省教育厅科学研究项目 (批准号: 11C0479) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: benzl0313@126.com

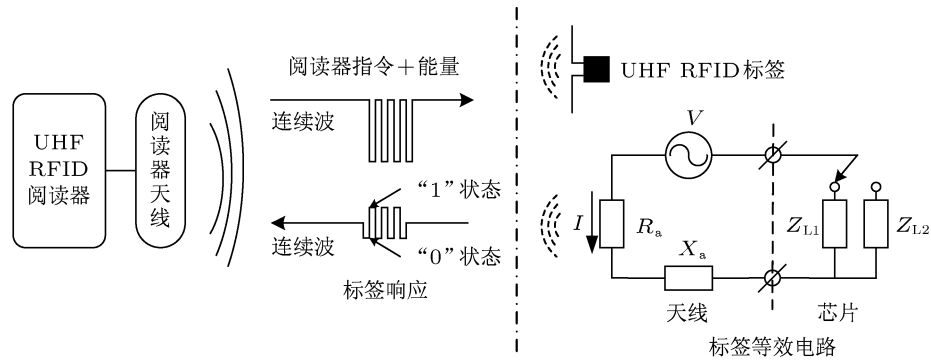


图1 无源 UHF RFID 系统示意图

链路中, 阅读器天线发射携带指令数据的连续波信号, 标签天线接收信号后经由整流器电路为标签芯片提供能量. 反向链路中, 标签通过改变 Z_L 反向散射调制阅读器天线发射的连续波信号, 将标签响应数据传至阅读器.

假设自由空间下, 前向链路中阅读器及标签天线增益分别为 $G_r(\theta, \varphi)$, $G_t(\theta, \varphi)$, 阅读器发射功率为 P_{r-t} , 阅读器天线与标签天线间距为 d , 则标签天线接收功率 P_{r-r} 为

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

其中 λ 为系统工作频率波长, $S_r = P_{r-t} G_r(\theta, \varphi) / (4\pi d^2)$ 为阅读器天线辐射电磁波至标签天线处功率密度, $A_{et} = G_t(\theta, \varphi) \lambda^2 / (4\pi)$ 为标签天线有效面积. 定义反射系数 ρ 为^[9]

$$\rho = \frac{Z_L - Z_a^*}{Z_L + Z_a}, \quad (2)$$

其中 $Z_a^* = R_a - jX_a$, 则标签芯片接收功率 P_{ic-r} 为

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

其中功率传输系数 τ 为

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

假设标签芯片灵敏度为 P_{ic-sen} , 则当 $P_{ic-r} \geq P_{ic-sen}$ 时标签被激活.

反向链路中, 标签天线反向散射功率 P_{t-b} 为

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

其中阻抗匹配因子 K 为

$$K = |1 - \rho|^2 = 4R_a^2 / |Z_a + Z_L|^2. \quad (6)$$

根据天线散射理论, 标签天线阻抗的电抗部分不向空间辐射能量, 故 P_{t-b} 可表示为

$$P_{t-b} = \frac{1}{2} I^2 R_a G_t(\theta, \varphi). \quad (7)$$

标签负载阻抗可分为三种状态: $Z_L = Z_a^*$ 为阻抗匹配状态, 有 $K_m = 1$, $\rho_m = 0$; $Z_L = 0$ 为阻抗短路状态, 有 $K_s = 4R_a^2 / (R_a^2 + X_a^2)$, $\rho_s = -(R_a - jX_a) / R_a + jX_a$; $Z_L = \infty$ 为阻抗开路状态, 有 $K_o = 0$, $\rho_o = 1$. 图 1 中, 标签负载阻抗在匹配 (“0” 状态) 及短路 (“1” 状态) 状态间转换, 阅读器天线接收的标签反向散射信号功率改变, 从而完成信号调制^[2,5]. 标签负载阻抗匹配及短路状态时, 阅读器天线接收功率 $P_{r-r}^{m,s}$ 为

$$P_{r-r}^{m,s} = \frac{P_{r-t} G_r^2(\theta, \varphi) G_t^2(\theta, \varphi) \lambda^4}{(4\pi d)^4} |1 - \rho_{m,s}|^2, \quad (8)$$

则阅读器接收功率 $P_{received}$ 为^[9]

$$P_{received} = \frac{P_{r-t} G_r^2(\theta, \varphi) G_t^2(\theta, \varphi) \lambda^4}{(4\pi d)^4} \Delta\rho, \quad (9)$$

其中调制因子 $\Delta\rho = |\rho_m - \rho_s|^2$.

目前商用 UHF RFID 标签天线一般为电小尺寸, 即其天线口径远小于 λ ^[10]. 根据电小尺寸天线电磁波传播特性, UHF RFID 标签天线辐射场分为感应近场区及辐射远场区, 假设观测点 O 至天线距离为 d , 则两场区边界条件为 $d = \lambda / (2\pi)$. 实际应用中标签应位于辐射远场区, 故本文假设标签间距 $d > \lambda / (2\pi)$.

3 UHF RFID 标签天线互偶效应分析

当阅读器天线辐射场存在多个标签时, 目标标签天线感应电压由阅读器天线辐射电磁波及其他标签散射电磁波共同作用产生.

3.1 标签天线互阻抗

为简化分析, 本文以双标签为例推导标签天线互阻抗表达式. 图 2 为密集环境下的双标签等效二端口网络. V_1, V_2 为标签 1, 2 单独位于阅读器天线辐射场时的标签天线感应电压. V_{12}, V_{21} 为标签 2, 1 天线散射电磁波在标签 1, 2 天线上产生的感应电压, Z_{12}, Z_{21} 为标签天线 1, 2 间的互阻抗, 标签 1, 2 的自阻抗分别为 $Z_{11} = Z_{a11} + Z_{L11}, Z_{22} = Z_{a22} + Z_{L22}$, I_1, I_2 为流经 Z_{a11}, Z_{a22} 的感应电流.

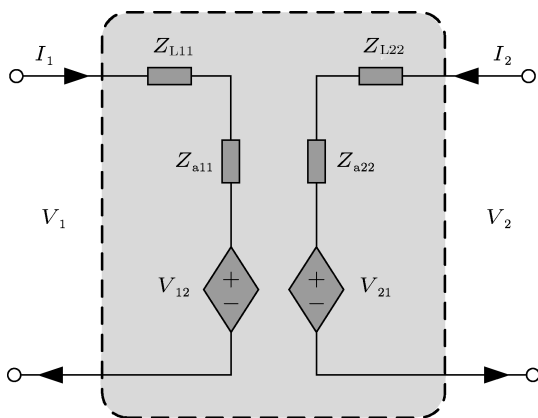


图 2 密集环境下双标签等效二端口网络

图 2 中, $V_{12} = Z_{12}I_2, V_{21} = Z_{21}I_1$, 则有^[11]

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

假设标签 1, 2 相对方向天线增益分别为 $G_1(\theta_{12}, \varphi_{12}), G_2(\theta_{21}, \varphi_{21})$, 由 (7) 式可得, 标签 2 天线散射功率 P_{b2} 为

$$P_{b2} = \frac{1}{2} I_2^2 R_{a22} G_2(\theta_{21}, \varphi_{21}). \quad (11)$$

由 (1) 式可得, 标签 1 天线对标签 2 天线散射电磁波接收功率 P_{r12} 为

$$\begin{aligned} P_{r12} &= S_{12} A_{et1} \\ &= \frac{P_{b2} G_1(\theta_{12}, \varphi_{12}) G_2(\theta_{21}, \varphi_{21}) \lambda^2}{4^2 \pi^2 d_{12}^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 S_{12} 为标签 2 天线散射电磁波至标签 1 天线处功率密度, A_{et1} 为标签 1 天线有效面积, d_{12} 为标签 1, 2 间距. 由 (5) 式可得, 标签 1 天线对标签 2 天线辐射电磁波的反向散射功率 P_{b12} 为

$$\begin{aligned} P_{b12} &= P_{r12} K_1 G_1(\theta_{12}, \varphi_{12}) \\ &= \frac{I_2^2 G_1^2(\theta_{12}, \varphi_{12}) G_2^2(\theta_{21}, \varphi_{21}) \lambda^2 R_{a11} R_{a22}}{8 \pi^2 d_{12}^2 |Z_{a11} + Z_{a11}|^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

其中 K_1 为标签 1 阻抗匹配因子. 由 (7) 式可得, P_{b12} 亦可表示为

$$\begin{aligned} P_{b12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{V_{12}}{|Z_{a11} + Z_{L11}|} \right)^2 R_{a11} G_1(\theta, \varphi) \\ &= \frac{1}{2} \frac{(Z_{12} I_2)^2}{|Z_{a11} + Z_{L11}|^2} R_{a11} G_1(\theta, \varphi). \end{aligned} \quad (14)$$

结合 (13), (14) 式可得

$$|Z_{12}| = \frac{\sqrt{R_{a11} R_{a22} G_1(\theta_{12}, \varphi_{12}) G_2(\theta_{21}, \varphi_{21})}}{2 \pi d_{\lambda 12}}, \quad (15)$$

其中波长数 $d_{\lambda 12} = d_{12}/\lambda$. Z_{12} 的相位由标签 2 天线入射波与反射波相位差 ϕ_2 及 $d_{\lambda 12}$ 决定, Z_{12} 的相位 $\angle(Z_{12})$ 为^[12]

$$\angle(Z_{12}) = \phi_2 + 2 \pi d_{\lambda 12}. \quad (16)$$

不失一般性, 当阅读器天线辐射场存在 n 个标签时, 由 (10) 式可得

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}, \quad (17)$$

其中标签自阻抗 $Z_{ii} = Z_{aii} + Z_{Lii}$, ($i = 1, 2, \dots, n$), V_i, I_i 为标签 i 单独位于阅读器天线辐射场时标签天线的感应电压及感应电流. 由 (15), (16) 式可得标签互阻抗 Z_{ij} 为

$$\begin{aligned} |Z_{ij}| &= \frac{\sqrt{R_{a11} R_{a22} G_1(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) G_2(\theta_{ji}, \varphi_{ji})}}{2 \pi d_{\lambda ij}} \\ &(i, j \in 1, 2, \dots, n \cap i \neq j), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\angle Z_{ij} = \phi_j + 2 \pi d_{\lambda ij} \quad (i, j \in 1, 2, \dots, n \cap i \neq j). \quad (19)$$

由 (17)—(19) 式可知, $|Z_{ij}|$ 具有互易性, 即 $|Z_{ij}| = |Z_{ji}|$. 若标签阻抗特性及天线方向图相同, 则

$$\begin{aligned} |Z_{ij}| &= \frac{R_a \sqrt{G(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) G(\theta_{ji}, \varphi_{ji})}}{2 \pi d_{\lambda ij}} \\ &(i, j \in 1, 2, \dots, n \cap i \neq j). \end{aligned} \quad (20)$$

3.2 互偶效应影响分析

由 (1)—(9) 式可知, 对于单阅读器单标签情形, $P_{ic-r} \propto \tau, P_{received} \propto \Delta \rho$. 当阅读器天线辐射场存在 n 个标签时, 标签 i 天线总阻抗 Z_{ai} 为

$$Z_{ai} = R_{ai} + jX_{ai} = \sum_{j=1}^n Z_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (21)$$

由 (18), (19) 式可得

$$R_{ai} = R_{a_{ii}} + \sum_{j=1}^{n-1} R_{aij} \quad (i \neq j), \quad (22)$$

$$X_{ai} = X_{a_{ii}} + \sum_{j=1}^{n-1} X_{aij} \quad (i \neq j), \quad (23)$$

其中 $R_{aij} = \text{Re}(Z_{ij})$, $X_{aij} = \text{Im}(Z_{ij})$.

前向链路中, 对于单标签情形且标签处于负载匹配状态时, $Z_{Li} = Z_{a_{ii}}^* = R_{a_{ii}} - jX_{a_{ii}}$, 则 $\tau = 1$. 对于标签密集环境, 标签 i 功率传输系数 τ_i 为

$$\tau_i = \frac{4R_{ai}R_{a_{ii}}}{|Z_{ai} + Z_{a_{ii}}^*|^2}. \quad (24)$$

以双标签为例, 假设标签阻抗特性相同, 且 $G_1(\theta_1, \varphi_1)G_2(\theta_2, \varphi_2) = 1$, 则标签 1 功率传输系数 τ_1 为

$$\tau_1 = \left[1 + \frac{1}{4\eta^2 + 4\eta \cos(\varphi_2 + \eta)} \right]^{-1}, \quad (25)$$

其中, $\eta = 2\pi d_{\lambda 12}$. 当标签 2 天线入射波与反射波相位差 $\varphi_2 = 0, \pi$ 时, τ_1 随 $d_{\lambda 12} \in (1/(2\pi), 3)$ 变化如图 3 所示. 令 $f(\eta) = 4\eta^2 + 4\eta \cos(\varphi_2 + \eta)$, 则 $f'(\eta)$ 为

$$\begin{aligned} f'(\eta) &= \frac{\partial f(\eta)}{\partial \eta} \\ &= 8\eta + 4\cos(\varphi_2 + \eta) - 4\eta \sin(\varphi_2 + \eta), \end{aligned} \quad (26)$$

当 $d_{\lambda 12} \geq 1/(2\pi)$ 时, $\eta \geq 1$, $f'(\eta) \geq 0$, 故 $f(\eta)$ 随 η 增大单调递增, 即 τ_1 随 η 增大而增大; 当 $\eta = \infty$ 时, $\tau_1 = 1$, 故图 3 中, τ_1 随 $d_{\lambda 12}$ 增大而增大, 并趋向于 1. 当 $\varphi_2 = 0$ 时, τ_1 变化范围较大, 当 $\varphi_2 = \pi$ 时, τ_1 变化范围较小; 二者在 $d_{\lambda 12} = 1/(2\pi)$ 时分别达到最小值 0.86 及 0.65; 当 $d_{\lambda 12} > 1.5$ 时 τ_1 已接近 1. 相较于单标签情形, Z_{12} 减小 P_{ic-r1} , 即降低系统性能, 且其影响程度随 $d_{\lambda 12}$ 增大而减小.

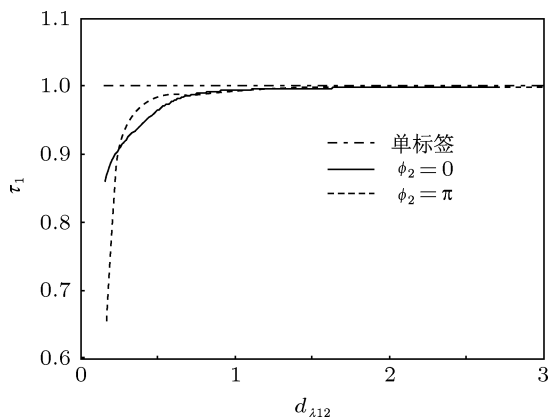


图 3 不同 φ_2 值下 τ_1 随 $d_{\lambda 12}$ 变化

反向链路中, 标签负载阻抗在匹配及短路状态间转换. 单标签情形下, $\Delta\rho = 1$. 标签密集环境下, 假设阅读器天线辐射场存在 n 个标签, 标签 i 负载阻抗匹配时 $Z_{Li} = Z_{a_{ii}}^*$, 负载阻抗短路时 $Z_{Li} = 0$, 则标签 i 调制因子 $\Delta\rho_i$ 为

$$\Delta\rho_i = |\rho_{mi} - \rho_{si}|^2 = 4 \left| \frac{Z_{a_{ii}}^* \text{Re}(Z_{ai})}{Z_{ai}(Z_{a_{ii}}^* + Z_{ai})} \right|^2. \quad (27)$$

双标签情形下, 假设标签阻抗特性相同, $\varphi_2 = 0$, $G_1(\theta_1, \varphi_1)G_2(\theta_2, \varphi_2) = 1$. 令标签自阻抗归一化系数 $m = X_{a_{11}}/R_{a_{11}}$. 由 (9), (27) 式可得

$$\begin{aligned} \Delta\rho_1 &= 4 \left| \frac{Z_{a_{11}}^* \text{Re}(Z_{a1})}{Z_{a1}(Z_{a_{11}}^* + Z_{a1})} \right|^2 \\ &= \frac{a_4\eta^4 + a_3\eta^3 + a_2\eta^2}{b_4\eta^4 + b_3\eta^3 + b_2\eta^2 + b_1\eta + 1}, \end{aligned} \quad (28)$$

其中

$$\begin{cases} a_4 = b_4 = 4m^2 + 4, \\ a_3 = 8(m^2 + 1)\cos(\varphi_2 + \eta), \\ b_3 = (4m^2 + 12)\cos(\varphi_2 + \eta) \\ \quad + 8m\sin(\varphi_2 + \eta), \\ a_2 = (4m^2 + 4)\cos^2(\varphi_2 + \eta), \\ b_2 = m^2 + 5 + 8m\cos(\varphi_2 + \eta)\sin(\varphi_2 + \eta) \\ \quad + 8\cos^2(\varphi_2 + \eta), \\ b_1 = 6\cos(\varphi_2 + \eta) + 2m\sin(\varphi_2 + \eta), \\ \eta = 2\pi d_{\lambda 12}. \end{cases} \quad (29)$$

当 $m \in (0, 4)$ 且 $d_{\lambda 12} \in (1/(2\pi), 4)$ 时, $\Delta\rho_1$ 随 m 及 $d_{\lambda 12}$ 变化如图 4(a) 所示; $m = 0, 1, 4$ 时, $\Delta\rho_1$ 随 $d_{\lambda 12}$ 变化如图 4(b) 所示. 由 (28), (29) 式可知 $a_4 = b_4$, 故随着 $d_{\lambda 12}$ 增大, $\Delta\rho_1$ 渐近周期变化并趋于 $\Delta\rho = 1$, 渐近周期为 1; 当 $m = 0$, $d_{\lambda 12} = 0.48$ 时, $\Delta\rho_1$ 达到最大值 1.43; 当 $m = 0.35$, $d_{\lambda 12} = 0.48$ 时, $\Delta\rho_1$ 达到最小值 0.39. 当 $m = 0$ 时, $d_{\lambda 12}$ 为 $\Delta\rho_1$ 的主要影响因素, $\Delta\rho_1$ 波动幅度随 $d_{\lambda 12}$ 增大而减小, 且有 $\Delta\rho_1 \in (0.43, 1.43)$; 随着 m 增大, 其对 $\Delta\rho_1$ 的影响增大, 当 $m = 0.35$ 时, $\Delta\rho_1 \in (0.39, 1.34)$; 至 $m = 4$ 时, $\Delta\rho_1$ 变化范围最小, 为 $\Delta\rho_1 \in (0.59, 1.17)$.

综上所述, 相较于单标签情形, 双标签密集环境下标签天线间互偶效应使得 $\tau_1 \leq \tau$, $\Delta\rho_1$ 基于 ρ 波动变化, 并以 $d_{\lambda 12} = 1$ 为周期渐近趋于 ρ ; 当 $d_{\lambda 12} \geq 1.5$, 即标签间距大于 1.5λ 时, 互偶效应对系统性能的影响较小.

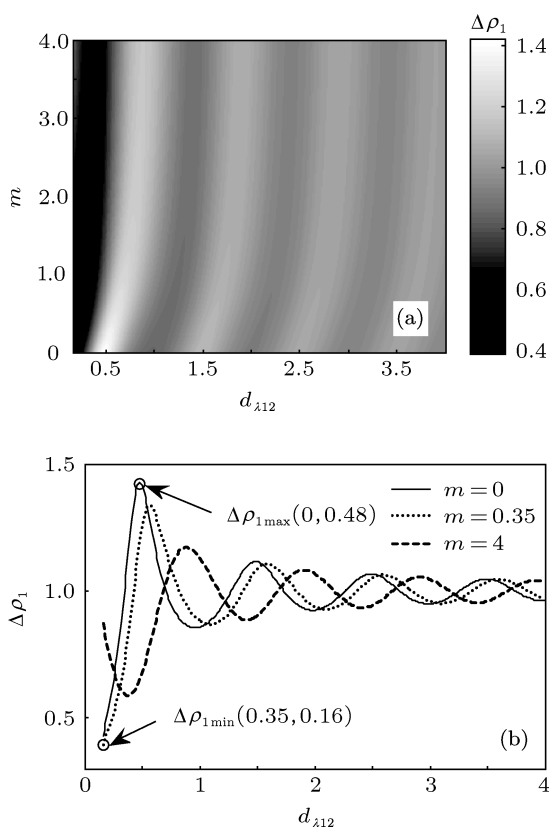


图4 标签1调制因子 $\Delta\rho_1$ 随 m 及 $d_{\lambda 12}$ 变化 (a) $m \in (0, 4)$; (b) $m = 0, 1, 4$

4 实验结果及分析

实验采用台湾 FAVITE 公司的 UHF RFID 设备, 包括阅读器 FS-GM201, 阅读器天线 FS-GA204 及标签 FT-G1205, 其中 FS-GA204 为圆极化面天线, 工作频率为 865—870 MHz 和 902—928 MHz, 增益为 8 dBi, 驻波比为 1.18. 标签尺寸为 10 cm × 3 cm. 实验在 6.5 m × 3.5 m × 3 m 的开阔室内环境进行, 系统工作频率为 915 MHz. 定义识别标签的阅读器天线最小发射功率为 $P_{\text{sen}i}$; 系统识别率为 $R(P_{\text{r-t}}) = M/N$, 其中 N 为目标标签数, M 为可识别标签数.

4.1 双标签情形互偶效应对系统性能影响的测试

实验布置如图 5 所示. 阅读器天线及目标标签位置固定, 间距 $d_{r1} = 100$ cm, 干扰标签与目标标签间距为 d_{12} , 标签夹角为 θ . $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 及 90° 条件下, d_{12} 以 5 cm 步长从 10 cm 增加至 70 cm 时, 目标标签阅读器天线最小发射功率 $P_{\text{sen}i}$ ($i = 1, 2, 3$,

4) 变化如图 6 所示.

当 $d_{12} = \infty$, 即阅读器天线辐射场中只存在目标标签时, 阅读器天线最小发射功率 $P_{\text{sen}0} = 21.5$ dBm. 由图 6 可见, $P_{\text{sen}i}$ 随 d_{12} 增大而渐近周期趋于 $P_{\text{sen}0}$. 令 $P_{\text{sen}i}$ 变化率为 $\Delta P_{ni} = (P_{\text{sen}i} - P_{\text{sen}0})/P_{\text{sen}0}$. 由 (25), (28) 式可知, 随着 $d_{\lambda 12}$ 增大, τ_1 增大且趋于 1, $\Delta\rho_1$ 渐近周期变化且趋于 $\Delta\rho$, 故 $|\Delta P_{ni}|$ 渐近周期减小且趋于 0, 渐近周期约为 $\lambda = 32$ cm; 当 $d_{12} \leq 45$ cm 时, τ_1 及 $\Delta\rho_1$ 变化较大, 故 ΔP_{ni} 变化较大; 当 $d_{12} > 45$ cm 时, τ_1 及 $\Delta\rho_1$ 变化较小, 故 ΔP_{ni} 变化较小; 当 $d_{12} = 10$ cm 时, τ_1 较小, 且目标标签处阅读器天线及干扰标签发射的电磁波反相, 故 $|\Delta P_{ni}|$ 达到最大值, 分别为 11.6%, 11.6%, 9.3% 及 7%. 由 (22), (23) 式可知, R_{a12}, X_{a12} 随 $G_1(\theta_{12}, \varphi_{12})G_2(\theta_{21}, \varphi_{21})$ 减小而减小, 故 d_{12} 一定时, ΔP_{ni} 随 θ 增大而减小; $\theta = 90^\circ$ 且 $d_{12} \geq 40$ cm 时, $\Delta P_{ni} = 0$, 即此时互偶效应对 $P_{\text{sen}i}$ 的影响可忽略. 由 (28), (29) 式可知, $\Delta\rho_1$ 可大于或小于 1, 故 ΔP_{ni} 可为正值或负值, ΔP_{ni} 变化范围分别为 $(-7\%, 11.6\%), (-4.7\%, 11.6\%), (0\%, 9.3\%)$ 及 $(0\%, 7\%)$, 互偶效应对系统性能的影响非单调变化, 可为增强或降低. 实际应用中, 标签间距应大于 1.5λ , 以减小互偶效应的影响.

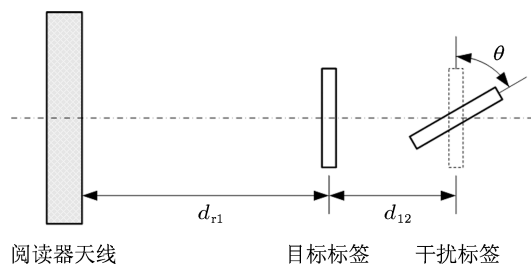


图5 双标签实验布置图

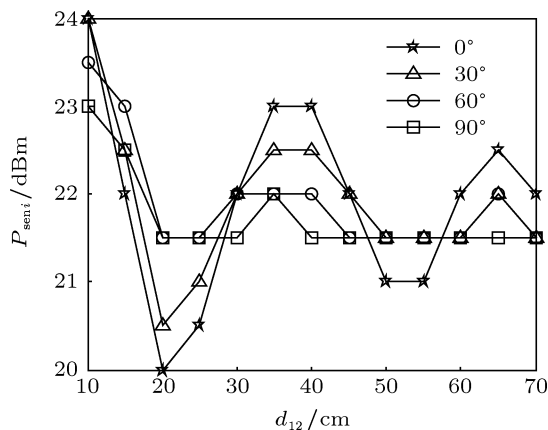


图6 阅读器天线最小发射功率 $P_{\text{sen}i}$ 随标签间距 d_{12} 及夹角 θ 变化

4.2 标签单平面情形互偶效应对系统性能影响的测试

实验采用 9 个标签, 布置如图 7 所示. 标签水平贴附于厚度为 5 cm 的薄木板, 相邻标签水平及垂直间距均为 d_2 , 标签 5 位置固定, 阅读器天线与标签贴附面平行, 且与标签 5 中心水平等高, 间距 $d_1 = 60$ cm. d_2 以 2 cm 步长从 10 cm 增加至 36 cm 时, 标签阅读器天线最小发射功率 P_{seni} ($i = 1, 2, \dots, 9$) 变化如图 8(a) 所示; d_2 以 2 cm 步长从 10 cm 增加至 36 cm 且阅读器天线发射功率 P_{r-t} 以 0.5 dBm 步长从 15 dBm 增加至 29 dBm 时, 系统识别率 $R(P_{r-t})$ 变化如图 8(b) 所示.

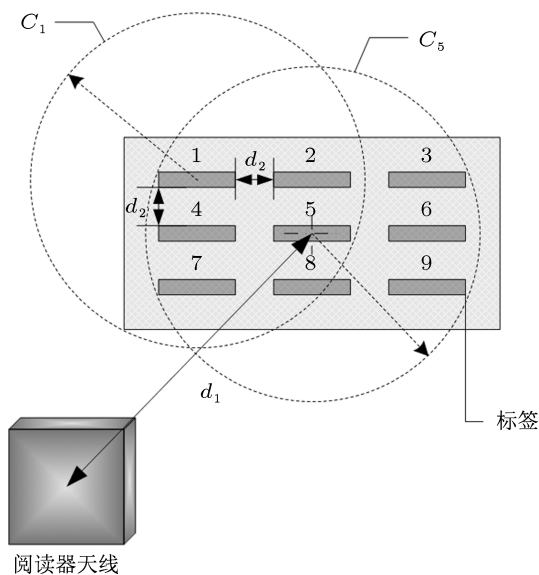


图 7 标签单平面实验布置示意图

图 7 中, 根据阅读器天线及标签相对位置, 9 个标签可分为组一标签 5; 组二标签 2, 8; 组三标签 4, 6; 组四标签 1, 3, 7, 9. 由图 8(a) 可见, P_{seni} 随 d_2 增大呈波动变化; 组一至组四标签 P_{seni} 变化范围分别为 (16, 28), (16, 25.5), (18, 25), (20, 24.5). 由 (24), (27) 式可知, 互偶效应对系统性能的影响随标签间距及夹角增大而减小; 以标签 i 中心为圆心的 1.5λ 半径范围内, 标签数量越多, 目标标签受互偶效应影响越大. 以标签 1, 5 为例, 图 7 中以标签 1, 5 中心为圆心的等半径圆 C_1 及 C_5 , C_5 覆盖全部标签, C_1 覆盖标签 1, 2, 4, 5 及 7, 且标签 5 与其他标签间距及夹角较小, 故 P_{sen5} 变化较大, P_{sen1} 变化较小. 由图 8(b) 可见, 当 d_2 一定时, R 随 P_{r-t} 增大而增大; 当 $P_{r-t} < 19.5$ 及 $P_{r-t} > 24$ 时, R 波动幅度较小, 当

$19.5 \leq P_{r-t} \leq 24$ 时, R 波动幅度较大, 这是由于 P_{seni} 在 (19.5, 24) 区间分布较为集中, 使得此时 R 变化较大. 当 P_{r-t} 一定时, R 随 d_2 增大呈波动变化; 由 (24), (27) 式可知, 当 $d_2 < 16$ 时, τ_i 及 $\Delta\rho_i$ 变化较大, 使得 $P_{received-i}$ 产生较大波动, 故此时 R 随 P_{r-t} 而增大的速度较慢. 实际应用中, 在符合相关标准条件下, 增大 P_{r-t} 可以减小互偶效应对系统性能的影响.

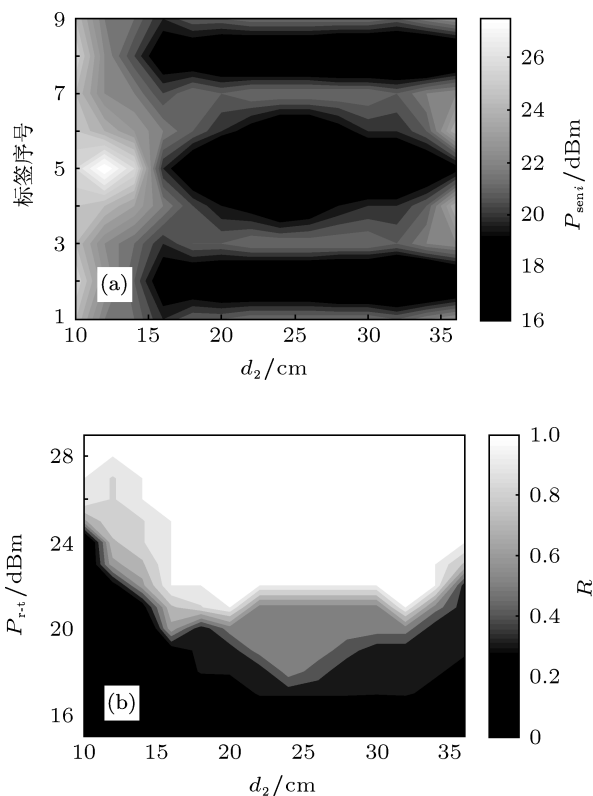


图 8 阅读器天线最小发射功率 P_{seni} 及系统识别率 R 随 d_2 变化 (a) P_{seni} ; (b) R

4.3 标签双平面情形互偶效应对系统性能影响的测试

实验采用 18 个标签, 布置如图 9 所示. 标签对称贴附于两块 5 cm 厚的薄木板, 且与阅读器天线底端水平对齐, 相邻标签水平间距 8 cm, 垂直间距 16 cm. 平面 1 位置固定, 阅读器与平面 1 间距 $d_1 = 60$ cm, 平面 1, 2 间距为 d_2 . d_2 以 2 cm 步长从 10 cm 增加至 44 cm 时, 平面 1 标签阅读器天线最小发射功率 P_{seni} ($i = 1, 2, \dots, 9$) 变化如图 10(a) 所示; d_2 以 2 cm 步长从 10 cm 增加至 44 cm, 且阅读器天线发射功率 P_{r-t} 以 0.5 dBm 步长从 15 dBm 增加至 26 dBm 时, 平面 1 系统识别率 $R_i(P_{r-t})$ ($i = 1, 2, \dots, 9$) 变化如图 10(b) 所示.

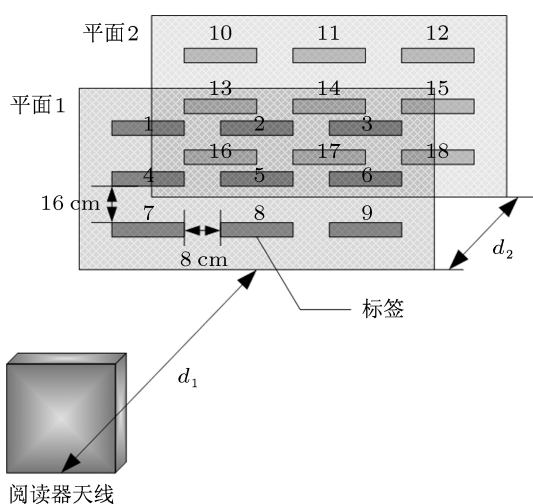


图9 标签双平面实验布置示意图

图 10(a) 测试结果如表 1 所示, 其中 \bar{P}_{seni} ($i = 1, 2, \dots, 9$) 为平面 1 单独位于阅读器天线辐射场时阅读器天线最小发射功率, $\tilde{P}_{ni} = (P_{seni} - \bar{P}_{seni}) / \bar{P}_{seni}$ 为 P_{seni} 变化率. 由图 10(a) 及表 1 可见, P_{seni} 随 d_2 增大呈波动变化; 同行 3 个标签中, 中间列标签 $\Delta\tilde{P}_{ni}$ 较大; 同列 3 个标签中, 中间行 $\Delta\tilde{P}_{ni}$ 较大. 这是由于相较于同行及同列中两端的标签, 中间位置标签与其他标签距离及夹角较小, 由 (24), (27) 式可知, 其受互偶效应影响较大, 即 $\Delta\tilde{P}_{ni}$ 较大. 由图 8(b) 可见, 当 d_2 一定时 R 随 P_{r-t} 增大而增大; 当 P_{r-t} 一定时, R 随 d_2 增大呈正弦波形式波动变化, 且变化周期约为 32 cm. 这是由于 d_2 增大时, $\Delta\tilde{P}_{ni}$ 变化由平面 2 标签共同作用产生. 考虑平面 1 标签 i ($i = 1, 2, \dots, 9$) 与平面 2 标签 j ($j = 10, 11, \dots, 18$) 的双标签互偶效

应, 由 (25) 式可知, 标签 i 调制因子 $\Delta\rho_{ij}$ 随 d_{ij} 增大呈渐近周期变化并趋于 $\Delta\rho_i$, 故 R 随 d_2 增大呈波动变化; 同时, 相较于平面 2 其他标签, 与 i 位置相对的标签 j ($j - i = 9$) 与 i 距离及夹角最小, 二者互偶效应对 i 影响最大, 且此时 $\Delta\rho_{ij}$ 关于 d_2 的渐近周期为 λ , 故 R 随 d_2 增大的变化周期约为 32 cm. 测试结果表明, 对于标签双平面情形, 干扰平面标签对目标平面标签的影响与金属平面相似.

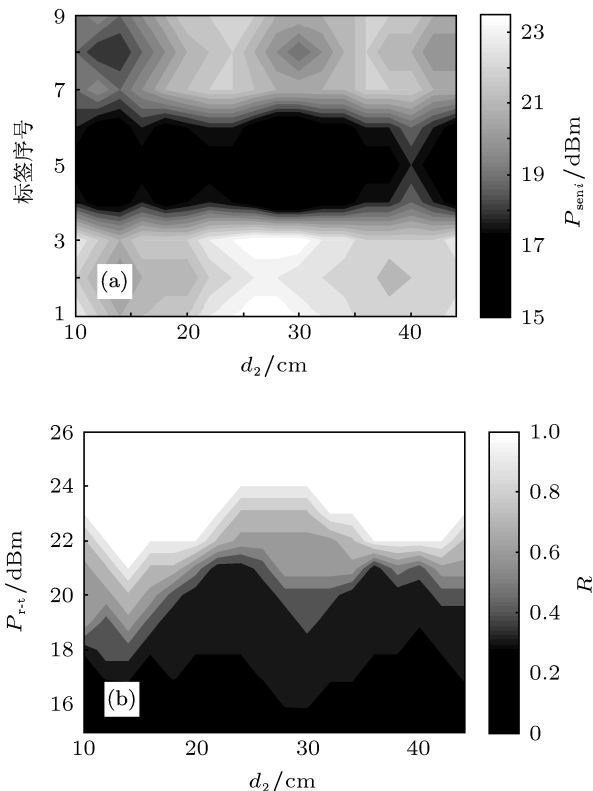


图 10 阅读器灵敏度及系统识别率 R 随 d_2 变化 (a) 标签阅读器灵敏度; (b) R

表 1 标签双平面布置 P_{seni} 测试结果

标签序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\bar{P}_{seni}/\text{dBm}$	23.0	22.0	23.0	17.0	16.0	17.0	21.0	20.0	21.0
$\tilde{P}_{ni-\text{min}}/\%$	-8.7	-9.1	-8.7	-5.9	-6.3	-5.9	-9.5	-10.0	-9.5
$\tilde{P}_{ni-\text{max}}/\%$	4.4	4.8	4.4	11.8	12.5	11.8	4.8	10.0	4.8
$\Delta\tilde{P}_{ni}/\%$	13.1	13.9	13.1	17.7	18.8	17.7	14.3	20.0	14.3

5 结论

结合单阅读器单标签情形的 UHF RFID 链路预算模型及二端口网络分析方法, 推导得到了密集环境下标签天线互阻抗表达式; 基于功率传输系数及标签调制因子, 分析了互偶效应对系统性能的影响.

理论分析及测试结果表明: 当标签间距小于 1.5 倍系统工作频率波长时, 互偶效应对系统性能影响较大; 互偶效应对系统性能影响非单调变化, 可为增强或降低; 对于双标签情形, 阅读器天线最小发射功率变化率范围为 (-7%, 11.6%); 增大阅读器天线发射功率, 可以减小互偶效应对系统性能的影响;

对于标签双平面情形,目标平面标签阅读器天线最小发射功率变化率范围为(-10%, 12.5%),干扰平面标签对目标平面标签系统识别率的影响与金属平面相似. 本文提出的标签天线间互阻抗计算表达式及互偶效应对 RFID 系统性能影响分析方法只适

用于标签位于天线辐射远场区条件,下一步研究工作结合变压器模型,研究标签位于天线感应近场区时的 UHF RFID 标签天线间互阻抗表达式,提出适应范围更广的互偶效应对 RFID 系统性能影响分析方法.

-
- [1] Marrocco G 2011 *Proc. IEEE Trans. Antennas Propag.* **59** 1019
- [2] Nikitin P V, Rao K V S 2006 *Proc. IEEE Trans. Antennas Propag.* **48** 212
- [3] Tang Z J, He Y G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5126 (in Chinese) [唐志军, 何怡刚 2009 物理学报 **58** 5126]
- [4] Hou Z G, He Y G, Li B, She K, Zhu Y Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5606 (in Chinese) [侯周国, 何怡刚, 李兵, 余开, 朱彦卿 2010 物理学报 **59** 5606]
- [5] Li B, He Y G, Hou Z G, She K, Zuo L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084202 (in Chinese) [李兵, 何怡刚, 侯周国, 余开, 佐磊 2011 物理学报 **60** 084202]
- [6] Baker H, LaGrone A H 1962 *IEEE IRE Trans. Antennas Propag.* **10** 172
- [7] Alexopoulos N G, Rana I E 1981 *Proc. IEEE Trans. Antennas Propag.* **29** 106
- [8] Weigand S M, Dobkin D M 2006 *Proc. IEEE Trans. Antennas Propag. Society Int. Symp.* Albuquerque, USA July 9–14, 2006 p1027
- [9] Nikitin P V, Rao K V S 2009 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **56** 2374
- [10] Dobkin D M 2007 *The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice* (Burlington: Elsevier) p305
- [11] Balanis C A 2005 *Antenna Theory, Analysis and Design* (3rd Ed.) (Hoboken: Wiley) p468
- [12] Lu F, Chen X S, Ye T T 2009 *2009 IEEE International Conference on RFID*, Orlando, USA, April 27–28, 2009 p330

Theory and measurement for mutual coupling effect of ultra high frequency radio-frequency identification in dense environments*

Zuo Lei^{1)†} He Yi-Gang¹⁾²⁾ Li Bing¹⁾ Zhu Yan-Qing¹⁾ Fang Ge-Feng³⁾

1) (*College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China*)

2) (*School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

3) (*The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China*)

(Received 31 July 2012; revised manuscript received 30 August 2012)

Abstract

The close displacement of ultra high frequency radio-frequency identification (UHF RFID) tags can be considered as an electromagnetically interconnected system which causes the mutual coupling effect among antennas of tags, thereby resulting in change in impedance matching condition. Based on the principles of RFID technology and Friis propagation equation, a link budget model of UHF RFID is provided which consists of one reader and one tag. Expressions of mutual impedance in dense environments are derived by using a two-port network. Utilizing the parameters of power transmission coefficient and modulation factor, the variation of system performance is discussed in theory and tested by three experiments which are conducted in open indoor environment. The measurement results show that the change rate of minimum power transmitted by the reader antenna is in a range from -7% to 11.6% for two-tag scene and from -10% to 12.5% for two-plane arrangement.

Keywords: radio frequency identification, dense environments, mutual coupling, mutual impedance

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Hz, 43.20.Gp

DOI: 10.7498/aps.62.044102

* Project supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 50925727), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60876022), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51107034), the National Defense Advanced Research Project of China (Grant No. C1120110004), the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant No. 12JJA004), and the Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province, China (Grant No. 11C0479).

† Corresponding author. E-mail: benzl0313@126.com