

多阅读器协作的 RFID 标签 树形防碰撞算法

宋建华^{1,2,3,4}, 何 帅¹, 姚 慧¹

(1. 湖北大学计算机与信息工程学院, 湖北武汉 430062; 2. 湖北省教育信息化工程技术研究中心, 湖北武汉 430062;
3. 湖北省软件工程工程技术研究中心, 湖北武汉 430062; 4. 智慧政务与人工智能应用湖北省工程研究中心, 湖北武汉 430062)

摘 要: 在物联网复杂的应用环境中, 射频识别技术中的标签碰撞问题作为造成其系统标签识别时间长, 通信量大等问题的主要原因, 已成为近年来本领域的核心研究热点之一. 针对以上问题, 本文提出一种多阅读器协作的树形防碰撞算法: 在第一阶段, 根据位追踪技术能够识别标签碰撞位的特点, 阅读器通过判别待识别标签中的碰撞位, 从待广播节点中删除已验证的无效节点; 在第二阶段的循环广播中, 阅读器间通过共享每次的广播的前缀与当次广播结果对自身的树形结构进行不断优化, 优化策略是为每一个阅读器分配一个待广播节点队列, 通过共享的信息计算待广播节点中含有标签的概率, 依据其概率调整队列中待广播节点的优先级, 并不断地删除无需广播的节点. 在下一轮广播中阅读器选取含有标签概率最大的节点进行广播. 仿真实验结果表明: 提出的算法的平均标签识别效率达到 59.9%, 并且在总时隙数量方面有一定优势.

关键词: 射频识别; 标签识别; 多阅读器; 二叉树; 防碰撞

中图分类号: TN918

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2020)08-1558-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.08.014

A Multi-Reader Cooperative Tree-Based Anti-Collision Algorithm

SONG Jian-hua^{1,2,3,4}, HE Shuai¹, YAO Hui¹

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China;
2. Engineering and Technical Research Center of Hubei Province in Educational Informatization, Wuhan, Hubei 430062, China;
3. Engineering and Technical Research Center of Hubei Province in Software Engineering, Wuhan, Hubei 430062, China;
4. Engineering Research Center of Hubei Province in Intelligent Government Affairs and Application of Artificial Intelligence, Wuhan, Hubei 430062, China)

Abstract: In the complex application environment of the internet of things, tag collision in RFID (radio frequency identification) technology has become one of the core research hotspots in recent years, which is the main reason for the high delay of tag identification and communication cost. To solve the problems above, a MRCT (multi-reader cooperative tree-based algorithm) is proposed in this paper. In the first stage of the algorithm, readers delete part of the invalid nodes according to the advantage of manchester code which can identify the collision bits of tags; In the second stage, readers share the prefix and the current broadcast result in each round of broadcast. The tree structure of the readers is continuously optimized by the information readers shared. The optimization strategy is to allocate a queue of nodes' priority to be broadcasted for each reader. The probability of tags to be broadcasted is calculated by the shared information. The priority of nodes to be broadcasted is adjusted according to its probability, and the invalid nodes are deleted continuously. In the next broadcast, readers select the node with the highest probability to broadcast. Simulation results show that the average tag recognition efficiency of this algorithm is 59.9%, and MRCT has advantage in total time slots.

Key words: RFID (radio frequency identification); tag recognition; multi-reader; binary tree; anti-collision

收稿日期: 2020-02-13; 修回日期: 2020-06-01; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61803149, No. 61901163, No. 61977021); 湖北省技术创新专项重大项目 (No. 2018ACA13); 湖北省高等学校人文社科重点研究基地 (绩效评价信息管理研究中心) 资助项目 (No. 2015JX02)

1 引言

RFID 是一种以电磁波为传输介质来实现数据双向通信的非接触式自动识别技术^[1]. 一个典型的 RFID 系统主要包含阅读器、标签和后台服务器. 系统通过阅读器以无线信号广播识别电子标签的方式来获取用户所需的信息. 随着多标签的应用场景不断增多, 由此带来的标签碰撞问题已成为影响 RFID 标签识别效率的瓶颈问题. 因此, 一个高效的标签防碰撞算法对于 RFID 技术的发展是至关重要的.

RFID 标签防碰撞算法可分为基于 Aloha 的防碰撞算法^[2,3]和基于树的防碰撞算法^[4-7]. 基于 Aloha 防碰撞算法是一种非确定性的算法, 在标签数量较少时具有较高的效率, 但其无法确保 100% 的标签识别率. 基于树的防碰撞算法, 由于其确定性的查找思想, 可以保证理论上所有标签被成功识别. 目前主流的 RFID 树形防碰撞算法通常讨论的是单阅读器在面对多标签时如何获得更低的时延和更少的总时隙数量, 然而随着 RFID 系统广泛地应用在工业物联网的复杂环境中. 由于较长的标签 ID 号和更多的阅读器数量, 此时传统的树形算法确认一个标签需要花费较高的代价, 这是由于单个阅读器广播时只能通过自身当前时隙的广播结果和位追踪技术所判别的碰撞电位而产生下一个广播前缀所造成的. 在每个阅读器查找标签数量相同的情况下, 更多的阅读器参与广播会迫使每个阅读器使用更深层的树形结构存储标签的每个电位, 这无疑大大降低了算法的效率. 针对以上问题, 本文提出了一种阅读器间协作的 RFID 标签树形防碰撞算法 MRCT. MRCT 的主要贡献如下: 我们发现单个阅读器的广播结果对其他阅读器有正向的增益, 从多阅读器相互协助的角度, 较为充分地利用了阅读器广播时隙的价值. 此外, 树形算法在开始广播阶段容易产生较多的碰撞时隙, 我们考虑到多阅读器标签识别场景的特殊性, 将初始广播层锁定在次末层, 避免了大量潜在的碰撞时隙.

2 相关工作

根据每次广播时标签响应结果的不同, 广播时隙分为空闲时隙, 可读时隙, 碰撞时隙三种. 阅读器的单次广播时隙内有多个标签响应的时隙为碰撞时隙. 此时阅读器无法识别其中的任意一个标签, 需要进一步的广播从而确认标签; 单次广播仅有单个标签响应的时隙为可读时隙, 此时阅读器获取到唯一标签标识, 并可对标签进行读写或静默操作; 当广播范围内无标签响应时, 此次广播时隙为空闲时隙.

位追踪技术是基于曼切斯特编码的一种追踪碰撞电位的技术. BCT (Back Tracking Tree) 和 QT (Query

Tree) 算法是基于位追踪技术中经典的两大算法. 其原理分别在文献^[6,7]中有详细的介绍. 在基于这两者的后续的研究中, 文献^[8]证明了在分叉数不变的情况下, 二叉树的搜索效率最高. 但由于分叉数只能是 2 的倍数, 许多学者尝试结合二叉树和四叉树来提升算法的效率, 混合式查询树^[9]是基于此类改进中较为著名的算法, 其基本原理是在 QT 的基础上, 通过广播结果决定采用四叉或二叉树的形式进行遍历. 近两年来, 通过概率与改进的 QT 结合逐渐成为研究热点, BE-MDT (Bayesian Tag Estimation With Modified Dynamic Tree)^[10]通过贝叶斯估计原则来估计竞争标签的数量, 随后文献^[11]通过对前者的改进并将混合式查询树进行结合, 达到了 45% 的最优效率. 最优查询追踪树^[12]从将所有标签分离成更小的集合这一角度对 QT 进行了改进. 最优查询追踪树首先根据广播过程中的标签的碰撞位的位置估计标签的数量, 根据此数量分裂出最优的初始子集, 然后通过跟踪查询树根据最优初始子集数量生成合适的查询, 使得分散在初始查询上的标签数量近似服从均匀分布. 最后, 查询跟踪树根据冲突位将标签进一步分裂成两个子集. 由于整个识别过程中阅读器不需要记忆数据, 使得其在硬件方面具有更低复杂度. 最近, 文献^[13]提出了一种基于概率的查询树算法 PQT (Probability-based Query Tree), 其通过标签数量估计出最优广播层在广播的开始阶段尽可能的减少碰撞的产生, 其最大效率可达 53% 左右. 据我们所知, 这是可实现算法中迄今为止效率最高的改进.

3 多阅读器协作的 RFID 标签树形防碰撞算法

3.1 基本思路

3.1.1 算法前提

本文遵循文献^[14]中相同的工作条件: RFID 系统通信信道具备控制信道和数据信道. 控制信道用于阅读器间的通信, 数据信道用于阅读器与标签之间的通信. 控制信道的覆盖范围必须保证所有在数据信道可能产生相互干扰的阅读器之间能够通过控制信道互相通信. 可以通过提高控制信道的发射功率保证控制信道的通信范围大于数据信道的通信范围. 控制信道是整个 RFID 系统频段的一部分, 其广播范围覆盖系统中其他阅读器, 和数据信道相互之间不会产生干扰. 阅读器部署在其他阅读器的数据信道范围之外, 因此本文中阅读器之间的通信在以上前提下被认为是理想的. 图 1 是本文的工作环境示例.

3.1.2 首轮广播前缀

假设阅读器的数量为 R , 标签长度为 N , 标签大致数量为 T . 则在首轮广播中, R 个阅读器同时对范围内所有标签进行广播. 已知在树形结构的第一层含有 2 个

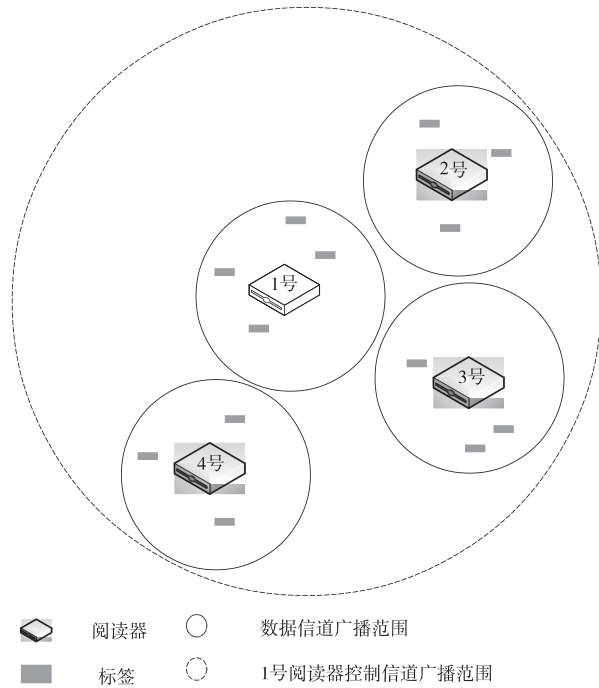


图1 MRCT工作环境示例图

节点,第二层含有 2^2 个节点,第 N 层含有 2^N 个节点.每个阅读器在广播时,可供选择的节点的总数为 2^N ,从中选择一个节点时,每一个节点被选中的可能性即为 $\frac{1}{2^N}$.当选择二叉树层数为第 N 层时,标签碰撞的概率为0,空闲时隙的概率为 $\frac{T}{2^N \cdot R}$.本文的广播策略将广播前缀锁定在二叉树的第 $N-1$ 层.锁层广播的详细原因将在3.1.3节中作以说明.根据位追踪技术原理,我们让阅读器在正式查找标签前首先从长度为 N 的全‘1’中作为“测试轮广播”,测试轮广播的目的是获取标签发生碰撞的所有碰撞位,从而避免广播非碰撞位包含的潜在无效节点.通过确认首个分叉层,我们从中随机选择一个节点作为该阅读器的初始广播前缀,并通过3.1.3中的优化策略不断调整待广播前缀的优先级.

3.1.3 最优广播队列的生成

我们让阅读器在每轮数据信道通信结束时通过控制信道向范围内其他所有阅读器发送本阅读器的广播结果和广播前缀,由于标签的每一位ID在阅读器中映射成树形结构中的一个节点,阅读器收到其他阅读器的广播前缀后,根据广播结果调整前缀在待广播队列中的权值,前缀的权值表示其可能含有的标签数量.

由于前缀选择的层数锁定在第 $N-1$ 层,要得到所有待广播节点初始的权值,则首先应求出第 N 层的节点的概率.假设待广播节点 A 包含标签的概率为 P_A 且标签服从均匀分布,由于每一个待广播节点只包含两

个子节点,使用 P_B 和 P_C 表示其子节点包含标签的概率.很显然, A 节点的概率取决于 B 节点和 C 节点的概率,且在未知标签分布的情况, P_B 和 P_A 是完全等价的,因此有 $P_B = P_C = \frac{T}{R \cdot 2^N}$.当 A 节点不包含标签时,仅存在一种情况,即为 B 节点和 C 节点同时不包含标签.设 $P_B = P_C = P$,可求出:

$$P_A = 1 - (1 - P)^2 \quad (1)$$

将 $P = \frac{T}{R \cdot 2^N}$ 带入式(1),得到:

$$P_A = 1 - \left(1 - \frac{T}{R \cdot 2^N}\right)^2 \quad (2)$$

严格来说, B 节点存在ID号与 C 节点存在ID号这两个事件并非是相互独立的,因此不满足独立事件的概率乘法法则.但在基数较大的情况下,这两个事件的相关性非常小,因此可以近似的看做两个事件相互独立,并依照概率乘法法则得出存在一定的误差的结果,但所有误差处于可控范围内.有关误差的内容将在性能分析一节中详细讲解.

下面介绍待广播节点队列的权值调整策略:当某一阅读器广播结果为碰撞时隙时,其他阅读器将该节点的权值减小至0,并将该节点从待广播节点队列中移除.此时该节点所包含的所有标签都不在当前阅读器的广播范围内,因此该节点对于当前阅读器来说是无效节点,应避免广播.当某一阅读器广播结果为空闲时隙时,其他阅读器当前节点的权值变化为 $1 - \left(1 - \frac{T}{(R-1) \cdot 2^N}\right)^2$,可以看出,当越多数量的阅读器对某一节点标记为空闲时隙时,该式的后项越趋近于0,即阅读器当前节点包含标签的概率越趋近于1.极端情况是当 $R-1$ 个阅读器将同一节点标记为空闲时隙,此时公式2的后项为最小值,整体得到最大值,该节点将成为优先级最高的待广播节点.当某一阅读器广播结果为可读时隙,对于当前阅读器来说有 $P_B = 0$,即 $P_A = P_C = \frac{T}{R \cdot 2^N}$,当前阅读器将标签所在的节点从其他阅读器待广播队列中删除,并且递归检查其父节点是否为空,若为空则将其父节点也从待广播队列中删除.阅读器在完成单次广播后,会将当前广播前缀从待广播队列中删除,在开始下一轮广播之前,阅读器查询自身待广播队列中权值最高的一项,若有多个节点同时处在最高优先级时,阅读器将从多个同优先级的前缀中随机选择一个作为次轮广播前缀.

3.2 MRCT 算法步骤

MRCT的算法步骤大致分为两个部分:

(1) 通过位追踪技术识别所有碰撞电位,阅读器将层

数锁定在第 $N-1$ 层并随机选择一个前缀进行首轮广播.

(2) 阅读器在每一次广播后通过控制信道交换广播前缀和广播结果,阅读器通过以上信息调整自身待广播节点的权值并从中选择权值最高的一项作为下一轮广播前缀,直至所有标签完成识别.

MRCT 算法的伪代码如下:

算法 1 MRCT 伪代码

```

AdjustNodePriority
Input: prefix, result, N, T, R
1. if result = =0 //碰撞时隙阅读器标志位
2.   prefixprobability = 0
3. else if result = =1 //可读时隙阅读器标志位
4.   prefixprobability = T/(R * 2^N)
5.   remove prefix from childprefix[]
6. If both childprefix has been removed
7.   remove prefix from prefix[]
8. endif
9. elseif result = =2 //空闲时隙阅读器标志位
10. prefixprobability = 1 - (1 - T/((R - 1) * 2^N))^2
11.   endif
12.   nextprefix = prefix has the highest probability
13.   return nextprefix
InitializeNode
Input: N, T, R
14. n = N - 1
15. counter, childcounter = 0
16. while counter < = 2^n
17.   prefix[counter] = n * '0' + binary(counter)
18.   prefixprobability = 1 - (1 - T/(R * 2^N))^2
19. end while
20. while childcounter < = 2^n
21.   childprefix[childcounter] = N * '0' + binary(childcounter)
22. End while
23. return prefix[], childprefix[]
MRCT
Input: N, T, R
24. prefix[], childprefix[] = InitializeNode(N, T, R)
25. prefix[] = prefix[] - Manchester(N, T, R)
26. while tags to be identified:
27.   readers broadcast with prefix using data channel
28.   readers broadcast using control channel
29. nextprefix = AdjustNodePriority(prefix, result)
30. end while

```

3.3 MRCT 算法实例

我们选取了三个阅读器和十二个标签的场景. 标签“0000”, “0001”, “0100”, “1100”分布在 1 号阅读器的广播范围内, “0010”, “0011”, “1110”, “1111”标签分布在 2 号阅读器的广播范围内, “0111”, “1010”, “1011”, “1101”标签分布在 3 号阅读器的广播范围内. 所有阅读器生成长度为 3 的待广播前缀队列, 依次从

“000”, “001”直至“111”共 8 个. 在首轮广播中, 三个阅读器同时广播“1111”, 根据位追踪技术原理, 用 X 表示碰撞电位, 1 号阅读器收到“XX0X”, 同时 2 号阅读器收到“XX1X”, 3 号阅读器收到“XXXX”. 此时说明三个阅读器首轮广播同时发生了标签碰撞, 此时根据非碰撞电位的信息, 1 号阅读器从待广播前缀队列中删除第三位为非“0”电位的前缀, 即“001”, “011”, “101”, “111”四个前缀, 此时, 1 号阅读器待广播前缀队列剩余“000”, “010”, “100”, “110”四个前缀, 阅读器从中随机选择一个作为下一轮前缀进行广播, 假设此时 1 号阅读器随机产生的下一轮的广播前缀为“000”, 标签响应“000X”, 1 号阅读器进一步遍历查找到标签“0000”和“0001”. 此时 1 号阅读器将“000”, “碰撞时隙”发送至 2 号和 3 号阅读器, 此时两阅读器的最优广播队列将同时发生将“000”节点移除. 同时 1 号阅读器由控制信道收到 2 号和 3 号阅读器交互信息: “111”, “碰撞时隙”, “110”, “可读时隙”. 根据 3.1.3 中的最优广播前缀队列的排序原则, 1 号阅读器根据 2 号阅读器共享的信息将“111”节点从带广播队列中删除, 选择概率最高的节点“110”进行广播.

4 算法效率分析

4.1 误差分析

本文在 3.1.3 中使用乘法计算两个非独立的事件的概率, 由此将会带来误差, 本节将证明误差处于可控范围内, 且不会影响算法效率.

已知概率函数为:

$$1 - P_n = (1 - P_A)^{2^{n-n}} \quad (3)$$

求得其一阶导数和二阶导数分别为:

$$\begin{aligned}
 (1 - P_n)' &= (1 - P_A)^{2^{n-n}} \cdot 2^{n-n} \ln(1 - P_A) \ln \frac{1}{2} \\
 (1 - P_n)'' &= (1 - P_A)^{2^{n-n}} 2^{N-n} (2^{N-n} \ln(1 - P_A) + 1) \\
 &\quad \cdot \ln(1 - P_A) \left(\ln \frac{1}{2} \right)^2
 \end{aligned} \quad (4)$$

令其二阶导数等于 0, 可得到:

$$2^n = 2^N \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - P_A} \right) \quad (5)$$

因为 n 恒大于 0, 若要 P_A 误差取得最大值, 则有 P_A 取得最小值, 此时 n 值最小, 对应 2^n 的值也最小. 即标签数量 $M_h = 1$ 时, 误差最大. 将 $P_A = \frac{M_h}{2^N}$ 代入式(5):

$$2^n = \frac{\ln(2^N) - \ln(2^N - M_h)}{\left(\frac{1}{2} \right)^N} \quad (6)$$

将 $M_h = 1$ 代入式(6), 将 N 趋近于无穷大得到:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} 2^n = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\ln(2^N) - \ln(2^N - 1)}{\left(\frac{1}{2}\right)^N} = 1 \quad (7)$$

$$\Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} n = 0$$

将式(5)代入式(3)得到误差最大值恒为 $\frac{1}{e}$,约等于0.3678.我们通过实验发现,这一误差随着标签数量的增长会迅速的下降,当单一阅读器的标签数量大于5后,误差会降至0.02以下.当标签数量为1~5时,此时概率的误差较大,但由于MRCT首先会根据位追踪技术剔除无效节点,因此此时的概率误差并不会对MRCT造成影响.仅有极少数情况会误导阅读器选择无标签的节点进行广播,因此可以得出结论,概率的误差始终在可控范围内.

4.2 总时隙数量

总时隙数量是指单个阅读器在查找标签的过程中,所进行广播的总次数,MRCT的总时隙数量为待广播队列的初始值 2^{N-1} 减去测试轮非碰撞电位的节点数量,再减去每轮广播后其他阅读器为碰撞时隙且该节点对于接收阅读器非无效节点的节点数量,最后减去其他阅读器为可读时隙时删除了标签节点使得该节点为空的节点.已知标签ID号长度为 N ,阅读器数量为 R ,每个阅读器需要查找的标签数量大致为 T ,我们使用 S_T 表示MRCT的单个阅读器的总时隙数量, M_1 表示测试轮广播剔除的无效节点数量,使用 M_1 表示每个阅读器对于接收阅读器为有效节点的碰撞时隙数量, M_2 表示每个阅读器为可读时隙时对于接收阅读器能够剔除的无效节点数量,则总时隙数量可以表示为:

$$S_T = 2^{N-1} - M_1 - (R-1) \cdot M_2 - (R-1) \cdot M_3 \quad (8)$$

首先讨论 M_1 与标签数量 T 的关系,根据位追踪技术原理,对于二叉树的每一层来说,只有当前层数的标签ID号全为“0”或全为“1”时,阅读器才能收到唯一编码,并剔除总节点数的 $\frac{1}{2}$,当出现第二个唯一编码时,则可以继续剔除 $\frac{1}{4}$ 无效节点,依次类推,我们使用 k 表示位追踪技术能够确认的唯一ID号个数,则可以剔除的无效节点数量可以表示为:

$$M_1 = 2^{N-1} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \dots + \frac{1}{2^k} \right) \quad (9)$$

其中:

$$k \in [0, N-1]$$

当 $k=0$ 时,此时阅读器收到 N 个碰撞电位,此时阅读器无法通过此轮广播剔除任何无效节点,当 $k=N-1$ 时,阅读器收到的反馈中从1至 $N-1$ 长度的每一位都能得到唯一编码,此时能够剔除当前节点外的所有节点,当 $k=N$ 时,此时阅读器范围内仅有一个标签,剔

除节点与 $k=N-1$ 相同,由于此种情况无实际意义,故不纳入讨论范围.可以发现,测试轮广播能够剔除节点的数量仅与碰撞电位的数量有关,而与碰撞电位出现的顺序无关,在这种前提下,对于二叉树的每一层,能否出现全“0”或全“1”编码问题,即在 N 重的 T 次实验中,取得全“0”或全“1”的概率,由于每次实验结果是只具有两种互斥结果的离散型随机事件,因此这一问题是从二项分布的,有 $X \sim B(N, P)$:

$$P(X=k) = C_N^k \cdot p^k \cdot (1-p)^{N-k} \quad (10)$$

将 p 由 T 表示并通过该分布求得期望后可求得 M_1 :

$$M_1 = 2^{N-1} - 2^{N - \sum_{k=0}^{N-1} [C_N^k \cdot \left(\frac{T}{2^k}\right)^k \cdot (1 - \frac{T}{2^k})^{N-k}]} \cdot k - 1 \quad (11)$$

接下来对 M_2 和 M_3 进行求解, M_2 为单个阅读器为碰撞时隙时对于接收阅读器能够剔除的节点数量,根据4.2中的原则,我们使用第 N 层的两个子节点使得 $N-1$ 层父节点为碰撞节点的概率乘以单个阅读器的标签数量来表示 M_2 :

$$M_2 = 2^{N-1} \cdot \frac{2}{2^N - (R-1) \cdot T} \cdot \frac{1}{2^N - (R-1) \cdot T - 1} \quad (12)$$

同理求得 M_3 :

$$M_3 = C_{R-1}^2 \cdot 2^{N-1} \cdot \left(\frac{2}{2^N - (R-1) \cdot T} \right)^2 \quad (13)$$

将式(11),式(12),式(13)代入式(8),求得总时隙数量为:

$$S_T = 2^{N-1} \cdot \left\{ 1 - 2^{-2^{N(T-1)} \sum_{k=0}^{N-1} [k(2^{T-1}-1)^{k+1}]} - \frac{2(R-1)}{2^N - (R-1) \cdot T} \right. \\ \left. \cdot \left[\frac{1}{2^N - (R-1) \cdot T - 1} + \frac{2C_{R-1}^2}{2^N - (R-1) \cdot T} \right] \right\} \quad (14)$$

4.3 吞吐率与通信复杂度

吞吐率 η ,又称作算法识别效率,是阅读器需查找的标签与查询次数的比值,是衡量树形结构防碰撞算法的关键指标之一,MRCT的吞吐率可表示为:

$$\eta = \frac{T}{S_T} \quad (15)$$

通信复杂度是识别所有标签所需要传输的总位数,使用 C 表示.MRCT在单次搜索中,阅读器通过数据信道广播标签ID号前缀,若标签自身ID号与广播前缀相匹配,则回传剩余ID号,两者之和即为标签的全长,完成单次搜索后,阅读器通过控制信道将前缀与广播结果发送至其他阅读器,广播前缀的长度 $N-1$,我们使用“0”,“1”,“2”分别表示不同的广播结果,因此两信道的通信复杂度同为标签的ID号长度乘以总时隙数量.MRCT的总通信复杂度(C_{total})为数据信道通信开销

加上控制信道通信开销之和:

$$C_T = 2N \cdot S_T \quad (16)$$

5 仿真实验结果

我们对 96 位标签 ID 号进行了仿真实验,已知 96 位 ID 最多可容纳 2^{96} 个标签,我们将区间 $[0, 1000]$ 进行了 10 等分,取 10 个标签数量(T)的值,采用 PQT、BCT、BE-MDT 三种算法分别遍历 200 次并求得每种算法的单阅读器总时隙数量的平均值作为对比,MRCT 采用 3~20 个阅读器,每个阅读器数量遍历 100 次并计算平均值.最终得出四种算法的总时隙数量 $S(T)$ 、吞吐量 $\eta(T)$ 和通讯复杂度 $C(T)$,仿真结果如图 2~图 5 所示.

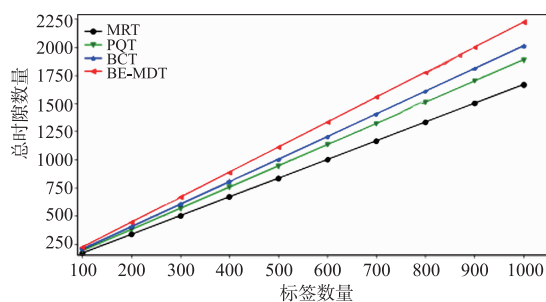


图2 总时隙数量对比图

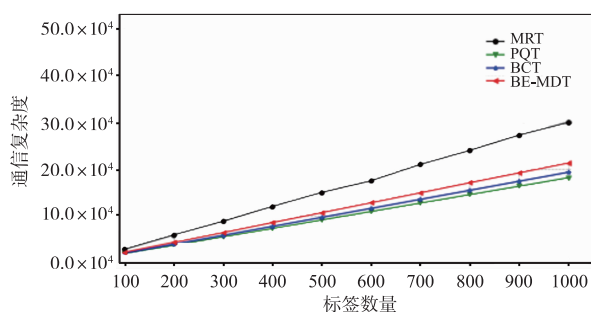


图3 通信复杂度对比图

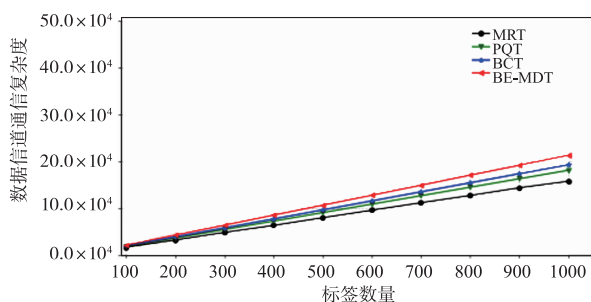


图4 数据信道通信复杂度对比图

由图 2 的实验结果可以看出,MRCT 的总时隙数量明显低于其他三种算法,算法的性能较为稳定,吞吐率的平均值达到了 59.9%。虽然系统整体的通信复杂度略高于其他树形算法,这是由于 MRCT 有两个信道造成的。如图 5 所示,由于 MRCT 较高的标签识别效率,仅与

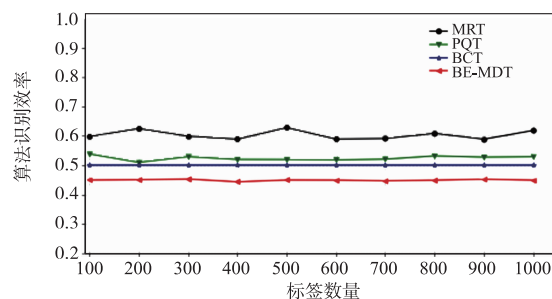


图5 吞吐量对比图

标签交互的数据信道和与阅读器交互的控制信道的通信复杂度都低于以上算法,因此 MRCT 在降低总时隙数量和提升吞吐量有较大效果。

6 结论

本文针对 RFID 系统中标签碰撞的问题进行了探讨,我们提出了一种多阅读器场景下的 RFID 系统标签防碰撞算法。MRCT 从阅读器间相互协作的角度对 RFID 标签识别方法进行了改进,通过共享的信息不断优化自身树形结构,从而从一定程度上缓解多阅读器情境下,识别效率较低的问题。相较于以往的树形结构的标签防碰撞算法,MRCT 在很大程度上减少了标签碰撞问题和无效节点的广播,从而提升了算法的效率。仿真实验结果表明,MRCT 的标签平均识别效率为 59.9%,在总时隙数量、吞吐量方面有一定优势。

参考文献

- [1] Weinstein R. RFID: A technical overview and its application to the enterprise [J]. IT professional, 2005, 7(3): 27-33.
- [2] Watkins C J C H, Dayan P. Q-learning [J]. Machine learning, 1992, 8(3-4): 279-292.
- [3] He Y, Wang X. An ALOHA-based improved anti-collision algorithm for RFID systems [J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(5): 152-158.
- [4] 苏建, 许若钰, 姚永雷, 等. 基于比特查询的多进制树标签防碰撞识别协议 [J]. 电子学报, 2019, 47(2): 422-427. SU Jian, XU Ruo-yu, YAO Yong-lei, ZHUANG Wei, WANG Bao-wei. Bit query based M-ary tree anti-collision identification protocol for RFID tags [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(2): 422-427. (in Chinese)
- [5] Su J, Sheng Z, Wen G, et al. A time efficient tag identification algorithm using dual prefix probe scheme (DPSS) [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(3): 386-389.
- [6] Capetanakis J. Tree algorithms for packet broadcast channels [J]. IEEE transactions on information theory, 1979, 25(5): 505-515.
- [7] Law C, Lee K, Siu K Y. Efficient memoryless protocol for

- tag identification [A]. Proceedings of the 4th international workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications [C]. New York; 2000. 75 – 84.
- [8] Mathys P, Flajolet P. Q-ary collision resolution algorithms in random-access systems with free or blocked channel access [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1985, 31(2): 217 – 243.
- [9] Ryu J, Lee H, Seok Y, et al. A hybrid query tree protocol for tag collision arbitration in RFID systems [A]. IEEE International Conference on Communications [C]. Glasgow: IEEE, 2007. 5981 – 5986.
- [10] Annur R, Srichavengsup W, Nakpeerayuth S, et al. Bayesian method of slotted aloha based anti-collision protocol for RFID systems [A]. IEEE Twelfth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems [C]. Taiwan; IEEE, 2015. 87 – 90.
- [11] Wijayasekara S K, Nakpeerayuth S, Annur R, et al. A collision resolution algorithm for RFID using modified dynamic tree with bayesian tag estimation [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(11): 2238 – 2241.
- [12] Lai Y C, Hsiao L Y, Chen H J, et al. A novel query tree protocol with bit tracking in RFID tag identification [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 12(10): 2063 – 2075.
- [13] Liang X, Guo Y. A probability-based anti-collision protocol for RFID tag identification [J]. Wireless Personal Communications, 2019, 107(1): 57 – 79.
- [14] 杨晓明, 杜力, 王佳昊, 等. 基于身份竞争与协作的 RFID 阅读器防碰撞算法 [J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(5): 764 – 768.

作者简介



宋建华 女, 1973 年出生, 湖北襄阳人. 现为湖北大学副教授. 湖北省教育信息化工程技术研究中心、湖北省软件工程技术研究中心、湖北省智能政务与人工智能应用工程研究中心成员. 主要研究方向为信息安全与网络安全.

E-mail: sjhhu@126.com



何帅 (通信作者) 男, 1994 年 2 月出生, 新疆乌鲁木齐人. 2016 年在湖北大学计算机与信息工程学院获得工学学士学位. 现为湖北大学计信学院硕士研究生, 主要研究方向为工业物联网和网络空间安全.

E-mail: optimus_he@126.com



姚慧 女, 1995 年出生, 湖北荆州人. 2018 年在湖北大学计算机与信息工程学院获得理学学士学位, 现为湖北大学计算机与信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为信息安全和网络安全.

E-mail: yaoh.ly@foxmail.com