

# 分组 $N$ 叉跟踪树型 RFID 防碰撞算法研究

王鑫<sup>1</sup>, 贾庆轩<sup>1</sup>, 高欣<sup>1</sup>, 陈钢<sup>1</sup>, 赵兵<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学自动化学院, 北京 100876; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 针对无线射频识别(RFID, Radio Frequency Identification)标签多路访问产生的信号碰撞问题, 提出了基于碰撞位跟踪的分组  $N$  叉跟踪树型 RFID 防碰撞算法(CBGN, Collision Bit Tracking Tree Algorithm Based on Grouping  $N$ -ray). 利用极大似然位估算法(MLE, Maximum Likelihood Bit Estimation)估算应用环境下标签的数量. 在 MLE 基础上根据标签标识(ID)将标签分配在不同分组内, 并利用  $N$  叉树识别分组后的标签, CBGN 算法通过分组及  $N$  叉识别两种策略相结合来降低碰撞概率及识别延时. 最后, 以通信复杂度为基准对不同  $N$  叉树下的最优分组系数进行了推导, 从而获得最优  $N$  值及对应分组系数. 理论分析和仿真实验表明, CBGN 算法具有鲁棒性好和通信复杂度低的特点.

**关键词:** 无线射频识别; 防碰撞;  $N$  叉; 吞吐量

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2016)02-0437-08

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

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.027

## Research on Grouping $N$ -ray Tracking Tree RFID Anti-Collision Algorithm

WANG Xin<sup>1</sup>, JIA Qing-xuan<sup>1</sup>, GAO Xin<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, ZHAO Bing<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2 China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** One grouping  $N$ -ray tracking tree RFID(Radio Frequency Identification) anti-collision algorithm (CBGN, Collision Bit Tracking Tree Algorithm Based on Grouping  $N$ -ray) for signals collision caused by RFID(radio frequency identification) tags multiple access of shared channel is proposed. We estimated the number of tags by the maximum likelihood bit estimation method (MLE, Maximum Likelihood Bit Estimation). Based on MLE, we allocated the set of tags into different groups through the tag identification, identified grouped tags via  $N$ -ray tree, and reduced recognition time by CBGN under combining grouping and  $N$ -ray identify. Finally, we derived the optimal grouping coefficient of different  $N$ -ray tree using the average identify tag cost time in communication link, further obtained the optimal  $N$  values and the corresponding optimal coefficient of clusters. Our theoretical analysis and simulation results showed that CBGN algorithm had the characteristics of strong robustness and low communication complexity.

**Key words:** radio frequency identification; anti-collision;  $N$ -ray; throughput rate

## 1 引言

RFID(无线射频识别)作为物联网关键支撑技术, 广泛应用于物流、航空及交通运输等自动识别领域<sup>[1]</sup>, 具有远距离识别及批量读取等诸多优点. 然而, 当读写器进行批量读取时, 多标签同时响应致使信号碰撞, 从而增加了识别延迟, 阻碍了 RFID 系统在快速识别领域的大规模应用<sup>[2]</sup>. 因此, 设计高效且鲁棒性好的 RFID 防碰撞算法以加快识别速度对提高工业系统整体效率具有重要意义.

目前, RFID 防碰撞算法可分为两个范畴: ALOHA 类及树型类防碰撞算法, ALOHA 类算法标签在读写器规定帧长内选取随机时隙响应, 当帧长与标签数相等时获得最高识别效率<sup>[3,4]</sup>, 具有简单且易操作等优点. 当前该类算法的研究热点为 DFSA 算法(Dynamic Frame Timeslot Aloha), 其通过将帧长设定为标签数估算值以最优算法识别效率<sup>[5]</sup>, 标签数估算精度是导致不同 DFSA 算法识别效率差别的主要原因<sup>[6]</sup>. 文献[7]中提出了 MFML 算法(Multiframe Maximum Likelihood Tag Estimation), 其利用多识别帧信息估算标签数量, 为当

前性能最优的 DFSA 类算法. 同时, 文献 [8] 中提出了 TSA 算法 (Tree Slotted Aloha), 其利用树形分布结构对碰撞时隙内的标签进行识别, 避免了 DFSA 算法在下一帧对碰撞时隙内的标签进行识别时, 上一帧碰撞时隙之间标签的碰撞, 从而减小了识别延时. 然而, TSA 算法受帧长设定的影响较大. 树型算法分为 BT (Binary Search Tree) 类与 QT (Query Tree) 类算法, BT 类算法标签逐时隙生成随机数 (0 或 1) 以形成唯一响应路径的策略以识别标签<sup>[9,10]</sup>. QT 类算法基于标签 ID 的二进制树状结构以形成唯一响应路径的策略以识别标签, 仅需标签具有数据串对比功能, 对标签性能要求较低. 因此, 针对 QT 算法提出大量改进算法<sup>[11-14]</sup>, 但仍不可避免地产生了大量空闲时隙和碰撞时隙. 最近, 文献 [15] 中提出了 CT 算法 (Collision Track Tree), 其利用曼切斯特码 ME (Manchester Encoding) 定位碰撞位以分割碰撞集, 消除了空闲时隙, 从而极大地提高了 QT 算法的识别效率. 文献 [16] 中提出了多叉树算法, 其利用多叉分割的方法降低了标签间的碰撞概率, 提高了 CT 算法的识别效率, 然而, 由于分割从根节点开始使得算法通信复杂度仍然较高.

本文提出一种分组  $N$  叉跟踪树型 RFID 防碰撞算法. 首先, 利用 MLE 算法估算应用环境下的标签数量, 其具有时耗极小的特点, 每个估算时隙仅对应 1bit 传输时长. 其次, 将标签集分布在多个分组内降低了质询树深度, 标签集分布在多个分组内相当于将标签分布于多个子树上 (每个分组对应一个子树), 采用  $N$  叉分割识别子树进一步降低了标签碰撞概率. 因此, CBGN 算法利用分组和  $N$  叉分割子树相结合的策略基本消除了空闲时隙, 并降低了标签集碰撞概率, 从而提高了识别效率. 然而, 分组数太大或太小都会导致识别延迟加大, 本文根据通信复杂度对不同  $N$  值及相应最优分组系数进行推导以使得算法识别延时最小.

## 2 CBGN 算法

CT 算法从质询树根节点开始识别使得标签碰撞概率较大. 同时, 仅利用二叉树分割导致质询树深度较深, 以上两方面原因导致 CT 算法碰撞时隙数仍然较多. 因此, 若将标签集分布在多个分组内可解决 CT 算法碰撞概率大的问题, 并将分组后标签利用多叉树算法 ( $N$  叉分割) 识别可有效降低部分分组内标签形成子树深度较深的问题, CBGN 算法利用以上两种策略以提高识别效率. 以下给出了 MLE 算法估算过程, 并提出了 CBGN 算法.

### 2.1 MLE 算法

CBGN 算法利用 MLE 算法估算标签数量. 如图 1 所示, 读写器广播 MLE 命令  $\parallel M$ , 标签接收到后生成随机

数  $r \in [0, |ID| \times M - 1]$ , 并在时隙  $r$  响应“1”. 因此, 读写器可接收到信道反馈信号  $ST_{mle}$ ,  $|ID|$  和  $M$  分别为 ID 长度及  $|ID|$  的倍数.

若在时隙  $r$  接收到“1”则表明该时隙至少有一个标签响应. 否则, 该时隙为空闲时隙, 统计空闲时隙数, 并记为  $e$ . 根据文献 [17] 可知, 当标签数为  $n$  且帧长为  $N$  时,  $e$  个时隙具有 0 个标签的概率  $P(N, e, n)$  如下:

$$P(N, e, n) = \frac{(-1)^e N! n!}{e! N^n} \sum_{j=e}^N (-1)^j \frac{(N-j)^n}{(j-e)!(N-j)!(n)!} \quad (1)$$

令  $\hat{n}$  为标签数的估算值. 则有:

$$\hat{n} = \arg \max_{n \geq |ID| \times M - e, N = |ID| \times M} (P(N, e, n)) \quad (2)$$

式 (2) 中,  $n \geq |ID| \times M - e$  是由于非空闲时隙至少对应一个标签响应.

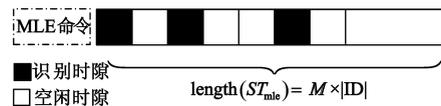


图1 MLE标签数估算法

### 2.2 CBGN 算法设计

在标签数估算基础上提出了 CBGN 算法, 算法流程如图 2 所示.

CBGN 算法执行流程如下:

(1) CBGN 算法利用标签 ID 对标签进行分组. 分组内标签利用  $N$  叉分割识别, 对每个分组内标签的识别等同于构建一个  $N$  叉树, 从而将整个识别过程分割为对多个子树的识别. 因此, 对每个子树的识别可等同为

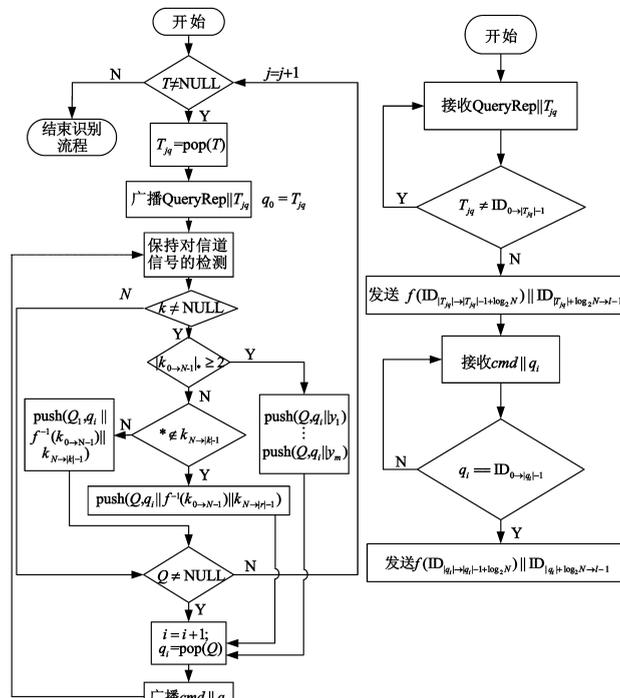


图2 CBGN算法读写器及标签的操作流程

整个识别帧的子帧,分组内标签满足 ID 前缀与确定数据串相同的特点. 定义帧质询串为分组内标签共有的部分 ID 前缀,其长度和构建方法在下文中具体给出.

令分组数包括  $h$  层的  $|u_q^h|$  组及  $h-1$  层的  $|u_q^{h-1}|$  组,  $T$  为保存所有子树的帧质询串的帧质询堆栈,  $u_q^h$  及  $u_q^{h-1}$  分别代表  $h$  层和  $h-1$  层帧质询串的集合,  $T$  的构建方法如下式:

$$\begin{aligned} S_{h-1} &= \text{btd} \{ \text{ctl}_{(\log_2 N)} \{ \text{dtb}_{(\log_2 N) \times h} \{ |u_q^h| + 1 \} \} \} \\ T &= \{ \text{dtb}_{(\log_2 N) \times h} \{ 0, \dots, |u_q^h| \}, \text{dtb}_{(\log_2 N) \times (h-1)} \\ &\quad \cdot \{ S_{h-1}, \dots, |u_q^h| + |u_q^{h-1}| \} \} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中,  $\text{dtb}_x \{ \dots \}$  为 10 进制数转  $x$  位 2 进制数运算,  $\text{btd} \{ \dots \}$  为 2 进制转 10 进制运算,  $\text{ctl}_x \{ \dots \}$  为截取 2 进制数后  $x$  位运算,  $S_{h-1}$  为  $h$  层分组边界节点的下一节点前缀. 为满足  $T$  内帧质询串涵盖对所有标签 ID 的识别质询,同时,由于  $N$  叉树  $h-1$  层的每个节点可分为  $h$  层的  $N$  个节点,则有:

$$\begin{cases} |u_q^h| + |u_q^{h-1}| = G \\ |u_q^h| + N|u_q^{h-1}| = N^h \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,  $G$  为分组数,进而可得:

$$\begin{cases} |u_q^{h-1}| = G - |u_q^h| \\ |u_q^h| = \lceil (NG - N^h) / (N - 1) \rceil \rightarrow N \times K \\ N = 2 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中,  $\lceil y \rceil \rightarrow N \times K$  为向上取整运算,使得  $y$  为  $N \times K$  的最小值. 当  $N=2$  时每个节点可实现 1 位 ID 的分割识别使得分组误差易于控制. 因此,以下不论子树识别采用  $N$  叉树的  $N$  值大小,在分组过程中都令  $N=2$  以构建  $T$ . 即式(3)中令  $N=2$  进行分组后,再利用  $N(N=2, 4, 8, \dots)$  叉树分割识别分组后的标签. 由此利用式(3)、(5)可构建  $T$ , 对分组数  $G$  的讨论在 3.2 节中具体给出.

(2) 读写器构建  $T$  后,执行  $T_{jq} = \text{pop}(T)$  并广播 QueryRep  $\parallel T_{jq}$ . QueryRep 为子帧初始化指令. 由于帧质询串为子树下标签共有的部分 ID 前缀,使得通过帧质询串可将具有与质询串同样 ID 前缀的标签规约到该子树下进行识别. 对应  $T$  中的  $|u_q^h|$  和  $|u_q^{h-1}|$  个帧质询串可构建  $G$  个子树,  $j$  代表第  $j$  个子树,利用  $T$  中帧质询串逐个识别子树,直到  $T = \text{NULL}$  时则证明所有子树识别完毕,结束识别流程.

(3) 读写器令子树初始质询串  $q_0 = T_{jq}$ ,即将  $q_0$  压入堆栈  $Q$  作为子树初始质询串. 标签接收到 QueryRep  $\parallel T_{jq}$  后,仅有 ID 满足  $T_{jq} = \text{ID}_{0 \rightarrow |T_{jq}|-1}$  的标签响应并发送 Str =  $f(\text{ID}_{|T_{jq}| \rightarrow |T_{jq}|-1 + \log_2 N}) \parallel \text{ID}_{|T_{jq}| + \log_2 N \rightarrow l-1}$ ,即首先将  $|T_{jq}| \rightarrow |T_{jq}|-1 + \log_2 N$  的 ID 利用函数  $f(x)$  转换为  $N$  位二进制数. 不满足  $T_{jq} = \text{ID}_{0 \rightarrow |T_{jq}|-1}$  的标签则不响应. 其中,  $|Str_x|$  表示数据串 Str $_x$  的长度,  $l$  为 ID 长度. 令  $x$ 、 $N$  及  $f(x)$  如下:

$$\begin{aligned} \log_2 N &= z \quad (z \in N^+) \\ x &= x_{z-1} \dots x_i \dots x_1 x_0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$f(x) = f(x)_{N-1} \dots f(x)_b \dots f(x)_1 f(x)_0$$

$f(x)$  转换算法如下:

$$\begin{aligned} &\text{for } b = 0; b \leq N-1; b++ \\ &\quad \text{if } b = \text{btd}(x_{z-1} \dots x_i \dots x_1 x_0) \\ &\quad \quad f(x)_b = 1 \\ &\quad \quad \text{else } f(x)_b = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

由此可见,利用函数  $f(x)$  可将  $z$  位 ID 转换为  $2^z$  位,利用转换后的  $2^z$  位碰撞检测可实现  $z$  位 ID 的碰撞检测,从而实现了对分组内标签的  $N$  叉分割.

(4) 读写器保持检测信道信号,令  $k = k_0 k_1 \dots k_i \dots k_{|k|-1}$  为标签集响应 Str 的混合信号,分以下几种情况进行说明:

①若响应标签集包含 0 个标签,则  $k = \text{NULL}$ ,表明该子树下没有标签. 此时  $Q = \text{NULL}$ ,则返回步骤(2).

②若响应标签集包含 1 个标签,则  $|k_{0 \rightarrow N-1}|_* \leq 1$  且  $* \notin k_{N \rightarrow |k|-1}$  ( $N$  到  $|k|-1$  位中无  $*$ ). 其中,“ $*$ ”表示碰撞位,  $|k_{0 \rightarrow N-1}|_*$  表示  $k$  中 0 到  $N-1$  位中碰撞位个数. 读写器将  $q_i \parallel f^{-1}(k_{0 \rightarrow N-1}) \parallel k_{N \rightarrow |k|-1}$  压入堆栈  $Q_1$  表示识别该标签 ID,  $f^{-1}(x)$  为  $f(x)$  的逆运算.

③若响应标签集包含多个标签则发生碰撞,分为两种情况:

(a) 若  $m = |k_{0 \rightarrow N-1}|_*$  且  $m \geq 2$ ,则  $\text{push}(Q, q_i \parallel y_1) \dots \text{push}(Q, q_i \parallel y_m)$ . 其中,  $y_i$  表示将  $k_{0 \rightarrow N-1}$  中第  $i$  个  $*$  转换为 1 且其它  $*$  转换为 0,转换后并利用  $f^{-1}(x)$  将其转换为  $y_i$ .

(b) 若  $|k_{0 \rightarrow N-1}|_* = 1$  且  $* \in k_{N \rightarrow |k|-1}$ ,令  $k_{N \rightarrow |k|-1}$  中首个碰撞位为第  $r$  ( $r > N$ ) 位,则  $\text{push}(Q, q_i \parallel f^{-1}(k_{0 \rightarrow N-1}) \parallel k_{N \rightarrow |r|-1})$ .

此时,若  $Q \neq \text{NULL}$ ,则令  $i = i + 1$  且  $q_i = \text{pop}(Q)$ ,并广播  $\text{cmd} \parallel q_i$ . cmd 为子帧内质询指令,标签接收到  $\text{cmd} \parallel q_i$  后其处理过程如步骤(3),循环执行步骤(4)直到  $Q = \text{NULL}$ ,即完成了对相应子树的识别,返回步骤(2)识别新的子树. 直到  $T = \text{NULL}$  即完成了整个识别过程.

### 3 CBN 算法性能理论分析

以下对 MLE 算法中  $M$  值的选取进行讨论,并对 CBN 算法性能进行理论分析,从而得出利用不同  $N$  叉分割识别子树情况下的最优分组系数.

#### 3.1 MLE 算法 $M$ 值选取

在实际应用环境中,可根据标签大致数给定初始  $M$  值.  $M$  选取太大或太小会浪费时延或估算不准确. 如图 3 所示为  $M=1$  且  $|ID|=96$  时对标签数的估算过程曲线,估算值在曲线峰值点处获得.

由图3可见,  $e$  越大则估算标签数越小. 当  $e=0$  且  $n > 800$  时概率最大值趋于恒定, 即  $e=0$  时导致估算结果不收敛,  $M$  的选取必须保证空闲时隙数  $e \geq 1$ . 因此, 可将  $e=1$  代入式(2)获得不同  $M$  值对应的最大估算范围, 如表1所示. 由此可利用表1根据大致标签数选定  $M$  值. 与此同时, 若操作人员面对未知环境则估算开始令  $M=1$ , 若检测到  $e=0$  则令  $M=M+1$  继续进行估算.

表1  $M$  值对应估算范围

$M$	$n$ 的范围
1	[1, 436]
2	[437, 1007]
3	[1008, 168]
4	[1629, 2282]
5	[2283, 2960]
6	[2961, 3658]
7	[3659, 4372]
8	[4373, 5082]
9	[5083, 5814]
10	[5815, 6589]

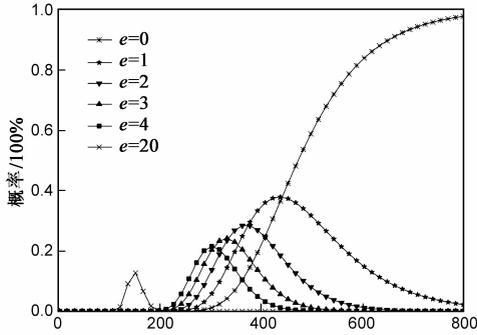


图3 MLE估算过程曲线

### 3.2 CBGN 算法理论分析

从系统识别耗时隙和通信复杂度两个层面对 CBGN 算法进行理论分析.

#### 3.2.1 CBGN 算法耗时隙分析

由于标签 ID 随机均匀分布, 标签可能属于  $G$  分组中的任一分组且标签分布在哪个分组的事件独立. 因此, 令  $B(n, 1/G, i)$  为标签数为  $n$  且分组数为  $G$  的情况下  $i$  个标签同时属于某个分组的概率, 则有:

$$B(n, 1/G, i) = \binom{n}{i} \left(\frac{1}{G}\right)^i \left(1 - \frac{1}{G}\right)^{n-i} \quad (8)$$

当  $n$  确定的情况下, 分组太小会导致标签碰撞概率太大, 分组太大则会导致空闲子树增多, 类似于 Aloha 算法中帧长与标签数相等时吞吐率达到最大. 因此, 这里假设  $G$  与  $n$  正相关,  $G$  需满足  $G \in [1, +\infty)$  以实现在  $n$  确定且满足式(8)条件下对标签的任意分布方案, 并推导最优分布. 为简化分析, 设定  $G$  为下式:

$$G = \alpha n \quad (9)$$

式(9)中,  $\alpha$  为分组系数. 令  $S_N^i$  为利用  $N$  叉树分割具有  $i$  个标签的子树所需时隙数, 则有:

$$S_N^i = \begin{cases} 1, & i=0 \text{ 或 } i=1 \\ S_N^i, & i \geq 2 \end{cases} \quad (10)$$

上式是由于即使子树下无标签, 读写器仍需广播 QueryRep ||  $T_{jq}$  进行确认. 当子树下包括的标签数  $i \geq 2$  则利用  $N$  叉树分割识别.

以下对  $i \geq 2$  时的  $S_N^i$  进行推导. 由式(6), 式(7)可见  $2^z = N(z \in N^+)$ , 当  $z=1$  时为二叉树分割, 当  $z \geq 2$  时则利用  $N=2^z$  叉树分割子树. 令  $I den(S_N^i)$  及  $Coll(S_N^i)$  分别为利用  $N$  叉树对  $i \geq 2$  个标签识别时的碰撞时隙数和可识别时隙数, 则有:

(1) 当  $z=1$  时

利用首位碰撞位分割碰撞集使得每个碰撞时隙包含两个子集<sup>[15]</sup>. 因此有:

$$S_2^i = I den(S_N^i) + Coll(S_N^i) = 2i - 1 \quad (11)$$

(2) 当  $z \geq 2$  时

建立满  $N$  叉树进行推导, 当标签数为  $n$  且分组数为  $G = \alpha n$ , 则有:

$$2^{z(h-1)} < \alpha n < 2^{zh} \quad (12)$$

结合式(5)可知, 满足式(4)的高度  $h$  如下式:

$$\hat{h} = \lceil (\log_2 \alpha n) / z \rceil | z=1 \quad (13)$$

令  $|T_{jq}^h|$  及  $|T_{jq}^{h-1}|$  分别为  $u_q^h$  与  $u_q^{h-1}$  中帧质询串的长度, 则有:

$$\begin{cases} |T_{jq}^h| = \hat{h} \\ |T_{jq}^{h-1}| = \hat{h} - 1 \\ |u_q^h| = \lceil \alpha n \rceil - |u_q^{h-1}| \\ |u_q^{h-1}| = \frac{2^{zh} - \lceil \alpha n \rceil}{2^z - 1} | z=1 \end{cases} \quad (14)$$

分组使得满子树从高度  $|T_{jq}^h|$  及  $|T_{jq}^{h-1}|$  开始质询. 因此, 可将  $u_q^h$  及  $u_q^{h-1}$  中包括子树的高度  $|T_{jq}^h|$  及  $|T_{jq}^{h-1}|$  分别等同为满  $N$  叉树的  $h=0$ , 其它高度依次类推. 根据文献[16], 令满子树  $h$  层每个节点包括  $m(m \geq 0)$  个标签的概率为  $P_m^h$ , 则有:

$$P_m^h = C_i^m C_{2^{i-1} - 2^{i-1} - 2^{i-1} - \dots}^m C_{2^{i-1} - 2^{i-1} - 2^{i-1} - \dots}^{i-m} / C_{2^{i-1} - 2^{i-1} - 2^{i-1} - \dots}^m C_{2^{i-1} - 2^{i-1} - 2^{i-1} - \dots}^{i-m} \quad (15)$$

进一步, 当  $h=0$  且  $i \geq 2$  时, 子树根节点为碰撞节点. 可得:

$$E(Coll(S_N^i)) = 1 + \sum_{h=1}^{i-1} \sum_{j=0}^{2^h-1} \sum_{m \geq 2} P_m^h \quad (16)$$

$$S_N^i = i + E(Coll(S_N^i)) \quad (17)$$

令  $R_{S_N^i}$  为识别所需总时隙数,  $R_{S_N^i}^{17_{jq}^h, 1u_q^h}$  及  $R_{S_N^i}^{17_{jq}^{h-1}, 1u_q^{h-1}}$  分别为识别  $u_q^h$  和  $u_q^{h-1}$  中帧质询串对应子树所需总时隙数, 结合式(10), 式(11), 式(17), 则有:

$$R_{S_N^i}(z=1) = \alpha n \left( \sum_{i=0}^1 B(n, \frac{1}{\alpha n}, i) \right)$$

$$+ \sum_{i \geq 2} \left( B(n, \frac{1}{\alpha n}, i) (2i - 1) \right) \quad (18)$$

$$R_{S_n}^{x,y} (z \geq 2) = R_{S_n}^{x,y} |_{x=|T_n^x|, y=|u_n^y|} + R_{S_n}^{x,y} |_{x=|T_n^{x-1}|, y=|u_n^{y-1}|}$$

$$R_{S_n}^{x,y} = y \left( \sum_{i=0}^1 B(n, \frac{1}{\alpha n}, i) + \sum_{i \geq 2} \left( B(n, \frac{1}{\alpha n}, i) \cdot (i + 1 + \sum_{h=1}^{l-x-1} \sum_{j=0}^{2^h-1} \sum_{m \geq 2} P_m^h) \right) \right) \quad (19)$$

### 3.2.2 CBGN 算法通信复杂度分析

通信复杂度为通信链路中识别标签平均耗时,反映了系统识别速度快慢。以下推导中参数的设置以 EPCGobleC1G2<sup>[18]</sup> 为基准,即令  $l = |ID| = 96$ ,  $|cmd| = |QueryRep| = 4$ , 数据传输率  $DR = 128\text{kbps}$ 。令  $C_{N,G}$  为标签分成  $G$  组后子树利用  $N = 2^z$  叉树进行识别的通信复杂度,则有:

(1) 当  $z = 1$  时,由分组所致帧质询串质询时隙与子树下对标签识别的质询时隙耗时相等。因此有:

$$C_{2,G} = \frac{R_{S_n} \times (l + |cmd|)}{DR \times n} \quad (20)$$

(2) 当  $z \geq 2$  时,对包含  $i = 0$  的子树识别所需交互数据长度为  $l + |QueryRep|$ ,对包含  $i \geq 1$  的子树识别每个时隙交互数据长度为  $l + |cmd| - z + 2^z$ 。因此有:

$$C_{N,G} = \frac{\alpha n \times B(n, \frac{1}{\alpha n}, i) |_{i=0} \times (l + |QueryRep|)}{DR \times n} + \frac{(l + |cmd| - z + 2^z) \times (R_{S_n} - \alpha n \times B(n, \frac{1}{\alpha n}, i) |_{i=0})}{DR \times n} \quad (21)$$

由式(21)可知,在  $N$  确定的情况下最优分组系数  $\hat{\alpha}$  应满足下式:

$$\hat{\alpha} = \underset{\alpha > 0}{\operatorname{argmin}} (C_{N,G} |_{N=2^z(z \in N^+), G=\alpha n}) \quad (22)$$

利用式(15)~(22)可得理论曲线如图4所示。图4为  $n = 650$  及  $n = 1000$  时对子树采用不同  $N$  叉树分割识别,分组系数  $\alpha$  对应的通信复杂度曲线图。

由图4可见, $\alpha$  与  $n$  无关,对应不同  $N$  值存在极小值点如表2所示;在最优  $\alpha$  的情况下, $N = 16 \setminus 8 \setminus 32 \setminus 4 \setminus 2 \setminus$

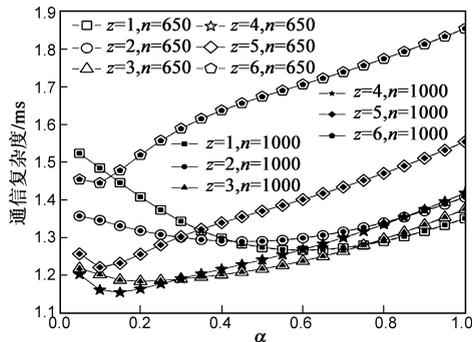


图4 分组系数  $\alpha$  变化对应的CBGN通信复杂度

64 时 CBGN 算法性能逐级递减; $\alpha$  偏离最优值范围较小时对算法性能影响不大,在等  $N$  值情况下  $\alpha$  太大或太小都会导致算法性能下降,原因为  $\alpha$  太大会导致由分组产生的无标签子树增加,太小则致使分组内标签数太多,从而增大了标签之间的碰撞概率; $N$  值的选取影响两方面因素即交互数据长度  $l + |cmd| - z + 2^z$  及交互次数,使得最低通信复杂度随  $N$  值变化而非单调变化。

表2 最优分组系数  $\alpha$

$N$	2	4	8	16	32	64
最优 $\alpha$	0.59602	0.448766	0.201743	0.13914	0.104401	0.08
通信复杂度/ms	1.27056	1.29103	1.18461	1.15538	1.22232	1.44089

## 4 仿真实验

以下对 MLE 算法估算误差及估算误差对通信复杂度的影响进行仿真分析,并对 CBGN 算法、CT 算法、理想 FSA (Frame Slotted Aloha) 算法、MFML 算法、TSA 算法及多叉树算法的性能进行仿真对比。由于 MFML 算法及 TSA 算法受初始设定帧长影响较大,为对比公平性,同样的设定初始帧长为 MLE 标签数估算值,表示为 MFML-MLE 算法及 TSA-MLE 算法;理想 FSA 为在识别开始就给定应用环境下标签精确数量的 DFSA 算法,为效率最高的 Aloha 类算法;为便于仿真图中表示,这里将多叉树算法<sup>[16]</sup> 命名为  $N$  叉树算法,与未分组情况下的 CBGN 算法相同。

### 4.1 MLE 算法性能分析

从 MLE 估算误差 ( $ESR$ ) 及其导致的 CBGN 算法通信复杂度误差 ( $TRD$ ) 两方面进行仿真实验。令  $\hat{n}$  为  $n$  的估算值,则有:

$$ESR = |n - \hat{n}| / n \quad (23)$$

$$TRD = \left| \frac{C_{N,G} |_{N=2^z, G=\alpha n} - C_{N,G} |_{N=2^z, G=\alpha \hat{n}}}{C_{N,G} |_{N=2^z, G=\alpha n}} \right| \quad (24)$$

仿真实验中, $n$  在  $100 \sim 1200$  范围内变化,对  $ESR$  及  $N = 16$  在最优分组下的 CBGN 算法  $TRD$  进行仿真。如图5所示, $ESR$  对  $TRD$  影响极小,基本可以忽略。

尽管  $M$  越大估算越准确,然而  $M$  越大估算耗时也越大。因此,有必要评估平均估算耗时。令  $T_{ES}$  为标签平均估算耗时等价转化为标签识别时隙数,则有:

$$T_{ES} = \frac{K \times |MLE| + \sum_{M=1}^K (M \times |ID|)}{n \times (|ID| + |cmd|)} \quad (25)$$

式(25)中, $K$  为估算标签所需读写器发送 MLE 命令的次数。由表2可知, $M = 10$  时可估算标签数最大范围为 6589,故可令  $M = 4\text{bit}$ ,并设定 MLE 命令  $\|M$  长度为 8bit。如图6所示为估算从  $M = 1$  开始且  $n \in [100, 4100]$  时的估算耗时仿真图。可见,在未知应用环境下,估算耗

用时隙数稳定在  $0.5\% n$  左右,与识别所需时隙数相比基本可忽略不计。

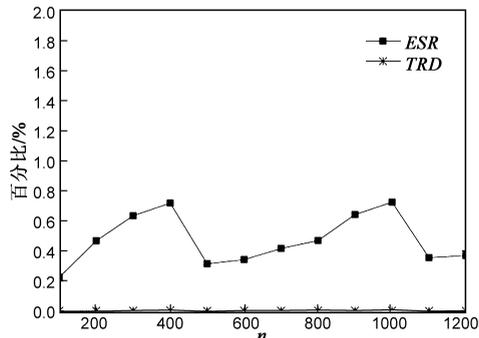


图5 MLE估算误差及对CBGN算法的影响

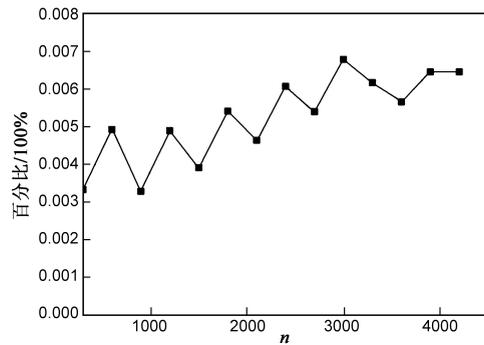


图6 MLE估算耗用时隙数

#### 4.2 CBGN 算法性能仿真实验分析

从总时隙数、吞吐量及通信复杂度三方面对以上几种算法性能利用 MATLAB 进行仿真实验并分析。读写器对 100 ~ 2000 个随机生成的标签分别利用以上几种算法进行识别,仿真结果利用蒙特卡罗法取 50 次实验平均值。其中,CBGN 算法、CT 算法、 $N$  叉树算法实验参数如 3.2.2 节给定的参数,其余算法的实验参数则依据 EPCGlobalC1G2 标准设置如下:碰撞时隙及可识别时隙耗时为  $857\mu\text{s}$ ,空闲时隙耗时为  $62\mu\text{s}$ 。

图 7 为总时隙数  $S_{\text{total}}$  仿真对比。可见,MFML-MLE 算法及理想 FSA 算法所需总时隙数相近,其由于 MFML-MLE 算法利用多识别帧信息估算标签数量,使得逐个识别帧的帧长与标签数趋近于相等。同时,以上两种算法不可避免的产生空闲时隙及标签饥饿问题导致的大量碰撞时隙,使得二者所需识别总时隙最多;TSA-MLE 算法识别总时隙数少于理想 FSA 算法,原因为 TSA-MLE 算法对每个碰撞时隙内标签继续利用 FSA 算法进行识别,避免了理想 FSA 算法在碰撞时隙内的标签在下一识别帧产生新的碰撞;CT 算法、CBGN 算法与  $N$  叉树算法采用碰撞位跟踪消除了空闲时隙,使得总时隙数少于 TSA-MLE 算法;由于 CBGN 算法将标签集分布于  $G$  组内解决了不分组导致的碰撞概率大的缺点,在同  $N$  叉分割标签集的情况下,CBGN 算法总时隙

数均少于  $N$  叉树算法;CBGN 算法  $N$  值越大则总时隙数越少,原因为  $N$  值越大则分组后利用  $N$  叉树构建的子树深度越低;CT 算法在  $N$  叉树算法中所需的总时隙数最多,原因为 CT 算法仅利用  $N=2$  叉进行识别致使标签之间碰撞概率较大;最后, $N$  值较大的  $N$  叉树算法总时隙数小于  $N$  值较小的 CBGN 算法,原因为在  $N$  值较小情况下虽然利用分组策略降低了标签之间的碰撞概率,然而, $N$  值较小也使得分组内标签碰撞概率仍然较大。

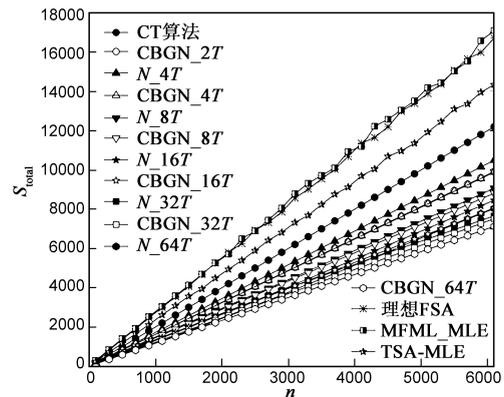


图7 总时隙数对比

图 8 为吞吐量  $TH_{\text{out}}$  仿真对比。可见,MFML-MLE 算法及理想 FSA 算法吞吐量最低,CT 算法、 $N$  叉树及 CBGN 算法基本消除了空闲时隙使得吞吐量较高;理想 FSA 算法吞吐量低于 TSA-MLE 算法,原因为在上一识别帧发生碰撞的标签在下一识别帧仍然可能产生新的碰撞;CT 算法、 $N$  叉树算法及 CBGN 算法吞吐量均优于 TSA-MLE 算法,原因为利用了 ME 编码检测碰撞位极大地消除了空闲时隙;CT 算法的吞吐量低于  $N$  叉树及 CBGN 算法,CBGN 算法的吞吐量高于等  $N$  值  $N$  叉树算法, $N$  值较大的  $N$  叉树算法吞吐量大于  $N$  值较小的 CBGN 算法,其原因与以上对总时隙数的分析相似。

图 9 为通信复杂度  $T_{\text{avg}}$  仿真对比。可见,CT 算法通

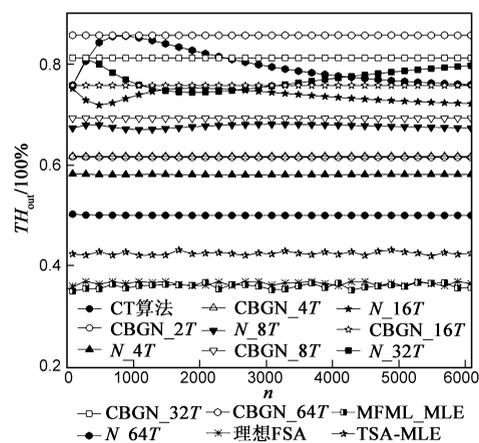


图8 吞吐量对比

信复杂度最高,虽然由图 7 可见理想 FSA 及 MFML-MLE 算法的总时隙数最多,然而,空闲时隙耗时少于碰撞时隙及可识别时隙使得 CT 算法的通信复杂度高于理想 FSA 算法;由于 TSA-MLE 算法不可避免的产生空闲时隙,而空闲时隙耗时少于碰撞时隙及可识别时隙致使其通信复杂度与 CBGN 算法 ( $N=2$ ) 相近且低于 CT 算法;在等  $N$  值的情况下,与  $N$  叉树算法相比, CBGN 算法对标签集进行了分组降低了标签碰撞概率,因而通信复杂度低于  $N$  叉树;CBGN 算法通信复杂度在  $N=16$  时最低且在  $N=64$  时最高,原因为利用  $N$  叉分割使得在  $N=64$  时每个时隙耗时较长;对应  $N$  值最优分组情况下  $N$  为 64/4/2/32/8/16 时 CBGN 算法通信复杂度越来越低,与表 2 中的理论分析值相一致;当  $N=16$  时 CBGN 算法性能达到最优通信复杂度稳定在 1.156 ~ 1.158ms 之间,略大于表 2 的理论分析值,原因为 MLE 算法估算误差而导致的分组数  $\alpha\hat{n}$  与精确值之间略有差异;由于 CBGN 算法随  $N$  值的增大导致总时隙数减少和单次交互数据长度增加,且不同  $N$  值情况下最优分组系数也不同,使得通信复杂度随  $N$  值变化而非单调变化。

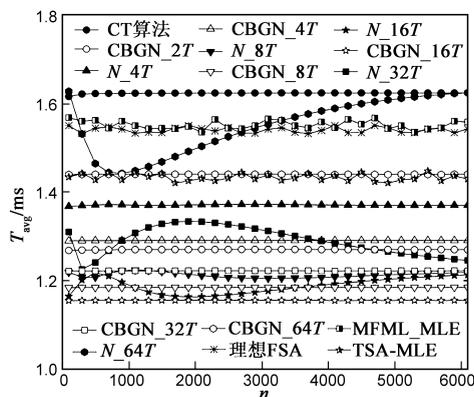


图9 通信复杂度对比

综上所述, CBGN 算法鲁棒性较好,通信复杂度基本保持恒定。同时,在等  $N$  值情况下 CBGN 算法性能均优于  $N$  叉树算法,在  $N=16$  且  $\alpha=0.13914$  时获得最低通信复杂度,稳定在 1.156 ~ 1.158ms 之间。

## 5 结语

本文采用分组策略将整个识别过程分割成对多个子树的识别,规避了树型算法碰撞概率大的问题。同时,对子树进行  $N$  叉树分割识别降低了子树的深度,从而减少了碰撞时隙发生的概率。最后,在  $N$  叉分割子树的情况下推导了最优分组系数使得 CBGN 算法获得最快识别速度,并证明了在最优分组情况下采用  $N=2^z$  ( $z=6\setminus 2\setminus 1\setminus 5\setminus 3\setminus 4$ ) 叉树识别子树时,识别速度逐级递增。理论分析和仿真实验表明, CBGN 算法在  $N=16$  且  $G=$

0.13914n 时获得最快的识别速度,算法鲁棒性较好。因此, CBGN 算法通信复杂度较低,适用于需快速识别的自动识别领域。

## 参考文献

- [1] 钱志鸿,王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012,40(5):1023-1029.  
QIAN Zhi-hong, WANG Yi-jun. IOT technology and application[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023-1029. (in Chinese)
- [2] Ullah S, Alsalih W, Alsehim A, et al. A review of tags anti-collision and localization protocols in RFID networks[J]. Journal of Medical Systems, 2012, 36(6): 4037-4050.
- [3] Klair K, Chin W, Raad R. A survey and tutorial of RFID anti-collision protocols[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2010, 12(3): 400-421.
- [4] 张小红,张留洋. RFID 防碰撞时隙应变协处理算法研究[J]. 电子学报, 2014, 42(6): 1139-1146.  
ZHANG Xiao-hong, ZHANG Liu-yang. Research on RFID anti-collision algorithm of slot responding in real-time and co-processing[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6): 1139-1146. (in Chinese)
- [5] 李萌,钱志鸿,张旭,等. 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 Meng, QIAN Zhi-hong, ZHANG Xu, et al. Slot-predicting based aloha algorithm for RFID anti-collision[J]. Journal on Communications, 2011, 32(12): 43-50. (in Chinese)
- [6] 吴海峰,曾玉. RFID 动态帧时隙 ALOHA 防冲突中的标签估计和帧长确定[J]. 自动化学报, 2010, 36(4): 620-624.  
WU Hai-feng, ZENG Yu. Tag estimate and frame length for dynamic frame slotted ALOHA anti-collision RFID system[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(4): 620-624. (in Chinese)
- [7] Javier V A, Victoria B D, Esteban E L, et al. Multiframe maximum likelihood tag estimation for RFID anti-collision protocols[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 487-496.
- [8] Bonuccelli M A, Lonetti F, Martelli F. Instant collision resolution for tag identification in RFID networks[J]. Ad Hoc Networks, 2007, 5(8): 1220-1232.
- [9] Lai Y C, Hsiao L Y. General binary tree protocol for coping with the capture effect in RFID tag identification[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(3): 208-210.
- [10] Choi J, Lee I, Du D Z. FTTP: A fast tree traversal protocol for efficient tag identification in RFID networks[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(8): 713-715.

- [11] 张学军,蔡文琦,王锁萍. 改进型自适应多叉树防碰撞算法研究[J]. 电子学报,2012,40(1):193-198.  
ZHANG Xue-jun, CAI Wen-qi, WANG Suo-ping. One anti-collision algorithm based on improved adaptive multi-tree search[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1):193-198. (in Chinese)
- [12] 丁治国,朱学永,郭立,等. 自适应多叉树防碰撞算法研究[J]. 自动化学报,2011,36(2):237-241.  
DING Zhi-guo, ZHU Xue-yong, GUO Li, et al. An adaptive anti-collision algorithm based on multi-tree search [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 36(2):237-241. (in Chinese)
- [13] Hugo L, Asier P. A fast RFID identification protocol with low tag complexity [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9):1704-1706.
- [14] Yang, C N, Lin C C. Two couple-resolution blocking protocols on adaptive query splitting for RFID tag identification [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(10):1450-1463.
- [15] Jia X L, Feng Q Y, Yu L S, et al. Stability analysis of an efficient anti-collision protocol for RFID tag identification [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(8):2285-2294.
- [16] Shin J, Jeon B, Yang D. Multiple RFID tags identification with M-ray query tree scheme. IEEE Communications Letters, 2013, 3(17):604-607.
- [17] Chen W T, Lin G H. An efficient scheme for multiple access in a RFID system [J]. IEICE Trans. Commun., 2006, E89-B(12):3386-3392.
- [18] EPCGLOBAL. EPCGLOBC1G2; Radio-Frequency identity protocol Class-1 Generation-2 UHF RFID protocol for communication at 860MHZ-960MHZ Version1. 2. 0. [EB/OL]. (2008-10-23) [2014-05-07]. [http://www.gs1.org/gsm/kc/epcglobal/uhfclg2/uhfclg2\\_1\\_2\\_0-standard-20080511.pdf](http://www.gs1.org/gsm/kc/epcglobal/uhfclg2/uhfclg2_1_2_0-standard-20080511.pdf).

## 作者简介



王鑫(通信作者) 男,1986年2月生于山西省原平市,现为北京邮电大学自动化学院博士研究生,主要研究方向为信息安全、RFID防碰撞算法及RFID无线信道安全防护机制研究。  
E-mail: buptwxin@gmail.com



贾庆轩 男,1964年7月生于山东省菏泽市,现为北京邮电大学空间机器人教育部重点实验室教授,博士研究生导师,主要研究方向为机器人学、空间机器人技术和虚拟现实技术。