

无源超高频射频识别系统路径损耗研究*

佐磊^{1)2)†} 何怡刚¹⁾²⁾ 李兵¹⁾²⁾ 朱彦卿²⁾ 方葛丰²⁾³⁾

1) (合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

2) (湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

3) (电子测试技术国防科技重点实验室, 青岛 266555)

(2012年12月4日收到; 2013年2月6日收到修改稿)

基于射频识别技术原理及 Friis 传输方程, 导出了自由空间下无源超高频射频识别 (RFID) 系统路径损耗表达式. 结合菲涅耳区理论, 分析了菲涅耳余隙及阅读器天线至标签间距两因变量条件下第一菲涅耳区受阻隔对 RFID 系统路径损耗的影响, 并提出了双斜率对数距离路径损耗模型. 在开阔室内环境下, 测试了菲涅耳余隙及阅读器天线至标签间距变化时的系统路径损耗. 测试结果表明: 菲涅耳余隙大于第一菲涅耳区半径 1.5 倍时, 刃形障碍物对系统路径损耗影响较小; 相比传统对数距离路径损耗模型, 双斜率模型标准差减小 10%.

关键词: 射频识别, 路径损耗, 菲涅耳区, 线性回归

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Fx, 42.15.Dp

DOI: 10.7498/aps.62.144101

1 引言

无源超高频 (UHF) 射频识别 (radio-frequency identification, RFID) 技术在生产、物流及设备管理等领域应用广泛. 部署场景复杂的电磁环境, 使得路径损耗成为制约 RFID 系统性能的重要因素^[1], 其研究工作可为 RFID 产品的研发及优化快速部署提供理论指导及参考依据. 因此, RFID 系统路径损耗的建模已成为 RFID 技术发展中亟需解决的问题之一.

迄今为止, 已有诸多文献对 RFID 系统的性能及其影响因素进行了研究. 文献 [2] 分析了阻抗失配对 RFID 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 [3, 4] 分析了 ISO/IEC 18000-6C 空中接口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 [2—4] 主要分析了产品设计及协议参数改变引起的系统性能变化, 其研究工作有助于 RFID 产品的改进优化, 但并未考虑实际部署环境中系统路径损

耗的变化及其变化对系统性能的影响.

文献 [5] 给出了无源 UHF RFID 系统的对数距离路径损耗模型, 采用单斜率线性回归方法拟合路径损耗随阅读器天线至标签对数距离增大时的衰减规律, 并测试了传送带环境下的损耗指数及标准差, 但并未考虑第一菲涅耳区受阻隔对系统路径损耗的影响. 此外, 商用 UHF RFID 系统识别距离一般小于 10 m^[6], 系统路径损耗随阅读器天线至标签间距改变而快速变化^[7], 故参考点估计值及测量偏差对标准差产生较大影响, 使得文献 [5] 所提模型的标准差较大, 限制了其估计精度. 文献 [8] 分析了第一菲涅耳区受阻隔对 UHF RFID 系统性能的影响, 并给出了系统第一菲涅耳区不受阻隔的阅读器天线至标签最大水平间距计算公式, 但并未建立系统路径损耗模型, 也无实际测量结果. 目前相关文献主要考虑电磁波反射对系统路径损耗的影响, 未考虑绕射情形^[5,8].

针对以上研究现状, 本文基于电磁波传播菲涅耳区理论, 研究障碍物绕射对 RFID 系统路径损耗的影响; 基于单斜率对数距离路径损耗模型, 结合

* 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) 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

阅读器天线至标签第一菲涅耳区受地面阻隔对系统路径损耗的影响分析, 提出双斜率对数距离路径损耗模型, 并进行仿真及测试. 本文所提模型采用双斜率描述第一菲涅耳区受阻隔引起的路径损耗衰减速率变化, 可有效减小模型标准差, 提高模型估计精度.

2 自由空间下无源 UHF RFID 系统路径损耗

典型无源 UHF RFID 系统如图 1 所示, 系统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. 前向链路中, 阅读器天线发射携带指令的连续波信号 (CW); 标签天线接收 CW, 经由整流器为标签芯片供电. 反向链路中, 标签通过改变负载阻抗反向散射调制 CW, 将响应数据返回至阅读器. 环境噪声主要是系统工作环境中其他信号源发射的电磁波.

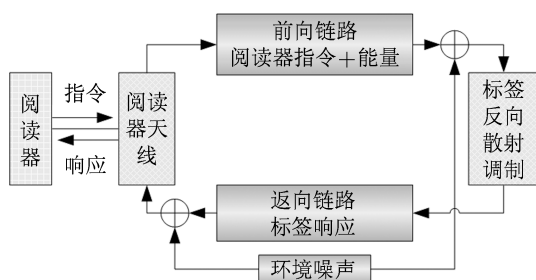


图 1 典型 UHF RFID 系统链路示意图

根据阅读器天线配置方式的不同, 无源 UHF RFID 系统分为收发天线共置的单站模式及分置的双站模式, 目前商用阅读器一般采用单站模式^[4]. 假设自由空间下阅读器天线至标签间仅存在直射路径, 前向链路中阅读器发射功率为 P_{t-r} , 阅读器及标签天线增益分别为 $G_r(\theta, \varphi)$, $G_t(\theta, \varphi)$, 波长为 λ , 阅读器天线至标签间距为 d , 则根据 Friis 传输方程, 标签天线接收功率 P_{t-r} 为

$$P_{t-r} = P_{t-r} + 10[\log G_r(\theta, \varphi) + \log G_t(\theta, \varphi)] + L_{\text{path-f}}, \quad (1)$$

其中前向链路路径损耗 $L_{\text{path-f}}$ 为

$$L_{\text{path-f}} = 20(\log \lambda - \log d) - 21.98. \quad (2)$$

假设标签天线及负载阻抗分别为 Z_a , Z_l , 定义标签反射系数 ρ 为

$$\rho = (Z_a - Z_l^*) / (Z_a + Z_l), \quad (3)$$

其中 Z_l^* 为 Z_l 的共轭阻抗, 则标签芯片接收功率 $P_{\text{tic-r}}$ 为^[9]

$$P_{\text{tic-r}} = P_{t-r} + 10 \log(1 - |\rho|^2). \quad (4)$$

假设标签芯片灵敏度为 $P_{\text{tic-sen}}$, 则当 $P_{\text{tic-r}} \geq P_{\text{tic-sen}}$ 时, 标签被激活, 系统完成识别.

反向链路中, 标签通过改变芯片负载阻抗完成信号调制, 即反向散射调制^[3,4]. 假设 $Z_l = Z_{l1}, Z_{l2}$ 时, 标签反射系数分别为 ρ_1, ρ_2 , 则标签天线反向散射功率 P_{t-b} 为

$$P_{t-b} = P_{t-r} + 20 \log|1 - \rho_{1,2}|. \quad (5)$$

阅读器天线接收功率 P_{r-r} 为

$$P_{r-r} = P_{t-b} + 10[\log G_r(\theta, \varphi) + \log G_t(\theta, \varphi)] + L_{\text{path-b}}, \quad (6)$$

其中反向链路路径损耗 $L_{\text{path-b}}$ 为

$$L_{\text{path-b}} = 20(\log \lambda - \log d) - 21.98. \quad (7)$$

结合 (1)—(7) 式可得, 阅读器接收功率 P_{received} 为^[2]

$$P_{\text{received}} = P_{t-r} + 20[\log G_r(\theta, \varphi) + \log G_t(\theta, \varphi)] + 10 \log \Delta \rho + L_{\text{path}}, \quad (8)$$

其中, 调制因子 $\Delta \rho = |\rho_1 - \rho_2|^2$, 系统路径损耗 L_{path} 为

$$L_{\text{path-b}} = 40(\log \lambda - \log d) - 43.96. \quad (9)$$

(9) 式亦可表示为

$$L_{\text{path}} = C + n \times d_{\log}, \quad (10)$$

其中 $C = 40 \log \lambda - 43.97$, $d_{\log} = 10 \log d$, 路径损耗指数 $n = -4$. 由 (1)—(10) 式可见, 自由空间下, 若阅读器天线及标签间仅存在直射路径, 则无源 UHF RFID 系统的 L_{path} 及 d_{\log} 呈线性关系, 且 L_{path} 随 d_{\log} 增大的下降速率为 -4 . 但实际应用中存在的绕射、反射等其他电磁波传播机制及系统第一菲涅耳区受阻隔等因素亦对系统路径损耗产生影响, 且终端用户难以获取模型所需的 $G_r(\theta, \varphi)$ 及 $\Delta \rho$ 等参数, 因此限制了模型的适用范围.

3 第一菲涅耳区受阻隔对系统路径损耗的影响

根据惠更斯-菲涅耳原理, 电磁波传播过程中, 波阵面上任一点均为辐射源 T 的次级波源. 辐射场内接收点 R 的场强由包围 R 任意封闭曲面上的次级波源辐射电磁波共同作用产生, 次级波源辐射电

电磁波在 R 处发生干涉效应形成菲涅耳区, 如图 2 所示.

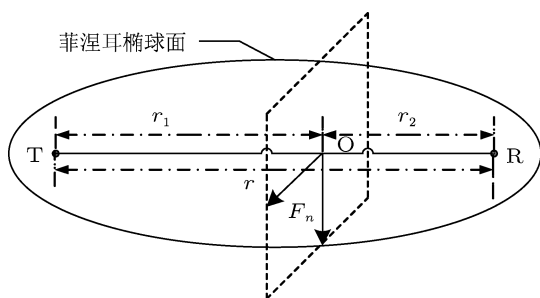


图 2 菲涅耳区半径示意图

图 2 中 T, R 间距为 r , 点 O 至 T, R 间距分别为 r_1, r_2 , 则第 n 菲涅耳区半径 F_n 为

$$F_n = \sqrt{n\lambda r_1 r_2 / r}, \quad (11)$$

实际工程中一般采用第一菲涅耳区半径 F_1 及 T 辐射至 R 处电磁波与自由空间下电场强度相同的最小菲涅耳区半径 F_0 , 分别为

$$F_1 = \sqrt{\lambda r_1 r_2 / r}, \quad (12)$$

$$F_0 = F_1 / \sqrt{3} \approx 0.577 / \sqrt{\lambda r_1 r_2 / r}. \quad (13)$$

根据菲涅耳区理论, T 经由第一菲涅耳区辐射至 R 的电磁波能量约占 R 接收总能量的 1/2, 且最小菲涅耳区为系统满足视距路径传播的充要条件^[10], 故系统电磁波传播第一菲涅耳区内的次级波源受障碍物或地面阻挡即第一菲涅耳区受阻隔时, 系统路径损耗将产生较大变化.

3.1 菲涅耳余隙对路径损耗的影响

电磁波在传播过程中遇到障碍物发生绕射现象, 当障碍物厚度远小于高度时, 一般采用菲涅耳刃形绕射模型^[11], 如图 3 所示.

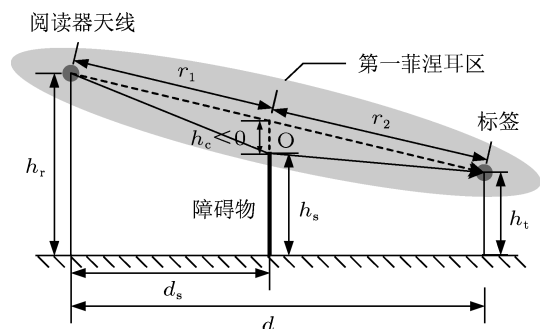


图 3 菲涅耳刃形绕射模型示意图

图 3 中阅读器天线、标签及障碍物距地高度分别为 h_r, h_t 及 h_s ; 菲涅耳余隙 h_c 为障碍物最高处至阅读器天线与标签连线的垂直间距, 当障碍物最高处位于连线下方时 $h_c < 0$, 反之 $h_c > 0$; 障碍物延长线及阅读器天线至标签连线交点为 O; 阅读器天线至标签及障碍物水平间距分别为 d 及 d_s . 假设自由空间及刃形绕射模型情形下, 阅读器天线辐射电磁波至标签处的电场强度分别为 E_0 及 E , 则菲涅耳数 $F(v)$ 为^[11]

$$F(v) = \frac{E}{E_0} = \frac{(1+j)}{2} \int_v^\infty \exp[-j\pi t^2 / 2] dt, \quad (14)$$

其中菲涅耳 - 基尔霍夫绕射系数为 $v = -h_c \sqrt{2(r_1 + r_2)} / (\lambda r_1 r_2)$, 故 RFID 系统刃形障碍物绕射损耗 L_{diff} 为

$$L_{diff} = 40 \log |F(v)|. \quad (15)$$

假设自由空间下 $h_r = 1$ m, $h_t = 0.5$ m, $h_s \in (0, 2)$ m, $d = 2$ m, $d_s = 1$ m, 系统工作频率为 $f = 915$ MHz, 定义相对余隙 $u = h_c / F_1$, 则图 3 所示刃形障碍物模型中的 L_{diff} 随 u 变化如图 4 所示. 由图 4 可见, 当 $u \leq -1$ 时, L_{diff} 随 u 减小呈波动变化, 且趋于 0, 这是由于当绕射波及直射波相位差 $\Delta\phi = k \times 2\pi$, ($k = 0, 1, 2, \dots$) 时, 绕射波及直射波同相, $|E| > |E_0|$, 当 $\Delta\phi = k \times \pi$, ($k = 1, 3, 5, \dots$) 时, 绕射波及直射波反相, $|E| < |E_0|$, 故 L_{diff} 呈波动变化; 当 $u \ll -1$ 时, 系统电磁波传播条件近似于自由空间, 故 L_{diff} 趋于 0; 当 $u > -1$ 时, 系统第一菲涅耳区受阻隔, 故 L_{diff} 随 u 增大而减小; 当 $u = -0.577$ 时, 前向及反向链路中标签及阅读器天线接收的电磁波电场强度与自由空间情形下相等, 故 $L_{diff} = 0$; 当 $u < -0.577$ 时, 系统已不满足视距路径传播条件, 故 L_{diff} 随 u 增大而快速减小.

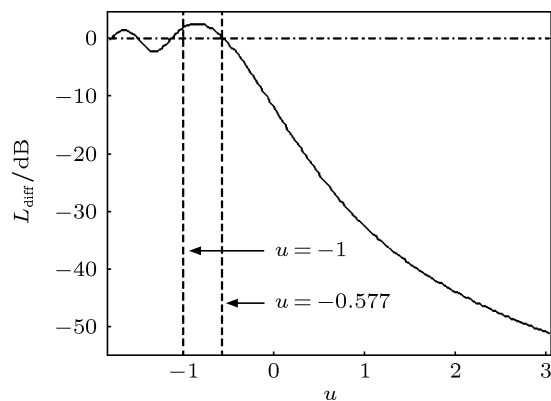


图 4 绕射损耗 L_{diff} 随相对余隙 u 变化

3.2 阅读器天线至标签间距对路径损耗的影响

天线辐射电磁波在传播过程中遇到障碍物发生反射现象, 假设多径环境下障碍物介质复介电常数 $\epsilon_r = \epsilon - j60\lambda\delta$, 其中 ϵ 为介质相对介电常数, δ 为介质电导率, 电磁波掠射角为 α , 则菲涅耳反射系数 Γ 为 [12]

$$\Gamma(\beta) = \frac{\cos\beta - a\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\beta}}{\cos\beta + a\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\beta}}, \quad (16)$$

其中, $\beta = 90^\circ - \alpha$, 天线水平极化时 $a = 1$, 垂直极化时 $a = 1/\epsilon_r$. 假设阅读器天线至标签的直射路径距离为 d_{dir} , 反射路径距离为 d_{ref} , 则多径环境下单站模式 L_{path} 为

$$L_{\text{path}} = 40 \left\{ \log\lambda + \log \left| 1 + \sum_{i=1}^n [\tau_i \exp(j\Delta\phi_i)] \right| - \log d_{\text{dir}} \right\} - 43.97, \quad (17)$$

其中, 反射及直射路径相位差 $\Delta\phi = 2\pi(d_{\text{dir}} - d_{\text{ref}})/\lambda$, 归一化反射系数 τ 为

$$\tau_i = \Gamma(\beta_i)d_{\text{dir}}/d_{\text{ref}(i)}. \quad (18)$$

由 (17) 式可见, 相比 (9) 和 (10) 式的自由空间情形, 多径环境下直射波及反射波的干涉效应改变了 L_{path} 及 d_{log} 的线性关系, 但 L_{path} 的均值及 d_{log} 仍呈线性关系, 故文献 [5] 提出无源 UHF RFID 系统对数距离路径损耗模型 $L_{\text{path-1}}(d)$ 为

$$L_{\text{path-1}}(d) = \overline{L_{\text{path}}}(d_0) + 10n \log(d/d_0) + X_\sigma, \quad (19)$$

其中 n 为路径损耗指数, d_0 为距阅读器天线最近测试点至天线的水平间距, $\overline{L_{\text{path}}}(d_0)$ 为自由空间下 d_0 处路径损耗, $X_\sigma \sim N(0, \sigma^2)$.

由 (19) 式可见, 对数距离路径损耗模型采用单斜率描述 L_{path} 均值随 d_{log} 增大的下降速率, 而未考虑系统第一菲涅耳区受地面阻隔对下降速率的影响. 实际应用中, 当阅读器天线及标签高度一定时, 随着二者水平间距的增大, 系统第一菲涅耳区受地面阻隔, 如图 5 所示.

为简化分析过程, 假设自由空间下 $h_r = h_t = 0.5$ m, $\epsilon = 15$, $\delta = 0.005$ S/m [13], $f = 915$ MHz, 由图 5 几何关系可得, 阅读器天线至标签连线中点 O 处的第一菲涅耳区半径 $F_1 = \sqrt{\lambda d}/2$, 且当 $F_1 > 0.5$ m 时系统第一菲涅耳区受地面阻隔; 定义 d_{f1} 为系统

第一菲涅耳区不受地面阻隔的阅读器天线至标签最大水平间距, 则由 $F_1 = h$ 可得 $d_{f1} = 3.05$ m. 当 $d \leq d_{f1}$ 及 $d > d_{f1}$ 时, 令 L_{path} 均值分别为 MV_1 及 MV_2 , 归一化第一菲涅耳区半径 $\Delta F_1 = F_1/h$, 则 L_{path} 及 ΔF_1 随 $d \in (0.1, 10)$ m 变化如图 6 所示.

根据菲涅耳区理论, 阅读器天线至标签的电磁波能量主要经由系统第一菲涅耳区传播 [12], 故图 6 中当 $d \leq d_{f1}$ 时, $\Delta F_1 \leq 1$, 系统第一菲涅耳区未受地面阻隔, MV_1 随 d_{log} 增大的下降速率为 $n_1 = -3.47$; 当 $d > d_{f1}$ 时, $\Delta F_1 > 1$, 系统第一菲涅耳区受地面阻隔, MV_2 随 d_{log} 增大的下降速率为 $n_2 = -6.44$.

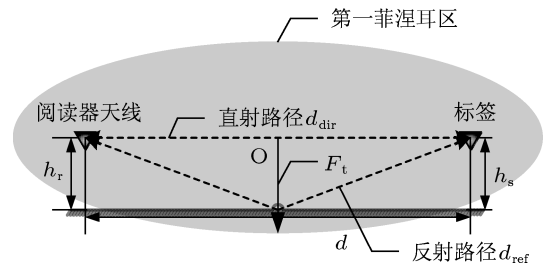


图 5 地面双射线模型示意图

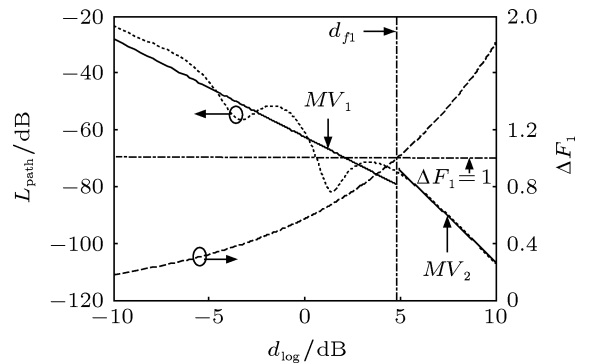


图 6 路径损耗 L_{path} 及 ΔF_1 随 d_{log} 变化

综上所述, 当第一菲涅耳区受地面阻隔时, RFID 系统路径损耗随阅读器天线至标签间距增大的下降速率显著增大, 故提出双斜率对数距离损耗模型 $L_{\text{path-2}}$ 为

$$L_{\text{path-2}} = \begin{cases} n_1 10 \log d + X_\sigma & (d \leq d_{f1}) \\ n_1 10 \log d_{f1} + n_2 10 \log d + X_\sigma & (d > d_{f1}) \end{cases}, \quad (20)$$

其中, $d_{f1} = 4h_t h_r / \lambda$ [8].

假设自由空间下 $\epsilon = 15$, $\delta = 0.005$ S/m, $f = 915$ MHz, $d \in (0.1, 10)$ m, $h_t = 0.5$ m, 则当 $h_r = 0.2$ m 及 1.7 m 时, 图 5 所示地面双射线模型情形下的

$L_{\text{path-1}}$ 及 $L_{\text{path-2}}$ 线性回归曲线随 d_{\log} 变化如图 7(a) 及图 7(b) 所示; 当 $h_r = 0.5$ m 时, $L_{\text{path-1}}$ 及 $L_{\text{path-2}}$ 的标准差 σ_1 及 σ_2 随 $h_r \in (0.1, 2)$ m 变化如图 7(c) 所示; 图 7(a) 及图 7(b) 中 n 及 σ 如表 1 所示.

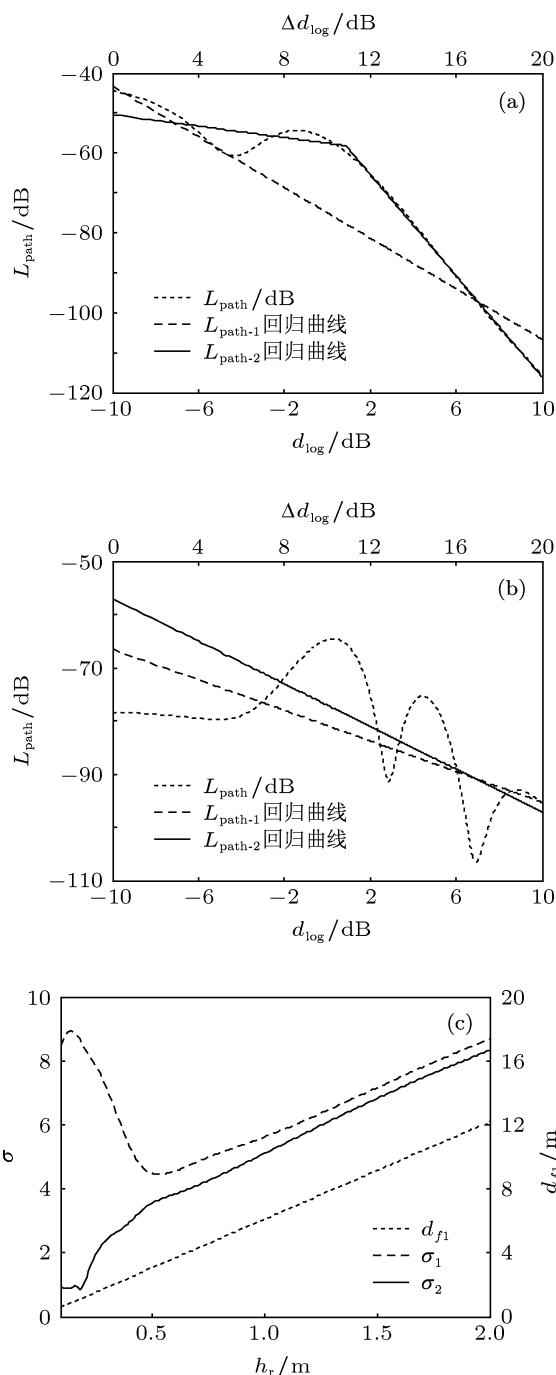


图 7 一阶及双斜率对数距离损耗模型 (a) $h_r = 0.2$ m; (b) $h_r = 1.7$ m; (c) $\sigma_{1,2}$ 随 h_r 变化

由图 7(a) 可见, 当 $h_r = 0.2$ m 时, $d_{f1} = 1.22$ m, 则当 $d > 1.22$ m 时, 阅读器天线至标签电磁波传播第一菲涅耳区受地面阻隔, 系统路径损耗随 d 增大快速减小, 故有 $\sigma_2 \ll \sigma_1$. 由图 7(b) 可见, 当 $h_r =$

1.7 m 时, $d_{f1} = 10.37$ m, 即有 $d < d_{f1}$, 故第一菲涅耳区不受地面阻隔; 但多径环境下 $L_{\text{path}}(d_0)$ 及 (19) 式中 $\overline{L_{\text{path}}}(d_0)$ 存在较大偏差, 而 (20) 式无 $\overline{L_{\text{path}}}(d_0)$ 假设, 故仍有 $\sigma_2 < \sigma_1$. 由图 7(c) 可见, 对于 $L_{\text{path-1}}$, 当 $h_r \leq 0.54$ m 时第一菲涅耳区受地面阻隔成为影响 σ_1 的主要因素, 由 (20) 式可知, d_{f1} 随 h_r 增大而增大, 即第一菲涅耳区受地面阻隔的范围随 h_r 增大而减小, 故此时 σ_1 随 h_r 增大而减小, 且当 $h_r = 0.14$ m 时, σ_1 为最小值 4.47; 当 $h_r > 0.54$ m 时, τ 成为影响 σ_1 的主要因素; 由 (18) 式可知, τ 随 $d_{\text{dir}}/d_{\text{ref}}$ 增大而增大, 即 L_{path} 波动幅度随 h_r 增大而增大, 故此时 σ_1 随 h_r 增大而增大. 对于 $L_{\text{path-2}}$, 由于采用 d_{f1} 作为损耗系数变化的断点, 故 τ 成为影响 σ_1 的主要因素, 即 σ_1 随 h_r 的增大而增大; 定义标准差变化率 $\Delta\sigma = (\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_1$, 当 h_r 较小时, 第一菲涅耳区受阻范围较大, 故 $\Delta\sigma$ 较大, 且当 $h_r = 0.18$ m 时, $\Delta\sigma$ 为最大值 90%; 当 h_r 较大时, 第一菲涅耳区受阻范围较小, 故 $\Delta\sigma$ 较小, 且当 $h_r = 2$ m 时, $\Delta\sigma$ 为最小值 4%.

表 1 $L_{\text{path-1}}$ 及 $L_{\text{path-2}}$ 的 n 及 σ 比较

h_r/m	$L_{\text{path-1}}$		$L_{\text{path-2}}$		
	n	σ_1	n_1	n_2	σ_2
0.2	-3.16	8.42	-0.72	-6.33	1.04
1.7	-1.43	7.80	-2	0	7.46

4 实验结果与分析

实验采用研发的 RFID 系统测试平台, 包括美国 NI 公司生产的 PCI-5640R IF RIO 中频卡、PXI-5610 射频上变频卡、PXI-5600 射频下变频卡及 PXI-PCIE8361 嵌入式控制器板卡. 平台设计基于软件无线电架构, 利用中频卡板载的 FPGA 模块实现相关 RFID 标准协议栈, 并结合上下变频板卡完成信号的产生及对标签返回信号的实时响应. 利用 LabVIEW 8.5 软件及其高级信号处理、频谱分析及调制等相关信号处理工具包, 实现平台的控制、参数设置及测试结果的分析与显示等功能, 并提供可视化的操作界面. 采用中国台湾 FAVITE 公司生产的 FS-GA204 天线及 FT-G1205 标签, 其中 FS-GA204 为圆极化面天线, 工作频率为 865—870 及 902—908 MHz, 增益为 8 dBi, 驻波比为 1.18. 实验在 $6.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的开阔室内环境进行, 测试场地内除实验设备外无其他障碍物, 以减少环境因素对测试结果的干扰. 测试设备及待测器件符

合 ISO/IEC 18000-6C(-6C) 标准. 仿真测试中, 基于 LabVIEW 的测试软件参数设置主要包括: 系统工作频率 $f = 915$ MHz, 阅读器天线发射功率 $P_{\text{r-t}} = 30$ dBm, $T_{\text{ari}} = 12.5$ μs , 脉冲宽度 $PW = 0.5 T_{\text{ari}}$, 调制深度 $MD = 90\%$. 根据 -6C 标准, 平台首先发射 Select 指令; 等待 5—6 T_{ari} 后, 发射 Query 指令; 标签被激活并返回 RN16 后, 发射 Ack 指令; 获取标签 UID 后, 发射 Req_RN 指令; 若接收标签 Handle 响应, 则系统完成识别.

4.1 菲涅耳余隙对路径损耗的影响

实验布置如图 3 所示. 待测标签为 FT-G1205; 阅读器天线及标签距地高度分别为 $h_r = 0.5$ m, $h_t = 0.5$ m, 水平间距为 $d = 0.6$ m; 刃形障碍物分别为 0.2 cm 厚铁板及 1.6 cm 厚高密度板, 障碍物位于阅读器天线至标签连线, 且与阅读器天线水平间距 $d_s = 0.3$ m. 测试菲涅耳余隙 h_c 以 0.01 m 步长从 -0.39 m 增加至 0.02 m 时, 金属及高密度板情形下的系统路径损耗 $L_{\text{diff}1}$ 及 $L_{\text{diff}2}$, 测试结果如图 8 所示.

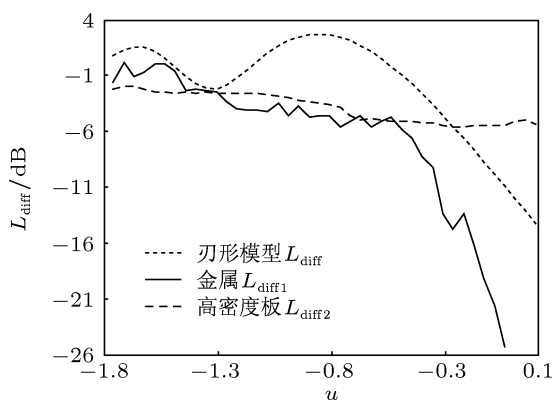


图 8 绕射损耗 L_{diff} 随相对余隙 u 变化

由图 8 可见, $L_{\text{diff}1,2}$ 随 u 增大而减小. 对于金属障碍物, $L_{\text{diff}1}$ 小于 (15) 式得到的刃形模型路径损耗 L_{diff} , 这是由于 (14) 和 (15) 式未考虑阅读器及标签天线的极化方式及方向图、障碍物表面粗糙度、电气特性及障碍物多径效应对系统绕射损耗的影响; 当 $u < -1.3$ 时, $|L_{\text{diff}1}|$ 较小, 这是由于此时系统第一菲涅耳区未受阻隔, 故系统绕射损耗较小; 当 $-1.3 \leq u < -0.577$ 时, $L_{\text{diff}1}$ 随 u 增大呈波动渐近减小; 当 $u \geq -0.577$ 时, $L_{\text{diff}1}$ 随 u 增大呈快速减小; 当 $u > -0.05$ 时, 标签不能被识别, 这是由于当 $u < -0.577$ 时 $h_c < F_0$, 由 (13) 式及图 4 可知

此时系统已不满足视距路径条件, 故系统绕射损耗快速减小. 对于高密度板, $L_{\text{diff}2}$ 随 u 增大变化幅度较小; 当 $u \leq -0.3$ 时, $L_{\text{diff}2} < L_{\text{diff}}$; 当 $u > -0.3$ 时, $L_{\text{diff}2} > L_{\text{diff}}$, 这是由于除绕射路径外, 部分电磁波经由折射穿过障碍物继续传播, 故系统绕射损耗变化较小, 且当 $u > 0$ 即系统视距路径完全阻隔时, 标签仍可完成识别. 实际应用中, 应尽量使阅读器天线及标签布置满足菲涅耳余隙大于 1.5 倍 F_1 , 以减小绕射路径损耗对系统性能的影响.

4.2 阅读器天线至标签间距对路径损耗的影响

实验布置如图 5 所示. 阅读器天线及标签距地高度分别为 $h_r = 0.5$ m, $h_t = 0.5$ m; 采用自制半波对称振子天线代替标签, 其谐振频率为 915 MHz, 增益为 2.15 dBi, 驻波比小于 1.5. 测试阅读器天线至标签水平间距 d 以 0.05 m 步长从 0.3 m 增加至 4.5 m 时的系统路径损耗 L_{path} , 测试结果如图 9 所示, $L_{\text{path-1}}$ 及 $L_{\text{path-2}}$ 的 n 及 σ 如表 2 所示.

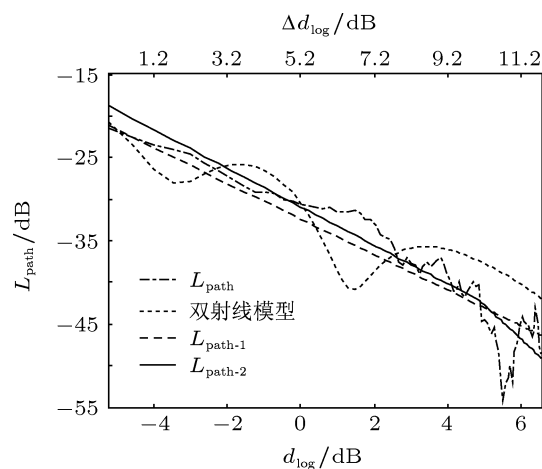


图 9 系统路径损耗 L_{path} 随间距 d_{log} 变化

由图 9 可见, 当 $d \leq 1.8$ m 时, 地面双射线模型预测的路径损耗小于 L_{path} , 这是由于阅读器天线带宽的限制使得直射及反射路径电磁波具有相近时延, 减小了干涉效应的抵消作用^[10]; 当 $d > 1.8$ m 时, 地面双射线模型预测的路径损耗大于 L_{path} , 这是由于此时除地面反射路径, 墙壁的反射路径亦对 L_{path} 产生较大影响, 使得系统路径损耗产生较大变化; 当 $d = 3.55$ m 时, L_{path} 为最小值 -54.2 dB. 由 (20) 式可得, $d_{f1} = 3.05$ m, 故图 8 中当 $d \leq 3.05$ m 时, L_{path} 下降速度较慢; 当 $d > 3.05$ m 时, 阅读器

天线至标签电磁波传播第一菲涅耳区受阻隔, L_{path} 下降速度较快; $L_{\text{path-2}}$ 利用 d_{f1} 作为斜率变化断点, 采用双斜率描述系统路径损耗的损耗指数, 故相比 $L_{\text{path-1}}$, 标准差减小 $\Delta\sigma = 11.99\%$. 需要指出的是, 实际应用中除多径效应, L_{path} 亦受系统工作频率、阅读器及标签天线极化失配及标签贴附物等因素影响, 故 $L_{\text{path-1}}$ 中 $\overline{L_{\text{path}}}(d_0)$ 相较实际测量值可能存在较大偏差, 进而增大 σ_1 .

表 2 $L_{\text{path-1}}$ 及 $L_{\text{path-2}}$ 的 n 及 σ 比较

$L_{\text{path-1}}$		$L_{\text{path-2}}$		
n	σ_1	n_1	n_2	σ_2
-2.14	2.92	-2.32	-4.07	2.57

5 结论

基于 RFID 系统链路预算模型及菲涅耳区理论, 分析了菲涅耳余隙及阅读器天线至标签间距变化对系统路径损耗的影响. 理论分析及测试结果表

明, 自由空间下系统路径损耗及对数距离呈斜率为 -4 的线性关系; 室内多径环境下系统路径损耗下降速度较快; 阅读器天线至标签电磁波传播第一菲涅耳区受阻隔产生附加损耗, 增大系统路径损耗下降速度; 当菲涅耳余隙大于第一菲涅耳区半径 1.5 倍时, 刃形障碍物对系统路径损耗影响较小; 室内环境下, 相比传统对数距离路径损耗模型, 本文提出的双斜率模型标准差减小 10% 以上. 本文分析的绕射损耗仅适用于单峰刃形障碍物, 这是由于对于多峰情形, 信号功率衰减一般较大, 且难以由闭式数学计算得到求精确解的一般方法; 所提出的双斜率路径损耗模型需根据具体应用环境通过测量及计算取得, 且当环境发生较大变化时需对模型参数进行修正. 下一步工作将结合电磁波传播理论及无源 UHF RFID 系统特点, 研究多峰及非刃形障碍物对系统路径损耗的影响, 提出适用范围更广的绕射附加损耗分析方法; 结合神经网络方法, 提出自适应的系统路径损耗模型.

- [1] Ruiz A R J, Granja F S, Honorato J C P, Rosas J G 2012 *Proc. IEEE Trans. Instrum. Meas.* **61** 178
- [2] Li B, He Y G, Hou Z G, She K, Zuo L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 4202 (in Chinese) [李兵, 何怡刚, 侯周国, 余开, 佐磊 2011 物理学报 **60** 4202]
- [3] 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]
- [4] Nikitin P V, Rao K 2009 *IEEE International Conference on RFID Orlando FL, USA, April 27–28, 2008* p117
- [5] S kai, He Y G, Zuo L, Fang G F 2011 *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies Weihai, China, July 6–9, 2011* p1441
- [6] Karthaus U, Fischer M 2003 *IEEE J. Solid-State Circuits* **38** 1602
- [7] Lazaro A, Girbau D, Salinas D 2009 *Proc. IEEE Trans. Antennas Propag.* **57** 1241
- [8] Wang H G, Pei C X, Pan Q 2009 *IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing Beijing, China, Sept. 24–26, 2009* p1
- [9] Nikitin P V, Rao K V S 2009 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **56** 2374
- [10] Lee W C Y 1998 *Mobile Communication Engineering: Theory and Applications* (2nd Ed.) (New York: McGraw-Hill) pp140–143
- [11] Goldsmith A (Translated by Yang H W, Li W D, Guo W B) 2007 *Wireless Communications* (Beijing: Posts and Telecom Press) pp33–35 (in Chinese) [哥德史密斯著 (杨鸿文, 李卫东, 郭文彬译) 2007 无线通信 (北京: 人民邮电出版社) 第 33—35 页]
- [12] Feuerstein M J, Blackard K L, Rappaport T S, Seidel S Y, Xia H H 1994 *IEEE Trans. Vehicular Technol.* **43** 487
- [13] Xia H H, Bertoni H L, Maciel L R, Stewart A L, Rowe R 1993 *Proc. IEEE Trans. Antennas Propag.* **41** 1439

Analysis and measurements of path loss effects for ultra high frequency radio-frequency identification in real environments*

Zuo Lei^{1)2)†} He Yi-Gang¹⁾²⁾ Li Bing¹⁾²⁾ Zhu Yan-Qing²⁾ Fang Ge-Feng²⁾³⁾

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

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

3) (National Key Laboratory of National Defense Science and Technology on Electronic Test and Measurement, Qingdao 266555, China)

(Received 4 December 2012; revised manuscript received 6 February 2013)

Abstract

Based on the principles of radio-frequency identification (RFID) technology and Friis propagation equation, the path loss expression of ultra high frequency (UHF) RFID in free space is provided. The Fresnel clearance and horizontal interval between reader antenna and tag are employed as dependent variables, and then the obstructing effect of the first Fresnel zone on path loss is discussed. By the methods of linear regression and minimum mean-square error, a dual-slope Logarithm distance path losses model is proposed. The path losses of UHF RFID under different parameters are measured in open indoor environment. The measurement results indicate that RFID system experiences less fading when the Fresnel clearance is 1.5 times higher than the first Fresnel radius. The standard deviation of the proposed model with two slopes reduces ten percent or more compared with that of traditional logarithm distance path loss model.

Keywords: radio frequency identification, path loss, Fresnel zone, linear regression

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Fx, 42.15.Dp

DOI: 10.7498/aps.62.144101

* 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, China (Grant No. C1120110004), and the Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province, China (Grant No. 11C0479).

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