

## 基于 0-1 分布的 RFID 标签估计算法

钱晓捷\*, 郭洪圆, 田阳光

(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001)

(\* 通信作者电子邮箱 ghy.429090@163.com)

**摘要:** 针对大规模无线射频识别系统中, 现存标签估计算法估计时间随标签数量增加而线性增加, 以及误差较大的问题, 提出一种基于 0-1 分布的标签估计算法。该算法利用 0-1 分布的特性, 通过设定特定帧长及选择标记, 来选择响应盘存命令的标签集合, 使得估计时间降低为标签数量的对数级, 并通过多次随机重复取均值来降低估计误差。仿真结果表明, 该算法比其他算法估计误差至少降低 0.9%, 且波动性更小。

**关键词:** 无线射频识别; 标签识别; 标签估计; 对数级; 0-1 分布

**中图分类号:** TP391.45 **文献标志码:** A

### Estimation of RFID tags based on 0-1 distribution

QIAN Xiaojie\*, GUO Hongyuan, TIAN Yangguang

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China)

**Abstract:** In the large-scale Radio Frequency Identification (RFID) system, the estimated time of current tag estimation algorithms increase linearly with the increase of tags, and the deviation is large. Regarding these problems, a new estimation algorithm based on 0-1 distribution was proposed. By using the feature of 0-1 distribution, the algorithm set the specific frame length and selected flag to choose the collection of tags which responded to the command of query. In this way, estimation time was reduced to the logarithmic level of tag number and the deviation was reduced through picking numerous average values randomly. Compared with other algorithms, the simulation results show that the proposed algorithm drops deviation at least by 0.9%, and has less fluctuation.

**Key words:** Radio Frequency Identification (RFID); tag identification; tag estimation; logarithmic; 0-1 distribution

## 0 引言

无线射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID) 是一种非接触式识别技术, 采用电感耦合和电磁反向散射耦合两种方式传递信息、交换数据。简单的结构、相对低的价格以及较大的存储容量使得 RFID 广泛应用于门禁、不停车收费、资产管理、物品追踪和仓储控制等领域<sup>[1]</sup>。当多个电子标签一起向阅读器 (Reader) 发送信息时将会出现相互干扰, 称之为标签碰撞。如何解决 RFID 的碰撞问题是当前研究的重点。

当前用于解决 RFID 标签碰撞问题的方法有两类: 基于树分叉的确定性算法<sup>[2-3]</sup>和基于 ALOHA 的非确定性算法<sup>[4]</sup>。基于树分叉的防碰撞算法把阅读器识别范围内的标签集分成多个子集, 直至只包含单一标签的集合时识别标签, 实际上是树的深度优先遍历。当标签数量相对较少时, 利用树分叉的识别算法能够有效地减少标签碰撞的发生, 提高系统的吞吐率; 但是当标签数量相对较大时, 树的深度将会变得非常大, 以至于系统吞吐率变得很低。ALOHA 算法是让阅读器识别范围内的所有标签随机地选择一个时隙 (slot) 向阅读器发送数据。因此, 合理的 ALOHA 帧长能够很好地提高 RFID 系统的识别效率。标签估计算法可以用于调整 ALOHA 类算法的帧长。由此产生的标签估计问题也是拥有大量标签的 RFID 系统的重要任务。本文提出的基于 0-1 分布的标签估计算法, 利用 0-1 分布的特性, 设定标签响应阅读器盘存命令的策略, 在降低估计时间的同时, 保证了标签的低成本。

为了方便描述, 在此约定 RFID 系统中的标签个数为  $n$ , 系统中 ALOHA 帧的帧长为  $L$ ; 标签传输时空隙、碰撞时空隙和成功时隙的概率分别为  $P_i$ 、 $P_c$  和  $P_s$ 。由概率论知识可得:

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

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

$$P_c = 1 - P_s - P_i \quad (3)$$

## 1 标签估计算法

估计标签数量无论对于 ALOHA 类的标签识别, 还是一些统计无线节点数量的领域都有着非常重要的意义<sup>[1]</sup>。现有的标签估计算法主要有 LB (LowBond) 估计算法、碰撞率估计算法<sup>[5]</sup>和切比雪夫不等式估算法<sup>[6]</sup>, 以及通过阅读器对空时隙的检测提出的 PZE 及其改进算法 EZB (Enhanced Zero-based Estimator)<sup>[7]</sup>。

碰撞率估计通过对一个帧长中出现的碰撞帧的检测, 计算出实际的碰撞率作为  $P_c$  的值, 再利用式 (1) ~ (3) 求出  $n$  的值。

切比雪夫不等式估算法 (Vgot 估算法) 运用系统对空时隙、成功时隙和碰撞时隙的实际检测值和期望值找到期望值与检测值之间的最小差值, 以确定  $n$  的值。此种方法相对精确, 但是计算复杂。

无论 PZE 还是 EZB 都使用固定的概率  $p$  来确定标签是否发送信息,  $p = \min(1, 1.59/\rho)$ , 其中  $\rho$  为系统的加载因

收稿日期: 2013-03-06; 修回日期: 2013-05-03。

**作者简介:** 钱晓捷 (1963 -), 男, 江苏无锡人, 副教授, 硕士, CCF 会员, 主要研究方向: 计算机系统结构、嵌入式系统; 郭洪圆 (1988 -), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统; 田阳光 (1986 -), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机系统结构。

子<sup>[5]</sup>,是响应阅读器的标签数与帧长的比值。这两种方法需要动态修改 $\rho$ 值,增加了系统的读取时间。

以上算法都有一个共同的缺点,即当系统中标签数量足够大,而系统的帧长相对较小时,系统出现空时隙和成功时隙的概率将很小,一旦阅读器没有检测到空时隙和成功时隙,则以上估计算法误差率将会很大。

文献[1]中提出了一种新的标签识别算法——LoF (Lottery Frame) 标签估计算法,使得估计时间为对数级,其通过在标签中使用 hash 函数来选择是否响应阅读器。估计算法的精确度取决于所使用的 hash 函数;如果在标签中执行 hash 函数,需要增加存储 hash 函数的存储空间,增加了标签的成本;另外由于低成本的特性,现有的无源标签并不具备执行复杂 hash 函数的能力。若按照文献[8]中所提出的设计方法,使标签在生产过程中存储标签 ID 号的 hash 值,以减少标签执行 hash 函数的过程和降低标签成本,则将使现有标签无法使用。

为实现低成本无源标签在大规模 RFID 系统中的应用,本文根据 0-1 分布的特性,基于第 1 类第 2 代 UHF RFID 860 MHz ~ 960 MHz 通信协议标准中标签的基本硬件结构,提出了基于 0-1 分布的标签估计算法。

## 2 基于 0-1 分布的标签估计

### 2.1 算法原理

数学家德·摩根曾抛掷 4092 次硬币,得到正面向上的结果为 2048 次。由概率统计可知,抛掷硬币,其落地所得结果为正面或反面的概率均为 1/2,服从 0-1 分布。本文根据 0-1 分布的此种特性,设定阅读器识别范围内的标签随机选择 0 或 1 两个时隙响应阅读器的盘存命令。若检测到 0 时隙碰撞,则令 0 时隙响应的标签重新选择 0 或 1 时隙响应盘存命令,直至出现非碰撞时隙。由于每次响应盘存命令的标签数量都约为前一次的一半,由此可以由查询次数估计标签的总数量。

### 2.2 算法实现

为完成对本文所提出算法的描述,需要在阅读器内增加一个查询计数器 RC,命名标签中的随机数生成器为 TRN,并初始化 TRN 的值为 0。本文只讨论标签估计部分,为了更好地表述估算的过程,引入 EPC 标准指令如下: Query 表示阅读器查询可识别范围内的标签<sup>[9]</sup>, Select 表示设定选择标记或取消选择标记<sup>[9]</sup>。

基于 0-1 分布标签估计算法流程(图 1)如下:

1) 初始化所有标签随机数生成器 TRN 为 0,阅读器中寄存器 RC 为 0;阅读器发送 Select 命令标记所有标签。

2) 阅读器发送 Query 命令;TRN 为 0 的标签随机选择置位 TRN 为 0 或者 1;阅读器发送 Select 命令取消 TRN 为 1 的标签标记。

3) TRN 为 0 的标签响应 Query 命令,发送 16 位散列数据 RN16。若发生碰撞,则 RC++, 然后转向步骤 2);若出现空时隙或者成功时隙,转向步骤 4)。

4) 通过 RC 的值计算出标签数量  $n$ 。

若 RC 的值为  $i$ , 响应阅读器 Query 命令的标签数量约为  $n/2^i$ ; RC 的值为  $i+1$ , 响应阅读器 Query 命令的标签数量约为  $n/2^{i+1}$ ;若出现空时隙或者成功时隙时, RC 的值为  $N$ , 则响应 Query 命令的标签数量为  $n/2^N$ , 可得标签的数量  $n \approx 2^N$ ,  $N$  的期望值  $E(N) \approx \lg(n)$ 。

为了满足对估计精确度要求较高的一些系统的需要,在此对提出的算法做进一步的优化。通过多次求  $N$  的值,设定

为  $N_1, N_2, \dots, N_t$ , 由此可得到  $N$  的值为

$$N = (N_1 + N_2 + \dots + N_t) / t$$

具体实现方法:在阅读器中添加累加寄存器 RNC, 保存  $N$  值;添加寄存器 RQ, 统计重复的次数。阅读器发送 Query 命令,一旦检测到成功时隙或者空时隙,则将 RC 中的  $N$  值与 RNC 中的值相加,并存入 RNC 中,  $K$  次之后就可获得 RQ 的值为  $K$ , RNC 的值除以 RQ 即得  $N$  的均值  $N'$ 。由此可得  $n = 2^{N'}$ 。

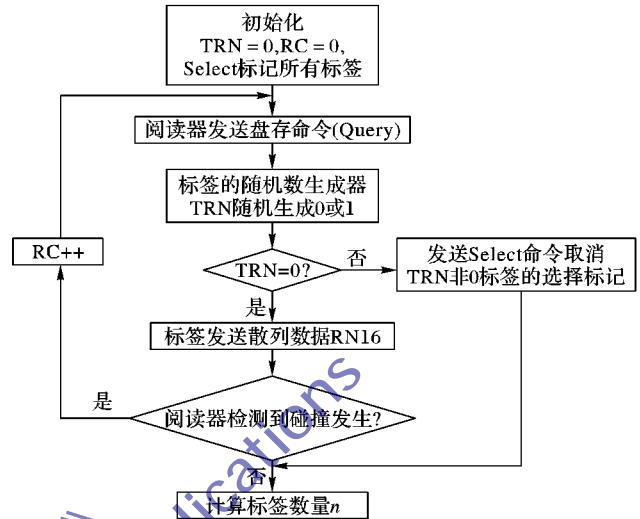


图1 算法流程

阅读器端算法实现的伪代码如下:

```

RN=0;
RNC=0;
RQ=k;
for (i=k; i>0; i--)
  while(tags collision)
    RC++;
  end while
  RNC+=RC;
  RC=0;
end
n=pow(2, RNC/K);
  
```

### 2.3 理论误差分析

未设定  $K$  值时,  $N$  的误差计算公式为:

$$\sigma(N)^2 = \sigma_{\infty}^2 + Q(\lg(n)) + o(1)$$

其中:  $Q(u)$  是平均值为 0, 周期为 1 的周期函数<sup>[10]</sup>;  $\sigma_{\infty} = 1.12127$ 。所以  $N$  的标准差  $\sigma(N) \approx 1.121$ 。当设定  $K$  值之后, 由文献[10] 可得计算标准差的近似公式如下:

$$\sigma(N') = \sigma / \sqrt{K} \quad (4)$$

其中  $\sigma$  约为 0.78, 当标准差越接近于 0 时系统的误差越小<sup>[10]</sup>。所以当  $K=16$  时,  $\sigma(N') \approx 0.195$ , 系统的标准差大大降低。同时估计算法的时间复杂度也会有所提升, 为  $O(K \lg(n))$ 。

令  $\mu = E(N') = \lg(n)$ , 由列维—林德伯格定理可知:

$$X = \frac{N' - \mu}{\sigma} \sim N(0, 1) \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (6)$$

高斯误差函数为

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2} dt \quad (7)$$

假设存在一个值  $c$ , 使得对于任意的一个  $\alpha$  都满足

$$1 - \alpha = P\{X \leq |c|\} \quad (8)$$

由式(5)~(8)知

$$P\{|X| \leq |c|\} = \text{erf}(c/\sqrt{2}) \quad (9)$$

假设存在置信区间  $\beta$ , 使得任意的  $\alpha$  都满足  $P\{|E(n) - n| \leq \beta n\}$ , 所以可以推出

$$P\{(1 - \beta)n \leq 2^{N'} \leq (1 + \beta)n\}$$

由式(4)可得

$$P\left\{\frac{\text{lb}[n(1 - \beta)] - \mu}{\sigma} \leq X \leq \frac{\text{lb}[n(1 + \beta)] - \mu}{\sigma}\right\} \quad (10)$$

由式(8)和(10)知, 当系统满足  $\frac{\text{lb}[n(1 + \beta)] - \mu}{\sigma} \geq c$

或者  $\frac{\text{lb}[n(1 - \beta)] - \mu}{\sigma} \leq -c$  时条件成立。将式(4)、(5)代入不等式, 解不等式得

$$K \geq \max\left\{\left|\frac{-\sigma c}{\text{lb}(1 - \beta)}\right|^2, \left|\frac{\sigma c}{\text{lb}(1 + \beta)}\right|^2\right\}$$

其中  $c$  可以由式(8)、(9)以及高斯误差表确定。由上式可得, 当置信水平  $\alpha$  为 0.05 时,  $K$  与  $\beta$  的关系如图 2: 其中  $Y$  轴为  $K$  值,  $X$  轴为  $\beta$  值。

由图 2 可知, 当置信水平为 0.05,  $K$  为 8 时, 系统的估计误差近似为 25%; 当  $K$  为 32 时, 系统的估计误差小于 15%。系统的估计误差与  $K$  值之间是一种反对数关系, 随着  $K$  值的增大, 系统的估计值逐渐接近于实际值。

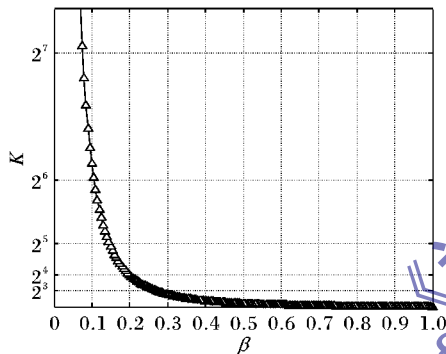


图2  $K$ - $\beta$  关系图

#### 2.4 时间稳定性分析

由式(2)知空闲时隙  $S_0$  的期望  $E(S_0) = LP_i = L\left(1 - \frac{1}{L}\right)^n = Le^{-\frac{n}{L}}$ 。由于文献[4-6, 11-12]中的估计算法大都依赖于碰撞时隙与空时隙的概率, 所以要保证估计值的可信, 必须满足  $E(S_0) > 1$ , 即  $Le^{-\frac{n}{L}} > 1$ , 可得  $L$  与  $n$  的关系为  $\frac{n}{\ln L} < L$ 。因此当  $n$  很大时,  $L$  也必须很大。ALOHA 系统中的帧长一般不大于 512, 所以  $L > n \cdot (\ln(512)) = 0.16n$ , 即当系统中标签的规模为 500 时, 帧长的最小值为 80; 标签的规模为 1024 时, 帧长的最小值为 163, 估计算法的估计时间近似于线性增长。本文提出的估计策略的估计时间为 RC 中的值  $N$ ,  $N \approx \text{lb}(n)$ , 估计时间与  $n$  为对数关系, 优化后的估计时间为  $K * N$ 。即当系统中标签规模为 1024 时,  $N$  近似为 10; 标签规模为 5000 时,  $N$  近似为 12。所以本文的估计策略对于大规模的标签估计其估计时间相对稳定, 为标签数量的对数级  $O(K \text{lb}(n))$ 。

### 3 仿真结果及分析

本文通过 Matlab 对估计算法进行仿真, 仿真标签与文献[10]中描述的标签数量一致, 为 128 ~ 20000; 仿真结果取 100 次同等条件下的平均值<sup>[13]</sup>。仿真中设定 LB 算法和 Vgot 算法的初始帧长随标签总数的变化而变化, 当标签总数小于

512 时, 随标签数量变多, 初始帧长依次为 16, 32, 64, 128; 当标签总数大于 512 时, 初始帧长设定为  $0.16n$  ( $n$  为标签总数); 使 LB 和 Vgot 算法的估计误差降到最低。LoF 算法的仿真使用标签 ID 号中最低位 0 的位置 (Value), 以达到几何分布的效果, 再多次对 Value 使用 hash 函数实现文献[8]中描述的多 hash 实验, 其中 hash 函数选用 MD5。对本文提出的 0-1 分布的标签识别算法仿真则设定由随机数生成器随机生成  $N$  个随机数列代表  $N$  个标签, 随机数为 0 则响应阅读器盘存命令。

实验中设定估计误差  $\text{err} = |(n - n')/n|$ , 其中:  $n$  为标签实际数量,  $n'$  为估计标签数量。

由图 3 仿真结果可知, 当标签数量较小时, 使用线性估计算法 LB 估计算法和 Vgot 估计算法的估计精确度较高; 随着标签数量的增加, LB 估计算法和 Vgot 估计算法的估计误差明显增加, 并且估计误差接近于 1。而使用 4 次 hash 函数的 LoF 估计算法和  $K=4$  的基于 0-1 分布的估计算法的估计误差在标签增加的过程中估计误差保持平稳, 基于 0-1 分布的标签估计算法在 30% ~ 40% 波动, LoF 估计算法在 30% ~ 50% 波动。

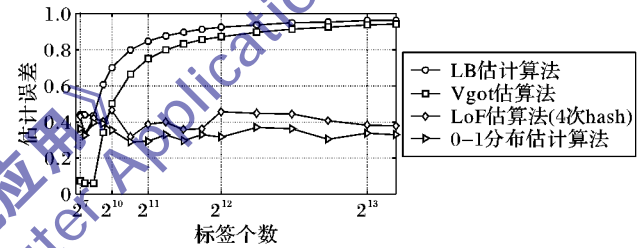


图3 标签数量与估计误差关系

对于不同的  $K$  值, 基于 0-1 分布的标签估计算法估计误差如图 4。由图 4 可知, 对于给定  $K$  值, 随  $K$  值增大, 系统的估计精确度增加, 估计误差趋于平稳。当  $K=16$  时, 基于 0-1 分布的标签估计算法的估计误差约为 20%; 当  $K=32$  时, 估计误差约为 13%, 低于文献[8]中得出的 13.9% 的理论误差; 当  $K=64$  时, 估计误差约为 10%。仿真结果与其理论值相符。在实际应用中, ALOHA 标签识别算法并不需要精确地知道标签的数量, 一定的误差限度是系统能够容忍的<sup>[14]</sup>。

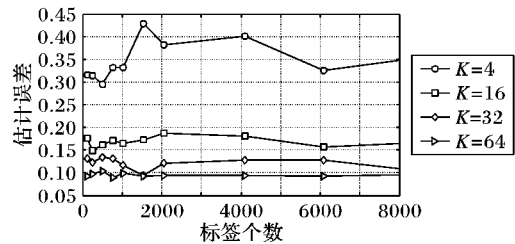


图4 本文算法在不同  $K$  值时的标签估计误差

以单个时隙所占用的时间为单位时间, 不考虑 LB 估计算法和 Vgot 估计算法修正初始帧长所花费的时间, 并且取 LB 估计算法和 Vgot 估计算法最优估计时估计时间的下限, 算法的估计时间对比如图 5 所示 (因为在不考虑算法计算所耗时间时, LB 估计算法和 Vgot 估计算法的估计时间都是整个帧长, 所以用一条实验曲线表示)。由图 5 可知, LB 估计算法和 Vgot 估计算法的估计时间在标签数量增加时线性增加; 基于 0-1 分布的估计算法的估计时间在标签数量增加时变化平稳。当估计误差容忍度为 20%,  $K=16$  的基于 0-1 分布的估计算法已经能够满足要求, 在标签数量为 8000 时, 其估计时间为 200 个时隙; 而 LB 估计和 Vgot 估计的估计时间已经远远大于 512 个时隙。



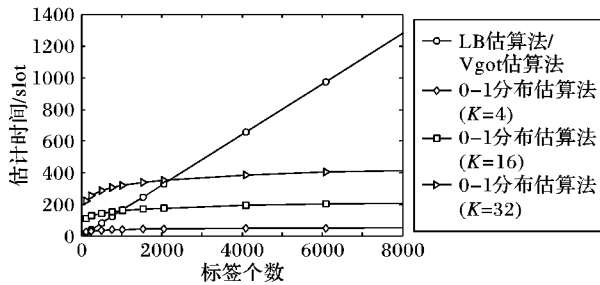


图5 算法的估计时间对比

#### 4 结语

本文提出的基于0-1分布特性的标签估计算法的估计时间为 $O(K \ln(n))$ 。在大规模RFID系统中,与之前的Vgot等估计算法相比,其估计时间明显减少,同时估计误差相对稳定。仿真结果表明,当 $K=32$ 时,估计误差约为13%,低于文献[8]中得出的32个hash函数LoF的理论误差13.9%。由于本文的估计算法基于文献[9]中的基本硬件结构,不需要对现有的标签做特殊的修改就能实现相对精确的估计,其在实现上优于LoF,更适用于普通的低成本无源标签。对于多阅读器的情况,本文算法依然适用,在此不作讨论。

#### 参考文献:

- [1] QIAN C, NGAN H, LIU Y H. Cardinality estimation for large-scale RFID systems [C]// PERCOM '08: Proceedings of the 2008 Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 30-39.
- [2] 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.
- [3] 孙文胜, 胡玲敏. 基于后退式搜索的自适应多叉树防碰撞算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(8): 2052-2055.
- [4] EOM J-B, LEE T-J. Accurate tag estimation for dynamic framed-slotted ALOHA in RFID systems [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 14(1): 60-62.
- [5] VALES-ALONSO J, BUENO-DELGADO V, EGEA-LOPEZ E, et al. Multiframe maximum-likelihood tag estimation for RFID anti-collision protocols [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 487-496.
- [6] VOGT H. Efficient object identification with passive RFID tags [C]// Proceedings of the First International Conference on Pervasive Computing, LNCS 2414. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 98-113.
- [7] KODIALAM M, ALCATEL-LUCENT H, NANDAGOPAL T, et al. Anonymous tracking using RFID tags [C]// INFOCOM 2007: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE, 2007: 1217-1225.
- [8] QIAN C, NGAN H. Cardinality estimation for large-scale RFID systems [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(9): 1441-1454.
- [9] EPCglobal Inc. EPC Radio-Frequency Identity Protocols, Class-1 Generation-2 UHF RFID: Protocol for Communications at 860 MHz-960 MHz Version 1.2.0 [EB/OL]. [2012-12-06]. [http://www.gs1.org/gsmp/kc/epcglobal/uhfclg2/uhfclg2\\_1\\_2\\_0-standard-20080511.pdf](http://www.gs1.org/gsmp/kc/epcglobal/uhfclg2/uhfclg2_1_2_0-standard-20080511.pdf).
- [10] FLAJOLET P, MARTIN G N. Probabilistic counting algorithms for data base applications [J]. Journal of Computer and System Science, 1985, 31(2): 182-209.
- [11] ZANELLA A. Estimating collision set size in framed slotted aloha wireless networks and RFID systems [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(3): 300-303.
- [12] VAHEDI E, WONG V W S, BLAKE I F, et al. Probabilistic analysis and correction of Chen's tag estimate method [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2011, 8(3): 659-663.
- [13] 李萌, 钱志鸿, 张旭, 等. 基于时隙预测的RFID防碰撞ALOHA算法[J]. 通信学报, 2011, 32(12): 43-50.
- [14] 郭宏博, 赵玉萍. 一种新的导数可靠度的RFID标签数目估计[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(5): 721-726.

(上接第2123页)

#### 5 结语

由于多跳DF方式中只要有一个中继不能正确解码将导致整个链路系统性能下降,且不能获得分集增益。针对这一缺点,推导了多跳SDF分集系统在高信噪比条件下中断概率近似表达式。通过仿真对比,发现采用SDF方式能获得空间满分集度,系统性能比DF有了很大的提升。

#### 参考文献:

- [1] SENDONARIS A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity, Part I: system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [2] LIN Y, HASNA M O, ALOUINI M-S. Average outage duration of multi-hop communication systems with regenerative relays [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(4): 1366-1371.
- [3] SEDDIK K G, SADEK A K, SU W F, et al. Outage analysis of multi-node amplify-and-forward relay networks [C]// WCNC 2006: Proceedings of IEEE 2006 Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2006, 2: 1184-1188.
- [4] 唐菁敏, 罗涛, 乐光新. 基于中继选择的认知系统性能[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(3): 44-47.
- [5] 唐菁敏, 罗涛, 乐光新. 感知系统中最优感测时间和功率分配[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(4): 89-92.
- [6] LEE I-H, KIM D. Spatial channel reuse in multi-hop decode-and-forward relaying systems in high path loss environments [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(7): 990-993.
- [7] BOYER J, FALCONER D D, YANIKOMEROGLU H. Multihop diversity in wireless relaying channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(10): 1820-1830.
- [8] 李云, 张正华, 赵为粮. 无线网络中的多跳协作机制[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(1): 234-236.
- [9] 杨洁, 芮丽娜, 曹雪虹. 改进的解码转发多跳中继系统及最优功率分配[J]. 计算机工程, 2013, 39(3): 82-86.
- [10] 陈兴阳, 张林, 山秀明, 等. 节点接收数目受限的多跳分集方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(10): 1684-1689.
- [11] 唐菁敏, 罗涛, 龙华, 等. 重叠共享方式下多跳协作分集感知系统性能[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(2): 37-40.
- [12] LANEMAN J N, TSE G N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [13] FARHADI G, BEAULIEU N C. Fixed relaying versus selective relaying in multi-hop diversity transmission system [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(3): 956-965.
- [14] SU W, SADEK A K, LIU K J R. SER performance analysis and optimum power allocation for decode-and-forward cooperation protocol in wireless networks [C]// Proceedings of 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2005, 2: 984-989.
- [15] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2414-2425.