

# 认知无线电系统中消除异步干扰的最小均方预编码方法

张宝剑 曲培新

(河南科技学院信息工程学院 新乡 453003) (武汉理工大学信息工程学院 武汉 430070)

**摘要** 当主用户和次用户在地理上存在一定距离时,由于次用户到达主用户系统的信号不同步,会产生异步干扰,此干扰不但影响主用户系统,使得其干扰增大,也会影响次用户系统,使得次用户系统传输速率损失,特别是误比特性能上升。为了消除异步干扰对主次用户系统的影响,提出了一种基于最小均方误差的预编码方法,此方法在预编码阶段就预先消除了异步干扰,并且在保证主用户的服务质量基础上进行的。通过分析和仿真结果表明,所提方案在对主用户系统干扰受限的条件下,有效提升了次用户系统和次用户系统的容量,同时提高了次用户系统传输的可靠性。

**关键词** 认知无线电,频谱共享,多输入多输出,异步干扰

中图分类号 TN929.53 文献标识码 A

## Precoding Method of Cancelling Asynchronous Interference for Cognitive Radio System

ZHANG Bao-jian QU Pei-xin

(School of Information Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract** When the primary users and second user geographically has certain distance, there are asynchronous interferences. The interferences not only influence the primary user system, also can affect second user system. In order to eliminate the influence of asynchronous interference on primary and secondary users systems, this paper put forward a kind of precoding based on the minimum mean square error. Analysis and simulation results show that the proposed scheme in the main user system interference limited conditions, effectively enhances the user's system and second user system capacity, and improves the reliability of the transmission system of second users system.

**Keywords** Cognitive radio, Spectrum share, MIMO, Asynchronous interferences

### 1 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术能够有效地利用没有被充分利用的频谱,从频率的再利用方面解决了无线频谱资源短缺的矛盾。在相同的频率下,当主用户(Primary User, PU)系统进行通信时,为了对PU不造成干扰,同时次用户(Second User, SU)需要利用不同的资源进行通信,不同的研究分别提出了充分利用空间、码资源等不同的资源<sup>[1-3]</sup>。其中多天技术以充分利用空间资源的优势,得到广泛的关注和研究。

以往的文章均是假设次用户对主用户的干扰是完全同步的,并且多个CBS发送的信号到达SU的干扰也是同步的,从而比较容易消除次用户之间的干扰和对主用户的干扰<sup>[4,5]</sup>。然而在实际应用中,PU系统和SU系统不可能做到完全的同步,而且CBS到达多个用户不可能做到完全的同步,所以以往的文章均没有考虑异步所带来的干扰,从而也不能消除异步干扰,造成PU系统和SU系统传输速率的下降以及误码率的上升。本文采用文献<sup>[6]</sup>的异步干扰建模方式,提出了一种消除PU系统和SU系统的基于最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)的预编码方法,由仿真结果和分

析可知,此方法有效提高了两个系统的系统容量,并且提高了SU系统的误比特性能。

### 2 系统模型

类似于文献<sup>[4]</sup>,所提方案的系统模型如图1所示,PU系统存在一个主用户基站(Primary Base Station, PBS),其将与一个主用户进行通信。SU认知网络有一个认知基站(Cognitive Base Station, CBS),其服务K个次用户。其中,PBS和CBS均配置M个天线,并且主用户和K个次用户配置N个接收天线。在同一个频率内,主用户所接收的信号将受到CBS所发送信号的干扰。在同一个时隙里,从CBS发送的信息符号为 $s = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T$ ,其中 $s_k$ 为将要发给次用户 $k$  ( $k=1, \dots, K$ )的信号。假设 $s$ 是单位能量的向量,即 $E[ss^H] = I_k$ 。

CBS所发送的信号可以写为

$$x = Ts \tag{1}$$

式中, $T = [t_1, t_2, \dots, t_K]$ 为CBS发送时的预编码矩阵, $t_k$  ( $k=1, \dots, K$ )为 $M \times 1$ 的向量。则次用户 $k$ 接收到的信号为

$$y_k = \sqrt{\beta_k} H_k x + \sqrt{P_p} G_k s_p + n_k \tag{2}$$

式中, $s_p \in C^{M \times 1}$ 为PBS发送的信号, $\beta_k$ 是CBS到次用户 $k$ 的

到稿日期:2012-09-16 返修日期:2012-12-19 本文受河南省科技攻关项目(122102310393)资助。

张宝剑(1969-),男,博士生,副教授,主要研究方向为计算机应用与算法设计分析,E-mail:zbj@hist.edu.cn;曲培新(1977-),男,博士生,讲师,主要研究方向为信号处理。

路径损耗;  $P_p$  为 PBS 的发送功率;  $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N \times M}$  是 CBS 到次用户  $k$  的信道 ( $1 \leq k \leq K$ );  $\mathbf{G}_k \in \mathbb{C}^{N \times M}$  是 PBS 到次用户  $k$  的信道 ( $1 \leq k \leq K$ );  $\mathbf{G}_p \in \mathbb{C}^{N \times M}$  为 PBS 到主用户的信道,  $\mathbf{H}_k$ ,  $\mathbf{G}_k$  和  $\mathbf{G}_p$  中的元素是独立同分布的复高斯随机变量, 均值为 0, 方差为 1;  $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  是一个均值为 0 的噪声向量, 其协方差矩阵为  $\mathbf{R}_{\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k} = E[\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^H] = \mathbf{I}_N$ . 而主用户接收到的信号为

$$\mathbf{y}_p = \sqrt{P_p} \mathbf{G}_p \mathbf{s}_p + \mathbf{H}_p \mathbf{x} + \mathbf{n}_p \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{H}_p \in \mathbb{C}^{N \times M}$  是 CBS 到主用户的信道;  $\mathbf{n}_p \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  是一个均值为 0 的噪声向量, 其协方差矩阵为  $\mathbf{R}_{\mathbf{n}_p \mathbf{n}_p} = E[\mathbf{n}_p \mathbf{n}_p^H] = \mathbf{I}_N$ .

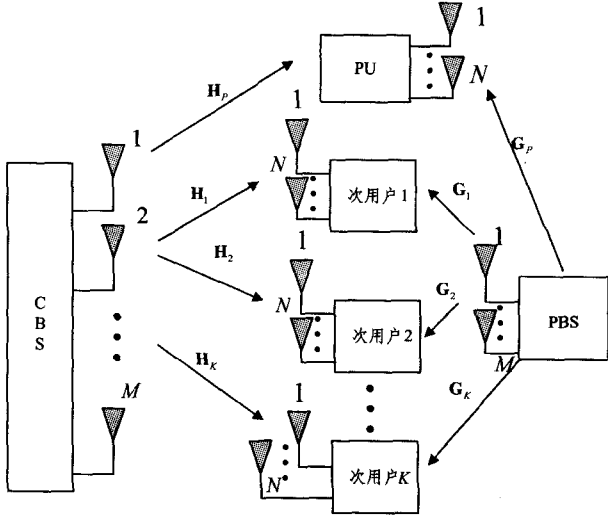


图1 认知多用户场景

采用类似文献[6]异步干扰的模型, 设置一个标准的传输时延  $\tau_k^{(s)}$  和  $\tau_k^{(p)}$ , 即 CBS 发送给用户  $k$  的时延为  $\tau_k^{(s)}$ ; 同样, PBS 信号到用户  $k$  的时延都为  $\tau_k^{(p)}$ . CBS 就需要提前或者延后发送时间  $\Delta\tau_k^{(s)} = \tau_k^{(s)} - \tau_k^{(p)}$  时间量来发送信息(如果  $\Delta\tau_k^{(s)}$  为正数, 则为提前发送; 如果  $\Delta\tau_k^{(s)}$  为负数, 则为延迟发送). 在次用户系统中, 对用户  $k$  和用户  $j$  的延迟调整量差可以表示为  $\tau_{jk}^{(s)} = (\tau_k^{(s)} - \Delta\tau_j^{(s)}) - \tau_k^{(p)} = \Delta\tau_k^{(s)} - \Delta\tau_j^{(s)}$ . 其中  $\tau_{jk}^{(s)}$  也可以理解为: 从 PBS 基站对用户  $j$  的信号(对用户  $j$  来说为干扰)到达用户  $k$  的时间与 PBS 对用户  $k$  干扰信号的时间之间的时间差.

图2描述了异步干扰的产生过程, 其发生在 CBS 发送给用户  $j$  的2个相连续的符号即  $m_{jk}^{(s)}$  和  $m_{jk}^{(s)} + 1$  之间. 由基站 CBS 传输给用户  $j$  的信号而对用户  $k$  所产生的异步干扰, 可以用  $i_{jk}^{(s)}$  来表示, 它可用下式来表示.

$$i_{jk}^{(s)} = \rho(\delta_{jk}^{(s)} - T_s) s_j(m_{jk}^{(s)}) + \rho(\delta_{jk}^{(s)}) s_j(m_{jk}^{(s)} + 1) \quad (4)$$

式中,  $\rho(\tau) = \int_0^{T_s} g(t) g(t - \tau) dt$ ,  $\delta_{jk}^{(s)} = \tau_{jk}^{(s)} \bmod T_s$ ,  $T_s$  为符号周期. 根据文献[6], 有  $E[i_{jk}^{(s)}(m) i_{jk}^{(s)*}(m)] = \beta_{jk}^{(s,p)} \mathbf{I}_{L_j}$ , 其中  $L_j$  表示用户接收的流的数量, 假设  $L_j = N_r$ . 对  $\beta_{jk}^{(s,p)}$  的统计特性可以分以如下几种情况来表示:

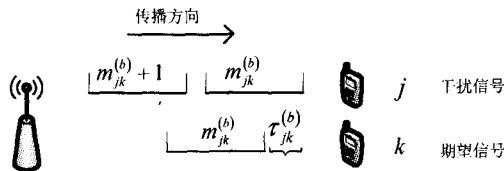


图2 下行链路异步干扰模型框图

当  $j \neq k$  时:

$$\beta_{jk}^{(s,p)} = 0, \text{ 当 } |m_{jk}^{(s)} - m_{jk}^{(s)}| > 1 \quad (5)$$

$$\beta_{jk}^{(s,p)} = \rho(\delta_{jk}^{(s)}) \rho(\delta_{jk}^{(p)} - T_s), \text{ 当 } m_{jk}^{(s)} = m_{jk}^{(s)} + 1 \quad (6)$$

$$\beta_{jk}^{(s,p)} = \rho(\delta_{jk}^{(s)}) \rho(\delta_{jk}^{(p)}) + \rho(\delta_{jk}^{(s)} - T_s) \rho(\delta_{jk}^{(p)} - T_s), \text{ 当 } m_{jk}^{(s)} = m_{jk}^{(s)} \quad (7)$$

$$\beta_{jk}^{(s,p)} = \rho(\delta_{jk}^{(s)}) \rho(\delta_{jk}^{(p)} - T_s), \text{ 当 } m_{jk}^{(s)} = m_{jk}^{(s)} - 1 \quad (8)$$

当  $j = k$  时:

$$\beta_{jk}^{(s,p)} = 1 \quad (9)$$

### 3 基于 MMSE 的预编码方案

根据模型, 可以定义优化函数为

$$\begin{aligned} \min_{\{t_1, \dots, t_K\}} & E_{\mathbf{H}_k \mathbf{G}_k} [\epsilon_k(t_k)] \\ \text{s. t. } & \begin{cases} E[\sum_{k=1}^K \text{Tr}(t_k t_k^H)] \leq P \\ \mathbf{H}_p^H \mathbf{T}^H \mathbf{T} \mathbf{H}_p \leq P_p \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $\epsilon_k(t_k)$  为均方误差的定义式, 即  $\epsilon_k(t_k) = \|\mathbf{s}_k - \sqrt{\beta_k} \mathbf{H}_k \mathbf{x} - \sqrt{P_p} \mathbf{G}_k \mathbf{s}_p - \mathbf{n}_k\|^2$ ,  $P$  为 CBS 发送功率的限制,  $P_p$  为对主用户干扰功率的门限. 而式(10)中的  $E[\sum_{k=1}^K \text{Tr}(t_k t_k^H)] \leq P$  为次用户的基站发送的功率是受限的, 即最大的发送功率不能超过  $P$ ; 而第二个限制条件为对主用户的干扰功率最大不能超过  $P_p$ , 这样从物理层保证了主用户系统的服务质量.

对于式(10)的优化问题, 由于 CBS 是频分双工系统, 因此只能通过有限反馈系统得到 CSI, 并且得到的 CSI 只是量化后的信道状态信息, 故 CBS 只能知道  $\hat{\mathbf{H}}_k$ ,  $\hat{\mathbf{G}}_k$  和  $\hat{\mathbf{G}}_p$ . 为了便于分析, 首先化简  $\epsilon_k(t_k)$  为

$$\begin{aligned} \epsilon_k(t_k) &= \|\mathbf{s}_k - \mathbf{y}_k\|_F^2 \\ &= \|\mathbf{s}_k - \sum_{b=1}^B \mathbf{H}_k^{(b)} \mathbf{T}_k^{(b)} \mathbf{s}_k - \sum_{b=1}^B \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_k^{(b)} \mathbf{T}_j^{(b)} i_{jk}^{(s)} - \mathbf{n}_k\|_F^2 \end{aligned} \quad (11)$$

将式(5)~式(9)代入式(11), 令  $\mathbf{J}_k = \sum_{b=1}^B \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_k^{(b)} \mathbf{T}_j^{(b)} i_{jk}^{(s)}$ ,

从而可以将其化简为以下较为简单的形式, 其中  $\mathbf{J}_k$  就是所说的干扰项, 其对接收信号的判决没有好处的, 故要消除.

$$\epsilon_k(t_k) = E\{\|\mathbf{s}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{s}_k - \mathbf{J}_k - \mathbf{n}_k\|_F^2\} \quad (12)$$

从优化问题的形式可以看出, 最小均方误差的优化是半无限规划(Semi-Infinite Programming, SIP)问题. 由拉格朗日乘法<sup>[4]</sup>优化原则可以构造拉格朗日函数, 得到拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(t_k, \lambda, \eta) &= E_{\mathbf{H}_k \mathbf{G}_k} [\epsilon_k(t_k)] + \lambda(t_k^H t_k - \frac{P}{K}) + \eta(\mathbf{H}_p^H \mathbf{T}^H \mathbf{T} \mathbf{H}_p \\ &\quad - P_p) \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $t_k$  为唯一的变量, 其他的  $\lambda$  和  $\eta$  分别为拉格朗日系数, 故分别对 3 个参数求偏导可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial t_k} &= \beta_k t_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H + P_p t_k^H \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k - \beta_k P_p t_k^H \mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H \\ &\quad - t_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{G}_{kkk} + 2\lambda t_k^H + 2\eta t \mathbf{H}_p = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = t_k^H t_k - \frac{P}{K} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \eta} = t \mathbf{H}_p = 0 \quad (16)$$

将式(15)和式(16)解得到的结果代入式(14), 化简式(14), 可以得到预编码向量的表达式为

$$t_k = \frac{1}{\Omega_k} [\mathbf{D}_k + \lambda_k \mathbf{I}_{N_p, B}]^{-1} \mathbf{H}_k^H \mathbf{A}_k \quad (17)$$

式中,  $\lambda_k$  为拉格朗日因子,  $A_k = H_k B_k$ ,  $D_k =$

$$\begin{bmatrix} D_k^{(1,1)} & D_k^{(1,2)} & \dots & D_k^{(1,B)} \\ D_k^{(2,1)} & D_k^{(2,2)} & \dots & D_k^{(2,B)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_k^{(B,1)} & D_k^{(B,2)} & \dots & D_k^{(B,B)} \end{bmatrix}, \text{其中 } D_k \text{ 里的元素 } D_k^{(b_1, b_2)} \text{ 表}$$

示为

$$D_k^{(b_1, b_2)} = \sum_{j=1}^K \frac{D_k^{(j, \rho)} H_j^{(b_1)H} H_j^{(b_2)}}{\Omega_j} \quad (18)$$

$\Omega_k = E[\text{tr}\{y_k y_k^H\}]$  是接收信号的平均功率。从式(17)可以看出, 预编码的形式与 MMSE 的标准形式相似, 所不同的是, 增加了  $D_k$  这一项, 根据式(18)可以看出, 此项就是异步干扰所造成的项数。故从中可以看出, 在发送端预先将其取逆消除, 达到消除其他干扰的同时, 消除了异步干扰的目的。在后面的仿真中可以看到所提出的方案在次用户系统容量和次用户 BER 方面的改善(主用户系统的干扰受限, 已经保证了主用户系统的容量和次用户 BER 相对于其他方案, 可以达到同样的效果)。

#### 4 仿真结果

假定仿真环境中有多信道, 每 2 个节点之间可以建立无线链接。将用户分为主用户和认知用户, 其中主用户的接入优先级高于认知用户, 且忽略信道干扰。在这种通信环境下, 在信道未被主用户占用时, 认知用户可以接入网络并建立路由链接。通过泊松分布按一定比例随机产生主用户和认知用户, 将它们置于二维平面中进行分析, 为突出研究重点, 假定所有节点皆为静态节点, 无隐藏节点, 信道也无衰减。其中, 认知用户不区分发送端和接收端, 在涉及到干扰的情况下, 仿真中统一将认知用户视为发送端, 即竞争接入网络。因此, 认知用户如果处在主用户发送端的干扰半径内, 那么将会对主用户进行干扰, 而认知用户之间的干扰这里不作进一步讨论。仿真流程主要分为 3 个部分: 参数设置、数据运算和数据处理。其仿真步骤可以归纳为以下 3 步:

(1) 根据所设定的通信环境初始化仿真参数。设定仿真区域的大小、主用户、认知用户的密度、通信负荷、主用户、认知用户的工作范围与干扰范围、是否去除未建立链接的认知用户、侦测信道是否空闲以及认知用户选择何种路由由算法等参数。

(2) 在仿真平台中进行数据仿真, 得到一系列数据, 包括活动节点、周边用户坐标、周边用户数量、主要用户坐标、认知用户坐标等, 将其输出到文本文件中, 同时还可以从仿真结果中得到显示通信状况数据。

(3) 用 Matlab 脚本将步骤(2)得到的数据读入, 画出相应的图形。

本部分主要仿真了所提方案下主用户系统和次用户系统的最大互信息的性能以及次用户系统的误比特性能, 将对比以下 3 种方案的最大互信息和 BER:

1. 采用半正定优化的预编码方案<sup>[4]</sup>, 在图 3—图 5 中记为“半正定优化”;
2. 传统的 BD 预编码方法<sup>[7]</sup>, 在图 3—图 5 中记为“理想 BD”;
3. 基于 MMSE 方法<sup>[8]</sup>, 在图 3—图 5 中记为“理想 MMSE”。

以上 3 种方案均是没有考虑异步干扰消除的。

仿真的场景,  $M=6, N=2, K=3, P=P_p=20\text{dB}$ 。图 3 所示为主用户系统所对应的最大互信息的性能。从图中可以看出, 在总的平均互信息相同的情况下, 与“半正定优化”的方案相比至少有 0.7dB 的增益, 当平均 SNR 在 15~30dB 的条件下, 本方案与“半正定优化”的方案均达到满复用增益, 但本方案要优于“半正定优化”的方案, 与理想 MMSE 方案有 1bps/Hz 的差距。

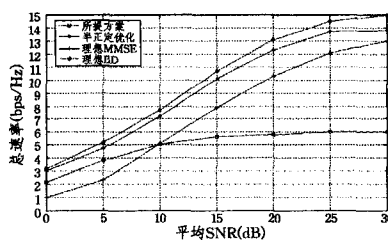


图 3 主用户系统最大互信息

图 4 为次用户系统中 4 种方案的最大互信息性能。从中可以看出, 所提的消除异步干扰的预编码方案有效地提高了次用户系统的传输性能, 远远高于其他 3 种没有考虑异步干扰的方案。

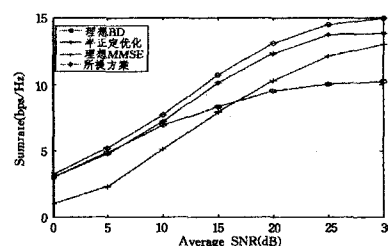


图 4 次用户系统最大互信息

图 5 为 4 种方案的误比特性能的变化曲线。从图中可以看出, 随着平均 SNR 的增加, 半正定优化方案和理想 BD 方案均出现了平顶效应, 而本文所提方案有效克服了平顶效应, 并且得到了较低的误比特性能。

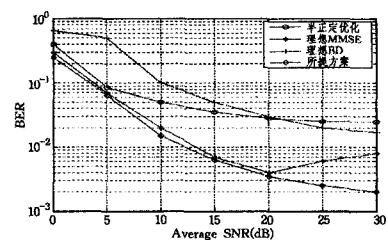


图 5 次用户系统的误比特性能

**结束语** 本文研究了在多用户多天线认知无线电系统中考虑异步干扰的预编码方案, 提出了一种基于 MMSE 的预编码方法。此算法在消除传统的多用户干扰和对主用户的干扰的同时, 考虑了主用户对次用户的异步干扰和异步多用户干扰, 有效提高了次用户系统和主用户的最大互信息, 并且提高了次用户系统传输的可靠性。

#### 参考文献

[1] Zhang Y, Lee C, Niyato D, et al. Auction Approaches for Resource Allocation in Wireless Systems; A Survey [J]. IEEE Auction Approaches for Resource Allocation in Wireless Systems; A Survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 99(99):1-22

(下转第 112 页)

析协商策略的基础上,能够在属性集合中找到最小非自由属性性子集。

## 参 考 文 献

- [1] Santos N, Krishna P. Towards Trusted Cloud Computing[A]// HotCloud'09 Proceedings of the 2009 conference on Hot topics in cloud computing, 2009[C]. CA, USA: USENIX, 2009: 22
- [2] Armbrust, Michael, Fox, et al. A view of cloud computing[J]. Communication of the ACM, 2010(4): 50-58
- [3] Trusted Computing Group. Trusted Computing Platform Alliance main specification version 1. 1b [EB/OL]. <http://www.Trustedcomputinggroup.org>, 2011-11
- [4] Trusted Computing Group. Trusted Computing Platform Alliance main specification version 1. 2 [EB/OL]. <http://www.Trustedcomputinggroup.org>, 2012-08
- [5] Brickell E, Chen Li-qun, Li Jiang-tao. A New Direct Anonymous Attestation Scheme from Bilinear Maps[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008(4968/2008): 166-178
- [6] Chen Li-qun. A DAA scheme requiring less TPM resources[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011(6151): 350-365
- [7] 周彦伟, 吴振强, 蒋李. 分布式网络环境下的跨域匿名认证机制[J]. 计算机应用, 2010(08): 2120-2124
- [8] Haldar V, Chandra D, Franz M. Semantic Remote Attestation-A Virtual Machine directed approach to Trusted Computing[A]// USENIX Virtual Machine Research and Technology Symposium [C]. 2004
- [9] Chen Li-qun, Löhr H, Manulis M. Property-Based Attestation without a Trusted Third Party[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008(5222): 31-46
- [10] 刘吉强, 赵佳, 赵勇. 可信计算中远程自动匿名证明的研究[J]. 计算机学报, 2009(7): 1304-1310
- [11] Bender A, Katz J, Morselli R. Ring Signatures; Stronger Definitions, and Constructions without Random Oracles[J]. Journal of Cryptology, 2009(1): 114-138
- [12] Zou De-qing, Du Shang-xin, Zheng Wei-de, et al. Building Automated Trust Negotiation architecture in virtual computing environment[J]. Journal of Supercomputing, 2011(1): 69-85
- [13] 陈小峰, 冯登国. 一种多信任域内的直接匿名证明方案[J]. 计算机学报, 2008(07): 1122-1128
- [14] Brickell E, Chen L, Li J. A New Direct Anonymous Attestation Scheme from Bilinear Maps[C]// LNCS 4968. Springer-Verlag, 2008: 166-178

(上接第 73 页)

## 参 考 文 献

- [1] Xiong Li, Liu Ling. PeerTrust: supporting reputation-based trust for Peer-to-Peer electronic communities [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2004, 6(7): 843-857
- [2] Kamvar S, Scholsser M, Garcia-Molina H. The EigenTrust algorithm for reputation management in P2P networks [A]// Proc. 12th Int'l World Wide Web Conf [C]. New York: ACM Press, 2003: 640-651
- [3] Kamvar S D, Schlosser M T. EigenRep: Reputation management in P2P networks [C]// Lawrence S, ed. Proc. of the 12th Int'l World Wide Web Conf. Budapest: ACM Press; 123-134
- [4] Colorni A, Drigo M, Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies [C]// Proc of the 1st European Conf Artificial Life. 1991: 134-142
- [5] Colorni A, Drigo M, Maniezzo V. An Investigation of some Properties of an Ant Algorithm [C]// Proc of PPSN '92. 1992: 509-520
- [6] 寒文, 王怀民, 贾焰, 等. 构造基于推荐的 Peer-to-Peer 环境下的 Trust 模型[J]. 软件学报, 2004, 15(4): 571-583
- [7] 李俊青, 潘全科, 王文宏, 等. 蚁群优化在 P2P 网络防范 DDoS 攻击中的应用研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 339-341
- [8] 于真, 郑少峰, 王少杰, 等. P2P 信任模型研究[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(9): 1715-1719
- [9] 李绍滋, 王挺, 周昌乐. 基于蚁群算法的非结构化 P2P 信息检索[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(8): 99-103, 139
- [10] 余智华. Peer-to-Peer 信任模型中的恶意行为分析[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(13): 18-21
- [11] 王新生, 李学, 贾冬艳. 基于蚁群算法的非结构化 P2P 资源搜索机制[J]. 计算机工程, 2009, 35(7): 189-190, 194

(上接第 79 页)

- [2] Vaze C S, Varanasi M K. The Degree-of-Freedom Regions of MIMO Broadcast, Interference, and Cognitive Radio Channels With No CSIT [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(8): 5354-5374
- [3] Nosrat-Makouei B, Andrews J G, Heath R W. User Arrival in MIMO Interference Alignment Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(2): 842-851
- [4] Gui Xin, Kang Gui-xia, Zhang Ping. Linear Precoding Design in Multi-User Cognitive MIMO Systems with Cooperative Feedback [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1580-1583
- [5] Xie Xian-zhong, Zheng Pin-lian, Gang Qu. Delay-Tolerance SLNR Precoding to Mitigate Inter-cell Asynchronous Interference [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2010, 28(1): 1-7
- [6] Zhang Hong-yuan, Mehta N B, Molisch A F. Asynchronous Interference Mitigation in Cooperative Base Station Systems [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions, 2008, 7(1): 155-165
- [7] Lee K-J, Lee I. MMSE Based Block Diagonalization for Cognitive Radio MIMO Broadcast Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3139-3144
- [8] Park H, Park S-H, Lee I. Weighted Sum MSE Minimization under per-BS Power Constraint for Network MIMO Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 16(3): 360-363
- [9] 胡智伦, 何世彪, 张新春, 等. 认知无线电中基于干扰温度的信道容量及中断概率[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24(6): 83-88