

# RFID 系统动态帧时隙 ALOHA 算法的改进<sup>①</sup>

杜永兴<sup>②</sup> 白文浩<sup>③</sup> 李宝山

(内蒙古科技大学信息工程学院 包头 014000)

**摘要** 为了提高射频识别(RFID)系统的多目标识别效率,研究了识别中的标签冲突,并对主流防冲突算法——根据标签数动态调整帧长的动态帧时隙 ALOHA 算法(DFSA 算法)进行改进,建立了基于 3 级随机数适时选择机制的改进算法的数学模型。这种新的改进算法通过 3 级随机数优先级的划分,解决了碰撞时隙的重新利用,提高了算法的时隙利用率,也在 DFSA 算法的基础上大幅提高了算法吞吐率,解决了 DFSA 算法最高吞吐率 36.8% 的瓶颈。仿真结果表明,此改进算法可以使系统识别效率提高到 69.35%,从而验证了此算法的有效性,为以后防碰撞算法的研究奠定了基础。

**关键词** 动态帧时隙 ALOHA, 标签随机数, 防冲突, 射频识别(RFID)

## 0 引言

射频识别(radio frequency identification, RFID)系统可通过无线电讯号对相关目标进行数据读写,是一种非接触式自动识别技术<sup>[1]</sup>。射频识别亦称射频标签识别,其中的标签冲突问题是制约射频系统多目标识别效率的一个重要因素,如果能解决好标签冲突问题,就能提高系统识别效率。当前主要有两种基于时分多址接入(TDMA)思想的冲突解决方法,一种是基于 ALOHA(最早最基本的无线数据通信协议)的概率性防碰撞算法,另一种是基于二进制的确定性防碰撞算法<sup>[2]</sup>。动态帧时隙 ALOHA(dynamic framed slotted ALOHA, DFSA)算法识别效率最大只有 36.8%<sup>[3, 4]</sup>。为了解决最大为 36.8% 的问题,史长琼等人<sup>[5]</sup>利用标签码元序列的唯一性,提出了基于标签码元的碰撞序列进行时序选择的改进算法,该算法最低识别效率为 37.5%,最高效率可达 100%,但不能稳定、大幅地提高系统识别效率;程文青等人<sup>[6]</sup>鉴于一帧的时隙数不能无限制

增加而提出了在标签数量超过最大时隙数时将标签分组的改进算法,该算法在稳定提高系统识别效率的同时,可减少 50% 的标签读取时间,但该算法没有更进一步地大幅提高系统识别效率;史长琼等人<sup>[7]</sup>又提出了增加选择随机数,将空闲时隙转化为成功时隙,使系统识别效率提高到 45.3% 的算法,但该算法只处理空闲时隙,不处理碰撞时隙,而且未给出最佳随机数个数。针对以上改进算法对空闲时隙和碰撞时隙处理方式上的缺陷,本文提出了增加成功时隙概率,提高时隙利用率的新的改进算法。该算法不仅能对空闲时隙、碰撞时隙做出处理,同时也解决了最佳随机数个数选择问题。

## 1 动态帧时隙 ALOHA 算法(DFSA 算法)

由于帧时隙 ALOHA 算法中数据帧的长度固定不变,不能满足对标签进行动态管理的需求<sup>[8]</sup>,如果帧长小于标签数,会降低系统吞吐率;如果帧长大于标签数,会造成时隙浪费<sup>[9]</sup>,所以根据标签数动

<sup>①</sup> 国家自然科学基金(61301073)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1980 年生,博士,副教授;研究方向:信号处理;E-mail: dyxql@imust.edu.cn

<sup>③</sup> 通讯作者,E-mail: bwh517932447@126.com

(收稿日期:2014-10-28)

态调整帧长的动态帧时隙 ALOHA(DFSA)算法被提出来<sup>[10]</sup>。

### 1.1 算法基本原理

DFSA 算法的基本思想是:轮询开始前,估算待识别标签数目<sup>[4]</sup>,然后确定帧长,使帧长能一直保持动态变化<sup>[11]</sup>,如图 1 所示。

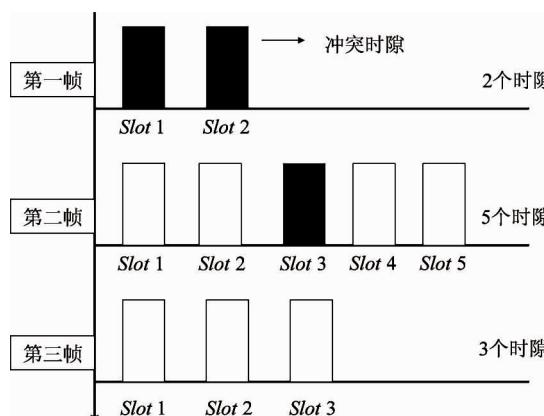


图 1 帧长调整示意图

算法具体实现步骤如下:

(1) 阅读器向标签发出识别请求,标签被激活,阅读器发送带  $L$  的查询指令( $L$  为当前帧长)。

(2) 标签的时隙计数器置 0,收到查询指令后,自身随机数发生器产生一个介于  $(1, L)$  的随机整数,每经过一个帧时隙,时隙计数器自加 1。

(3) 将时隙计数器与随机数的值进行比较,当两者相等时,开始发送数据,否则不发送。此时,若多个标签同时发送数据,发生碰撞,阅读器让发生碰撞的标签停止发送数据,等下一帧开始,时隙计数器加 1;若没有标签响应,为空闲时隙,标签时隙计数器加 1;若只有一个标签响应,成功识别,阅读器向其发出休眠指令,使其处于灭活状态,不再参与其他帧的识别。

(4) 判断标签时隙计数器的值与  $L$  是否相等,如果相等则结束这一帧的识别,重新判断待识别标签数,调整帧长,进行下一帧识别。如果不相等,重复步骤(3)。

### 1.2 算法效率分析

假设帧长为  $L$ ,待识别标签数为  $N$ ,一个时隙内同时有  $n$  个标签响应的概率服从二项分布:

$$P(x = n) = C_N^n \left(\frac{1}{L}\right)^n \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{N-n} \quad (1)$$

当  $n=1$  时,即成功时隙的概率为

$$P(x = 1) = C_N^1 \frac{1}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{N-1} = \frac{N}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{N-1} \quad (2)$$

吞吐率为

$$S = \frac{N}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{N-1} \quad (3)$$

令  $S$  对  $L$  求导<sup>[12]</sup>,即

$$\frac{dS}{dL} = \frac{N(N-1)(L-1)^{N-2}}{L^N} - \frac{N^2(L-1)^{N-1}}{L^{N+1}} \quad (4)$$

令其为 0,得  $L=N$  时, $S$  最大<sup>[13]</sup>,为 36.8%。将  $L=N$  代入,得动态帧时隙 ALOHA 的吞吐率为

$$S = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1} \quad (5)$$

吞吐率仿真图如图 2 所示。

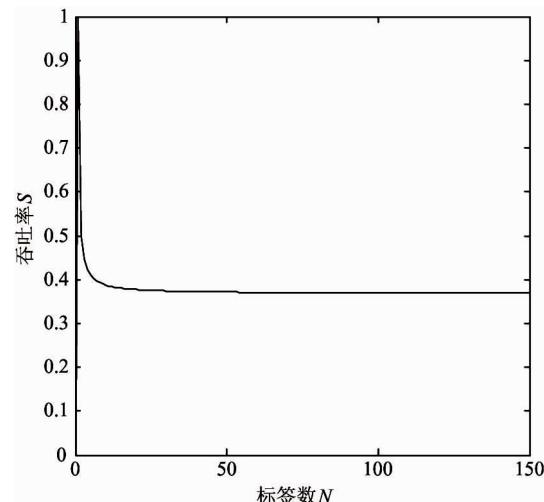


图 2 动态帧时隙 ALOHA 算法吞吐率

### 2 DFSA 算法的改进

通过对 DFSA 算法的分析可知,该算法最大成功识别率为 36.8%,那么就有 63.2% 的时隙造成浪费(空闲时隙和碰撞时隙),DFSA 算法对空闲时隙和碰撞时隙的处理是当出现空闲时隙和碰撞时隙时,阅读器就让标签停止发送数据,将该时隙摒弃,转到下一时隙,这无疑造成了时隙浪费。

## 2.1 改进算法的提出

按 DFSA 算法,阅读器发送带  $L$  的查询指令时,标签会产生一个介于  $(1, L)$  的随机数,当随机数与标签时隙计数器中的值相等时,标签发送数据。为了增加时隙利用率,改进的算法引入了多组随机数概念。下面以引入 3 组随机数来举例分析,以下称为 3 级随机数适时选择机制。3 级随机数适时选择机制,即标签在收到阅读器的查询指令后,标签产生 3 组独立的介于  $(1, L)$  的随机数。同时规定:

(1) 3 组随机数分别为  $a, b, c$ ,且相互独立,只具有先后顺序的优先级,当第一组随机数不满足时,才启用第二组随机数,同理,前两组随机数都不满足时,才启用第三组随机数。

(2) 每组随机数在应用时,都遵循 DFSA 算法的运行机制。

(3) 碰撞检测时间、每一级随机数是否满足当前需求的判断时间和数据发送的延迟时间可忽略不计。

改进算法的流程图如图 3 所示。

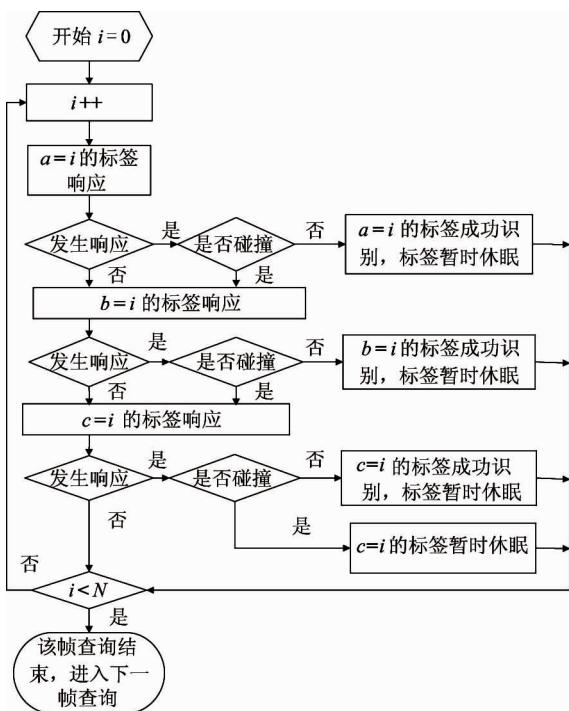


图 3 改进算法流程图

改进算法实现步骤:

第一个查询时隙:阅读器发送查询指令使  $a = 1$  的标签响应。

(1) 只有一个标签响应,成功识别,此标签休眠。

(2) 没有标签响应,此时隙为空闲时隙。阅读器发送激活  $b$  组随机数指令,然后比较  $b$  的值,使  $b = 1$  的标签响应。①成功识别,标签休眠;②空闲,阅读器发送激活  $c$  组随机数指令,比较  $c$  的值,使  $c = 1$  的标签响应,成功识别,标签休眠;空闲,进入下一时隙;发生碰撞,使  $c = 1$  的标签休眠;③发生碰撞,阅读器发送指令,使所有标签停止发送数据,并发送激活  $c$  组随机数指令,比较  $c$  的值,使  $c = 1$  的标签响应,成功识别,标签休眠;空闲,进入下一时隙;碰撞,使  $c = 1$  的标签休眠。

(3) 发生碰撞,此时隙为碰撞时隙。阅读器发送指令,使所有标签停止发送数据,并发送激活  $b$  组随机数指令,比较  $b$  的值,使  $b = 1$  的标签响应。①成功识别,标签休眠;②空闲,阅读器发送激活  $c$  组随机数指令,比较  $c$  的值,使  $c = 1$  的标签响应,成功识别,标签休眠;空闲,进入下一时隙;发生碰撞,使  $c = 1$  的标签休眠;③发生碰撞,阅读器发送指令使所有标签停止发送数据,并发送激活  $c$  组随机数指令,比较  $c$  的值,使  $c = 1$  的标签响应。成功识别,标签休眠;空闲,进入下一时隙;碰撞,使  $c = 1$  的标签休眠。

依此类推到  $N$  个时隙。

此算法的核心思想是只要产生空闲时隙或碰撞时隙,就摒弃第一级随机数,进行第二级随机数的比较,一直到第三级随机数。

## 2.2 改进算法的性能分析和仿真

### 2.2.1 改进算法的性能分析

改进算法引入 3 级随机数适时选择机制,只要任意一组随机数识别成功,该时隙就成功被利用,避免了时隙的浪费,和 DFSA 算法相比,增加了成功时隙的概率。

现用  $S$  来表示改进算法的系统效率。标签成功识别有三种可能,即第一组随机数  $a$  成功识别,概率为  $P_a$ ;第二组随机数  $b$  成功识别,概率为  $P_b$ ;第三组随机数  $c$  成功识别,概率为  $P_c$ 。由于每组独立的随机数成功识别的概率  $P$  都为 36.8%。第二组随机

数  $b$  是在第一组随机数  $a$  不成功的情况下启用, 即第一组随机数不成功的概率为  $1 - P_a$ , 同理, 第三组随机数启用是在前两组随机数都不成功的情况下(条件概率), 综合以上分析, 有

$$S = P_a + P_b + P_c \quad (6)$$

$$P_b = (1 - P_a) \times P \quad (7)$$

$$P_c = (1 - P_a) \times [(1 - P_a) \times (1 - P_a)] \times P \quad (8)$$

将  $P = 36.8\%$ ,  $P_a = 36.8\%$  代入(6)、(7)、(8)式得  $S = 36.80\% + 23.26\% + 9.29\% = 69.35\%$ 。

### 2.2.2 改进算法的仿真实验

通过多次仿真实验, 结果表明相比动态帧时隙 ALOHA 算法, 新的改进算法的吞吐率有大幅的提高, 可以达到 69.35%。而且吞吐率也基本能保持在 69.35% 左右, 验证了该算法较高和较稳定吞吐率的性能, 如图 4 所示。

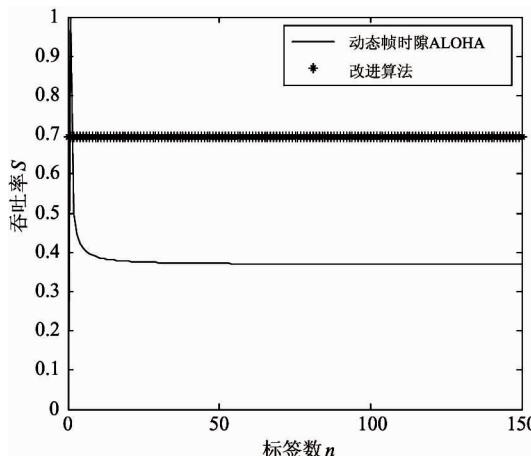


图 4 动态帧时隙 ALOHA 和改进算法比较

## 3 引入 $n$ 组随机数分析

以上举例分析了引入 3 组随机数的情况, 按照算法改进思想, 引入随机数组越多, 则系统吞吐率将越高。但是随着随机数组的增加, 系统的硬件设计复杂度也将大大增加, 因而, 能否取一个合适的  $n$  值, 以解决系统吞吐率和硬件设计复杂度的矛盾, 是需要研究的问题。

### 3.1 随机数组 $n$ 值选取分析

假设引入  $n$  组随机数, 由 2.2.1 节可知, 每组随

机数作用时识别成功率为  $P = 36.8\%$ 。 $n = 1$ , 系统识别效率为  $P_1 = P = 36.8\%$ ;  $n = 2$ , 第一组随机数不成功识别时, 第二组随机数还可以成功识别, 那么第二组随机数作用时的识别效率为  $P_2 = (1 - P) \times P$ ;  $n = 3$ , 在第一、二组随机数都不成功识别时, 第三组随机数还可以成功识别, 那么第三组随机数作用时的识别效率为  $P_3 = (1 - P) \times [(1 - P) \times (1 - P)] \times P$ ; 同理,  $n = 4$  时,  $P_4 = (1 - P) \times [(1 - P) \times (1 - P)] \times [(1 - P) \times (1 - P) \times (1 - P)] \times P$ , 一直到第  $n$  组随机数时,  $P_n = P \times (1 - P)^{n-1}$ , 其中  $t = 3 \times 2^{(n-3)}$ 。第  $n$  组随机数作用时的识别效率仿真图如图 5 所示。

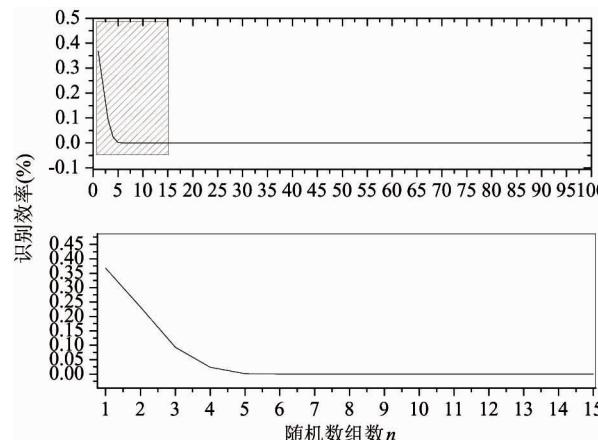


图 5 第  $n$  组随机数作用时识别效率

从图 5 看出, 随着  $n$  值的增加, 第  $n$  组随机数作用时的识别效率越来越小。而引入 1 组随机数时系统吞吐率为  $S_1 = P_1$ ; 引入 2 组随机数时系统吞吐率为  $S_2 = P_1 + P_2$ ; 引入 3 组随机数时系统吞吐率为  $S_3 = P_1 + P_2 + P_3$ ; 引入  $n$  组随机数时系统吞吐率为:

$$S_n = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (9)$$

引入  $n$  组随机数时系统吞吐率仿真图如图 6 所示。

从图 6 看出, 随着  $n$  值的增加, 系统吞吐率不断提高, 但是当  $n > 5$  时, 系统吞吐率的增加已经趋于平缓。我们用  $M$  来表示系统吞吐率的渐变量,  $M_n = S_{n+1} - S_n$ ,  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ , 将式(9)代入, 仿真如图 7 所示。

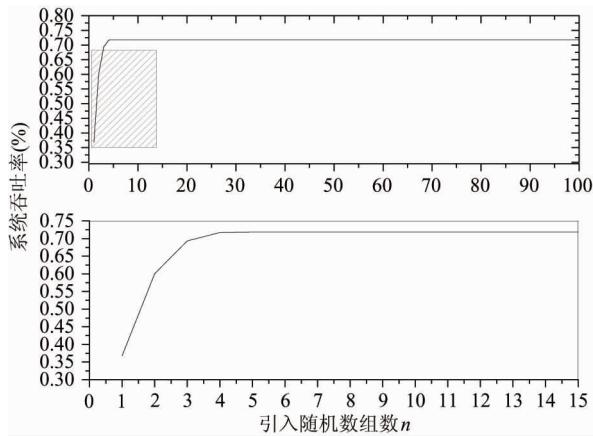
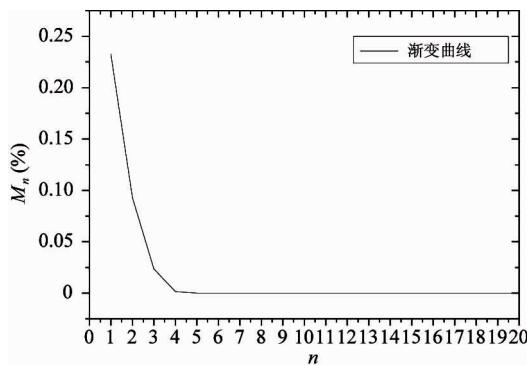
图 6 引入  $n$  组随机数对应系统吞吐率

图 7 系统吞吐率渐变

从图 7 看出,随着  $n$  的增加,系统吞吐率的增加越来越小。

### 3.2 算法复杂度分析

评价一个算法的优劣,不仅仅依靠性能指标,执行算法语句耗费的时间也是考虑的范畴之一。一个算法的执行耗费时间理论上是不能计算出来的,但我们将算法语句的执行频度,即执行次数来作为算法复杂度的时间性能来考量,假设每一行语句执行的时间为单位时间。

$$p = 0.368;$$

$$s(3) = 0.093;$$

$$y(3) = 0.6;$$

for  $n = 3 : 1 : 100$

$$s(n) = p \cdot (1 - p) \cdot ^{(3 \cdot \text{pow2}(n - 3))}; \quad ①$$

$$y(n + 1) = y(n) + s(n); \quad ②$$

end

在计算系统吞吐率算法中,语句①和语句②的

执行频度最大,该算法的时间复杂度  $T(n) = 2 \times (n - 3)$ ,该算法具有线性阶的算法复杂度,  $T(n) = O(n)$ 。随着  $n$  的增加,算法复杂度也会随着线性地增加,单就算法复杂度来说,复杂度越低,算法效率越高。

综合以上分析,有  $S_1 = 36.80\%$ ,  $S_2 = 60.06\%$ ,  $S_3 = 69.35\%$ ,  $S_4 = 71.70\%$ ,  $S_5 = 71.85\%$ , …, 又有  $S_2 - S_1 = 0.2326$ ,  $S_3 - S_2 = 0.0929$ ,  $S_4 - S_3 = 0.0235$ ,  $S_5 - S_4 = 0.0015$ , …当  $n = 4$  时,系统吞吐率变化就不明显了,当  $n = 5$  时,系统吞吐率的增加已经微乎其微,再增加  $n$  值来提高吞吐率就没有多大意义了。综合算法复杂度,选取  $n = 3$ ,此时既能最大化提高系统吞吐率,也能兼顾降低硬件设计难度。

## 4 结 论

本文从标签防冲突算法的效率分析出发,针对原动态帧时隙 ALOHA 算法最大吞吐率只有 36.8% 的问题,进行了系统的分析,建立了基于 3 级随机数适时选择机制的改进算法的数学模型。通过 3 级随机数优先级的划分,解决了碰撞时隙的重新利用问题,从而提高了算法时隙利用率,也在原动态帧时隙 ALOHA 算法的基础上大幅提高了算法吞吐率。通过性能分析和仿真结果表明,本文提出的 3 级随机数适时选择机制的新的改进算法,在遵循原算法原理的大前提下,即根据待测标签数能动态调整帧长,比原来的动态帧时隙 ALOHA 算法有更高的吞吐率,可以达到 69.35%。本文提出的改进算法为大幅提高算法吞吐率的研究与应用奠定了基础,并且在 RFID 射频领域有较好的实用性。

然而,新的改进算法在标签和阅读器的硬件设计上有一定的特殊要求,因为要增加随机数组和考虑优先级设计问题,所以在一定程度上会相对增加成本,但在一些要求极高吞吐率的特殊场合还是有一定的实用价值。如何进一步提高吞吐率和降低设计成本是将来需要进一步研究的内容。

## 参考文献

- [1] 张晖,王东辉. RFID 技术及其应用的研究. 微计算机信息, 2007, 23(11):252-254

- [ 2 ] Klair D K, Chin K, Raad R. A survey and tutorial of RFID anti-collision protocols. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2010, 12(3) :400-421
- [ 3 ] 张小红,肖娟凤. 无源 RFID 系统标签防碰撞优化算法研究. *系统仿真学报*, 2014, 26(06) :1320-1326
- [ 4 ] 刘金艳,冯全源. 无线射频识别多标签防碰撞算法综述. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(02) :440-451
- [ 5 ] 史长琼,肖瑞强,吴丹. 一种改进的 ALOHA 防碰撞算法. <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3778/j.issn.1002-8331.1401-0223.html>; *计算机工程与应用*, 2014
- [ 6 ] 程文青,赵梦欣,徐晶. 改进的 RFID 动态帧时隙 ALOHA 算法. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(06) :14-16
- [ 7 ] 史长琼,肖瑞强,吴丹. 改进的动态帧时隙 ALOHA 防碰撞算法. *计算机工程与设计*, 2014, 35(06) :1897-1900
- [ 8 ] 吴海锋,曾玉. 自适应帧 Aloha 的 RFID 标签防冲突协议. *计算机研究与发展*, 2011, 48(05) :802-810
- [ 9 ] 单剑锋,谢建兵,庄琴清. 基于分组的动态帧时隙 ALOHA 防碰撞算法研究. *计算机技术与发展*, 2011, 21(11) :39-41
- [ 10 ] Cha J R, Kim J H. Novel anti-collision algorithms for fast object identification in RFID system. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed System Workshops*, Fukuoka, Japan, 2005. 63-67
- [ 11 ] Kim J G. A divide-and-conquer technique for throughput enhancement of RFID anti-collision protocol. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(6) :474-476
- [ 12 ] Schoute F C. Dynamic frame length ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, 1983, 31(4) :565-568
- [ 13 ] Vogt H. Multiple object identification with passive RFID tags. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Yasmine Hammamet, Tunisia, 2002. 651-656

## Improvement of the dynamic framed slotted ALOHA algorithm for RFID systems

Du Yongxing, Bai Wenhao, Li Baoshan

(Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000)

### Abstract

To raise a radio frequency identification (RFID) system's multi-object identification efficiency, the tag collision problem in RFID was studied. Then, the mainstream anti-collision algorithm, i. e. the dynamic framed slotted ALOHA (DFSA) algorithm was improved, and the mathematical model for a new improved algorithm for the DFSA based on the 3-level random number timely selection mechanism was established. The new improved algorithm reuses collision timeslots according to the definition of the priorities of the random number group, throughput rate can be greatly increased, and the DFSA algorithm's throughput bottleneck of 36.8% can be solved. The simulation results show that the new improved algorithm can make the system identification efficiency up to 69.35%, so its effectiveness is verified. The study lays the foundation for the anti-collision algorithm research.

**Key words:** dynamic framed slotted ALOHA, random number of the label, anti-collision, radio frequency identification (RFID)