

基于软件无线电的无源超高频 RFID 标签性能测试*

侯国刚 何台刚 李兵 余开 朱彦卿

(湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

(2009 年 8 月 9 日收到; 2009 年 11 月 10 日收到修改稿)

讨论了无源超高频射频识别(UHF RFID)系统的信号传输过程及性能测试方法,以软件定义无线电方式实现了符合 ISO/IEC18000-6C 标准的无源标签的部分性能测试,研究了部分通信参数动态变化时标签应答功率的变化,并对不同标签的灵敏度进行了测试.所有实验在常规条件下完成,测试研究表明在基带编码采用较小的 Tari 值、PW 为 50% 以及较高的调制系数时,阅读器能够接收到标签反射回来的最大功率,系统的识别距离最远.

关键词: 射频识别, 无源电子标签, 标签灵敏度, 性能测试

PACC: 5270G, 0630L, 0690

1. 引 言

UHF 频段的射频识别(radio-frequency identification, RFID)产品所遵循的国际或者某地区规范标准,基本规定了阅读器和标签之间包括算法、调制以及通信参数等内容. RFID 系统通信过程中,通信参数以及环境因素的变化对系统性能的影响较大. RFID 系统的性能测试技术包含标签测试、阅读器测试、系统测试等. Kim 等在办公室环境下,采用发射接收天线分离的方法,发送 CW 信号到带全向天线的模拟标签,通过开关对 CW 进行负载调制,完成信号的反向散射,并用小尺度衰减模型对 2.45 G 的 RF 标签通信信道的两个链路进行模拟和测试,并测试证明了双向链路的路径损耗指数为单向链路的两倍^[1]; Daniel 和 Aror 等分别对具有不同天线形状且符合 EPC C0 或 EPC C1 标准的标签在靠近金属和塑料瓶装水时的阻抗、读写距离和功率传输等性能进行分析和测试,发现在同等硬件条件下,标签附近的物体导致电场减弱是读写距离减小的关键,给出了 RFID 系统正常读写的贴近临界距离,并对读取距离与频率的相关性等参数做了测试实验^[2,3]. 这些对 RFID 读写距离进行的测试,讨论了环境因素的影响,但都是针对单谐振频点进

行. Pavel 等讨论了标签的灵敏度、增益、极化方式、阻抗匹配等参数、路径损耗、失谐以及阅读器的灵敏度、EIRP 等参数对读写距离的影响^[4],并利用 NI 公司的软硬件进行了符合 ISO18000-6C(简称-6C)标准的三类标签的部分性能参数测试,在固定其他性能参数的前提下,测试 RFID 在 0.8—1 GHz 范围内的读写距离^[5],初步实现软件无线电方式对 RFID 的测试.

目前对链路功率或读写范围进行的测试研究,基本是固定基带信号的编码参数的情形下进行的^[1-5]; RFID 测试需要矢量分析仪、频谱分析仪等仪器,成本高,且测试效率低;对单频点的静态参数性能测试或固定编码参数的频段内的动态性能测试,主要集中对链路功率测算.用软件定义无线电方式构建测试系统,测试通信参数的变化对 RFID 系统的下行链路功率的影响,摆脱了对硬件测试仪器的依赖,提高测试效率;研究符合-6 C 标准的 RFID 系统在办公室环境下, Tari、脉冲宽度(PW)、调制深度等参数组合变化时阅读器接收功率随频率变化的规律,优化参数组合;实现对无源超高频 RFID 标签的灵敏度测试.本文的主要工作有:标签灵敏度测试,编码参数变化的动态性能测试,进行参数组合优化,获取标签最佳性能;测试反向链路的接收功率,得出编码参数组合的优化结果;并讨

* 国家杰出青年科学基金(批准号:50925727),国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA04A104),国家自然科学基金(批准号:50677014,60876022),湖南省科技计划(批准号:2008Gk2022)资助的课题.

通讯联系人. E-mail: hyghnu@yahoo.com.cn

论了雷达散射截面的测量结果. 本研究有助于加深对 RFID 的通信参数对信道影响的理解, 进行通信参数组合, 并得出系统获取最佳识别效果的编码参数组合, 为 RFID 系统设计和测试提供参考依据.

2. ISO/IEC 18000-6 Type C 介绍

2007 年 ISO 正式发布-6C 标准. 该标准中规定了 860—960 MHz 的空中接口协议参数, 规定 RFID 系统前向链路采用 PIE 编码, 反向链路选用 FMO 或 Miller 编码. 标准规定, PIE 编码通过脉冲间隔的不同长度来区分数据 0 和 1, 且在数据的中间会产生一次相位翻转. 数据 0 的长度定义为一个 T_{ari} 时长, 而 $T_{\text{ari}} + xT_{\text{ari}}$ 为数据 1 的长度, 且数据 0 和 1 都有 PW 长度的低电平, 见图 1. 标签在接收数据时, 把脉冲数据的长度和参考脉冲长度 $((1 + x/2) T_{\text{ari}})$ 进行比较, 得出数据 0 和 1. PIE 编码方式能较好的保持数据同步, 能有效提高对各种干扰的抵抗. -6C 规定 T_{ari} 值在 $6.25\text{—}25 \mu\text{s}$ 之间, 而 PW 的宽度的取值为 $\max(0.265 T_{\text{ari}}, 2 \mu\text{s})$ 和 $0.525 T_{\text{ari}}$ 之间, x 的值在 $0.5\text{—}1$ 之间.

图 1 PIE 编码数据符号图

3. 软件定义无线电系统方案

软件无线电 (SDR) 技术是用现代化软件来操纵、控制传统的“纯硬件电路”的无线通信. 软件定义无线电终端促进了物理层功能的可编程实现, 将模块化、标准化的硬件单元以总线方式连接构成基本平台, 并通过软件加载实现多种无线电功能的一种开放式体系结构. 软件无线电的关键思想是: 将 A/D, D/A 尽可能靠近天线, 用软件来完成尽可能多的无线电功能^[6].

测试平台采用 NI 公司的上下变频板卡 (PXI-5610, PXI-5600)、中频输入输出卡 (PCI-5640 R) 和控制主机 (PXI-PCIE8361, PXI-1044), 利用

LabVIEW8.5 进行开发, 参照-6C 标准能够进行状态机测试, 在发送指令后, 能记录标签的应答信号, 并具有进行时域、频域以及联合时频的分析计算功能. 其中 PCI-5640R 包括三百万门级的 Xilinx 的 Virtex-IIPro P30 FPGA 芯片、两路 100 MS/s 的中频输入、二路 200 MS/s 的中频输出、数字上下变频模块 (DUC, DDC) 以及 2 MB 的 SRAM^[5]. 测试平台基本通信结构如图 2 所示.

图 2 RFID 系统性能测试原理图

硬件系统架构简单, 板卡之间通过 IF RIO 板载 FPGA 来实现实时通讯, HOST PC 用于平台的控制以及进行信号的后续分析. 系统测试过程中, 由 IF RIO 板载 FPGA 生成指令, 并进行 PIE 编码之后, 通过数字上变频 (DUC) 和 DAC 转化为中频信号, 传送给射频上变频器 PXI-5610 模块 (RF UC) 经调制后通过天线向外发送; 接收到的应答信号经射频下变频 PXI-5600 模块 (RF DC) 解调后转化为中频信号, 经 ADC 和数字下变频 (DDC) 后, 转化为数字基带信号, 可送至控制器进行谱分析、时域参数分析等, 同时由 FPGA 解码后的信息也送至控制器, 进行解码分析等.

测试天线采用半波对称振子天线, 谐振频率为 915 MHz, 满足标准 ISO18047-6 规定的测试用天线要求, 驻波比 $VSWR < 1.8$, 天线臂为直径 2 mm 的纯铜材质.

4. 测试系统分析

测试平台能够实现阅读器和标签之间的实时通讯, 且能够获取指令和应答的基带信号参数. 根据硬件条件和协议规范, 发送“QUERY”等指令, 对 T_{ari} 值、调制系数、PW 宽度以及载波信号的频率范围等动态调整, 得出标签应答信号的功率随其他动态参数变化的过程.

微波信号的传输过程中部分在端口被反射, 部分被吸收, 其余的通过网络传输出去^[7]. 无线信道中, 假设 P_{T} 为阅读器发送功率的大小, G_{reader} , G_{tag} 分

别表示阅读器和标签天线的增益, 前向链路的发送天线与标签天线间的距离为 d_1 , 反向链路中标签天线与接收天线间的距离为 d_2 (图 2). 标签天线感应接收信号的电压值为 V_s , 内阻为 $Z_A = R_A + jX_A$, 如图 3 所示. 标签芯片由整流电路提供能量, 所获功率由标签工作状态所决定, 现在假设芯片阻抗为 $Z_L = R_L + jX_L$, 匹配状态“0”(Z_{L1}), 失配状态“1”(Z_{L2}).

图 3 典型 RFID 通信系统示意图

由弗里斯传输方程可知, 在前向链路中标签天线接收功率

$$P_{R_{tag}} = P_T G_{reader} G_{tag} \frac{1}{4 d_1^2} \quad (1)$$

设标签工作时, 标签芯片接收功率为

$$P_{chip} = P_T G_{reader} G_{tag} \frac{1}{4 d_1^2} \frac{4R_A R_L}{|Z_A + Z_L|^2} \quad (2)$$

标签天线的反射功率为

$$P_{Back} = P_T G_{reader} G_{tag}^2 \frac{1}{4 d_1^2} \frac{4R_A^2}{|Z_A + Z_L|^2} \quad (3)$$

其中 $K = \frac{4R_A R_L}{|Z_A + Z_L|^2}$ 为功率传输系数, $K =$

$\frac{4R_A^2}{|Z_A + Z_L|^2}$ 为阻抗匹配因子, 当 $Z_A = Z_L^*$, $K = 1$;

当 $Z_L = 0$ 时, $K = \frac{4R_A^2}{R_A^2 + X_A^2}$; 当 $Z_L = \infty$ 时, $K = 0$.

从图 3 可知, 标签的反向散射调制工作状态在匹配状态且芯片阻抗等效为 $Z_L = Z_{L1}$ (“0”态) 和“短路”状态且阻抗为 $Z_L = Z_{L2}$ (失配, “1”态) 两种状态之间转换, 通过阻抗状态的转换, 阅读器的接收功率变化^[8]. 标签工作在 0 态和 1 态时的天线辐射功率分别为 0 态时,

$$P_{back0} = P_T G_{reader} G_{tag}^2 \frac{1}{4 d_1^2} \frac{4R_A^2}{(Z_A + Z_{L1})^2}$$

为 1 态时,

$$P_{back1} = P_T G_{reader} G_{tag}^2 \frac{1}{4 d_1^2} \frac{4R_A^2}{(Z_A + Z_{L2})^2}$$

在离阅读器 d_1 处的入射功率密度 S , 标签接收天线有效面积为 A_e , 同时考虑标签天线的雷达散射截面, (3) 式可以表为

$$P_{back} = S \cdot A_e \cdot K \cdot G_{tag} = \frac{P_T G_{reader}}{4 d_1^2} \cdot \frac{1}{4} G_{tag} \cdot \frac{4R_A^2}{|Z_A + Z_L|^2} \cdot G_{tag} \quad (4)$$

其中 $K = \frac{(G_{tag} R_A)^2}{(|Z_A + Z_L|^2)}$.

在反向链路中, 阅读器接收天线接收到的标签反向散射功率为

$$P_{backscatter} = \frac{P_T G_{reader}^2}{(4 d_1 d_2)^2} \quad (5)$$

阅读器天线接收端接收的电压信号由同相分量 I 正交分量 Q 组成, 实际上由标签的反向散射信号以及发射天线与接收天线间耦合的杂散泄漏信号组成. 在忽略杂散泄漏信号时, 阅读器接收到的功率值为^[5]

$$P_{backscatter} = \frac{I^2 + Q^2}{2Z_0} \quad (6)$$

其中 I , Q 为标签负载调制时 Z_{L1} , Z_{L2} 所对应的应答信号的正交、同相分量的差. Z_0 为接收天线的输入阻抗(50 Ω).

根据文献[9]以及(5)式, 标签天线在不同负载下的雷达散射截面计算如下:

$$= \frac{(4 d_1 d_2)^2}{(G_{reader})^2} \left| \frac{P_{backscatter}}{P_T} \right| \quad (7)$$

为 Z_{L1} , Z_{L2} 时的 RCS 的差值.

5. 实验测试及结果

在进行灵敏度测试时, 测试平台发送 Inventory Sequence 序列中的 Select 指令后等待 5—6 Tari 后, 再发送 QUERY 指令, 标签激活应答返回 RN16, 发送 ACK 指令, 获取标签的 UII 等, 再发送 Req_RN 指令获取 Handle 应答. 固定天线距离 $d_1 = d_2 = 0.5$ m, 发射、接收天线的增益为 2.15 dBi, 工作频率为 915 MHz, 发送功率为 20 dBm(100 mW). 整个系统通信数据基带波形如图 4 (Tari = 12.5 μ s, PW = 0.5 Tari, $m=90\%$) 所示, 图 4(b) 表示其 I - Q 通道信号的星座图. 从图 4 中分析得 $|V| = 5$ mV. 结合(5), (6)式, 从图 4(b) 可算出 $P_{backscatter}$ 为 0.48 mW, 代入(7)式, 得 $\sigma = 0.04$ m².

图 4 链路波形及基带 I-Q 星座图 (a) 信号波形; (b) I Q 星座图

动态调整参数的测试时只发送 QUERY 指令, 激活标签后获取 RN16 即为识别成功. 当编码参数变化且载波中心频率也变化时, 链路的各参数都会变化, 反映到系统中, 表现为标签反射功率大小的变化. 测试中设置载波频率从 860 MHz 并固定步长增长到 960 MHz, 而其他编码参数以最大值并固定步长减小到某一最小值. 测试过程的部分流程如图 5 所示, 载波频率设置 $F_{\max} = 960$ MHz, $F_{\min} = 860$ MHz, step1 为 2 M 或 5 Hz 的步长, index1, index2 为循环次数, 初始值为 0, Ref 为编码参数, 在测试过程中分别为 Tari, PW 和调制系数, Rmax, Rmin 分别为各参数可设置的最大值、最小值, step2 为可设置的步长.

5.1. 标签灵敏度测试

无源标签由阅读器发送的连续载波提供能量激活标签, 驱动数字电路部分, 使标签响应阅读器的相关指令并完成负载调制, 且必须满足: $P_{\text{chip}} >$

$P_{\text{sensitivity}} \cdot P_{\text{sensitivity}}$ 为标签灵敏度阈值. 标签灵敏度一般为 -13 dBm (50 μ W), 测试平台的天线接收灵敏度大约为 -50 dBm, 低于此值时即使标签有应答, 测试系统也无法进行正常的解码. 标签识别距离与灵敏度的关系为

$$r = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{P_T G_{\text{reader}} G_{\text{tag}}}{P_{\text{sensitivity}}}} \quad (8)$$

一般情形下无源 RFID 系统识别距离的大小由前向链路决定, 表明了读写距离主要受前向链路的影响^[4].

参照 ISO/IEC18046-3 标准中所提到的识别操作电场阈值 (E_{THR}) 测试方法, 以 5 MHz 步长, 天线距离 $d_t = d_r = 0.5$ m, 发射、接收天线的增益为 2.15 dBi, 测得 Alien 和坤锐标签成功识别所要求的最小发送功率值 (灵敏度) 如图 6 所示. 由图可见, Alien 标签在 915 MHz 谐振, 标签有较好的灵敏度, 需要最低 8 dBm 的发送功率, 如若灵敏度为 -13 dBm, 则可得路径损耗约为 21 dBm.

图 5 测试平台的部分流程图

5.2. Tari 对应答功率影响的测试

标签完成通信必须使阅读器成功对接收到的应答信号解码. 在改变 PIE 编码的 Tari 值、给定发射功率和固定天线标签间距离的前提下, Alien 标签应答功率的大小在扫频过程中随 Tari 值的变化如图 7 所示.

图 7 中的 Tari 值从 25 μs 以 1.25 μs 步长下降时到 5 μs 时, 接收功率基本也有减弱趋势, 但是在同一个 Tari 值时, 900—930 MHz 频段的接收功率相对较大, 因为标签谐振频率为 915 MHz; 而在频率 860—880 MHz 段内的功率接收波动较大, 甚至没有

图 7 Tari 变化时不同频点所接收功率 (PW = 0.5 Tari, 调制系数 = 90%)

得到正确的解码. 在能够进行正确解码的情形下, 阅读器获得最大接收功率的点为 (904 MHz, 18.75 μs , -32.92 dBm). 在同一个中心频率且能正常识别的情形下, Tari 值的变化对接收功率值的影响较大, 最小差值约为 1.50 dBm (916 MHz), 而在同一个 Tari 值时, 不同频点对应的接收功率差值很大, 最小约为 8 dB (16.25 μs), 最大约为 14 dB (5 μs). 采用较合适的 Tari 值, 可以使得 RFID 系统在整个频段内能够有效的提高识别率, 此图表明编码参数 Tari 对接收功率有影响. Tari 值越大, 接收功率有所上升, 但是 Tari 值越大, RFID 系统的指令速率越小, 效率会降低.

5.3. 脉冲宽度对应答功率影响的测试

按照 -6C 标准规定, PW 值在 $\max(0.265 \text{ Tari}, 2 \mu\text{s})$ 到 0.525 Tari 之间变化. 测试系统中设置 PW 在 0.1—0.9 Tari 之间变化, 标签应答信号的功率大小的测试结果如图 8 所示.

图 6 标签灵敏度测试 (Tari = 12.5 μs , PW = 0.5 Tari, $m = 90\%$)图 8 PW 变化时接收功率强度 (Tari = 12.5 μs , 调制系数 = 90%)

当 PW 大于 0.65 Tari 或者小于 0.25 Tari 时, 对标签识别效果不理想, 而在 0.5 Tari 附近的识别效

果最好, 测试结果验证了协议所规定 PW 值为 0.265 Tari 到 0.525 Tari 之间最为合适的事实. 860—880 MHz 之间的接收功率值的波动是因为此频段的接收功率受干扰信号以及标签失谐的影响而降低, 且造成较低的认识率.

5.4. 调制系数对应答功率影响的测试

无源 UHF RFID 系统中, 前向链路通信采用 DSB-ASK, SSB-ASK, PR-ASK 等调制方式. 讨论 DSB-ASK 调制情形下, 前向链路的不同调制系数对标签应答功率的影响, 提高调制系数可提高信噪比、功率利用率.

在幅度调制时调制波形的平均功率

$$\bar{P} = 1 + \frac{1}{2}m^2 P_c, \quad (9)$$

P_c 为载波功率, m 为前向链路的调制系数, 载波功率一定时, m 越大, 发射的平均功率也就越大. 由 (2), (3) 式看出, 标签天线所接收的功率, 部分被吸收, 激活标签和完成负载调制, 另一部分被反射, 作为反向链路功率反射回阅读器. 吸收部分要激活标签必须比其灵敏度阈值功率要大, 而采用 ASK 调制方式前向链路中, 当调制系数从 10% 到 100% 之间以 5% 的步长变化时, 接收功率变化如图 9 所示.

在协议规定的频段内, 发送功率固定在 20 dBm 时, 调制系数低于 60% 时, 给定测试条件下的 RFID 系统识别率下降, 特别是低于 40%, 系统基本不能正确识别标签; 在较高的调制系数情形下, 虽然接受功率值有波动, 但整个频段内的识别率接近 1.

本文主要提出了编码参数组合优化, 对标签动态性能进行测试. 软件定义无线电 RFID 测试平台改进了单点频率的标签性能测试, 可在某频段范围内对标签进行测试, 提高了测试效率. 完成了编码参数组合变化时对标签方向链路接收功率的测试, 并针对 RCS 进行了间接的测试. 采用收发独立天线, 发送符合标准的指令对标签进行读操作, 得出标签性能随信道参数变化的测试结果, 得出了编码参数组合. 但在测试过程中, 要注意如下两个问题:

1. 在频段内的测试时, 假设标签天线和收发天线的增益和方向性不随频率改变而改变.
2. 测试时, 对干扰源的抑制效果不理想, 特别是在无法识别情形时更为严重.

另外测试平台还存在不足和面临改进的问题是如何对多标签冲突分解效率的测试.

6. 结 论

编码参数对 RFID 系统性能有重要影响, 优化参数组合很有必要. 本文前述测试结果表明: Tari 值较小, PW 占空比约为 50% 和较高的调制系数为参数的最优组合, 此时标签天线获取功率最大, 识别距离最大, 且读写速度也较快. Tari, PW 值过大或过小以及调制系数太小时, 读写距离都会减小, 所以最优组合为 (12.5 μ s, 0.5, 90%) 附近. 在下一步工作中将改进测试环境, 针对标签贴附的各种附材料表面来设计; 在最优参数组合的基础上, 对通信链路的功率损耗进行测试分析, 获取足够的测试参数建立实际环境中无源 RFID 系统识别范围的几何模型.

图 9 调制系数变化时接收功率强度 (Tari = 12.5 μ s, PW = 0.5 Tari)

[1] Kim D, Ingram M A, Smith W W 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 1740
 [2] Dobkin D M, Weigand S M 2005 *IEEE Microw. Symp. Digest Long Beach, CA JUN 2005* **1** 135
 [3] Aroor S R, Deavours D D 2007 *IEEE Systems J.* **1** 168
 [4] Nikitin P V, Rao K V S 2006 *Proc. IEEE Antennas and*

Propag. Society Int. Symp. Albuquerque, NM July 2006 **1** 1011
 [5] Nikitin P V, Rao K V S 2009 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **56** 2374
 [6] Niu X X, Yang Y X 2000 *Software Defined Radio Technology and Application* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press) p15 (in Chinese) [钮心昕、杨义先

- 2000 软件无线电技术与应用 (北京: 北京邮电大学出版社) 第 15 页]
- [7] Liu C, Zhang S J, Xie L, Zhu N H 2005 *Acta Phys. sin.* **54** 2606 (in Chinese) [刘 超、张尚剑、谢 亮、祝宁华 2005 物理学报 **54** 2606]
- [8] Vita G D, Iannaccone G 2005 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **53** 2978
- [9] 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]

Measurement of the passive UHF RFID tag s performance based on software-defined radio^{*}

Hou Zhou-Guo He Yi-Gang Li Bing She Kai Zhu Yan-Qing

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

(Received 9 August 2009; revised manuscript received 10 November 2009)

Abstract

The signal transmission and measurement method of the passive UHF radio-frequency identification(RFID) system are discussed in this paper. Part of tag s communication performance which conforms with the ISO/IEC 18000-6 Type C was obtained by using the software-defined radio test platform. The received power by the platform changes with the communication parameters. Sensitivity of different tags was tested. All experiments were conducted under normal conditions. The measurement results show that the small Tari, half duty cycle (PW) and higher modulation index in baseband signal encoding allow the RFID system to receive larger power, also the RFID system to have larger read range.

Keywords: RFID, passive tag, sensitivity, performance test

PACC: 5270G, 0630L, 0690

* Project supported by the National Natural Science Funds of China for Distinguished Young Scholar of China (Grant No. 50925727) , National High Technology Research and Development Program of China(Grant No. 2006AA04A104) , the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50677014, 60876022) , Hunan Provincial Science and Technology Foundation of China (Grant No. 2008 GK2022) .