

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407652

线性阵列分布 RFID 系统性能建模方法研究*

佐磊^{1,2} 张一卓¹ 孔维业¹ 雷碧航¹ 丁雨晴¹

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009;

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

摘要: 标签间互耦效应对不同位置标签的作用效果不同,使得线性阵列分布 RFID 系统的整体性能随标签间距与数量的改变呈现非线性变化。鉴于此,基于 RFID 工作原理与电磁波传播理论,推导了多标签 RFID 系统中标签互阻抗及功率传输系数的表达式;利用功率传输系数,分析了标签线性等距分布情形下,互耦效应对不同位置标签及系统整体性能的影响,并建立了系统最小功率传输系数随标签间距与标签数量变化的数学模型;在开阔室内环境中,测试了标签间距和数量变化时的应答信号功率。理论分析与实验结果表明,线性等距分布时,标签的功率传输系数与间距呈非线性关系;互耦效应对标签的影响程度以工作波长为周期逐步减小,在间距为波长倍数时取得极大值;最小功率传输系数出现的位置随着间距的增大在中心与外侧之间以波长为周期波动;系统性能测试结果与所建立模型的变化规律保持一致。

关键词: 射频识别;互耦效应;互阻抗;多标签 RFID 系统;线性阵列分布

中图分类号: TN821+.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 501.1015

Research on RFID system performance modeling method under linear array distribution

Zuo Lei^{1,2} Zhang Yizhuo¹ Kong Weiye¹ Lei Bihang¹ Ding Yuqing¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, 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: To address the problem that the mutual coupling effect between tags has different effects on tags at different positions, which makes the overall performance of the linear array distributed RFID system show nonlinear changes with the change of tag spacing and number. The method involves that based on the working principle of RFID and the theory of electromagnetic wave propagation, the expressions of the mutual impedance and power transmission coefficient of tags in the multi-tag RFID system are derived. Using power transmission coefficient, the influence of mutual coupling effect tags at different positions and the overall performance of the system in the case of linear equidistant distribution of tags is analyzed. A mathematical model of the system's minimum power transmission coefficient changing with the tag spacing and the number of tags is established. In an open indoor environment, the response signal power is tested when the tag spacing and number change. Theoretical analysis and experimental results show that when the tags are linearly equidistantly distributed, the power transmission coefficient of the tags is nonlinearly related to the spacing. The influence of the mutual coupling effect on the tags no longer decreases monotonically with the increase of distance, but gradually decreases with the wavelength as the period, and reaches the maximum value when the spacing is a multiple of the wavelength. The location of the system's minimum power transmission coefficient fluctuates between the center and the outside with a wavelength as the spacing increases. The test results of system performance are consistent with the change pattern of the established model.

Keywords: radio frequency identification; coupling effect; mutual impedance; multi-tag RFID system; linear array distribution

0 引言

无源射频识别 (radio frequency identification, RFID) 标签通过电磁感应从阅读器发射信号中获取能量并对自身供电,是构建通感算一体化网络的重要支撑^[1-2]。天线与负载阻抗的共轭匹配是制约标签性能的关键因素;然而在零售、物流等实际应用中的多标签环境下,标签间的互耦效应会导致标签天线与阻抗匹配失谐,进而降低标签及 RFID 系统性能^[3-4]。

目前,已有诸多文献对互耦效应影响 RFID 系统性能的作用机理及分析方法开展研究。文献[5-7]基于多端口等效电路的分析方法,导出了互耦效应作用下标签天线互阻抗计算表达式,给出了基于功率传输系数的互耦效应影响分析方法。文献[8]基于变压器模型,从无线电传输的角度推导了近场密集标签间的互阻抗表达式,并研究了双标签系统近场频率偏移问题。文献[9]使用电磁场拉格朗日密度与复螺旋度评估了电磁场分布对天线互耦的影响。文献[10]通过建立信道模型,给出了密集部署下目标标签的应答信号功率 (received signal strength indication, RSSI) 波动规律。文献[11]利用矩量法对互阻抗进行了分析,并将互阻抗代入链路模型以评估互阻抗对系统通信链路影响。文献[12]通过去耦合距离量化了不同尺寸天线的互耦效应。文献[5-12]从频率偏移、RSSI 等多个维度给出了互耦效应影响的分析方法;但所提出方法仅以单个标签作为研究对象,未考虑多标签互耦效应交互作用下 RFID 系统性能的变化。此外,这种特性可被用于传感检测,文献[13-14]分别利用多标签互耦效应进行无机盐浓度检测与运动物体的间距测量。文献[15-16]对偶极天线间的电磁耦合进行了统计分析,使用 NEC 仿真评估其阻抗失配,并通过近地面传播模型将现有的基本偶极子传播模型推广到实际有限长偶极子情况。文献[17]对偶极子天线的匹配特性进行了统计分析,给出不同密度下偶极子标签天线吸收功率的累积分布函数。文献[18]通过仿真实验比较了商用标签与简化的半波偶极子标签的相似性,指出在密集部署情况下标签吸收功率随密度增加而衰减。文献[15-18]给出了多标签环境下互耦效应影响 RFID 系统性能的分析方法,但并未给出系统性能随标签分布参数变化的数学模型。

综上所述,现有文献以互阻抗为切入点,通过系统链路模型及其关键参数分析了互耦效应对频率偏移、RSSI 等系统性能参数的影响,但并未给出互耦效应作用下系统性能的建模方法。本文基于 RFID 工作原理与电磁波传播理论,推导了标签互阻抗及功率传输系数的表达式;利用功率传输系数分析了标签线性等距分布情形下,互

耦效应对不同位置标签及系统整体性能的影响;建立了系统最小功率传输系数随标签间距与标签数量变化的数学模型,并在开阔室内环境中,测试了标签间距和数量变化时的应答信号功率。

1 多标签无源 UHF RFID 系统链路预算模型

1.1 典型无源 UHF RFID 系统链路模型

RFID 系统通信链路包括阅读器至标签的前向链路和标签至阅读器的反向链路。典型无源 UHF RFID 系统如图 1 所示。其中,标签天线阻抗为 $Z_a = R_a + jX_a$, 标签负载芯片为 $Z_L = R_L + jX_L$, V 是标签天线的感应电压。

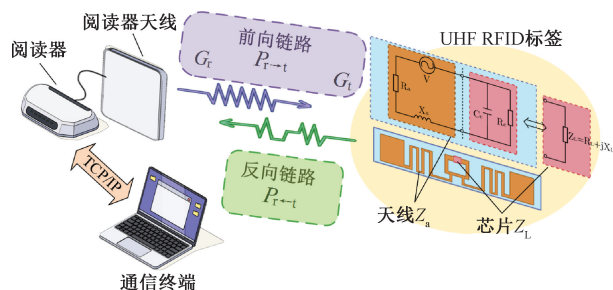


图 1 典型无源 UHF RFID 系统模型与标签等效电路

Fig. 1 Typical passive UHF RFID system model and tag equivalent circuit

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 、 G_t , 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_t 为:

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

其中, λ 为自由空间波长, $S_r = P_t G_t / (4\pi D^2)$ 为阅读器在标签处的功率密度, $A_{et} = G_t \lambda^2 / (4\pi)$ 为标签天线的有效口径。式(1)换算为级差单位后如式(2)、(3)所示,其中, P_t 和 P_{r-t} 单位为 dBm, G_r 和 G_t 单位为 dBi, L (dB) 为路径损耗。

$$P_t = P_{r-t} + G_r + G_t + L \quad (2)$$

$$L = 10 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \quad (3)$$

前向链路中功率传输系数 τ 与芯片接收功率 P_c 为^[19]:

$$\tau = \frac{4R_a R_L}{|Z_L + Z_a|^2} \quad (4)$$

$$P_c = P_t \tau = \frac{P_{r-t} G_r G_t R_a R_L \lambda^2}{4(\pi D)^2 |Z_L + Z_a|^2} \quad (5)$$

在反向链路中,取再辐射匹配系数 $K = 4R_a^2 / |Z_L + Z_a|^2$, 则标签天线的再辐射功率为:

$$P_{r \leftarrow t} = K P_t G_t = \frac{P_{r \leftarrow t} G_t G_t^2 R_a^2 \lambda^2}{4 \pi^2 D^2 |Z_L + Z_a|^2} = \frac{1}{2} I^2 R_a G_t \quad (6)$$

功率波信号经过再辐射到达阅读器,当标签负载阻抗为匹配状态时,最后阅读器接收的功率为:

$$P_{re} = \frac{P_{r \leftarrow t} G_t \lambda^2}{(4 \pi D)^2} = \frac{4 P_{r \leftarrow t} G_t^2 R_a^2 \lambda^4}{(4 \pi D)^4 |Z_L + Z_a|^2} \quad (7)$$

1.2 多标签系统互阻抗与系统链路模型

实际应用中,当阅读器天线辐射场存在多个标签时,目标标签天线的感应电压由阅读器天线辐射电磁波和临近空间其他标签产生的散射电磁波共同作用产生,其他标签散射的电磁波会导致标签的阻抗发生变化,即在互耦效应作用下,标签天线产生了互阻抗。

多标签 RFID 系统及考虑互耦效应的标签电路等效模型如图 2 所示,其中 n 为系统中标签的总数。设标签 i 为目标标签,标签 $j(j \neq i)$ 为干扰标签,目标标签与干扰标签相对方向天线增益分别为 G_i 和 G_j ; V_i 为标签天线 i 上的总感应电压, V_j 为标签天线 j 上的总感应电压, V_{ij} 为标签 j 散射电磁波在标签 i 上产生的感应电压; Z_{ij} 为标签 i, j 之间的互阻抗, $Z_{ii} = Z_{a ii} + Z_{L i i}$, $Z_{jj} = Z_{a j j} + Z_{L j j}$ 分别为标签 i, j 的自阻抗,其中 $Z_{a ii}$ 和 $Z_{a j j}$ 为标签天线的阻抗, $Z_{L i i}$ 和 $Z_{L j j}$ 为标签的负载阻抗, I_i 和 I_j 为标签天线上的感应电流。

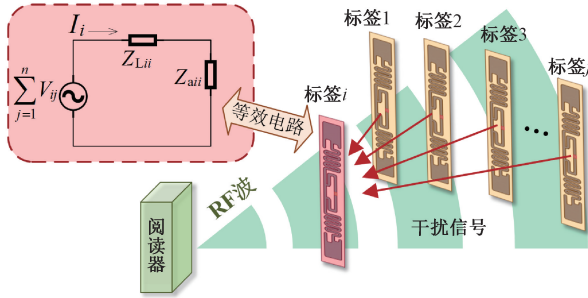


图 2 多标签密集布放及标签 i 等效电路图

Fig. 2 Dense placement of multiple tags and equivalent circuit diagram of tag i

多标签 RFID 系统可以看成是一个 n 端口网络,基于文献[7]中对双标签等效二端口网络的研究基础,可以推导出多标签系统的等效 n 端口网络表达式。对于标签 i ,它受到的感应电压为 $\sum_{j=1}^n V_{ij}$,其中, $V_{ij} = Z_{ij} I_j$, $V_{ji} = Z_{ji} I_i$,根据基尔霍夫定律,则有:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$V_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} = \sum_{j=1}^n Z_{ij} I_j = Z_{i1} I_1 + Z_{i2} I_2 + \cdots + Z_{in} I_n \quad (9)$$

由式(6)可得,对于干扰标签 j 而言,天线散射功率为:

$$P_{ij} = \frac{1}{2} I_j^2 R_{aj} G_j(\theta_{ji}, \varphi_{ji}) \quad (10)$$

由式(1)可知,目标标签 i 对于干扰标签 j 散射电磁波的接收功率为:

$$P_{reij} = S_{ij} A_{eti} = \frac{P_{ij} G_i(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) G_j(\theta_{ji}, \varphi_{ji}) \lambda^2}{4 \pi^2 d_{ij}^2} \quad (11)$$

其中, S_{ij} 是标签 j 天线散射电磁波传输到标签 i 处的功率密度, A_{eti} 为标签 i 天线的有效面积, d_{ij} 为标签 i 与标签 j 之间的距离。

由式(6)可知,标签 i 天线对于干扰标签 j 天线散射电磁波的再辐射功率为:

$$P_{raij} = P_{reij} K_i G_i(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) = \frac{I_j^2 G_i^2(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) G_j^2(\theta_{ji}, \varphi_{ji}) \lambda^2 R_{a ii} R_{a j j}}{8 \pi^2 d_{ij}^2 |Z_{a ii} + Z_{L i i}|^2} \quad (12)$$

其中, $K_i = 4 R_{a ii}^2 / |Z_{a ii} + Z_{L i i}|^2$ 为标签 i 的阻抗匹配因子。由式(10)可得,标签 i 天线对标签 j 天线散射电磁波的再辐射功率可表示为:

$$P_{raij} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{ij}}{|Z_{a ii} + Z_{L i i}|} \right)^2 R_{a ii} G_i(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) = \frac{1}{2} \frac{R_{a ii}}{|Z_{a ii} + Z_{L i i}|^2} (Z_{ij} I_j)^2 G_i(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) \quad (13)$$

由式(12)、(13)知,标签 i 与 j 之间的互阻抗、标签 i 的总阻抗为:

$$|Z_{ij}| = \frac{\sqrt{R_{a ii} R_{a j j} G_i(\theta_{ij}, \varphi_{ij}) G_j(\theta_{ji}, \varphi_{ji})}}{2 \pi d_{\lambda ij}} \quad (14)$$

$$\angle Z_{ij} = \Phi_j + 2 \pi d_{\lambda ij} \quad (15)$$

$$R_{a ij} = \operatorname{Re}(Z_{ij}) = |Z_{ij}| \cos(\angle Z_{ij}) \quad (16)$$

$$X_{a ij} = \operatorname{Im}(Z_{ij}) = |Z_{ij}| \sin(\angle Z_{ij}) \quad (17)$$

$$Z_i = R_i + j X_i = \sum_{j=1}^n Z_{ij} \quad (18)$$

$$R_{ai} = R_{a ii} + \sum_{j=1}^n R_{a ij} =$$

$$R_{a ii} + \sum_{j=1}^n \operatorname{Re}(Z_{ij}) = R_{a ii} + \sum_{j=1}^n |Z_{ij}| \cos(\angle Z_{ij}) \quad (19)$$

$$X_{ai} = X_{a ii} + \sum_{j=1}^n X_{a ij} =$$

$$X_{a ii} + \sum_{j=1}^n \operatorname{Im}(Z_{ij}) = X_{a ii} + \sum_{j=1}^n |Z_{ij}| \sin(\angle Z_{ij}) \quad (20)$$

其中,标签 i 与 j 之间的波长数 $d_{\lambda ij} = d_{ij} / \lambda$, Φ_j 为标签 j 天线入射波与反射波相位差。

根据式(4)可知,标签*i*的功率传输系数为:

$$\tau_i = \frac{4R_{ai}R_{aii}}{|Z_{ai} + Z_{aii}^*|^2} = \frac{4R_{ai}(R_{aii} + \sum_{j=1}^n |Z_{ij}| \cos(\angle Z_{ij}))}{(R_{aii} + R_{aii} + \sum_{j=1}^n |Z_{ij}| \cos(\angle Z_{ij}))^2 + (\sum_{j=1}^n |Z_{ij}| \sin(\angle Z_{ij}))^2} \quad (21)$$

已知标签*i*芯片的开启功率为 P_{thi} ,根据式(5),则有标签*i*最小接收功率至少为 $P_{ti} = P_{thi} / \tau_i$,级差单位下即 $P_{ti} = P_{thi} - 10\lg(\tau_i)$,则由式(2)可知,保证标签*i*可被读写的阅读器最小发射功率为:

$$P_{ri-min} = P_{thi} - 10\lg(\tau_i) - G_t - G_r - L \quad (22)$$

当阅读器发射功率 P_r 已知时,由式(7)可知,多标签系统中标签*i*的应答信号功率为:

$$P_{rssi-i} = P_r + 2G_r + 2G_t + 40\lg\left(\frac{\lambda}{4\pi D}\right) + 10\lg(K_i) \quad (23)$$

目前,在零售、物流、资产管理等多标签场景中,标签与标签之间一般相互处于对方的辐射远场区,即标签之间的间距为 $d > \lambda/2\pi$,故本文研究的对象为间距 $d > \lambda/2\pi$ 的等距线性分布的多标签 RFID 系统。

为简化分析过程,不失一般性,设天线入射波与反射波的相位差 $\Phi = 0$,则由式(15)可知互阻抗的相位角仅由波长数决定。由文献表明,互耦效应对偶极子天线的增益影响较小,且考虑到实际应用场景,本文研究的线性等距布放的多标签 RFID 系统中天线的相对角度不会发生变化,故忽略增益的改变。同时,在实际应用场景中,一般使用的是同类型偶极子标签,故标签的自阻抗是相等的,即取 $Z_{aii} = Z_{ajj} = Z_a$ 、 $R_{aii} = R_{ajj} = R_a$ 、 $X_{aii} = X_{ajj} = X_a$ 、 $G_i = G_j = G = 1$ 。为简化互阻抗计算方法,取以下中间变量:

$$x_{ij} = 2\pi \frac{d_{ij}}{\lambda} = 2\pi d_{\lambda ij} \quad (24)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^n \frac{\cos(2\pi d_{\lambda ij})}{2\pi d_{\lambda ij}} = \sum_{j=1}^n \frac{\cos x_{ij}}{x_{ij}} \quad (25)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n \frac{\sin(2\pi d_{\lambda ij})}{2\pi d_{\lambda ij}} = \sum_{j=1}^n \frac{\sin x_{ij}}{x_{ij}} \quad (26)$$

则根据式(19)~(21),可得:

$$R_{ai} = R_a + R_a C_i \quad (27)$$

$$X_{ai} = X_a + R_a S_i \quad (28)$$

$$\tau_i = \frac{4R_a(R_a + R_a C_i)}{(2R_a + R_a C_i)^2 + (R_a S_i)^2} = \frac{4(1 + C_i)}{4 + 4C_i + C_i^2 + S_i^2} \quad (29)$$

由式(29)可知,当标签群为同类型标签且增益 $G = 1$ 时, τ 与自阻抗大小无关。

2 线性等距布放多标签 RFID 系统性能研究

在典型的单标签场景下,标签天线与负载的阻抗一般设计为共轭匹配关系;此时 $\tau = 1$,标签将获得最大的前向功率传输效率。然而,在商品零售、快递物流及生产流水线等场景中,标签常呈线性等距布放;此时,标签之间互耦效应产生的互阻抗会导致标签天线与负载阻抗失谐,使得 $\tau < 1$,进而降低单个标签及整个 RFID 系统的性能^[20]。

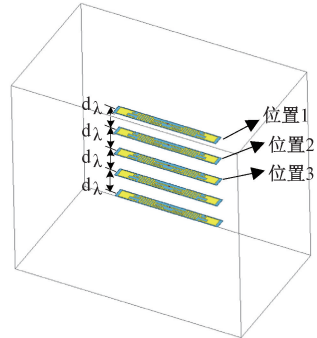
2.1 对系统中单个标签的影响

由式(14)、(15)得,标签天线互阻抗和其与其他标签的相对位置关系紧密相关。因此,分析互耦效应对不同位置标签的作用效果,是研究线性等距布放的多标签 RFID 系统性能的基础。本文以典型商用标签 ALN-9640 为对象,通过计算和仿真实验,分析线性等距布放情形下标签间距和数量变化对功率传输系数的影响。ALN-9640 的自阻抗为 $Z_a = R_a + jX_a = 27 + j201(\Omega)$,其模型及多标签线性等距布放仿真示意图如图3(a)、(b)所示。



(a) ALN-9640 标签模型

(a) ALN-9640 tag model



(b) 多标签仿真模型

(b) Multi-tag simulation

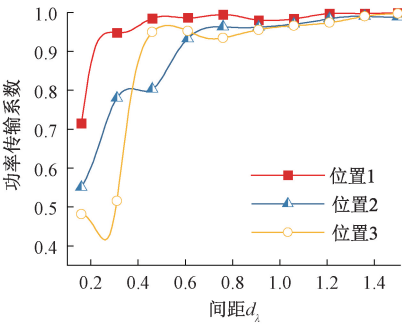
图3 ALN-9640 模型与多标签系统电磁仿真图

Fig. 3 ALN-9640 tag model and electromagnetic simulation diagram of multi-label system

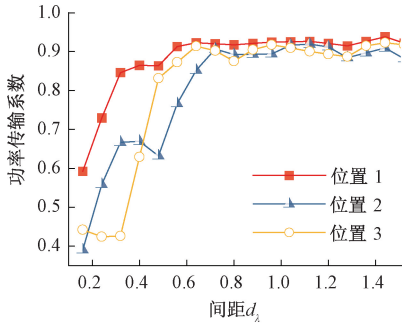
1) 标签间距对不同位置标签功率传输系数的影响

假设单个标签增益 $G = 1$,入射波与反射波相位差 $\Phi = 0$ 。根据式(29),当 d_λ 以0.01为步长,从 $1/2\pi \approx 0.16$ 增大至1.5时, τ 随 d_λ 变化的计算结果如图4(a)所示;利用 HFSS 软件和式(21),工作频率为915 MHz, d_λ 以0.08为步长,从 $1/2\pi \approx 0.16$ 增大至1.5时, τ 随 d_λ 变化的计算结果如图4(b)所示。

考虑到标签位置的对称性,图4仅给出图3(b)中位置1、2、3的单侧标签计算和仿真结果。由图4(a)、(b)



(a) 功率传输系数随距离变化计算值
(a) Calculated value of τ varying with distance



(b) 功率传输系数随距离变化仿真值
(b) Simulation value of τ varying with distance

图 4 5 标签系统标签 τ 与 d_λ 的关系

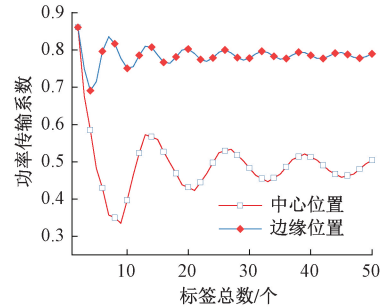
Fig. 4 Relationship between τ and d_λ of tags at 5-tag system

可知,标签 1 的 τ 值变化最小,这表明位于阵列边缘处的标签受互耦效应影响最小;标签 2、3 的 τ 值变化幅度较大,但两个标签 τ 值随 d_λ 增大而变化的幅度大小关系并不恒定,这表明位于阵列中部的标签受互耦效应影响较大,但阵列中心位置的标签并不一定是受影响程度最大的。同时,由于式 (29) 计算时采用的典型值设置,计算和仿真的 τ 在相同 d_λ 处的大小存在一定偏差,但 τ 随 d_λ 增大的变化趋势一致,即各位置标签的 τ 均随 d_λ 增大呈非线性变化,波动渐进增大并趋近 $\tau = 1$ 。这表明文献[7]中所给出的双标签情形下 τ 随 d_λ 增大而单调增大并趋近 $\tau = 1$ 的规律并不适用于多标签 RFID 系统,在多标签互耦效应交互作用下,标签性能随 d_λ 改变的变化将更为复杂。

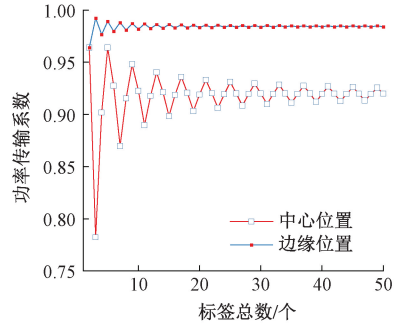
2) 标签数量对不同位置标签功率传输系数的影响

假设单个标签增益 $G = 1$,入射波与反射波相位差 $\Phi = 0$ 。则由式 (29) 可得, d_λ 分别为 0.16、0.5、1、1.5 情形下,标签数量 n 以 1 为步长、从 2 增加至 50 时,线性阵列中心位置标签与边缘位置标签的 τ 随 n 的变化如图 5 所示。

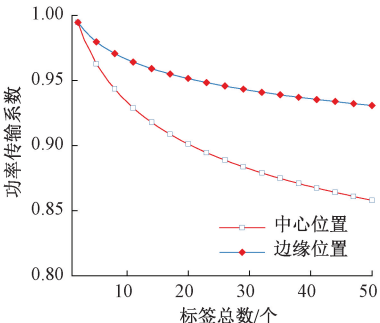
由图 5 可知,当 d_λ 为 4 种典型值的情形下, τ 随着 n 的增大逐渐趋向于平缓;中心位置标签受互耦效应影响程度大于边缘位置标签。对于图 5(a)、(b)、(d),即 d_λ



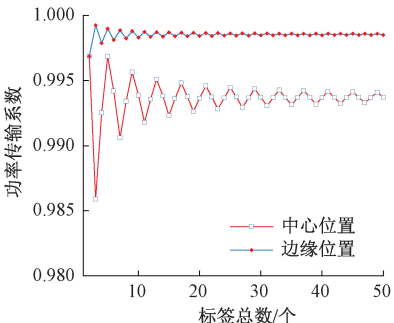
(a) $d_\lambda=0.16$ 时 τ 与标签总数的关系
(a) The change of τ with number of tags when $d_\lambda=0.16$



(b) $d_\lambda=0.5$ 时 τ 与标签总数的关系
(b) The change of τ with number of tags when $d_\lambda=0.5$



(c) $d_\lambda=1$ 时 τ 与标签总数的关系
(c) The change of τ with number of tags when $d_\lambda=1$



(d) $d_\lambda=1.5$ 时 τ 与标签总数的关系
(d) The change of τ with number of tags when $d_\lambda=1.5$

图 5 功率传输系数关于标签总数的变化

Fig. 5 Variation of τ with respect to the number of tags

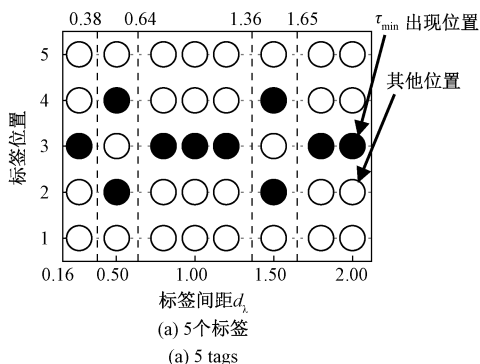
为 0.16、0.5 及 1.5 时,中心和边缘位置标签的 τ 都随 n 增大呈震荡幅度渐进衰减的类周期变化;中心位置标签的变化周期约为边缘标签的两倍。对于图 5(c),即 $d_\lambda = 1$ 时,中心和边缘位置标签的 τ 都随 n 增大单调减小。这是由于当标签间距为波长的倍数时,由式 (25)、(26) 可得 $S_i = 0$ 、 $C_i = \sum_{j=1}^n 1/x_{ij}$,代入式 (29) 后, τ_i 对 C_i 求导可得:

$$\frac{d\tau_i}{dC_i} = \frac{-4C_i}{(C_i + 2)^3} \quad (30)$$

由式 (25)、(30) 可得, $C_i \in [0, +\infty]$, $\tau_i' < 0$, 且 C_i 与标签个数 n 正相关,因此 τ_i 随 n 增大单调递减。

2.2 对 RFID 系统整体性能的影响

根据 2.1 节的分析可知,在标签线性等距分布的 RFID 系统中,不同位置的标签受互耦效应影响的程度存



在较大差异。对于系统整体而言,受互耦效应影响程度最大即 τ 值最小的标签,决定了系统 100% 识别率所需要的阅读器最小发射功率。因此,定义 d_λ 为任意值时, n 个标签的 τ 中最小的值为此时的系统最小功率传输系数 $\tau_{\min}$,并利用 $\tau_{\min}$ 分析 d_λ 和 n 对系统整体性能的影响。

1) 标签间距对系统最小功率传输系数的影响

以 5 标签和 8 标签系统为例分析 d_λ 对 $\tau_{\min}$ 的影响。假设单个标签 $G = 1$,入射波与反射波相位差 $\Phi = 0$ 。根据式 (29),当 d_λ 以 0.01 为步长、从 0.16 增大至 2 时, $\tau_{\min}$ 出现的位置随 d_λ 的变化如图 6 所示。由图 6 可知,随着 d_λ 的增加, $\tau_{\min}$ 不会出现在阵列边缘位置,但也并不固定在阵列中心位置; $\tau_{\min}$ 出现的位置随 d_λ 的增加,呈以 λ 为周期、在偏外侧与中心位置之间波动变化。

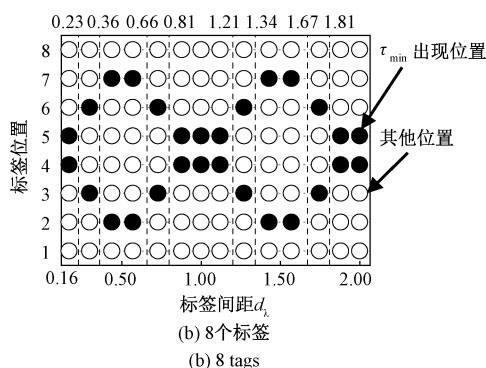


图 6 最小功率传输系数出现位置与标签间距的关系

Fig. 6 Relationship between position of $\tau_{\min}$ and tag spacing

2) 标签数量对系统最小功率传输系数的影响

对于线性等距布放 RFID 系统,标签数量与标签间距共同决定标签的分布状态,本小节将研究标签数量 n 对多标签系统临界性能的影响。标签数量 n 以 1 为步长、从 2 个至 20 个改变时,研究 3 个特殊间距,即 d_λ 分别为 0.16、1 和 1.5 时多标签 $\tau_{\min}$ 的变化情况, $\tau_{\min}$ 出现的位置与大小关于标签数量的关系如图 7 所示。由图 7 可知,特殊间距下随着标签数量的增长,系统最小功率传输系数的变化规律与图 5 中边缘与中心标签的功率传输系数变化情况近似。图 7(b) 中,当 $d_\lambda = 1$ 时,随着标签数量 n 的增加,系统最小功率传输系数呈指数衰减;而在图 7(a)、(c) 中,系统最小传输系数以不同的周期震荡衰减。

结合图 6 和 7 可知, $\tau_{\min}$ 出现的位置主要由标签间距决定,而与标签数量关系较弱。当间距为 λ 整数倍时, $\tau_{\min}$ 出现的位置聚向中间;当间距偏离 λ 整数倍时, $\tau_{\min}$ 出现的位置倾向于两侧。

3) 基于分布参数的多标签系统最小功率传输系数计

算模型

综合上述分析结果,建立最小功率传输系数 $\tau_{\min}$ 关于标签间距与标签数量的计算模型。标签数量 n 以 1 为步长、从 2 个增加至 100 个,标签间距 d_λ 以 0.01 为步长、从 0.16 增加至 3 时, $\tau_{\min}$ 随 n 与 d_λ 变化如图 8 所示。间距分别为 1 至 5 倍 λ 时 $\tau_{\min}$ 关于标签个数的变化由图 9 给出。

由图 8 可知, $\tau_{\min}$ 呈现以工作波长 λ 为周期的波动变化,并在间距为 λ 倍数时取得极小值。双标签实验中通常将间距超过 1.5 倍波长时视为标签稀疏分布,忽略互耦效应的影响^[7,11],即当标签在 1.5 倍波长范围内的密度固定时,数量的增长不对 $\tau_{\min}$ 产生明显影响。但如图 9 中 $d_\lambda = 1$ 时 $\tau_{\min}$ 曲线,标签数量为 80 时将产生 16.4% 的性能恶化。考虑到实际应用场景中阅读器的阅读范围通常在 30 m 以内,因而数量为 80 个以上的情况不进行讨论。模型表明,标签受互耦效应的影响程度以波长为周期逐步减小,在间距为波长倍数时取极大值。因此当实际应用中标签数量较大时,可以适当增大标签

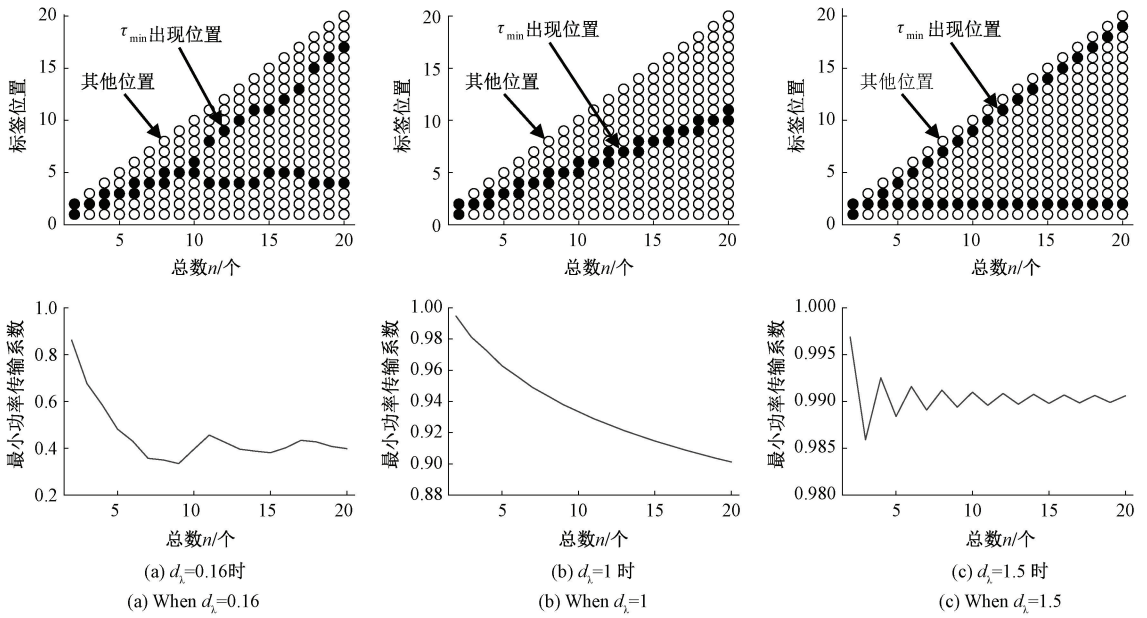


图 7 不同间距下最小功率传输系数出现位置与大小

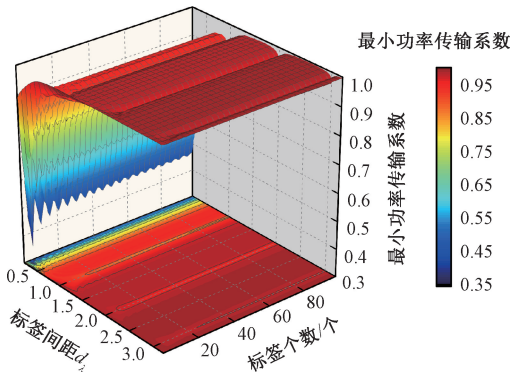
Fig. 7 Relationship between position of τ_{min} and tag spacing

图 8 最小功率传输系数模型

Fig. 8 Minimum power transmission coefficient model

间距离,并避免间距为波长倍数的情形。

对图 8 的结果进行拟合得到线性阵列标签的最小功率传输系数 τ_{min} 随标签数量 n 与间距 d_k 变化的模型为:

$$\tau_{min}(n, d_k) = 1 - \frac{0.022 \cdot e^{-0.92d_k}}{A_1 - \cos(2\pi d_k)} - A_2 \cdot e^{-4.89d_k} \quad (31)$$

其中,

$$\begin{cases} A_1 = 1.04 + \frac{1}{n-1.6} \\ A_2 = 1.45 - 25.98e^{-1.56n} \end{cases} \quad (32)$$

需要说明的是,为了简化分析过程,图(8)中假设标签天线增益为 1,式(31)的模型是基于该假设的基础上建立的。实际商用标签天线增益虽然各不相同,但一般

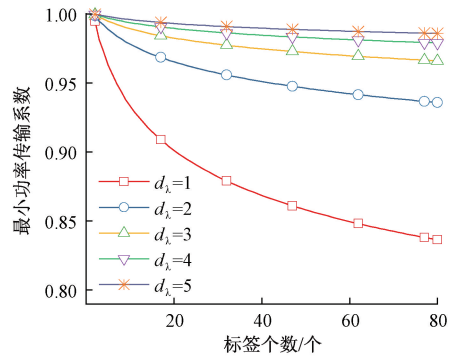


图 9 波长倍数处的最小功率传输系数

Fig. 9 Minimum power transmission coefficient at multiples of wavelength

均大于 1。因此,在标签间互耦效应作用下,实际商用标签功率 τ_{min} 的下降幅度会大于式(31)所建立模型的估计值。

3 实验结果及分析

实验采用深圳远诺德公司生产的 UHF RFID 系统,其中包括阅读器 YND3002、阅读器天线 YND9028,其中 YND9028 的极化方式为圆极化,增益为 9.2 dBi;系统工作频率设置为 915 MHz;标签贴附于 PVC 透明薄盒上。现场测试设置在空旷的室内环境,室内布置示意图与实验场景如图 10 所示,阅读器与标签群所在平面之间的距离 D 为 2 m。

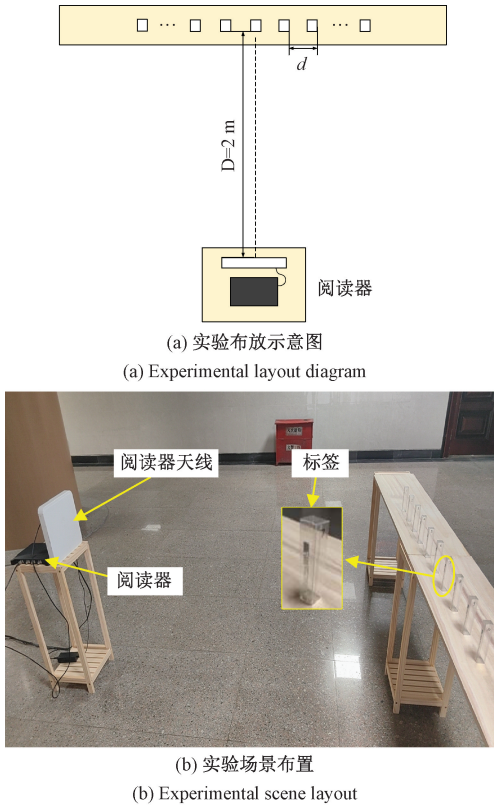


图 10 实验示意图与场景布置

Fig. 10 Experimental scene diagram and layout

3.1 对系统中单个标签的影响

1) 标签数量对系统最小功率传输系数的影响

设置阅读器发射功率为 30 dBm, 采用标签 ALN-9640, 分别测量 4、5 个标签线性等间距分布情形下, 标签间距 d 以 2.5 cm 为步长, 从 5 cm 增加至 100 cm 时, 标签应答信号功率随 d 的变化。考虑阅读器天线不同方向增益的差异, 为减小误差, 使用单个标签测量不同位置的应答信号功率, 单个标签处于测量范围内不同位置平均值为 -50.1 dBm, 从多标签系统测量结果的相应位置减去该值相对于均值的偏差值。测试结果经上述误差补偿方法处理后如图 11 所示。

由图 11 可知, 系统中每个标签的应答信号功率随间距 d 增大呈现周期性振荡衰减, 振荡周期约为一个工作波长 $\lambda = 32.8$ cm。随着间距增大, 互耦效应影响减弱而逐渐趋近于稳定值 -50.1 dBm, 即单个标签的测试结果。由 2.2 节分析可知, 应答信号最低点所在位置呈现以间距等于一倍波长为周期的变化规律, 当间距 d 为 λ 倍数时, 最小功率传输系数总是出现在中心标签处。红线标示中心位置标签, 在图 11(a) 中分别在 30.0~32.5 cm 与 62.5~65.0 cm 取得极小值, 在图 11(b) 中分别在 32.5~35.0 cm 与 65.0~67.5 cm 取得极小值, 且处于所有位置中的最低点, 基本对应 $d_{\lambda} = 1$ 与 $d_{\lambda} = 2$ 。蓝线表示边缘位

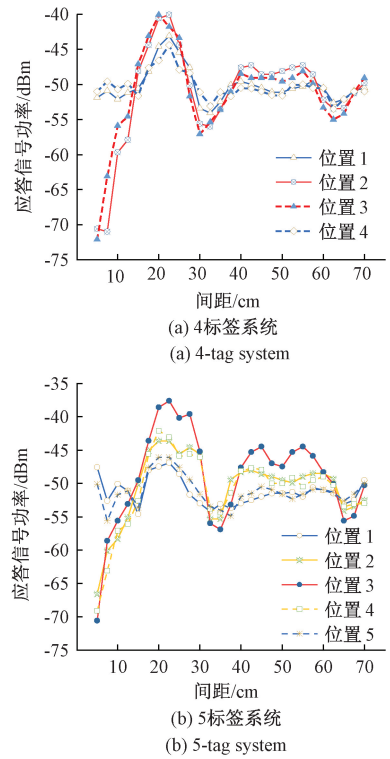


图 11 应答信号功率与间距的关系

Fig. 11 Relationship between response signal power and spacing

置标签, 变化幅度最小, 其最大最小值都处于中心标签变化幅值范围以内。不同间距时应答信号最低点约以 32.5 cm 为周期交错出现, 与 2.2 节 1) 获得规律一致。

2) 标签数量对标签性能的影响

设置阅读器发射功率为 30 dBm, 分别测试标签间距为 $d = 0.5\lambda = 16.4$ cm 和 $d = \lambda = 32.8$ cm 情形下, 标签数量 n 以 1 个为步长, 从 2 个增加至 10 个时, 标签应答信号功率随 n 的变化。测试结果经 3.1 节 1) 相同的误差补偿方法处理后如图 12 所示。

由图 12(a) 可知, 当间距 d 为 0.5λ 时, 应答信号功率的增减性随 n 的增长呈周期性波动, 波动幅值逐渐减弱趋向于稳定值。其中中心标签以 4 个为周期波动, 边缘标签以 2 个为周期波动, 且边缘标签始终弱于中心标签。由图 12(b) 可知, 当间距 d 为 λ 时, 应答信号功率基本呈现单调递减趋势, 递减幅值逐渐减弱趋向于稳定值, 且中心标签始终弱于边缘标签。结论与式 (30) 分析及 3.1 节 2) 规律一致。

3.2 对 RFID 系统整体性能影响测试

采用标签 ALN-9640 和 ALN-9662, 测量标签数量 n 以 1 为步长从 2 增加至 10, 标签间距 d 以 5 cm 为步长从 5 cm 增加至 65 cm 时, 识别所有标签所需要的阅读器最小发射功率 $P_{\min}$ 随 n 及 d 的变化。标签 ALN-9640 和 ALN-9662 的测试结果分别如图 13(b)、(c) 所示。

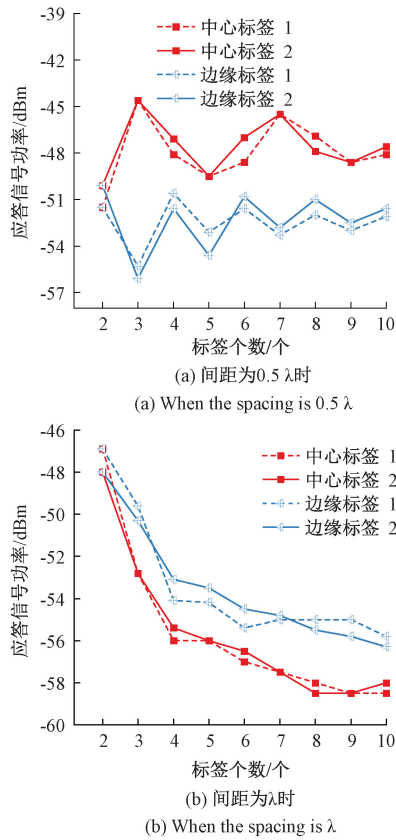


图 12 应答信号功率与标签总数的关系
Fig. 12 Relationship between response signal power and number of tags

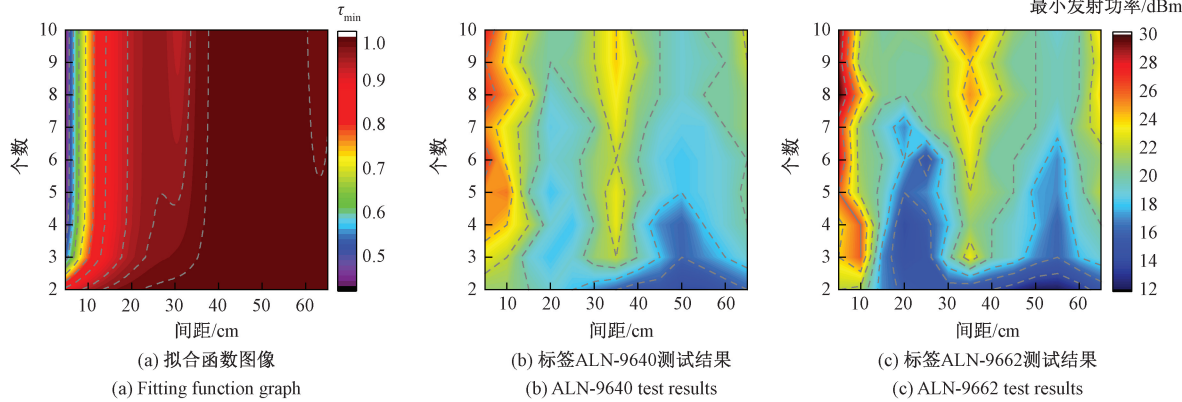


图 13 拟合函数与最小发射功率测试结果

Fig. 13 Fitting function and minimum transmit power test results

达式;利用功率传输系数,分析了标签线性等距分布情形下,互耦效应对不同位置标签及系统整体性能的影响,并建立了 τ_{min} 随 n 及 d 变化的数学模型。理论分析与实验结果表明,在线性等距分布多标签系统中,单个标签的功率传输系数与间距呈非线性关系;当标签数量较多时,互耦效应对标签的影响不再随着距离增大而单调减小,而是以 λ 为周期,在间距为 λ 倍数时取得极大值,并逐步减

式 (31)函数图像如图 13(a) 所示。

由式 (22)可知,最小发射功率与 τ 呈负相关。由图 13(a)可知, τ 在最小发射功率在间距最小时取得最小值,并在间距为 λ 倍数的区间附近时取得极大值,表明在该段区间内系统性能发生劣化,功率传输系数 τ 下降,使得芯片吸收功率下降,故需要阅读器增大发射功率使得全部标签都可读取,随着标签个数增加,间距为 λ 倍数处的性能劣化将更加显著。由图 13(b)、(c)可知, P_{min} 在间距为 35 cm 与 65 cm 时取得极大值,并随着标签个数的增长逐渐增大,与图 13(a)规律相对应。因计算模型中将天线增益设定为 1,而实际商用天线通常增益大于 1,所以 τ 随间距变化的幅值没有实测结果明显。当标签数量较多时,激活所有标签所需的 P_{min} 在 10~30 cm 与 40~60 cm 范围内同样随着标签数量增长有明显提高,这是由于边缘标签距离阅读器过远所导致的误差。

实验结果中,两类标签变化规律几乎一致,且与理论结果相符,表明所采用模型可以有效反应实际值的变化情况,在分析多标签密集分布时的群体性能时具有实际应用价值。

4 结 论

基于 RFID 工作原理与电磁波传播理论,分析了标签间互耦效应对 RFID 系统性能影响的作用机制,推导了多标签 RFID 系统中标签互阻抗及功率传输系数的表

小; τ_{min} 出现的位置随着 d 的增大在中心与外侧之间以 λ 为周期波动;系统性能测试结果与所建立 τ_{min} 模型的变化规律保持一致。本文的研究工作仅适用于标签线性等距分布情形下;下一步计划对平面及空间标签随机分布情形开展研究,可结合网格法建立对标签分布状态的评估参数,提出适用范围更广的互耦效应影响分析方法及系统性能模型。

参考文献

- [1] BUTT M M, MANGALVEDHE N R, PRATAS N K, et al. Ambient IoT: A missing link in 3GPP IoT devices landscape[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2024, 7(2): 85-92.
- [2] 谢良波, 夏晨晖, 张钰坤, 等. 基于双频点载波相位的 RFID 室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 267-277.
XIE L B, XIA CH H, ZHANG Y K, et al. RFID indoor localization algorithm based on dual-frequency carrier phase[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 267-277.
- [3] ZHU J X, JIN C, LIU H. Mutual inductance modeling of two coaxial solenoid antennas with large ferrite core for underground RFID applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, DOI: 10.1109/TMAG.2021.3081370.
- [4] WANG Z Q, ZHANG J A, XIAO F, et al. Accurate AoA estimation for RFID tag array with mutual coupling[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(15): 12954-12972.
- [5] 彭章友, 任秀方, 孟春阳, 等. UHF RFID 密集标签互耦效应的频移特性研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 11-15.
PENG ZH Y, REN X F, MENG CH Y, et al. Study of frequency shift characteristics of mutual coupling between UHF RFID tags in dense environment[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(6): 11-15.
- [6] SHI G L, HE Y G, YIN B Q, et al. Analysis of mutual couple effect of UHF RFID antenna for the internet of things environment[J]. IEEE Access, 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2923661.
- [7] 佐磊, 曹雪兵, 朱良帅, 等. 标签分布疏密状态变化情形下超高频天线设计方法研究[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(1): 158-167.
ZUO L, CAO X B, ZHU L SH, et al. Research on the design method of UHF antenna under the condition of changing tag distribution density[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(1): 158-167.
- [8] 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.
HE Y G, SHE P L, ZUO L, 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.
- [9] SARKAR D, ANTAR Y M M. Antenna mutual coupling in near-field: Insights using EM lagrangian density and complex helicity[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(11): 2670-2674.
- [10] ZHAO Y, ZHAO X X, LI L Y, et al. Timing: Tag interference modeling for RFID localization in dense deployment[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(23): 23464-23475.
- [11] SHAO ZH, WEN Y M, LI P, et al. Passive distributed sensor array using multiple RF sensing tags[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(17): 16128-16139.
- [12] NANNI F M C, MARROCCO G. Experimental evaluation and upper-bounds of cross-sensitivity in stacked RFID sensors[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2024, DOI: 10.1109/JRFID.2024.3358189.
- [13] FENG R, XIANG X W, XIE S, et al. Sensing system for mixed inorganic salt solution based on improved double label coupling RFID[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(12): 13565-13574.
- [14] BIANCHI L, GIAMPAOLO E D, MARTINELLI F, et al. Close motion estimation of UHF-RFID tagged objects based on electromagnetic coupling[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2024, 8: 185-195.
- [15] ADJALI I, GUEYE A, MOSTARSHEDI S, et al. Matching evaluation of highly coupled dipoles quantified by a statistical approach[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(7): 5044-5051.
- [16] BELAID H A, MOSTARSHEDI S, POUSSOT B, et al. On the validity of the asymptotic near-ground propagation model of hertzian dipole for finite-length dipole antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(12): 2357-2361.
- [17] ADJALI I, POUSSOT B, MOSTARSHEDI S, et al. Statistical analysis of matching properties of randomly distributed thin and thick dipoles[C]. 8th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems, Marrakech, Morocco, 2022: 137-138.
- [18] MUGHAL A, SUDERSANAN J M, MOSTARSHEDI S, et al. Statistical evaluation of the coupling effects between tags in a UHF RFID forward link[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2023, 7: 257-266.
- [19] 佐磊, 朱良帅, 尹柏强, 等. 疫苗冷链运输中多环境交互作用时 RFID 系统分析与测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 169-177.
ZUO L, ZHU L SH, YIN B Q, et al. Analysis and testing of RFID systems during multiple environmental interactions in vaccine cold chain transportation[J].

Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 169-177.

[20] EBRAHIMI-ASL S, GHASR M T A, 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.

作者简介



佐磊 (通信作者), 2013 年于湖南大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为智能感知技术及应用、智能电网设备状态监测与评估。
E-mail: benzl0313@126.com

Zuo Lei (Corresponding author) received Ph. D. from Hunan University in 2013. Now he is an associated researched and M. Sc. supervisor at Hefei University of Technology. His main research interests include Intelligent perception technology and application, state monitoring and evaluation of smart grid equipment.



张一卓, 2022 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为射频识别技术与互耦效应分析。
E-mail: 361716114@qq.com

Zhang Yizhuo received her B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2022. Now she is a M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. Her main research interests include radio frequency identification technology and mutual coupling effect analysis.



孔维业, 2022 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为液体环境对 RFID 系统性能影响分析。
E-mail: kongwy0409@163.com

Kong Weiye received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include the analysis of the impact of liquid environment on the performance of RFID systems.



雷碧航, 2022 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为抗液体标签设计。
E-mail: 315737332@qq.com

Lei Bihang received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. His main research interest includes anti-liquid label design.



丁雨晴, 2020 年于四川农业大学获得学士学位, 2024 年于合肥工业大学获得硕士学位, 主要研究方向为射频识别技术与信号处理。
E-mail: d_yuqing98@126.com

Ding Yuqing received her B. Sc. degree from Sichuan Agricultural University in 2020 and M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2024. Her main research interests include radio frequency identification technology and signal processing.