

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407606

容器内液位高度对 RFID 系统性能影响研究*

佐磊 孔维业 张一卓 雷碧航

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要:针对容器内液位高度变化对无源超高频(UHF)RFID 标签性能影响的问题,基于 RFID 工作原理电磁波传播理论,首先推导了无源 UHF RFID 系统链路预算模型;并利用功率传输系数,分析了容器内液体导致的标签阻抗匹配失谐对系统性能的影响;为验证理论模型,采用仿真和室内实验相结合的方法,通过仿真实验和分析,建立了标签竖置和横置部署情况下,标签应答信号功率(RSSI)随液位高度变化的分段模型。在开阔的室内环境中,分别测试了在容器内液位高度变化时 Alien9662 和 Alien9640 两款标签的 RSSI。实验设计覆盖了液位高度从 0~140 mm 的范围,测量了不同液位条件下的信号强度变化。理论分析及实验结果表明:当液位沿天线弯折臂变化时,RSSI 随液位高度的升高而逐渐减小;当液位沿电小环变化时,RSSI 随液位高度的升高呈先增大后减小的非线性变化;两款标签的 RSSI 随液位高度改变的变化规律与所建立分段模型保持一致,验证了模型的有效性。研究结果不仅为理解液体环境对 RFID 系统的性能影响提供了理论依据,也为实际应用中标签部署与设计提供了参考依据。

关键词: 射频识别;液体环境;阻抗分析;标签天线;传输系数

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 the influence of liquid level height in container on the performance of RFID system

Zuo Lei Kong Weiye Zhang Yizhuo Lei Bihang

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

Abstract: To address the problem of how liquid level height variations within containers impact the performance of passive ultra-high frequency (UHF) RFID tags, a link budget model for passive UHF RFID systems was derived based on the electromagnetic wave propagation theory of RFID. Using the power transmission coefficient, the study analyzes how liquid-induced impedance mismatch within containers affects system performance. To validate the theoretical model, a method combining simulations and indoor experiments was employed. Through simulation and analysis, segmented models were established to describe the variation in tag response signal strength (RSSI) with changes in liquid level height for both vertical and horizontal tag orientations. In an open indoor environment, the RSSI of two tags, Alien9662 and Alien9640, was measured as the liquid level varied, covering a range from 0 mm to 140 mm to observe signal strength changes under different liquid levels. Theoretical analysis and experimental results indicate that when the liquid level rises along the bent arm of the antenna, RSSI gradually decreases with increasing liquid level height, whereas when the liquid level rises along the electric small loop, RSSI exhibits a nonlinear trend, initially increasing and then decreasing. The RSSI change patterns for both tags align with the segmented model, verifying its accuracy. These findings provide a theoretical basis for understanding the effects of liquid environments on RFID system performance and offer practical insights for tag deployment and design in real-world applications.

Keywords: radio frequency identification; liquid environment; impedance analysis; tag antenna; transmission coefficient

0 引言

无源超高频 (ultra-high frequency, UHF) 射频识别 (radio frequency identification, RFID) 是一种非接触式快速通信技术,已经广泛应用在社会生产生活中的诸多领域^[1-3]。在物流、零售、医疗等实际应用中,容器内的液体会导致标签天线与阻抗匹配失谐,增大信号传播路径损耗,进而降低 RFID 系统性能。

目前,已有诸多文献对标签临近液体对 RFID 系统性能的影响开展研究。文献[4]分析了 RFID 系统链路传输方程,指出标签的阻抗匹配和信道的路径损耗是制约 RFID 系统性能的两个核心因素。然而,标签临近空间中的液体会影响上述两个因素,进而降低系统性能^[5]。阻抗匹配方面,文献[6-8]通过实际测量,验证了标签临近液体对系统性能的影响,给出了表征不同液体影响程度的衰减系数,并指出液体的介电常数越高影响程度越大。文献[9]推导了标签在液体环境中的阻抗模型,并通过仿真和测量表明液体主要影响标签天线阻抗的实部,进而增大标签等效电路中的天线损耗电阻;文献[10-11]进一步指出,液体对标签的耦合作用效果随二者间距的减小而增大,进而增强了标签的阻抗失谐。路径损耗方面,文献[12-13]通过研究标签临近空间中不同介质对系统识别范围的影响,表明液体在吸收系统通信链路能量的同时,放大了液体容器对标签应答信号功率 (received signal strength indication, RSSI) 波动的影响。文献[14-16]表明在液位变化过程中,液面反射导致的相干多径信号会影响系统性能,且当标签与液面间距为 0.25 倍工作波长时,液体对标签的性能影响较小。文献[17]分析了液位高度变化对标签性能产生影响的作用机理,并测量了典型液位高度下的标签 RSSI,但并未给出基于液位高度变化的标签性能模型。文献[18-19]分析了 UHF RFID 天线设计中弯折偶极子天线以及电小环部分的在实现标签阻抗匹配中的作用。

综上所述,现有文献基于天线与电磁波理论及 RFID 工作原理,分析了标签临近空间液体对标签性能产生影响的耦合机理及基本特征,但并未给出标签性能随临近空间液位变化的建模方法。本研究基于 RFID 工作原理电磁波传播理论,推导了系统链路预算模型;利用功率传输系数,分析了容器内液体导致的标签阻抗匹配失谐对系统性能的影响;通过仿真实验及分析,建立了标签应答信号功率随液位高度变化的分段模型,并在开阔室内环境中进行了测试。研究结果不仅为理解液体环境对 RFID 系统的性能影响提供了理论依据,也为实际应用中标签部署与设计提供了参考依据。

1 无源 UHF RFID 系统链路模型

无源 UHF RFID 系统阅读器和标签之间是通过电磁波反向散射进行通信的。阅读器天线发射能量并激活标签,通过连续载波信号给与标签指令的过程称为前向链路;标签通过改变自身负载,反向散射调制阅读器天线发射的连续波信号,将标签响应数据传送至阅读器的过程称为反向链路。

假设自由空间下,阅读器天线增益为 G_r , 标签天线增益为 G_t , λ 为自由空间波长, P_t 为标签获取功率, P_{th} 为芯片开启功率, P_r 为阅读器发射功率, R_a 、 R_c 分别为标签天线和标签芯片电阻, X_a 、 X_c 分别标签天线和标签芯片电抗, Z_a 、 Z_L 分别为标签天线和标签芯片的阻抗,阅读器和标签之间的距离为 d , 则前向链路中标签天线的接收功率 P_i 为:

$$P_i = \frac{P_r G_r G_t \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (1)$$

定义反射系数为 ρ :

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

其中, Z_a^* 为天线阻抗 Z_a 的共轭, $Z_a^* = R_a - jX_a$, 标签芯片的接收功率 P_{i-r} 为:

$$P_{i-r} = P_i \tau = \frac{P_r G_r G_t^2 R_a R_L \lambda^2}{4\pi^2 d^2 |Z_L + Z_a|^2} \quad (3)$$

其中,功率传输系数为:

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

则当芯片的接收功率 P_{i-r} 大于芯片开启功率 P_{th} 时,标签芯片被激活工作。

在反向链路中设阻抗匹配因子为 $K = 4R_a^2 / |Z_L + Z_a|^2$, 则标签天线的再辐射功率 P_{i-b} 为:

$$P_{i-b} = P_i K G_t = \frac{P_r G_r G_t^2 R_a^2 \lambda^2}{4\pi^2 d^2 |Z_L + Z_a|^2} = \frac{1}{2} P^2 R_a G_t \quad (5)$$

标签应答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:

$$P_{re} = \frac{P_{i-b} G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} = \frac{4P_r G_r^2 G_t^2 R_a^2 \lambda^4}{(4\pi d)^4 |Z_L + Z_a|^2} \quad (6)$$

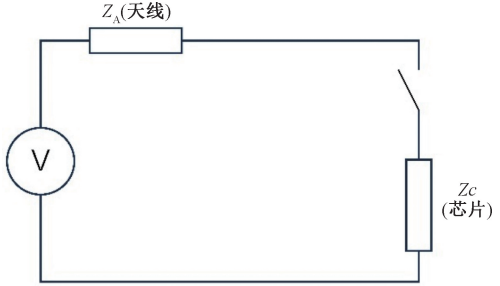
2 容器内液位高度对 RFID 系统性能影响分析

由式(4)可知,为实现标签天线至负载能量的最优传输,无源 UHF 标签一般设计为天线与负载阻抗满足共轭匹配的关系。然而,当容器内液位高度变化时,标签临

近空间中的液体可能使得标签天线与负载的阻抗匹配失谐,并改变阅读器接收到的标签应答信号强度(RSSI)。

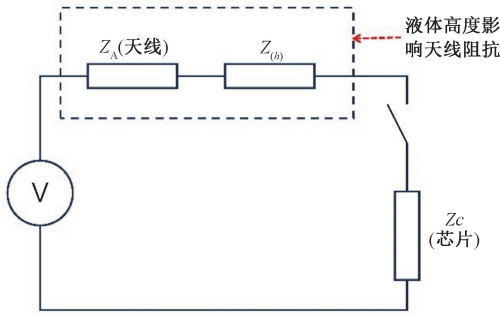
2.1 容内液位高度对标签阻抗匹配的影响

当标签贴附于容器表面时,随着容器内液位高度的变化,标签临近空间中的液体将会使得标签天线阻抗产生变化。此时,标签天线的实际阻抗可以视为其在自由空间中的阻抗 Z_A 与液体环境影响下产生的等效阻抗 $Z_{(h)}$ 之间的串联组合。自由环境和液体环境下的标签阻抗模型如图 1(a)、(b)所示。



(a) 自由环境下的标签等效电路模型

(a) Label equivalent circuit model in a free environment



(b) 附着于液体介质的标签等效电路模型

(b) A label equivalent circuit model attached to a liquid medium

图 1 自由环境和液体环境下的标签阻抗模型

Fig. 1 Label impedance models in both free and liquid environments

当标签附着在液体目标上时,需要考虑因液体环境影响而产生的等效阻抗,标签阻抗受液体环境影响变为:

$$Z'_a = R'_a + jX'_a \quad (7)$$

其中, $R'_a = R_{air} + R_{liq}$, $X'_a = X_{air} + X_{liq}$ 。当液位高度开始变化时,液体对标签的影响会导致功率传输系数 τ 发生变化:

$$\tau = \frac{4R'_a R_L}{|Z_L + Z'_a|^2} = \frac{4R'_a R_L}{(R'_a + R_L)^2 + (X'_a + X_L)^2} \quad (8)$$

分别讨论 R'_a 和 X'_a 对传输系数的影响。

R'_a 对传输系数的影响:令 $R'_a = x$, $\tau = f(x)$, 则式(8)可表示为:

$$f(x) = \frac{4R'_a R_L}{(x + R_L)^2 + (X'_a + X_L)^2} \quad (9)$$

对 x 求导可得:

$$f(x)' = \frac{4R'_a R_L (R_L - x) (R_L + x)}{((x + R_L)^2 + (X'_a + X_L)^2)^2} \quad (10)$$

由式(10)可得,当 $x > R_L$ 时, $f(x)' < 0$, 功率传输系数是一个关于 R'_a 的单调递减函数。即当 $x > R_L$ 时, τ 随着 R'_a 的增大而减小。

X'_a 对传输系数的影响:令 $X'_a = y$, $\tau = f(y)$, 则式(8)可表示为:

$$f(y) = \frac{4R'_a R_L}{(R'_a + R_L)^2 + (y + X_L)^2} \quad (11)$$

对 y 求导可得:

$$f(y)' = \frac{-8R'_a R_L (y + X_L)}{((R'_a + R_L)^2 + (y + X_L)^2)^2} \quad (12)$$

由式(12)可得,当 $y > -X_L$ 时, $f(y)' < 0$, 功率传输系数是一个关于 X'_a 的单调递减函数;当 $y < -X_L$ 时, $f(y)' > 0$, 功率传输系数是一个关于 X'_a 的单调递增函数;当 $y = -X_L$ 时, $f(y)' = 0$, 此时 $f(y)$ 取最大值。综合分析可知, τ 随 X'_a 的增大呈非线性变化。

2.2 容器内液位高度对 RFID 系统性能的影响

1) RSSI 随液位高度变化的仿真分析

本研究利用 Ansoft HFSS15.0 软件,以 Alien9662 标签为例,分析液位变化对标签性能的影响,仿真模型如图 2 所示。图 2 中,假设液体为水,其介电常数 $\epsilon = 80$ (水);容器尺寸为 92 mm × 30 mm × 140 mm,系统工作频率为 915 MHz, L 为液面高度。图 2(a)中标签相对液位垂直居中部署,距离容器底部 20 mm;图 2(b)中,标签相对液位水平居中部署,距离容器底部 28 mm。通过仿真分别获得标签采用竖置和横置两种部署情形下, L 以 1 mm 为步进、从 0 mm 升高至 140 mm 时的标签阻抗。Alien9662 标签参数如图 2(c)所示。不失一般性,假设式(6)中, $d = 0.5$ m, $G_r = 9.2$ dBi, $G_t = 2.15$ dBi, $P_r = 30$ dBm, 频率 $f = 915$ MHz;基于仿真获得的标签阻抗,结合式(6)可得两种部署情形下阅读器接收到的标签应答信号的 RSSI 如图 3、4 所示。

(1) 标签竖置部署

将标签贴附在液体介质表面,将标签与液体距离设置为 1 mm 以此来模拟液体容器的厚度,设定液位高度为 L ,在 $L = 20$ mm 时液位达到标签下边界位置, $L = 46$ mm 时液位达到标签电小环下边界位置, $L = 66$ mm 时液位达到电小环上边界位置, $L = 92$ mm 时液位达到标签上边界位置,利用式(6)计算标签在不同液位高度 L 下的 RSSI, 仿真测试结果如图 3 所示。

由图 3 可知,当 $L < 5$ mm 时,液面距离 RFID 标签下边界较远,标签应答信号的 RSSI 变化幅度较小;当即 $L \in (5, 20)$ 时,液位逐渐升高并接近标签的下边界,标

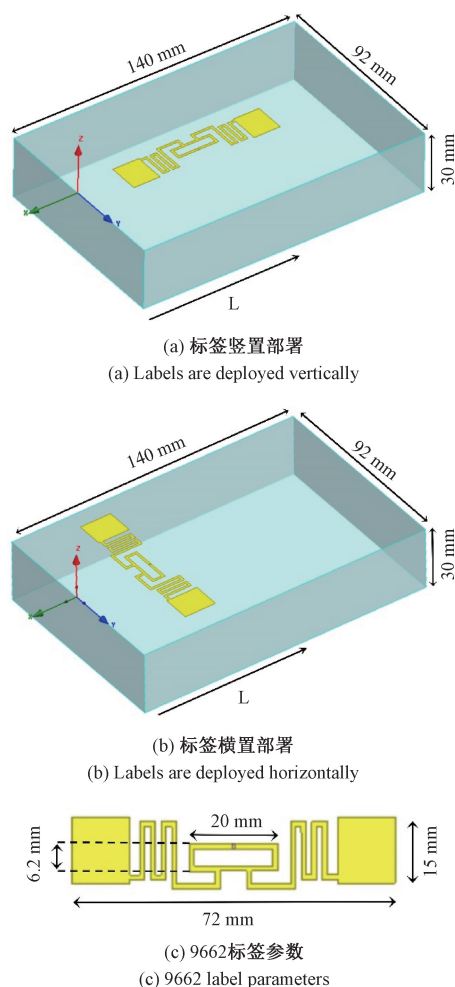


图 2 液位变化情况下标签天线的仿真模型

Fig. 2 Simulation model of a tag antenna under changing liquid level

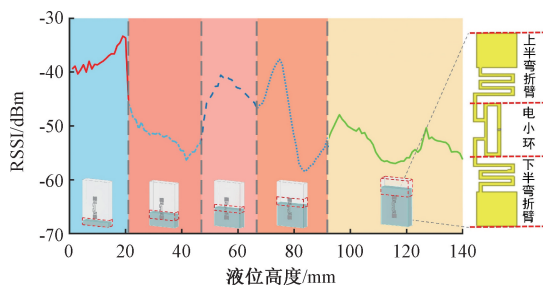


图 3 标签竖置返回信号强度变化

Fig. 3 The label is vertically positioned to return a change in signal strength

签应答信号的 RSSI 随液位升高而升高,并在接触到标签下边界即 $L=20$ mm 时显著下降。这是由于在液面接触标签的下边界前,电磁波在空气和液体介质表面发生多径传播,部分电磁波通过反射路径传播至标签,部分电磁波通过折射路径被液体吸收,多径效应对标签产生非线

性的相关干扰;当液面到达标签下边界后,在多径效应干扰的同时,液体已经耦合为标签天线的一部分,使得标签天线的特性参数随液位升高而不断变化,进而加大了标签天线与负载阻抗失谐的程度。这种阻抗失谐使得电磁波更多地被液体吸收,而不是被有效反射或传输,进而导致 RSSI 急剧下降。

当 $L \in (20, 46)$ 时,液位沿标签天线的下半弯折臂部分升高并逐渐趋近电小环,标签应答信号的 RSSI 随液位的增加而逐渐减小,这是由于此时标签天线阻抗产生了显著变化。标签天线的弯折臂部分主要增加了天线的电阻和辐射效率。标签临近空间液体会增大标签天线阻抗的电阻大小^[20],即满足 $R'_a > R_L$;结合式(10)及 3.1 节分析可得,此时标签天线阻抗变化幅度较大的为天线阻抗的电阻部分,且 R'_a 的变化幅度随液位高度增加而增大,使得 τ 随液位高度增加而减小。

当 $L \in (46, 66)$ 时,液位沿电小环逐渐升高,标签应答信号的 RSSI 呈先增大后减小的非线性变化。电小环天线主要影响标签天线阻抗的虚部,以实现标签阻抗的匹配调谐;结合式(12)及 3.1 节的分析可得,此时标签天线阻抗变化幅度较大的为天线阻抗的电抗部分,且 X'_a 的变化幅度随液位高度增加而增大,使得 τ 随液位高度增加呈现非线性变化。

当 $L \in (66, 92)$ 时,液面超过电小环并沿标签的上半弯折臂部分逐渐升高,标签应答信号的 RSSI 随液位的增加而逐渐减小,呈现与 $L \in (20, 46)$ 时相同的变化规律。当 $L \in (92, \infty)$ 时,在液位超过标签,标签应答信号的 RSSI 随液位高度增加呈幅值渐小的类正弦周期性变化,变化周期约为 30 mm。这是由于标签天线阻抗随液位高度增加的变化幅度逐渐减小,标签天线与负载的阻抗匹配关系趋于稳态,标签阻抗失谐对系统性能影响的程度亦随之减小;此时,容器内液体导致的电磁波传播多径效应逐渐成为影响系统性能的主要因素,且其影响程度随液位升高逐渐减小。

(2) 标签横置部署

将标签贴附在液体介质表面,将标签与液体距离设置为 1 mm 以此来模拟液体容器的厚度,设定液位高度为 L ,在 $L=28$ mm 时液位达到标签下边界位置, $L=43$ mm 时液位没过标签;基于仿真获得的标签阻抗,结合式(6)可得不同液位高度下阅读器接收到的标签的 RSSI 如图 4 所示。

由图 4 可知,当 $L < 15$ mm 时,液面逐渐升高,标签的 RSSI 变化幅度较小,呈现与标签竖置且 $L < 5$ mm 时相近的特征;当 $L \in (15, 28)$ 时,液面逐渐趋近并到达标签下边界,标签应答信号的 RSSI 呈现先增大后减小的非线性变化。这是由于当液面距离标签较远时,影响 RFID 系统性能的主要因素是容器内液体导致的电磁波存在的反

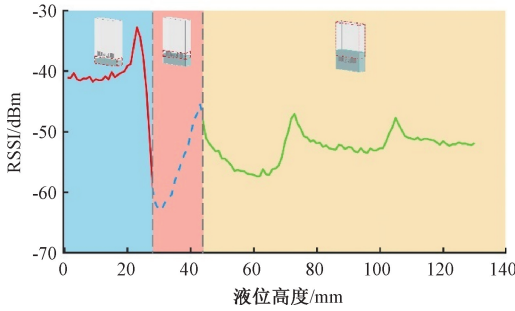


图 4 标签横置返回信号强度变化

Fig. 4 The label is tapped to return a change in signal strength

射和折射等多条传播路径造成的多径效应；当液面趋近并到达标签时，液体导致的标签阻抗匹配失谐成为影响系统性能的主要因素，且标签天线阻抗变化幅度较大的为天线阻抗的电阻部分，结合式(10)及3.1节分析可得， τ 随液位高度增加而减小。当 $L \in (28, 43)$ 时，液面到达并沿标签变化，标签应答信号的RSSI随液位升高呈先减小后增大的非线性变化。这是由于该过程中液体已经接触到标签，此时液体已经耦合为标签天线的一部分，会改变标签天线的特性参数，同时标签电小环受液体影响较大，且沿着液位升高过方向标签结构具有非对称性，使得标签阻抗的电阻和电抗均呈较大幅度的变化。 $L \in (43, \infty)$ 时，标签应答信号的RSSI随液位高度增加呈幅值渐小的类正弦周期性变化，其变化周期与标签竖置部署且 $L \in (92, \infty)$ 时相同，均为约30 mm。这是由于此时容器内液体导致的电磁波传播多径效应逐渐成为影响系统性能的主要因素，且其影响程度随液位升高逐渐减小。

2) RSSI随液位高度变化的建模分析

2.1节1)中对标签竖置和横置部署两种情形下，标签应答信号的RSSI随液位高度的变化进行了仿真分析。为了更好的研究液位变化对标签RSSI的影响，基于上述仿真结果及分析，分别构建分段的数学模型表达标签竖置和横置两种情形下RSSI与液位高度之间的关系。

(1) 标签竖置部署

设定标签下边界与液面之间的距离为 h ，由于标签竖置部署时标签距离容器底部20 mm，因此 $h = 20 - L$ 。由图5可知，当 $h > 0$ mm时，液位逐渐升高并趋近标签，RSSI随液位升高而增大，故采用指数函数描述该过程；当 $h \in (-26, 0)$ 时，液位沿标签天线的下半弯折臂部分升高并逐渐趋近电小环，RSSI随液位升高而逐渐减小，故采用二次多项式函数描述该过程；当 $h \in (-46, -26)$ 时，液位沿电小环升高，RSSI随液位升高呈非线性变化，故采用三次多项式函数描述该过程；当 $h \in (-72, -46)$ 时，液位沿标签天线的上版弯折臂部分升高，RSSI随液位升高呈非线性变化，故采用正弦函数描述该过程；

当 $h \in (-\infty, -72)$ 时，液位完全超过并逐渐远离标签，RSSI随液位升高呈以30 mm为周期的类周期变化，故采用渐进衰减的正弦函数描述该过程。设定标签的长为 M ，电小环的长为 N ，结合上述分段数学模型，可得标签竖置部署时，RSSI随液位高度变化的分段模型为：

$$RSSI = \begin{cases} a_0 e^{a_1 h} - a_2 (h > 0) \\ b_0 h^2 + b_1 h - b_2 \left(h \in \left(-\frac{M-N}{2}, 0 \right) \right) \\ c_0 h^3 - c_1 h^2 - c_2 h \\ -c_3 \left(h \in \left(-\frac{N+M}{2}, -\frac{M-N}{2} \right) \right) \\ d_0 \sin(d_1 h + d_2) \\ -d_3 \left(h \in \left(-M, -\frac{N+M}{2} \right) \right) \\ g_0 e^{g_1 h} \sin(g_2 h + g_3) \\ -g_4 (h \in (-\infty, -M)) \end{cases} \quad (13)$$

其中， $a_{0,1,2}$ 、 $b_{0,1,2}$ 、 $c_{0,1,2,3}$ 、 $d_{0,1,2,3}$ 、 $g_{0,1,2,3,4}$ 等参数受标签类型、容器及液体特征参数的影响。例如，以2.2节1)中仿真分析中采用的Alien9662标签及容器与液体设置为例，Alien9662标签的长 $M = 72$ mm，电小环的长 $N = 20$ mm，基于最小二乘法拟合可得此时RSSI随液位高度变化的分段模型为：

$$RSSI = \begin{cases} 8.17e^{-0.159h} - 40.2 (h > 0) \\ 0.01h^2 + 0.6h - 46 (h \in (-26, 0)) \\ -0.0062h^3 - 0.77h^2 \\ -31.2h - 456 (h \in (-46, -26)) \\ 9.8\sin(0.25h + 8.82) \\ -48.5 (h \in (-72, -46)) \\ 15.9e^{0.018h} \sin(0.2h + 11.14) \\ -53.5 (h \in (-\infty, -72)) \end{cases} \quad (14)$$

2.1节1)中Alien9662标签竖置部署的仿真结果及基于式(14)的拟合曲线如图5所示。

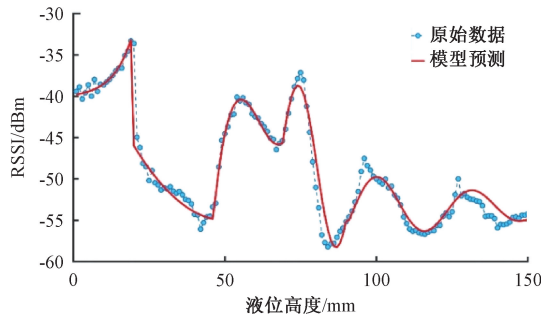


图 5 竖置标签液位变化与标签RSSI的关系

Fig. 5 The relationship between the change of vertical label liquid level and the label RSSI

(2) 标签横置部署

设定标签下边界与液面之间的距离为 h , 由于标签横置部署时标签距离容器底部 28 mm, 因此 $h = 28 - L$ 。由图 6 可知, 当 $h > 10$ mm 时, 液位距离标签较远, RSSI 随液位增加的变化幅度较小, 故采用常量描述该过程; 当 $h \in (0, 5)$ 时, 液位趋近标签下边界, RSSI 随液位升高而增加, 故采用二次多项式描述该过程; 当 $h \in (-15, 5)$ 时, 液位沿着标签升高, RSSI 随液位增加呈先减小后增大的变化, 故采用两段线性表达式描述该过程; 当 $h \in (-\infty, -15)$ 时, 液位完全超过并逐渐远离标签, RSSI 随液位增加呈以 30 mm 为周期的类周期变化, 并随着液位的继续升高逐渐趋于稳定, 故采用渐进衰减的正弦函数描述该过程。设定标签的宽为 R , 结合上述分段数学模型, 可得标签横置部署时, RSSI 随液位高度变化的分段模型为:

$$RSSI = \begin{cases} K(h > 15) \\ A_0 h^2 - A_1 h - A_2 (h \in (5, 15)) \\ B_0 h - B_1 \left(h \in \left(-\frac{R}{5}, 5 \right) \right) \\ C_0 h - C_1 \left(h \in \left(-R, -\frac{R}{5} \right) \right) \\ D_0 e^{D_1 h} \sin(D_2 h + D_3) \\ -D_4 (h \in (-\infty, -R)) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $A_{0,1,2}, B_{0,1}, C_{0,1}, D_{0,1,2,3,4}, K$ 等参数受标签类型、容器及液体特征参数的影响。例如, 以 2.1 节 1) 中仿真分析中采用的 Alien9662 标签及容器与液体设置为例, Alien9662 标签的宽 $R = 15$ mm, 基于最小二乘法拟合可得此时 RSSI 随液位高度变化的分段模型为:

$$RSSI = \begin{cases} -41.2 (h > 15) \\ 0.11h^2 - 2.98h - 21.09 (h \in (5, 15)) \\ 5.89h - 62.67 (h \in (-3, 5)) \\ -1.15h - 62.67 (h \in (-15, -3)) \\ 10.19e^{0.03h} \sin(-0.18h - 0.1) \\ -51.4 (h \in (-\infty, -15)) \end{cases} \quad (16)$$

2.2 节 1) 中 Alien9662 标签横置部署的仿真结果及基于式 (16) 的拟合曲线如图 6 所示。

3 实验结果及分析

实验采用的设备包括阅读器 YND3002、阅读器天线 YND9028, 其中阅读器工作频率为 890~960 MHz, 阅读器天线增益为 9.2 dBi, 极化方式为圆极化; 测试标签包括 2.2 节 1) 中仿真分析所采用的标签 Alien9662 及对比标签 Alien9640。标签 Alien9640 参数如图 7(c) 所示。实验在开阔室内环境下进行, 实验场景布置如图 7(a) 所

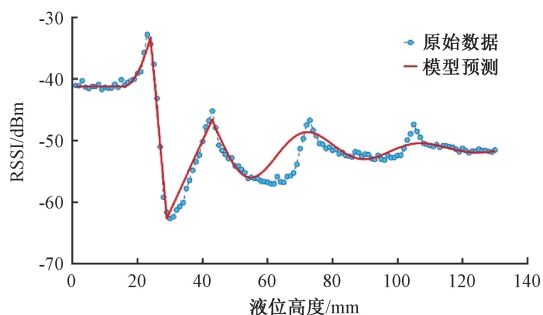


图 6 横置标签液位变化与标签 RSSI 的关系

Fig. 6 The relationship between the change of horizontal label level and the label RSSI

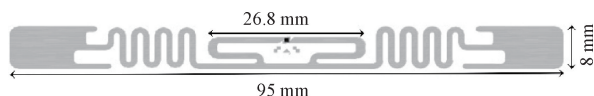
示。设定阅读器发射功率为 30 dBm, 系统工作频率为 915 MHz; 将标签贴附于容器表面, 读写器天线与标签间距为 0.5 m, 分别测量两种标签在竖置和横置部署方式下阅读器获得的标签应答信号功率随液位高度增加的变化。



(a) 实验场景设置
(a) Experimental scene settings



(b) 标签布放图
(b) Label layout diagram



(c) 9640 标签参数
(c) 9640 label parameters

图 7 测试实验场景

Fig. 7 Test the experimental scenario

3.1 标签竖置部署

标签的部署示意图如图 7(b) 所示。9662 标签在 $L =$

90 mm 左右时液位与标签上边界齐平, $L=55$ mm 左右时液位到达标签芯片位置, $L=20$ mm 左右时液位到达标签下边界, 9640 标签在 $L=115$ mm 左右时液位与标签上边界齐平, $L=65$ mm 左右时液位到达标签芯片位置, $L=20$ mm 左右时液位到达标签下边界。分别测量液位高度 L 以 5 mm 为步长, 从 0 mm 增加至 140 mm 时, Alien9662、Alien9640 的 RSSI 值。测量结果及式(14)所建立模型的 RSSI 如图 8 所示。

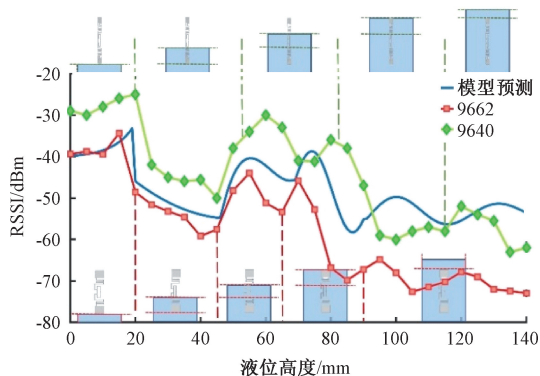


图 8 标签竖置模型预测与实测数据对比

Fig. 8 Comparison between the prediction of the label vertical model and the measured data

由图 8 可知, 对于 Alien9662, 当 $L < 20$ mm 时, 液位逐渐升高并接近标签的下边界, RSSI 随液位升高, 从 -39.8 dBm 增大至 -34.4 dBm; 当 $L \in (20, 45)$ 时, 液位沿标签下半弯折臂升高, RSSI 随液位升高, 从 -48.6 dBm 减小至 -57.6 dBm; 当 $L \in (45, 65)$ 时, 液位沿电小环升高, RSSI 随液位升高呈非线性变化, 从 -57.6 dBm 增大至 -44 dBm 后又减小至 -53.4 dBm; 当 $L \in (65, 95)$ 时, 液位沿标签天线另一弯折臂升高, RSSI 随液位升高, 从 -45.8 dBm 减小至 -64.8 dBm; 当 $L > 95$ mm 时, 液位超过并逐渐远离标签, RSSI 以 30 mm 为周期, 呈渐进衰减的类正弦周期函数变化。对于 Alien9640, 当 $L < 20$ mm 时, 液位逐渐升高并接近标签的下边界, RSSI 随液位升高, 从 -29.5 dBm 增大至 -24.8 dBm; 当 $L \in (20, 55)$ 时, 液位沿标签下半弯折臂升高, RSSI 随液位升高, 从 -42 dBm 减小至 -50 dBm; 当 $L \in (55, 80)$ 时, 液位沿电小环升高, RSSI 随液位升高呈非线性变化, 从 -36 dBm 增大至 -30 dBm 后又减小至 -41.2 dBm; 当 $L \in (80, 115)$ 时, 液位沿标签天线另一弯折臂升高, RSSI 随液位升高, 从 -36.8 dBm 减小至 -58 dBm; 当 $L > 115$ mm 时, 液位超过并逐渐远离标签, RSSI 以 30 mm 为周期, 呈渐进衰减的类正弦周期函数变化。

综上, 当标签竖置部署时, Alien9662 与式(14)采用同款标签, 测试结果的液位高度分段区间的与式(14)保持了较好的一致性, 但由于模型建立时典型值的选取、容

器与液体实际参数及测试环境噪声的影响, 测试结果与分段模型的 RSSI 大小存在一定差异; Alien9640 与式(14)采用不同款标签, 由于天线弯折臂及电小环几何参数的差异, 测试结果的液位高度分段区间及 RSSI 值大小与式(14)所建立模型均存在一定差异, 但测试结果的变化规律与模型保持一致。

3.2 标签横置部署

设置阅读器与标签之间的距离 d 为 0.5 m, 分别测量标签在不同液位高度下的返回信号强度 (RSSI), 液位高度 L 从 0 mm 增长到 140 mm, 步长为 5 mm, 9662 标签在 $L=75$ mm 左右时液位与标签上边界齐平, $L=55$ mm 液位与标签下边界齐平, 9640 标签在 $L=65$ mm 左右时液位与上边界齐平, $L=55$ mm 时液位与下边界齐平, 记录不同液位高度 L 下的信号强度, 将实际测量结果与计算值进行对比, 测试结果如图 9 所示。

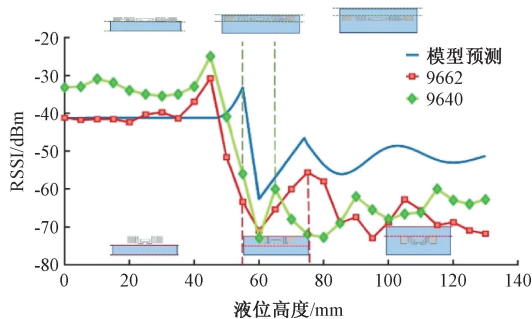


图 9 标签横置模型预测与实测数据对比

Fig. 9 Comparison between the prediction of the label transposition model and the measured data

由图 9 可知, 对于 Alien9662, 当 $L < 40$ mm 时, 液面逐渐升高, 标签应答信号的 RSSI 变化幅度较小, 维持在 -40 dBm 附近; 当 $L \in (40, 55)$ 时, 液面逐渐趋近并到达标签下边界, 标签应答信号的 RSSI 呈现先增大后减小的非线性变化, 从 -40.4 dBm 增大至 -30.8 dBm 后又减小至 -63.4 dBm; 当 $L \in (55, 75)$ 时, 液面到达并沿标签变化, 标签应答信号的 RSSI 随液位升高呈先减小后增大的非线性变化, 从 -63.4 dBm 减小至 -71 dBm 后又增大至 -55.6 dBm; $L > 75$ mm 时, 标签应答信号的 RSSI 随液位高度增加呈幅值减小的类正弦周期性变化。对于 Alien9640, 当 $L < 40$ mm 时, 液面逐渐升高, 标签应答信号的 RSSI 变化幅度较小, 维持在 -33 dBm 附近; 当 $L \in (40, 55)$ 时, 液面逐渐趋近并到达标签下边界, 标签应答信号的 RSSI 呈现先增大后减小的非线性变化, 从 -33 dBm 增大至 -25 dBm 后又减小至 -56 dBm; 当 $L \in (55, 65)$ 时, 液面到达并沿标签变化, 标签应答信号的 RSSI 随液位升高呈先减小后增大的非线性变化, 从 -56 dBm 减小至 -73 dBm 后又增大至 -60 dBm; 当 $L >$

65 mm 时,液位超过并逐渐远离标签,RSSI 以 30 mm 为周期,呈渐进衰减的类正弦周期函数变化。

综上,当标签横置部署时, Alien9662 与式(16)采用同款标签,测试结果的液位高度分段区间与式(16)保持了较好的一致性,但由于模型建立时典型值的选取、容器与液体实际参数及测试环境噪声的影响,测试结果与分段模型的 RSSI 大小存在一定差异; Alien9640 与式(16)采用不同款标签,由于天线弯折臂及电小环几何参数的差异,测试结果的液位高度分段区间及 RSSI 值大小与式(16)所建立模型均存在一定差异,但测试结果的变化规律与模型保持一致。

4 结 论

研究基于 RFID 工作原理电磁波传播理论,推导了无源 UHF RFID 系统链路预算模型;结合对液体环境下的标签分析,推导出标签在液体环境中的阻抗模型,标签在液体环境下会受到液体介质的非线性干扰影响,容器内液位高度的变化会使 RFID 系统性能受到较大的影响,以贴附于容器外侧的超高频射频识别系统中的无源标签为研究对象,利用功率传输系数,分析了容器内液体导致的标签阻抗匹配失谐对系统性能的影响;通过仿真实验和分析,建立了标签应答信号 RSSI 随液位高度变化的分段模型。理论分析及测试结果表明:液位沿标签天线弯折臂变化时,主要影响标签天线阻抗的电阻部分,使得标签信号的 RSSI 随液位升高而减小;液位沿标签天线的电小环变化时,主要影响标签天线阻抗的电抗部分,使得 RSSI 随液位升高呈先增大后减小的非线性变化;所建立的分段模型能够较好的描述标签信号 RSSI 随容器液位高度改变的变化规律。本研究所建立的分段模型仅适用于标签天线为弯折半波偶极子天线的情形,下一步计划针对标签天线采用线圈型、缝隙型天线开展研究,提出适用范围更广的容器内液体对 RFID 系统性能影响的建模方法。

参考文献

- [1] 董青迅,涂彦明,胡祥胜,等. 数字化智能仓储机器人[J]. 国外电子测量技术,2022,41(4):145-152.
DONG Q X, TU Y M, HU X SH, et al. Digital intelligent warehouse robot [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(4): 145-152.
- [2] 左秀江,杨帆,周一童,等. 用于变压器状态监测的 RFID 传感器设计[J]. 电子测量技术,2023,46(20): 128-132.
ZUO X J, YANG F, ZHOU Y T, et al. Design of RFID sensor for transformer condition monitoring [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20): 128-132.
- [3] 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.
- [4] 佐磊,何怡刚,李兵,等. 无源超高频射频识别系统路径损耗研究[J]. 物理学报,2013,62(14):150-157.
ZUO L, HE Y G, LI B, et al. Research on path loss of passive UHF radio frequency identification system [J]. Journal of Physics, 2013, 62(14): 150-157.
- [5] LI B B, WANG Y, ZHAO Y Q, et al. Enabling fine-grained residual liquid height estimation with passive RFID tags[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(17): 20159-20168,.
- [6] SHAH A, NIKSAN O, JAIN M C, et al. Microwaves see thin ice: A review of ice and snow sensing using microwave techniques [J]. IEEE Microwave Magazine, 2023, 24(10):24-39.
- [7] CHEN Y, HUA CH ZH, SHEN ZH X. Circularly polarized uhf rfid tag antenna for wireless sensing of complex permittivity of liquids [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23):26746-26754.
- [8] ZHANG M M, LI P, BAO S J, et al. RF-LQRNN: RFID-based concentration detection of alcohol solutions and glucose solutions[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(10):10656-10672.
- [9] 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.
- [10] LIU W, GU Y, LI B, et al. Enabling suspended sediment concentration detection with passive RFID tags[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(15): 8663-8672.
- [11] 王玉. 基于 RFID 的容器内剩余液体高度监测方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2021.
WANG Y. Towards remaining liquid height detection in container with RFID [D]. Qinhuandao: Yanshan University, 2021.
- [12] KAO H L, CHO C L, XIU Y Z, et al. Bending effect of an inkjet-printed series-fed two-dipole antenna on a liquid crystal polymer substrate[J]. IEEE Antennas & Wireless

Propagation Letters, 2014, 13:1172-1175.

- [13] WANG SH SH, LI X L, ZHAO Y. Study on the effect of substances in passive RFID contactless sensing applications[C]. 2022 3rd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE). IEEE, 2022: 139-142.
- [14] 段普宇. 超高频 RFID 酒类标签天线设计理论与实践[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
DUAN P Y. Research and implementation of antenna design theory for UHF RFID alcohol tag[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [15] 张柯岩. 基于 RFID 线性极化天线的跨域无源感知技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
ZHANG K Y. Research on cross-domain batteryless sensing scheme based on rfid linear polarized antenna [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [16] 何兵兵. 基于 RFID 的液体状态感知机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
HE B B. RFID based Liquid Sensing[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [17] TAJIN M A S, HOSSAIN M S, MONGAN W M, et al. Passive UHF RFID-based real-time intravenous fluid level sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(3): 3863-3873.
- [18] 林钰金, 陈星. 新型宽带高效率平面耦合环天线设计[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(6): 603-607.
LIN SH J, CHEN X. Design of a novel planar coupling loop antenna with broadband width and high radiation efficiency [J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(6): 603-607.
- [19] 董健, 余夏苹, 任华斌, 等. 一种 UHF 频段弯折偶极子 RFID 天线的设计[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(2): 47-51.
DONG J, YU X P, REN H B, et al. Design of a bending dipole RFID antenna at UHF band [J]. Electronic Components and Materials, 2016, 35(2): 47-51.
- [20] SOHRAB A P, HUANG Y, HUSSEIN M, et al. A uhf-rfid tag with improved performance on liquid bottles[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15:1673-1676.

作者简介



佐磊, 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 received his 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.



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 interest includes analysis of the impact of liquid environment on the performance of RFID systems.



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信号处理。

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 at Hefei University of Technology. Her main research interests include radio frequency identification technology and signal processing.



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. He is now a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest includes anti-liquid label design.