

基于空闲时隙消除的超高频 RFID 防碰撞算法

苏 健^{1,2}, 谢良波², 杨 颖³, 文光俊², 孟庆微⁴

(1. 南京信息工程大学计算机与软件学院, 江苏南京 210044; 2. 电子科技大学通信与信息工程学院, 四川成都 611731
3. 成都理工大学管理科学学院, 四川成都 610059; 4. 空军工程大学信息与导航学院 陕西西安 710077)

摘 要: 标签防碰撞是射频识别系统中的一项重要研究课题. 为了进一步提高射频识别系统的性能和降低复杂度, 提出了一种基于空闲时隙消除的二进制分裂算法. 该算法在二进制分裂算法中引入了单比特状态标识位, 在识别过程中, 标签在 ID 数据传输之前先发送单比特随机信号, 用于判定时隙是否碰撞, 从而避免了冗余的信息传输. 由于该算法彻底消除了传统二进制随机数分裂方法中的空闲时隙, 因此节省了识别过程中的协调时间开销. 最后通过理论分析和仿真结果证明: ISE-BS 算法的吞吐率稳定在 40.65% 左右, 时间效率稳定在 32.46% 左右, ISE-BS 算法相比于现有的防碰撞算法性能更优. 从实现的角度, 比较了各个算法的浮点运算成本, 结果显示提出的算法可以极大的降低系统复杂度.

关键词: 射频识别; 防碰撞; 吞吐率; 时间效率

中图分类号: TP399

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)02-0307-08

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.007

Idle Slots Elimination Based Anti-collision Algorithm for UHF RFID

SU Jian^{1,2}, XIE Liang-bo², YANG Ying³, WEN Guang-jun², MENG Qing-wei⁴

(1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;
2. School of Communications and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu, Sichuan 611731, China;
3. School of Management Science, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
4. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: Tag collision avoidance is a critical issue in RFID system. In order to further improve the performance of RFID system and reduce the computation complexity, an efficient idle slots elimination anti-collision algorithm based on binary splitting (ISE-BS) is proposed. In ISE-BS, one bit control flag signal is introduced to transmit before data exchange, where tag collision can be informed by control signal and the unnecessary data exchange between a reader and tags can be further avoided. Since the idle slots during BS algorithm are eliminated by ISE-BS, coordination transmission time of identification process is saved. Simulation results show that the proposed ISE-BS algorithm achieves throughput of 0.4065 and time efficiency of 0.3247, outperforms the existing anti-collision algorithms. To the view of implement, we compare the floating point operations (FLOP) cost of various algorithms. The results show that the proposed algorithm significantly reduces the system's complexity.

Key words: radio frequency identification; anti-collision; throughput; time efficiency

1 引言

RFID (Radio frequency Identification) 作为物联网感知层的关键技术之一, 能实现多目标快速识别而被广泛应用于各个领域, 特别是物流管理、供应链管理, 食品生产, 生物电子及制药, 工业自动化等领域^[1]. 在 RFID 技术所涵盖的众多频段中, 无源超高频

(UHF)^[2,3] RFID 由于其通信距离长, 识别速度快, 存储容量大, 低成本等优点, 更受青睐. 要实现多目标快速同时识别, 就需要解决由于多标签竞争同一信号而导致的多标签碰撞问题. 而解决标签碰撞问题就需要引入防碰撞算法, 通过防碰撞算法来实现多目标产品的追踪与识别. UHF 频段的 RFID 产品由于读写器覆盖范围广, 处于读写器工作域内的标签数目很多, 就使得 UHF

RFID 系统的标签碰撞问题更为突出. 因此, 在 UHF RFID 系统中引入高效、稳定、且易实现的防碰撞算法是实现 UHF RFID 产业化的关键.

典型的, 标签防碰撞算法可以分为概率性算法^[4-6]和确定性算法^[7-9]. 确定性算法又称为查询树 (query tree, QT) 算法, 主要基于碰撞比特识别和追踪技术. 然而, 在 UHF RFID 系统中, 由于读写器端的接收信号存在频率偏移, 导致读写器不能有效的检测到具体的碰撞位, 因此使得 QT 类算法难以应用到 UHF RFID 系统中, 诸如 EPCglobal C1 Gen2^[10] 或者 ISO/IEC 18000 - 6B^[9]. 在 EPCglobal C1 Gen2 系统中, 不同标签的调制信号的符号速率偏移高达 22%^[11], 这就意味着不同标签的响应最大间隔时间为 24 微秒 (μs). 类似地, 在 ISO/IEC 18000 - 6B 标准中, 标签的符号速率偏差高达 15%.

概率性算法可以分为 Aloha 类算法^[4,6,11-14]和二进制分裂算法 (binary splitting, BS)^[5]. Aloha 类算法的基本思想是, 读写器发送查询命令后, 标签随机选择一个时隙来响应, 读写器检测标签的响应并判断是否产生碰撞, 如果检测到碰撞, 读写器发送命令让标签停止发送数据, 各个标签随机延迟一段时间再发送. 这类算法的关键是: 通过延迟不同的随机时间, 来降低碰撞的概率. 目前国内外一些先进的 Aloha 类算法主要包括 Q 算法^[10], 最大后验概率估计算法 (Maximum a posteriori estimation, MAP)^[4], 基于分组动态帧时隙 Aloha 算法 (grouped dynamic frame slotted Aloha, GDFSA^[12]、快速防碰撞算法 (fast anti-collision algorithm, FACA)^[13]、提高型线性组合模型算法 (improved linearized combinatorial model, ILCM)^[14] 等. 其中 MAP 算法基于最大后验概率估计标签数, 涉及最优化运算, 因此计算复杂度较高, 难以应用于移动读写器. GDFSA 算法首先预估待识别的标签数, 然后采用分组以及动态帧时隙策略对标签进行识别. 同 MAP 算法类似, GDFSA 算法同样需要不断的迭代搜索来对标签数进行预估, 这一过程增加了读写器的开销. FACA 算法通过帧内早期观察来判断当前帧是否最优, 该算法的优点是对标签数的估计和帧长的调整所依据的理论公式相对简单, 复杂度低, 缺点是识别性能亟待提高. ILCM 引入适度的浮点运算 (floating point operations, FLOP) 成本, 可以作为标签估计方法应用于防碰撞算法中. ILCM 算法的优点是降低了标签数估计过程中的能量消耗, 缺点是它的性能随着标签数的增加而恶化. 此外, Aloha 类算法并不能保证标签完全识别, 也就是存在 ‘标签饿死’ 的问题, 且识别性能对标签数敏感. 因此, 本文对此类算法不做过多探讨, 将重点放在 BS 算法.

BS 算法利用二进制随机数 0/1 将标签进行分组,

碰撞的标签其计数器值随机加上 0/1, 其余标签计数器值加 1, 直到某个分组仅包含一个标签, 读写器就可以识别该标签. 尽管 BS 算法不存在 ‘标签饥饿’ 问题, 但是由于标签群分裂所引起的空闲时隙会造成较高的识别延迟. 近年来, 有研究者提出了一种自适应二进制树时隙 Aloha (ABTSA)^[15] 的混合防碰撞算法, 该算法将 Aloha 类算法与 BS 算法结合起来从而实现更好的识别效率. 与 Aloha 算法和 BS 算法相比, 虽然 ABTSA 可以实现更好的吞吐率, 但是该算法的实施需要级联两种不同的算法, 要求标签同时支持两种截然不同的架构, 导致算法实现复杂度高.

为了提高 UHF RFID 系统的识别效率, 本文提出了一种基于空闲时隙消除的二进制分裂算法 (idle slots elimination based binary splitting, ISE-BS). ISE-BS 算法引入了单比特标识位, 利用该标识位对标签组进行辅助分裂, 不但消除了 BS 算法中由于标签分裂所产生的空闲时隙, 且 ISE-BS 算法所设计的碰撞仲裁策略节省了协调传输时间, 从而提高了系统识别效率. 性能分析和仿真结果显示, ISE-BS 算法无论在吞吐率, 时间效率, 识别延迟, 还是计算复杂度等方面都优于现有算法.

2 算法描述

2.1 BS 算法

BS 算法的流程图如图 1 所示.

从图中可以看出每个标签都有一个计数器 T_c 和一个二进制随机数发生器 Q . 根据接收到的标签的响应数据, 读写器会给出三种不同的反馈信号: ID 碰撞, ID 成功和空闲. 其中 ID 碰撞表示单前有多个标签同时向读写器发送数据, 导致读写器无法正确识别标签. ID 成功

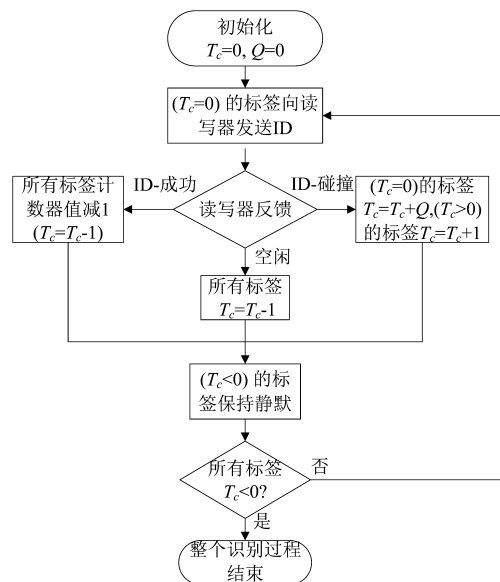


图1 BS算法流程图

意味着当前时隙仅有一个标签返回 ID 数据,因此被成功识别. 空闲表示当前时隙无标签响应. 根据不同的反馈信号,标签执行如下操作:

ID-空闲:所有标签的 $T_c = T_c - 1$.

ID-成功:所有标签的 $T_c = T_c - 1$.

ID-碰撞:计数器为 0 的标签 $T_c = T_c + Q$, $T_c > 0$ 的标签 $T_c = T_c + 1$.

BS 算法的优点是性能稳定,即使标签数波动较大时,算法性能也能保持稳定. 文献[5]分析指出,当标签数量较多时,此类算法可以保持 34.8% 左右的吞吐率,接近 Aloha 类算法的吞吐率. 然而此类算法存在大量的空闲时隙,且碰撞仲裁所需的传输时间长,因此总体识别效率仍有很大的提升空间.

2.2 ISE-BS 算法

本文提出的 ISE-BS 算法的流程如图 2 所示.

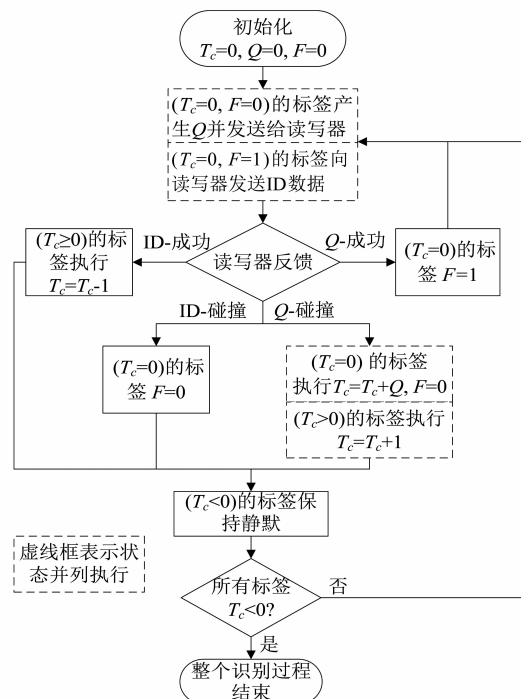


图2 ISE-BS算法流程图

从图中可以观察到,在该算法中,标签在原有计数器 T_c 和随机数发生器 Q 的基础上增加了一个二进制标识位 F . 当标签计数器值和标识位均为 0 ($T_c = 0, F = 0$) 时,标签随机产生 Q 并发送给读写器. 当标签计数器值为 0,标识位为 1 ($T_c = 0, F = 1$) 时,标签向读写器发送 ID 数据. 在初始化识别过程时,所有标签的标识位均为 0. 识别过程中,标识位的状态变化取决于读写器的反馈信号. 下面结合图 2 列出了 ISE-BS 算法中,读写器的反馈信号及标签对应的操作.

Q-碰撞:当多个标签同时向读写器发送 Q 信号,且 Q 信号不同时,导致读写器无法正确识别 Q 信号,产生

Q 碰撞. 读写器会发送 Q -碰撞的反馈信号,此时 $T_c = 0$ 的标签执行 $T_c = T_c + Q, F = 0$; $T_c > 0$ 的标签执行 $T_c = T_c + 1$.

Q-成功:当多个标签同时向读写器发送相同的 Q 信号,或者只有一个标签发送 Q 信号时,读写器可以正确识别 Q 信号. 读写器会发送 Q -成功的反馈信号,此时 $T_c = 0$ 标签将标识位 F 变为 1,并向读写器返回 ID 数据.

ID-成功:当读写器成功接收到 Q 信号后,会向标签广播 Q -成功的反馈信号,此时 $T_c = 0$ 的标签会转换标识位并返回 ID 数据. 如果读写器无碰撞的接收到 ID 数据,就会发送 ID-成功的反馈信号,此时 ($T_c \geq 0$) 的标签会执行 $T_c = T_c + 1$.

ID-碰撞:读写器在发送 Q -成功的反馈信号后,多个标签同时返回 ID,导致读写器无法成功识别 ID,产生 ID 碰撞. 读写器会发送 ID-碰撞的反馈信号,此时 ($T_c = 0$) 的标签将状态标识位清零 ($F = 0$).

从算法的流程图可知,标签被读写器成功识别前,会先发送 Q 信号,只有收到 Q -成功的反馈信号后,才会向读写器发送其 ID 信号. 在 ISE-BS 算法中,有三种时隙状态:ID-成功, ID-碰撞和 Q -碰撞. 图 3 和图 4 分别给出了读写器采用 ISE-BS 算法和 BS 算法识别 3 个标签的示例,通信链路时序图,其中“x”表示当前无操作.

对比图 3、图 4 可以发现,ISE-BS 算法彻底消除了 BS 算法中的空闲时隙,且由于 Q 信号仅为 1 比特信号,因此相较于 Aloha 算法的 16 位随机数 (RN16) 碰撞仲裁,BS 算法的 ID 碰撞仲裁,ISE-BS 算法极大的缩短了碰撞的仲裁时间,提高了系统的识别效率.

时隙	时隙状态	标签A (T_c, Q)	标签B (T_c, Q)	标签C (T_c, Q)	识别结果
1	ID-碰撞	(0, 1)	(0, 1)	(0, 1)	碰撞
2	ID-空闲	(1, x)	(1, x)	(1, x)	空闲
3	ID-碰撞	(0, 0)	(0, 1)	(0, 1)	碰撞
4	ID-成功	(0, x)	(1, x)	(1, x)	A 被成功识别
5	ID-碰撞	(-1, x)	(0, 1)	(0, 1)	碰撞
6	ID-空闲	(-1, x)	(1, x)	(1, x)	空闲
7	ID-碰撞	(-1, x)	(0, 0)	(0, 1)	碰撞
8	ID-成功	(-1, x)	(0, x)	(1, x)	B 被成功识别
9	ID-成功	(-1, x)	(-1, x)	(0, x)	C 被成功识别

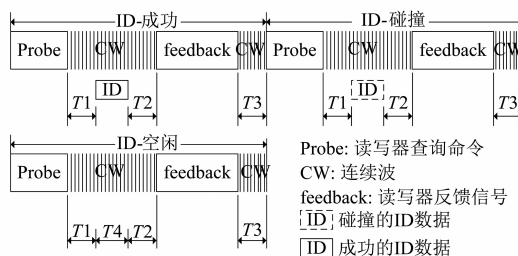


图3 BS算法识别示例

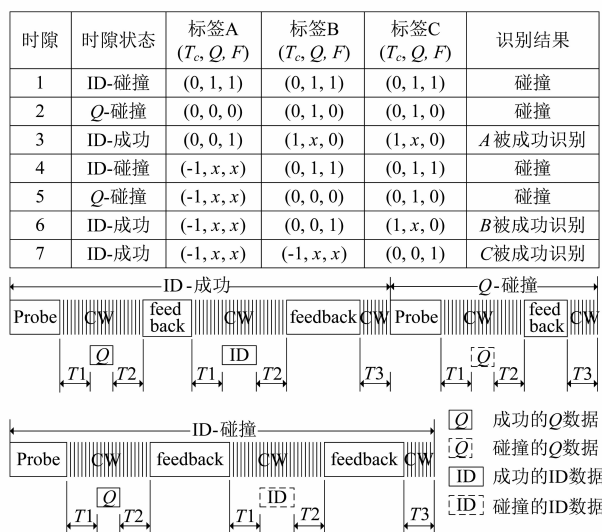


图4 ISE-BS算法识别示例

3 算法性能分析

由于 BS 类算法的识别过程类似一个二进制遍历树的遍历过程,因此可以利用二进制遍历树来分析 ISE-BS 算法的性能,可以推导出以下引理。

引理 1 令 $C(n)$, $I(n)$ 分别定义为二进制遍历树识别 n 个标签所产生碰撞时隙数和空闲时隙数, ISE-BS 算法识别 n 个标签所需的总时隙数可以表示为:

$$T_{\text{slots}}(n) = C(n) + n \quad (1)$$

证明 由于二进制遍历树识别标签的过程是不断的将碰撞的标签分为 0/1 两个子集,直到某个子集仅包含一个标签就可以成功将其识别.因此整个识别过程可以被看作一颗完全二进制树.树内所有的中间节点都对应一个碰撞时隙,叶子节点对应成功时隙或者空闲时隙.在 BS 算法中,当多个标签产生相同的随机数 1 时,会产生一个空闲时隙和一个碰撞时隙.而在 ISE-BS 算法中,相同的随机数会导致 ID 碰撞,从而消除了二进制遍历树中的空闲时隙,因此引理 1 得证。

引理 2 对于任意标签数 n ,采用 ISE-BS 算法识别,所需的总时隙数为:

$$T_{\text{slots}}(n) = n + \sum_{k=0}^{\infty} 2^k [1 - p(k)^n - n \cdot 2^{-k} p(k)^{n-1}] \quad (2)$$

其中 $p(k) = 1 - 2^{-k}$.

证明 $I(n, k)$, $S(n, k)$ 和 $C(n, k)$ 分别定义为二进制遍历树中第 k 层所产生的空闲时隙数,成功时隙数以及碰撞时隙数.那么对于整棵遍历树而言,总的碰撞时隙数 $C(n)$ 可以表示为:

$$C(n) = \sum_{k=0}^{\infty} C(n, k) \quad (3)$$

$p(k)$ 定义为遍历树中第 k 层的某个时隙为空闲时隙的概率.那么有:

$$I(n, k) = 2^k p(k)^n \quad (4)$$

$$S(n, k) = n \cdot p(k)^{n-1} \quad (5)$$

对于遍历树而言,每一层的总节点数为 2^k ,由此可以推导出第 k 层产生的碰撞时隙数为:

$$C(n, k) = 2^k [1 - p(k)^n - n \cdot 2^{-k} p(k)^{n-1}] \quad (6)$$

通过式(1), (3), (6), 引理 2 得证。

由引理 1 和引理 2,我们可以推导出 ISE-BS 算法的理论吞吐率为:

$$U = \frac{n}{T_{\text{slots}}(n)} \quad (7)$$

考虑到不同的时隙状态,其持续时间不同(例成功时隙的持续时间要大于空闲时隙),传统的吞吐率性能指标不能很好的从识别时间角度来衡量 RFID 系统的识别性能,因此本文提出了一种新的衡量指标:时间效率,定义如下:

$$\eta = \frac{n \cdot T_{\text{ID}}}{n \cdot T_{\text{succ}} + N_{\text{ID-coll}} \cdot T_{\text{ID-coll}} + N_{\text{Q-coll}} \cdot T_{\text{Q-coll}} + I \cdot T_{\text{idle}}} \quad (8)$$

其中 n 为待识别标签数, T_{ID} 为标签有效数据 ID 传输所需要的时间, T_{succ} 为一个成功时隙的持续时间, $N_{\text{ID-coll}}$, $N_{\text{Q-coll}}$, 和 I 分别表示 ID-碰撞, Q-碰撞和空闲时隙的个数,可以在标签识别过程中,由读写器统计得到. $T_{\text{ID-coll}}$, $T_{\text{Q-coll}}$ 和 T_{idle} 分别表示其时隙状态所持续的时间。

引理 3 对于任意标签数 n ,采用 ISE-BS 算法识别,其 Q-碰撞时隙数为:

$$N_{\text{Q-coll}} = n - 1 \quad (9)$$

证明 由 ISE-BS 算法的原理可知, Q-碰撞时隙将导致标签将被分为两个子集,故 Q-碰撞节点产生的子节点数等于 $2 * N_{\text{Q-coll}}$,因此我们有:

$$1 + 2 * N_{\text{Q-coll}} + N_{\text{ID-coll}} = n + N_{\text{ID-coll}} + N_{\text{Q-coll}} \quad (10)$$

根据引理 3 和式(8), ISE-BS 算法时间效率的理论值为:

$$\eta = \frac{n \cdot T_{\text{ID}}}{n \cdot T_{\text{succ}} + (n - 1) \cdot T_{\text{Q-coll}} + (T_{\text{slots}} - 2n + 1) \cdot T_{\text{ID-coll}}} \quad (11)$$

我们将在仿真环节验证理论推导的有效性。

4 实验仿真与分析

本节衡量了 ISE-BS 算法的吞吐率,时间效率以及平均识别时间,并同现有的先进算法进行了对比分析,包括:MAP 算法^[4], GDFSA 算法^[12], FACA 算法^[13], IL-CM 算法^[14], ABTSA 算法^[15] 以及 ABS 算法^[5].所有的仿真实验均在 MATLAB 2010 平台上进行.为了确保实验结果的可靠性,采用了蒙特卡洛仿真方法,标签数量

在 100 到 1000 之间变化,步长为 100,每次实验的仿真次数为 500 次.为了计算时间效率和识别单个标签所需的平均时间,需要计算整个识别过程中每一步所花费的时间,包括:数据接收、发送、命令占用时间,间隔时间以及保护时间等.表 1 列出了仿真中所采用的时间参数,设置均参考工业标准 EPCglobal C1 Gen2 和 ISO 18000-6B.值得注意的是,ISE-BS 算法的性能优势在这些参数下具有鲁棒性.

表 1 仿真参数设置

参数	取值	参数	取值
读写器到标签 data-0	1Tari	RTeal	37.5 μ s
读写器到标签 data-1	2Tari	TRcal	50 μ s
读写器到标签数据率	80kbps	T1	25 μ s
标签到读写器数据率	160kbps	T2	25 μ s
Tpri	6.25 μ s	T3	50 μ s
T4	100 μ s	Probe	8bits
Tari	12.5 μ s	RN16	16bits
feedback	2bits	ID	96bits
Query	22 bits	Ack	18bits
QueryAdj	9bits	QueryRep	4bits

图 5 比较了不同算法在不同初始 Q_{ini} 下的吞吐率.

从图 5 可以看出, Aloha 类算法: MAP, GDFSA, FACA 及 ILCM 算法的吞吐率受初始 Q 值 Q_{ini} 影响较大.随着标签数量的急剧增加,而初始帧长 ($F_{ini} = 2^{Q_{ini}}$) 很小时,这些算法均不能调整合适的帧长来适应剩余标签数的变化,从而导致性能恶化.换言之,这类算法的稳定性较差以至于不能适应标签数的大幅度变化.作为对

比,BS 类算法: ABS 和 ISE-BS 的吞吐率是独立而稳定的,那即是说 ABS 和 ISE-BS 算法的性能只和标签数相关,不会受到其他因素影响,因此稳定性较好.且 BS 类算法在识别过程中无需估计剩余标签数,因此相较于 Aloha 类算法,复杂度较低.为了直观的比较算法性能的稳定性,我们定义如下波动函数:

$$C_v = (S_{TD}/M_{ave}) \quad (12)$$

其中 S_{TD} 和 M_{ave} 分别表示变量(吞吐率、时间效率或平均识别时间)的标准差和均值. C_v 反映了性能的稳定性.特别地, C_v 越小,该性能的波动率越低,离散程度越低,则说明稳定性越好.表 2 列出了各种算法的平均吞吐率和波动率. "*" 表示以此为参考点.

表 2 各个算法的平均吞吐率和波动率比较

算法	吞吐率	提高百分比	波动率	提高百分比
ILCM	0.3297	*	5.88%	*
GDFSA	0.3381	2.55%	5.30%	9.86%
FACA	0.3389	2.79%	2.27%	61.4%
MAP	0.3409	3.40%	5.36%	8.84%
ABS	0.3447	4.55%	0.57%	90.3%
ABTSA	0.4082	23.8%	0.80%	86.4%
ISE-BS	0.4065	23.3%	0.61%	89.6%

从上述结果可知,BS 类算法的平均吞吐率高于 Aloha 类算法.特别地, ISE-BS 算法的平均吞吐率达到了 0.4065,相对于 ILCM, GDFSA, FACA, MAP 和 ABS 算法,分别提高了 23.3%, 20.2%, 20.0%, 19.2% 和 17.9%. 尽管 ABTSA 算法融合了 Aloha 算法和 BS 算法的优势,在吞吐率上都高于这两类算法,但是我们提出

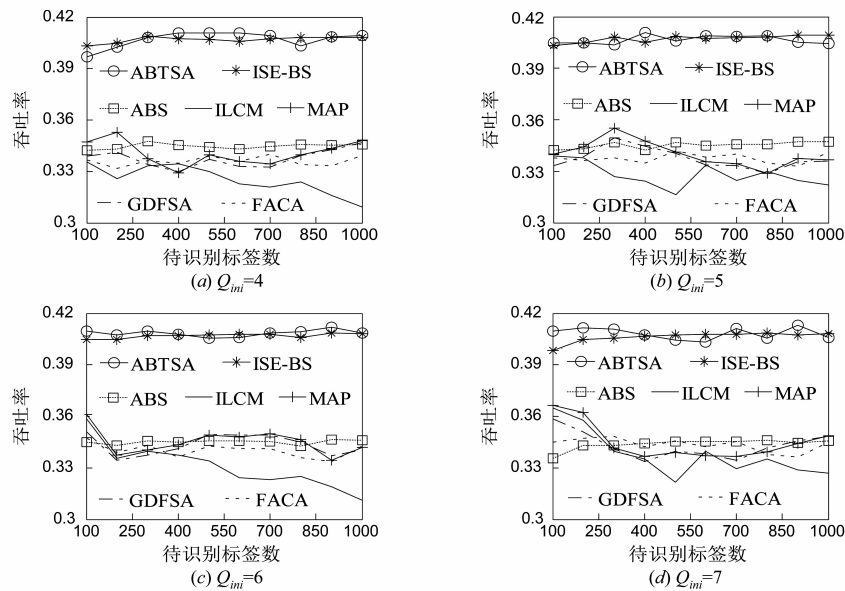


图 5 不同算法的吞吐率性能比较

的 ISE-BS 算法能够达到 ABTSA 算法性能的 99.6%。此外,若将 ISE-BS 算法同 Aloha 算法融合,其性能将超越 ABTSA 算法。在吞吐率稳定性方面,ABS、ISE-BS 和 ABTSA 算法都比其他方法有显著提升。如前文所述,吞吐率指标是基于时隙的个数而不考虑具体某个时隙的持续时间,因此对于不同的算法,吞吐率指标不能很好的从识别时间上来衡量它们的性能。

图 6 和表 3 比较了不同算法的时间效率和波动率。从中可以看出,ABS 算法的时间效率低于所有的 Aloha 类算法,那是因为在 ABS 算法中,碰撞仲裁依赖的是标签的 ID,在 Aloha 类算法中,碰撞仲裁的依赖的是 16 比

特伪随机数 RN16,标签的 ID 传输时间要远大于 RN16 的传输时间,因此在整个标签识别过程中,ABS 算法的总的时间开销要高于 Aloha 类算法。ISE-BS 算法在 ABS 算法的基础上消除了所有空闲时隙,且通过引入 Q 信号传输,缩短了碰撞的仲裁时间,因此极大的提高了时间效率。由于 ABTSA 算法融合了 Aloha 和 BS 架构,所以在整体的传输时间上会大于 ISE-BS 算法。ISE-BS 算法的平均时间效率为 0.3246,在 ABS,ILCM,FACA,GDFSA,MAP 和 ABTSA 算法的基础上分别提高了 29.3%,4.95%,3.61%,3.38%,3.38% 和 2.2%。

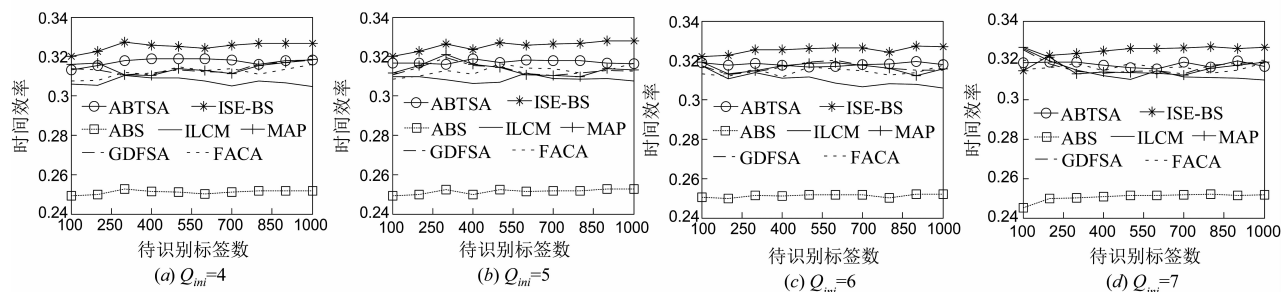


图 6 不同算法的时间效率性能比较

表 3 各个算法的平均时间效率和波动率比较

算法	吞吐率	提高百分比	稳定性	提高百分比
ABS	0.2510	*	0.58%	79.7%
ILCM	0.3093	23.2%	2.86%	*
FACA	0.3133	24.8%	1.44%	49.7%
GDFSA	0.3140	25.1%	2.84%	0.70%
MAP	0.3140	25.1%	2.79%	2.45%
ABTSA	0.3176	26.5%	1.33%	53.5%
ISE-BS	0.3246	29.3%	1.11%	61.2%

由于防碰撞算法都是运行在计算能力受限的读写器上,因此算法本身的复杂度也是一个关键衡量指标,它决定着该算法能否有效的实施。为了衡量算法的复杂度,采用了文献[16]中的参考值并计算各个算法的 FLOP 成本。表 4(a)列出了各种运算所需的 FLOP 成本,表 4(b)给出了不同算法在初始 Q 值 Q_{mi} 为 5 的条件下(即初始帧长 F_{mi} 等于 32),识别 1000 个标签所需的 FLOP 成本。

防碰撞算法的 FLOP 成本主要来源于识别过程中对标签数量的估计和帧长的调整。MAP、GDFSA 算法均涉及最优化运算,整个识别过程中搜索次数多,因此复杂度较高。ILCM 算法在每帧中仅判断一次,然而判断过程中涉及指数函数、三角函数等复杂度较高的运算。FACA 算法同 ILCM 算法一样,在每帧中只判断一次,且对标签数的估计和帧长的设置都是基于简单的数学运算,因此复杂度降低不少。ABS 算法和 ISE-BS 算法本身

无需估计标签数和设置帧长,因此复杂度均低于上述算法。ABTSA 算法融合了 Aloha 算法和 BS 算法,因此复杂度要偏高。ISE-BS 算法在 ABS 算法基础上仅增加了单比特标识位寄存器,但是性能却得到了大幅度提升。

表 4 不同算法的 FLOP 成本比较

(a) 不同操作的 FLOP 成本

操作	FLOP 成本
加法、减法、乘法	1
比较	2
除法、开方	10
指数、对数、三角函数	50
阶乘	100

(b) 各个算法的总 FLOP 成本

算法	总 FLOP 成本
MAP	2.03×10^6
GDFSA	4.01×10^5
ILCM	1.44×10^4
ABTSA	1.20×10^4
FACA	7.22×10^3
ABS	4.33×10^3
ISE-BS	4.90×10^3

为了验证第三节中对 ISE-BS 算法理论分析的有效性,图 7 将分析结果和仿真实验结果做了对比。

从图中可以看出,仿真结果非常接近理论分析的

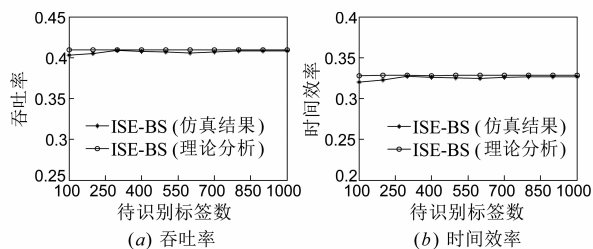


图7 ISE-BS算法的理论分析与仿真结果对比

结果. 对于吞吐率, ISE-BS 算法的仿真结果可以达到 0.4065, 通过式(7)计算得出的吞吐率为 0.4098, 仿真结果达到了理论结果的 99.2%. 类似地, 对于时间效率, 仿真结果也达到了理论结果的 99.0%. 因此, 该实验证明 ISE-BS 算法的理论分析结果是准确而可靠的.

5 结论

本文在 BS 算法的基础上提出了一种有效的二进制分裂算法 ISE-BS. 该算法在标签分裂的过程中彻底消除了空闲时隙, 并利用 1 比特 Q 信号来辅助碰撞仲裁, 极大的缩短了碰撞仲裁时间, 提高了系统识别效率. 仿真结果表明, ISE-BS 算法的吞吐率稳定在 0.4065 左右, 波动幅度维持在 0.61%, 时间效率稳定在 0.3246, 波动幅度为 1.11%, 均优于对比算法. 最后对算法的复杂度做了分析比较, 证明了 ISE-BS 算法的复杂度更低. 因此, 综合结果表明, 本文提出的算法有效的提高了 RFID 系统的识别性能, 并且 ISE-BS 算法的实现复杂度相对较低, 可用性较高, 应用平台较广.

参考文献

- [1] G M Gaukler. Item-level RFID in a retail supply chain with stock-out-based substitution[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(2): 362 – 370.
- [2] A Lehto, J Nummela, L Ukkoen, L sydanheimo, M Kivikoski. Passive UHF RFID in paper industry: challenges, benefits and application environment[J]. IEEE Transactions on Automation Science Engineering, 2009, 6(1): 66 – 79.
- [3] 邓芳明, 何怡刚, 佐磊, 李兵, 吴可汗. 基于无源超高频射频识别标签的湿度传感器设计[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 188402.
Deng Fang-min, He Yi-gang, Zuo Lei, Li Bin, Wu Ke-han. Complementary metal-oxide-semiconductor humidity sensor design for passive ultra-high frequency radio-frequency identification application[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(18): 188402. (in Chinese)
- [4] W-T Chen. An accurate tag estimate method for improving the performance of an RFID anticollision algorithm based on dynamic frame length Aloha[J]. IEEE Transactions on Automation Science Engineering, 2009, 6(1): 9 – 15.
- [5] J Myung, W Lee, J Srivastava. Adaptive binary splitting for efficient RFID tag anti-collision[J]. 2006, IEEE Communications Letters, 10(3): 144 – 146.
- [6] 苏健, 韩雨, 骆忠强, 谢良波, 文光俊. 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.
Su Jian, Han Yu, Luo Zhong-qiang, Xie Liang-bo, and Wen Guang-jun. A feasible time-optimal anti-collision algorithm for UHF RFID systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(8): 1651 – 1655. (in Chinese)
- [7] H Landaluce, A Perallos, L Bengtsson, I J Garcia Zuazola. Simplified computation in memoryless anti-collision RFID identification protocols[J]. Electronics Letters, 2014, 50(17): 1250 – 1252.
- [8] X Jia, Q Feng, L Yu. Stability analysis of an efficient anti-collision protocol for RFID tag identification[J]. IEEE Transactions on Commuactions, 2012, 60(8): 2285 – 2294.
- [9] 苏健, 文光俊, 韩佳利. 一种基于 ISO18000-6B 标准的 RFID 防碰撞算法[J]. 电子学报, 2014, 42(12): 2515 – 2519.
Su Jian, Wen Guang-jun, Han Jia-li. An efficient RFID anti-collision algorithm for ISO 18000-6B protocol[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(12): 2515 – 2519. (in Chinese)
- [10] EPCglobal. EPC radio-frequency identify protocols class-1 generation-2 UHF RFID protocol for communications at 860 MHz-960 MHz, version 2.0.0[S]. 2013.
- [11] C Angerer, R Langwieser, M Rupp. RFID reader receivers for physical layer collision revocery[J]. IEEE Transactions on Communactions, 2010, 58(12): 3526 – 3537.
- [12] 庞宇, 彭琦, 林金朝, 周前能, 李国全, 吴玮. 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): 148401.
Pang Yu, Peng Qi, Lin Jin-zhao, Zhou Qian-neng, Li Guo-quan, Wu Wei. Reducing tag collision in radio frequency identification systems by using a grouped dynamic frame slotted ALOHA algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 148401. (in Chinese)
- [13] W-T Chen. A fast anti-collision algorithm for the EPCglobal UHF Class-1 Generation-2 RFID standard[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(9): 1519 – 1522.
- [14] P Solic, J Radic, N Rozic. Energy efficient tag estimation method for ALOHA-based RFID systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(10): 3637 – 3647.
- [15] H Wu, Y Zeng, J Feng, Y Gu. Binary tree slotted Aloha for passive RFID tag anticollision[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed. Systems, 2013, 12(6): 19 – 31.
- [16] J V Alonso, V B Delgado, E E Lopez, F J Castano, J Al-

caraz. Multiframe maximum-likelihood tag estimation for RFID anticollision protocols[J]. IEEE Transactions on In-

dustria Informatics,2011,7(3):487-496.

作者简介



苏 健(通信作者) 男,1986年3月出生于湖北荆州.电子科技大学通信与信息工程学院博士研究生.研究方向为物联网技术、无线射频识别技术、认知无线网络、图像处理与模式识别.

E-mail: xiaoyanzi850603@163.com



谢良波 男,1986年1月出生于四川成都.电子科技大学通信与信息工程学院博士研究生.研究方向为无线射频识别技术、低功耗模拟/数字电路设计.



杨 颖 女,1994年11月出生于重庆长寿.成都理工大学管理科学学院本科生.研究方向为无线射频识别技术、RFID 防撞算法.

文光俊 男,1964年8月出生于四川南充.电子科技大学通信与信息工程学院博士生导师,主要研究方向为射频/微波/毫米波集成电路与系统、通信网络与宽带通信、新型电磁材料、无线传感器等技术领域.

孟庆微 男,1980年出生于黑龙江安达.2007年获得空军工程大学硕士学位,2013年获得西北工业大学博士学位.研究方向为无线通信调制解调、压缩感知等.