

基于信号强度的分组帧时隙 ALOHA 防碰撞算法

王 谦^{1a,2}, 司 虎^{1b}, 熊 焰^{1a}, 黎明曦^{1a}

(1. 中国科学技术大学 a. 计算机科学与技术学院; b. 信息科学技术学院, 合肥 230027;

2. 安徽新闻出版职业技术学院, 合肥 230602)

摘 要: 针对现有 ALOHA 防碰撞算法存在系统吞吐量低下的问题, 利用射频识别阅读器和标签之间的信号能量传输特点, 对帧时隙 ALOHA 算法(FSA)进行改进, 提出一种分组帧时隙 ALOHA 防碰撞算法。根据接收信号能量的强度将标签均匀分布到帧时隙中进行分组应答, 从而降低标签碰撞概率。仿真实验结果表明, 在标签数与帧时隙数之比小于 1.8 的情况下, 该算法最大系统吞吐量可达 50%, 优于 FSA 算法及碰撞分组算法。

关键词: 无线射频识别; ALOHA 算法; Friis 传输方程; 分组; 吞吐量

中文引用格式: 王 谦, 司 虎, 熊 焰, 等. 基于信号强度的分组帧时隙 ALOHA 防碰撞算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(6): 90-95.

英文引用格式: Wang Qian, Si Hu, Xiong Yan, et al. Grouping Framed Slotted ALOHA Anti-collision Algorithm Based on Signal Strength[J]. Computer Engineering, 2015, 41(6): 90-95.

Grouping Framed Slotted ALOHA Anti-collision Algorithm Based on Signal Strength

WANG Qian^{1a,2}, SI Hu^{1b}, XIONG Yan^{1a}, LI Mingxi^{1a}

(1a. School of Computer Science and Technology; 1b. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Anhui Vocational College of Press and Publishing, Hefei 230602, China)

【Abstract】 To solve the low throughput of current ALOHA anti-collision algorithms, the Signal Strength Grouping Framed Slotted ALOHA(SSGFSA) algorithm is proposed, which exploits the energy transmission characteristics between Radio Frequency Identification(RFID) reader and tags, improves the Framed Slotted ALOHA(FSA) algorithm to group tags, and distributes tags into frame slot according to received energy strength for reducing the probability of collision. Simulation results show that the maximum throughput of the algorithm is up to 50%, better than the theory value of the FSA algorithm and Collision Grouping Algorithm(GCA) in the case of the ratio of the tag number and the frame time slot number is less than 1.8.

【Key words】 Radio Frequency Identification(RFID); ALOHA algorithm; Friis transmission equation; grouping; throughput
DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2015.06.017

1 概述

无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)是一种低成本、可靠的自动化识别技术,在制造业、物流、交通、商场超市等领域得到广泛应用。与条形码、指纹等传统技术不同,RFID技术无需视距通信,是一种非接触的识别技术。一个典型的RFID系统包括应用主机、阅读器和多个标签3个部

分^[1]。与其他无线通信系统一样,阅读器与标签进行无线通信时,在识别范围内如果有一个以上的标签同时向阅读器发送信息,就会产生相互干扰现象,即标签碰撞,致使阅读器无法正确识别。由于RFID系统中的大部分标签是被动的,没有电源,只能通过阅读器电磁辐射来获取有限能量,因此阅读器和标签具有不同的计算和通信能力,导致传统避免碰撞的方法,如载波监听多路访问(Carrier Sense Multiple

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61232018);传感技术联合国家重点实验室基金资助项目(skt1206);安徽省自然科学基金青年基金资助项目(1408085QF124);安徽省高等学校省级自然科学基金研究基金资助重点项目(KJ2013A255)。

作者简介: 王 谦(1975-),女,副教授、硕士,主研方向:传感器网络;司 虎,讲师、硕士;熊 焰,教授、博士生导师;黎明曦,博士。

收稿日期: 2014-09-15 **修回日期:** 2014-10-16 **E-mail:** q. wang75@hotmail.com

Access, CSMA) 不适用。RFID 系统的防碰撞算法被设计成阅读器驱动方式,可以分为2类:(1)采用确定性机制,如查询树算法、逐位二叉树算法、EPCglobal Class 0 算法、ISO/IEC 18000-6B 算法等,这些算法不会造成标签饥饿问题,但识别时间较长,有些电路较复杂;(2)采用概率性机制,基本上都是基于 ALOHA 算法,如纯 ALOHA 算法、时隙 ALOHA 算法、帧时隙 ALOHA 算法、动态帧时隙 ALOHA 算法、ISO/IEC 18000-6A 算法等,这些算法比较简单,在标签数量较少时,识别时间较短,但吞吐量低,且存在标签饥饿现象。

在实际 RFID 系统中,阅读器的位置通常是固定的,而标签出现的位置和移动方向也有一定约束,只是出现时间不做限定。本文利用 RFID 阅读器和标签之间信号能量传输的特点,根据 Friis 传输方程可知,标签位置决定了接收信号和响应信号的强度,从而将帧时隙 ALOHA (Framed Slotted ALOHA, FSA) 算法改进为基于信号强度的分组帧时隙 ALOHA (Signal Strength Grouping Framed Slotted ALOHA, SSGFSA) 算法。

2 基于 ALOHA 的标签防碰撞算法

基于 ALOHA 的算法本质上是采用时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 技术将可以利用的信道时间分割成若干片,然后将这些时间片分配给标签。与码分多址、频分多址等技术相比,时分多址技术简单、成本较低、计算量小,非常适合 RFID 系统中的被动标签。

2.1 ALOHA 算法

ALOHA 算法^[2]是最简单的基于 ALOHA 的标签防碰撞算法,又称为纯 ALOHA (pure-ALOHA) 算法。当阅读器请求识别标签时,在识别范围内的标签会将自己的 ID 号发送给阅读器。如果在标签 ID 号发送期间没有碰撞发生,则阅读器会成功识别此标签。否则,说明有多个标签同时向阅读器发送数据,产生碰撞,这些标签会各自随机延后一段时间,重新发送。由于标签发送时间是随机的,要成功发送而不发生碰撞,必须至少占用连续 2 个标签传输时间单位。若标签进入识别区符合泊松分布概率,则当系统有效负载 G (单位时间内标签向阅读器发送的数据包数量) 等于 0.5 时,也就是 2 个时间单位发送一个数据包时,纯 ALOHA 算法具有的最大吞吐量 S 为 18.4%。

2.2 时隙 ALOHA 算法

时隙 ALOHA 算法^[3]是将纯 ALOHA 算法的时

间分割成若干个时间段,称为时隙 (slot), 每个时隙要求大于或等于标签发送数据的时间长度,并且标签只能在时隙起始处进行通信,在一定程度上限制了标签发送时间的随机性,使成功发送只需占用一个标签传输时间单位。若标签发生碰撞,会再次选择一个随机的时隙发送。当系统有效负载 G 等于 1 时,也就是一个时间单位发送一个数据包时,时隙 ALOHA 算法达到最大吞吐量 S 等于 36.8%, 是纯 ALOHA 的 2 倍。

2.3 帧时隙 ALOHA 算法

帧时隙 ALOHA^[4]算法把时间分割成一系列的帧,每帧由多个时隙组成。与时隙 ALOHA 算法类似,阅读器识别范围内的标签只能选择在每帧的某个随机时隙开始处进行发送数据。若标签发送数据失败,则会在下一帧中再次随机选择一个时隙发送。在标签碰撞情况下, FSA 算法可以避免时隙 ALOHA 算法下的标签短时间内重复发送数据,减少了 RFID 系统的能量消耗。FSA 算法的吞吐量 S 与时隙 ALOHA 算法相同,当最大值 G 等于 1 时, S 等于 36.8%。

3 基于信号强度的分组帧时隙 ALOHA 算法

在上述 ALOHA 算法中,纯 ALOHA 算法由于标签发送时间随机,产生碰撞概率很大,效率很低,而时隙 ALOHA 算法和 FSA 算法都是在时隙起始处开始通信,具有一定的同步机制,碰撞概率减半,效率得到提高,但仍然存在大量的空时隙无法利用。在 RFID 系统中,由于无源标签的低成本及低功耗原因,因此不适合采用有源标签的 CSMA^[5] 方法检测通道空闲情况,也不宜采用码分多址^[6] 等方法同时通信。在采用 ALOHA 算法时,标签发送数据的时隙有正常通信、碰撞和空闲 3 种情况,具有随机性。如果标签能均匀分布到时隙中,则能减少碰撞和空闲时隙,从而提高系统效率。本文在 FSA 算法的基础上,提出基于信号强度的分组帧时隙 ALOHA (Signal Strength Grouping Framed Slotted ALOHA, SSGFSA) 算法,利用无源标签能量获取的大小与阅读器之间的位置关系,增加标签自分组功能,帧时隙同时分组的方法,减少碰撞概率,从而提高系统吞吐量。

3.1 无源标签能量的获取与分组

无源标签能量是通过接收阅读器发射的电磁波来获取。对于阅读器来说,由于天线方向性,不同方向的增益 G_r 与天线的角度有关。同样地,无源标签的接收天线也有接收增益 G_R 。根据 Friis 传输方

程^[7],无源标签接收到的能量 P_R ,也就是信号强度,可由式(1)计算:

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

其中, P_T 为阅读器辐射能量大小; λ 为电磁波波长; d 为标签到阅读器的距离。可以看出,标签接收到的能量取决于阅读器的发射功率 P_T 、发射天线增益 G_T 、接收天线增益 G_R 、发射波长 λ 及距离 d 。一般情况下,对于移动标签来说,阅读器在识别时,不同距离和角度的标签接收到的能量是不同的。阅读器根据识别范围内的标签响应情况,确定分组参数,在发送请求命令时传给标签,由标签计算出自己所在的分组。

SSGFSA 算法具体流程如下:

步骤 1 在初始情况下,阅读器发送请求命令帧,包括帧长 L 、分组数 g 、最大信号强度 P_{\max} 、最小信号强度 P_{\min} 等信息,其中, L 的初值可设为 32, g 的初值可设为 4, $P_{\max} \geq P_{\min}$ 。

步骤 2 标签收到请求命令后,进行时钟同步,然后执行以下过程:

(1) 根据自己接收到的信号强度,计算所在分组:大于 P_{\max} 为第 1 组,小于 P_{\min} 为第 g 组,在 P_{\max} 与 P_{\min} 之间则等分在第 2 组到第 $g-1$ 组中的某一组。

(2) 帧长 L 等分为 g 组,每组时隙数为 $\lfloor L/g \rfloor$,最后 1 组,即第 g 组的时隙数可能略多;标签在自己所在组中随机选择一个时隙应答,发送自己的 ID,并等待阅读器确认。

步骤 3 阅读器对于识别帧中的每一个时隙,可以判断有无标签应答:对于只有一个标签应答,此时隙标记为 0;对于无标签应答或多个标签应答,此时隙标记为 1。一个识别帧结束后,阅读器发送确认命令,其中包含上一识别帧中每个时隙标记。

步骤 4 标签收到阅读器的确认命令后,比较自己发送时的时隙标记,若为 0,则说明已识别,进入静默状态,不参与以后的识别过程,否则,说明产生碰撞现象,需等待下一个阅读器请求命令,再次识别。

步骤 5 阅读器发送下一个请求命令帧,其中最大信号强度 P_{\max} 、最小信号强度 P_{\min} 等信息可以根据前面识别帧的标签应答情况进行修正。如果采用动态帧长方法,可以根据统计出的空时隙数、成功时隙数和碰撞时隙数,利用 Vogt 等人提出的方法估算出识别范围内的标签数量^[8-10],调整帧长 L 及分组数 g 等参数。

步骤 6 重复步骤 2 ~ 步骤 5,直到没有标签应答,或在标签动态产生情况下识别出一定数量的标签。

3.2 吞吐量分析

假设 SSGFSA 算法的帧长 L 是固定的,阅读器识别范围内的标签个数为 n ,分组数量为 g ,那么有 $r(0 \leq r \leq n/g)$ 个标签选择时隙 $i(1 \leq i \leq L/g)$ 的概率为:

$$P_i(r) = C_{n/g}^r \left(\frac{g}{L} \right)^r \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{n/g-r} \quad (2)$$

当没有碰撞发生时,每个时隙或者没有标签选中,或者只有一个标签选中。所以,一帧结束后,能成功识别的标签期望值为:

$$N_{\text{succ}} = \sum_{i=1}^L P_i(1) = n \times \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{n/g-1} \quad (3)$$

空时隙数的期望值为:

$$E = \sum_{i=1}^L P_i(0) = L \times \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{n/g} \quad (4)$$

冲突时隙数的期望值为:

$$C = L - N_{\text{succ}} - E = L - n \times \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{n/g-1} - L \times \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{n/g} \quad (5)$$

系统吞吐量为:

$$\begin{aligned} S(L) &= \frac{\text{成功时隙数}}{\text{当前帧长}} = \frac{N_{\text{succ}}}{L} = \left(\frac{n}{L} \right) \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{n/g-1} \\ S(L \rightarrow \infty) &= \left(\frac{n}{L} \right) \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{n/g-1} = \\ &= \left(\frac{n}{L} \right) \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{-\left(\frac{L}{g}\right) \left(1 - \frac{n-g}{L}\right)} = \\ &= \left(\frac{n}{L} \right) e^{-\frac{n-g}{L}} \end{aligned} \quad (6)$$

由于系统有效负载 $G = \frac{n}{L}$,即单位时隙平均发送的标签数量,则 $n = GL$:

$$S = G e^{-\frac{GL-g}{L}} = G e^{g/L-G} \quad (7)$$

从式(6)、式(7)可以看出,理论上分组数量 g 越接近帧长 L ,吞吐量越大,而在理想状态下,当 $n = g = L$ 时,每个时隙只有一个标签,吞吐量达到最大值 100%。但在实际应用中,分组数越多,分组标签之间的能量差越小,但不能低于标签所能区分的最小能量单位,所以,在 RFID 系统中,分组数有最大限制。另外,标签位置通常是不固定的,接收信号强度相近的标签处于同组时,可能会同时应答,从而产生冲突,所以吞吐量不会达到理想状态值。在最坏情况下,大量标签虽然处于不同位置,但接收信号强度一样,标签计算后属于同一组,这

时如果 $g = L$, 则这些标签始终处于同一识别时隙, 造成无法识别。为了避免该情况发生, SSGFSA 算法设定 $2g \leq L$, 保证帧内每组的时隙数大于 2, 而当识别范围内的标签数增多到识别性能明显下降时, 帧内每组的时隙数要适当增多, 即需要减少帧内分组数^[11-12]。

3.3 仿真结果与分析

为验证算法的有效性, 设计了一个 RFID 系统模型, 具体思路为: 阅读器位置固定, 电子标签动态生成, 时间和位置随机, 符合泊松概率分布, 但有标签最大数量的限制, 当待识别标签达到最大数量时, 系统新产生的标签数等于过去一个识别周期识别出的标签数。系统主要参数包括: 帧时隙数 L , 标签实际发送最大数量 n 为 2^m ($m \geq 0$), 分组数 g , 最大信号强度 P_{\max} 和最小信号强度 P_{\min} 动态变化, 与标签位置相关。通过设置不同的参数值, 在识别出一定数量 (如 1 000 个) 的标签后, 可计算出相应算法的平均效率。

图 1 是 FSA 算法与 SSGFSA 算法吞吐量的比较, 其中, 系统有效负载 $G = n/L$, n 是实际发送标签数量 (大于实际产生的标签数, 因冲突标签会重发), $n \leq 32$, 帧时隙数 $L = 32$, 分组 $g = 4$ 。从图 1 可以看出, SSGFSA 的理论值与仿真实验值基本一致。在阅读器的识别范围内, 标签个数远小于帧时隙数时, 冲突概率较小, SSGFSA 算法只比 FSA 算法略好。但当实际发送标签数量接近帧时隙数时, SSGFSA 算法优于 FSA 算法。在帧时隙数 $L = 32$ 、分组 $g = 4$ 时, SSGFSA 算法的吞吐量 S 最大值接近 40%, 而此时 FSA 算法的理论实验吞吐量的最大为 36.8%。

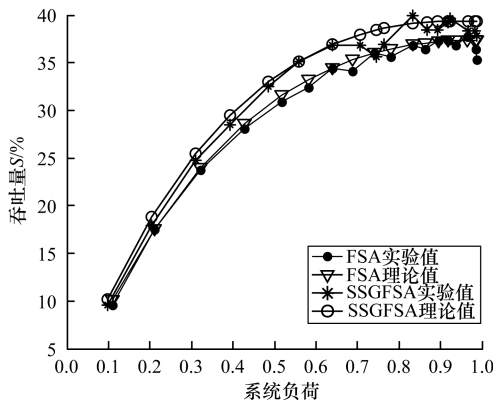


图 1 FSA 算法与 SSGFSA 算法吞吐量比较

图 2 为 FSA 算法与 SSGFSA 算法平均延迟时间在 $n \leq 32, L = 32, g = 4$ 时的情况, 采用 SSGFSA 算法后, 标签平均延迟时间会减少。

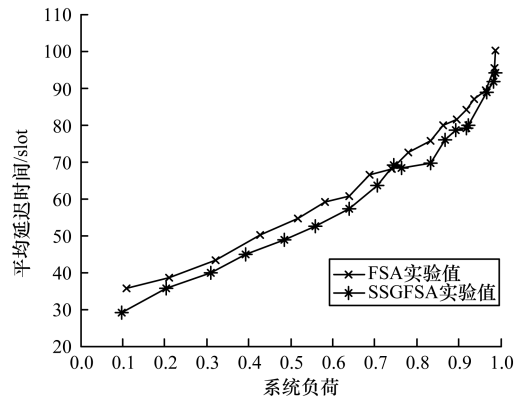


图 2 FSA 算法与 SSGFSA 算法平均延迟时间比较

图 3 为不同分组下 SSGFSA 算法的吞吐量, 其中, $n \leq 96; L = 32$ 。从图 3 可以看出, 当分组 $g = 1$ 时, 性能相当于 FSA 算法。标签数小于帧时隙数时, 分组越多, 吞吐量 S 越大, 并在 G 等于 1 前达到最大值, 可达到 50% 以上。在理想情况下, 当分组数 g 、标签数 n 、帧时隙数 L 三者相等时, 每组标签数只有 1 个, 无碰撞发生, 系统效率最高。在实际应用中, 这 3 个参数是不断变化的, 碰撞是不可避免的。随着 G 的增大, 分组的影响会减小, 当 G 大于 1.8 后, 分组越多效果越差。这是因为分组后, 每组标签数大于每组时隙数, 碰撞概率比不分组时大。

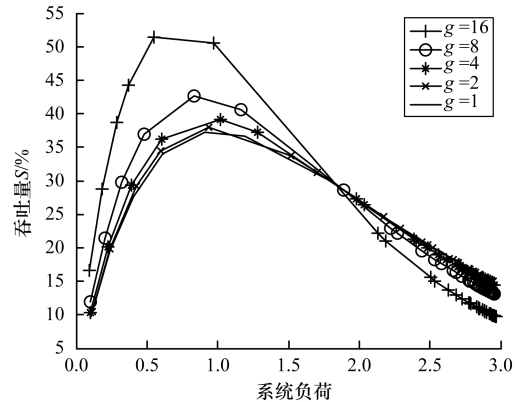


图 3 不同分组下 SSGFSA 算法吞吐量比较 1

如果考虑捕获效应^[13], 当标签产生碰撞时, 具有最大信号强度的标签仍有可能被阅读器识别, 而其他标签信号则作为背景噪声存在。

定义捕获效应下系统吞吐量为:

$$S(L) = \frac{\text{成功时隙数} + \alpha \times \text{冲突时隙数}}{\text{当前帧长}} = \frac{N_{\text{succ}} + \alpha C}{L} = (1 - \alpha) \left(\frac{n}{L} \right) \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{n/g-1} + \alpha \left(1 - \left(1 - \frac{g}{L} \right)^{n/g} \right) \quad (8)$$

其中, α 为标签冲突时的捕获系数。若每次冲突时都可以识别其中一个, 则 $\alpha = 1$, 此时分组数等于帧

时隙数时,吞吐量可以达到 1。若每次冲突都无法识别其中一个标签,则 $\alpha = 0$, 相当于无捕获效应。在 RFID 系统中, α 值取决于冲突标签响应信号的强度及离散度。捕获效应对 FSA 及 SSGFSA 算法的影响如图 4 所示, 其中, $\alpha = 0.2; n \leq 96; L = 32; g = 4$ 。可以看出, 考虑捕获效应后, 当识别范围内标签数较少 ($G < 0.25$) 时, 捕获效应对于 FSA 和 SSGFSA 基本没影响, 因为此时标签的碰撞概率很小。随着标签与帧时隙的比值增大, 即实际流量 $G = n/L$ 变大时, 捕获效应的影响也逐渐变大。当 $G > 0.25$ 时, 捕获效应开始体现; 当 $G > 0.5$ 后, 捕获效应下的吞吐量超过了无捕获效应的 FSA 算法和 SSGFSA 算法, 而且随着标签数的增加, 吞吐量不会变差。由于改进的 SSGFSA 算法采用标签接收的能量来进行分组, 能量相近的标签发送的时间比较接近, 一旦产生碰撞, 捕获系数反而较 FSA 小, 但在一定流量下, 无碰撞的概率较大, SSGFSA 算法仍比 FSA 算法的吞吐量略好。

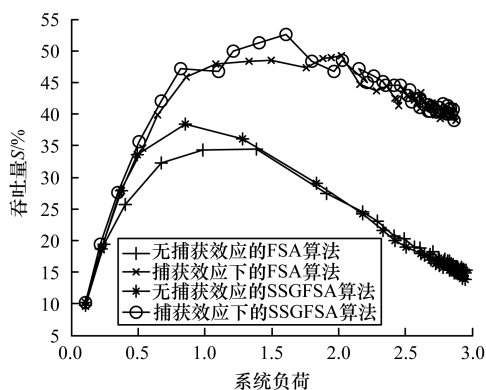


图 4 捕获效应对 FSA 及 SSGFSA 算法吞吐量的影响

当分组不同时采用 SSGFSA 算法的仿真结果如图 5 所示, 其中, $n \leq 96; L = 32$ 。可以看出, 当 $G > 1$ 时, 分组过少 ($g = 2$) 或过多 ($g = 8$) 捕获效应下的吞吐量都会逐渐下降, 若采用合适分组 ($g = 4$), 当 $G > 1$ 时, 则吞吐量会提升, 最大值出现在 $G = 1.6$ 左右。

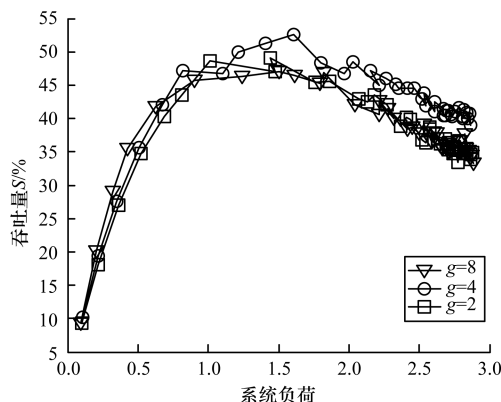


图 5 捕获效应下不同分组的 SSGFSA 算法吞吐量比较

4 与其他分组 ALOHA 算法的比较

在实际应用环境中, 阅读器识别范围内标签数量通常是动态变化的, 动态 ALOHA 算法^[9-11]根据产生碰撞的标签数量来决定识别帧的长度, 从而使系统效率达到最佳。碰撞分组算法 (Collision Group Algorithm, CGA)^[14]是一种动态 ALOHA 算法。在 CGA 标签识别过程中, 每个循环分为 2 步: (1) 阅读器发出请求命令 R_1 , 包括此步帧长 f , 标签在帧长内随机选一个时隙应答, 阅读器累计每一时隙的碰撞情况 Δ 及此步结束时的碰撞数 C_i , 当 $C_i \neq 0$ 时估算标签数 n 并设置第 (2) 步的每组时隙数 $f_g = \min(128, \max(\lceil n/c \rceil, 2))$ 及第 (2) 步帧长 $C_i \times f_g$; (2) 阅读器发出请求命令 R_2 , 包括第 (1) 步中的碰撞情况 Δ 及 f_g , 第 (1) 步中同一时隙产生碰撞的标签在同一组, 并随机选择 $1 \sim f_g$ 中某时隙再次发送。当第 (2) 步结束后, 下一循环的第 (1) 步帧长 $f = \min(128, \max(n - S_i - S_{i+1} + 1, 2))$ 。重复以上步骤, 直到碰撞次数为 0。

为验证 SSGFSA 在动态帧长下的性能, 采用前述仿真系统, 标签数估计采用 CGA 方法。由于在仿真系统中, 识别范围内的标签是动态产生的, 且有最大数量限制, 作为比对的 CGA 动态 ALOHA 算法的结束条件需稍作修改: 结束条件改为识别标签数达到设定值, 而 C_i 或 C_{i+1} 为 0 时, 直接继续下一循环。仿真系统的系统负载也相应修改为系统实际负载 (相当于标签产生速率) $G' = n'/L$, 即单位时隙平均发送的系统产生标签数, n' 为系统中实际产生的待识别标签数。

图 6 为初始帧长为 32 时, CGA 与 SSGFSA 算法性能比较, 由此可知, 在该仿真系统中, 当系统实际负载 G' 较低时, SSGFSA 与 CGA 吞吐量基本相同, 随着系统实际负载 G' 的增加, 逐渐达到最大值。SSGFSA 与 CGA 算法在 $G' > 1$ 时的吞吐量是系统负载 $G = 1$ 时的情况。可以看出, 待识别标签数量对 CGA 影响较大, 而对 SSGFSA 影响较小。

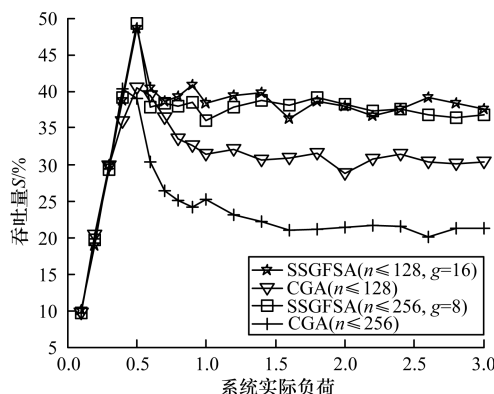


图 6 初始帧长为 32 时算法吞吐量比较

由图 7 可知,随着标签产生速率的增加,2 种算法的标签识别延时会增大并逐渐稳定,待识别标签数量越多,算法延时越大。当 $G' > 0.5$ 时,在相同待识别标签数量下,SSGFSA 性能较好。

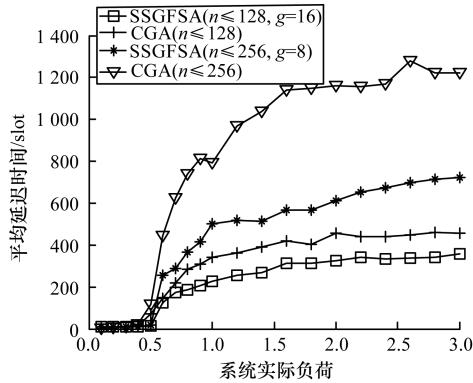


图 7 初始帧长为 32 时算法平均延迟时间比较

图 8 是不同系统实际负载下 SSGFSA 采用动态帧长时的性能,其中标签数 $n' \leq 256$ 。可以看出,在 $G' = 0.5$ 时,分组数量越多,吞吐量 S 越大,此时的系统负载 $G \approx 1$ 。系统在最大待识别标签数下,分组数对 SSGFSA 性能影响较小。

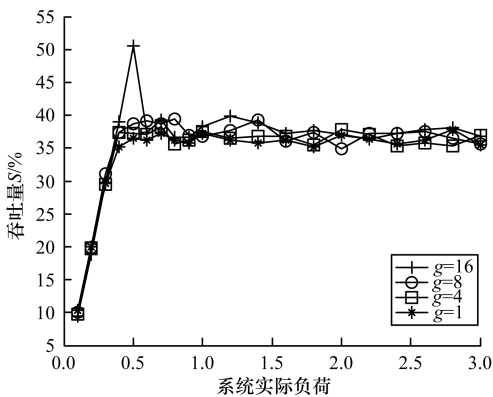


图 8 不同分组数下的 SSGFSA 算法吞吐量比较 2

5 结束语

本文提出一种基于信号强度的分组帧时隙 ALOHA 防碰撞算法,帧时隙和标签分组根据标签接收信号强度决定,使标签能更均匀地分配到帧时隙中,减少标签碰撞概率,而且对标签硬件要求较低。仿真结果表明,在合适的标签分组和系统负载情况下,SSGFSA 算法的最大吞吐量可以达到 50%,优于 FSA 及其他分组 ALOHA 算法的最大理论值 36.8%,适合在物流配送、交通运输、图书管理、食品监管、医疗设备等领域推广应用。

参考文献

- [1] Finkenzeller K. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification [M]. 3rd ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Abramson N. The Aloha System: Another Alternative for Computer Communications [C]//Proceedings of Fall Joint Computer Conference. New York, ACM Press, 1970:281-285.
- [3] Liu L, Lai S. ALOHA-based Anti-collision Algorithms used in RFID System [C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006:1-4.
- [4] Bin Z, Kobayashi M, Shimizu M. Framed ALOHA for Multiple RFID Objects Identification [J]. IEICE Transactions on Communications, 2005, 88 (3): 991-999.
- [5] 刘 闯,惠晓威. 基于 CSMA 的无线射频识别防碰撞算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(18): 284-286.
- [6] 石封茶,崔 琛,余 剑. 基于标签运动的一种新型 RFID 防碰撞算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(6): 76-79.
- [7] Friis H T. A Note on a Simple Transmission Formula [J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1946, 34(5): 254-256.
- [8] Vogt H. Efficient Object Identification with Passive RFID Tags [M]. Berlin, Germany: Springer, 2002.
- [9] Lee S R, Joo S D, Lee C W. An Enhanced Dynamic Framed Slotted ALOHA Algorithm for RFID Tag Identification [C]//Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2005:166-172.
- [10] Dhakal S, Shin S. Precise Time System Efficiency of a Frame Slotted Aloha Based Anti-collision Algorithm in an RFID System [J]. Network Protocols and Algorithms, 2013, 5(2): 16-27.
- [11] Prodanoff Z G. Optimal Frame Size Analysis for Framed Slotted ALOHA Based RFID Networks [J]. Computer Communications, 2010, 33(5): 648-653.
- [12] Namboodiri V, Desilva M, Deegala K, et al. An Extensive Study of Slotted Aloha-based RFID Anti-collision Protocols [J]. Computer Communications, 2012, 35(16): 1955-1966.
- [13] Wieselthier J E, Ephremides A, Michaels L A. An Exact Analysis and Performance Evaluation of Framed ALOHA with Capture [J]. IEEE Transactions on Communications, 1989, 37(2): 125-137.
- [14] Lin C F, Lin F Y S. Efficient Estimation and Collision-group-based Anti-collision Algorithms for Dynamic Frame-slotted ALOHA in RFID Networks [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(4): 840-848.

编辑 陆燕菲