

基于二叉树分解的自适应防碰撞算法

丁治国^{①②} 郭立^② 朱学永^① 汪赵华^②

^①(解放军电子工程学院网络中心 合肥 230037)

^②(中国科学技术大学电子科学与技术系 合肥 230027)

摘要: 该文提出了一种基于二叉树分解的自适应防碰撞算法。新算法利用标签 EPC 的唯一性, 通过时隙分配估计标签的分布情况, 对发生碰撞的时隙进行二叉树搜索, 从而将一个庞大且复杂的二叉树分解成多个简单的小子二叉树, 简化了搜索流程。通过引入碰撞堆栈, 并根据时隙状态自适应地调整搜索路径, 从而进一步减少搜索的时隙数及提高了时隙的吞吐量。理论和仿真实验证明了新算法的有效性, 即在待识别的标签数量较多时, 可有效的减少识别时间, 提高搜索效率。

关键词: 射频识别; 防碰撞算法; 二叉树分解; 碰撞堆栈

中图分类号: TN91

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1395-05

An Adaptive Anti-collision Algorithm Based on Binary-Tree Disassembly

Ding Zhi-guo^{①②} Guo Li^② Zhu Xue-yong^① Wang Zhao-hua^②

^①(Center of Network, Electronic Engineering Institute PLA, Hefei, 230037, China)

^②(Department of Electronic Science and Technology, USTC, Hefei, 230027, China)

Abstract: A new adaptive anti-collision algorithm based on binary-tree disassembly is proposed in this paper. In order to enhance the search efficiency, a big and complex binary-tree is disassembled to several small and simple binary-trees by estimating the distributing of tags. The introduction of the collision stack, as well as adjusting the search paths adaptively based on the state of slots, the performance of the new algorithm is improved further, including reducing the search timeslots and improving the throughput of timeslots. Theory and computer simulations show that the new anti-collision algorithm is practical, especially when the number of tags is large.

Key words: Radio Frequency Identification (RFID); Anti-collision algorithm; Binary-tree disassembly; Collision stack

1 引言

射频识别(RFID)是20世纪90年代兴起并逐渐走向成熟的一种非接触式的自动识别技术, 在物流、跟踪、定位等领域已得到广泛应用。其中, 用于解决读写器作用范围内多标签识别问题的防碰撞算法已成为该领域研究的热点之一。

标签防碰撞算法主要解决在读写器有效通信范围内, 多个标签同时与读写器进行通信的问题。常用的防碰撞算法一般可以分为两类, 一种是基于时隙随机分配的ALOHA算法^[1], 包括动态时隙ALOHA(DSA)算法^[1], 分群时隙ALOHA算法(GSA)^[2]和标签估计算法(TEM)^[3]等。其特点是, 算法简单, 便于实现, 适用于低成本RFID系统。但由于该类算法的时隙是随机分配的, 即存在一定的可能性, 某一标签在相当长的一段时间内无法识别, 即“tag starvation”问题, 所以这类方法被称为可能性方法。另一类是基于二进制树搜索(BS)算法^[1], 包括动态二进制搜索(DBS)算法^[1], 自适应二

叉树搜索算法(ABS)^[4-6], 自适应查询树算法(AQS)^[7]、返回式搜索算法(BackTrack)^[8]和后退索引搜索算法^[9]等。该类算法比较复杂, 识别时间较长, 但不存在“tag starvation”问题, 又被称为确定性方法。

本文提出了一种基于二叉树分解的自适应防碰撞算法。新算法在二叉树搜索算法的基础上, 利用标签 EPC (Electronic Product Code, 即电子产品代码)的唯一性, 通过时隙分配估计标签的分布情况, 对发生碰撞的时隙进行二叉树搜索, 从而将一个庞大且复杂的二叉树分解成多个简单的小子二叉树, 简化了搜索流程。通过引入碰撞堆栈, 并根据时隙状态自适应地调整搜索路径, 从而进一步减少搜索的时隙数及提高了时隙的吞吐量。理论和仿真实验证明了新算法的有效性, 即在待识别的标签数量较多时, 可有效的减少识别时间, 提高搜索效率。

2 防碰撞算法原理及相关的研究成果

对于一个特定的RFID系统来说, 任意一个RFID标签都有一个唯一确定的EPC。读写器通过获取标签的EPC来确认标签的身份。当读写器作用范围内有多个未识别的标签时,

每个标签都会响应读写器的查询命令，发送自己的EPC，这样就不可避免会出现相互之间的干扰，即产生碰撞。而防碰撞算法就是要提出相应策略，使读写器能依次对标签逐一进行识别。

目前，很多RFID系统都采用国际标准ISO/IEC1800026中的二进制树搜索(BS)算法，它采用曼彻斯特(Manchester)的编码方法，可以有效地识别碰撞比特出现的位置。BS算法的实质就是通过多次比较，不断缩小响应标签的范围，直至对唯一的标签进行识别，并通过循环操作，依次识别所有标签。但该算法是始终自上而下进行的，搜索的过程中会出现许多重复路径，搜索效率比较低。自适应二叉树搜索(ABS)算法，自适应查询树(AQS)算法和返回式搜索(BackTrack)算法都是在BS算法的基础上，在搜索策略上进行的改进。它们根据3种不同时隙状态(碰撞、空闲和可读)，自动地调整搜索路径，在不同程度上提高了搜索效率，减少读写器对标签的搜索时隙。

值得注意的是，上述防碰撞算法都是对一个庞大且复杂的二叉树进行操作的，在搜索的过程中难免会出现重复路、回头路或冤枉路。在如图1所示的RFID系统中，读写器的作用范围内有6个待识别的标签，标签的EPC长度为4位。以AQS算法为例，完成上述搜索需要12个时隙。其中，由于标签Tag1和Tag2的EPC前3位都相同，所以需要深度为4的搜索，才能将两个标签区分开来。如果能够根据标签EPC的分布情况，将一个庞大且复杂的二叉树分解成多个简单的小二叉树，逐一进行搜索，是否可以使用更少的时隙数来完成对所有标签的识别呢？根据下一节的描述，答案是肯定的。

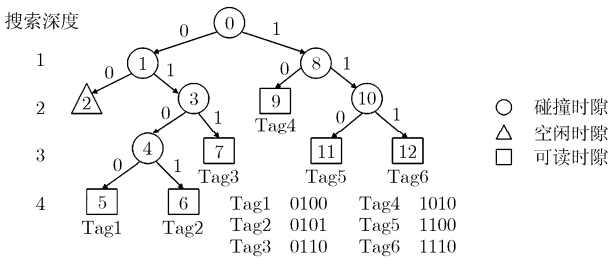


图1 AQS算法的搜索流程

3 基于二叉树分解的自适应防碰撞算法

如图2所示，可以通过初始分配4个时隙用来掌握所有标签的EPC的分布情况。在这4个时隙里，读写器分别发送00、01、10和11的查询码，前两位EPC满足上述条件的标签在相应时隙内做出应答。读写器根据应答可以判断，第1个和第3个时隙分别为空闲时隙和可读时隙，无需进行二叉树的搜索，读写器就可直接完成对标签的识别。而在第2个和第4个时隙发生碰撞，需要以01和11为起点，继续二叉树的搜索。这样就将原来一个庞大而复杂的二叉树问题分解为两个简单的小二叉树进行解决。在01的子二叉树中读写器直接发

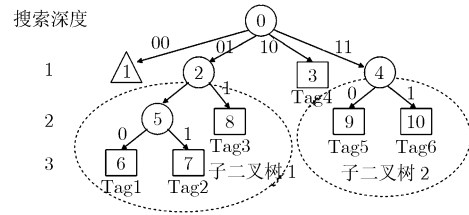


图2 初始分配4时隙的ABD算法的搜索流程

送查询码010和011，需要4个时隙完成对Tag1，Tag2和Tag3的搜索，而在11的子二叉树中读写器直接发送查询码110和111，只需要2个时隙即完成标签Tag5和Tag6的搜索。故新方法只需要4+4+2=10个时隙就完成了所有标签的搜索。

图3给出了初始分配8个时隙的解决方案，可以看到只有在读写器发送010这个时隙时标签出现碰撞，这样只需要在010的子二叉树下继续搜索。所以该方案同样需要8+2=10个时隙完成所有标签的搜索。当然也可以初始分配16个时隙进行搜索，由于所有时隙都是空闲和可读的，所以不存在子二叉树，但该方案需要16个时隙，显然不是最优方案。

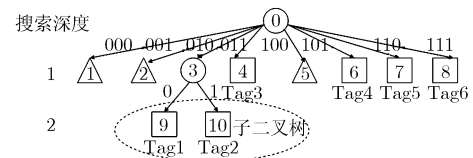


图3 初始分配8时隙的ABD算法的搜索流程

综上所述，下面对新算法进行一般性描述，由于新算法将一个复杂的二叉树分解成多个简单的小二叉树依次进行搜索，所以新算法被称为基于二叉树分解的自适应防碰撞算法(Adaptive binary-tree disassembly anti-collision algorithm)简称ABD算法。为了保证算法的高效率，在读写器中增加了碰撞堆栈，用以在子二叉树的返回搜索过程中，直接确定搜索的新起点，算法的流程如图4所示。

步骤 1 读写器初始分配 2^l ($1 \leq l \leq L$ 其中 L 为标签EPC的长度)个时隙用来判断标签的分布。 l 被称为区分度，其值越大表示估计的标签分布越细，分解后的子二叉树越多而且越小。读写器在相应的时隙内发送长度为 l 的查询码，前 l 位符合查询码的标签做出响应。

步骤 2 读写器根据时隙中发生碰撞的次数确定子二叉树的个数 n ($0 \leq n \leq 2^l$)。对于空闲时隙，由于没有标签存在，读写器不做处理。对于可读时隙，读写器直接完成对标签的识别。

步骤 3 标签依次对子二叉树进行搜索，根据不同时隙状态，自适应地调整搜索路径：

(1)碰撞时隙：判断将当前搜索是否为满叉的($j = 1$)，如果不是，将当前搜索深度值 i 保存到碰撞堆栈中 $S_0 = i$ ，表示该深度还有一个分支没有搜索，在进行返回搜索时，必

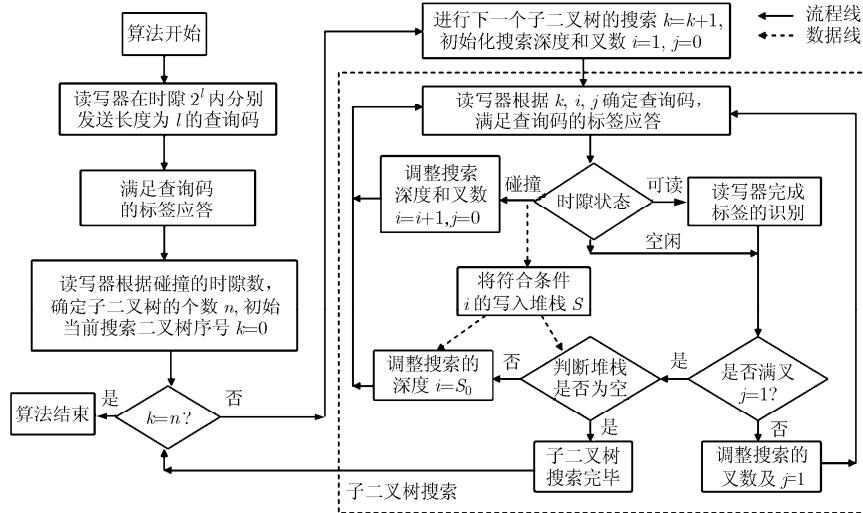


图 4 ABD算法的流程框图

须返回到该深度, 继续另一个分支的搜索。同时, 由于该节点内有大于或等于2个标签存在, 所以该节点需要进行二叉树分割, 令 $i = i + 1, j = 0$; 读写器根据当前的 i, j , 确定查询码继续搜索。

(2)空闲时隙: 说明该节点内没有标签存在, 无需继续二叉树分裂。判断当前搜索是否是满叉的, 如果不是, 则 $j = 1$, 继续另一分支的搜索。如果是, 则需要返回搜索。BS算法返回到算法的起点, 即 $i = 1$, BackTrack算法返回到当前搜索深度的上一层, 即 $i = i - 1$ 。而新算法的策略是返回到碰撞堆栈栈首所指示那一深度, 即 $i = S_0$ 。同时, 清除堆栈栈首的内容, 读写器根据当前的 i, j , 确定查询码继续搜索。

(3)可读时隙: 说明该节点内有且只有唯一的标签存在, 读写器对标签进行识别。然后进行返回搜索, 搜索的策略同空闲时隙一样。

(4)子二叉树搜索的结束: 如果堆栈的内容为空, 当前的深度的搜索是满叉且时隙状态为非碰撞时, 当前的子二叉树搜索结束, 继续下一个子二叉树的搜索。

步骤4 读写器判断当前结束搜索的子二叉树是否为最后一个, 如果不是继续步骤3, 如果是则算法结束。

4 算法性能分析

假设系统内待识别的标签总数为 N , 读写器初始分配的时隙数为 2^l , 估计出现的空闲时隙、可读时隙和碰撞时隙的数量分别为

$$\hat{T}_e = 2^l(1 - 1/2^l)^N \quad (1)$$

$$\hat{T}_r = 2^l \frac{N}{2^l} (1 - 1/2^l)^{N-1} \quad (2)$$

$$\hat{T}_c = 2^l [1 - T_e - T_r] = 2^l \left[1 - \left(1 - \frac{1}{2^l}\right)^N - \frac{N}{2^l} \left(1 - \frac{1}{2^l}\right)^{N-1} \right] \quad (3)$$

当 $N \gg 2^l$ 时, $\hat{T}_c \rightarrow 2^l$, 说明当标签总数远大于分配的时隙总数时, 几乎在所有的时隙都发生碰撞, 也就是说分解

后的子二叉树个数为 2^l 个, 平均每个子二叉树内的标签总数为 $N/2^l$ 。

新算法在子二叉树的搜索中, 采用是基于碰撞堆栈的自适应搜索算法, 搜索的路径根据时隙状态自适应地调整, 所以很难用公式准确计算出新算法所需的时隙数。但如果采用BS算法, 就可以得出下面的公式。

根据文献[1], 对于一个有 N 个标签的二叉树, BS算法的所需的时隙数为

$$T_{BS} = N(\log_2 N + 1) \quad (4)$$

而新算法有 2^l 个子二叉树, 每个子二叉树平均有 $N/2^l$ 个标签, 所需的时隙数为

$$T_{ABD_BS} = 2^l \frac{N}{2^l} \left(\log_2 \frac{N}{2^l} + 1 \right) + 2^l = N(\log_2 N - l + 1) + 2^l \quad (5)$$

其中 T_{ABD_BS} 表示子二叉树采用二进制树搜索的ABD算法, 式中的第二项 2^l 为初始分配的时隙数。将式(4)和式(5)相减, 就可以得出采用二叉树分解方法, 可减少的时隙数:

$$T_{sub} = T_{BS} - T_{ABD_BS} = Nl - 2^l \quad (6)$$

不难看出, 当 N 很大时, 将二叉树进行分解处理, 可以有效地减少时隙数, 提高算法的搜索效率。当 2^l 较小时, 减少的时隙数 T 与标签数量 N 和区分度 l 成正比。也就是说, 当标签数量越多时, 分解的子二叉树越多, 算法的效率越高。但是, 区分度 l 不宜盲目增大, 随着 l 的增加, 进行二叉树分解的代价(初始分配的时隙数 2^l) 会呈指数性增加。对一个标签EPC长度为 L 的RFID系统, 标签的容量为 2^L 个, 当 $l = L$ 时, 说明读写器为系统内每一个可能存在的标签都分配一个时隙进行搜索, 这显然会造成极大的浪费。

对式(5)求 l 的导数, 可以得到在最少的时隙数的条件下, 标签数量 N 与区分度 l 的关系:

$$\frac{d}{dl} T_{ABD_BS} = \ln 2 \cdot 2^l - N = 0 \quad (7)$$

$$2^l = N / \ln 2 \quad (8)$$

另一个衡量算法性能的指标是时隙的吞吐量，它定义为可读时隙与总时隙之比：

$$S = \frac{T_r}{T_{ABD_BS}} = \frac{N}{N(\log_2 N - l + 1) + 2^l} \quad (9)$$

对式(9)求 l 的导数，可以得到在最大时隙吞吐量的条件下，标签数量 N 与区分度 l 的关系：

$$\begin{aligned} \frac{d}{dl} S &= \frac{d}{dl} \frac{N}{N(\log_2 N - l + 1) + 2^l} \\ &= \frac{-N(-N + \ln 2 \cdot 2^l)}{(N(\log_2 N - l + 1) + 2^l)^2} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$2^l = N / \ln 2 \quad (11)$$

比较式(8)和式(11)，可以看出在最少时隙数和最大时隙吞吐量条件下，结论相同，即随着标签数量的增加，初始分配的时隙数也应该线性的增加。

5 实验仿真与分析

通过计算机仿真分别验证了ABD算法的优越性和不同的区分度对算法性能的影响。假设标签EPC的长度为32位，下列结果取相同条件下20次仿真的平均值。

图5(a), 5(b)分别为ABD, AQS, BackTrack和BS4种算法所需时隙数和吞吐量的比较，仿真结果验证了理论分析的正确性，表明ABD算法在标签数量较多时，可有效的减少搜索的时隙数和提高吞吐量。在标签数量较少时，由于初始分配的时隙数太多，反而导致算法的性能的下降。

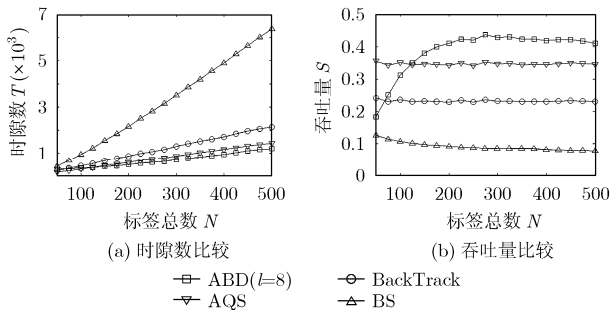


图5 4种算法的性能比较

图6(a), 6(b)分别为ABD算法在不同区分度条件下所需的时隙数和吞吐量的比较，可以看出标签数量在50以内时，区分度为4，算法的吞吐量最大。标签在100左右时，区分度为6，算法的吞吐量最大。而标签在300左右时，区分度应该选择8。这说明在最少时隙数和最大时隙吞吐量条件下，随着标签数量的增加，初始分配的时隙数也应该线性地增加。也就是说，在不同的标签总数的情况下，选择合适的区分度是影响算法性能的关键。一般来说，对于应用在特定场所(如：机场、车站或学校)的RFID系统，标签的到达数量是有规律的。在上午或下午的特殊时段，待识别的标签数量可能达到几百甚至上千，而在午夜和凌晨，标签数量显著减少甚至为零。这些知识都可以作为选择区分度的依据。

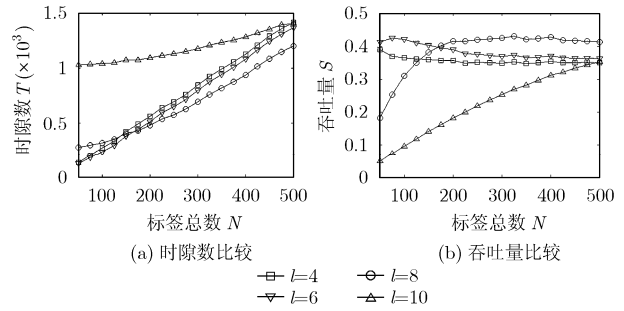


图6 区分度对算法性能的影响

6 结束语

本文提出了一种基于二叉树分解的自适应防碰撞算法。新算法在二叉树搜索算法的基础上，利用标签 EPC 的唯一性，通过时隙分配估计标签的分布情况，对发生碰撞的时隙进行二叉树搜索，从而将一个庞大且复杂的二叉树分解成多个简单的小子二叉树，简化了搜索流程。通过引入碰撞堆栈，并根据时隙状态自适应地调整搜索路径，从而进一步减少搜索的时隙数并提高了时隙的吞吐量。理论和仿真实验证明了新算法的有效性，即在待识别的标签数较多时，可有效地减少识别时间，提高搜索效率。

参考文献

- [1] Finkenzeller K. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. John Wiley & Sons, 2003.
- [2] Hwang Tae-Wook, Lee Byong-Gyo, and Kim Young-Soo. Improved anti-collision scheme for high speed identification in RFID system. First International Conference on Innovative Computing, Information and Control, Beijing, China, 2006, Vol.2: 449-452.
- [3] Cha Jae-Ryong and Kim Jae-Hyun. Novel anti-collision algorithms for fast object identification in RFID system., 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems Workshops, Fukuoka, Japan, 2005, Vol.2: 63-67.
- [4] Myung Jihoon, Lee Wonjun, and Srivastava J. Adaptive binary splitting for efficient RFID tag anti-collision. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(3): 144-146.
- [5] Lai Yuan-Cheng and Lin Chih-Chung. A pair-resolution blocking algorithm on adaptive binary splitting for RFID tag identification. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(6): 432-434.
- [6] Myung Jihoon and Lee Wonjun. Adaptive binary splitting: a RFID tag collision arbitration protocol for tag identification. 2nd International Conference on Broadband Networks, Boston, United States, 2005, Vol.1: 347-355.
- [7] Myung J, Lee W, and Shih T. An adaptive memoryless protocol for RFID tag collision arbitration. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2006, 8(5): 1096-1101.

- [8] 杜海涛, 徐昆良等. 基于返回式树形搜索的反碰撞算法. 云南大学学报, 2006, 28(S1): 133-136.
Du Hai-tao and Xu Kun-liang, *et al.* An anti-collision algorithm based on binary-tree Searching of backtracking. *Journal of Yunnan University*, 2006, 28(S1): 133-136.
- [9] 余松森, 詹宜巨等. 基于后退索引的二进制树形搜索反碰撞算法及其实现. 计算机工程与应用, 2004, 26(16): 26-28.
Yu Song-sen and Zhang Yi-ju, *et al.* An anti-collision algorithm based on binary-tree searching of regressive index and its practice. *Computer Engineering and Application*, 2004, 26(16): 26-28.
- 丁治国: 男, 1977年生, 博士生, 讲师, 研究方向为RFID防碰撞算法和安全认证协议.
- 郭立: 男, 1946年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为集成电路设计、图像处理.
- 朱学永: 男, 1958年生, 教授, 研究方向为计算机网络与信息安全.
- 汪赵华: 男, 1973年生, 博士生, 讲师, 研究方向为敏感信号分析.