

Analysis and Test of UHF RFID Humidity Sensor^{*}

GUAN Shuo, XI Jingtian, WANG Junyu^{*}

(ASIC & System State Key Laboratory, AUTO-ID Laboratory in Fudan University, Shanghai 201203, China)

Abstract: The combination of the RFID reader and the tag is able to measure humidity. Theoretical analysis, mathematical simulations, and experiments for EPC Gen2 tags used as humidity sensors are conducted to deduce the reason why RFID tags can be used as humidity sensors. According to the analysis, an appropriate RFID tag used for humidity sensing requires that the impedance matching factor between the tag antenna and the tag changes monotonically when the humidity changes. The tag can be used to measure humidity when the impedances of the tag antenna and the tag chip are perfectly matched. The experiment considers that the moisture content absorbed by paper when the humidity rises is different from that desorbed by paper when the humidity decreases and the analysis is given.

Key words: sensor application; humidity sensor; RFID; wireless communication

EEACC: 5260; 7320X

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.01.006

超高频射频识别湿度传感器的分析与测试^{*}

关 硕, 奚经天, 王俊宇^{*}

(复旦大学 Auto-ID 实验室, 专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 201203)

摘 要: 读写器和标签组成的射频识别系统(RFID)可以用于湿度测量。本文通过理论分析, 数值仿真以及实验测试给出了可用于湿度传感器的 EPC Gen2 电子标签的特性。分析结果表明, 当湿度变化时, 标签天线和标签之间的阻抗匹配系数单调变化的标签才可用做湿度传感器。在空气中, 标签天线和标签芯片完全匹配的标签可以用于湿度测量。本文还在实验中考虑了纸张在湿度增加或减少时对基于电子标签的湿度传感器测量结果的影响, 并且给出了分析结果。

关键词: 传感器应用; 湿度传感器; 射频识别; 无线通信

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)01-0024-06

湿度传感器被广泛应用于农业仓储, 工业控制, 日常家用, 医药治疗, 食品卫生监督等众多领域。电子湿度传感器以其优越的精度和方便自动化控制管理正逐步替代传统的机械式湿度计。基于微波技术原理的电子湿度传感器^[1-3]和使用软件微机械技术并基于特殊材料的电子湿度传感器^[4]是目前电子湿度传感器的主要设计方法, 但是其制造费用较高。CMOS 电容特性随湿度变化的特性也被应用于湿度传感器的设计^[5], 然而 CMOS 工艺本身的精度随机差异对测量精度影响较大。文献[6]介绍了一种使用普通电子标签作为廉价电子湿度标签的设计方法: 对于附着在纸张之上的电子标签而言, 纸张的相对介电常数会随着纸张的湿度发生变化^[7], 而且改变的数值与湿度改变的相对数值有关, 这将导致附

着在纸张之上的电子标签天线阻抗和辐射方向图也会发生变化, 使得标签能够正常工作的最小发射功率就会改变。基于上述变化, 可以构造用于湿度测量的电子标签传感器, 其基本操作过程如下: (1) 系统初始设置在干燥环境下, 且读写器与标签的距离固定, 将读写器的发射功率调整为刚好使标签工作的最小功率; (2) 当湿度改变而工作距离不变时, 调整并记录刚好使标签工作的读写器的最小发射功率; (3) 通过比较读写器发射功率所需的最小值和初始状态时的最小值之间的差异, 建立与湿度变化的关联关系, 进而测出湿度。文献[6]的不足之处在于对标签湿度传感器的工作原理缺少必要的理论分析; 对普通商用标签用作湿度传感器的条件没有进一步的研究; 实验结果没有考虑湿度增加和减少

项目来源: “十一五”国家科技支撑计划项目资助(2008BAI55B07)“药品安全追溯管理射频识别技术研究”

收稿日期: 2010-06-19 修改日期: 2010-08-09

时, 纸张等材料的对水分的吸放差异导致传感器测量结果出现的差异。

本文的内容结构如下: 第 1 节基于理论推导和电磁仿真结果揭示了电子标签可以用于湿度传感器的原因, 并且说明了何种类型的标签可以用作湿度传感器。第 2 节介绍了在恒温恒湿箱中的实验步骤和测试环境以验证理论推导结果。第 3 节将测试环境改为实际应用的普通环境, 并得到实际环境下的测试结果。最后一节为文章的结论。

1 标签湿度传感器系统模型理论分析

1.1 分析模型设定

本文的研究对象为一个超高频 RFID 基本系统, 如图 1 所示, 系统包括一个无源电子标签和一个读写器, 其中电子标签被附着于厚度为 5 mm 的紧密多层的干燥纸面上, 并将其朝向读写器的天线。

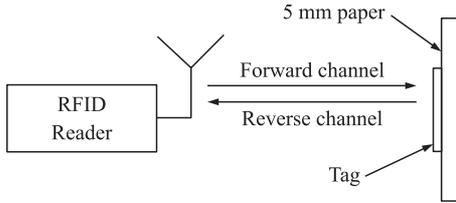


图 1 将基于 EPC Gen2 协议的标签贴附于 5 毫米厚的可吸收水分的纸上
读写器和标签的距离固定

本文在分析天线随环境变化的时候只涉及到介电常数的实部, 但这并不影响分析的正确性。因为当纸张水分含量增加的时候, 其代表介电常数虚部的损耗角也会增加, 进而增加介质的损耗, 最终间接增加了读写器需要发射的功率, 这和只分析实部时得到的结果是相同的。另外损耗角的增加, 也会使标签天线损耗电阻增加, 进而使匹配恶化, 也会增加读写器所需发射的功率。本文在理论说明部分更注重对结果变化的定性分析, 更精确的定量分析可以从实验结果中得到。

1.2 前向链路理论分析

对于无源标签而言, 一旦它接受到的能量足以使它正常工作并返回调制信号, 则其反向调制信号可以被读写器读出^[8]。因此本文的理论分析仅考虑前向链路。为简化分析模型, 避免前向链路的损耗^[9], 本文假定电子标签附着在一定厚度的纸张朝向读写器天线一侧的表面, 如图 1 所示。

通过解链路方程^[10]可以得到标签所需功率的最小值为:

$$P_{\text{reader, min}} G_i L_{\text{path}}(d) G_r p \tau = P_{\text{th}} \quad (1)$$

其中 $P_{\text{reader, min}}$ 是需要读写器发射的最小功率, G_i 是读写器天线的增益, $L_{\text{path}}(d)$ 是前向链路的路径损耗, G_r 是标签天线的增益, P 是极化系数, τ 是标签的阻抗匹配系数, P_{th} 则是芯片启动的阈值功率。其中 $G_i, L_{\text{path}}(d), P$ 和 P_{th} 对于距离固定的系统是常数。那么附着在干燥纸上的标签与附着在吸收了水分后的湿纸上的同一个标签所需最小发射功率差 P_{diff} 就可以表示为:

$$P_{\text{diff}} = \frac{\tau_{\text{dry}} G_{r, \text{dry}}}{\tau_{\text{moisture}} G_{r, \text{moisture}}} \quad (2)$$

如果在湿度单调变化的同时, 最小功率差异 P_{diff} 也是单调变化的, 那么对应每一个 P_{diff} 值, 就有唯一的湿度值与之对应。则通过测量 P_{diff} 的值就能够的到当前湿度的数值。

1.3 标签天线阻抗理论分析

偶极子类型的天线被广泛用作超高频 RFID 的标签天线, 而且它们的特性十分类似。本文中就以类偶极子天线的标签作为分析对象, 虽然这些天线的结构比较复杂但仍旧遵循偶极子天线的特性。考虑一个使用理想的半波长偶极子天线的无源标签, 其阻抗匹配系数可以用下式计算:

$$\tau = \frac{4R_A R_T}{|Z_A + Z_T|^2} \quad (3)$$

其中 $Z_A = R_A + jX_A$ 是天线的输入阻抗, $Z_T = R_T + jX_T$ 标签芯片的输入阻抗。天线阻抗 Z_A 的实虚部可以由下两式得出:^[11]

$$R_A = \frac{R_r}{\sin^2\left(\frac{kl}{2}\right)}, X_A = \frac{X_m}{\sin^2\left(\frac{kl}{2}\right)} \quad (4)$$

其中 l 是偶极子的长度, R_r 是天线的辐射电阻, X_m 是在天线电流最大处看入阻抗的虚部, 它们的表达式分别为:^[11]

$$R_r = \frac{\eta}{2\pi} \left\{ C + \ln(kl) - C_i(kl) + \frac{1}{2} \sin(kl) \times [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] + \frac{1}{2} \cos(kl) \times \left[C + \ln\left(\frac{kl}{2}\right) + C_i(2kl) - 2C_i(kl) \right] \right\}$$

$$X_m = \frac{\eta}{4\pi} \left\{ 2S_i(kl) + \cos(kl) [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] - \sin(kl) \times \left[2C_i(kl) - C_i(2kl) - C_i\left(\frac{2kr^2}{l}\right) \right] \right\} \quad (5)$$

其中 $C_i(x) = \int_{\infty}^x \frac{\cos y}{y} dy$, $S_i(x) = \int_{\infty}^x \frac{\sin y}{y} dy$, C 恒等于 0.577 2, r 是偶极子截面的半径, η 是波阻抗, 其表达式为:^[12]

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_e \epsilon_0}} \quad (6)$$

其中 μ_0 是真空磁导率, ε_0 是真空介电常数。 k 是空间频率^[12]:

$$k = \frac{2\pi f}{c\sqrt{\varepsilon_e}} \quad (7)$$

其中 c 是真空中光速, f 是标签的工作频率, ε_e 是等效相对介电常数, ε_e 可表示为^[13]:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (8)$$

其中 ε_r 是标签所附着的介质的相对介电常数, d 是此介质的厚度, W 是此偶极子的宽度。

从式(3)~式(7)可得到结论为 τ 是 ε_r 的函数, 可写作:

$$\tau = \tau(\varepsilon_r) \quad (9)$$

天线的增益 G 是其方向性增益 D 乘以辐射效率 η_r , 辐射效率在本文涉及情况下近似为 1。因此我们在做理论分析时候可以用 D 来代表天线的增益, 这样做会降低精确度但却是合理的简化。

偶极子的归一化功率方向图为^[11]:

$$F(\theta, \phi) = F(\theta) = \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2}\cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]^2 \quad (10)$$

天线的方向性增益为^[11]:

$$D = \frac{2F(\theta) |_{\max}}{\int_0^\pi F(\theta) \sin\theta d\theta} \quad (11)$$

可以看出 D 也是 ε_r 的函数, 并可以写作:

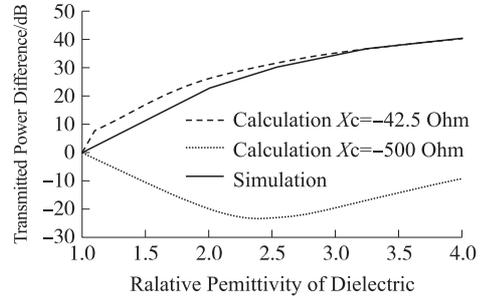
$$D = D(\varepsilon_r) \quad (12)$$

通过(9), (12)两式, 可以把式(2)改写为:

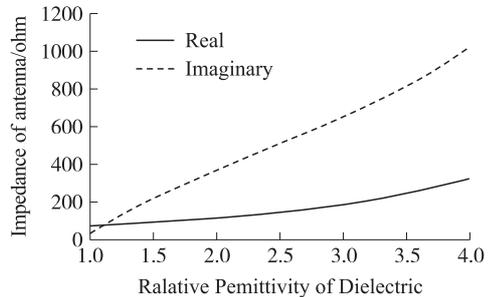
$$P_{\text{diff}} = P_{\text{diff}}(\varepsilon_r) \quad (13)$$

这说明 P_{diff} 只和 ε_r 有关。如图 2(a) 所示, 当空气中偶极子标签天线阻抗与标签芯片阻抗完全匹配 (即标签天线阻抗为 $73 + j42.5$, 标签芯片阻抗为 $73 - j42.5$) 时, 随着标签所附着的介质的介电常数升高, P_{diff} 是单调增加的。在电磁仿真软件 IE3D 中的仿真结果与计算结果接近, 验证了公式的正确性。由此可见, 可以通过测量 P_{diff} 的变化来获得对应的湿度值, 使用电子标签作为湿度传感器是可行的。通过电磁仿真还发现, 由于介电常数改变而造成的阻抗匹配因子的变化要远大于增益的变化, 因此 P_{diff} 的变化主要由阻抗匹配因子的变化来决定。电磁仿真结果表明, 偶极子天线阻抗的实部和虚部都是随相对介电常数单调增加的, 如图 2(b) 所示。则根据式(3)假设标签天线实部不变, 那么当标签芯片的阻抗虚部小于 -42.5 时, 该曲线就会丧失单调性。例如, 当标签芯片的阻抗为 $73 - 500j$ 时, 这条曲线就不是单调的了, 如图 2(a) 所示。同理当假设标签天线虚部不变时, 当

标签芯片阻抗实部大于 73 时也会出现非单调性。由此可见, RFID 标签可以用于湿度传感器, 但是其使用条件和阻抗匹配情况密切相关。



(a) 所需最小发射功率与标签后材料的相对介电常数的关系



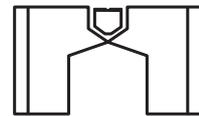
(b) 天线阻抗变化与标签后材料的相对介电常数的关系

图2 天线与环境仿真分析结果

2 标签湿度传感器系统仿真分析

2.1 仿真条件与环境

本文选取两款商用标签天线在电磁仿真软件 IE3D 中进行验证, 其天线结构如图 3 所示。仿真环境中设置有限大小的介质层来模拟纸张, 并改变这个介质层的介电常数来模拟湿度的变化, 通过仿真软件得到天线的 τ 和 G 之后带入(2)式可得 P_{diff} 随 ε_r 变化的曲线。



(a) 标签A: Quanray 622G002



(b) 标签B: Quanray 622GF040

图3 两款商用标签天线结构图

2.2 仿真结果与分析

图 4 是仿真结果所得的 P_{diff} 随 ε_r 变化的曲线。其中标签 B 的曲线是单调变化的但标签 A 却是非单调变化的。在对天线阻抗变化的仿真结果的观察中发现, 标签 B 的天线阻抗在空气中工作的时候和芯片的阻抗是完全匹配的。随着其贴附物质介电常数的增加, 标签的阻抗匹配系数持续减小, 导致标签

芯片获得的功率不断减小, 因此为了使芯片正常工作, 读写器就要发射更大的功率。标签 A 在空气中的天线阻抗和标签的阻抗并非完全匹配, 随着其贴附物质介电常数的增加, 标签的阻抗匹配系数先上升到 1 之后开始下降, 因此就会出现如图 4 中非单调的变化曲线。这种非单调的曲线会导致在湿度测量的过程中, 同一个 P_{diff} 值, 会对应于两个湿度的数值, 因此这类型的标签不能用于湿度测量。因此, 用于湿度传感器的标签不能随意选取, 必须满足一些条件。一款可以用于湿度测量的 RFID 商用标签, 其天线的设计应使得在测量所关注的介电常数变化范围内 P_{diff} 的变化曲线都是单调的。

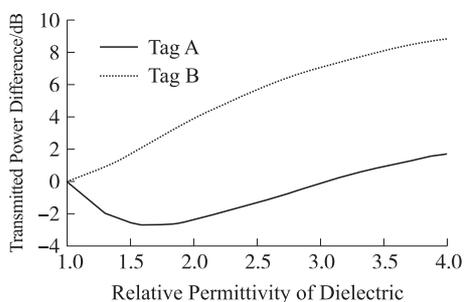


图 4 实际标签仿真

对于实际的商用标签, 标签天线和芯片之间的阻抗匹配有不同的设计策略。一部分标签公司的设计方法是如标签 B, 让其在空气中的天线阻抗和芯片匹配, 另一部分标签公司选择标签 A 的设计方案, 使其在空气中天线的阻抗并不和芯片完全匹配, 而一旦其附着在物品上时, 匹配状态会得到优化, 可增加标签工作的鲁棒性^[14]。因此标签 B 类型的商用标签是最适合此种应用的; 同时这种标签的 P_{diff} 变化范围不能超过读写器功率可变的范围, 从仿真和下一节测试的结果来看, 标签在普通环境的湿度改变下标签 B 的 P_{diff} 变化范围不超过 8 dB, 而主流 RFID 读写器厂商生产的读写器其功率变化范围都在 15 dB 左右, 可以满足标签 B 的需求。但对于其他种类的标签还要视具体情况而定; 商用读写器的功率变化精度为 1 dB 或者 0.1 dB, 对于精度为 1 dB 的读写器, 如果标签天线对环境不敏感, 湿度变化的范围虽然很大, 但对于读写器来说则不需要改变超过 1 dB 功率值, 那么这个湿度传感器系统的精度就难以得到保障。读写器可调功率的精度越高, 其能检测到的湿度变化就更细微更精确。综上, 最适合组成湿度传感器的系统是, 其标签天线在空气中的阻抗与标签芯片的匹配系数为 1, 且标签天线由于环境湿度变化而引起的 P_{diff} 的变化不能超过 15 dB, 精度不小于 0.1 dB, 而读写器的功率可变范围、功率可变精度只要能满足标签对其功率变化的要求即可。

3 标签湿度传感器系统实验分析

3.1 电磁屏蔽室实验及分析

本文使用一个恒温恒湿箱来构建所需的湿度环境。首先, 测量干燥环境中读写器在固定距离下能激活标签的最小功率。然后将标签贴附的纸张放入恒温恒湿箱中, 设置测试箱的一个相对湿度值并保持此状态约 1 h 左右后取出。最后, 用读写器读取贴附纸张表面的标签, 在微波屏蔽室中测量并比较读写器首次读取到的标签的所需的最小发射功率, 则其与干燥环境下的功率差即为 P_{diff} 。实验分为两组, 第 1 组将相对湿度由 50% 升至 90%, 第 2 组由 90% 降至 50% (这一湿度范围是由仪器测量范围决定的)。相对湿度每变化 10%, 记录一次发射功率的变化。对于每一个湿度点重复进行 3 次实验。

3.1.1 实验条件与环境

实验中采用的标签符合 EPCglobal Class 2 协议。标签天线的制造方法为将导电银墨压印在 PET 衬底上。由于 PET 塑料衬底的厚度远小于电介质 (如 5 mm 厚的纸张), 因此其对标签特性的影响与纸张相比可以忽略不计, 标签的性能会等效地随外界环境变化而变化。

标签被贴在一打 5 mm 厚的 A4 大小的纸上。标签的高度和读写器天线的高度保持一致, 中心相对地置于读写器正前方, 如图 5 所示。标签与读写器的距离经过精确的选定, 可以将多径效应的影响降低到不对实验过程造成影响。实验在屏蔽室中进行。屏蔽室可以被认为是密闭的, 整个实验环境在实验过程中足够稳定。



图 5 实验场景

实验采用一款商用 RFID 读写器^[15], 这款型号的读写器不具备发射功率可调的功能。为了调整读写器的输出功率, 本文在读写器和读写器天线之间插入一个衰减器来模拟一个可调功率的读写器, 但这并不是本文描述的湿度传感器系统所必需的, 因为很多种类的商用读写器都是输出功率可调的。此衰减器的衰减范围为 0 至 -11 dB, 步长为 0.1 dB。

3.1.2 实验步骤

在实验中, 我们改变并测量读写器的输出功率,

直至可以持续地读取标签。整个实验系统的中心频率为 923 MHz。文献[6]的湿度传感器系统是将两个相同种类的标签并行放置,两者同读写器天线正面对,其中一个标签裸露在空气中,而在另一个标签的正面对贴附了适当大小和厚度的纸张作为吸水材料,其 P_{diff} 即为读出此两标签所需最小功率的差值。本文没有采用这种方法,因为即使湿度环境有很大变化,读写器读出裸露在空气中的标签的最小功率变化并不明显,则可在实际使用的环境条件下测量读出此标签的所需最小功率并记录下来用于比较,这样可以省去读写器一半的读写次数。文献[6]的方法还存在一个功率误差没有考虑,即使湿度不变,裸露在空气中的标签和附着纸张的标签其天线特性已经存在差异,并且纸张在通信链路中还带来一定的损耗,导致其最终测定的 P_{diff} 并非准确的数值。相比之下,本文只使用一个标签,不仅使系统更加实用,还减小了读写器控制模块的复杂度。

3.1.3 实验结果与分析

图6显示了发射功率变化值与相对湿度的关系。图中最左边的点代表干燥环境下(相对湿度为0)的数据,即实验中作为比较的标准值。在相对湿度由50%升至90%过程中,对于标签B发射所需最小功率变化值与湿度的关系曲线是单调的,而对于标签A则是非单调的,这也印证了之前的仿真结果。但和图4的仿真结果有差异的是,由于纸质材料的吸收和解吸水分存在过程依赖性,纸质材料在湿度上升阶段吸收的水分含量的比率和湿度下降阶段解吸的水分含量的比率是不同的^[16]。在这一情况下,纸张的水分含量不仅与当前的相对湿度有关,还与周围环境的湿度变化过程有关。例如湿度上升10%时纸张吸收水分的含量和湿度下降10%时纸张解吸水分的含量是不一样的。所以图6中每个标签发射功率变化值的两条曲线分别对应了两种情况下的湿度。这样就会造成相同的功率差异却对应两个不同湿度值的情况,这是本系统中要避免的情况。

在现实环境中的湿度变化是动态的可能经历很多上升或者下降的反复过程,因此在用于湿度测量的RFID系统中应该引入一个保存历史测量记录的模块。如果当前的功率变化大于之前的功率变化,应该参照图6中箭头向上的曲线,反之亦然。举例而言,如果标签B的发射功率变化测量值为7 dB,而上一次的测量值为6 dB,根据图6的曲线,可以得到湿度大约是80%。而当上一轮的测量值为8 dB时,则应该参考箭头向下的曲线,并得到湿度大概是70%。

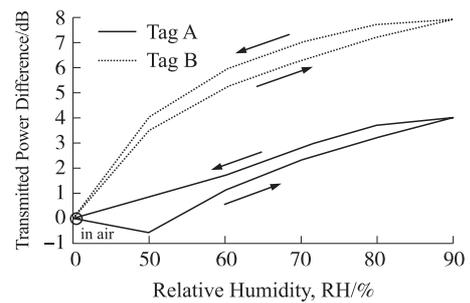


图6 理想情况测试结果

3.2 普通环境中的实验及分析

3.2.1 实验条件与环境

本文在一个有障碍物和环境噪声的普通环境中再次测试电子标签作为湿度传感器的功能。实验设备的放置同前。由于实验环境并非选择在屏蔽室等密闭空间,若想改变并稳定其环境的湿度是很困难的。而本文在之前也说明了湿度对此系统的直接影响就是纸张水分含量的增加,因此直接改变纸张含水量和改变外部环境的温度对标签带来的影响是一致的。同时这种实验还对应于一种新的使用场景,即测量管道或是其他运输等重要环节的泄漏情况。本文中的系统置于某些压力过大易于泄漏的关键部位之下,当管道等发生泄漏或者破裂的情况时,读写器就可能要提高功率去读取标签。如果读写功率固定,则读写器此时就不能识别标签,并触发报警器的开关。

3.2.2 实验步骤

本实验的步骤是,首先在纸张干燥时,让读写器尝试读取标签并记录下读写器所需发射的最小功率。然后,使纸张均匀吸收10 mL固定量的水,此时标签不能返回信号。随后,增大读写器的输出功率,直至读写器能够重新读取吸收水分的标签,记录所增大功率的数值。我们重复进行这一实验过程(吸水,增大功率,测量)5次,直到读写器的输出功率达到其上限。图7显示了读写器功率的增量,即发射功率变化值与喷洒在纸张上的水的体积的关系曲线。

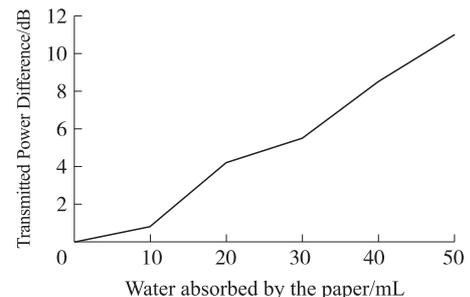


图7 现实环境测试结果

3.2.3 实验结果与分析

增大纸张上的水分含量相比环境湿度对标签天

线性质的影响是剧烈的。当纸张吸收了 50 mL 的水之后,即使将实验中的读写器的输出功率设为最大,读写器也无法读取该标签。

通过上述论证,本方法测量湿度是可行的。如果使用本方法运用于商用远程湿度传感,需要功率可调的读写器已经以及若干商用电子标签,这些标签应该具有第 2 节中所提到的特性。除此之外,建议采用可编程的读写器来解决湿度上升和下降造成 P_{diff} 的不同值问题。

4 结论

本文引入并分析了使用低成本 UHF 电子标签作为湿度传感器的方法。通过理论分析和仿真验证证明了并非所有的商用标签都可以作为湿度传感器,进而提出适用于湿度传感器的标签类型,并且分别在恒温恒湿箱中和普通环境下进行了实验测试。实验结果表明,湿度变化趋势的不同将导致测量结果的差异,因此一个合适的 RFID 湿度系统要包含一个对环境较为敏感的标签天线,以及一个可以区分湿度上升或者下降过程的探测模块,这个模块可以在读写器中通过编程实现,进而降低标签的成本。本文在最后通过理想环境和实际环境的测试验证了理论分析和仿真结果。

参考文献:

- [1] Menke F, Knochel R, Boltze T, et al. Moisture Measurement in Walls Using Microwaves [J]. IEEE Int Microwave Symp, 1995, 3: 1147-1150.
- [2] Hauschild T, Menke F. Moisture Measurement in Masonry Walls Using a Non-Invasive Reflectometer [J]. Electronics Letters, 1998, 34(25): 2413-2414.



关 硕(1985-),男,复旦大学在读硕士生,主要研究方向为标签天线设计,阻抗匹配网络设计,082052030@fudan.edu.cn;

- [3] Trabelsi S, Nelson S O. Inexpensive Microwave Moisture Sensor for Granular Materials [J]. Antenna and Propagation Society International Symposium, 2007: 297-300.
- [4] Miyoshi Y, Tkeuchi T, Saito T, et al. A Wearable Humidity Sensor with Hydrophilic Membrane by Soft-MEMS Techniques [J]. Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS '07. 2nd IEEE International Conference on, 2007: 211-214.
- [5] Wang Yang, Chen Jun-Ning, Ke Dao-Ming, et al. Modeling of a CMOS Capacitive Relative Humidity Sensor [J]. Education Technology and Computer Science, 2007, 3(7-8): 209-212.
- [6] Johan Siden, Xuezhi Zeng, Tomas Unander, et al. Remote Moisture Sensing Utilizing Ordinary RFID Tags [C]//IEEE SENSORS 2007 Conference, 2007, 28-31: 308-311.
- [7] Apekis L, Christodoulides C, Pissis P. Dielectric Properties of Paper as a Function of Moisture Content [C]//Dielectric Materials, Measurements and Applications, 5th International Conference on, 1988, 27-30: 97-100.
- [8] Che Wenyi, Yang Yuqing, Xu Conghui, et al. Analysis, Design and Implementation of Semi-Passive Gen2 Tag [C]//2009 IEEE Conference on RFID, 2009, 27-28: 15-19.
- [9] Fletcher R, Marti U P, Redemske R. Study of UHF RFID Signal Propagation Through Complex Media [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005, 1B: 747-750.
- [10] Nikitin P V, Rao K V S. Antennas and Propagation in UHF RFID Systems [C]//2008 IEEE Int Conf RFID Las Vegas, 2008: 277-288.
- [11] Balanis C A. Antenna Theory Analysis and Design 3rd [M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 2005: 143-157.
- [12] Jin Au Kong. Maxwell Equations [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 45-46.
- [13] David M. Pozar Microwave Engineering Third Edition [M]. New York: John Wiley & Sons, 2005: 243-248.
- [14] Impinj INC. Datasheet of MonzaTM [EB/OL]. <http://www.Impinj.com>, 2006.
- [15] Quanray Electronics Co. Ltd, Datasheet of production [EB/OL]. <http://www.quanray.com>, 2009.



王俊宇(1973-),男,复旦大学微电子研究院副研究员,硕士生导师,主要研究方向为电子标签和物联网节点设计方法研究,junyuwang@fudan.edu.cn。