

认知无线中继网络最小化中断概率功率分配算法

朱春花¹, 周豫苹¹, 陈宝兴¹, 朱 权²

(1. 闽南师范大学 计算机学院, 福建 漳州 363000; 2. 厦门大学 计算机科学系, 福建 厦门 361005)

摘 要: 为提升认知无线中继网络的中断性能, 通过分析系统中断概率及用户功率分配情况, 提出一种最小化中断概率的功率分配算法。给出在主用户干扰约束和总功率约束条件下最小化中断概率的数学优化方程组, 根据用户的最大发射功率与干扰电平阈值的受限关系, 分别考虑分配功率不超过干扰电平阈值、中继节点功率受限于干扰电平阈值以及所有节点受限于干扰电平阈值这 3 种情况, 对应提出 3 种最佳功率分配方案, 并基于 KKT 条件求解最优值。实验结果表明, 该功率分配算法与基于频谱共享以及基于机会主义中继选择的中断概率分析方法相比, 性能增益提升显著, 并且在总功率、干扰电平变化的条件下, 所采用的功率分配方案提升系统中断性能效果较好。
关键词: 认知无线中继网络; 最小化中断概率; 功率分配; 干扰电平阈值; KKT 条件

中文引用格式: 朱春花, 周豫苹, 陈宝兴, 等. 认知无线中继网络最小化中断概率功率分配算法 [J]. 计算机工程, 2017, 43(7): 119-123.

英文引用格式: Zhu Chunhua, Zhou Yuping, Chen Baoxing, et al. Power Allocation Algorithm Minimizing Outage Probability in Cognitive Radio Relay Network [J]. Computer Engineering, 2017, 43(7): 119-123.

Power Allocation Algorithm Minimizing Outage Probability in Cognitive Radio Relay Network

ZHU Chunhua¹, ZHOU Yuping¹, CHEN Baoxing¹, ZHU Quan²

(1. School of Computer Science and Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China;
2. Department of Computer Science, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

【Abstract】 To improve the outage performance of cognitive radio relay network, this paper proposes a power allocation algorithm minimizing outage probability by analyzing the system outage probability and user power allocation conditions. It presents the mathematical optimization equations minimizing outage probability of under master user interference constraint and total power constraint. Then, according to the relationship between the user's maximum transmit power and interference level threshold, it proposes three optimal power allocation schemes respectively to deal with three types of cases, including the distribution of power not exceeding the interference level threshold, the relay node power limited by the interference level threshold, and all nodes limited by the interference level threshold. Finally, the optimal value is solved based on Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions. Experimental results show that compared with similar power allocation methods, the proposed algorithm has obvious performance gain promotion. And the effectiveness of the adopted power allocation schemes is proved the most effective in enhancing the system outage performance when the total power or the interference level is changing.

【Key words】 cognitive radio relay network; minimizing outage probability; power distribution; interference level threshold; Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.07.019

0 概述

随着无线通信网络的快速发展, 与无线服务相

关的频谱资源需求量也在不断增长, 然而, 由于频谱资源有限, 且目前的静态频谱分配方法使得频谱利用率降低^[1-2], 因此如何高效利用频谱资源成为无线

基金项目: 国家自然科学基金(61402216); 闽南师范大学教学研究基金(JG201507)。

作者简介: 朱春花(1984—), 女, 工程师、硕士, 主研方向为计算机通信网络、信息安全、机器学习、图像处理; 周豫苹, 副教授、博士; 陈宝兴, 教授、博士; 朱 权, 硕士研究生。

收稿日期: 2016-04-13 修回日期: 2016-07-17 E-mail: huimin005@163.com

通信网络领域的重要问题。实际的测量数据表明,大多数许可的频谱并没有得到充分利用,接近 90% 的授权频谱处于空闲状态。为此,一种能够提高频谱资源利用率的认知无线电技术在通信领域受到了关注^[3]。该技术允许非授权用户,简称次用户,在保证主用户的服务质量条件下使用许可频段^[4]。引入认知无线电技术的认知中继网络同时具备了认知无线电技术和中继技术的优点,可以在高效使用频谱资源的同时提高信道传输质量。

中断概率是评估认知中继网络系统性能的重要指标,在认知无线网络领域,这方面已取得了一定的成果,其中,在主用户所受干扰功率的限制条件下,求解次用户网络中断概率是认知中继网络的热点研究问题。文献[5]采用一种“选择-最优中继译码转发”模式求解共存式频谱共享认知中继网络的中断概率问题,得到了中断概率的表达式和近似解,但对干扰电平限制条件下的次用户功率分配问题并没有做出具体分析。文献[6]提出一种非完全信道下认知中继网络中断概率及功率分配方法,在主用户干扰约束和保证认知用户服务质量的条件下最大化认知中继网络频谱效率的数学优化模型,该功率分配方法在一定程度上提升了系统的性能增益。但缺乏对系统总功率及干扰功率阈值的分析。文献[7]提出一种组播认知中继网络频谱共享的中断概率分析方法,该方法采用单次解码-转发的中继方法得到频谱共享组播认知中继网络的二次中继概率,并在高信噪比的条件下采用了一种渐进式方程,该方法可以提高中继网络的中断性能。文献[8]提出一种基于机会主义中继选择的认知双向中继网络中断分析方法,该文定义了一个新的系统中断概率并分析了主用户的发射功率,由此得到了次用户网络系统与主用户网络系统间的干扰功率方程。

在本文提出的认知无线中继系统中,由于主用户所能承受的最大干扰电平有限,因此认知中继网络存在最大干扰电平阈值及有限的总功率,为了提高系统的中断性能,本文根据总功率及干扰电平的受限情况分别提出了 3 种最佳的用户功率分配方案,从而在总功率及干扰电平阈值变化条件下实现最小中断概率的求解。

1 认知中继系统模型

如图 1 的系统模型所示,认知无线网络由主用户 PU 网络和次用户 SU 网络组成^[9-10],在次用户网络中, SU_1 , SU_2 通过认知中继节点互相通信。所有节点都是同步的,采用单天线并且以半双工方式运作。次用户网络的节点共享 PU 的频谱资源并且网络可以获取发射器的瞬时信道状态信息。

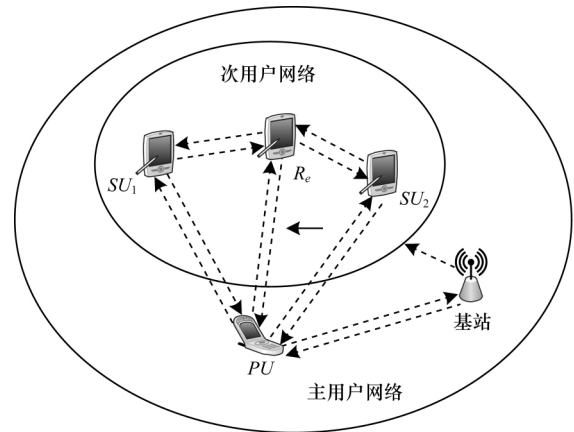


图 1 认知无线网络系统模型

在图 1 所示的次用户网络通信模型中,数据传输受到加性噪声和频率平坦瑞利衰落影响,节点 SU_1 , SU_2 和 R_e 频率的加性高斯白噪声分别用 ξ_1 , ξ_2 和 ξ_r 来表示,平坦瑞利衰落信道的路径损耗系数为 λ ,其中 $g_i \sim N(0, d_{ir}^{-\lambda})$, d_{ir} 表示源节点 SU_i 和中继节点 R_e 的传输距离, g_i 表示在源节点和中继节点之间的信道增益。节点 SU_1 , SU_2 和 R_e 的发射功率分别为 P_1 , P_2 和 P_r 。认知无线网络的 SU 节点在共享 PU 的频谱资源的同时会对 PU 造成一定程度的干扰,本文将该噪声表示为 $\psi_i \sim N(0, \sigma_{\psi_i}^2)$, $i = 1, 2, r$ ^[11-12]。

在第 1 时隙,节点 SU_1 和 SU_2 发送单位功率信号 s_1 和 s_2 至其他节点,当中继节点接收到信号时,该信号表示为:

$$Y_r = \ln P_1 g_{1r} s_1 + \ln P_2 g_{2r} s_2 + \xi_r + \psi_r \tag{1}$$

在第 2 时隙,中继端在放大增益后广播组合信号,因此,通过中继节点转发并在 SU_1 和 SU_2 接收到的信号分别为:

$$Y_1 = K(\ln P_1 g_{1r} s_1 + \ln P_2 g_{2r} s_2 + g_{1r} \xi_r + g_{1r} \psi_r) + \xi_1 + \psi_1 \tag{2}$$

$$Y_2 = K(\ln P_1 g_{2r} s_1 + \ln P_2 g_{2r} s_2 + g_{2r} \xi_r + g_{2r} \psi_r) + \xi_2 + \psi_2 \tag{3}$$

$$K = \ln \left(\frac{P_r}{(P_1 g_{1r} + P_2 g_{2r}) + (\sigma_{\psi_r}^2 + \sigma_{\xi_r}^2)} \right) \tag{4}$$

其中, K 表示放大增益,式(2)的 $K \ln P_1 g_{1r} s_1$ 和式(3)的 $K \ln P_2 g_{2r} s_2$ 表示节点的自干扰。

SU_1 和 SU_2 的信号干扰加噪声比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)为^[13-14]:

$$SR_1 = \frac{\sqrt{P_r P_2 g_1 g_2}}{\ln P_r (\sigma_{\psi_r}^2 + \sigma_{\xi_r}^2) + \ln P_1 (\sigma_{\psi_1}^2 + \sigma_{\xi_1}^2) g_1 + (\sigma_{\psi_1}^2 + \sigma_{\xi_1}^2) P_2 g_2} \tag{5}$$

$$SR_2 = \frac{\sqrt{P_r P_1 g_1 g_2}}{\ln P_r (\sigma_{\psi_r}^2 + \sigma_{\xi_r}^2) + \ln P_2 (\sigma_{\psi_2}^2 + \sigma_{\xi_2}^2) g_2 + (\sigma_{\psi_2}^2 + \sigma_{\xi_2}^2) P_1 g_1} \tag{6}$$

此时 SU_1 的瞬时速率 v_1 为:

$$v_1 = \frac{1}{2} \ln(1 + SR_1) \quad (7)$$

中断概率作为评价无线系统性能的重要指标, 表现为链路的瞬时速率小于所要求的用户速率的概率, 其概率分布与平均信噪比及信道衰落模型有关^[15]。当用户速率需求为 $v_{Th,1}$ 时, 则 SU_1 的中断概率表示为:

$$\begin{aligned} \rho_1^{out} &= \Pr\{v_1 \leq v_{Th}\} \\ &= 1 - \frac{1}{2} e^{-(X_1 X_2)} \ln \left(X_1 X_2 SR_{Th,1} \frac{P_r \sigma_{\psi_r}^2 + P_1 \sigma_{\psi_1}^2}{P_r \sigma_{\psi_r}^2} + 1 \right) \\ &\quad \times G_1 \frac{\ln \left(X_1 X_2 SR_{Th,1} \frac{P_r \sigma_{\psi_r}^2 + P_1 \sigma_{\psi_1}^2}{P_r \sigma_{\psi_r}^2} + 1 \right)}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$X_1 = \frac{d_{1r}^{-\lambda}}{\left(\frac{P_r}{(\sigma_{\psi_1}^2 + \sigma_{\xi_1}^2)} + \frac{P_1}{(\sigma_{\psi_r}^2 + \sigma_{\xi_r}^2)} \right)} \quad (9)$$

$$X_2 = \frac{d_{2r}^{-\lambda} (\sigma_{\psi_2}^2 + \sigma_{\xi_2}^2)}{\left(\frac{P_2}{P_r} \right)} \quad (10)$$

$$SR_{Th,1} = \sqrt{2^{2v_{Th,1}} - 1} \quad (11)$$

其中 G_1 表示一阶修正贝塞尔函数; d_{1r} , d_{2r} 分别表示 SU_1 , SU_2 和中继节点 R_e 的传输距离。同理, 可以得到中断概率 ρ_2^{out} 。

由于 SU 在第一时隙期间发送信号时会对 PU 造成干扰, 因此采用 W_1 和 W_2 分别表示由 SU_1 , SU_2 造成的干扰电平:

$$W_1 = \frac{\sqrt{2} P_1 g_{1p}}{\ln 2} \quad (12)$$

$$W_2 = \frac{\sqrt{2} P_2 g_{2p}}{\ln 2} \quad (13)$$

其中 g_{1p} 和 g_{2p} 分别表示 PU 来自 SU_1 , SU_2 的信道增益。在第 2 时隙, PU 受到来自中继节点的干扰电平, 可以表示为:

$$W_r = \frac{\sqrt{2} P_r g_{rp}}{\ln 2} \quad (14)$$

其中 g_{rp} 表示来自中继节点的信道增益。

2 最小化中断概率功率分配方案

本节通过对用户节点和中继节点进行总功率分配来最小化中断概率。功率限制下的中断概率最小化方程组如下:

$$\begin{aligned} &\min\{\rho_1^{out}, \rho_2^{out}\} \\ &s. t. P_r > 0, P_1 + P_2 + P_r \leq P_Z \\ &\quad P_1, P_2 \leq P_{max} \\ &\quad W_1 + W_2 \leq W_M \\ &\quad W_r \leq W_M \end{aligned} \quad (15)$$

其中 P_Z 表示总功率; P_{max} 表示次用户能够使用的最大功率。中断概率函数 ρ_1^{out} , ρ_2^{out} 的最小化问题是一个凸问题, 它必须有一个唯一的最优解, 并且 $\rho_1^{out} = \rho_2^{out} = \rho^{out}$, 因此优化方程组表示为:

$$\begin{aligned} &\min\{\rho_1^{out}, \rho_2^{out}\} \\ &s. t. P_r > 0, P_1 + P_2 + P_r \leq P_Z \\ &\quad \rho_1^{out} = \rho_2^{out} \\ &\quad P_1, P_2 \leq P_{max} \\ &\quad \frac{\sqrt{2}}{\ln 2} (P_1 g_{1p}^2 + P_2 g_{2p}^2) \leq W_M \\ &\quad P_r \frac{\sqrt{2} g_{rp}^2}{\ln 2} \leq W_M \end{aligned} \quad (16)$$

对于次用户节点 SU_1 , SU_2 以及中继节点 R_e 的发射功率, 需要根据总功率大小及 PU 的最大干扰电平阈值来确定最佳的功率分配方案。

2.1 对 PU 的干扰不超过干扰功率阈值的分配方案

根据式 (16), 当总功率低于一定水平时, SU_1 , SU_2 和 R_e 对 PU 的干扰电平不会超过干扰功率阈值。此时可以排除干扰功率阈值的限制来获得最佳功率分配方案, 使得 SU_1 , SU_2 和 R_e 充分利用总功率。因此, 该条件下的最优功率分配方案为:

$$P_1' = \frac{(\sigma_{\psi_1}^2 + \sigma_{\xi_1}^2) d_{1r} \alpha_0 SR_{Th,1}^2 + (\sigma_{\psi_2}^2 + \sigma_{\xi_2}^2) d_{2r} \alpha_1 SR_{Th,2}^2 + SR_{Th,1} SR_{Th,2}}{\alpha_0 SR_{Th,1}^2 + \alpha_1 SR_{Th,2}^2} \quad (17)$$

$$P_2' = \frac{\sqrt{(d_{2r} - d_{1r}) ((\sigma_{\psi_1}^2 + \sigma_{\xi_1}^2) SR_{Th,1} + (\sigma_{\psi_2}^2 + \sigma_{\xi_2}^2) SR_{Th,2})}}{(d_{2r} - d_{1r}) \alpha_1} \quad (18)$$

$$P_r' = P_Z - P_1' - P_2' \quad (19)$$

其中:

$$\alpha_0 = (\sigma_{\psi_1}^2 + \sigma_{\xi_1}^2) d_{1r} - (\sigma_{\psi_r}^2 + \sigma_{\xi_r}^2) d_{2r} \quad (20)$$

$$\alpha_1 = (\sigma_{\psi_2}^2 + \sigma_{\xi_2}^2) d_{2r} - (\sigma_{\psi_r}^2 + \sigma_{\xi_r}^2) d_{1r} \quad (21)$$

2.2 中继节点受限于干扰电平阈值的分配方案

根据式 (16), 由于次用户节点受限于最大功率, 当总功率增加时, 中继节点的发射功率会随总功率增加而增加, 但中继节点的发射功率受限于 PU 遇到的最大干扰电平。此时中继节点采取的功率分配方案为 P_r' :

$$P_r' = \min \left(W_M \frac{\sqrt{2} g_{rp}^2}{\ln 2}, P_{max} \right) \quad (22)$$

同时, 根据 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件, 次用户节点 SU_1 , SU_2 在充分利用总功率的条件下, 所分配的功率分别为:

$$P_2' = \min \left(\frac{\sqrt{(d_{2r} - d_{1r}) ((\sigma_{\psi_1}^2 + \sigma_{\xi_1}^2) SR_{Th,1} + (\sigma_{\psi_2}^2 + \sigma_{\xi_2}^2) SR_{Th,2})}}{(d_{2r} - d_{1r}) \alpha_1}, P_{max} \right) \quad (23)$$

$$P_1' = \min (P_Z - P_r' - P_2', P_{max}) \quad (24)$$

2.3 所有节点受限于干扰电平阈值的分配方案

随着总功率的增加,次用户节点 SU_1, SU_2 和中继节点的发射功率会逐渐增加但会受限于 PU 所能承受的最大干扰电平,当达到受限条件时中断概率会得到限制,总功率也不会再增加,此时的最优分配方案为:

$$P_r' = \min\left(W_M \frac{\sqrt{2}g_{rp}^2}{\ln 2} P_{\max}\right) \quad (25)$$

$$P_2' = \min\left(\frac{P_r'(\sigma_\psi^2 + \sigma_\xi^2)g_{lp}^2 - \sqrt{4P_r'(\sigma_\psi^2 + \sigma_\xi^2)\beta_1\beta_2}}{2\beta_1\beta_2} P_{\max}\right) \quad (26)$$

$$P_1' = \min\left(\frac{W_M - g_{2p}^2 P_2'}{g_{1p}^2} P_{\max}\right) \quad (27)$$

3 实验结果

实验采用 Matlab7.1 对算法进行编程仿真,并与基于频谱共享的中断概率分析方法^[7]及基于机会主义中继选择的中断概率分析方法^[8],在相同的实验环境下进行对比分析,分别比较在不同的系统总功率、系统数据传输速率下的中断性能。

实验仿真的硬件条件为 CPU Intel 酷睿 i3、主频 3.3 GHz、运行内存 4 GB 的 PC 机。软件仿真环境的参数设置为:路径衰落系数 $\lambda = 3$,中继节点 R_e 位于 SU_1, SU_2 之间,信噪比 $SR_{Th,1} = 1, SR_{Th,2} = 1.5, d_{1r} = 0.6$,信道增益 $g_{1p} = 0.2, g_{2p} = 0.3, g_{rp} = 0.5$,次用户节点的最大功率 $P_{\max} = 20$ 。 SU_1, SU_2 和 R_e 平分总功率 P_z 。

图 2 显示了在总功率增大的条件下系统中断概率的变化情况。从中可以看出,随着总功率的增加,系统的中断概率会逐渐减小。但中断概率收敛到一定水平时,即使总功率继续增加,中断概率也不会继续减少。

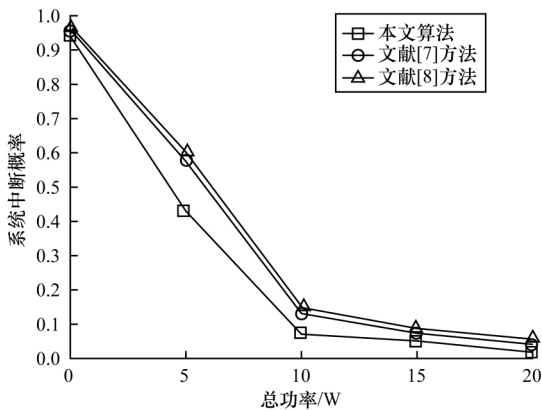


图 2 不同总功率下的系统中断性能

根据 2.3 节的分析,节点的发射功率已经达到主用户所能承受的最大干扰电平阈值,在该条件下,中断概率也处于最小值。对于总功率增长、节点功率受限于干扰电平阈值的情况,采用 2.3 节的节点功率分配方案。实验结果显示,这种分配方案下系统的中断性能优于另外 2 种功率分配方案,所带来的系统中断概率性能增益相比另外 2 种方法至少提高了 20%。

图 3 显示了在干扰功率阈值增大的条件下系统中断性能的变化情况。从中可以看出,随着干扰功率阈值 W_M 的增加,系统中断概率下降。这是因为当 W_M 变大时,次用户能获得更大的发射功率,从而提高了信道容量,降低了系统发生中断事件的概率。当节点对主用户造成的干扰电平不超过干扰电平阈值时,采用 2.1 节的功率分配方案,在该方案下 SU_1, SU_2 和 R_e 能够充分地利用总功率,降低系统中断概率。从实验结果来看,本文方案所带来的系统中断性能增益相比另 2 种方案分别提升了 32.7% 和 43.2%。

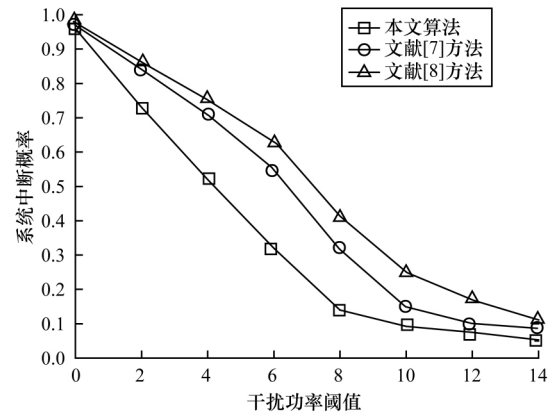


图 3 不同干扰功率阈值下的系统中断性能

4 结束语

中断概率是评估系统性能、分析系统特性的重要指标之一。本文通过分析中断概率与用户功率分配及干扰电平阈值的关系,给出了中断概率最小化方程组,并在总功率及干扰电平阈值的约束条件下采取 3 种最佳的用户功率分配方案,以达到最小化系统中断概率的目的。仿真数值结果证明,与同类方法相比,本文的功率分配方案性能增益提升效果更显著。下一步将进一步减少系统信息的反馈量和实现的复杂度,以使该方案能够早日应用于工程实践。

参考文献

- [1] 邹世辰, 王慧强, 冯光升, 等. 基于 Moran 过程的认知中继网络多策略信任演化模型 [J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(10): 2209-2214.
- [2] Song Yaolian, Zhang Fan, Shao Yubin, et al. Energy Efficiency Optimization of Cognitive Relay Network Based on Cooperative Spectrum Sensing [J]. Journal of China Universities of Posts & Telecommunications, 2015, 22(3): 26-34.
- [3] Bang J, Lee J, Kim S, et al. An Efficient Relay Selection Strategy for Random Cognitive Relay Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(3): 1555-1566.
- [4] Prema G, Karthiyayini R. A Review on Beamforming Techniques for Cognitive Multi-antenna Relay Network [C]// Proceedings of International Conference on Communication and Network Technologies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 48-51.
- [5] 洪浩, 朱锐, 周春晖, 等. 基于共存式频谱共享的译码转发认知中继网络的中断性能 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(7): 936-939.
- [6] 唐伦, 李庆, 陈前斌, 等. 非完全信道下认知中继网络中断概率及功率分配 [J]. 重庆大学学报, 2012, 35(12): 144-162.
- [7] Yang Ping, Song Jianxun, Li Ming, et al. Exact Outage Probability of Spectrum Sharing Multicast Cognitive Relay Networks [J]. Wireless Personal Communications, 2015, 83(4): 2739-2746.
- [8] Zhang Xing, Zhang Zhenhai, Xing Jia, et al. Exact Outage Analysis in Cognitive Two-way Relay Networks with Opportunistic Relay Selection Under Primary User's Interference [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2502-2511.
- [9] Zhao Feng, Sun Xiangqi, Chen Hongbin, et al. Outage Performance of Relay-assisted Primary and Secondary Transmissions in Cognitive Relay Networks [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications & Networking, 2014: 60.
- [10] Lee J, Wang H, Andrews J G, et al. Outage Probability of Cognitive Relay Networks with Interference Constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 390-395.
- [11] Yang Ping, Song Jianxun, Li Mingyang, et al. Outage Probability Gap Between Proactive and Reactive Opportunistic Cognitive Relay Networks [J]. Wireless Personal Communications, 2015, 82(4): 2417-2429.
- [12] Yan Shengnan, Li Yan. Performance Analysis of Cognitive Relay Systems with Spectrum-sharing Interference Under a Primary Outage Probability Constraint [J]. Journal of China Universities of Posts & Telecommunications, 2014, 21(1): 16-21.
- [13] 贾亚男, 岳殿武. 博弈论框架下认知小蜂窝网络的动态资源分配算法 [J]. 电子学报, 2015, 43(10): 1911-1917.
- [14] 洪浩, 张焱, 肖立民, 等. 认知双向中继网络的功率分配优化算法研究 [J]. 电波科学学报, 2014, 29(2): 201-206.
- [15] Bordon R, Montejo Sanchez S, Baraldi Mafra S B, et al. Energy Efficient Power Allocation Schemes for a Two-user Network-coded Cooperative Cognitive Radio Network [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 64(7): 1654-1667.

编辑 张帆

(上接第 118 页)

- [10] Pei X, Wang Y, Ma X. Cooperative Repair Based on Tree Structure for Multiple Failures in Distributed Storage Systems with Regenerating Codes [C]// Proceedings of the 12th ACM International Conference on Computing Frontiers. New York, USA: ACM Press, 2015: 784-792.
- [11] Li Jun, Yang Shuang, Wang Xin, et al. Tree-structured Data Regeneration with Network Coding in Distributed Storage Systems [C]// Proceedings of the 17th International Workshop on Quality of Service. South Carolina, USA: [s. n.], 2009: 1-9.
- [12] Li Jun, Yang Shuang, Wang Xin, Li Baochun. Tree-structured Data Regeneration in Distributed Storage Systems with Regenerating Codes [C]// Proceedings of IEEE INFOCOM. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 2892-2900.
- [13] 刘昫昊, 张敏情, 杨晓元. 基于 RS 码的错误容忍存储方案 [J]. 计算机工程, 2010, 36(14): 65-66.
- [14] 谭子军, 何连跃. 分布式存储系统中用户磁盘空间分配策略 [J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 44-46.
- [15] Bhagwan R, Tati K, Cheng Y. Total Recall: System Support for Automated Availability Management [C]// Proceedings of the 1st Symposium on Networked Systems Design and Implementation. San Francisco, USA: [s. n.], 2004: 337-350.
- [16] Rashmi K V, Shah N B, Gu D. A "Hitchhiker's" Guide to Fast and Efficient Data Reconstruction in Erasure-coded Data Centers [C]// Proceedings of ACM SIGCOMM'14. New York, USA: ACM Press, 2014: 331-342.

编辑 刘冰 金胡考