

基于马尔科夫链的射频识别防碰撞测试*

侯周国^{1)2)†} 何怡刚¹⁾ 李兵¹⁾

1) (湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

2) (湖南人文科技学院通信与控制工程系, 娄底 417000)

(2009年10月12日收到; 2010年5月5日收到修改稿)

分析了自适应 Q 值算法的防碰撞原理以及射频识别 (RFID) 通信的时序, 定义防碰撞过程的识别效率、识别速度和标签数目及 Q 值的数据状态 (Q, n) . 在此基础上讨论并建立了多标签的状态转移过程的马尔科夫链模型. 通过蒙特卡罗统计方法, 对马尔科夫链模型求解, 得出识别效率和识别速度. 用软件无线电测试方案实现防碰撞测试, 有效地实现了 RFID 防碰撞过程的识别效率和识别速度的量化分析. 模型仿真结果和测试数据的一致证明了测试模型的有效性和测试方法的正确性.

关键词: 射频识别, 防碰撞测试, 马尔科夫链, 时隙计数器

PACS: 52.70.Gw, 06.90.+v

1. 引言

射频识别 (RFID) 技术提供了一种自动识别和收集目标对象信息的高效且低成本的手段. RFID 系统包括标签和读写器, 由贴附在物体上的电子标签通过无线信道向读写器传输其唯一的标识字符串 (ID), 读写器对此 ID 进行识别并可进一步读写操作, 完成对标签贴附目标的信息识别和记录^[1]. 对超高频 RFID 应用的推广, 其挑战之一是提高多标签情形下防碰撞算法的系统效率和速度, 提高效率和减少识别时间是 RFID 走向实用的关键^[2,3]. 目前 RFID 防碰撞的研究多为改进各种 ALOHA 算法和 Tree 算法, 有效地提高防碰撞效率^[2-6]. ISO18000-6C (简称-6C) 协议标准采用的 ALOHA 算法, 通过调整时隙数来有效减少碰撞概率, 但标签或读写器数目增大时, 碰撞概率提高, 识别效率降低, 识别时间飞速增长^[2,4]. 因此有效调整 Q 值是提高效率的关键, 同时需要依赖解码性能、信号捕获能力以及散射功率等^[5]. 人们对防碰撞算法进行讨论, 分析标签应答的三种状态的时序关系, 通过调整时隙来减

少碰撞概率^[5,7-9], 理论估计各算法的效率, 但缺乏对 RFID 系统性能的具体测试结果, 没有解决防碰撞性能的量化分析和测试.

为了有效地对射频识别系统的性能进行分析和测试, 本文提出采用马尔科夫链模型来量化系统的识别效率和识别速度, 并结合虚拟仪器技术实现对防碰撞过程的效率测试. 首先介绍了-6C 协议规定的动态时隙参数自适应 Q 值算法^[10], 分析系统的通信时序, 指出标签在每一帧中选择时隙满足二项分布随机过程, 并定义了标签数目和时隙参数 Q 的变化数据对状态 (Q, n) , 在此基础上讨论并建立数据对状态 (Q, n) 转移过程的马尔科夫链模型, 有效地模拟 Q 值调整过程, 以提高系统识别效率. 通过定义防碰撞过程的识别效率和识别速度, 给出了马尔科夫链模型的求解过程. 通过对识别效率和识别速度的分析, 结合软件无线电测试理论, 利用具有良好解码性能、信号俘获能力的射频识别测试系统^[11]进行测试, 有效地实现了 RFID 的识别效率和识别速度的量化, 测试的系统效率优于查询树 (QT)、改进查询树 (QTI) 等算法^[9]的结果.

* 国家杰出青年科学基金 (批准号: 50925727)、国家自然科学基金 (批准号: 60876022)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA04A104)、湖南省科技计划 (批准号: 2008GK2022) 和广东省教育部产学研结合计划 (批准号: 2009B090300196) 资助的课题.

† E-mail: ldmark@126.com

2. 自适应 Q 值算法

2.1. 标签盘存时序

-6C 规定了标签盘存可由多个盘存周期组成. 盘存周期以 Query 开始, 以随之 Query 或 Select 命令止. “盘存”规定了三条查询指令: Query, QueryAdjust 和 QueryRep, 本文用 Query (含 Query, QueryAdjust

(Adj), QueryRep (Rep)) 指代. Query 编码位中含有 4 bits 时隙参数 (Slot Count, SC) Q , 即 $0 \leq Q \leq 15$. 由 Seletc 所激活的标签群, 在 Query 发出后在 $[0, 2^Q - 1]$ 间随机选取一个数值并载入其 SC. Adj 指令用来在盘存周期中调整 Q 值^[5,10].

标签识别过程的时序如图 1 所示^[1,5,10]. 其中 T_{qj} 可分别表示 Query, Adj, Rep 三指令的发送时长 (用 T_{q1} , T_{q2} 和 T_{q3} 表示). 用 T_{id} , T_c , T_s 分别表示空闲、碰撞、成功识别的时间长度.

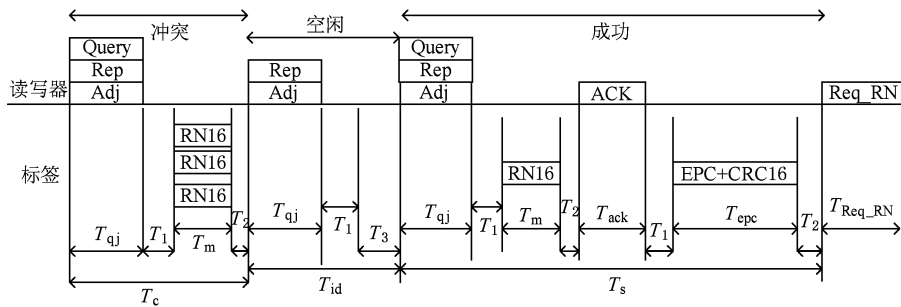


图 1 RFID 通信时序图

其中: $T_{idj} = T_{qj} + T_1 + T_3$; $T_{cj} = T_{qj} + T_1 + T_m + T_2$; $T_{sj} = T_{qj} + 2(T_1 + T_2) + T_m + T_{ack} + T_{epc}$; $j = 1, 2, 3$ 分别对应为 Query, Adj, Rep 三条指令的各自操作时序.

2.2. 自适应 Q 值算法

基于动态帧时隙 ALOHA 算法的 Q 值算法如图 2 所示^[1,10], 动态调整 Q 值可以减少碰撞概率. 图中用浮点数 Q_{fp} 来代表 Q 值, 将其四舍五入为整数 Q 值. C 为一个调整参数, 取 $0.1 < C < 0.5$, Q 值的初值可选 $Q_0 = 4$. 分析得到五类事件发生. E_{i0} : 空闲, $Q \leftarrow Q$; E_{i1} : 空闲, $Q \leftarrow Q - 1$; E_{c0} : 碰撞, $Q \leftarrow Q$; E_{c1} : 碰撞, $Q \leftarrow Q + 1$; E_s : 成功识别, $Q \leftarrow Q$.

定理 在较长时间情形下, Q 值 +1 (或 -1) 和 Q 不变的概率分别为 C 和 $1 - C$.

3. 性能分析

系统识别效率可用来衡量各种防碰撞算法的效果, 定义为读写器发送 Query 指令中成功识别标签次数与发送总次数之比; 识别速度是另一个评价算法效果的参数, 定义为总的成功识别次数与总的时长之比^[4]. 现假设信道是理想的, 标签识别过程由一系列 (K 个) 的盘存周期组成. 则第 i 个盘存中,

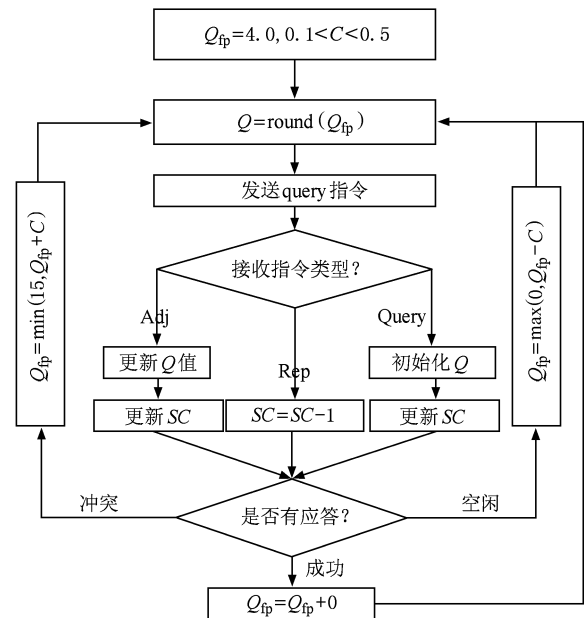


图 2 自适应 Q 值算法

发送了 Y_i 条 Query 指令, X_i 为在第 i 个盘存内被成功识别的标签数 ($X_i \leq Y_i$), T_i 为该盘存周期的时间长度 ($1 \leq i \leq K$), 定义

$$R_{sr} = \frac{\text{成功读取标签次数}}{\text{发送读取指令次数}} = \frac{\sum_{i=1}^K X_i}{\sum_{i=1}^K Y_i}, \quad (1)$$

$$T_{is} = \frac{\text{成功读取标签次数}}{\text{所用总的时长}} = \frac{\sum_{i=1}^K X_i}{\sum_{i=1}^K T_i},$$

R_{sr} 表示一条 Query 可能识别一个标签,也最多识别一个标签的概率; T_{is} 表示在给定时间内及足够多标签的情形下读写器识别标签的速度, R_{sr} 为读写器质量的参考因素, T_{is} 与 R_{sr} 紧密相关. R_{sr} 和 T_{is} 主要依赖防碰撞分解算法的效率,但同时也受标签数目、天线之间的距离、背景噪声、标签的贴附物体等的影响^[4,8].

设当前盘存周期的 Q 值为 q ,待识别标签数为 N ,用 (q, N) 数据对表示. 若干条 Query 指令发送后,剩余的待识别标签数为 $n(0 \leq n \leq N)$, $n = 0$ 表示标签都被识别, $n = N$ 表示没有标签被识别. 持续发送 Query 指令, (q, n) 的变化为标签识别与否的依据. 在每一条 Query 指令后, Q 值在原来的基础上可加 1, 减 1 或保持不变, 而 n 值从 N 开始或保持不变, 或减 1. 在多个标签时 Q 值的变化会出现前述五种情形, 结合前述定理可得(2)式, 其中 $p_i(q, n)$, $p_c(q, n)$, $p_s(q, n)$ 分别表示在 (q, n) 状态下发送一个 Query 指令后出现空闲、碰撞和成功识别的概率^[2,12], 满足 $p_i(q, n) + p_c(q, n) + p_s(q, n) = 1$, 且

$$\begin{aligned}
 P(E_{i0}) &= (1 - C)p_i(q, n), \\
 P(E_{i1}) &= Cp_i(q, n), \\
 P(E_{c0}) &= (1 - C)p_c(q, n), \\
 P(E_{c1}) &= Cp_c(q, n), \\
 P(E_s) &= p_s(q, n), \\
 P(E_c) &= P(E_{c0} \cup E_{c1}) = p_c(q, n), \\
 P(E_i) &= P(E_{i0} \cup E_{i1}) = p_i(q, n).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

3.1. 模型分析

在 RFID 的典型应用环境下, 每个盘存周期中可能出现的标签数目不确定, 需要读写器首先估计激活标签的数目, 然后读写器自动调整 Q 值, 再次给激活的标签随机赋值, 每帧中出现碰撞、空闲和成功识别三种情形. 下一帧识别出的标签数目(0 或 1 个)由当前帧时的 q 值和标签数量 n 决定, 而与先前帧所识别出的标签数量无关, 可用马尔科夫链来分析此过程^[12,13].

Adj 和 Rep 指令必须在 Query 开始的盘存周期内, Adj 用来直接调整 Q 值, Rep 反复调整 SC 值, 结合 2.1 节中的三种模式, 做如下假设:

- 1) 空闲时, 若 Q 值改变, 则是读写器发送了一条 Adj 指令(标签重新选 SC), 若 Q 值保持不变($Q = \text{round}(Q_{fp})$), 则是发送了 Rep 指令, $SC = SC - 1$;
- 2) 碰撞时, 发送 Adj 指令, 以便让标签重新选择 SC 值, 因为这更能有效地提高读写器解决碰撞的效率. 若碰撞后仍发 Rep, 则 $SC = SC - 1$, 同样有较大概率出现碰撞而降低效率;
- 3) 成功识别, 设读写器重新发送 Adj 指令, Q 不变, 调整 SC 值.

Query 指令的发送过程是一马尔科夫链过程. 设剩余标签数为 $n(0 \leq n \leq N)$, q 值满足 $0 \leq q \leq 15$. 设初始状态为 (Q_0, N) , 经过有限步后到达 $(q, 0)$, 可得到如图 3 所示的转移图. 状态转移到次态有四种可能 $\{(q, n), (q - 1, n), (q + 1, n), (q, n - 1)\}$,

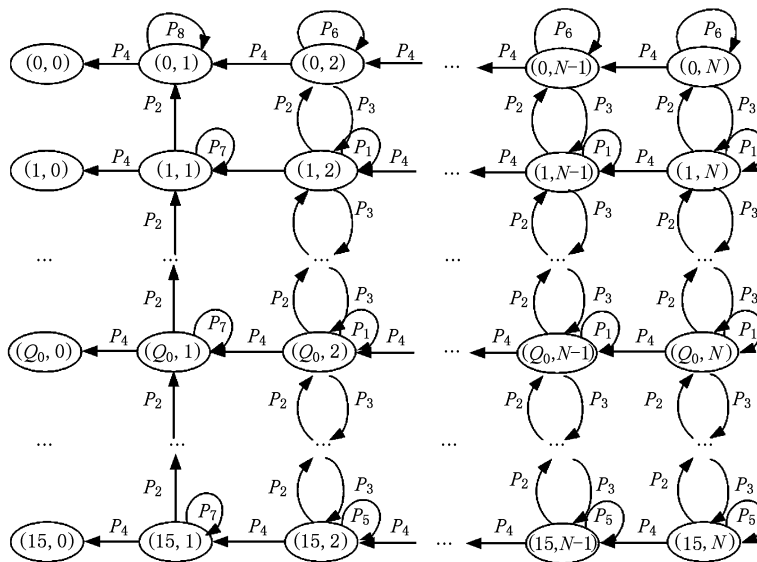


图3 马尔科夫链状态转移图

在特殊情形下($q = 15, q = 0$ 或 $n = 1$)次态只有三种甚至两种($q = 0$ 且 $n = 1$). 从现态(q, n)到次态(q', n')只与当前的状态有关而与过去的状态无关, (q', n')表下一帧后标签数量的变化由当前状态所处帧过后识别出标签的数量决定, 且当前状态转移到下一状态的转移概率是可确定的, 与前面的帧中所识别出的标签数量无关, 此过程是马尔科夫链过程^[12]. 图中各转移概率分析如下.

1) $1 < n \leq N$ 且 $q = 15$ 时, 下一条 query 指令后, q 不能再增大^[10], 因此各事件发生概率如下. 识别(E_s): $(q, n - 1) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 $P_4 = P(E_s) = p_s(q, n)$; 空闲(E_{i1}): $(q - 1, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 $P_2 = P(E_{i1}) = C \times p_i(q, n)$; 空闲或冲突($E_{i0} \cup E_{c0} \cup E_{c1}$): $(q, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 $P_5 = P(E_{i0}) + P(E_{c0}) + P(E_{c1}) = (1 - C) \times p_i(q, n) + p_c(q, n)$.

2) $1 < n \leq N$ 且 $0 < q < 15$ 时, 在下一条 Query 指令后, 空闲或冲突($E_{i0} \cup E_{c0}$): $(q, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 $P_1 = (1 - C) \times (p_i(q, n) + p_c(q, n))$. 空闲(E_{i1}): $(q - 1, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 P_2 ; 冲突(E_{c1}): $(q + 1, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 $P_3 = P(E_{c1}) = C \times p_c(q, n)$; 识别(E_s): $(q, n - 1) \leftarrow (q, n)$, 转移

概率为 P_4 .

3) $1 < n \leq N$ 且 $q = 0$, 在下一条指令后, q 不能再减小. 识别(E_s): $(q, n - 1) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 P_4 ; 冲突(E_{c1}): $(q + 1, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 P_3 ; 空闲或冲突($E_{i0} \cup E_{i1} \cup E_{c0}$): $(q, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 $P_6 = P(E_i) + P(E_{c0}) = p_i(q, n) + (1 - C) \times p_c(q, n)$.

4) $n = 1$ 且 $0 < q \leq 15$, 只有一个标签, 不存在冲突, q 不能再增加, 则概率情形为识别(E_s): $(q, n - 1) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 P_4 ; 空闲(E_{i1}): $(q - 1, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 P_2 ; 空闲(E_{i0}): $(q, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 $P_7 = P(E_{i0}) = (1 - C) \times p_i(q, n)$.

5) $n = 1$ 且 $q = 0$, 不会发生碰撞, q 值保持不变. 识别(E_s): $(q, n - 1) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 P_4 ; 空闲($E_{i0} \cup E_{i1}$): $(q - 1, n) \leftarrow (q, n)$, 转移概率为 $P_8 = P(E_i) = p_i(q, n)$.

6) $n = 0$, 则所有标签都识别完成, 此存盘周期结束.

根据前述分析, 其一步转移概率 $P(q, n)$ 在不同的状态间虽有所不同, 但若只对 n 来说, 转移是单向的(n 只能不变或者减小), 一步转移概率为

$$P(q, n) = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_3 & P_4 \\ P_5 & P_6 \\ P_7 & P_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - C)(p_i(q, n) + p_c(q, n)) & Cp_i(q, n) \\ Cp_c(q, n) & p_s(q, n) \\ (1 - C)p_i(q, n) + p_c(q, n) & p_i(q, n) + (1 - C)p_c(q, n) \\ (1 - C)p_i(q, n) & p_i(q, n) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

3.2. 模型求解

标签接收到第一条($k = 1$)指令为 Query, 开始盘存周期, 其一帧中共有 $L = 2^q$ 个时隙, $n = N$, 标签随机选择一个时隙参数是符合二项分布的随机过程^[2]. 选择 $SC = 0$ 的标签数为 1, 0 以及 1 个以上的概率分别为 p_s, p_i, p_c , 则

$$p_s^1(q, n) = n \frac{1}{2^q} \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)^{n-1} = p_s(q, n),$$

$$p_i^1(q, n) = \left(\frac{2^q - 1}{2^q}\right)^n = p_i(q, n),$$

$$p_c^1(q, n) = 1 - p_s^1(q, n) - p_i^1(q, n) = p_c(q, n). \quad (4)$$

可以推出 N 较大的情形下, 读写器发第 k ($k \geq 1$) 条 Query 指令后其各自的概率近似为^[2,8]

$$p_s^k(q, n) = p_s^1(q, n) = n \frac{1}{2^q} \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)^{n-1},$$

$$p_i^k(q, n) = p_i^1(q, n) = \left(\frac{2^q - 1}{2^q}\right)^n,$$

$$p_c^k(q, n) = p_c^1(q, n) = 1 - p_i^1(q, n) - p_s^1(q, n). \quad (5)$$

尽管(5)式为近似值, 且在 N 较大情形下获得, 但是在此近似基础上的效率和速度测试与仿真结果一致. (5)式的数学期望为

$$\begin{cases} E(p_s) = N \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)^{N-1}, \\ E(p_i) = \frac{1}{2^q} \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)^N, \\ E(p_c) = 1 - N \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)^{N-1} - \frac{1}{2^q} \left(1 - \frac{1}{2^q}\right)^N, \end{cases} \quad (6)$$

标签数目和时隙数相等获得最大效率^[12]. 识别时标签数目递减, 采用 Q 值算法, 自动更新 q 值, 以期获取最大吞吐量.

3.3. 计算 R_{sr} 和 T_{is}

由(3)式知道图3的转移概率仅依赖 $p_c(q, n)$, $p_s(q, n)$, $p_i(q, n)$, 结合(5)式分别算出 $P_1—P_8$. 设初态(4, N)到末态($q, 0$)共经过 NN 步, NN 直接决定了RFID系统的效率. 在2.2节中定义了5种识别情形, 采用蒙特卡罗方法对一个盘存周期中的总步长数进行求解^[8, 14].

步骤1 设 $M_{i0}, M_{i1}, M_{c0}, M_{c1}, M_s$ 五个变量为空闲(q 不变或 -1)、碰撞(q 不变或 $+1$)以及识别成功五类事件发生的次数且均初始化为0, $Q_0 = 4$, 初始状态(q, n) = (Q_0, N), C 为常数.

步骤2 计算 $p_i(q, n)$, $p_s(q, n)$, $p_c(q, n)$. 由随机数生成器随机在 $[0, 1)$ 范围内均匀分布地产生一个随机数 R_a , 那么次态就由此随机数 R_a 和前面定义的五类标签识别事件的发生概率来决定.

步骤3 令 $q' = \max(0, \min(15, q))$; 如果 $n' = 0$, 结束; 否则, 以(q', n')为初态, 返回步骤2, 见图4.

当读写器没有接收到应答且 q 不变时, 读写器发送 Rep 指令; 仅在盘存周期开始时发送 Query, 而

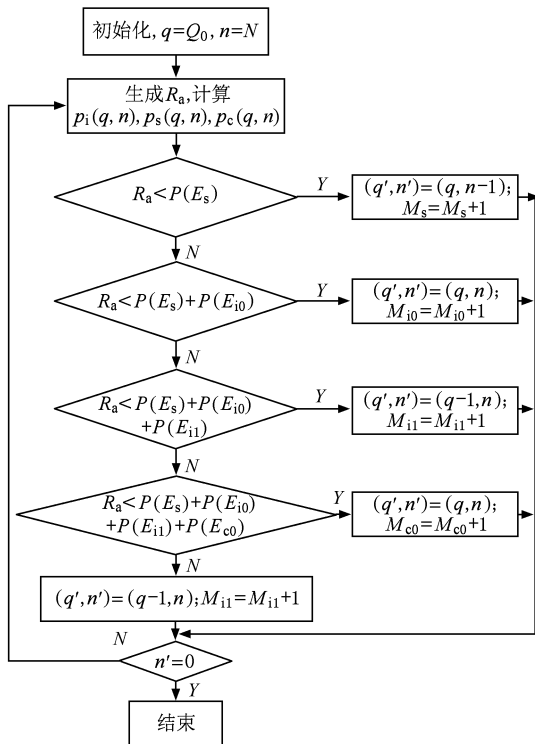


图4 识别事件概率模拟流程图

其他状态发送 Adj 指令. 那么一个盘存周期中, Query 出现的次数 $N_{q1} = 1$; Adj 出现的次数为 $N_{q2} = M_{i1} + M_{c0} + M_{c1} + M_s - 1$, 而 Rep 出现的次数 $N_{q3} = M_{i0}$, 因此一个盘存周期中总的 Query 指令数为 $NN = N_{q1} + N_{q2} + N_{q3}$, $R_{sr} = N/NN$, $T_{is} = N/T_{total}$. 其中

$$T_{total} = M_s T_s + (M_{c1} + M_{c0}) T_c + (M_{i1} + M_{i0}) T_{id}, \quad (7)$$

其中 T_s, T_c, T_{id} 分别为识别、碰撞、空闲时的平均通信时长, 有

$$\begin{aligned} T_s &= (N_{q1} T_{s1} + N_{q2} T_{s2} + N_{q3} T_{s3})/NN, \\ T_c &= (N_{q1} T_{c1} + N_{q2} T_{c2} + N_{q3} T_{c3})/NN, \quad (8) \\ T_{id} &= (N_{q1} T_{id1} + N_{q2} T_{id2} + N_{q3} T_{id3})/NN. \end{aligned}$$

应用马尔科夫链模型做统计分析时, 假设阅读器若能获取 RN16 就能对标签进行解码, 与读写器需要正确获取 ID 的情形有区别, 因此实际操作中有个别误判现象, 即获取 RN16 但无法正确获取 ID, 可通过提高信噪比来降低统计误差, 因此对统计结果影响不大. 当 N 较大时, Query 指令发出后, 每帧信道内均有较大概率出现碰撞, 而当标签数目很小时, 碰撞概率降低, 不影响前面分析的结果. 模型中因只简单统计 Query 指令及其响应时长, 而非读写器、标签之间完整的通信时长(不含 Req_RN 及其他读写操作), 因此本文定义的识别速度与实际意义上的识别速度方面有差异, 且实际产品的读取效率和速度比模型结果要低. 采用马尔科夫链模型进行标签统计识别, 其计算过程效率高, 其通信用的总的时隙数与标签数目基本呈线性关系^[14].

4. 实验测试

用软硬件模拟读写器, 且收发天线分置, 通过上行天线把载波和基带信号(含参数 Q)发送出去, 标签激活后应答, 由下行信道把应答(RN16, EPC 等)送回读写器. 实验测试系统主要由 NI 公司的 PXI-PCIe8361 控制器, PXI-5600 射频下变频模块(RF DC), PXI-5610 射频上变频模块(RFUC)以及 PCI-5640R 板载 FPGA 模块(IF RIO)等组成^[11].

设在 $K = 100$ 个盘存周期内, 每个周期在 N 个标签全部识别后再进入下个新的周期, 统计出每个盘存周期中发送的指令数 Y_i (等于 NN)和所用时间. 根据(1)式, 在所有 K 个周期内的识别率 R_{sr} 和识别速度 T_{is} 分别为

$$R_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^K X_i}{\sum_{i=1}^K Y_i} = 100N / \sum_{i=1}^{100} Y_i,$$

$$T_{is} = \sum_{i=1}^K X_i / \sum_{i=1}^K T_{total,i} = 100N / \sum_{i=1}^{100} T_{total,i} \quad (9)$$

$T_{total,i}$ 由(7)式计算, i 表示第*i*个盘存周期. 根据PIE编码原理,设置相关参数见表1.

表1 18000-6C的部分编码参数^[10]

参数名称	参考值	参数名称	参考值	参数名称	参考值
Tari	6.25 μs	T_2	$6T_{pri}$	X	0.5
RTcal	2.5Tari	Query	22 bits	Delimiter	12.5 μs
Preamble	10.5Tari	Rep	4 bits	TRcal	2RTcal
DR	8	ACK	18 bits	Frame-sync	5.5Tari
T_{pri}	1/BLF	EPC	96 bits	BLF	256 kHz
RN16	16 bits	T_3	$10T_{pri}$	FMO Preamble	$6T_{pri}$
Adj	9 bits	T_1	Max(RTcal, $10T_{pri}$)	FMO end-of-signal	$2T_{pri}$

仿真过程中,假设信道为理想信道,设标签应答都能被读写器成功区分. 我们设定每个盘存周期的*N*数是变化的,*N*以10为步长从10增加到1000,恰好有100个盘存周期,选择 $Q_0 = 4$,参数*C*可在0.1到0.5之间变化. 根据(7)–(9)式,按图1所标时序,结合防碰撞的马尔科夫过程,对多标签情形 R_{sr} 和 T_{is} 进行计算和仿真,得到 R_{sr} 和 T_{is} 如图5所示.

在图5(a)中,对*C* = 0.4和0.2时以及QT和QTI的识别效率进行了对比. 由图5(a)可知,采用马尔科夫链模型得出的 R_{sr} 最终趋近30%,*C*值的设定对于其影响不大且识别率出现交错,而QT和QTI算法的识别效率分别为25.5%和29%^[9],低于本文模型的结果. 采用本文的模型得到的 R_{sr} 随标签数目的增加有所降低,但当标签超过200个时, R_{sr} 基本保持平稳. R_{sr} 接近30%,说明在多标签情形下,指令的“有用”率约为30%. 图5(b)是对 T_{is} 的仿真,当Tari值增大时,识别速度降低,且基本成反比关系,说明TRrate对识别速度有很大影响,且在标签数目超过100个后, T_{is} 值稳定. T_{is} 最大约为700,与-6C协议设想的读取速度是符合的^[5]. T_{is} 并不表示读写器每秒能够对700个标签进行完全读写,只完成发送ACK指令后接收EPC,整个识别过程也许有后续其他指令,识别速度就会降低. 结果表明采用较小的Tari值,数据传送速度提高,有助于加快RFID系统的标签识别速度. 采用马尔科夫链模型模拟碰撞过程,发现其碰撞、空闲的时隙数随标签数目的增加基本呈线性增加,且总

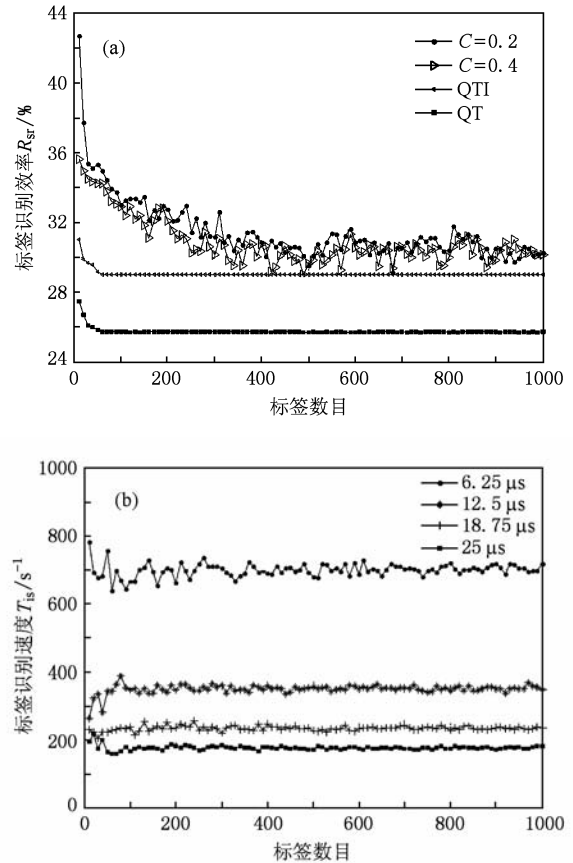


图5 实验仿真 (a) 识别效率(Tari 值为 6.25 μs), (b) 识别速度(*C* = 0.2, Tari 取不同值)

的时隙约为标签数目的三倍(见图6), 所得结果略高于文献[14]所得的结果, 整个过程的计算效率高, 易于实现.

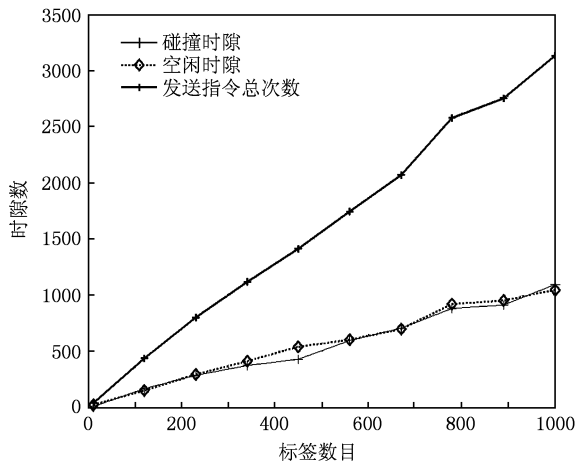


图6 时隙数与标签数对比

按照图1所标的时间序列,在读写器天线的足够功率的定向辐射场范围内(1 m半径的60°扇形区域),共放置20个Alien公司的ALN-9640标签,软件模拟读写器发送Query指令,可得到如图7所示的波形.图7表示通信链路时序波形图,在EPC数据返回之后,标签还要接收Req_RN指令,返回Handle数据,以便进行其他的数据读写.在保持其他参数不变的情形下,在调整Tari值,统计各段时间长度后平均,再代入(7)–(9)式得出 R_{sr} 和 T_{is} ,结果如表2.

从表2中可以看出,通过调整Tari值,可以得到相应的识别速度和识别效率.根据前述模型, T_q 由 T_{q1}, T_{q2}, T_{q3} 求平均得到, T_{id}, T_s, T_c 由(1)式计算,测试结果表明在Tari值为6.25, 12.5, 25 μs 时的标签

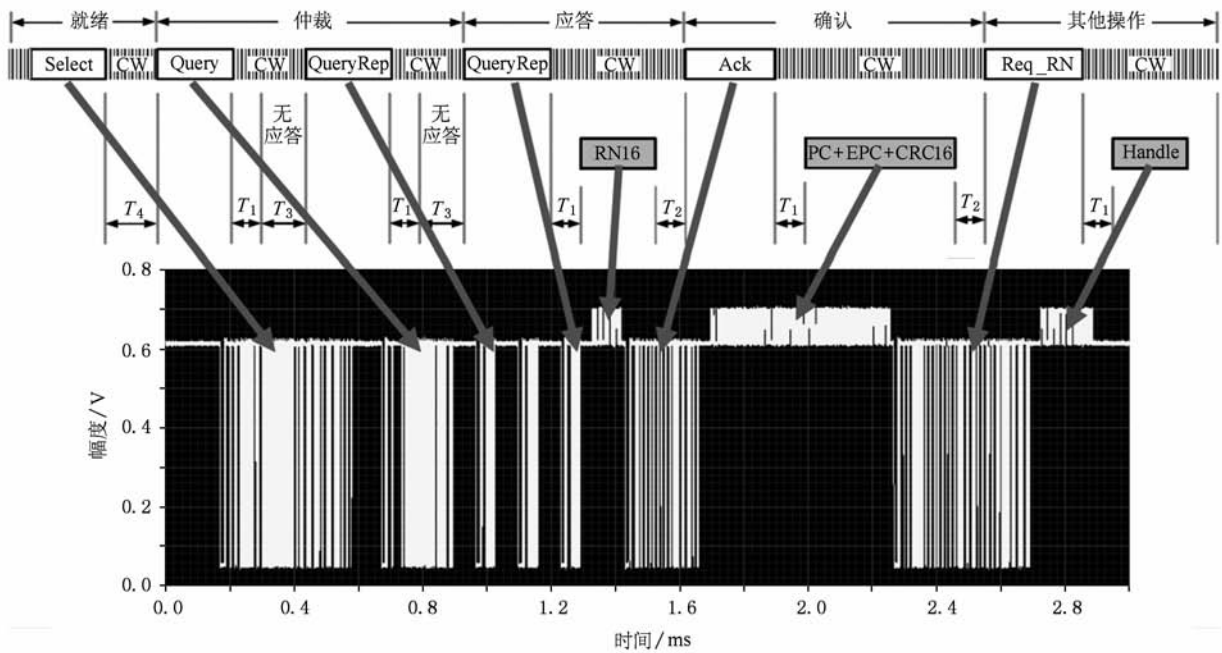


图7 射频识别系统通信链路时序波形

识别速率分别为每秒665,341和173个,而理论计算的结果分别为每秒726,364和182个,与图5的仿真结果一致,表明本文所建立的马尔科夫链模型对防碰撞进行模拟结果和测试结果相符合,表明基于马尔科夫模型的测试理论正确有效.

本文在理论上提供了一种模拟测试RFID识别效率的方法,能有效真实地模拟标签识别过程,且所设计的测试过程简单,仿真算法效率高.但在实际应用中产品的识别速度会低于测试结果,因为实

验结果均按照图1的时序进行分析,只计算读写器“标识”标签的时间,如果考虑Req_RN指令以及后面的Handle应答,结合具体的读写操作,所用的时间会增加.测试设备在完成了对RN16的解码后才能确定其识别成功,所以测试设备对信号解码的灵敏度对测试的识别效率有影响,且在测试过程中,测试环境对识别效果有较大影响,读写器与标签的相对位置和标签间的彼此覆盖都会影响指令俘获效果而影响识别效率.

表2 通信时间理论值和测试结果的对比

参数	Tari = 6.25 μs		Tari = 12.5 μs		Tari = 25 μs	
	理论值	测试值	理论值	测试值	理论值	测试值
T_{Select}	>312.5	368.56	>625	729.44	>1250	1439.61
T_{q1}	215.625	215.12	431.25	415.60	862.5	806.08
T_{q2}	96—109	101.24	192—218	183.95	384—436	352.27
T_{q3}	59—65	62.08	118—130	107.76	236—260	209.62
T_{Ack}	150—200	175.36	300—400	293.20	600—800	565.84
$T_{\text{Req_RN}}$	293—393	356.36	596—786	692.00	1192—1572	1303.25
T_1	40	38.14	80	77.60	160	155.50
T_2	24	23.75	48	47.06	96	94.42
T_3	40	40.39	80	76.08	160	146.20
T_4	93.75	93.24	187.5	187.4	375	375.3
T_{rn}	96	80.08	192	175.52	384	348.06
T_{epc}	512	528.56	1024	1045.10	2048	2119.03
T_{Handle}	128	148.49	256	300.64	512	603.92
T_{id} (计算)	165.22	204.71	329.11	389.45	659.08	757.69
T_{s} (计算)	967.95	1034.0	1935.4	1998.9	3871.65	3988.8
T_{c} (计算)	242.92	268.15	485.36	536.08	971.58	1054.2
$1/(T_{\text{id}} + T_{\text{s}} + T_{\text{c}})$	726 s^{-1}	664 s^{-1}	364 s^{-1}	342 s^{-1}	182 s^{-1}	172 s^{-1}

5. 结 论

通过对多标签情形下的碰撞分解效率和标签识别速度的讨论,建立了马尔科夫链模型来模拟通信链路中的碰撞分解过程,通过仿真和实验测试,发现标签的识别效率虽然随标签的增加有所降低,但是在较多标签时,变化不敏感;随 Tari 值的增加,识别速度降低. 本文所建立的马尔科夫链模型对防

碰撞进行的模拟结果和测试结果基本一致,表明可以通过该模型对多标签的读取速度以及时隙利用效率和防碰撞算法进行有效分析,对 RFID 产品性能的具体测试很有意义. 由于识别过程中时长统计的非完整性,则产品的实际识别效率和速度比理论结果和测试结果要低. 模型求解过程是在有足够多的标签情形下完成的,实际环境下的标签分布可能不满足此条件,且环境因素也影响识别效果,因此模型还有待改进.

- | | |
|---|--|
| <p>[1] Dobkin D M 2007 <i>The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice</i> (New York: Elsevier) p422</p> <p>[2] Xu H, Son L 2007 <i>Proc. of the 9th ICACT</i> Beijing, China, Feb. 12—14, 2007 p94</p> <p>[3] Shih D H, Sun P L, Yen D C, Huang S M 2006 <i>Computer Communications</i> 29 2150</p> <p>[4] Liu L, Yan D, Lai X, Lai S L 2008 <i>The 4th ICCSC</i> Shanghai, China, May 26—28, 2008 p559</p> <p>[5] Maguire Y, Pappu R 2009 <i>IEEE Trans. on Automation Science and Engineering</i> 6 16</p> <p>[6] Piramuthu S 2008 <i>Journal of Information & Knowledge Management</i> 7 9</p> | <p>[7] Tao C, Li J 2007 <i>Proc. of the 9th ICACT</i> Beijing, China, Feb. 12—14, 2007 p697</p> <p>[8] Sohrawy K, Mahmoud D, Wang C G, Li B 2009 <i>IEEE Trans. on Wireless Communications</i> 8 2592</p> <p>[9] Bonuccelli M A, Lonetti F, Martelli F 2006 <i>Proc. of the Int. Symp. on WoWMoM'06</i> New York, USA, July 10—12, 2006 p608</p> <p>[10] <i>ISO/IEC WD 18000-6REV1: Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960MHz</i> ver1 2007</p> <p>[11] Hou Z G, He Y G, Li B, She K, Zhu Y Q 2010 <i>Acta Phys. Sin.</i> 59 5606 (in Chinese) [侯周国、何怡刚、李兵、余开、朱彦卿 2010 物理学报 59 5606]</p> |
|---|--|

- [12] Tong Q, Zou X, Liu D, Dai Y 2007 *Proc. of the 3rd WiCOM2007* Shanghai, China, Sep. 21—25, 2007 p2054 1619
- [13] Zhao Z J, Zheng S L, Xu C Y, Kong X Z 2007 *Chin. Phys.* **16**
- [14] Eom J B, Lee T L 2007 *The International Symp. on Comm. and Inform. Tech.* Sydney, Australia, Oct. 17—19, 2007 p1027

Radio frequency identification anti-collision test based on Markov chain model*

Hou Zhou-Guo^{1)2)†} He Yi-Gang¹⁾ Li Bing¹⁾

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

2) (Department of Communication and Control Engineering, Hunan Institute of Humanities Science and Technology, Loudi 417000, China)

(Received 12 October 2009; revised manuscript received 5 May 2010)

Abstract

The anti-collision theory of adaptive Q algorithm and radio frequency identification (RFID) communication timing sequence were analyzed. Then a Markov chain model for simulating multi-tag identification process was established based on the following three definitions. The definitions are identifying efficiency, identifying speed and data state (Q, n), where n is the total remanent tag number, and Q is the slot count. The identifying efficiency and speed were obtained from the model using Monte Carlo statistical method. A software-defined radio program was built to simulate the collision of RFID which could quantify the identifying efficiency and speed effectively. The consistency of model simulation result and test data proves the validity of the model and test method.

Keywords: radio frequency identification, anti-collision test, Markov chain, slot-count

PACS: 52.70.Gw, 06.90.+v

* Project supported by the National Natural Fund for Distinguished Young Scholar of China (Grant No. 50925727), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60876022), the National High-Tech Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA04A104), Hunan Provincial Science and Technology Program, China (Grant No. 2008GK2022), and the Joint Program of Guangdong Province and Ministry of Education of China on Industry, University and Research Institute Integration (Grant No. 2009B090300196).

† E-mail: ldmark@126.com