

自适应多叉树防碰撞算法研究

丁治国^{1,2} 朱学永^{1,3} 郭立² 古今²

摘要 提出了一种自适应多叉树防碰撞算法. 新算法在动态二叉树和四叉树搜索算法的基础上, 利用曼彻斯特编码可以准确识别碰撞位的特性, 通过计算碰撞因子, 估计标签数量, 从而在标签数较多的分支内选择动态四叉树搜索, 反之选择动态二叉树搜索. 理论和仿真分析表明: 新算法克服了动态二叉树和四叉树搜索算法的缺点, 在减少碰撞时隙数的基础上, 又减少了空闲时隙数, 大幅度地提高了搜索效率和时隙的吞吐率, 具有一定的创新性和实用性.

关键词 射频识别, 防碰撞算法, 多叉树搜索, 曼彻斯特编码, 碰撞因子

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00237

An Adaptive Anti-collision Algorithm Based on Multi-tree Search

DING Zhi-Guo^{1,2} ZHU Xue-Yong^{1,3} GUO Li² GU Jin²

Abstract A new adaptive anti-collision algorithm based on multi-tree search is proposed in this paper. Based on the binary tree and quadtree search, the new algorithm taking advantage of the features of Manchester encoding computes the collision factor and estimates the number of the tags. That is to say, when the number of tags in branches is large, the new algorithm uses quadtree search, otherwise, binary tree search is used. Theoretic analysis and computer simulations show that the new anti-collision algorithm overcomes the disadvantages of binary tree and quadtree algorithms. It can decrease timeslots and improve the throughput of timeslots effectively.

Key words Radio frequency identification (RFID), anti-collision algorithm, multi-tree search, Manchester encoding, collision factor

射频识别 (Radio frequency identification, RFID) 是 20 世纪 90 年代兴起并逐渐走向成熟的一种非接触式的自动识别技术, 在物流、跟踪、定位等领域已得到广泛应用. 其中, 用于解决读写器作用范围内多标签识别问题的防碰撞算法已成为该领域研究的热点之一.

标签防碰撞算法主要解决在读写器有效通信范围内, 多个标签同时与读写器进行通信的问题. 常用的防碰撞算法一般可以分为两类, 一类是基于时隙随机分配的 ALOHA 算法^[1], 包括动态时隙 ALOHA (Dynamic slot allocation, DSA) 算法^[1], 分群时隙 ALOHA (Group slot allocation, GSA) 算法^[2] 和标签估计 (Tag estimation method, TEM) 算法^[3] 等. 其特点是, 算法简单, 便于实现, 适用于低成本 RFID 系统. 但由于该类算法的时隙是随机

分配的, 即存在一定的可能性, 某一标签在相当长一段时间内无法识别, 即 “Tag starvation” 问题, 所以这类方法被称为随机型算法. 另一类是基于二叉树搜索 (Binary search, BS) 算法^[1], 包括动态二叉树搜索 (Dynamic binary search, DBS) 算法^[1], 自适应二叉树搜索 (Adaptive binary splitting, ABS) 算法^[4-6] 和查询树搜索 (Query tree, QT) 算法^[7] 等. 该类算法比较复杂, 识别时间较长, 但不存在 “Tag starvation” 问题, 被称为确定型算法.

值得注意的是, 当待识别标签数量较多时, 基于二叉树的搜索算法由于频频出现碰撞, 且每次碰撞只产生两个分支, 搜索效率较低. 文献 [8] 为此提出了一种基于四叉树搜索 (Dynamic four-tree search, DFS) 算法的混合搜索 (Hybrid query tree, HQT) 算法. 虽然该算法在搜索的初期可以有效地减少碰撞, 但随着分支内标签的数量的减少会产生大量的空闲时隙, 不得不通过在标签中增加延迟器以改善算法的性能.

本文在动态二叉树和四叉树搜索算法的基础上, 利用曼彻斯特编码可以准确地识别碰撞位的特性, 通过计算碰撞因子, 估计标签数量, 从而自适应地调整搜索叉数. 即在标签数较多的分支内选择动态四叉树搜索, 反之则选择动态二叉树搜索. 理论和仿真分析表明: 新算法克服了动态二叉树和四叉树搜索算法的缺点, 在减少碰撞时隙数的基础上, 又减少了

收稿日期 2008-12-26 录用日期 2009-06-20
Manuscript received December 26, 2008; accepted June 20, 2009

高等学校博士学科点专项科研基金 (20020358033) 资助
Supported by Doctoral Program Foundation of Institutions of Higher Education of China (20020358033)

1. 解放军电子工程学院网络中心 合肥 230037 2. 中国科学技术大学电子科学与技术系 合肥 230027 3. 中国科学技术大学网络中心 合肥 230027

1. Center of Network, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037 2. Department of Electronic Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027 3. Center of Network, University of Science and Technology of China, Hefei 230027

空闲时隙数,大幅度地提高了搜索效率和时隙的吞吐率,具有一定的创新性和实用性.

1 防碰撞算法原理及相关的研究成果

对于一个特定的 RFID 系统来说,任意 RFID 标签都有唯一确定的电子产品代码 (Electric product code, EPC),读写器通过获取标签的 EPC 来确认标签的身份.当读写器作用范围内有多个未识别的标签时,每个标签都向读写器发送自己的 EPC,这样就不可避免会出现相互干扰,即产生碰撞.而防碰撞算法就是要提出相应策略,使读写器能逐一对标签进行识别.

目前,很多 RFID 系统都采用传统的二进制搜索算法,它采用曼彻斯特 (Manchester) 的编码方法,可以有效地识别碰撞比特出现的位置. BS 算法通过多次比较,不断缩小响应标签的范围,直至对唯一的标签进行识别,并通过循环操作,依次识别所有标签.但该算法始终是自上而下进行的,搜索的过程中会出现许多重复路径,搜索效率比较低.且读写器的查询和标签的应答,都是完整地传输 EPC 序列,这就需要读写器和标签之间进行大量的数据传输.

在动态二叉树搜索算法中,读写器的查询命令仅传输 EPC 序列的一部分,标签的应答则传输 EPC 序列的剩余部分,当发生碰撞时,读写器根据第一次碰撞出现的位置,产生两个新的查询码分别进行搜索.随着搜索深度的增加,分支内的标签越来越少,直至对唯一的标签进行识别.而在动态四叉树搜索算法中,当标签发生碰撞后,读写器根据前两次碰撞出现的位置,产生 4 个新的查询码进行搜索.

值得注意的是,当待识别标签数量较多时,动态二叉树搜索算法由于频频出现碰撞,且每次碰撞只产生两个分支,搜索效率较低.如图 1 所示,完成上述 RFID 系统内 5 个标签的搜索共需要 9 个时隙,其中 4 个是碰撞时隙.

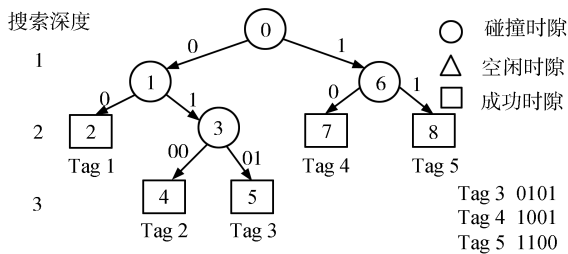


图 1 动态二叉树搜索流程

Fig. 1 Process of dynamic binary tree search

动态四叉树搜索算法虽然可以减少碰撞时隙数,但随着分支内标签的数量的减少会增加空闲时隙数.如图 2 所示,完成所有标签的搜索仍然需要 9 个时隙,即在减少 2 个碰撞时隙的同时增加了 2 个空闲

时隙.

值得注意的是,在上述的系统中,如果在搜索深度 1 时,采用四叉树搜索,而在搜索深度 2 时,采用二叉树搜索,就可以有效地减少搜索的时隙数,提高搜索效率.如图 3 所示,四-二叉树搜索仅需要 7 个时隙,其中只有 2 个碰撞时隙,且不产生空闲时隙.

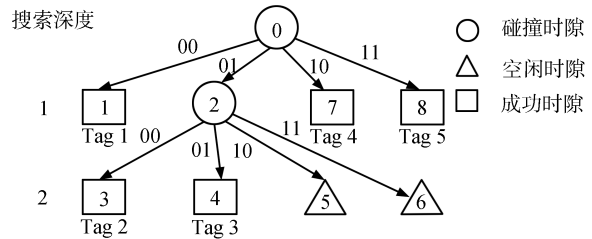


图 2 动态四叉树搜索流程

Fig. 2 Process of dynamic quadtree search

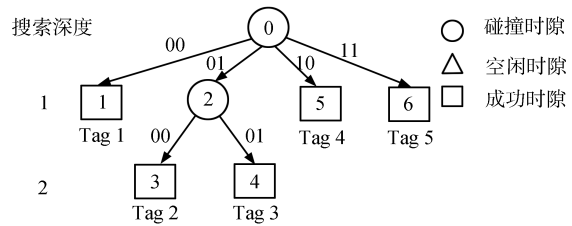


图 3 动态四-二叉树搜索流程

Fig. 3 Process of dynamic quad-binary search

2 自适应多叉树防碰撞算法

上述简单的例子说明如果防碰撞算法能根据分支内标签的数量,自适应地选择搜索叉数,就可以有效提高算法的效率.值得注意的是,在 RFID 系统中,采用曼彻斯特编码,读写器可以识别所有碰撞位的信息.现阶段大多数二叉树搜索算法仅利用了碰撞位的首位信息 (动态四叉树搜索算法利用碰撞位的前两位信息),而剩余的碰撞信息并没有充分的利用.一般来说,当分支内标签的数量越多时,出现碰撞的位数越多,碰撞位占总比特位的概率越大.

为了有效地利用碰撞位信息,定义了碰撞因子.

定义 1. 碰撞因子 μ 为在碰撞时隙内碰撞比特 n_c 占标签响应比特位 n 的比值:

$$\mu = \frac{n_c}{n} \tag{1}$$

定理 1. 碰撞因子包含了待识别标签的数量信息.

证明. 假设系统内有 N 个符合查询条件的待识别标签,标签响应的长度为 n 比特,任意一位比特不发生碰撞的概率为 $1/2^{N-1}$,故:

$$\mu = \frac{n[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1}]}{n} = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} \tag{2}$$

可见, 标签数量越大时, 碰撞因子越高. 反之, 碰撞因子越低. 说明碰撞因子包含了待识别标签的数量信息. □

如何确定碰撞因子的值呢?

假设系统内有 N 个待识别标签, 系统分配的叉数为 L , 在搜索深度为 1 时, 标签的识别概率为: $p(1) = (1 - 1/L)^{N-1}$, 在搜索深度为 k 时, 识别概率为: $p(k) = [1 - p(1)]^{k-1}$, 则所需搜索深度的均值为

$$E(k) = \sum_{k=1}^{\infty} kp(k) = \sum_{k=1}^{\infty} kp(1)[1 - p(1)]^{k-1} \quad (3)$$

将式 (3) 两边同乘以 $1 - p(1)$, 可得:

$$[1 - p(1)]E(k) = p(1) \sum_{k=1}^{\infty} k[1 - p(1)]^k \quad (4)$$

将式 (3) 减去式 (4) 得到:

$$p(1)E(k) = p(1) \quad (5)$$

因为 $1 - p(1) < 1$, 根据等比数列的求和公式:

$$E(k) = \sum_{k=1}^{\infty} k[1 - p(1)]^k = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{l}\right)^{N-1}} \quad (6)$$

所需的平均时隙数为

$$T = E(k)L = \frac{L}{\left(1 - \frac{1}{l}\right)^{N-1}} \quad (7)$$

对于二叉树搜索, 所需的平均时隙数为 $T_{2ary} = 2/(1 - 1/2)^{N-1}$. 对于四叉树搜索, 所需的平均时隙数为 $T_{4ary} = 4/(1 - 1/4)^{N-1}$. 比较两式, 可得当 $N > 3$ 时, 四叉树优于二叉树搜索, 反之, 二叉树优于四叉树. 根据式 (2), 碰撞因子应选择:

$$\mu = 1 - \left(1 - \frac{1}{2}\right)^{3-1} = 0.75 \quad (8)$$

由于新算法是根据碰撞因子自适应地选择搜索叉数, 所以被称为自适应多叉数防碰撞算法 (Adaptive multi-tree search anti-collision algorithm, AMS).

如图 4 所示, 算法的一般性描述如下:

步骤 1. 读写器初始化查询堆栈 S , 使之为空, 并发出搜索命令.

步骤 2. 符合查询条件的标签进行响应. 读写器根据标签响应, 确定时隙状态.

步骤 3. 读写器根据时隙状态, 自适应地选择搜索叉数和查询码.

步骤 3.1. 碰撞时隙: 计算碰撞因子 μ , 如果 $\mu \leq 0.75$, 说明待识别的标签数较少, 选择动态二叉树搜索, 即根据碰撞首位信息, 确定两条新的查询码, 将其写入查询堆栈 S . 如果 $\mu > 0.75$, 说明待识别的标签数较多, 选择动态四叉树搜索, 即根据碰撞前两位的信息, 确定 4 条新的查询码, 将其写入查询堆栈 S .

步骤 3.2. 空闲时隙: 说明没有标签存在, 在该分叉内无需继续搜索.

步骤 3.3. 成功时隙: 说明有且仅有一个标签存在, 读写器完成对该标签的识别.

步骤 4. 判断堆栈的内容是否为空, 如果不是, 读写器读取查询堆栈内的第一条查询码继续搜索, 并返回到步骤 2. 否则, 算法结束.

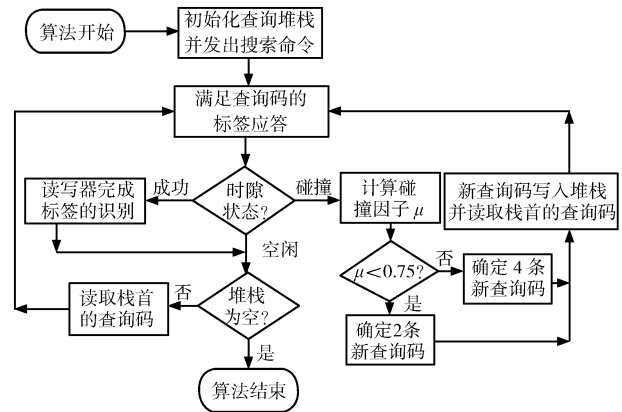


图 4 AMS 算法的搜索流程框图

Fig. 4 Block diagram of AMS algorithm

3 算法性能分析

通过时隙数和吞吐率计算, 对 AMS 算法的性能进行分析.

假设系统内有 N 个待识别标签, 且标签的分布是均匀的. 根据算法描述, 可知当碰撞因子 $\mu < 0.75$ (节点内的标签数小于 3) 时, 采用动态二叉数搜索, 反之则采用动态四叉数搜索. 所以, AMS 算法的总时隙数为二叉数搜索的时隙数和四叉树搜索的时隙数之和:

$$T_{ASM} = T_{2ary} + T_{4ary} \quad (9)$$

假设当搜索深度为 k 时, 子节点的标签数量平均为 3. 当搜索深度小于 k 时, 算法采用的是动态四叉数搜索, 其中 $k = \lfloor \log_4(N/3) \rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取小于该值的最大整数.

$$T_{4ary} = \sum_{i=0}^k 4^i = \sum_{i=0}^{\lfloor \log_4 N/3 \rfloor} 4^i \quad (10)$$

搜索深度大于等于 k 时, 算法采用的是动态二叉数搜索, 根据 $T_{DBS} = 2N - 1^{[1]}$:

$$T_{2ary} = \frac{N}{3}(2 \times 3 - 1) = \frac{5N}{3} \quad (11)$$

将式 (10) 和式 (11) 带入式 (9) 可得:

$$T_{AMS} = T_{4ary} + T_{2ary} = \sum_{i=0}^{\lfloor \log_4 N/3 \rfloor} 4^i + \frac{5}{3}N \quad (12)$$

根据吞吐率的定义, 可得:

$$S_{AMS} = \frac{N}{T_{AMS}} = \frac{N}{\sum_{i=0}^{\lfloor \log_4 N/3 \rfloor} 4^i + \frac{5}{3}N} \quad (13)$$

由于 $0 < \sum_{i=0}^{\lfloor \log_4 N/3 \rfloor} 4^i < N/3$ ($\log_4 N/3$ 非整数时), 所以 T_{AMS} 和 S_{AMS} 满足: $5N/3 < T_{AMS} < 2N$, $0.5 < S_{AMS} < 0.6$.

4 实验仿真与分析

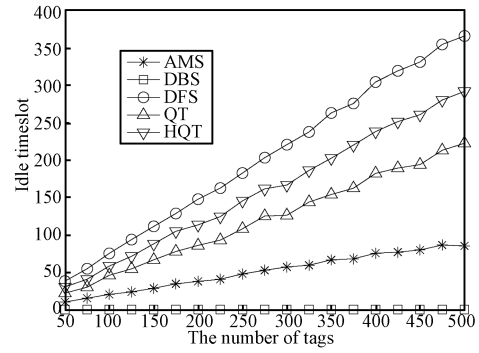
下面通过计算机对上述算法进行仿真, 结果取 20 次实验的平均值.

图 5 (a) ~ (d) 分别为 5 种算法所需空闲时隙、碰撞时隙、总时隙和吞吐率的比较. 当标签数为 $N = 500$ 时, 根据式 (12) 和式 (13), $T_{AMS} = 918$, $S_{AMS} = 0.545$, 与理论值误差小于 1%, 说明仿真与理论分析一致, 虽然 DBS 算法所需的空闲时隙最少 (为零), DFS 算法所需的碰撞时隙最少, 但 AMS 算法在减少碰撞时隙的基础上又降低空闲时隙数, 从总时隙数和吞吐率来看, 具有更高的搜索效率和性能. 而 QT 和 HQT 算法适用于不提供碰撞位信息的 RFID 系统, 由于没有有效地利用碰撞信息, 所以性能较差. 但 HQT 算法通过在标签中增加延迟器, 有效地减少空闲时隙数, 所以取得了与 DFS 算法相近的性能.

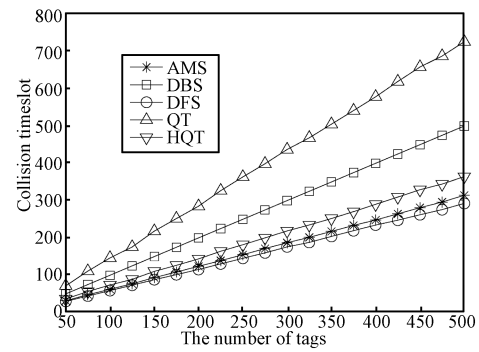
图 6 (a) 和 (b) 分别为选择不同的碰撞因子对 AMS 算法性能的影响. 仿真与理论分析一致, 说明选择 $\mu = 0.75$ 作为选择二叉树和四叉数的依据是正确的, 比选择其他值具有更好的搜索效率和性能.

5 结论

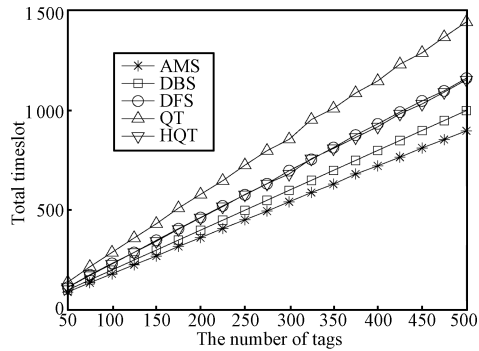
本文提出了一种自适应多叉树防碰撞算法. 新算法在动态二叉树和四叉树搜索算法的基础上, 利用曼彻斯特编码可以准确识别碰撞位的特性, 通过计算碰撞因子, 估计标签数量, 从而自适应地调整搜索叉数, 即在标签数较多的分支内选择动态四叉树搜索, 反之则选择动态二叉树搜索. 理论和仿真分析表明: 新算法克服了动态二叉树和四叉树搜索算法的缺点, 在减少碰撞时隙数的基础上, 又减少了空闲



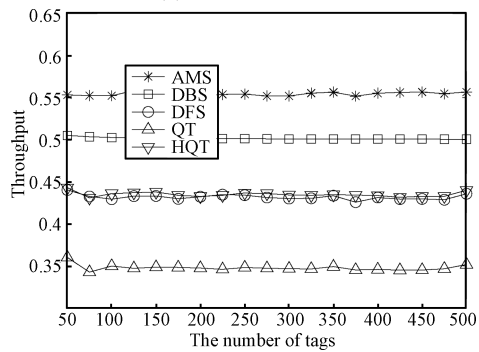
(a) 空闲时隙



(b) 碰撞时隙



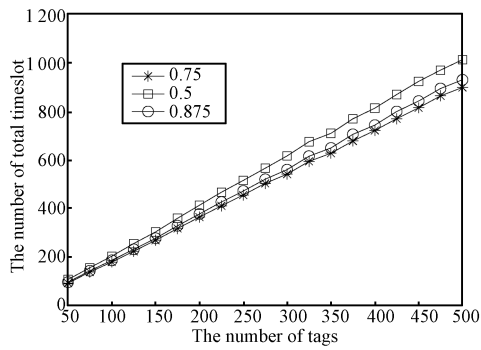
(c) 总时隙



(d) 吞吐率

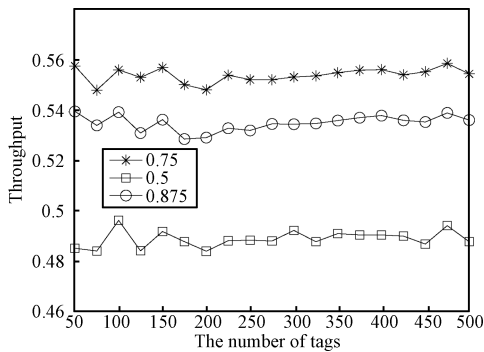
图 5 5 种算法的性能比较

Fig. 5 Performance comparisons for five algorithms



(a) 总时隙

(a) Total timeslot



(b) 吞吐量

(b) Throughput

图 6 不同的碰撞因子对 AMS 算法性能的影响

Fig.6 Performance of AMS algorithm using different collision factors

时隙数,大幅度地提高了搜索效率和时隙的吞吐量,具有一定的创新性和实用性。

References

- 1 Finkenzeller K. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. New York: John Wiley and Sons, 2003
- 2 Tae-Wook H, Byong-Gyo L, Kim Y S, Suh D Y, Kim J S. Improved anti-collision scheme for high speed identification in RFID system. In: Proceedings of the 1st International Conference on Innovative Computing, Information and Control. Beijing, China: IEEE, 2006. 449–452
- 3 Jae-Ryong C, Jae-Hyun K. Novel anti-collision algorithms for fast object identification in RFID system. In: Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed System. Fukuoka, Japan: IEEE, 2005. 63–67
- 4 Jihoon M, Wonjun L, Srivastava J. Adaptive binary splitting for efficient RFID tag anti-collision. *IEEE Communications Letters*, 2006, **10**(3): 144–146
- 5 Lai Y C, Lin C C. A pair-resolution blocking algorithm on adaptive binary splitting for RFID tag identification. *IEEE Communications Letters*, 2008, **12**(6): 432–434
- 6 Jihoon M, Wonjun L. Adaptive binary splitting: an RFID tag collision arbitration protocol for tag identification. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Broadband Networks. Boston, USA: IEEE, 2005. 347–355

Proceedings of the 2nd International Conference on Broadband Networks. Boston, USA: IEEE, 2005. 347–355

- 7 Law C, Lee K, Kai-Yeung S. Efficient memoryless protocol for tag identification. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications. Boston, USA: ACM, 2000. 75–84
- 8 Ryu J, Lee H, Seok Y, Kwon T, Choi Y. A hybrid query tree protocol for tag collision arbitration in RFID systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Glasgow, Scotland: IEEE, 2007. 5981–5986



丁治国 解放军电子工程学院网络中心讲师, 博士。主要研究方向为射频识别关键技术。本文通信作者。

E-mail: dhgzg@mail.ustc.edu.cn

(DING Zhi-Guo Ph.D., lecturer at the Center of Network, Electronic Engineering Institute. His main research interests are key technologies of radio

frequency identification. Corresponding author of this paper.)



朱学永 中国科学技术大学网络中心教授。主要研究方向为计算机网络与信息安全。E-mail: zhuxy@ustc.edu.cn

(ZHU Xue-Yong Professor at the Center of Network, University of Science and Technology of China. His research interest covers computer network and information security.)



郭立 中国科学技术大学电子科学与技术系教授。主要研究方向为集成电路设计与图像处理。

E-mail: lguo@ustc.edu.cn

(GUO Li Professor in the Department of Electronic Science and Technology, University of Science and Technology of China. His research interest covers IC design and image processing.)



古今 中国科学技术大学电子科学与技术系博士研究生。主要研究方向为信息安全技术。

E-mail: guj@mail.ustc.edu.cn

(GU Jin Ph.D. candidate in the Department of Electronic Science and Technology, University of Science and Technology of China. Her main research interests are technologies of information security.)