



一种新型的快速标签估计算法

崔英花

(北京信息科技大学, 北京 100085)

摘要: 标签估计是 RFID 系统中的关键技术之一。常规的标签估计算法通常要查询所有时隙的标签响应情况。在标签数量较大时会极大地增加通信负荷和时间损耗。提出一种快速标签估计算法, 判断每一帧前 4 个时隙的标签碰撞情况, 就可以对 Q 参数取值做快速调整, 随后通过查询少量时隙就可以得到标签估计数目。仿真结果表明, 与传统的标签估计算法相比, 本文算法具有估计速度快、估计误差小等优点, 非常适用于需要快速做出估计的场合。

关键词: 射频识别; 标签估计; 时隙调整

中图分类号: TN914

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017273

A novel fast tag number estimation algorithm

CUI Yinghua

Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100085, China

Abstract: Tag number estimation is one of the key technologies in radio frequency identification (RFID) system. The conventional estimation algorithms usually interrogate all time slots before estimating the tag quantity, which lead to large payload and time consumption. A rapid estimation algorithm was proposed. By judging the collision of the first 4 slots in each frame, the Q parameter values could be adjusted quickly, and then the number of tag estimates could be obtained by querying a small number of slots. Simulation results show that compared with the traditional tag estimation algorithm, the proposed algorithm has the advantages of fast estimation speed and small estimation error, and is very suitable for fast estimation.

Key words: radio frequency identification, tag estimation, slot adjustment

1 引言

射频识别 (radio frequency identification, RFID) 技术是一种自动识别技术。RFID 系统中

的阅读器可以在短时间内识别大量的标签。由于 RFID 可以快速识别物体, 并且成本低廉、管理智能方便, 被广泛应用于仓储、货运、物流等行业。

收稿日期: 2017-05-31; 修回日期: 2017-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61340005); 北京市自然科学基金资助项目 (No.4132012); 北京市教委科技发展计划基金资助项目 (No.KM201411232011); 北京市优秀人才培养资助 D 类项目 (No.2013D005007000006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61340005), Beijing Natural Science Foundation of China (No.4132012), Project of Beijing Education Committee Science and Technology Development Plan (No.KM201411232011), Beijing Outstanding Personnel Training Project (No.2013D005007000006)



标签估计是 RFID 系统中的关键技术之一,除了用于标签盘点,它还被用在标签防碰撞技术中,对选择合适帧长或时隙、提高标签识别效率起到了重要作用^[1-4]。

典型的标签估计算法都基于帧时隙 Aloha 模型^[5,6]。当阅读器查询 1 帧时隙后,会有 3 种情况出现:空闲时隙,单标签响应时隙和多于一个标签响应的碰撞时隙。用 N_0 、 N_1 、 N_c 分别代表这 3 种时隙的个数,用 N 来代表总时隙数。由于在碰撞时隙至少有 2 个标签同时响应阅读器,可以用标签数的下限 N_1+2N_c (lower bound 算法)^[7]估计标签数。假定帧时隙大小与标签数目相当时,碰撞标签的期望值为 $2.39N_c$,所以估计的标签值为 $N_1+2.39N_c$ (Schoute 估计法)^[8,9]。还有一些检测碰撞时隙和空闲时隙的标签估计方法在参考文献^[10,11]中提到过。但这些标签估计算法都存在一些共性问题:第一,当帧时隙大小与标签数目不匹配时,按照上述方法估计的标签数会有较大误差;第二,阅读器需要查询整个帧时隙的标签响应情况,当标签数量较大时,会增加额外的通信负荷和时间损耗;第三,在没有任何标签信息的情况下,阅读器很难选择合适的时隙,主要是因为 Aloha 模型主要用来解决信息传递的碰撞问题,而不是用来进行快速标签估计。

此外还有 Vogt-II 动态估计算法^[12]、最大后验概率 (maximum a posteriori, MAP) 算法^[13]等,这些方法在一定程度上提高了估算精度,但计算复杂度也大大增加。

2 对标签碰撞情况的统计分析

标签估计算法在很大程度上依赖于对时隙中标签碰撞情况的统计,将对每 1 帧前 4 个时隙的标签碰撞情况进行讨论,并对如何调整 Q 值进行理论分析与证明。

假设有 n 个标签需要被识别, \hat{n} 为标签估计

值,定义估计误差为:

$$error(\hat{n}) = \frac{|n - \hat{n}|}{n} \quad (1)$$

2.1 前 4 个时隙都是空时隙

假设有 n 个标签需要被识别,帧长度为 $N = 2^Q$,如果前 4 个时隙是空时隙,那么会有较高概率不等式 $error(\frac{N}{4}) < error(N)$ 成立。

证明:前 4 个时隙全部为空时隙的概率 p_{4e} 为:

$$p_{4e} = (1 - \frac{4}{N})^n = (1 - \frac{4}{N})^{\frac{N}{4} \frac{4n}{N}} \approx (\frac{1}{e})^{\frac{4n}{N}} \quad (2)$$

定义 $f = \frac{n}{N}$,式 (2) 可写为:

$$p_{4e}(f) = (\frac{1}{e})^{4f} \quad (3)$$

前 4 个时隙全部为空时隙的概率 P_{4e} 解析如图 1 所示。从图 1 中可以看出,当 $f > 0.625$ 时, $p_{4e}(f) < p_{4e}(0.625) \approx 0.0821$,这是一个非常小的概率。即当前 4 个时隙都为空时, f 以很大概率小于 0.625。当 $f \leq 0.625$,且 $N > n$,可以得到以下结论。

如果 $N/4 > n$,则:

$$\begin{aligned} error(N/4) &= \left| \frac{N/4 - n}{n} \right| = \frac{N/4 - n}{n} \\ &< \frac{N - n}{n} = \left| \frac{N - n}{n} \right| = error(N) \end{aligned} \quad (4)$$

如果 $N/4 < n$,则:

$$\begin{aligned} error(N/4) &= \left| \frac{N/4 - n}{n} \right| = \frac{n - N/4}{n} \\ &\leq 1 - 1/(4 \times 0.625) = 1/0.625 - 1 \\ &\leq \frac{N - n}{n} = \left| \frac{N - n}{n} \right| = error(N) \end{aligned} \quad (5)$$

因此,当 $f \leq 0.625$ 时,不等式 $error(N/4) < error(N)$ 成立。证毕。

根据以上分析过程,当使用 $N/4$ 代替帧长 N 时,估计误差将会降低。因此在这种情况下,让 $Q = Q - 2$ 。

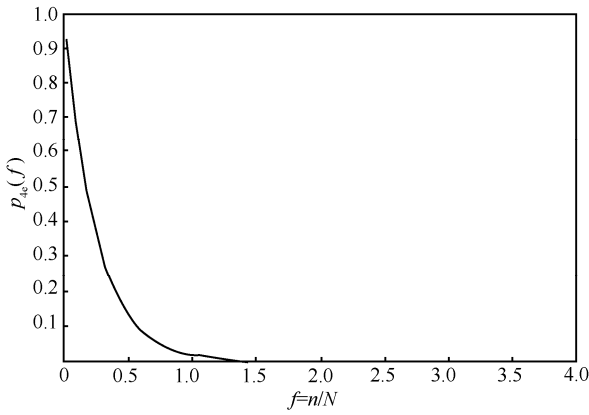


图1 前4个时隙全部为空时隙的概率 $p_{4e}(f)$ 解析

2.2 前4个时隙中包含3个空时隙

假设有 n 个标签需要被识别，帧长度为 $N=2^Q$ ，如果前4个时隙中有3个空时隙，那么会有较高概率不等式 $error(N/2) < error(N)$ 成立。

证明：在前4个时隙中有3个时隙为空的概率为：

$$\begin{aligned}
 p_{3e} &= C_4^1 \sum_{n \geq x \geq 1} C_n^x \frac{(N-4)^{n-x}}{N^n} \\
 &= 4 \sum_{n \geq x \geq 1} \frac{n!}{x!(n-x)!} \frac{\left(1 - \frac{4}{N}\right)^{n-x}}{N^x} \approx 4 \sum_{10 \geq x \geq 1} \frac{\left(\frac{n}{N}\right)^x}{x!} \left(\frac{1}{e}\right)^{\frac{4n}{N}} \\
 p_{3e}\left(f = \frac{n}{N}\right) &\approx 4 \sum_{10 \geq x \geq 1} \frac{f^x \left(\frac{1}{e}\right)^{4f}}{x!} \quad (6)
 \end{aligned}$$

图2显示了前4个时隙中有3个时隙为空的概率 $p_{3e}(f)$ 的解析。从图3中可以看出，当 $f > 0.75$ 时， $p_e(f) < p_e(0.75) \approx 0.2224$ ，这是一个很小的概率。因此，当前4个时隙有3个为空时，很大概率上 $f < 0.75$ 。

当 $f \leq 0.75$ 且 $N > n$ 时，会得到如下结论。

如果 $N/2 > n$ ，则：

$$\begin{aligned}
 error(N/2) &= \left| \frac{N/2 - n}{n} \right| = \frac{N/2 - n}{n} = \frac{N - n}{n} - \frac{N}{2n} \\
 &< \frac{N - n}{n} = \left| \frac{N - n}{n} \right| = error(N) \quad (7)
 \end{aligned}$$

如果 $N/2 < n$ ，则：

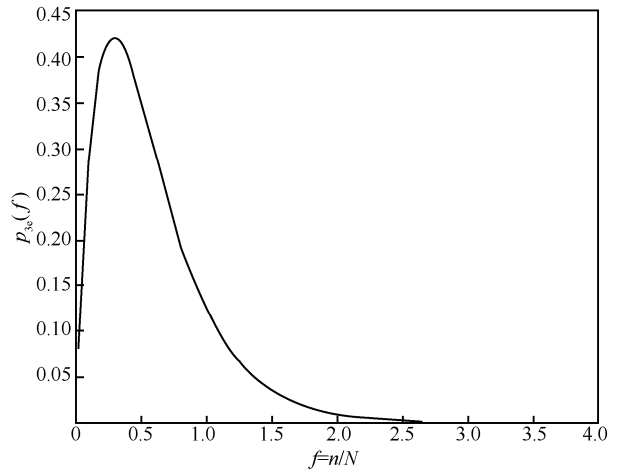


图2 前4个时隙有3个空时隙 $p_{3e}(f)$ 解析

$$\begin{aligned}
 error(N/2) &= \left| \frac{N/2 - n}{n} \right| = \frac{N/2 - n}{n} \leq 1 - 1/(2 \times 0.75) \\
 &\leq \frac{N - n}{n} = \left| \frac{N - n}{n} \right| = error(N) \quad (8)
 \end{aligned}$$

因此，当 $f \leq 0.75$ 时，不等式 $error(N/2) < error(N)$ 成立。证毕。

根据以上分析，当前4个时隙有3个空时隙的时候，用帧长 $N/2$ 代替 N ，可以减小估计误差。在这种情况下，调整 Q 参数为 $Q = Q - 1$ 。

2.3 前4个时隙都是碰撞时隙

假设有 n 个标签需要被识别，帧长度为 $N=2^Q$ ，如果前4个时隙都是碰撞时隙，那么会有较高概率不等式 $error(4N) < error(N)$ 成立。

证明：前4个时隙全部为碰撞时隙的概率 P_{4c} 为：

$$\begin{aligned}
 p_{4c} &= \sum_{\substack{n \geq x \geq 2, n \geq y \geq 2, \\ n \geq z \geq 2, n \geq u \geq 2}} C_n^x C_{n-x}^y C_{n-x-y}^z C_{n-x-y-z}^u \frac{(N-4)^{n-x-y-z-u}}{N^n} \\
 &\approx \sum_{\substack{10 \geq x \geq 2, 10 \geq y \geq 2, \\ 10 \geq z \geq 2, 10 \geq u \geq 2}} \frac{n! \left(1 - \frac{4}{N}\right)^{n-x-y-z-u}}{x!y!z!u!(n-x-y-z-u)! N^{x+y+z+u}} \\
 &\approx \sum_{\substack{10 \geq x \geq 2, 10 \geq y \geq 2, \\ 10 \geq z \geq 2, 10 \geq u \geq 2}} \frac{\left(\frac{n}{N}\right)^{x+y+z+u} \left(\frac{1}{e}\right)^{\frac{4n}{N}}}{x!y!z!u!} \\
 p_{4c}(f) &= \sum_{\substack{10 \geq x \geq 2, 10 \geq y \geq 2, \\ 10 \geq z \geq 2, 10 \geq u \geq 2}} \frac{f^{x+y+z+u} \left(\frac{1}{e}\right)^{4f}}{x!y!z!u!} \quad (9)
 \end{aligned}$$



前 4 个时隙全部为碰撞时隙的概率 $P_{4c}(f)$ 解析如图 3 所示。

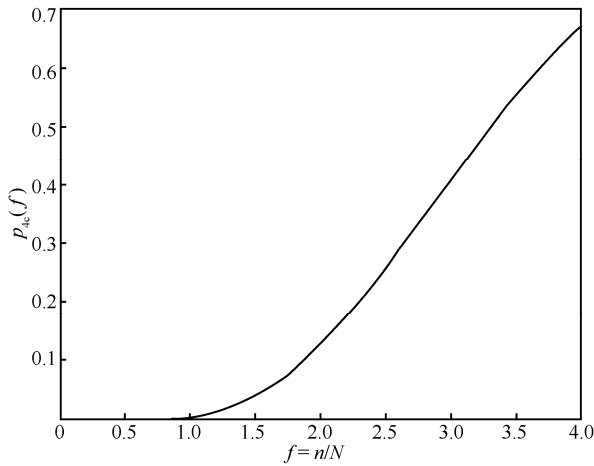


图 3 前 4 个时隙全部为碰撞时隙的概率 $P_{4c}(f)$ 解析

从图 3 中可以看出, 当 $f < 2.5$ 时, $p_{4c} < 0.2579$ 。因此, 当前 4 个时隙全为碰撞时隙时, f 以很大概率大于 2.5。

当 $f \geq 2.5$, 且 $n > N$ 时, 会得到如下结论。

当 $4N > n$ 时, 由于 $f \geq 2.5$, 则:

$$\left| \frac{4N-n}{n} \right| = \frac{4N-n}{n} \leq 4/2.5 - 1 = 1 - 1/2.5 \leq \frac{n-N}{n} = \left| \frac{N-n}{n} \right| \quad (10)$$

当 $4N < n$ 时:

$$\left| \frac{4N-n}{n} \right| = \frac{n-4N}{n} < \frac{n-N}{n} = \left| \frac{N-n}{n} \right| \quad (11)$$

因此当 $f \geq 2.5$ 时, 不等式 $error(4N) < error(N)$ 成立。证毕。

通过以上分析, 当前 4 个时隙全部为碰撞时隙时, 用帧长 $2N$ 代替帧长 N , 估计误差会减小。因此调整参数 Q 为 $Q=Q+2$ 。

2.4 前 4 个时隙中包含 3 个碰撞时隙

假设有 n 个标签需要被识别, 帧长度为 $N=2^Q$, 如果在前 4 个时隙中有 3 个碰撞时隙, 那么会有较高概率不等式 $error(2N) < error(N)$ 成立。

证明: 前 4 个时隙有 3 个碰撞时隙的概率 P_{3c} 为:

$$\begin{aligned} p_{3c} &= 4n \sum_{\substack{n-1 \geq x \geq 2, n-1 \geq y \geq 2, \\ n-1 \geq z \geq 2}} C_{n-1}^x C_{n-1-x}^y C_{n-1-x-y}^z \frac{(N-4)^{n-1-x-y-z}}{N^n} + \\ &4 \sum_{\substack{n \geq x \geq 2, n \geq y \geq 2, \\ n \geq z \geq 2}} C_n^x C_{n-x}^y C_{n-x-y}^z \frac{(N-4)^{n-x-y-z}}{N^n} \\ &\approx \sum_{\substack{10 \geq x \geq 2, 10 \geq y \geq 2, \\ 10 \geq z \geq 2}} \frac{4 \left(\frac{n}{N} \right)^{1+x+y+z} \left(\frac{1}{e} \right)^{\frac{4n}{N}} + 4 \left(\frac{n}{N} \right)^{x+y+z} \left(\frac{1}{e} \right)^{\frac{4n}{N}}}{x!y!z!} \\ p_{3c}(f) &= \sum_{\substack{f = \frac{n}{N} \\ 10 \geq x \geq 2, 10 \geq y \geq 2, \\ 10 \geq z \geq 2}} \frac{4(f+1)f^{x+y+z} \left(\frac{1}{e} \right)^{4f}}{x!y!z!} \quad (12) \end{aligned}$$

前 4 个时隙有 3 个碰撞时隙的概率 $P_{3c}(f)$ 如图 4 所示。

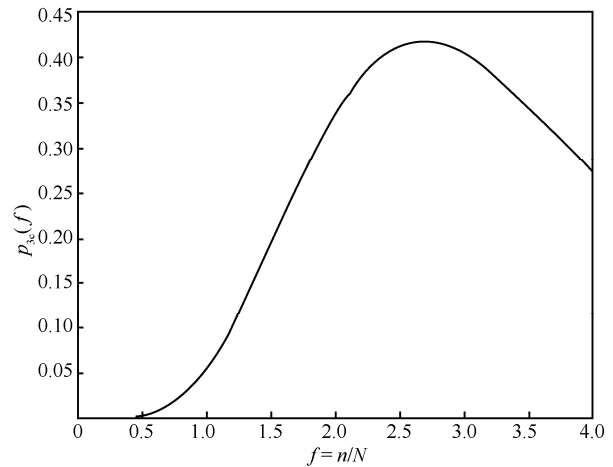


图 4 前 4 个时隙有 3 个碰撞时隙的概率 $P_{3c}(f)$ 解析

从图 4 中可以看出, 当 $f < 1.5$ 时, $P_{3c} < 0.1929$ 。因此, 当前 4 个时隙有 3 个碰撞时隙时, f 有很大概率大于 1.5。当 $f \geq 1.5$ 时, 则 $n > N$, 则有如下结论成立。

当 $2N > n$ 时, 由于 $f \geq 1.5$, 则:

$$\left| \frac{2N-n}{n} \right| = \frac{2N-n}{n} < 2/1.5 - 1 = 1 - 1/1.5 \leq \frac{n-N}{n} = \left| \frac{N-n}{n} \right| \quad (13)$$

当 $2N < n$ 时:

$$\left| \frac{2N-n}{n} \right| = \frac{n-2N}{n} < \frac{n-N}{n} = \left| \frac{N-n}{n} \right| \quad (14)$$

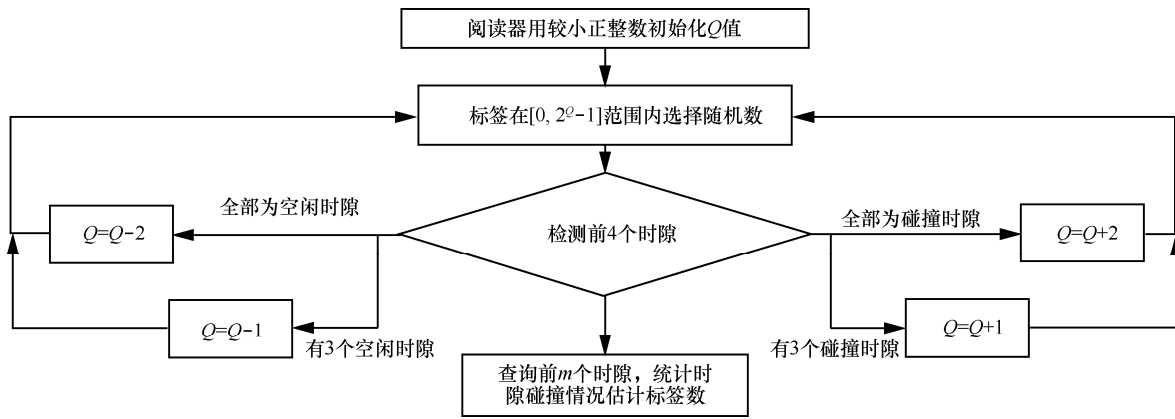


图5 快速标签识别方法流程

因此,当 $f \geq 1.5$ 时,不等式 $error(2N) < error(N)$ 成立。证毕。

通过以上分析得知,在前4个时隙中有3个时隙为碰撞时隙时,用帧长 $2N$ 替代帧长 N ,标签估计误差会降低。因此在这种情况下,调整参数 Q 为 $Q+1$ 。

综上所述,研究了前4个时隙的标签碰撞情况,并对参数 Q 值做了相应调整。通过上述方法,可以加快标签估计过程。

3 快速标签估计算法流程

根据前述分析,阅读器通过调整前4个时隙,就可以有效调整最优的查询时隙长度,加快估计速度。采用参考文献[5]中提到的 $N_1+2.39N_c$ 的方法,但只需查询前 m 个时隙,则估计标签数 \hat{n} 可表示为:

$$\hat{n} = \frac{(N_1 + 2.39N_c) \cdot N}{m} \quad (15)$$

其中, N 为在实际估计过程中调整后时隙数。根据第2节的分析结果,快速标签估计算法流程如图5所示。

4 仿真结果与分析

通过 MATLAB 仿真程序,对快速标签估计算法与 lower bound 算法和 Schoute 算法进行了对比分析。几种对比算法的初始帧长都设置为16,本文算法设置参数 $m=12$ 。图6为在标签数目范围

100~1 000,算法执行100次所得的平均估计值。从图6中可以看出,本文算法的估计值曲线与标签实际值基本吻合,优于其他两种算法。图7比较了几种标签估计算法的标准差,可以看出,本文估计标准偏差小于0.1,具有较高的精确度。

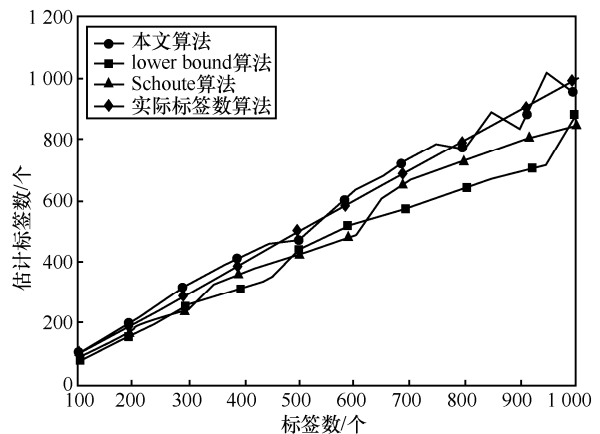


图6 几种标签估计算法的仿真结果比较

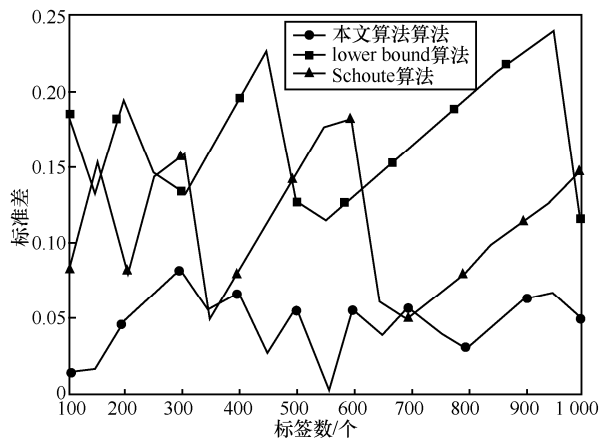


图7 几种标签估计算法估计标准差比较



图 8 显示了快速估计算法估计标签所使用的时隙数, 图 9 则比较了多种标签估计算法估计标签所使用的时隙数。从图 9 中可以看出, 快速估计算法平均只使用了 23 个时隙, 比传统算法所需要查询的时隙数减少了数 10 倍。快速估计算法判断每帧前 4 个时隙的标签碰撞情况, 就可对参数 Q 值做快速调整; 在随后的零估计方法中, 也只查询前 m 个时隙就可以做出较精确的标签数目估计。因此快速标签估计算法估计标签所使用的时间和通信负荷要远远小于传统的估计方法。

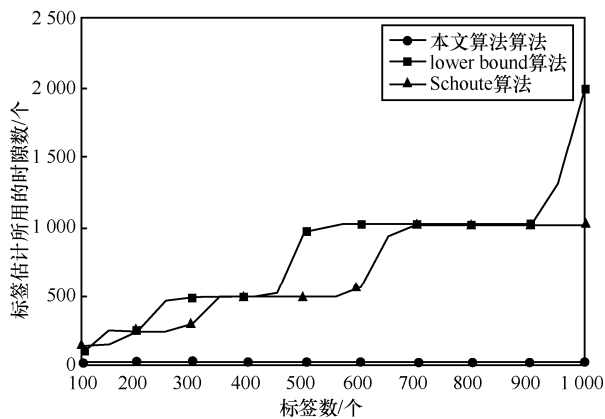


图 8 几种标签估计算法所使用时隙数比较

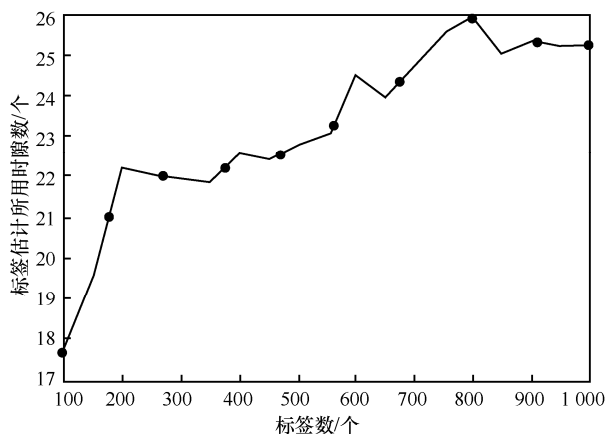


图 9 快速标签估计算法所使用时隙数

5 结束语

本文提出了一种快速标签估计算法, 针对每一帧前 4 个时隙的标签碰撞情况进行统计分析, 能够对 Q 参数取值做出快速调整。该算法只统计

很少数量的时隙数, 大大加快了估计过程, 并取得了很好的估计精度。仿真结果表明, 相比于传统的标签估计算法, 本文所述算法所需查询的时隙数目大大减小, 极大降低了时间和通信负荷损耗, 而估计误差也有所减小, 具有较高的估计精度。非常适用于要求低能耗和快速标签估计的 RFID 系统。在实际通信过程中, 由于捕获效应的存在, 较强信号通常会抑制较弱信号。这就造成了实际统计情况与事实不符的现象, 进而影响标签的正确估计。后续将在捕获效应条件下对快速标签估计算法做进一步的分析研究。

参考文献:

- [1] FINKENZELLER K. RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards and identification[M]. New York: ACM Press, 2003.
- [2] 刘永, 熊兴中, 李晓花. RFID 防碰撞技术的研究[J]. 电信科学, 2012, 28(2): 138-143.
LIU Y, XIONG X Z, LI X H. Research on anti-collision technology in RFID[J]. Telecommunications Science, 2012, 28(2): 138-143.
- [3] 王勇, 李婷. 改进的基于 ALOHA 的 RFID 防碰撞算法[J]. 电信科学, 2016, 32(8): 77-81.
WANG Y, LI T. Improved RFID anti-collision algorithm based on ALOHA[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(8): 77-81.
- [4] KIM S H, PARK P G. An efficient tree based tag anti-collision protocol for RFID systems[J]. IEEE Transactions on Letters, 2007, 11(5): 449-451.
- [5] VOGT H. Efficient object identification with passive RFID tags[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2002: 98-113.
- [6] PARK J, CHUNG M Y, LEE T J. Identification of RFID tags in framed-slotted ALOHA with robust estimation and binary selection[J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(5): 452-454.
- [7] CHA J R, KIM J H. Dynamic framed slotted ALOHA algorithms using fast tag estimation method for RFID system[C]//2006 IEEE International Consumer Communications & Networking Conference, Jan 8-10, 2006, Las Vegas, NV, USA. New Jersey: IEEE Press, 2006: 768-772.
- [8] FLOERKEMEIER C. Transmission control scheme for fast RFID object identification[C]//The International Conference on Pervasive Computing Communications Workshops, March 13-17, 2006, Pisa, Italy. New Jersey: IEEE Press, 2006: 457-462.
- [9] ZHEN B, KOBAYASHI M, SHIMIZU M. Framed ALOHA for multiple RFID objects identification[J]. IEICE Transactions on

- Communications, 2005, E88-B(3): 991-999.
- [10] CHA J R, KIM J H. Novel anti-collision algorithms for fast object identification in RFID system[C]//The International Conference on Parallel and Distributed Systems Computing, July 20-22, 2005, Fukuoka, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2005(2): 63-67.
- [11] KODIALAM M, NANDAGOPAL T. Fast and reliable estimation schemes in RFID systems[C]//The 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, September 23-29, 2006, Los Angeles, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2006: 322-333.
- [12] VOGT H. Efficient object identification with pasive RFID tags[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2002: 98-113.
- [13] CHEN W. An accurate tag estimate method for improving the performance of an RFID anti-collision algorithm based on dynamic frame length ALOHA[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(1): 9-15.

[作者简介]



崔英花（1973-），女，博士，北京信息科技大学副教授，主要研究方向为射频识别技术、标签防碰撞技术、无线通信技术。