

有缓冲的认知无线电系统的接入控制算法

张国斌^{1,2} 李明² 赵晓芳²

(华南理工大学电子与信息学院 广州 510640)¹ (东莞理工学院电子工程学院 东莞 523808)²

摘要 采用连续时间马尔科夫链对有缓冲机制的认知系统进行建模和分析,针对过多的认知用户接入会导致业务中断的特点,设计算法控制认知用户的接入概率,在满足用户中断概率限制的前提下最大化系统容量。仿真结果表明,在使用该算法的系统中,用户的接入概率与系统吞吐量随中断概率限制的增大而增大,中断概率限制下的最大接入概率即为最大化系统容量的接入概率,用户中断概率限制的满足是以牺牲系统吞吐量为代价的。同时,引入缓冲机制能够提高用户的接入概率和系统容量。

关键词 认知无线电,缓冲机制,接入控制,马尔科夫链,中断概率

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A

Access Control Algorithm with Buffering in Cognitive Radio System

ZHANG Guo-bin^{1,2} LI Ming² ZHAO Xiao-fang²

(School of Electronic and Information, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)¹

(School of Electronic and Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)²

Abstract We built and analyzed the model of the cognitive radio system with buffering by continuous time Markov. Aimed at the character that the access of overmany users will result in the forced termination of the service, we designed an algorithm to control access probability of the cognitive users, which maximizes system throughput in the precondition of satisfying the forced termination limitation. The simulation result shows that, in the system using the algorithm, the user access probability and system throughput increase with the forced termination limitation. Also the largest access probability under the forced termination limitation is the access probability which can maximize the system throughput. The system satisfies the forced termination limitation at the sacrifice of throughput. At the same time, the simulation indicates that the introduction of buffering can improve the user access probability and the system throughput performance.

Keywords Cognitive radio, Buffering, Access control, Markov chain, Forced termination probability

1 引言

随着无线用户数量及其对无线通信业务需求的迅速增长,可用频谱资源越来越稀缺。近年来,认知无线电(Cognitive Radio, CR)作为一种能够对频谱资源进行有效利用的频谱共享技术,受到了人们的广泛关注^[1,2]。它能够感知外部的频谱环境,寻找频谱空穴进行通信。

在认知无线电系统中,认知用户择机使用授权系统的空闲频谱。为了不影响授权用户的通信,当授权用户出现时,认知用户必须退出正在使用的频谱,选择其它的空闲频谱进行通信。如果有过多的认知用户接入系统,会使得认知用户在退出正在使用的频谱后无法寻找到新的频谱,从而引起通信的中断,因而对于实时业务而言,控制认知用户的接入概率、保证已接入的认知用户通信的连续性是认知系统需要解决的关键问题。文献[3-7]对认知系统的动态频谱接入进行了研究。文献[3]采用连续时间马尔科夫链建立了认知节点的动

态接入模型,并设计了基于公平准则的接入控制算法,但只是对单个信道的接入进行了分析,场景过于简单。文献[4]提出一种带有缓冲机制的认知无线电系统模型,并采用马尔科夫链对多信道认知无线电系统的中断概率、阻塞概率、等待时间等进行了分析,但并未对用户的动态接入控制进行深入研究。文献[5]对两组认知用户同时接入认知系统的场景进行建模,并对两组用户的中断概率、阻塞概率等进行了分析,同时基于公平原则讨论了两组用户的最大接入数目,但并未结合认知用户的业务流分布研究用户的接入概率控制。

本文采用连续时间马尔科夫链对有缓冲机制的认知系统进行建模和分析,针对授权用户的出现可能带来认知用户业务中断的特点,设计认知用户的接入概率控制算法,在认知用户中断概率限制下最大化系统容量。本文对 3 个业务信道、1 个缓冲信道的场景进行仿真,结果表明,采用本文算法进行接入控制后,用户的接入概率与系统吞吐量随中断概率限制的增大而增大,中断概率限制下的最大接入概率即为最大化系

到稿日期:2011-04-19 返修日期:2011-07-10 本文受东莞市高等院校科研机构科技计划项目(2011108102030)资助。

张国斌(1980-),女,博士,工程师,主要研究方向为宽带无线通信系统的信号处理与应用;李明(1971-),男,硕士,副教授,主要研究方向为无线通信网络、计算机网络;赵晓芳(1982-),女,博士,主要研究方向为图像处理、模式识别等。

统容量的接入概率,用户中断概率限制的满足是以牺牲系统吞吐量为代价的。同时,结果表明,引入缓冲机制能够提高用户的接入概率和系统容量。

2 系统模型

2.1 系统和业务流描述

为提高用户的 QoS 性能,将缓冲机制引入认知无线电接入系统。缓冲机制是一种信道预留机制,能够为新到来和暂时中断的认知用户预留信道,从而降低系统的阻塞概率和中断概率。能够进行通信的信道称为业务信道,缓冲区的信道称为缓冲信道。当系统的业务信道都被授权用户和认知用户占用时,如果有新的认知用户到来,且缓冲区有空闲信道,系统会将用户接入缓冲信道,等到有业务信道空闲后,再将用户接入业务信道中。如果正在通信的认知用户由于授权用户的到来需要退出正在使用的信道,而系统没有空闲的业务信道能够接入,若缓冲区有空闲信道,系统会将用户转移到缓冲区,当有空闲的业务信道时,再将用户接入业务信道。缓冲区的用户按照先进先出(FIFO)的原则放入业务信道进行通信。假设授权系统共有 N 个业务信道、 M 个缓冲信道,授权系统有 N 个授权用户,每个授权用户占用一个信道进行通信。授权用户的出现服从参数为 λ_p 的泊松过程,接入持续时间服从参数为 μ_p 的负指数分布。认知系统共有 N 个用户,每个认知用户在通信过程中只需要一个信道,认知用户在接入概率控制下使用授权系统的空闲信道进行通信,多个认知用户不能同时接入同一个信道。认知用户的出现服从参数为 λ_s 的泊松过程,接入持续时间服从参数为 μ_s 的负指数分布,认知用户的接入概率用 α_s 表示。

2.2 马尔科夫模型

采用连续时间马尔科夫链对认知系统和授权系统的状态进行分析,如图 1 所示。 i 代表系统中接入的授权用户的数目, j 代表接入的认知用户的数目, m 表示缓冲区认知用户的数目。定义系统的状态空间为 $\Omega, \Omega = \{(i, j, m) | i \geq 0, j \geq 0, i + j \leq N, 0 \leq m \leq M\}$ 。

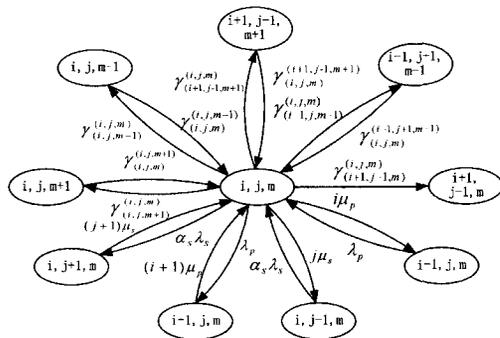


图 1 系统马尔科夫状态转移图

图 1 标注了各状态间的转移率,其中

$$\gamma_{(i, j, m+1)}^{(i, j, m)} = \begin{cases} j\mu_s, & i+j=N, i>0, j>0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

$$\gamma_{(i, j, m)}^{(i, j, m+1)} = \begin{cases} \alpha_s \lambda_s, & i+j=N, 0 < m < M \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma_{(i+1, j-1, m)}^{(i, j, m)} = \begin{cases} \lambda_p, & i+j=N, j \geq 0, m=M \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$\gamma_{(i+1, j-1, m+1)}^{(i, j, m)} = \begin{cases} \lambda_p, & i+j=N, m < M \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$\gamma_{(i, j, m)}^{(i+1, j-1, m+1)} = \begin{cases} (i+1)\mu_p, & i+j=N \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

$$\gamma_{(i-1, j+1, m-1)}^{(i, j, m)} = \begin{cases} i\mu_p, & i+j=N, i>0, m>0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

$$\gamma_{(i, j, m)}^{(i-1, j+1, m-1)} = \begin{cases} \lambda_p, & i+j=N, m>0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

$$\gamma_{(i, j, m-1)}^{(i, j, m)} = \begin{cases} j\mu_s, & i+j=N, j>0, m>0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

$$\gamma_{(i, j, m)}^{(i, j, m-1)} = \begin{cases} \alpha_s \lambda_s, & i+j=N, 0 < m < M \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

图 1 示出了状态空间中所有可能发生的状态转移,对于具体的状态 (i, j, m) ,只有部分转移会发生。

定义系统状态的指示变量 $I(i, j, m)$ 为

$$I(i, j, m) = \begin{cases} 1, & i \geq 0, j \geq 0, i+j \leq N, 0 \leq m \leq M \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

用 $\pi_{(i, j, m)}$ 表示系统处于 (i, j, m) 状态的概率,由图 1 可以得出系统的状态转移方程为

$$\begin{aligned} & (\gamma_{(i+1, j-1, m)}^{(i, j, m)} I(i+1, j-1, m) + \gamma_{(i+1, j-1, m+1)}^{(i, j, m)} I(i+1, j-1, m+1) + \gamma_{(i-1, j+1, m-1)}^{(i, j, m)} I(i-1, j+1, m-1) + \gamma_{(i-1, j+1, m)}^{(i, j, m)} I(i-1, j+1, m) + i\mu_p I(i-1, j, m) + j\mu_s I(i, j-1, m) + \lambda_p I(i+1, j, m) + \alpha_s \lambda_s I(i, j+1, m)) \pi_{(i, j, m)} I(i, j, m) \\ & = \gamma_{(i, j, m+1)}^{(i, j, m)} \pi_{(i, j, m+1)} I(i, j, m+1) + \gamma_{(i+1, j-1, m+1)}^{(i, j, m)} \pi_{(i+1, j-1, m+1)} I(i+1, j-1, m+1) + \gamma_{(i-1, j+1, m-1)}^{(i, j, m)} \pi_{(i-1, j+1, m-1)} I(i-1, j+1, m-1) + \lambda_p \pi_{(i-1, j, m)} I(i-1, j, m) + \alpha_s \lambda_s \pi_{(i, j-1, m)} I(i, j-1, m) + (i+1)\mu_p \pi_{(i+1, j, m)} I(i+1, j, m) + (j+1)\mu_s \pi_{(i, j+1, m)} I(i, j+1, m) + \gamma_{(i, j, m-1)}^{(i, j, m)} \pi_{(i, j, m-1)} I(i, j, m-1) \end{aligned} \quad (11)$$

其中系统的稳态概率满足

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{m=0}^M \pi_{(i, j, m)} = 1 \quad (12)$$

2.3 系统分析

系统容量与用户的阻塞概率和中断概率相关,本文从阻塞概率和中断概率的角度分析和描述系统容量。

A. 阻塞概率

当系统的业务信道都被占用,缓冲区处于饱和状态,也就是系统状态 (i, j, m) 满足 $i+j=N, m=M$ 的时候,如果有认知用户到来,那么该用户就无法被接入业务信道,也无法放入缓冲区缓存,该用户的连接就被阻塞。因而认知系统的阻塞概率可以用式(13)描述^[4]。

$$P_B = \sum_{i+j=N, m=M} \pi_{(i, j, m)} \quad (13)$$

B. 中断概率

当认知用户接入后,如果系统的业务信道和缓冲区信道都处于占用状态,那么如果有授权用户到来,认知用户就必须退出正在使用的频谱,若没有新的空闲频谱使用,认知用户的通信就会中断。用 P_{int} 表示有认知用户连接时系统处于信道都被占用状态的概率。

$$P_{int} = \frac{\sum_{i \geq 0, i+j=N, m=M} \pi_{(i, j, m)}}{\sum_{j > 0, i+j \leq N} \pi_{(i, j, m)}} \quad (14)$$

对于处于连接状态的认知用户来说,下一个事件是连接过程的完成或者授权用户的到来引起连接的中断,因而认知用户在连接过程中的中断概率 P_F 可由式(15)计算^[4]。

$$P_F = \frac{\lambda_p P_{int}}{\mu_s + \lambda_p P_{int}} \quad (15)$$

C. 系统容量

假定每一个用户在连接过程中都有 1kbps 的数据速率,那么认知系统的容量 R_s 可以用单位时间内能够成功完成的连接数目与每个成功连接的平均持续时间的乘积来表示^[6], R_s 可由式(16)计算得到。

$$R_s = (1 - P_B)(1 - P_F)\alpha_s\lambda_s\left(\frac{\mu_s}{1 - P_F}\right)^{-1} = (1 - P_F)^2\theta_s \quad (16)$$

其中

$$\theta_s = \frac{\alpha_s\lambda_s}{\mu_s} \quad (17)$$

3 最优化问题描述

为满足认知用户通信的 QoS 需求,用户的中断概率需要限制在一定数值之下。本文对认知用户的接入概率进行控制,在满足用户通信中断概率要求的前提下,最大化系统容量。本文的最优化问题表示为

$$\begin{aligned} \max_{\alpha_s} R_s, \text{ 即 } \max_{\alpha_s} (1 - P_F)^2\theta_s \\ \text{s. t. } P_F \geq P_0 \\ 0 \leq \alpha_s \leq 1 \end{aligned} \quad (18)$$

式中, P_0 为最大中断概率限制, R_s 由式(16)得到, P_F 由式(15)求得。

4 求解方法

可以采用对偶优化法求解最优化问题(18)^[8,9], 解决思路如下: 1) 定义对偶问题解除中断概率限制约束, 将有约束优化转化为无约束优化; 2) 采用梯度迭代法对对偶问题进行求解^[10-12]。

首先定义对偶问题。定义对偶变量为 ω , 式(18)对应的拉格朗日对偶函数为

$$L(\alpha_s, \omega) = R_s - \omega(P_F - P_0) \quad (19)$$

对偶问题的目标函数为

$$D(\omega) = \max_{\alpha_s} L(\alpha_s, \omega) \quad (20)$$

对偶问题为

$$\min_{\omega} D(\omega) \quad (21)$$

然后采用梯度迭代法求解对偶问题, 具体步骤如下。

(1) 初始化

$$t=0, \omega(0)=0, \alpha_s(0)=0$$

(2) 按照式(22)、式(23)更新对偶变量

$$\omega(t+1) = [\omega(t) + l_\omega \frac{\partial D}{\partial \omega}(t)]^+ \quad (22)$$

式中, l_ω 为常数步长, $[X]^+$ 表示 $\max\{X, 0\}$,

$$\frac{\partial D}{\partial \omega}(t) = -(P_F(t) - P_0) \quad (23)$$

将 $\alpha_s(t)$ 代入式(15)得到式(23)中的 $P_F(t)$ 。

(3) 按照式(24)、式(25)更新原始变量

$$\alpha_s(t+1) = [\alpha_s(t) + l_\alpha \frac{\partial L}{\partial \alpha_s}(t)]_0^1 \quad (24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_s}(t) = -2(1 - P_F(t))\theta_s(t) \frac{\partial P_F}{\partial \alpha_s}(t) + \frac{\lambda_s}{\mu_s}(1 - P_F(t))^2 -$$

$$\omega(t) \frac{\partial P_F}{\partial \alpha_s}(t) \quad (25)$$

式中, l_α 为步长, $[X]_0^1$ 表示 $\min\{b, \max\{X, a\}\}$, 将 $\alpha_s(t)$ 代入

$\frac{\partial P_F}{\partial \alpha_s}$, 得到 $\frac{\partial P_F}{\partial \alpha_s}(t)$ 。

(4) 按照(2)、(3)过程进行迭代, 直到算法收敛, 收敛的条件为 $\alpha_s(t+1) - \alpha_s(t) \leq \epsilon$ 。

5 仿真

本文对所提算法进行了仿真, 使用 MATLAB 搭建了基于 CR 系统的仿真平台。为了说明缓冲机制带来的系统增益, 本文同时搭建了有缓冲机制和无缓冲机制的两种系统。有缓冲机制的系统包含 3 个业务信道、1 个缓冲信道, 无缓冲机制的系统仅包含 3 个业务信道, 两种系统均有 3 个授权用户和 3 个认知用户共享信道, 每个用户在通信时占用 1 个信道。授权用户的接入时间参数 $\mu_p = 10s^{-1}$, 认知用户的到达率 $\lambda_s = 5s^{-1}$, 接入时间参数 $\mu_s = 5s^{-1}$ 。

首先分析接入概率与系统吞吐量随用户中断概率限制 P_0 的变化趋势, 授权用户的到达率 λ_p 取 $10s^{-1}$ 。图 2 表示接入概率随 P_0 的变化, 可以看出, 在 P_0 小于一定值的时候, 接入概率随 P_0 的增大而增大, 当 P_0 增大到允许用户的接入概率为 1 后, 接入概率的取值一直为 1。图 3 示出了系统吞吐量随 P_0 的变化, 可以看出, 在 P_0 小于一定值的时候, 吞吐量随 P_0 的增大而增大, 当 P_0 增大到允许用户的接入概率为 1 后, 接入概率的取值一直为 1, 因而吞吐量保持不变。图 2 和图 3 说明, 当接入概率增大为 1 后吞吐量达到最大, 因此中断概率限制下的最大接入概率即为最大化系统容量的接入概率。同时说明, 在中断概率限制较小的情况下, 系统为满足用户的中断概率限制会控制用户的接入概率, 从而使得系统的吞吐量下降, 因此用户中断概率限制的满足是以牺牲系统吞吐量为代价的。图 2 和图 3 分别将有缓冲机制与无缓冲机制的系统的接入概率和吞吐量进行了对比, 可以看出, 引入缓冲机制后, 用户的接入概率和系统吞吐量得到了提高。

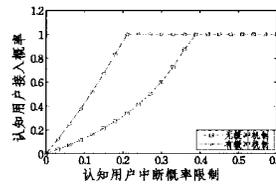


图 2 接入概率随中断概率限制的变化

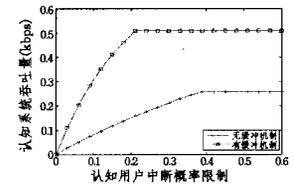


图 3 吞吐量随中断概率限制的变化

接下来分析用户中断概率限制取 0.05 时授权用户到达率 λ_p 对接入概率和系统吞吐量的影响。从图 4 和图 5 可以看出, 授权用户的到达率越高, 系统的信道对于认知系统的可用时长越小, 认知用户在中断概率限制下的接入概率越低, 认知系统的吞吐量越小。图 4 和图 5 也将有缓冲机制的系统性能与无缓冲机制的系统性能进行了对比, 再次验证了引入缓冲机制能够带来接入概率和吞吐量的增益。

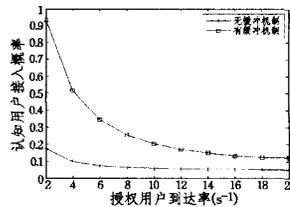


图 4 接入概率随授权用户到达率的变化

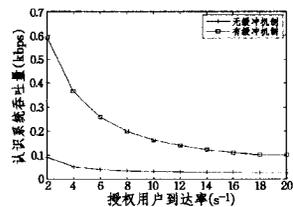


图 5 吞吐量随授权用户到达率的变化

结束语 在认知无线电系统中, 由于授权用户业务的优先级高于认知用户, 因此授权用户的出现可能带来认知用户

业务的中断。为保证认知用户的 QoS 需求,需要将用户的中断概率限制在满足需求的最大中断概率之下。本文采用连续时间马尔科夫链对有缓冲机制的认知系统进行建模和分析,设计算法控制认知用户的接入概率,在满足认知用户中断概率要求的前提下最大化系统容量。仿真结果表明,采用该算法进行接入控制的认知系统中,用户的接入概率与系统吞吐量随中断概率限制的增大而增大,用户中断概率限制的满足是以牺牲系统吞吐量为代价的。同时,引入缓冲机制能够带来用户接入概率与系统吞吐量的提升。

参考文献

- [1] Mitola J III. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio [D]. Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), May 2000
- [2] FCC Report and Order, Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies[R]. FCC-05-57A1. USA: FCC, 2005
- [3] Wang Bei-bei, Zhu Ji, Liu K J R. Primary-prioritized Markov Approach for Dynamic Spectrum Access, New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks [C] // DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium. April 2007; 507-515
- [4] Hong C P T, Lee Y, Koo I. Spectrum sharing with buffering in cognitive radio networks [C] // 2010 Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems. Mar. 2010; 261-270
- [5] Ahmed W, Gao J, Faulkner M. Channel allocation for fairness in

opportunistic spectrum access networks [C] // 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Apr. 2010

- [6] Ahmed W, Gao J, Zhou Hong, et al. Throughput and proportional fairness in cognitive radio networks [C] // 2009 International Conference on Advanced Technologies for Communications. Oct. 2009; 248-252
- [7] Hu Han, Zhu Qi. Dynamic spectrum access in underlay cognitive radio system with SINR constraints [C] // 2009 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Sep. 2009
- [8] Bansal G, Hossain J, Bhargava V K. Adaptive power loading for OFDM-based cognitive radio systems [C] // Proc. IEEE International Communication conference. Glasgow, Scotland, June 2007; 5137-5142
- [9] Wang P, Zhong X, Xiao L, et al. A general power allocation algorithm in OFDM-based cognitive radio systems [C] // Proc IEEE ICC 2009. Dresden, Germany, 2009; 1-5
- [10] Zhang Lan, Xin Yan, Liang Ying-chang. Optimal power allocation for multiple access channels in cognitive radio networks [C] // VTC Spring'2008. 2008; 1549-1553
- [11] Lu Qian-xi, Peng Tao, Wang Wei, et al. Utility-based Resource Allocation in Uplink of OFDMA-based Cognitive Radio Networks [J]. Wiley International Journal of Communication Systems (IJCS), 2010, 23(2): 252-274
- [12] 李红岩, 贺志强, 牛凯, 等. 感知无线网络中最优的分布式功率分配 [J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(5): 112-116

(上接第 46 页)

结束语 从本质上讲,当前 P2P 系统的核心任务在于传输更多的数据,满足更多用户的数据服务请求。但有两种因素影响系统的吞吐量:搜索成功率和可用带宽。如果搜索失败,请求和服务匹配失败,数据传输功能就无法启动;如果节点可用带宽受限制,即便搜索成功率很高,仍然无法实现高吞吐量的目标。因此,我们的问题在于,如何在保证节点可用带宽的前提下提高搜索成功率。

一个节点对搜索成功率的贡献受两个条件约束:一是节点收到的查询消息数量,二是存储数据能够命中查询的概率(节点权重)。本文的基础实验结果表明,一个节点收到的查询消息数量与其节点连接度基本成正比。因此我们可以基于节点权重调整覆盖网络结构,以很小的代价达到控制搜索成功率的效果。基于此,本文提出了一种覆盖网络自适应调整算法。算法在节点传输负载较小时,增加高权重节点连接数目,提高搜索成功率;在节点可用带宽较小时,减少高权重节点连接数目,充分利用低权重节点带宽(即便降低搜索成功率),从而提高系统吞吐量。本文模拟实验也表明,BAAT 策略在提高系统吞吐量方面是有效的。

参考文献

- [1] Stoica I, Morris R, Karger D, et al. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications [C] // Proc. of ACM SIGCOMM'01. San Diego, Sep. 2001
- [2] Sylvia R, Paul F, Mark H, et al. A scalable content-addressable network [C] // Proc. of Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. 2001; 161-172

- [3] Pandurangan G, Raghavan P, Upfal E. Building low-diameter peer-to-peer networks [J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 21: 995-1002
- [4] Pyun Y J, Reeves D S. Constructing a balanced, $(\log(n)/\log\log(n))$ -diameter super-peer topology for scalable P2P systems [C] // Proc. IEEE P2P Computing. 2004
- [5] Wouhaybi R H, Campbell A T, Phenix. Supporting resilient low-diameter peer-to-peer topologies [C] // Proc. of IEEE INFOCOM. 2004
- [6] Cooper B F. An optimal overlay topology for routing peer-to-peer searches [C] // Proc. of Middleware. 2005
- [7] Feng G, Zhang J, Jiang Y, et al. Optimization of Overlay Topology for Unstructured Peer-to-Peer [J]. Journal of Software, 2007, 18(11)
- [8] Kin-Wah K, Tsang D H K. Building heterogeneous peer-to-peer networks; protocol and analysis [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 16(2): 281-292
- [9] Kin-Wah K, Tsang D H K. Application-aware Topology Formation Algorithm for Peer-to-Peer Networks [C] // Proc. of IEEE International Conference on Communications. 2007; 73-79
- [10] Kin-Wah K, Tsang D H K. On the relationship of node capacity distribution and P2P topology formation [C] // Proc. of High Performance Switching and Routing. 2005; 123-127
- [11] Gkantsidis C, Mihail M, Saberi A. Random walks in peer-to-peer networks [C] // Proc. of INFOCOM'04. 2004
- [12] Lee S-J, Banerjee S, Sharma P, et al. Bandwidth-Aware Routing in Overlay Networks [C] // Proc. of 27th Conference on Computer Communications. INFOCOM, 2008; 1732-1740
- [13] Waxman B. Routing of Multipoint Connections [J]. IEEE J. Select. Areas Communications, 1988, SAC-6(9): 1617-1622