

无源 RFID 自适应帧时隙防碰撞算法研究

张小红¹, 张留洋^{2,1}

(1. 江西理工大学信息工程学院, 江西赣州 341000; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 射频识别 RFID 作为一种重要的物联网终端数据采集技术, 系统的吞吐率直接影响着数据采集终端的性能, 但目前广泛应用于无源 RFID 系统的帧时隙类防碰撞算法吞吐率普遍较低. 本文着重分析了影响无源 RFID 帧时隙类 ALOHA 防碰撞算法性能两类因素: 帧长和碰撞时隙的处理方式, 通过构建和求解帧长调整和标签碰撞的数学模型, 给出了无源 RFID 帧时隙类 ALOHA 防碰撞算法的具体优化途径和方案: 帧长自适应调整和碰撞实时散列. 在此基础上提出了自适应二进制散列帧时隙 ALOHA 防碰撞算法—ABSFSFA. 实验结果表明 ABSFSFA 算法在同等条件下可以有效减少无效时隙, 明显将 RFID 系统的吞吐率稳定提高到 45%. 本文的研究工作为无源 RFID 帧时隙类防碰撞算法的优化提供了可供参考的数学模型, 同时对提升物联网数据采集终端的性能具有一定的应用价值.

关键词: 射频识别; ALOHA 防碰撞算法; 帧长自适应调整; 二进制散列机制; 标签估计函数

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)09-2211-08

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.028

Research on Passive RFID System Adaptive Frame Slot Anti-collision Algorithm

ZHANG Xiao-hong¹, ZHANG Liu-yang^{2,1}

(1. School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: As an important data acquisition technology, throughput of RFID system affects performance of the data acquisition terminal of Internet of Things directly, but the throughputs of passive RFID system anti-collision algorithms of framed slot are generally low. Two factors influencing throughput of RFID systems are analyzed, which were frame length and the way of solving collided slots. Mathematical models of frame adjusting and tag collision are set up and solved, and then a solution is proposed for optimizing the anti-collision ALOHA algorithms of framed slot, that is, frame length adjusting adaptively and collision binary splitting timely. On these bases, the adaptive binary splitting frame slotted ALOHA anti-collision is constructed. The simulation results show that ABSFSFA algorithm is able to decrease the invalid slots effectively in the same condition, and the throughput of RFID system is steadily improved to 45% obviously. The research work provides a referable mathematical model for optimizing the anti-collision ALOHA algorithms of framed slot, and a valuable solution for improving performance of data acquisition terminal of Internet of Things.

Key words: RFID; ALOHA anti-collision algorithm; frame length adjusting adaptively; binary splitting mechanism; tag estimation function

1 引言

射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术是一种利用射频信号和空间耦合的传输特性, 在读写器和标签之间进行双向通信的非接触式自动识别技

术. 与条码和二维码技术相比, 具有多标签识别能力、非视距读取、读取速度快、存储容量大、安全性高等优点^[1]. 物联网被世界公认为是继计算机、互联网与移动通信网之后的世界信息产业第三次浪潮^[2], RFID 技术作为物联网的一种终端数据采集技术, 现已在第二代

收稿日期: 2014-09-13; 修回日期: 2015-11-26; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61363076), 江西省教育厅科技项目(No. GJJ13435, No. GJJ14465), 江西省自然科学基金(No. 20142BAB207020), 江西省研究生创新专项基金(No. YC2012-S092)

居民身份证、校园卡公交卡系统、小区门禁系统、田径赛事计时系统、物流供应链管理、畜牧管理、高速公路不停车收费系统等方面得到了应用^[2],随着 RFID 系统中读写器和标签技术的进步和发展,RFID 技术的应用将会越来越广泛.

RFID 系统一般由附着在物品上的标签、读写器和数据库组成.当无源(内部没有电源供应)标签进入到读写器的读写区域时,标签从电磁场中获取能量,按照一定的数据交换协议获取标签的 ID,完成对标签的识别. RFID 系统中一般存在多个读写器和大量的标签,读写器与读写器、读写器与标签之间的通信通常是在单一信道上进行,读写器和标签随机占用信道造成信号混叠,致使彼此都不能正确获取信息,即在复杂的 RFID 系统中一般存在着两种形式的碰撞:读写器碰撞和标签碰撞.由于读写器属于有电源供应的系统,能够监测信道的占用情况,因此可以很好地解决读写器碰撞.本文讨论的重点是标签碰撞问题.

2 制约 RFID 标签防碰撞算法性能的因素

标签防碰撞算法主要解决如何快速从大量标签中选取一个标签与之通信,并在尽量短的时间内完成对所有标签的识别.在 RFID 系统中,由于无源标签低成本性的限制,标签本身不能主动探测信道占用情况,因此无法避免碰撞;而且标签结构较为简单,计算能力和存储能力有限,成熟的防碰撞算法无法直接应用.现有的 RFID 防碰撞算法一般采用时分多路(TDMA)技术解决标签碰撞问题^[3,4],一般分为树形算法和概率性算法.树形算法通过让发生碰撞的标签不断地分为左右两个子集,直到每个子集下只有一个标签来解决标签碰撞,二进制搜索算法^[5]、动态二进制搜索算法^[6]、查询树算法等都属此类;概率性算法,通过让标签在规定的一段时间内随机选择一个时刻接入信道来解决标签碰撞,常用的概率性算法有时隙 ALOHA(SA)算法、帧时隙 ALOHA(FSA)算法^[7]、动态帧时隙(DFS)算法^[8]、增强型动态帧时隙(EDFSA)算法^[9-11]和 Q 值时隙 ALOHA(QSA)算法等. RFID 系统防碰撞算法性能一般用系统吞吐率来衡量,定义为成功识别标签数与识别完这些标签所用时隙数的比值.

RFID 系统防碰撞算法的性能除了受标签硬件限制外,还受算法本身效率的约束.纯 ALOHA 算法的理论吞吐率在 18.4%左右;通过改进算法,让标签在读写器规定的时刻响应,SA 算法和 FSA 算法的理论吞吐率提高到约 36.8%;DFS 算法根据上一帧标签的响应情况,通过动态调整 FSA 算法帧长的方法,使得 DFS 算法的系统吞吐率比 FSA 算法略有提升;除纯 ALOHA 算法和 SA 算法外,FSA 算法、DFS 算法和 QSA 算法都可

以归为帧时隙类 ALOHA 防碰撞算法,它们的共同点是:将一段时间划分为若干个时隙,让所有等待被识别的标签随机选择一个时隙响应,因此它们的算法性能受到的限制因素和对算法进行优化的手段也大致类似.

本文在分析 RFID 系统帧时隙类 ALOHA 防碰撞算法的基础上,以 FSA 算法为例,着重分析了帧长和碰撞时隙的处理方式对帧时隙类 ALOHA 防碰撞算法系统吞吐率的影响.为了提高帧时隙类 ALOHA 算法系统吞吐率,本文构建并求解了帧长调整和标签碰撞的数学模型,从理论上证明了自适应调整帧长和碰撞标签实时二进制散列机制可以较大地提高帧时隙 FSA 算法的性能,提升 RFID 系统吞吐率.本文提出了自适应二进制散列帧时隙 ALOHA 防碰撞算法—ABSFS (Adaptive Binary Splitting Frame Slotted ALOHA algorithm, ABSFS). ABSFS 算法综合运用了自适应调整帧长和实时二进制散列碰撞标签这两类优化手段,实验结果表明 ABSFS 算法在同等条件下可以明显提高 RFID 系统吞吐率.

3 帧长自适应调整模型

FSA 防碰撞算法:读写器将一段时间划分为 N 个时隙,将由 N 个时隙组成的时间长度称为长度为 N 的帧.读写器与标签之间通过询问-应答的方式进行数据交换,读写器向标签发送查询指令,所有收到指令的标签在 N 个时隙内随机选择一个时隙响应读写器的查询指令.

当标签数远大于帧长时,多个标签在同一个时隙上响应的概率增大,会出现较多碰撞时隙;当帧长过大时又会出现较多空闲时隙,势必影响 RFID 系统的吞吐率,因此帧时隙 FSA 算法的系统吞吐率一定与标签读取过程中设置的帧长相关.

3.1 标签数量与最佳帧长之间的关系

定理 1 当标签数量 n 一定时,存在帧长 N 使得 FSA 算法的系统吞吐率达到最大,标签数量 n 与最佳帧长 N_{opt} 之间的关系为:

$$N_{opt} = 2^{\lceil \log_2 n \rceil}, \quad n \in \mathbf{N}^+$$

floor 为向下取整函数.

证明 假设当前标签数量为 n ,帧长为 N .每一个标签随机在 N 个时隙中选择一个时隙响应读写器的查询指令,则每个标签选择某一个时隙的概率为 $1/N$,于是某一个时隙被 r 个标签选择的概率为:

$$P(r) = \binom{n}{r} \cdot \left(\frac{1}{N}\right)^r \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{n-r}, \quad r \leq n$$

所以在当前帧上,成功时隙的期望值为:

$$E(N_{succ}) = N \cdot P(r=1) = n \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{n-1}$$

根据 RFID 系统吞吐率的定义,当前帧内系统吞吐率 η 的期望值为:

$$E(\eta) = \frac{E(N_{\text{succ}})}{N} = \frac{n \cdot (1 - 1/N)^{n-1}}{N} = \frac{n(N-1)^{n-1}}{N^n} \quad (1)$$

由式(1)可知,影响系统吞吐率的主要因素为标签数量 n 和帧长 N . 求得当标签数量为 n ,当前帧内最佳帧长为:

$$N_{\text{opt}} = n, n \in \mathbf{N}^+ \quad (2)$$

即当帧长 N 等于当前帧上的标签数 n 时, FSA 算法的系统吞吐率取得最大值:

$$E(\eta)_{\text{max}} = \frac{n(n-1)^{n-1}}{n^n} \quad (3)$$

由式(3),当 $n > 50$,理想情况下 FSA 算法的系统吞吐率稳定在 36.8% 左右. 理想情况下帧长 N 的取值为正整数,且只能取 2 的次幂. 于是实际情况下最佳帧长 N 应为:

$$N_{\text{opt}} = 2^{\lceil \text{floor}(\log_2 n) + 1 \rceil}, n \in \mathbf{N}^+ \quad (4)$$

证毕.

实际情况下读写器无法预知读写区域内标签的数量 n . 此时如何选择合适的帧长使 FSA 算法保持一个较高的系统吞吐率是一个具有挑战性的问题^[12-14].

3.2 标签估计函数的构造与自适应调整实现

利用由样本估计总体的方法,构造标签估计函数,在兼顾估计准确度和帧长调整灵敏度的同时,优化估计读写器范围内存在的标签数.

每个时隙上存在的标签数量 X 是一个随机变量, $X \sim B(n, 1/N)$, n 为标签数量, N 为帧长. 每个时隙上存在标签数的期望为:

$$E(X) = n \cdot p = n \cdot \frac{1}{N} = \frac{n}{N} \quad (5)$$

假设 $\{X_k | 1 \leq k \leq K\}$ 为一标签读取过程中每个时隙上标签数量的样本, K 为样本容量,则该样本的均值,也即每个时隙上标签数的期望估计为:

$$\hat{E}(X) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K X_k \quad (6)$$

假设 $\hat{E}(X)$ 是 $E(X)$ 的无偏估计,则可求得当前帧内存在标签数的估计值,也即标签估计函数为:

$$\hat{n} = \frac{N}{K} \sum_{k=1}^K X_k \quad (7)$$

为使标签数的估计值更加准确,将标签数的估计值 \hat{n} 乘以调节因子 β . 经验证, β 一般取 0.5. 根据式(4),标签数的估计值 $\beta \hat{n}$ 对应的最佳帧长为:

$$\begin{aligned} \hat{N}_{\text{opt}} &= 2^{\lceil \text{floor}(\log_2 \beta \hat{n}) + 1 \rceil} \\ &= 2^{\lceil \text{floor}(\log_2 \beta \frac{N}{K} \sum_{k=1}^K X_k) + 1 \rceil} \end{aligned} \quad (8)$$

为保证估计灵敏度,样本容量 K 不应太大;但样本容量 K 越大,估计准确度越高. 估计误差率定义为估计值减去真实值的绝对值与真实值的比值. 随着时隙样本容量的增加,估计误差率急剧下降;当时隙样本容量 $K=5$ 时,估计误差率已经下降到 30% 左右. 由式(4)及对数函数的性质,30% 误差率的估计值对最佳帧长求解影响不大,通过后续估计可以很快收敛到最佳帧长. 因此时隙样本容量的最小值取 $K=5$ 较为合适. 综上所述,在未知读写器范围内标签数的情况下,通过一定容量的时隙样本 X_k ,可求得 FSA 算法的最佳的帧长. 重复进行估计和调整,使 FSA 算法执行过程中的帧长自适应趋于最合适的帧长.

4 碰撞标签的二进制散列模型

在 FSA 算法中,当前帧上发生碰撞的标签会与其他标签在下一帧再次碰撞,严重影响 FSA 算法的性能.

4.1 碰撞时隙处理方式——二进制散列 BS 机制

二进制散列 BS^[12,13] 机制是一种专门处理碰撞的时隙散列机制,可以利用碰撞时隙的信息解决发生的碰撞. 本文根据碰撞时隙的二进制散列模型求解决 n 个发生碰撞的标签所需要时隙数的期望值,从理论上证明二进制散列 BS 机制确实可以提高系统吞吐率.

4.2 二进制散列模型

定理 2 二进制散列 BS 机制可以有效地解决碰撞,解决 n 个发生碰撞的标签所需要时隙数的期望为:

$$E_n = \begin{cases} 0, & n = 1 \\ \frac{2^n}{2^{n-1} - 1} + \sum_{t=1}^{n-1} (E_t + E_{n-t}) \cdot \binom{t}{n} \cdot \frac{1}{2^n - 2}, & n \geq 2 \end{cases}$$

证明 首先对推导中使用的变量进行说明:

n : 表示当前时隙上发生碰撞的标签数;

P_1 或 P_2 : 表示碰撞标签经过一次散列,散列模型的出现概率;

$P_{n,m}$: 表示当前时隙上发生碰撞的 n 个标签,经过 m 次散列,参与碰撞的标签数首次降低时某一种散列模型出现的概率;

$N_{n,m}$: 表示当前时隙上发生碰撞的 n 个标签,经过 m 次散列,参与碰撞的标签数首次降低时某一种散列模型所使用的时隙数;

$E_{n,m}$: 表示当前时隙上发生碰撞的 n 个标签,经过 m 次散列,参与碰撞的标签数首次降低时所需要时隙数的期望;

E'_n : 表示解决 n 个发生碰撞的标签,参与碰撞的标签数首次降低时所使用时隙数的期望;

E''_n : 表示在解决 n 个发生碰撞的标签过程中,参与碰撞的标签数首次降低后,解决 $t(1 \leq t \leq n-1)$ 个发生碰撞的标签所需要时隙数的期望;

E_n :表示解决 n 个碰撞标签所需时隙数的期望.

假设有 n 个标签在当前时隙上发生了碰撞,参与碰撞的标签经过第一次二进制散列后可能出现的散列模型有 $n+1$ 种,根据散列后时隙上碰撞的标签数是否降低,将这 $n+1$ 种散列模型分为两类,第 I 类为散列后时隙上碰撞的标签数没有降低时的散列模型,第 II 类为散列后时隙上参与碰撞的标签数降低时的散列模型.图 1 中,□代表碰撞时隙,△代表成功时隙,○代表空闲时隙.

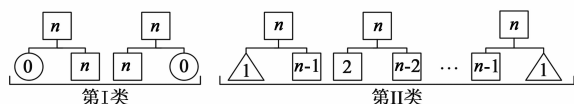


图1 碰撞标签经过一次散列可能出现的散列模型及分类

二进制散列时每个发生碰撞的标签在两个时隙中选择其一,选择其中一个时隙的概率为 $1/2$,根据二项式分布定理:

第 I 类模型出现的概率为:

$$P_1 = \binom{0}{n} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n + \binom{n}{n} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^0 = \frac{1}{2^{n-1}}$$

第 II 类模型出现的概率为:

$$P_2 = \sum_{t=1}^{n-1} \binom{t}{n} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^t \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{n-t} = 1 - P_1 \\ = 1 - \frac{1}{2^{n-1}} = \frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-1}}$$

对于第 I 类模型来说,原来发生碰撞的 n 个标签经过一次二进制散列,全部又一次在一个时隙上发生了碰撞,对于这类发生碰撞的标签继续进行二进制散列,直到散列后时隙上发生碰撞的标签数第一次降低,则此时满足这种要求的散列模型及分类如图 2 所示.

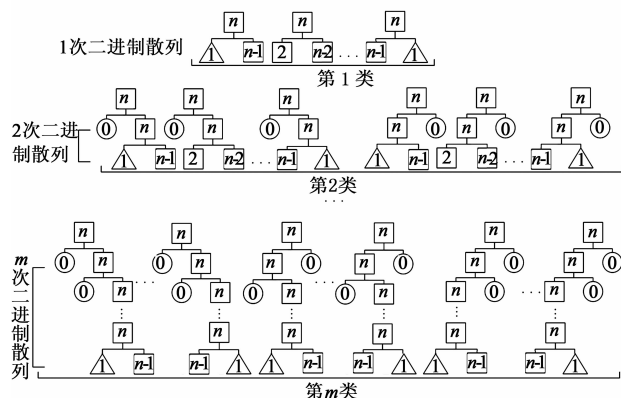


图2 发生碰撞的标签数第一次降低时可能出现的散列模型及分类

由图 2 可知,发生碰撞的标签进行二进制散列,发生碰撞的标签数第一次降低时经过的散列次数可能趋于无穷多次,而且经过散列的次数越大,对应的散列模型出现的概率可能就越小.根据二项式分布定理,经过

不同散列次数的散列模型其出现概率如下:

$$P_{n,1} = \sum_{t=1}^{n-1} \binom{t}{n} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^t \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{n-t} = P_2 = \frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-1}}$$

$$P_{n,2} = P_1 \cdot P_2 = \frac{2^{n-1} - 1}{2^{2n-2}}$$

$$P_{n,m} = (P_1)^{m-1} \cdot P_2 = \left(\frac{1}{2^{n-1}}\right)^{m-1} \cdot \frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-1}} = \frac{2^{n-1} - 1}{2^{(n-1)m}}$$

这些散列模型的概率之和满足:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^m P_{n,t} = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^m \frac{2^{n-1} - 1}{2^{(n-1)t}} = 1.$$

对于每一类散列模型中的某一个散列模型,发生碰撞的 n 个标签,经过 m 次散列,参与碰撞的标签数首次降低时所使用的时隙数 $N_{n,m} = 2m, m = 1, 2, 3, \dots$,根据期望的定义,则图 2 中每一类散列模型经过 m 次散列,解决 n 个发生碰撞的标签,参与碰撞的标签数首次降低时使用时隙数的期望如下,第 I 类散列模型是指经过 1 次散列,参与碰撞的标签数便发生降低时的散列模型.

第 I 类散列模型所使用时隙数的期望为:

$$E_{n,1} = N_{n,1} \cdot P_{n,1} = 2 \cdot \frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-1}} = \frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-2}}$$

第 2 类散列模型所使用时隙数的期望为:

$$E_{n,2} = N_{n,2} \cdot P_{n,2} = 4 \cdot \frac{2^{n-1} - 1}{2^{2n-2}} = \frac{2^{n-1} - 1}{2^{2n-4}}$$

第 m 类散列模型所使用时隙数的期望为:

$$E_{n,m} = N_{n,m} \cdot P_{n,m} = 2m \cdot \frac{2^{n-1} - 1}{2^{(n-1)m}} = \frac{2m(2^{n-1} - 1)}{2^{(n-1)m}}$$

于是,解决 n 个发生碰撞的标签,参与碰撞的标签数首次降低时使用时隙数的期望为:

$$E'_n = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^m \frac{2t(2^{n-1} - 1)}{2^{(n-1)t}} = \frac{2^n}{2^{n-1} - 1} \quad (9)$$

定义图 1 中第 II 类散列模型中某一种散列模型为事件 $A_{t,n-t}$, t 与 $n-t$ 分别表示 n 个发生碰撞的标签经过一次散列,散列后两个时隙上的标签数.当经过散列发生碰撞的标签数降低时, $t \in [1, n-1]$. 则对于图 1 中的第 II 类散列模型中的某一种散列模型,其出现的概率为:

$$P(A_{t,n-t}) = \binom{t}{n} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^t \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{n-t}, t \in [1, n-1]$$

定义图 1 中第 II 类模型为事件 A_2 ,则在第 II 类模型一定出现的情况下,第 II 类散列模型中的某一种散列模型,其出现的条件概率为:

$$P(A_{t,n-t}/A_2) = P(A_{t,n-t})/P_2 = \frac{\binom{t}{n} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^t \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{n-t}}{\sum_{t=1}^{n-1} \binom{t}{n} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^t \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{n-t}}$$

图 1 中第 II 类散列模型的某一种散列模型继续进

行二进制散列,直到发生碰撞的标签完全得到解决,则此时所使用的时隙数的期望为 $E_t, t \in [1, n-1]$,若图 2 中的散列模型在参与碰撞的标签数首次降低后继续进行散列,则此时后续完全解决发生碰撞的标签所使用时隙总数的期望为:

$$\begin{aligned} E''_n &= \sum_{t=1}^{n-1} (E_t + E_{n-t}) \cdot P\left(\frac{A_{t,n-t}}{A_2}\right) \\ &= \sum_{t=1}^{n-1} (E_t + E_{n-t}) \cdot \binom{t}{n} \cdot \frac{1}{2^n - 2} \end{aligned} \quad (10)$$

综上,完全解决 n 个发生碰撞的标签所需要时隙数的期望 E_n 等于参与碰撞的标签数首次降低时所使用时隙数的期望 E'_n 加上后续完全解决发生碰撞的标签所使用时隙总数的期望 E''_n ,即:

$$\begin{aligned} E_n &= E'_n + E''_n \\ &= \frac{2^n}{2^{n-1} - 1} + \sum_{t=1}^{n-1} (E_t + E_{n-t}) \cdot \binom{t}{n} \cdot \frac{1}{2^n - 2}, n \geq 2 \end{aligned} \quad (11)$$

易知当 $n=1$,当前时隙上只有一个标签,没有发生碰撞,故 $E_1=0$. 所以解决发生碰撞的标签所需时隙数的期望为:

$$E_n = \begin{cases} 0, & n = 1 \\ \frac{2^n}{2^{n-1} - 1} + \sum_{t=1}^{n-1} (E_t + E_{n-t}) \cdot \binom{t}{n} \cdot \frac{1}{2^n - 2}, & n \geq 2 \end{cases} \quad (12)$$

证毕.

4.3 实时解决碰撞对 FSA 算法性能的提高

根据式(12)可知,发生碰撞的标签数与解决发生碰撞的标签所需时隙数之间近似呈线性关系. 解决碰撞标签的效率定义为:发生碰撞的标签数与解决发生碰撞的标签所需时隙数的比值. 发生碰撞的标签数在 $[2, 30]$ 范围内时,随着碰撞标签数的增多,解决碰撞的效率下降也较快. 随着发生碰撞的标签数继续增多,解决碰撞的效率曲线趋于平缓. 当发生碰撞的标签数为 13 时,此时解决碰撞的效率约为 36.6%.

综上所述,当发生碰撞的标签数 $n \in [2, 13]$ 时,解决碰撞的效率在 37% 左右,接近或大于理想情况下 FSA 算法的系统吞吐率 36.8%,所以二进制散列 BS 机制在一定范围内实时解决发生碰撞的标签可以提高 FSA 算法的系统吞吐率.

5 ABSFSA 算法

FSA 算法是帧时隙类 ALOHA 防碰撞算法中的一种基本的算法,但吞吐率并不高. 将第 3 节和第 4 节提出的优化思想分别用于 FSA 算法优化,则可以产生自适应帧时隙 ALOHA 算法 AFSA (Adaptive Frame Slotted ALOHA Algorithm) 和二进制散列帧时隙算法 BSFSA

(Binary Splitting Frame Slotted ALOHA Algorithm). ABSFSA 算法同时运用了第 3 节和第 4 节的优化方案. AFSA 算法针对 FSA 算法不能自动调整帧长以适应标签数量变化的缺点,运用了帧长随标签数自适应调整的方法,大大减少了因帧长不能及时调整导致的无效时隙. 实时对碰撞标签进行二进制散列可以进一步提高系统吞吐率,这是 BSFSA 算法提高系统吞吐率的原因所在. ABSFSA 算法的基本思想是:让所有待识别的标签在帧上随机选择一个时隙响应读写器的查询指令,当某个时隙发生碰撞时,将这些发生碰撞的标签进行二进制散列,每一帧的帧长在识别过程中自适应调整,以减少无效时隙的出现. 以下是 ABSFSA 算法的执行流程:

①读写器初始化.

②读写调整帧长参数,向读写范围内所有未被识别的标签发送查询指令.

③所有收到查询指令的标签随机在当前的帧上选择一个时隙,并在读写器轮询到该时隙时响应读写器的查询指令.

④读写器对当前帧的每一个时隙,按照顺序逐一查询每个时隙上响应的标签. 在查询过程中,读写器统计每个时隙上响应的标签数. 若在某个时隙上发生了标签碰撞,转到⑥. 当时隙上标签数样本容量大于 5 时,根据时隙上标签的分布情况,估计合适的帧长,若发现当前帧长与估计的帧长不一致,转到⑤;若估计帧长为 1,转到⑦.

⑤读写器停止轮询,当前帧结束,将估计的帧长设置为下一帧的帧长,转到②.

⑥将在当前时隙上发生碰撞的标签进行二进制散列,进行碰撞标签的识别,其他尚未被识别的标签依次滞后处理.

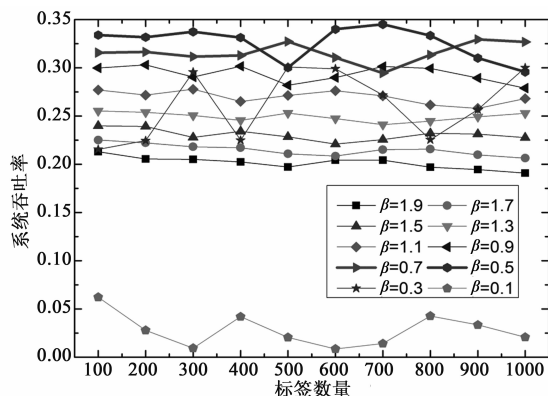
⑦若在当前帧上,无任何标签响应,则可判定该读写器读写范围的所有标签都已识别完成.

6 ABSFSA 算法仿真实验

为验证 ABSFSA 算法的有效性和吞吐率提升效果,同时为了说明第 3 节、第 4 节中提出的两种优化方案的可行性,本文进行了以下 4 组实验. 实验中每组数据均取 100 次数据的算术平均值,所有帧长参数或初始帧长参数均设置为 128,标签数量都以 100 为步长,在 $[100, 1000]$ 间变化.

仿真实验 1 β 值选取. 在 AFSA 算法中,帧长自适应调整涉及到公式(8)中的调节因子 β ,当 β 在以步长 0.2 在区间 $[0.1, 2.0]$ 间取值时,AFSA 算法随标签数量变化的曲线如图 3 所示.

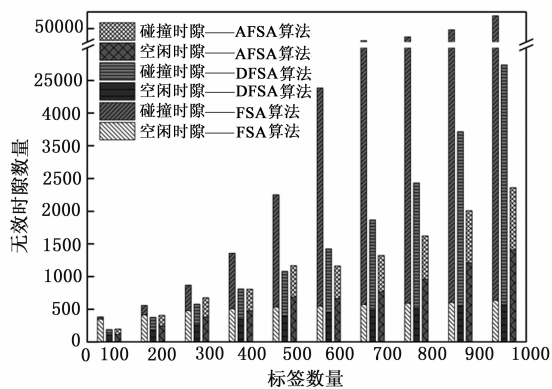
综合考虑系统吞吐率的大小和波动幅度, β 值取

图3 AFSA算法在不同 β 值下的系统吞吐率曲线

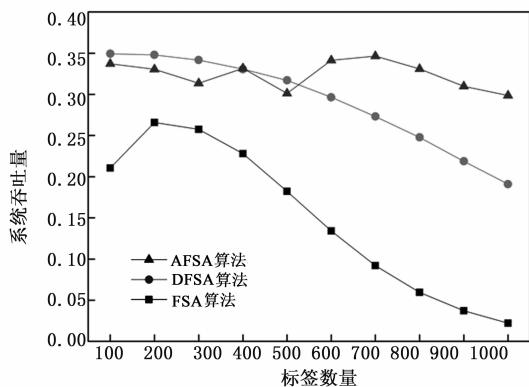
0.5 较为合适,此时系统吞吐率最大,且波动幅度在可以接受的范围内。

仿真实验 2 AFSA 算法系统吞吐率. 为了验证帧长自适应调整机制提升帧时隙类 ALOHA 算法的可行性,对比算法为帧时隙类算法中的两种基本算法, FSA 算法和 DFSA 算法. 如图 4(a) 和 4(b) 所示为 AFSA、FSA 和 DFSA 算法在不同标签规模下的无效时隙和吞吐率。

从图 4(a) 可以看到, AFSA 算法抑制无效时隙的效果最为明显. 其根本原因是 AFSA 算法可以根据标签在帧上的分布, 自适应调整帧长以快速适应标签数量的



(a) 三种算法在不同标签规模下的无效时隙



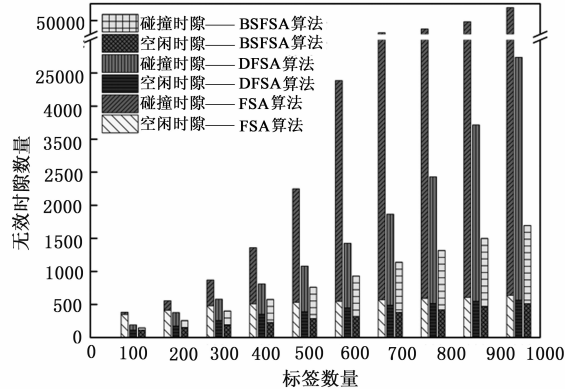
(b) 三种算法在不同标签规模下的系统吞吐率

图4 AFSA算法系统吞吐率比较

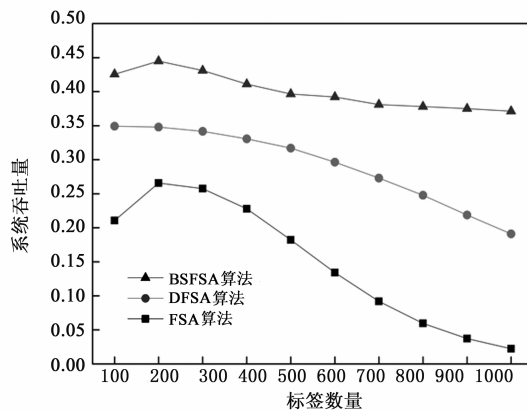
变化,进而大幅减少无效时隙的出现. 综上, AFSA 算法的系统吞吐率也是最高的,如图 4(b) 所示

由图 4(b), FSA 和 DFSA 算法随着标签的增多,其吞吐率呈现不断下降的趋势. AFSA 算法在标签规模较小时,其吞吐率略小于 DFSA,但 AFSA 的平均系统吞吐率大于 DFSA,且其波动小较小,但是这不影响 AFSA 算法自适应调整机制的有效性,同时也优于 DFSA 算法的帧长调整机制。

仿真实验 3 BSFSA 算法系统吞吐率. 同样也以 FSA 算法和 DFSA 算法为对照算法,验证二进制散列机制的有效性. 如图 5(a) 和 5(b) 所示为 BSFSA、FSA 和 DFSA 算法在不同标签规模下的无效时隙和吞吐率. 从图 5(a) 可看出, FSA 算法和 DFSA 算法随着标签数量的增加,出现了较多的碰撞时隙; BSFSA 算法的碰撞时隙数虽有增加,但较为缓慢. 因此 BSFSA 算法有效地减少了无效时隙的出现. BSFSA 算法减少无效时隙的机理是: 当标签在某个时隙上发生碰撞时,与 FSA 算法和 DFSA 算法将碰撞标签延迟至下一帧响应不同, BSFSA 算法有效利用了碰撞时隙的碰撞信息,将碰撞标签实时进行二进制散列,防止在当前帧上发生碰撞的标签延迟至下一帧时增加下一帧上响应的标签数量,增大与其他标签再次发生碰撞的概率. 因此二进制散列机



(a) 三种算法在不同标签规模下的无效时隙



(b) 三种算法在不同标签规模下的系统吞吐率

图5 BSFSA算法系统吞吐率比较

制可以在一定程度上抑制无效时隙,特别是碰撞时隙的出现.

由图 5(b),BSFSA 算法的系统吞吐率最大,可达 40% 以上.其原因前已有述,BSFSA 算法有效利用了碰撞时隙信息,碰撞标签实时进行散列,防止在下一帧上与其他标签再次发生碰撞.

仿真实验 4 ABSFSA 算法系统吞吐率. ABSFSA 算法综合运用了帧长自适应调整机制和碰撞标签实时二进制散列机制,实验 2 和 3 分别验证了这两种机制的可行性和有效性,为验证这两种机制综合使用的效果,特进行本实验.对照算法为 BSFSA、AFSA、DFSA 和 FSA 算法.图 6(a)和 6(b)所示为 ABSFSA、BSFSA、AFSA、DFSA 和 FSA 算法在不同标签规模下的无效时隙和吞吐率.

由图 6(a),ABSFSA 算法中出现无效时隙最少,显示较强的抑制无效时隙的能力.由图 12(b),ABSFSA 算法的吞吐率最高,且较稳定,吞吐率曲线没有发生大的跌落.BSFSA、AFSA、DFSA 和 FSA 算法依次次之.ABSFSA 算法的吞吐率比 FSA 算法有大幅提高,达到 45% 左右.

综上所述,ABSFSA 算法显示了较强的抑制无效时隙的能力,且性能稳定,同时也充分说明了帧长自适应

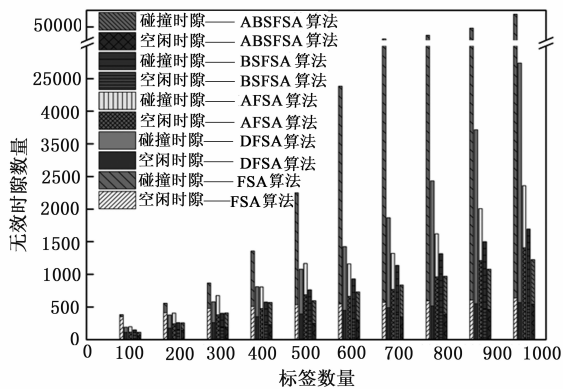
调整机制和碰撞标签实时二进制散列机制的可行性和有效性.

7 结束语

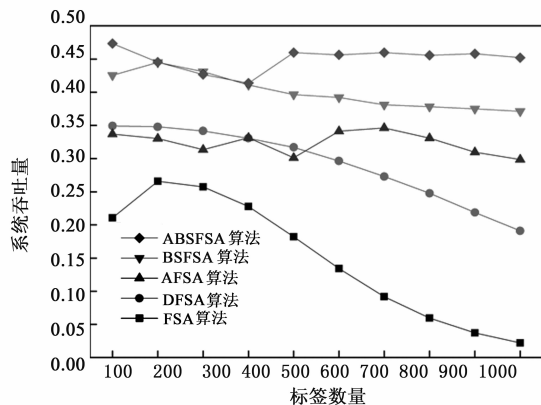
本文对影响无源 RFID 帧时隙类 ALOHA 防碰撞算法性能的帧长和碰撞时隙两因素进行分析,并在此基础上提出了自适应二进制散列 ABSFSA 防碰撞算法.针对帧长和碰撞时隙因素建立了相应的数学模型,从理论上证明了帧长自适应调整机制和碰撞标签实时二进制散列机制可以有效提高帧时隙类 ALOHA 算法的系统吞吐率.仿真实验结果表明帧长自适应调整机制和碰撞标签实时二进制散列机制具有较强的抑制无效时隙的能力;ABSFSA 算法系统吞吐率相比其他经典算法有大幅提升,可较稳定达 45% 左右,减少了信道占用时间,且算法复杂度较低,对读写器运算能力无特别要求.本文提出的 ABSFSA 算法可为物联网数据采集终端 RFID 系统性能的提升提供一个较为有效的解决方案.

参考文献

- [1] Grover A, Berghel H. A survey of RFID deployment and security issues[J]. Journal of Information Processing Systems, 2011, 7(4): 561 - 580.
- [2] 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 Z H, Wang Y J. IoT technology and application[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023 - 1029. (in Chinese)
- [3] Weilian S, Nikolaos V A. Multiple RFID tags access algorithm[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(2): 174 - 187.
- [4] Sree K R, Ajay O, Archana M, et al. Anti-collision policy for RFID systems; fast predict tags in field algorithm[J]. International Journal of Radio Frequency Identification Technology and Applications, 2011, 3(3): 215 - 228.
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] Bih-yaw S, Ta-wei L, Chen-yuan C. The research of quadtree search algorithms for anti-collision in radio frequency identification systems[J]. Scientific Research and Essays, 2011, 6(25): 5342 - 5350.
- [7] Donghwan L, Jihoon C, Wonjun L, et al. A time-optimal anti-collision algorithm for FSA-based RFID systems[J]. ETRI Journal, 2011, 33(3): 458 - 461.
- [8] Shi-an L, Xiao-juan P. Improved dynamic frame slotted ALOHA algorithm for anti-collision in RFID systems[J].



(a) 五种算法在不同标签规模下的无效时隙



(b) 五种算法在不同标签规模下的系统吞吐率

图 6 ABSFSA 算法系统吞吐率

- Knowledge Discovery and Data Mining, 2012, 135: 423 - 430.
- [9] Chun-yi W, Chi-chung L, Ming-cheng L. An enhanced dynamic framed slotted ALOHA anti-collision method for mobile RFID tag identification[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2011, 6(4): 340 - 351.
- [10] Lei Z, Yum T S P. Optimal framed aloha based anti-collision algorithms for RFID systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(12): 3583 - 3592.
- [11] Deng D J, Tsao H W. Optimal dynamic framed slotted aloha based anti-collision algorithm for RFID systems[J]. Wireless Personal Communications, 2011, 59(1): 109 - 122.
- [12] Eom J B, Lee T J. Accurate tag estimation for dynamic framed-slotted aloha in RFID systems[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(1): 60 - 62.
- [13] Wu H, Zeng Y. Bayesian tag estimate and optimal frame length for anti-collision aloha RFID system[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(4): 963 - 969.
- [14] Thomas F L P, Gaia M, Chiara P. Anticollision protocols for single-reader RFID systems: temporal analysis and optimization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(2): 267 - 279.

作者简介



张小红 女, 1966 年 8 月出生, 河北昌黎人. 现为江西理工大学信息工程学院教授、博士、硕士生导师. 研究方向: 无线传感器网络、非线性动力学理论、混沌保密通信.

E-mail: xiaohongzh@263.net



张留洋(通信作者) 男, 1988 年 1 月出生, 河南禹州人. 现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士研究生. 研究方向: 射频传感理论、RFID 防碰撞算法.

E-mail: zhangliuyang2011@126.com