

可并行识别的分组动态帧时隙 ALOHA 标签防碰撞算法

袁莉芬^{*①} 杜余庆^① 何怡刚^① 吕密^② 程珍^①

^①(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

^②(德州农工大学 美国德克萨斯州卡城 TX77843)

摘要: 该文针对现有动态帧时隙 ALOHA 标签防碰撞算法的系统吞吐率低、算法效率低等问题, 提出一种可并行识别的分组动态帧时隙 ALOHA(PIGDFSFA)标签防碰撞算法。该文以实验为基础, 探索了待识别标签数、标签分组数、帧长对系统吞吐率与标签碰撞率的影响, 研究了提升系统吞吐率与降低标签碰撞率的策略与方法。结合射频识别(RFID)的多天线系统, 引入 FastICA 技术, 从而实现碰撞时隙重新定义, 并以此为基础, 利用未识别标签数目自适应确定分组数与帧长。仿真结果表明: PIGDFSFA 算法在标签数达到 2000 时, 算法吞吐率仍能稳定在 92% 以上, 与 FSA-256, GDFSFA, BSDBG 等算法相比具有更高的算法吞吐率, 更少的空槽时隙, 更高的算法效率。

关键词: 射频识别; ALOHA 算法; FastICA; 分组; 动态帧时隙

中图分类号: TP391.45

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)04-0944-07

DOI: 10.11999/JEIT170654

Grouped Dynamic Frame Slotted ALOHA Tag Anti-collision Algorithm Based on Parallelizable Identification

YUAN Lifan^① DU Yuqing^① HE Yigang^① LÜ Mi^② CHENG Zhen^①

^①(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

^②(Texas A&M University, College Station, TEXAS, TX77843, USA)

Abstract: In order to solve the problem of low throughput rate and efficiency of the current dynamic frame slot ALOHA collision algorithms, a grouped dynamic frame slotted ALOHA tag anti-collision algorithm based on Parallelizable identification (PIGDFSFA) is proposed. Based on the experiments, the method and strategy of increasing the system throughput rate and lowering the tag collision rate are presented by exploring effects of the number of the tags and its groups, the frame length on the system throughput and tag collision rate. Combining the multi-antenna of the RFID system and FastICA technology, the collision slot can be redefined, and the number of the unrecognized tags can be used to set the number of groups and frame length adaptively. The simulation results show that the PIGDFSFA algorithm can stabilize the throughput rate more than 92% when the number of tags reaches 2000, and it has higher throughput rate, lesser idle slot and higher algorithm efficiency compared with the FSA-256, GDFSFA, and BSDBG algorithm.

Key words: Radio Frequency IDentification (RFID); ALOHA algorithm; FastICA; Group; Dynamic frame slot

1 引言

射频识别(Radio Frequency IDentification,

RFID)系统中读写器和标签之间进行通信过程中会产生标签碰撞问题, 导致标签的识别准确度、速度和效率等性能变差, 标签防碰撞算法成为了当前 RFID 系统亟待突破的关键技术之一^[1,2]。

目前标签防碰撞算法主要有基于时分多路的 ALOHA 算法^[3-7]和树形算法^[8-10]。树形算法识别率高, 但计算复杂, 且当标签数多的时候, 时间延迟大^[11], 不适用于密集标签环境下的实时识别。ALOHA 算法主要包括时隙 ALOHA(Slotted ALOHA, SA)算法^[12]、帧时隙 ALOHA(Frame Slotted ALOHA, FSA)算法^[13]、动态帧时隙 ALOHA(Dynamic Frame Slotted ALOHA, DFSA)算法^[14]

收稿日期: 2017-07-05; 改回日期: 2017-12-06; 网络出版: 2018-01-23

*通信作者: 袁莉芬 yuanlifan_hfut@163.com

基金项目: 国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”(2016YFF0102200), 国家自然科学基金(61102035, 51577046), 国家自然科学基金重点项目(51637004), 中国博士后特别资助项目(2015T80651), 中国博士后面上项目(2014M5517)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program “Major Scientific Equipment Development” (2016YFF0102200), The National Natural Science Foundation of China (61102035, 51577046), The National Natural Science Fund Project (51637004), China Postdoctoral Special Project (2015T80651), Chinese Postdoctoral on the Project (2014M5517)

等等。其中 SA 与 FSA 标签识别算法的时隙利用率低,而 DFSA 算法在标签数量很大时吞吐率快速下降。文献[15]提出将标签分组策略用于 DFSA,使得吞吐率能稳定在 34.6%~36.8%之间,但是该算法在一个时隙中只能识别一个标签,算法效率依然较低。据此,文献[16]引入了盲源分离技术,可在一个时隙中识别多个标签,使标签识别效率有了较大的提高。然而该算法的帧长不符合 ISO/IEC 18000-6 国际标准^[7]。此外,文献[18]引入了马尔可夫链模型加速跳过无效时隙,其过程较为复杂且需要进行时隙预测。文献[19]提出了一种动态位隙分组策略,每个标签需要利用一个 128 bit 的二进制数进行位隙分组,加大了阅读器的运算负担。

针对标签防碰撞算法存在吞吐率低、识别效率低等问题,本文通过对现有标签防碰撞算法进行实验与理论分析,发现:(1)如果能解决单时隙内多标签信号识别问题,可大大减少碰撞时隙数目,提升标签识别率;(2)系统帧长的自适应设置可提升系统吞吐率;(3)标签分组数的自适应设置可提升系统吞吐率。为此,本文提出了一种可并行识别的分组动态帧时隙 ALOHA(PIGDFSA)标签防碰撞算法。该算法引入 FastICA 技术实现多个标签在单时隙内的并行识别,可实现碰撞时隙的重新定义。同时,在符合 ISO/IEC 18000-6 国际标准相关规定的前提下,研究动态帧长调整策略以及标签分组策略,以提升系统的吞吐率与识别效率。

2 动态帧时隙 ALOHA 算法

动态帧时隙 ALOHA 算法将时间分成多个相等的时隙,然后将这些时隙打包成一个帧,每帧包含的时隙个数称为帧长,阅读器会根据未识别的标签数,动态地调整下一帧的帧长。假设某个识别帧的帧长为 L ,在阅读器的识别范围内有 n 个标签。假设某一时隙内,向阅读器返回信号的标签数 $N=0$,则这个时隙称为空闲时隙;如果 $N=1$,则这个时隙称为单标签时隙;如果 $N \geq 2$,则称这个时隙为碰撞时隙。所以,空闲时隙 P_0 ,单标签时隙 P_1 ,碰撞时隙 P_f 的概率可分别表示为^[14]

$$P_0 = \left(1 - \frac{1}{L}\right)^n \quad (1)$$

$$P_1 = C_n^1 \frac{1}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-1} \quad (2)$$

$$P_f = 1 - P_0 - P_1 \quad (3)$$

RFID 系统的吞吐率是指阅读器在一个识别帧长的时间内可以成功传输信息的时隙数目所占的比例^[13],可以用 P_1 表示。将 P_1 求关于 L 的导数得

$$\frac{dP_1}{dL} = \frac{n(n-L)}{L^3} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-2} \quad (4)$$

当 $\frac{dP_1}{dL} = 0$ 时, $L = n$, 此时系统吞吐率 $S = P_1$

取得最大值 36.8%,故动态帧时隙 ALOHA 算法取得最大吞吐率的理想状态就是帧长 L 始终等于标签数 n 。此时空闲时隙和成功时隙各占总时隙数的 36.8%,碰撞时隙为 26.4%。可以看出,理想动态帧时隙 ALOHA 算法的吞吐率依然很低,特别是随着标签数目的激增,空闲时隙与碰撞时隙总数快速增加。

3 基于动态帧时隙 ALOHA 的改进算法

3.1 同时隙多标签并行识别

基于独立成分分析的 FastICA 算法是一种盲多源信号识别算法^[20],将其引入动态帧时隙 ALOHA 算法,可实现同一时隙内多标签的并行识别,从而将碰撞时隙转化为可辨识时隙。FastICA 能很好地将源信号从混合信号中分离出来。碰撞时隙信号由不同标签信号组成,不同标签信号之间相互独立,信号能量分布为非高斯分布,满足 FastICA 的应用要求。此外, FastICA 算法具有收敛速度快、形式简单等优点^[21],可以满足多标签碰撞时隙识别的实时性要求。

假设某个时隙内有 $N(2 \leq N \leq M)$ 个标签向带有 M 个天线的阅读器返回其 EPC 编码信号 $\mathbf{S}_0 = [\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_N]^T$,各天线接收到的多标签混合信号为 $\mathbf{X}_0 = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M]^T$,经过 FastICA 算法处理得到的标签 EPC 编码估计信号为 $\mathbf{Y}_0 = [\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_N]^T$,则存在:

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{A} \mathbf{S}_0 \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{W} \mathbf{X}_0 \quad (6)$$

其中, $\mathbf{A}$ 是 $M \times N$ 维的混合矩阵,具体形式由信道特征决定。 $\mathbf{W}$ 是 $N \times M$ 维的解混矩阵。利用 FastICA 算法可求出解混矩阵 $\mathbf{W}$,进而估计出 N 个标签 EPC 编码信号 $\mathbf{S}_0$ 的估计信号 $\mathbf{Y}_0$ 。其步骤如下:

(1)采集多标签混合信号 $\mathbf{X}_0$ 的观测信号 $\mathbf{X}$, $\mathbf{X}_0 = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M)^T$ 由 M 个连续信号组成, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_M]^T$,其中 M 为天线个数, $\mathbf{x}_i = [\mathbf{x}_{i1}, \mathbf{x}_{i2}, \mathbf{x}_{i3}, \dots, \mathbf{x}_{il}]$ 为第 i 个天线的采样值(其中 $1 \leq i \leq M$), l 为采样数据长度。

(2)对观测信号 $\mathbf{X}$ 进行去均值和白化处理,对观测信号 $\mathbf{X}$ 去均值得 $\mathbf{X}'$: $\mathbf{X}' = \mathbf{X} - \mathbf{E}(\mathbf{X})$, $\mathbf{E}(\mathbf{X})$ 为采集的观测信号的均值。

对去均值后的信号 $\mathbf{X}'$ 进行白化处理:

(a) 求出 $\mathbf{X}'$ 的相关矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1M} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{M1} & \rho_{M2} & \cdots & \rho_{MM} \end{bmatrix}$$

(b) 求出相关矩阵 $\mathbf{R}$ 的特征值和特征向量, 进而得出特征值对角阵 $\mathbf{\Lambda}$ 和特征向量矩阵 $\mathbf{Q}$;

(c) 计算线性变换矩阵 $\mathbf{H} = \mathbf{\Lambda}^{-1/2} \mathbf{Q}^T$;

(d) 求得白化后的信号 $\mathbf{Z} = \mathbf{H} \mathbf{X}'$ 。

(3) 依次求出第 i ($1 \leq i \leq M$) 个标签信号的解混系数向量 $\mathbf{w}'_i$, 进而求出 $\mathbf{y}_i$ 。

(a) 确定要估计的信号个数 N , 取 $i = 1$;

(b) 随机选择一个满足 $\|\mathbf{w}_i\| = 1$ 的初始化向量 $\mathbf{w}_i$, $\|\cdot\|$ 表示矩阵范数;

(c) 将 $\mathbf{w}_i$ 代入公式: $\mathbf{w}_i \leftarrow \mathbf{E}\{\mathbf{Z} \mathbf{g}(\mathbf{w}_i^T \mathbf{Z})\} - \mathbf{E}\{\mathbf{g}'(\mathbf{w}_i^T \mathbf{Z})\} \mathbf{w}_i$ 对 $\mathbf{w}_i$ 进行更新, “ $\leftarrow$ ” 表示赋值, 函数 $G(y)$ 取: $G(y) = -\exp(-y^2/2)$, $g(y) = G'(y) = y \cdot \exp(-y^2/2)$, $g'(y) = (1 - y^2) \exp(-y^2/2)$;

(d) 正交化 $\mathbf{w}_i: \mathbf{w}_i \leftarrow \mathbf{w}_i - \sum_{j=1}^{i-1} (\mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_j) \mathbf{w}_j, j = 1, 2, \dots, i-1, i \geq 2$, $\mathbf{w}_j$ 为已经算出的解混系数向量;

(e) 归一化 $\mathbf{w}_i: \mathbf{w}'_i \leftarrow \frac{\mathbf{w}_i}{\|\mathbf{w}_i\|}$;

(f) 判断收敛性: $|\left(\mathbf{w}_i\right)^T \mathbf{w}'_i| - 1 < \varepsilon$? 即判断未代入公式向量 $\mathbf{w}_i$ 和解混系数向量 $\mathbf{w}'_i$ 的数量积的绝对值 1 的差值是否小于 ε , 如果是, 求出一个标签 EPC 估计信号 $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{w}'_1 \mathbf{X}_0$; 否则返回步骤(c);

(g) 求出其它独立成分: 置 $i \leftarrow i + 1$, 如果 $i \leq N$, 返回步骤(b), 根据 $\mathbf{Y}_i = \mathbf{w}'_i \mathbf{X}_0$ 依次求出该时隙的剩余标签 EPC 估计信号 $\mathbf{Y}_2, \mathbf{Y}_3, \dots, \mathbf{Y}_N$, 如果 $i > N$, 结束识别过程。

3.2 动态帧长调整原则

在 RFID 系统工作的过程中, 阅读器以识别帧为周期对标签进行识别。如果以固定的帧长识别标签, 当标签数很少时, 帧长过长, 导致空闲时隙过多; 当标签数过多时, 帧长过短, 导致碰撞时隙过多。因此, 根据未识别的标签数自适应地改变帧长, 可以提高信道利用率和算法吞吐率。

文献[19]表明: 当某个时隙的标签数 k 满足 $2 \leq k \leq M$ 时, 其中 M 为阅读器的天线数, 该时隙的标签可以利用 FastICA 算法识别, 这类碰撞时隙就变成了可识别的多标签时隙。因此, 当待测标签

数为 n , 阅读器天线数为 M 时, 碰撞时隙可重新定义为: 向阅读器返回信号的标签数多于阅读器天线数的时隙。

若 P_0, P_1, P_k, P_f 与 S 分别代表空闲时隙概率、单标签时隙概率、多标签可辨识时隙概率、碰撞时隙概率与吞吐率, 则各计算方法为

$$P_0 = \left(1 - \frac{1}{L}\right)^n \quad (7)$$

$$P_1 = C_n^1 \frac{1}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-1} \quad (8)$$

$$P_k = \sum_{k=2}^M C_n^k \left(\frac{1}{L}\right)^k \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-k}, \quad 2 \leq k \leq M \quad (9)$$

$$P_f = 1 - P_0 - P_1 - P_k \quad (10)$$

$$S = P_1 + P_k = \sum_{k=1}^M C_n^k \left(\frac{1}{L}\right)^k \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-k} \quad (11)$$

考虑到阅读器的成本, 天线数 M 一般不大于 8 个, 本文以 $M = 8$ 为例对算法的吞吐率进行分析。在帧长数 L 取值不同的情况下, 随着标签数的增加, 算法吞吐率曲线如图 1 所示。

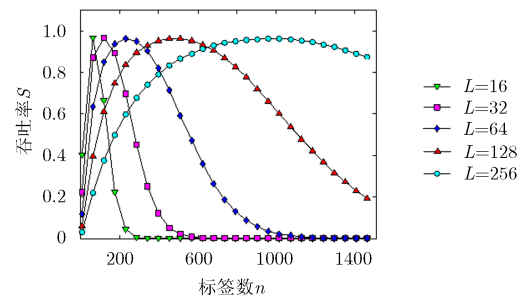


图1 $M=8$ 时不同帧长算法吞吐率

从图 1 中可以发现: (1) 本算法的理想最高吞吐率最高可达 97.3%; (2) 帧长若固定不变, 随着待测标签数目的增长, 吞吐率 S 先快速上升, 后快速下降; (3) 如果根据标签数动态地调整帧长, 则可使吞吐率曲线处于上包络线, 吞吐率稳定在 92.0% 以上。

因此, 根据待测标签数量, 动态调整帧长, 可让吞吐率维持在理想的最佳状态, 此时对应的标签数就是调整帧长的临界点, 由式(12)确定。

$$\sum_{k=1}^M C_n^k \left(\frac{1}{L_1}\right)^k \left(1 - \frac{1}{L_1}\right)^{n-k} = \sum_{k=1}^M C_n^k \left(\frac{1}{L_2}\right)^k \left(1 - \frac{1}{L_2}\right)^{n-k} \quad (12)$$

根据 ISO/IEC 18000-6 国际标准^[17]关于帧长的规定, 时隙 ALOHA 算法的帧长只能取 8~256 等 2 的整数次幂, 最大不能超过 256。根据式(12)可求出两个相邻帧长 L_1, L_2 算法吞吐率交点对应的标签数, 从而得到每个帧长对应的最优待测标签数目范围, 其结果如表 1 所示。

表1 帧长与待测标签数量范围

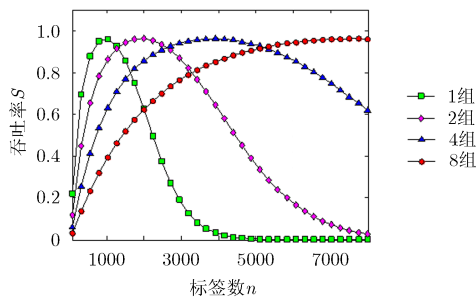
帧长	8	16	32	64	128	256
最小标签数	1	42	83	164	327	652
最大标签数	41	82	163	326	651	1301

由表1可以看出,若 $\lfloor x \rfloor$ 表示不大于 x 的最大整数,则帧长 L 与标签数 n 的关系为

$$L = 8 \times 2^{\lfloor \log_2(n/21) \rfloor} \quad (13)$$

3.3 标签分组原则

从图1可以发现,当标签数目较大($n > 651$)时,帧长取固定值 $L = 256$,当标签数目持续增加,系统吞吐率会降低。为使吞吐率维持在一个较高的水准,可以通过分组限制每次响应标签的数目。为确保分组的最佳性能,在帧长 $L = 256$ 不变的情况下,随着标签数的增加,不同分组数与系统吞吐率之间的关系曲线如图2所示。

图2 $L=256$ 时不同分组数的算法吞吐率

根据式(14),选取对标签进行分组的临界值,即相邻分组数吞吐率交点对应的标签数。

$$\sum_{k=1}^M C_{n/a}^k \left(\frac{1}{256} \right)^k \left(1 - \frac{1}{256} \right)^{n/a-k} = \sum_{k=1}^M C_{n/b}^k \left(\frac{1}{256} \right)^k \left(1 - \frac{1}{256} \right)^{n/b-k} \quad (14)$$

例如,取分组数 $a = 1$, $b = 2$,代入式(14)求得 $n = 1301$,即将标签分为1组和2组临界值。在式(14)中改变 a, b 的值,可求得其它分组数的临界值,根据各临界值将标签进行分组,其结果如表2所示。

由表2可以看出,分组数 r 可以利用标签数 n 表示为

$$r = \lfloor n/1302 \rfloor + 1 \quad (15)$$

表2 分组数与标签数量的关系

分组数	1	2	3	4	...
最小标签数	1	1302	2604	3906	...
最大标签数	1301	2603	3905	5207	...

按照式(15)的规则对标签进行分组,即使标签数很大,如图2所示,算法吞吐率仍能稳定在0.92以上。克服了传统ALOHA算法随着标签数增多,算法吞吐率急剧下降的弊端。

3.4 算法流程

根据3.1节,3.2节,3.3节的分析可知,在满足ISO/IEC 18000-6国际标准的前提下,标签识别过程中采取可并行识别的分组动态帧时隙ALOHA(PIGDFSA)标签防碰撞算法可提升系统性能,具体流程如图3所示。

4 算法仿真结果与分析

为了验证本文算法的有效性 with 实用性,分别对FSA-256, GDFSA, BSDBG算法以及本文算法(PIGDFSA),从吞吐率、空闲时隙比率、标签识别率等方面进行比较来衡量本算法的性能。仿真实验将标签设置为均匀分布,标签数目设置为1~2000,标签数每隔50个统计1次,每种算法各统计40次。特别说明:BSDBG算法是一种基于动态位隙分组的盲分离防碰撞算法,仿真实验将阅读器天线数设置为与本文相同的8个。此外,该算法识别标签的最小周期为一个位隙分组,相当于与之相比较的算法中的时隙。

4.1 吞吐率实验结果与分析

从图4可以看出,FSA-256在标签数大于256后,吞吐率急剧下降。而GDFSA算法能将吞吐率稳定在34.6%以上,然而该优化算法吞吐率的最大值达不到40%。BSDBG算法的吞吐率能达到86.6%以上,波动较大。而本文提出的PIGDFSA算法的吞吐率能够始终稳定在92.0%以上,且最大值可达97.3%,在绝大多数标签数区段,该算法吞吐率均大于或等于BSDBG算法吞吐率,且波动性更小,稳定性更强。当标签数为2000时,FSA-256, GDFSA, BSDBG, PIGDFSA算法的吞吐率均值分别为12.76%, 36.14%, 93.58%, 94.98%。PIGDFSA算法的吞吐率均值分别是前面3种算法的744.4%, 262.8%, 101.5%, 算法吞吐率提高比分别达到了644.4%, 162.8%和1.5%。

4.2 空闲时隙比率实验结果与分析

图5为空闲时隙比率仿真图,可以看出本文提出的PIGDFSA算法的空闲时隙比率不超过7.9%,而GDFSA算法在25%和50%之间来回波动,BSDBG算法空闲时隙比率在13.4%以下,FSA-256随着标签数的增加空闲时隙比率降得很低,但其算法性能却变得较低下,因为造成了大量的标签碰撞。

FSA-256, GDFSA, BSDBG, PIGDFSA算法在

标签数为 2000 时, 空闲时隙比率的均值分别为 12.74%, 38.31%, 5.86%, 3.61%, FSA-256, GDFSFA, BSDBG 算法的空闲时隙比率均值分别是 PIGDFSFA 算法的 3.53, 10.61, 1.62 倍。可见, PIGDFSFA 算法的空闲时隙得到了有效的抑制, 相比于前面 3 种算法较大地降低了该类时隙造成的时间开销。

4.3 算法效率实验结果与分析

算法效率, 又称为标签识别率, 反映的是阅读器每次操作可以成功读取的标签数, 也就是每个时隙成功识别标签数量的期望^[19]。

本文提出的 PIGDFSFA 算法可以在一个时隙中识别 1~M 个标签, 故算法效率:

$$E = \sum_{k=1}^M k C_n^k \left(\frac{1}{L} \right)^k \left(1 - \frac{1}{L} \right)^{n-k} \quad (16)$$

从图 6 可以看出, PIGDFSFA 算法的算法效率

能维持在 2.53~4.47 之间, BSDBG 算法的算法效率基本稳定在 2.35~3.87 之间, GDFSFA 算法的算法效率能保持平稳, 但始终无法突破 0.37。FSA-256 算法的算法效率在标签数为 256 达到峰值 0.368 之后快速下降。显然, PIGDFSFA 算法的算法效率高于其它 3 种算法。当标签数为 2000 时, FSA-256, GDFSFA, BSDBG, PIGDFSFA 算法的算法效率均值分别为 0.1216, 0.3614, 3.0186, 3.7297, 相对于前面 3 种算法, PIGDFSFA 算法的算法效率分别提高了 29.70, 9.32, 0.24 倍。

5 结论

本文针对动态帧时隙 ALOHA 算法存在的吞吐率低、空闲时隙比例高、算法效率低等问题, 引入了 FastICA 技术实现多个标签在单一时隙内的并行识别, 同时提出了可提升系统吞吐率的动态帧长调

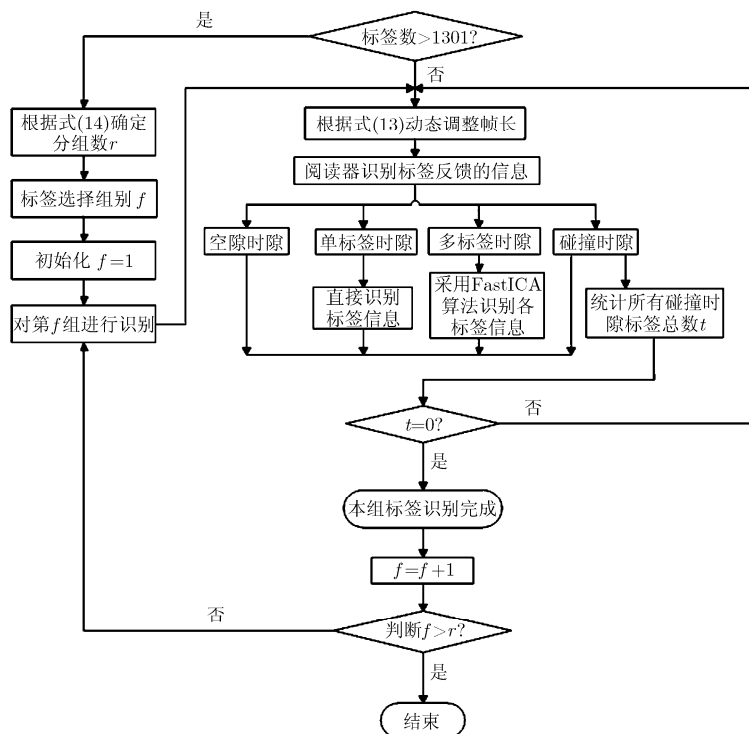


图3 PIGDFSFA 算法流程图

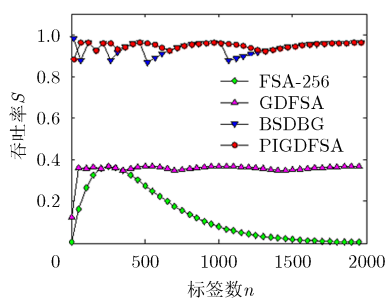


图4 算法吞吐率比较

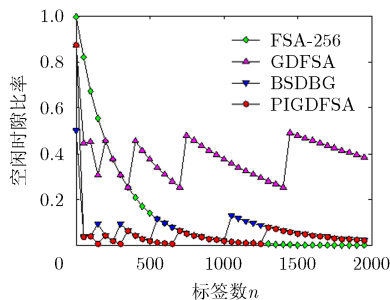


图5 空闲时隙比率比较

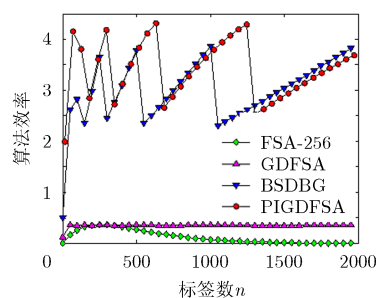


图6 算法效率比较

整策略以及标签分组策略,并在符合 ISO/IEC 18000-6 国际标准相关规定的前提下,提出一种可并行识别的分组动态帧时隙 ALOHA(PIGDFSFA)标签防碰撞算法。仿真实验表明,随着标签数目的增加,算法吞吐率能够稳定在 92.0%和 97.3%之间,相对于传统 ALOHA 算法有了大幅提高。此外,该算法还具有空闲时隙比率低、算法效率高等优点。因此,本文提出的算法具有稳定、高效的优点,具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] GROVER A and BERGHEL H. A survey of RFID deployment and security issues[J]. *Journal of Information Processing Systems*, 2011, 7(4): 561-580. doi: 10.3745/JIPS.2011.7.4.561.
- [2] 丁治国. RFID 关键技术研究 with 实现[D]. [博士学位论文], 中国科学技术大学, 2009. doi: 10.7666/d.y1498442.
DING Zhiguo. Research and realization on key technologies of RFID[D]. [Ph.D. dissertation], *University of Science and Technology of China*, 2009. doi: 10.7666/d.y1498442.
- [3] CHEN Wentzu. Optimal frame length analysis and an efficient anti-collision algorithm with early adjustment of frame length for RFID systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(5): 3342-3348. doi: 10.1109/TVT.2015.2441052.
- [4] SU J, SHENG Z, HONG D, *et al.* An efficient sub-frame based tag identification algorithm for UHF RFID systems[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Kuala Lumpur, 2016: 1-6. doi: 10.1109/ICC.2016.7511360.
- [5] 尹君, 何怡刚, 李兵, 等. 基于分组动态帧时隙的 RFID 防碰撞算法[J]. *计算机工程*, 2009, 35(20): 267-269. doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2009.20.094.
YIN Jun, HE Yigang, LI Bing, *et al.* RFID anti-collision algorithm based on grouping dynamic frame slotted[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(20): 267-269. doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2009.20.094.
- [6] XU Y and CHEN Y. An improved dynamic framed slotted ALOHA anti-collision algorithm based on estimation method for RFID systems[C]. *IEEE International Conference on RFID*, San Diego, USA, 2015: 1-8. doi: 10.1109/RFID.2015.7113066.
- [7] 苏健, 韩雨, 骆忠强, 等. 超高频 RFID 系统中一种可行的时间最优防碰撞算法[J]. *电子学报*, 2015, 43(8): 1651-1655. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.08.027.
SU Jian, HAN Yu, LUO Zhongqiang, *et al.* A feasible time-optimal anti-collision algorithm for UHF RFID systems[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(8): 1651-1655. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.08.027.
- [8] LI Zhiwen and SUN Min. Adaptive N-tree anti-collision algorithm based on collided bit collided bit[C]. *International Conference on Information Science and Control Engineering*, Beijing, 2016: 809-813.
- [9] 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. doi: 10.3969/j.issn.1000-436X.2010.06.008.
WANG Xue, QIAN Zhihong, HU Zhengchao, *et al.* Research on RFID anti-collision algorithms based on binary tree[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(6): 49-57. doi: 10.3969/j.issn.1000-436X.2010.06.008.
- [10] WANG H, YANG Q, WAN X, *et al.* A capture-aware and blocking binary tree protocol for RFID tag identification[C]. *International Conference on Signal Processing and Communication Systems*, Queensland, Australia, 2016: 1-5. doi: 10.1109/ICSPCS.2016.7843332.
- [11] HE Y and WANG X. An ALOHA-based improved anti-collision algorithm for RFID systems[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(5): 152-158. doi: 10.1109/MWC.2013.6664486.
- [12] AHMED H A, SALAH H, ROBERT J, *et al.* A closed form solution for frame slotted ALOHA utilizing time and multiple collision recovery coefficients[C]. *IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks*, Texas, USA, 2016: 11-14.
- [13] 邹雪城, 童乔凌, 刘冬生, 等. 基于贝叶斯估计的 RFID 帧时隙 ALOHA 算法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(7): 74-77. doi: 10.13245/j.hust.2010.07.022.
ZOU Xuecheng, TONG Qiaoling, LIU Dongsheng, *et al.* Bayesian estimation-based dynamic framed slotted ALOHA algorithm in RFID systems[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(7): 74-77. doi: 10.13245/j.hust.2010.07.022.
- [14] VAZQUEZ-GALLEGO F, ALONSO-ZARATE J, and ALONSO L. Reservation dynamic frame slotted-ALOHA for wireless M2M networks with energy harvesting[C]. *IEEE International Conference on Communications*, London, 2015: 5985-5991. doi: 10.1109/ICC.2015.7249276.
- [15] 庞宇, 彭琦, 林金朝, 等. 基于分组动态帧时隙的射频识别防碰撞算法[J]. *物理学报*, 2013, 62(14): 488-495. doi: 10.7498/aps.62.148401.
PANG Yu, PENG Qi, LIN Jinzhao, *et al.* Reducing tag collision in radio frequency identification systems by using a grouped dynamic frame slotted ALOHA algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(14): 488-495. doi: 10.7498/aps.62.148401.
- [16] 张小红, 穆宇超. 盲分离的帧时隙超高频 RFID 系统防碰撞算法[J]. *计算机工程与科学*, 2015, 37(3): 559-565. doi: 10.3969/j.issn.1007-130X.2015.03.025.

- ZHANG Xiaohong and MU Yuchao. Anti-collision algorithm for UHF RFID systems based on blind separation and framed-slot[J]. *Computer Engineering & Science*, 2015, 37(3): 559–565. doi: 10.3969/j.issn.1007-130X.2015.03.025.
- [17] International organization for standardization. ISO/IEC 18000-6[S]. 2004.
- [18] 付钰, 钱志鸿, 孟婕, 等. 基于连续时隙预测的帧时隙 Aloha 防碰撞算法[J]. 电子学报, 2016, 44(9): 2081–2086. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.009.
- FU Yu, QIAN Zhihong, MENG Jie, *et al.* FSA anti-collision algorithm based on continuous slot prediction[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(9): 2081–2086. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.009.
- [19] 栗华, 贾智平, 王洪君, 等. 基于动态位隙分组盲分离的 UHF RFID 防碰撞算法[J]. 通信学报, 2012, 33(4): 47–53. doi: 10.3969/j.issn.1000-436X.2012.04.007.
- LI Hua, JIA Zhiping, WANG Hongjun, *et al.* UHF RFID anti-collision algorithm based on blind separation and dynamic bit-slot grouping[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(4): 47–53. doi: 10.3969/j.issn.1000-436X.2012.04.007.
- [20] 史振威. 独立成分分析的若干算法及其应用研究[D]. [博士学位论文], 大连理工大学, 2005. doi: 10.7666/d.y714607.
- SHI Zhenwei. Several algorithms for independent component analysis and their applications[D]. [Ph.D. dissertation], Dalian University of Technology, 2005. doi: 10.7666/d.y714607.
- [21] 季策, 胡祥楠, 朱丽春, 等. 改进的高阶收敛 FastICA 算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(10): 1390–1393.
- JI Ce, HU Xiangnan, ZHU Lichun, *et al.* Improved higher order convergent FastICA algorithm[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(10): 1390–1393.
- 袁莉芬: 女, 1976 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为测试与故障诊断、智能电网技术、射频识别技术.
- 杜余庆: 男, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为射频识别技术.
- 何怡刚: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为模拟和混合集成电路设计、测试与故障诊断、智能电网技术、射频识别技术、虚拟仪器和智能信号处理.
- 吕 密: 女, 1958 年生, 教授, 研究方向为并行计算、分布式处理、并行计算机架构和算法、计算机算术运算、计算机网络、计算几何和 VLSI 算法.
- 程 珍: 女, 1988 年生, 讲师, 研究方向为仿生感知和信号处理.