

基于可离散处理的 RFID 防碰撞混杂算法研究

李平^{1,2}, 孙利民², 吴佳英¹, 方庆¹, 谢晋阳¹, 周博翔¹

(1. 长沙理工大学 计算机与通信工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中国科学院 信息工程研究所 信息安全国家重点实验室, 北京 100093)

摘要: 针对一类二叉树搜索算法存在寻呼次数过高的应用局限, 采用二叉树查询和离散处理相结合的方法, 提出了 RFID 防碰撞混杂算法。理论分析表明, 与以往算法不同, 该算法实质上是对满足可离散处理特征的模式而非个体的标签进行二叉树搜索。算法充分考虑了阅读器寻呼次数、寻呼开销、吞吐率等重要的性能指标。仿真结果验证了该算法在寻呼次数、吞吐率等性能指标上有明显的提升。

关键词: RFID; 标签识别; 离散处理; 碰撞位序列

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)08-0010-08

Research on RFID anti-collision hybrid algorithm based on discrete processing

LI Ping^{1,2}, SUN Li-min², WU Jia-ying¹, FANG Qing¹, XIE Jin-yang¹, ZHOU Bo-xiang¹

(1. School of Computer and Telecommunications, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. State Key Laboratory of Information Security, Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: A kind of binary tree search algorithms have distinct application limitations such as high number of requests in case that a fairly large number of tags are available. A hybrid anti-collision algorithm was proposed, combining binary tree search with discrete processing. Theoretic analysis show that, different from available schemes, the algorithm essentially performs binary tree search not on a single tag, but on models which identify the property of discrete procession. The proposed algorithm fully takes the time of request into account, as well as power consumption and throughput of the system. Simulation result verifies that the algorithm achieves much better performances such as the time of request and throughput than the previous algorithms.

Key words: RFID; tag recognition; discrete processing; collision sequence

1 引言

RFID(radio frequency identification)技术正日益被广泛应用^[1], 已有的防碰撞算法主要分为 2 类: 一类是基于 ALOHA 的不确定性算法^[2-4], 另一类是基于二叉树(BT, binary tree)的确定性算法^[5-7]。这 2 类算法均未有效地解决寻呼次数过高、吞吐率较低的关键问题。

多个标签由于同时响应, 所产生的信号在空间中相互干扰, 形成了一定长度的碰撞位序列。对碰

撞位序列按位不断进行二叉树查询, 最终识别到唯一的标签, 是这一类算法的主要特点。在一定情况下, 能否从给定的碰撞位序列中一次识别出多个标签, 是本文提出可离散处理的防碰撞算法的动机。 n 维超立方体空间中节点之间的关系^[8]为算法的设计提供了新的思路。在 n 维空间中, 与参考 0 节点汉明距为 1 或 $n-1$ 的节点, 标识这些节点的码元进行位碰撞, 所产生的碰撞位序列具备可一次识别的特点。基于此, 本文提出了结合二叉树搜索与离散处理的混杂防碰撞算法。

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2013-01-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61073180); 国家重大科技专项基金资助项目(2010ZX03006-004); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2011CB302902)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61073180); The National Science and Technology Major Project(2010ZX03006-004); The National Basic Research Program of China(973 Program)(2011CB302902)

2 已有的研究工作

目前，对于解决标签碰撞的方法主要集中于 2 类方法，第 1 类方法是基于 ALOHA 算法查询^[9,10]，在这一类随机算法中，如果 2 个标签选择了同一个时隙的话还是会发生碰撞，且随着标签数量的增加，时隙将不断增加，检测效率也会下降，且这类方法还存在“标签饥饿”的情况。第 2 类方法是基于二叉树查询算法，这类方法在标签数量很小的情况下，阅读效率较理想，但在标签数量大的情况下，检测效率会急剧下降^[11-13]。

基于二叉树查询机制，王雪等人^[14]提出了锁位后退防碰撞算法，该算法减少了数据冗余位和碰撞发生次数。阅读器在发送寻呼指令后，工作区域内所有标签做出应答，如果阅读器译码得到有 h bit 发生碰撞，锁位后退防碰撞算法将防碰撞处理限制在碰撞位的比特上，不传输其他比特，减少了数据冗余位。与二叉搜索算法不同的是，锁位后退防碰撞算法不返回到根节点而是返回到上一次发生碰撞的节点，这就减少了碰撞发生的次数。然而，当场景中的标签数目较大时，该算法仍存在着寻呼次数过高的问题。

3 算法基本思想

针对上述方法寻呼次数过高，吞吐率较低的局限性，本文提出了一种基于离散处理的防碰撞算法来满足高检测效率的要求。

3.1 离散碰撞

对于符合一定特征的标签如 t_1, t_2, \dots, t_n ，所构成的集合设为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。对于其中任意的一个子集 $T_{\text{sub}} \subseteq T$ ，由该子集的元素产生碰撞位序列 h 。若存在这样的 $f_c^{-1}(h)$ ，能够由 $f_c^{-1}(h)$ 唯一确定地恢复出 T_{sub} 中的所有元素，则这样的碰撞位具有离散可识别的性质。考察由 n bit 组成的 $N = 2^n$ 的空间中，与全 0 标签的汉明距离为 1 的标签组成的集合 $Neighbor(a) = \{v_i | H(v_i, a) = 1, i = 1, \dots, n\}$ 。对于任意的一个子集 $V \subseteq Neighbor(a)$ ，由标识 V 中节点的码元碰撞所产生的碰撞位序列，显然可唯一地识别出子集 V 中包含的所有标签 ID。同样，与全 0 标签汉明距离为 $n-1$ 的标签也具备类似的性质。

3.2 术语与定义

定义 1 碰撞位序列空间。设有 N 个标签，碰

撞产生长度为 w 的碰撞位序列 $\underbrace{XX \dots XX}_w$ 。由该序列组成的 w 维空间称为碰撞位序列空间，记为 $\Omega(N, w)$ 。空间中的任意一个节点如 a ，由 w 长度的二进制串组成。

定义 2 碰撞位序列的位标识。设给定碰撞位序列 $h = \underbrace{XX \dots XX}_w$ ，该序列中的某一比特如第 i bit 与长度为 n 的标签序列中的某一比特如第 k bit 对应，则定义碰撞位序列中第 i bit 的位标识为 k ，位标识函数记为 $Location(h) = \{j_1, \dots, j_i, \dots, j_w\}$ ， j_i (其中， $i = 1, \dots, w$) 为 h 序列中第 i bit 所对应于标签序列中的位置序号。

定义 3 异位分类。给定一个碰撞位序列空间 $\Omega(N, w)$ ，设空间中的参考节点 I_0 为 $\underbrace{00 \dots 00}_w$ ，若在这个空间中存在节点 I_j 与 I_0 满足汉明距 $H(I_j, I_0) = j$ ，那么就称该节点为异 j bit 节点，这类节点的集合称为异 j bit 节点的集合，表示为 $S^{(j)}$ 。

定义 4 基于异位分类的系列碰撞位序列。设初始碰撞位序列为 h_0 。由定义 3 可知，集合 $S^{(j)}$ 中元素碰撞所产生的相应碰撞位序列为 $h^{(j)}$ 。对 $h^{(j)}$ 的系列二叉树查询所产生的系列碰撞位序列为 $h_0^{(j)}, h_{00}^{(j)}, \dots, h_s^{(j)}$ ，其中， s 为标识某一层二叉树查询的二进制串。

相关术语与约定如表 1 所示。

表 1	相关术语与约定
符号	符号解释
N	标签数目
n	标签长度
h_0	初始碰撞位序列
$h^{(j)}$	异 j bit 标签构成的碰撞位序列
$ h $	h 序列的码元长度
$h_{(s)}^{(j)}$	对异 j bit 标签逐层进行二叉树查询，产生的碰撞位序列
$c_0, c^{(j)}, c_s^{(j)}$	与碰撞位序列对应产生的一致位序列
$c(0), c(1)$	一致位序列中 0 或 1 的个数
N_j	N 个标签中与参考全 0 标签异 j bit 的标签个数

4 算法描述

4.1 指令说明

本算法需要用到的关键指令如下。

1) $Request(00 \dots 00)$: 总查询指令，阅读器范围

内的标签在接收到该指令时全部响应，发送其 ID 码元序列。

2) $Select(Location(h_0 \| c_0), c_0, j)$: 异位查询指令，给定一致位序列 c_0 ，碰撞位序列 h_0 中有 j 个“1”的取值标签响应。

3) $Select(Location(h_s^{(j)} \| c_s^{(j)}), 0(1), c_s^{(j)})$: 二叉树查询指令，给定一致位序列 $c_0, c^{(j)}, \dots, c_s^{(j)}$ 系列，碰撞位序列 $h_s^{(j)}$ 的最高位为 0(或 1)的标签响应。

4.2 处理流程

图 1 为可离散处理的 RFID 防碰撞混杂算法的处理流程，主要的步骤如下。

1) 阅读器发送 $Request(00\dots00)$ 指令，所有阅读范围内的标签在收到该命令后做出响应并发送 ID 码元序列。

2) 阅读器分以下情况处理：①如果没有接收到信号，表示阅读器周围没有标签，则再执行步骤 1)；②如果接收到无错信号，阅读器对该信号进行译码得到一个标签；③如果发生碰撞，则执行步骤 3)。

3) 阅读器首先根据译码结果，产生一致位序列 c_0 及碰撞位序列 h_0 ，然后从 $j=1$ 开始，到 $j=|h^{(j)}|$ 结束，执行异位查询指令 $Select(Location(h_0 \| c_0), c_0, j)$ 。

4) 在异 j bit 分类 ($1 < j < |h^{(j)}| - 1$) 查询指令发出后，符合条件的标签做出响应。阅读器分以下情况处理：①如果没有接收到信号，表示没有符合条件的标签，阅读器停止异 j bit 查询；②如果接收

到无错信号，阅读器对该信号进行译码得到一个标签；③如果发生碰撞，则执行步骤 5)。

5) 阅读器产生一致位序列 $c^{(j)}$ 及碰撞位序列 $h^{(j)}$ 。判断如下 2 个条件。

$$j - c^{(j)}(1) = 1 \tag{1}$$

$$|h^{(j)}| - c(0) - j = 1 \tag{2}$$

判断式(1)或式(2)是否成立。若成立，结合一致位序列 $c_0, c^{(j)}$ 的信息，阅读器一次解析出相应的标签，否则进入到步骤 6)。

6) 阅读器参照文献[14]提出的锁位后退防碰撞算法，执行 $Select(Location(h^{(j)} \| c^{(j)}), 0(1), c^{(j)})$ 指令进行二叉树 0 分支和 1 分支的查询。每产生新的一致位序列 $c_s^{(j)}$ 及碰撞位序列 $h_s^{(j)}$ ，皆判断如下 2 个条件。

$$j - \sum_s c_s^{(j)}(1) - c^{(j)}(1) = 1 \tag{3}$$

$$|h^{(j)}| - \sum_s c_s^{(j)}(0) - c^{(j)}(0) - j = 1 \tag{4}$$

判断式(3)或式(4)是否成立。若成立，该碰撞位序列可由离散处理识别相应的标签，否则进入到下一层的二叉分支查询。直到异 j bit 的所有标签被识别或离散处理为止。

7) 当 $j=1$ 或 $j=|h^{(j)}| - 1$ 时，由离散碰撞性质，可由异位查询指令进行一次离散识别相应的标签。当 $j=|h^{(j)}|$ 时，可判断碰撞位空间中取值全为 1 的节点是否存在。

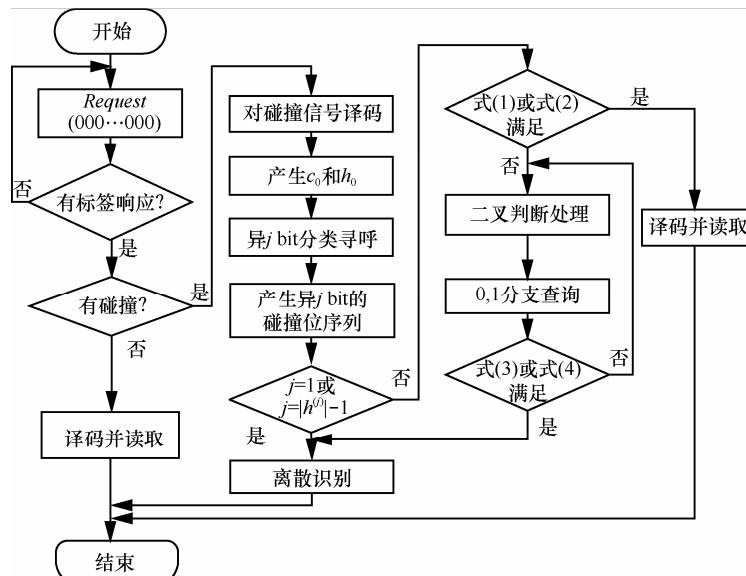


图 1 可离散处理的 RFID 防碰撞算法的工作流程

5 性能分析

算法在异 j bit 分类寻呼后, 将对 $S^{(j)}$ 集合中的 N_j 个元素进行二叉树与离散的混杂处理。本节通过考察碰撞位序列 $\Omega(N_j, n)$ 空间内节点之间的关系, 分析本算法的关键性能。

5.1 分类后 N_j 个标签的寻呼开销分析

定理 1 当标签个数为 $N = 2^n$, 标签序列长度为 n , 对该 N 个标签采用离散碰撞处理, 阅读器的总寻呼次数 $Q(n) = \frac{1}{2}N + n$ 。

证明 易知 $N = 2^n$ 个标签的碰撞位序列长度为 n , 分以下 2 种情况进行讨论。

1) 对于异 1 bit 的标签类型 (即只含有一个“1”的标签), 直接进行离散碰撞处理即可将所有异 1 bit 的标签识别出来, 阅读器只产生一次寻呼次数, 即只需进行 1 次异位寻呼。

2) 对于异 $j(j > 1)$ bit (含有 j 个“1”) 的标签, 采用如下方法进行分类: 先对前 $n-1$ 个碰撞位上任意置 $j-1$ 个“1”, 第 $j-1$ 个“1”位置之前没有置 1 的位上都置 0, 一共有 C_{n-1}^{j-1} 种取法。然后阅读器据此分别进行寻呼, 由离散碰撞处理的性质可知, 这样的标签可全部被识别出来。

例如, 取 $n = 5$, $j = 3$ 的情况, 所有标签为: 00111、01011、01101、01110、10011、10101、11001、10110、11010、11100。阅读器所用寻呼序列为: 11、101、1001、011、0011、0101。那么寻呼“11”时, 标签 11001、11010、11100 回应进行离散处理即可将它们识别出来, 按照此方法, 阅读器通过次寻呼即可将所有标签识别。由于异位分类寻呼次数为 n , 可得阅读器寻呼次数为

$$\begin{aligned} Q(n) &= 1 + \sum_{j=2}^n C_{n-1}^{j-1} + n \\ &= 2^{n-1} + n \\ &= \frac{1}{2}N + n \end{aligned} \quad (5)$$

可见, 在 $N = 2^n$ 的情况下, 离散处理算法是 BLBO 算法^[14]所需的寻呼开销的 $\frac{1}{4}$ 左右。

定理 2 给定碰撞位序列空间 $\Omega(N_j, n)$ 中, 任意 2 个节点中能被离散处理的概率为 $P_{\text{离散}}$, 不能被离散处理的概率为 $P_{\text{二叉}}$, 有

$$P_{\text{离散}} = \frac{C_n^{j-1} C_{n-j+1}^1 C_{n-j}^1}{C_n^j (C_n^j - 1)} \cdot \frac{C_{n-2}^{j-1}}{C_n^{j-1}}$$

且

$$P_{\text{二叉}} = 1 - P_{\text{离散}}$$

证明 由定理 1 的分析, 空间中任意 2 个节点能被离散处理的条件为: 1) 2 个节点的位标识中 $j-1$ 个“1”的位置相同; 2) $j-1$ 个“1”的位置靠前于最后一个 1。

满足条件 1) 的概率为

$$P_{2\text{-离散}}^{(1)} = \frac{C_n^{j-1} C_{n-j+1}^1 C_{n-j}^1}{C_n^j (C_n^j - 1)} \quad (6)$$

满足条件 2) 的概率为

$$P_{2\text{-离散}}^{(2)} = \frac{C_{n-2}^{j-1}}{C_n^{j-1}} \quad (7)$$

由此 2 个标签能被离散处理的概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{离散}} &= P_{2\text{-离散}}^{(1)} P_{2\text{-离散}}^{(2)} \\ &= \frac{C_n^{j-1} C_{n-j+1}^1 C_{n-j}^1}{C_n^j (C_n^j - 1)} \cdot \frac{C_{n-2}^{j-1}}{C_n^{j-1}} \end{aligned} \quad (8)$$

证毕。

由定理 2 可知, 空间 $\Omega(N_j, n)$ 中任意 2 个节点中能被离散处理的概率仅与 n, j 相关, 与 N_j 无关。

由定理 1 可知, 对于 $N = 2^n$ 的情形, 采用 C_{n-1}^{j-1} 个取法进行相应的寻呼。给出如下关于寻呼模式的定义。

定义 5 寻呼模式。设 $S^{(j)}$ 集合及相应长度为 n 的碰撞位序列 $h^{(j)}$ 。定义在序列 $h^{(j)}$ 中由前 $j-1$ 个“1”的位置所确定的子空间为一个寻呼模式, 表示为 $\Omega(N_j, n, m_1 m_2 \cdots m_{k-1})$, 其中, $m_1 m_2 \cdots m_{k-1}$ 为该子空间在 $\Omega(N_j, n)$ 空间中前 k 个维度的标识, 满足 $m_i \in \{0, 1\} (1 \leq i < k)$ 。

定义 6 模式空间、容量与长度。在 $\Omega(C_n^j, n)$ 空间中, 令所有满足定义 5 的模式所构成的集合空间为 M , 有 $|M| = C_{n-1}^{j-1}$ 。令 $\alpha = m_1 m_2 \cdots m_{k-1}$, 定义 $\|\alpha\|$ 为模式的长度, 有 $\|\alpha\| = k$ 。定义 $|\alpha|$ 为模式的容量, 表示与该模式 α 所匹配的元素个数, 若 $|\alpha| = 1$, 则称该模式为单容量模式, 否则称为多容量模式。

定理 3 $\forall \alpha_i \in M$, 有

$$\|\alpha_i\| \leq n - |\alpha_i|_{N_j} \quad (9)$$

成立, 其中, $|\alpha_i|_{N_j}$ 表示这 N_j 个节点中匹配模式 α_i

的个数。

证明 令 $k_i = \|\alpha_i\|$ 。同属于 α_i 模式的节点, 在 k_i 维空间中具有相同的标识。在 $n - k_i$ 维空间中, 与 0 节点具有汉明距为 1 的节点数最多为 $n - k_i$ 个。由 $N_j \leq C_n^j$ 可知, 式 (9) 显然成立, 仅当 $N_j = C_n^j$ 时等号成立。

定理 4 给定 $N_j < 2^n$, $h^{(j)} = n$, 阅读器识别异 j bit 的 N_j 个标签所需寻呼次数 $Q(N_j) = 2t - 1$ 。设 $M(N_j) = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_t\}$ 为 N_j 个标签所匹配的模式集合, t 为该集合中模式的个数。

证明 由假设可得

$$N_j = \sum_{i=1}^t |\alpha_i|_{N_j}, |\alpha_i|_{N_j} \geq 1$$

算法对给定的异 j bit 进行分类后, 开始采用改进的二叉树搜索 BLBO 算法对碰撞位序列 $h^{(j)}$ 由 1 到 0、由高位到低位逐层搜索。

1) 由于搜索的空间以 $\Omega(N_j, n)$ 开始, $\forall \alpha_i \in M(N_j)$, $\exists \Omega(N_j, n, m_1 m_2 \dots m_{\tau})$, 满足 $\tau < k_i$ 且由该子空间所对应的二叉树碰撞节点上, 总可以分叉搜索到下层子空间 $\Omega(N_j, n, m_1 m_2 \dots m_{k_i-1})$ 。

2) $\forall \alpha_i \in M(N_j)$, 对于匹配模式 α_i 的任意 2 个节点, 由于同属于子空间 $\Omega(N_j, n, m_1 m_2 \dots m_{k_i-1})$, 则在算法搜索到该子空间之前, 不可能先后被识别出来。

由此算法对标签的查询转化为对现存模式的查询, 现有的 $\alpha_1, \dots, \alpha_t$ 个模式将被二分叉提取出来。若 $|\alpha_i|_{N_j} > 1$, 则提取后该模式中的标签将进行离散处理, 若 $|\alpha_i|_{N_j} = 1$, 即识别出单个的标签。证毕。

定理 5 $\forall \alpha_i \in M(N_j)$, 若 $|\alpha_i|_{N_j} = 1$, 称该模式处于孤立态。则系统中存在孤立态模式 α_i 的个数期望为

$$E(N_{j,(1)}^{\alpha_i}) = C_{N_j}^1 \frac{|\alpha_i|_{N_j}^{N_j-1} C_n^j - |\alpha_i| - \tau + 1}{C_n^j - \tau} \quad (10)$$

证明 由 $N_j \leq C_n^j$, 对于任意一个标签, 它与模式 α_i 匹配的概率为 $\frac{|\alpha_i|}{C_n^j}$ 。由 $|\alpha_i|_{N_j} = 1$ 可得, 其他 $N_j - 1$ 个标签不匹配该模式的概率为

$$\begin{aligned} & \frac{C_n^j - |\alpha_i|}{C_n^j - 1} \frac{C_n^j - |\alpha_i| - 1}{C_n^j - 2} \dots \frac{C_n^j - |\alpha_i| - N_j + 2}{C_n^j - N_j + 1} \\ &= \prod_{\tau=1}^{N_j-1} \frac{C_n^j - |\alpha_i| - \tau + 1}{C_n^j - \tau} \end{aligned}$$

则存在孤立态模式 α_i 的个数期望为 $N_{j,(1)}^{\alpha_i} = C_{N_j}^1 \cdot$

$$\frac{|\alpha_i|}{C_n^j} \cdot \prod_{\tau=1}^{N_j-1} \frac{C_n^j - |\alpha_i| - \tau + 1}{C_n^j - \tau}。$$

证毕。

定理 6 给定 $N_j \leq C_n^j$, 则系统中存在孤立态模式的个数期望为

$$E(N_{j,(1)}) = \sum_{k=1}^{n-j+1} \rho_k E(N_{j,(1)}^{\alpha_i}) \quad (11)$$

其中, ρ_k 表示满足 $|\alpha| = k$ 的模式个数。

证明 不失一般性, 设 $j \geq 2$ 。由定义 6, 空间 $\Omega(C_n^j, n)$ (即 $N_j = C_n^j$) 中存在 C_{n-1}^{j-1} 个模式。根据前 $j-1$ 个“1”所在的位置情形, $\forall \alpha_i \in M$, 有 $1 \leq |\alpha_i| \leq n - j + 1$, 即对于给定的 α_i , 空间 $\Omega(C_n^j, n)$ 中存在 $n - \|\alpha_i\|$ 个可离散处理的节点, 有 $|\alpha_i| = n - \|\alpha_i\|$ 成立。不妨设 $|\alpha_i| = k_i$, 由 $\alpha_i = m_1 m_2 \dots m_{k_i-1}$ 可知, 该类模式的最后一位必为 1, 则满足前 $j-2$ 个“1”在 $n - k - 1$ 个维度内的模式个数为 $\rho_k = C_{n-k-1}^{j-2}$, 这些模式的容量皆为 k_i 。由于具有同等容量的模式存在孤立态的个数期望相同, 且由定理 5 可得, 命题成立。

图 2 描述了 $n=10, j=5$ 条件下, N_j 取值在 $[1, C_n^j]$ 时孤立态模式的个数期望。图 2 中的直线 (single-mode) 与曲线 (multi-mode) 分别对应单容量模式、多容量模式呈现出的孤立态特征。由图 2 可知, 本算法具有相当强的“吸聚”效应, $N_j \ll C_n^j$ 时, 单容量及多容量模式皆呈现出孤立态的特点。而当 N_j 取值在 80 左右时, multi-mode 曲线出现了拐点。这意味着此时更大的 N_j 取值, 将不断地促使多容量模式脱离孤立态, 即后续增加的标签能被离散识别的概率急剧增大。

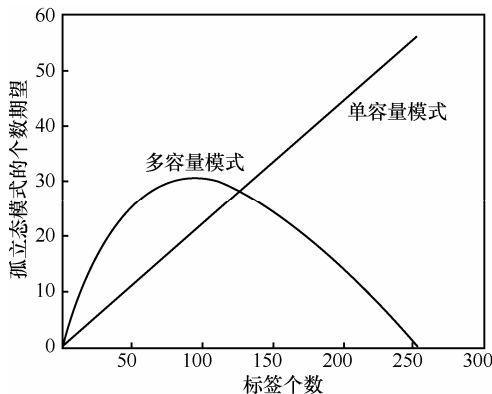


图 2 孤立态模式的个数期望

5.2 新增一个标签 t_{new} 的寻呼次数分析

定理 7 原有的标签个数为 N ，该 N 个标签的碰撞位长度为 n_0 ，新增一个标签后， $N+1$ 个标签的碰撞位长度为 n_{new} ，新增的碰撞位数为 k ，则所增加的寻呼次数为

$$\begin{cases} 2P_{\text{二叉}}, & n_{new} = n_0 \\ k, & n_{new} > n_0, t_{new}(1) \leq x_1 \cup t_{new}(1) \geq x_1 + n_0 \\ k + 2P_{\text{二叉}}, & n_{new} > n_0, x_1 \leq t_{new}(1) < x_1 + n_0 \end{cases}$$

其中， $t_{new}(1)$ 表示新增标签 t_{new} 中在碰撞序列 h_{new} 中含“1”的个数； x_1 表示新增的 k 个碰撞位上对应原 N 个标签序列位上“1”的个数。

证明

1) 当 $n_{new} = n_0$ ，即 $k = 0$ 时。

在该条件下，意味着新加入标签不改变碰撞位长度，这将不改变原 N 个标签异位分类，依然是分为异 1、2、...、 n_0 bit 的各个集合，表示为 $S^{(1)}$ 、 $S^{(2)}$ 、...、 $S^{(n_0)}$ ，因此只需考虑该标签序列能否被离散处理就行了。当能被离散处理时，所增加的寻呼次数为 0，当不能被离散处理时，所增加的寻呼次数为 2 次。所以，当 $n_{new} = n_0$ 时，增加的寻呼次数为 $0 \times P_{\text{离散}} + 2 \times P_{\text{二叉}} = 2P_{\text{二叉}}$ 。

2) 当 $n_{new} > n_0$ ，即 $k > 0$ 时。

原 N 个标签 n_0 个异位分类被扩展至 n_{new} 个异位分类，用集合分别表示为 $S^{(1)}$ 、 $S^{(2)}$ 、...、 $S^{(x_1)}$ 、 $S^{(x_1+1)}$ 、...、 $S^{(x_1+n_0)}$ 、 $S^{(x_1+n_0+1)}$ 、...、 $S^{(new)}$ 。可见，原 N 个标签异位分类的 n_0 个集合对应到 $S^{(x_1+1)}$ 、...、 $S^{(x_1+n_0)}$ ，因此，除了新增标签，集合 $S^{(1)}$ 、 $S^{(2)}$ 、...、 $S^{(x_1)}$ 、 $S^{(x_1+n_0+1)}$ 、...、 $S^{(new)}$ 为空集合。

下面分 2 种情况讨论。

① 当 $t_{new} < x_1 \cup t_{new} > x_1 + n_0$ 时，新增的标签序列被异位分类到集合 $S^{(1)}$ 、 $S^{(2)}$ 、...、 $S^{(x_1)}$ 、 $S^{(x_1+n_0+1)}$ 、...、 $S^{(new)}$ 中的一个，因此新增标签所属集合只包含该新增标签，所以阅读器只需增加异位分类寻呼次数，即为 k 。

② 当 $x_1 < t_{new} < x_1 + n_0$ 时，所有标签被异位分类为 $k + n_0$ 个集合，因此异位分类寻呼增加 k 次寻呼。原 N 个标签将被异位分类至集合 $S^{(x_1+1)}$ 、...、 $S^{(x_1+n_0)}$ ，新增标签被异位分类到这些集合中的一个。对于次新增标签，与它所处同一异位集合中的标签序列在前 k bit 互补，因此只能进行二叉处理。所以，此时新增的寻呼次数为 $k + 2P_{\text{二叉}}$ 。

证毕。

6 仿真比较

本节对 DISCRETE 算法与 BLBO 算法进行了仿真比较，比较了寻呼次数、吞吐率和新增标签后增加的寻呼开销等。每一次仿真结果是进行了 100 次数据统计得出的。

令 $n = 10$ ，随机抽取 N 个标签，采用混杂算法进行识别。由图 3 可以看出，在实际标签个数 N 的小于 100 时离散处理算法的寻呼次数非常接近 BLBO 算法的寻呼次数，但随着实际标签个数 N 的不断增加，离散处理算法的寻呼次数明显小于 BLBO 算法。

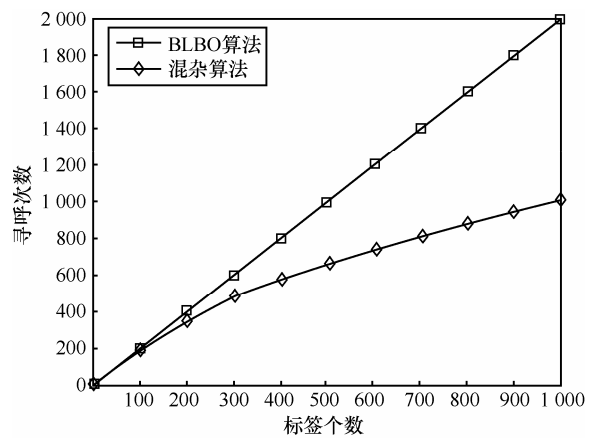


图 3 混杂算法与 BLBO 算法的寻呼次数比较

仿真实验发现，除非 $N \ll 2^n$ ，碰撞位序列一般总是为 n 。则由定理 5、定理 6 和当 $|\alpha| > 2$ 时，相应的多容量模式处于非孤立态的个数极少，系统的吞吐量 S 可近似表示为

$$S = \frac{N}{n + \sum_{j=2}^{n-1} (N_j + E(N_{j(1)}))} \quad (12)$$

如图 4 所示，混杂算法的吞吐率在标签个数 N 小于 20 时，与 BLBO 算法性能基本相同；当标签个数 N 高于 20 时，离散处理算法的吞吐率明显比 BLBO 算法优越。

如图 5 所示，当标签个数较小时， $|\alpha_i|_{N_j} = 1$ 的情况相当普遍，即此时标签的增加更多地体现在模式的增加上；随着标签个数的不断增加，非孤立态模式的个数近乎线性增长。即对于多容量模式，模式出现的个数开始增长，由 $|\alpha_i|_{N_j} = 1$ 开始

陆续脱离孤立态。当标签总数接近于标签空间规模时，孤立态模式的个数趋于接近单容量模式的个数。

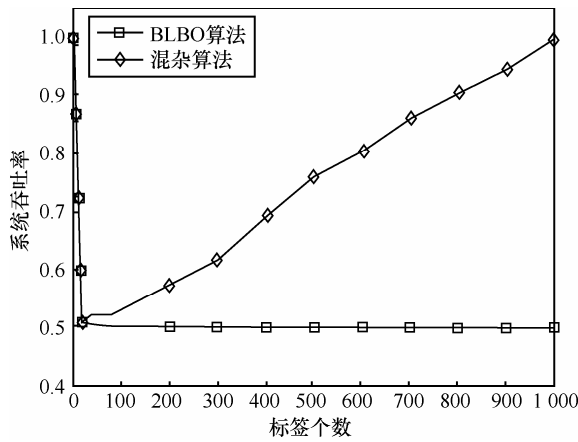


图 4 混杂算法与 BLBO 算法的吞吐率比较

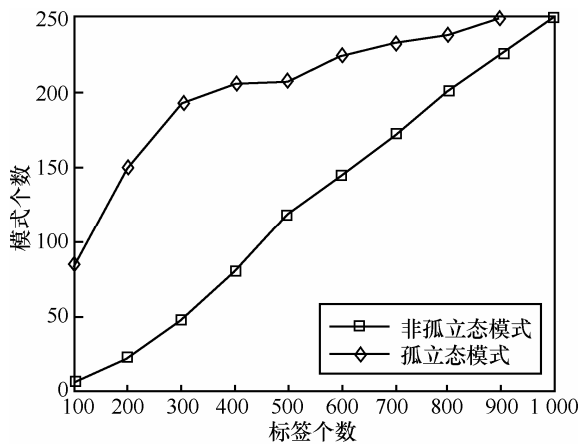


图 5 孤立态模式与非孤立态模式比较

如图 6 所示，以步长为 20， N 取值为 20~100 的情况下，相应增加一个标签所需要的寻呼开销，当 $N \ll 2^n$ 时，寻呼开销近乎线性增加。如图 7 所示，BLBO1 表示在 BLBO0 的基础上增加一个标签所需要的寻呼开销，DISCRETE1 表示在 DISCRETE0 的基础上增加一个标签所需的寻呼开销，由图 7 可知，随着 N 的不断增大，增加一个标签所需要新增的寻呼开销相当小。

设标签由 $n=10$ bit 二进制序列表示，在 1024 个标签中随机抽取 N 个，通过 1000 次实验，碰撞位的个数如图 8 所示，由图可知，当标签数超过 10 时，增加标签数后的碰撞位个数基本不变。所以对于定理 7，增加一个标签，增加的实际寻呼次数一般为 $2P_{\text{二叉}}$ 。

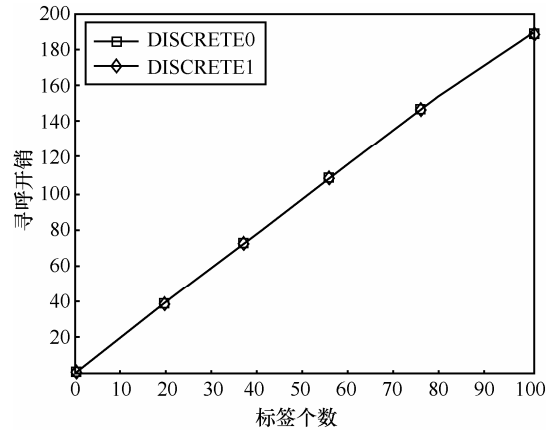


图 6 N 在 100 以内新增寻呼开销比较

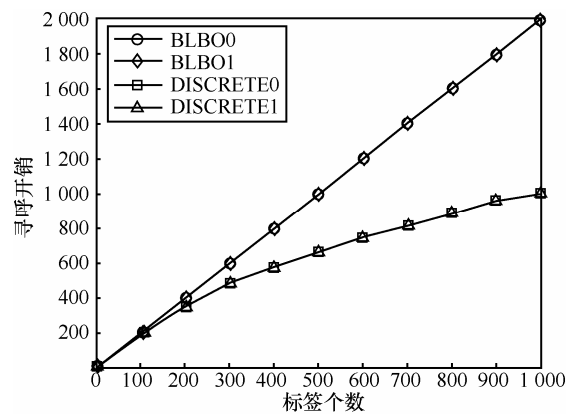


图 7 N 在 1000 以内新增寻呼开销比较

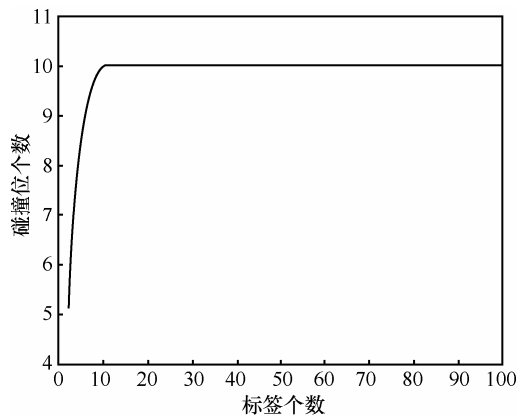


图 8 随机抽取 N 个标签的碰撞位个数

7 结束语

本文对已有的几种防碰撞算法进行了分析和比较，在此基础上提出了离散处理的技术思路，结合二叉树搜索方法及离散处理的特点，提出了一类防碰撞混杂算法。理论分析上，在 n 维空间中考察可离散处理节点的模式属性，证明了提出的混杂算法实质上是对标签所匹配模式的二叉树搜索算法。

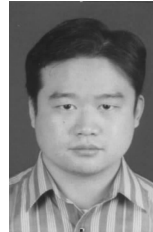
性能分析和仿真结果表明, 该算法在阅读器的寻呼次数和吞吐率方面都有很大的提高, 整体提高了系统识别的效率。

参考文献:

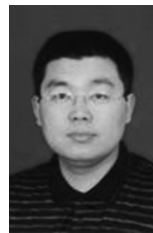
- [1] FINKENZELLER K. RFID-Handbook Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication[M]. New York: Wiley and Sons, 2010.
- [2] 吴海峰, 曾玉. 自适应帧 Aloha 的 RFID 标签防冲突协议[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(5):802-810.
WU H F, ZENG Y. ADFA protocol for RFID tag collision arbitration[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(5):802-810.
- [3] 王必胜, 张其善. 可并行识别的超高频 RFID 系统防碰撞性能研究[J]. 通信学报, 2009, 30(6):108-113.
WANG B S, ZHANG Q S. Study of anti-collision performance in parallelizable identification UHF RFID system[J]. Journal on Communications, 2009, 30(6):108-113.
- [4] 梁彪, 胡爱群, 秦中元. 一种新的 RFID 防碰撞算法设计[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9):2158-2160.
LIANG B, HU A Q, QIN Z Y. A novel design for RFID anti-collision technique[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(9):2158-2160.
- [5] LAI Y C, LIN C C. A pair-resolution blocking algorithm on adaptive binary splitting for RFID tag identification[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(6):432-434.
- [6] CHEN Y H, HORNG S J, TUN R S. A novel anti-collision algorithm in RFID systems for identifying passive tags[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(1):105-121.
- [7] MIT auto-ID center. draft protocol specification for a 900MHZ class 0 radio frequency identification tag[EB/OL]. <http://auto-id.mit.edu>, 2003.
- [8] 李平, 吴佳英. 基于超立方体弱连通性质的多态网络研究[J]. 系统工程学报, 2010, 25(3):298-303.
LI P, WU J Y. Research on polymorphic networks based on hypercube weak connectivities[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(3):298-303.
- [9] EOM D F, LEE T J. Accurate tag estimation for dynamic framed-slotted ALOHA in RFID systems[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(1):60-62.
- [10] 李萌, 钱志鸿. 基于时隙预测的 RFID 防碰撞 ALOHA 算法[J]. 通信学报, 2011, 32(12):43-50.
LI M, QIAN Z H. Slot-predicting based ALOHA algorithm for RFID anti-collision[J]. Journal on Communications, 2011, 32(12):43-50.
- [11] YU S S, ZHAN Y J, WANG Z P, *et al.* Anti-collision algorithm based on jumping and dynamic searching and its analysis[J]. Computer Engineering, 2005, 31:19-20.
- [12] WANG T P. Enhanced binary search with cut-through operation for anti-collision in RFID systems[J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(4):236-238.
- [13] 丁治国, 郭立, 朱学永等. 基于二叉树分解的自适应防碰撞算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6):1395-1398.
DING Z G, GUO L, ZHU X Y, *et al.* An adaptive anti-collision algorithm based on binary-tree disassembly[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(6):1395-1398.

- [14] 王雪, 钱志鸿, 胡正超等. 基于二叉树的 RFID 防碰撞算法的研究[J]. 通信学报, 2010, 31(6):49-57
WANG X, QIAN Z H, HU Z C, *et al.* Research on RFID anti-collision algorithms based on binary tree[J]. Journal on Communications, 2010, 31(6):49-57.

作者简介:



李平 (1972-), 男, 湖南新化人, 长沙理工大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为网络与信息安全、无线传感网和物联网。



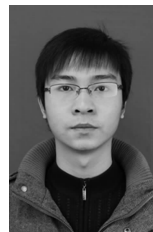
孙利民 (1966-), 男, 河南淮阳人, 博士, 中国科学院研究员, 主要研究方向为移动自组网、无线传感网和物联网的安全。



吴佳英 (1977-), 女, 湖南桃江人, 长沙理工大学副教授, 主要研究方向为无线网络、人工智能。



方庆 (1989-), 男, 湖南岳阳人, 长沙理工大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。



谢晋阳 (1989-), 男, 湖南邵阳人, 长沙理工大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。

周博翔 (1988-), 男, 湖南邵阳人, 长沙理工大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。