

文章编号: 1000-582X(2012)12-144-05

# 非完全信道下认知中继网络中断概率及功率分配

唐 伦<sup>1</sup>, 李 庆<sup>1</sup>, 陈前斌<sup>1</sup>, 曾孝平<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室, 重庆 400065; 2. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 基于最大信道增益的中继选择方法, 分析了在非完全信道状态信息(CSI, channel state information)和受主用户干扰情况下认知中继网络的中断概率; 进一步提出了在主用户干扰约束和保证认知用户服务质量(QoS, quality of service)条件下最大化认知中继网络频谱效率的数学优化模型, 利用拉格朗日对偶松弛法获得了该优化问题的解, 在保证主用户传输性能不受影响的前提下, 提高了认知中继网络的频谱效率。仿真结果表明该文提出的功率分配方案与等功率分配方案相比提高了性能增益。同时表明在非完全信道条件下获得的频谱效率与完全信道条件下的频谱效率近似, 但减少了系统信息的反馈量和实现的复杂度, 有利于该方案的工程应用。

**关键词:** 认知中继网络; 不完全信道状态信息; 中继选择; 功率分配

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

## Outage probability and power allocation in cognitive relay networks under imperfect channel state information

TANG Lun<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup>, CHEN Qianbin<sup>1</sup>, ZENG Xiaoping<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Considering the interference introduced by primary user, the outage probability of cognitive relay networks under imperfect channel state information is analyzed based, on the relay selection for the maximum channel gain. In addition, the mathematical optimization model of maximizing the spectrum efficiency under the interference constraint of primary user and the QoS requirement of cognitive user is proposed for cognitive relay networks. Then, the optimal solution of the model is obtained with the Lagrangian method. The proposed scheme improves the spectrum efficiency of cognitive relay networks on the premise of guaranteeing the transmission performance of primary user. Simulation results show that the proposed power allocation scheme improves the system performance compared with the traditional equal power allocation scheme. Meanwhile, it indicates that the approximate spectrum efficiency can be obtained under the perfect channel state and the imperfect channel state. Under the imperfect channel state, the feedback information and the complexity of implementation will be reduced, which is beneficial to the engineering application.

**Key words:** cognitive relay networks; imperfect channel state information; relay selection; power allocation

**收稿日期:** 2012-06-16

**基金项目:** 国家科技重大专项(2011ZX03003-003-02); 国家自然科学基金资助项目(60972070, 61171111); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2009BA2090); 重庆市教委资助项目(KJ100514); 重庆邮电大学博士启动基金(A2011-2)

**作者简介:** 唐伦(1973-), 男, 重庆邮电大学副教授, 主要从事新一代无线通信系统资源管理, 包括动态频谱分配, 中继系统资源分配等方向研究, (Tel)15823489558; (E-mail)tangl@cqupt.edu.cn。

目前,对认知中继网络<sup>[1]</sup>(cognitive relay networks, CRN)在完全 CSI 条件下的中断概率、功率分配及系统容量等网络性能已进行了广泛的研究。文献[2]研究了无线衰落环境下认知中继网络的中断性能,推导了认知中继网络中断概率的上界闭合表达式,但作者没有考虑主网络对认知网络的干扰。文献[3]在保证主用户的 QoS 条件下,提出了一种基于最优中继选择的认知传输策略,获得了认知用户中断概率的闭合表达式。文献[4]提出了一种在认知中继网络中的机会功率策略,机会性地改变传输功率,最大化认知用户的最大可达速率,前提条件要求获得完全信道状态信 CSI。文献[5]研究了协作认知无线网络中继转发的功率和干扰控制问题,提出了一种中继选择准则。文献[6]为满足认知用户对住用户的干扰约束,建立了在主用户接收端干扰受限条件下最大化认知用户容量的数学优化问题;进一步提出了当主用户信噪比不断变化时,认知用户可根据干扰控制因子自适应地调节发射功率,最大化认知系统容量。文献[7]研究了在多个中继节点与源节点协同通信的场景下,提出了一种基于放大转发(amplify and forward, AF)协作方式的功率分配及联合优化算法,然而作者忽略了主用户对认知用户的干扰。

上述研究工作均假设了系统能够获得完全 CSI,然而在无线移动通信系统中,由于信道的时变性、接收机估计不准确、量化精度误差等因素使得系统很难获得准确和实时的 CSI,所以研究非完全 CSI 条件下通信系统的性能具有重要意义<sup>[8-9]</sup>。目前,针对认知中继网络在不完全信道条件下的性能分析尚无相关文献报道。其次,主网络对认知网络的干扰在实际网络中广泛存在,影响认知中继网络的系统性能指标,需要进一步深入研究。最后,在综合考虑中继选择策略、主用户干扰约束,认知用户 QoS 约束的条件下,通过最优功率分配策略,最大化认知中继网络的频谱效率需要深入研究。为此,在不完全信道状态信息条件下,分析了存在主用户干扰情况下的认知中继网络的中断概率;并进一步研究了在主用户干扰约束和保证认知用户 QoS 的条件下,最大化认知中继网络的频谱效率,最后利用拉格朗日对偶松弛法设计了相应的优化求解算法。

## 1 系统模型

考虑一个主网络与认知网络共存的中继系统,如图 1 所示。主网络中,一个主用户发送端(primary transmitter, PT)发送数据给主用户接收

端(primary receiver, PR);认知网络由一个认知源节点(source, S)、一个认知目的节点(destination, D)和  $M$  个随机分布的潜在的认知中继节点( $R_i$ )组成,其中,  $i \in S_{\text{relay}} = \{1, 2, \dots, M\}$ ,所有潜在认知中继节点集合  $S_{\text{relay}}$  构成了候选协作域,如图 1 大长方形区域,能够正确接收认知源节点消息且参与解码转发的中继节点构成了协作域,如图 1 小长方形区域。整个认知中继系统采用前向译码转发(decode and forward, DF)模式进行通信,并且目的节点将第二时隙的信息进行最大比合并(maximum ratio combining, MRC)。

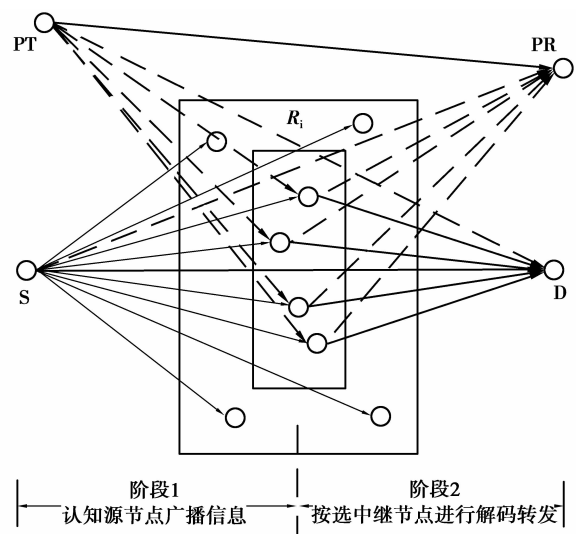


图 1 认知中继网络系统模型

假设主用户节点、认知用户节点和中继节点间的传输信道为独立的静态瑞利衰落信道,  $h_{kl}$  ( $k \in \{S, R_i, P\}, l \in \{D, R_i, P\}$ ) 表示节点  $k$  到节点  $l$  之间的信道增益。各节点间传输信道的功率增益服从指数分布:  $\gamma_{kl} = |h_{kl}|^2$ , 其均值为:  $\bar{\gamma}_{kl} = \sigma_{kl}^2$ 。假设所有背景噪声都是满足方差为  $N_0$  且相互独立的加性高斯白噪声。认知中继网络所要求的最小传输速率为  $R$ 。为了估计信道状态信息,认知网络中继系统通信过程分为 2 个阶段:训练阶段和数据传输阶段,训练阶段主要通过训练序列来估计信道。假设训练阶段和数据传输阶段的功率分别为:  $P_t$  和  $P_d$ , 且  $P_t + P_d \leq P_{\text{total}}$ ,  $P_{\text{total}}$  是系统总功率。在信道训练阶段目的节点根据源和中继节点发出的已知测试序列来评估信道状态  $h_{sd}$  和  $h_{rd}$ , 中继节点根据源节点发出的已知测试序列来评估信道状态  $h_{sr}$ 。假设每个节点都采用最小均方误差(minimum mean square error, MMSE)的方法进行信道估计。信道系数可以表示

为:  $h_i = \hat{h}_i + \tilde{h}_i$ , 其中  $\hat{h}_i$  为信道正确估计,  $\tilde{h}_i$  为错误估计。根据文献[10]可得  $\hat{h}_i = \frac{\sigma_i^2 \sqrt{P_t}}{\sigma_i^2 P_t + N_0} y_i$ ,  $y_i \sim CN(0, \sigma_i^2 P_t + N_0)$ ;  $\tilde{h}_i$  是方差为  $\text{var}(\tilde{h}_i) = \frac{\sigma_i^2 N_0}{(\sigma_i^2 P_t + N_0)}$  的复高斯随机变量。为了书写方便把接收端的干扰噪声记为  $N_i = \sigma_{\tilde{h}_i}^2 P_d + N_0$ , 其中  $\sigma_{\tilde{h}_i}^2 = \frac{\sigma_i^2 N_0}{(\sigma_i^2 P_t + N_0)}$  为信道评估错误因子方差, 推出  $\hat{\gamma}_i = |\hat{h}_i|^2$  服从均值为  $\Gamma_i = \frac{\sigma_i^4 P_t}{(\sigma_i^2 P_t + N_0)}$  的指数分布。

假设认知网络为总功率受限的系统, 数据传输总功率为  $P_d$ , 因此认知源节点的发射功率和认知中继节点的发射功率满足:  $P_s + \sum_{r_i \in D(N)} P_{r_i} \leq P_d$ 。考虑认知网络源节点为:  $P_s = \alpha P_d$ , 认知网络所有中继节点的功率限制为:  $\sum_{r_i \in D(N)} P_{r_i} = (1 - \alpha) P_d$ , 式中  $\alpha$  表示功率控制因子。考虑最佳中继选择策略来进行功率分配, 仅选择 1 个中继来转发数据, 认知中继节点的功率为:  $P_{r_i} = (1 - \alpha) P_d$ 。

## 2 数据传输时系统中断概率分析

定义认知源节点的协作域  $D(N)$  是能够正确译码的中继节点的集合, 即认知源节点与认知中继间的互信息大于所要求的传输速率  $D(N) \triangleq \left\{ i \in S_{\text{relay}} : \frac{1}{2} \log \left[ 1 + \frac{\alpha P_d |\hat{h}_{sr_i}|^2}{P_p |\hat{h}_{pr_i}|^2 + N_{sr_i}} \right] \geq R \right\}$ 。由于  $\hat{\gamma}_{sd} = |\hat{h}_{sd}|^2$  服从均值为  $\Gamma_{sd} = \frac{\sigma_{sd}^4 P_t}{(\sigma_{sd}^2 P_t + N_0)}$  的指数分布, 则任意中继正确解调认知源节点信息以此成为协作节点的概率为

$$\begin{aligned} Pr\{r_i \in D(N)\} &= Pr\left\{ \frac{1}{2} \log \left[ 1 + \frac{\alpha P_d |\hat{h}_{sr_i}|^2}{P_p |\hat{h}_{pr_i}|^2 + N_{sr_i}} \right] \geq R \right\} = \\ &1 - Pr\left\{ |\hat{h}_{sr_i}|^2 \leq \frac{(2^{2R} - 1)(P_p |\hat{h}_{pr_i}|^2 + N_{sr_i})}{\alpha P_d} \right\} = \\ &1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{(2^{2R} - 1)(P_p |\hat{h}_{pr_i}|^2 + N_{sr_i})}{\alpha P_d} f_{|\hat{h}_{sr_i}|^2}(|\hat{h}_{sr_i}|^2) f_{|\hat{h}_{pr_i}|^2}(|\hat{h}_{pr_i}|^2) d|\hat{h}_{sr_i}|^2 d|\hat{h}_{pr_i}|^2 = \\ &\frac{\alpha P_d \Gamma_{sr_i}}{\Gamma_{pr_i} (2^{2R} - 1) P_p + \alpha P_d \Gamma_{sr_i}} \exp\left\{ -\frac{(2^{2R} - 1) N_{sr_i}}{\alpha P_d \Gamma_{sr_i}} \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

中继节点能否正确解调源信息是相互独立的, 则候选协作域中  $M$  个节点构成任意协作域的概率为

$$Pr(D(N)) =$$

$$\prod_{r_i \in D(N)} Pr\{r_i \in D(N)\} \prod_{r_i \notin D(N)} Pr\{r_i \notin D(N)\}, \quad (2)$$

一般情况下, 通过获取认知中继到认知目的节点间所有链路  $M \rightarrow D$  中最大信道增益来确定最佳中继节点, 那么最佳中继的选择准则表示为:  $r_{\text{opt}} = \arg \max_{m \in D(N)} \hat{\eta}_{md}$ , 其中  $\hat{\eta}_{md}$  表示中继  $m$  到目的节点的信道增益。目的节点处的信道容量为

$$I = \frac{1}{2} \log \left[ 1 + \frac{\alpha P_d |\hat{h}_{sd}|^2}{P_p |\hat{h}_{pd}|^2 + N_{sd}} + \frac{\max_{m \in D(N)} \hat{\eta}_{md} (1 - \alpha) P_d}{P_p |\hat{h}_{pd}|^2 + N_{r,d}} \right], \quad (3)$$

那么, 认知中继系统的条件中断概率可以表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}(I < R | D(N)) &= \\ Pr\left\{ \frac{1}{2} \log \left[ 1 + \delta_{sd} + \frac{\max_{m \in D(N)} \hat{\eta}_{md} (1 - \alpha) P_d}{P_p |\hat{h}_{pd}|^2 + N_{r,d}} \right] < R \right\} &\leq \\ Pr\{\delta_{sd} < 2^{2R} - 1\} Pr\left\{ \frac{\max_{m \in D(N)} \hat{\eta}_{md} (1 - \alpha) P_d}{P_p |\hat{h}_{pd}|^2 + N_{r,d}} < 2^{2R} - 1 \right\} &= \\ Pr\{\delta_{sd} < 2^{2R} - 1\} \prod_{m \in D(N)} Pr\left\{ \frac{\hat{\eta}_{md} (1 - \alpha) P_d}{P_p |\hat{h}_{pd}|^2 + N_{r,d}} < 2^{2R} - 1 \right\} &= \\ \left\{ 1 - \frac{\alpha P_d \Gamma_{sd}}{\Gamma_{pd} (2^{2R} - 1) P_p + \alpha P_d \Gamma_{sd}} \exp\left\{ -\frac{(2^{2R} - 1) N_{sd}}{\alpha P_d \Gamma_{sd}} \right\} \right\} \times \\ \prod_{r_i \in D(N)} \left\{ 1 - \frac{(1 - \alpha) P_d \Gamma_{r,d}}{\Gamma_{pd} (2^{2R} - 1) P_p + \alpha P_d \Gamma_{r,d}} \exp\left\{ -\frac{(2^{2R} - 1) N_{r,d}}{(1 - \alpha) P_d \Gamma_{r,d}} \right\} \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\delta_{sd}$  表示认知源节点到认知目的节点的信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR), 且  $\delta_{sd} = \frac{\alpha P_d |\hat{h}_{sd}|^2}{(P_p |\hat{h}_{pd}|^2 + N_{sd})}$ 。

由于协作域  $D(N)$  中认知中继的个数是随机变化的, 因此整个中继系统的中断概率可以表示为

$$P_{\text{out}} = \sum_{D(N)} Pr(I < R | D(N)) Pr(D(N)). \quad (5)$$

## 3 最优功率分配

在认知中继系统总功率和主网络干扰受限的条件下, 感兴趣的是寻找一个认知源节点和认知中继之间的最优功率分配方案来最大化认知中继系统的频谱效率, 其优化模型如下

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} I_{\text{DF}} &= \frac{1}{2} E_{r_{sd}, w_{r,d}, w_{pd}} \left\{ \log \left( 1 + \frac{\alpha P_d |\hat{h}_{sd}|^2}{P_p |\hat{h}_{pd}|^2 + N_{sd}} + \right. \right. \\ &\left. \left. \frac{(1 - \alpha) P_d |\hat{h}_{r,d}|^2}{P_p |\hat{h}_{pd}|^2 + N_{r,d}} \right) \Big|_{r_i \in D(N)} \right\}, \\ \text{s. t. } &0 < \alpha < 1, \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_{\text{out}} \leq P_{\text{out}}^{\text{target}}, \quad (7)$$

$$\alpha P_d | \hat{h}_{\text{sp}} |^2 \leq I_{\text{th}}, \quad (8)$$

$$(1-\alpha)P_d | \hat{h}_{r,p} |^2 \leq I_{\text{th}}, \quad (9)$$

约束条件(6)表示功率控制因子的范围。约束条件(7)保证认知用户的 QoS 要求。约束条件(8)和(9)保证对主用户干扰约束限制不容许超过其干扰约束限制。 $P_{\text{out}}^{\text{target}}$ 表示认知用户的目标中断概率, $I_{\text{th}}$ 表示主用户所能容许的最大干扰限制。

显然式(9)是一个凸优化问题,可采用凸优化理论分析最优功率分配方案。首先,构造拉格朗日函数

$$L(\alpha, \lambda, \mu, \nu) = \frac{1}{2} \log \left[ 1 + \frac{\alpha P_d | \hat{h}_{\text{sd}} |^2 + (1-\alpha)P_d | \hat{h}_{r,d} |^2}{P_p | \hat{h}_{\text{pd}} |^2 + N_{\text{sd}} + P_p | \hat{h}_{\text{pd}} |^2 + N_{r,d}} \right]_{r_d \in D(N)}^{\max} | \hat{h}_{r,d} |^2 + \lambda \{ P_{\text{out}} - P_{\text{out}}^{\text{target}} \} + \mu \{ \alpha P_d | \hat{h}_{\text{sp}} |^2 - I_{\text{th}} \} + \nu \{ (1-\alpha)P_d | \hat{h}_{r,p} |^2 - I_{\text{th}} \}. \quad (10)$$

其中, $\lambda$ 、 $\mu$ 和 $\nu$ 是拉格朗日乘数因子, $P_{\text{out}}$ 由式(5)给出。根据拉格朗日对偶法,定义相应的对偶问题 $D(\lambda, \mu, \nu)$ 如下

$$D(\lambda, \mu, \nu) = \max_{\alpha} L(\alpha, \lambda, \mu, \nu), \quad \text{s. t. } 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (11)$$

则优化式(6)~式(9)的最优解 $\alpha^*$ 可以根据式(12)对 $\alpha$ 求偏导等于0可得

$$\frac{\partial L(\alpha, \lambda, \mu, \nu)}{\partial \alpha} = \frac{\partial I}{\partial \alpha} + \lambda \frac{\partial P_{\text{out}}}{\partial \alpha} + \mu P_d | \hat{h}_{\text{sp}} |^2 - \nu P_d | \hat{h}_{r,p} |^2. \quad (13)$$

显然,无法简单地通过使式(13)等于0求得初始最优解 $\alpha^*$ ,因为式(13)是关于 $\alpha$ 的一个复杂的非线性方程。因此,利用梯度迭代得出初始最优解 $\alpha^*$

$$\alpha(t_1 + 1) = [\alpha(t_1) + \beta_1(t_1) f(\alpha)]_X, \quad (14)$$

其中 $f(\alpha) = \frac{\partial L(\alpha, \lambda, \mu, \nu)}{\partial \alpha}$ , $t_1$ 是迭代次数,作为内层循环, $\beta_1(t_1)$ 是大于0的迭代步长, $[\cdot]_X$ 表示在可行集 $X = \{\alpha; 0 \leq \alpha \leq 1\}$ 上的投影。利用次梯度算法,最优 $\lambda^*$ 、 $\mu^*$ 、 $\nu^*$ 可以通过迭代更新 $\lambda$ 、 $\mu$ 、 $\nu$ 来获得

$$\begin{aligned} \lambda(t+1) &= [\lambda(t) - \beta_2(t) f(\lambda)]^+; \\ \mu(t+1) &= [\mu(t) - \beta_2(t) f(\mu)]^+; \\ \nu(t+1) &= [\nu(t) - \beta_2(t) f(\nu)]^+, \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $f(\lambda) = P_{\text{out}} - P_{\text{out}}^{\text{target}}$ ;  $f(\mu) = \alpha P_d | \hat{h}_{\text{sp}} |^2 - I_{\text{th}}$ ;  $f(\nu) = (1-\alpha)P_d | \hat{h}_{r,p} |^2 - I_{\text{th}}$ 。

另外, $[\cdot]^+$ 表示在非负实数集上的投影, $t$ 是

迭代次数,作为外层循环, $\beta_2(t)$ 表示迭代步长,且为不可和的,递减的,满足: $\sum_{t=1}^{\infty} \beta_2(t) = \infty, \lim_{t \rightarrow \infty} \beta_2(t) = 0$ 。最后,可以通过最优对偶变量 $\lambda^*$ 、 $\mu^*$ 、 $\nu^*$ 重新获得最优原始变量 $\alpha^*$ 。

## 4 仿真分析

假设 $N_0 = 10^{-4}$ , $R = 1$  bit/s/Hz, $P_t = 0.5$  W, $P_d = 0.5$  W, $I_{\text{th}} = 0$  W。OPA和EPA分别表示所提的最优功率分配策略和平均功率分配策略。

图2显示了求解优化问题式(6)-(9)算法的收敛过程,横坐标表示循环迭代次数 $t$ ,纵坐标表示认知用户的频谱效率(上)和功率控制因子 $\alpha$ (下)的值。当最优功率分配算法迭代100次后,认知用户的频谱效率( $I_{\text{DF}}$ )收敛到最优解约为2.05 bit/s/Hz左右,此时认知用户的最优功率控制因子 $\alpha = 0.24$ 。

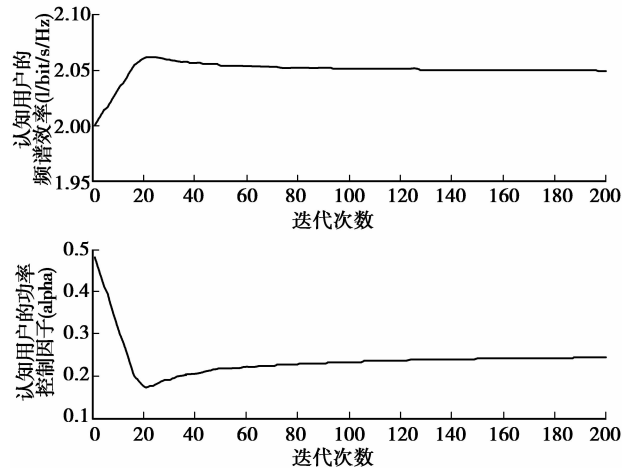


图2  $I_{\text{DF}}$ 与 $\alpha$ 的迭代收敛曲线( $N_r = 1$ )

图3显示了不完全CSI的认知中继网络中,参与选择的中继节点数、 $I_{\text{DF}}$ 与 $P_p$ 的关系。在相同中继节点情况下,当 $P_p$ 不断增加时, $I_{\text{DF}}$ 不断减少。当 $P_p$ 一定时,随着中继的增加, $I_{\text{DF}}$ 也会随着提高。相比 $N_r = 1$ 情况下,当 $N_r = 4$ 时认知用户的 $I_{\text{DF}}$ 比当 $N_r = 2$ 时增加了约3倍。然而当 $N_r = 6$ 时,认知用户的 $I_{\text{DF}}$ 比当 $N_r = 2$ 时增加了约3.2倍,其增加的幅度明显减小,这是因为当中继数达到一定数目时对信道估计产生的误差会越大,从而使认知用户的频谱效率增加幅度越来越小。还可以看出,所提最优功率分配算法比等功率分配所获得的频谱效率要高。

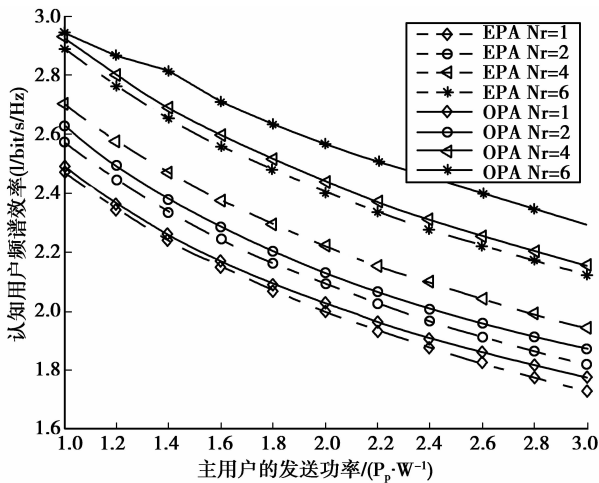


图 3  $I_{DF}$  与  $P_p$  之间的关系

图 4 仿真分析了信道估计误差对认知用户传输速率的影响,其参与选择的中继数为  $N_r = 6$ ,并设  $S-R, R-D, S-D$  3 条链路的信道估计误差相同,即  $\sigma_{h_{sr}}^2 = \sigma_{h_{rd}}^2 = \sigma_{h_{sd}}^2$  (此处,令  $\sigma_{h_{sr}}^2 = \sigma_{e1}^2, \sigma_{h_{rd}}^2 = \sigma_{e2}^2, \sigma_{h_{sd}}^2 = \sigma_{e3}^2$ )。从图中可以看出,随着  $\sigma_{h_{sr}}^2$  的增大,认知用户的传输速率逐渐减小,即信道估计误差越大系统性能越差;并且随着主用户发射功率的增加,信道估计误差对系统性能的影响越大。

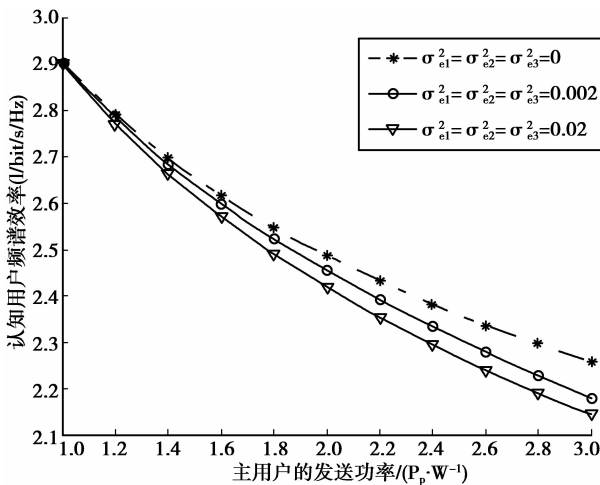


图 4 不同信道估计误差条件下的  $I_{DF}$  ( $N_r = 6$ )

图 5 显示了在中继数  $N_r = 1$  和  $N_r = 6$  的条件下,完全 CSI 与不完全 CSI 下  $I_{DF}$  与  $P_p$  之间的关系。从图中可以看出,完全 CSI 下比不完全 CSI 下的所获得的  $I_{DF}$  要高。还可以看出,当  $N_r = 6$  时完全 CSI 与不完全 CSI 下的  $I_{DF}$  差比  $N_r = 1$  时要大。总的来看,在非完全 CSI 条件下获得的  $I_{DF}$  与完全 CSI 条件下近似,但非完全 CSI 条件下减少了系统信息的反馈量和实现的复杂度,有利工程实现。

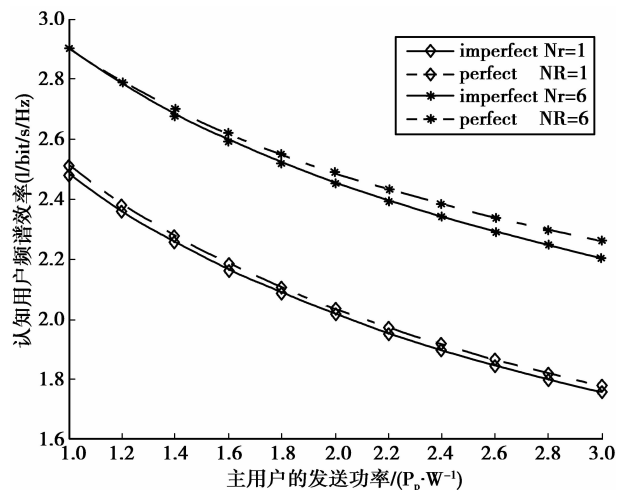


图 5 完全 CSI 与不完全 CSI 下  $I_{DF}$  与  $P_p$  之间的关系

## 5 结 语

主要研究了在不完全 CSI 和认知中继网络受主用户干扰条件下的中断概率,并联合最优中继选择方法,提出了在主用户干扰约束和保证认知用户 QoS 条件下最大化认知中继网络频谱效率的数学优化模型。仿真结果显示,所提算法的有效性,并且相比传统的等功率分配,所提的最优功率分配获得的系统频谱效率有所提高。当参与选择的中继增加时,认知中继系统的频谱效率也会随着提高。在不完全 CSI 条件所获得的频谱效率与完全 CSI 条件下的近似,但非完全信道条件下减少了系统信息的反馈量和实现的复杂度,有利工程实现。

### 参考文献:

- [1] Mao X M, Qiu P L. Cognitive relay[C]// Proceedings of the Future Generation Communication and Networking, December 6-8, 2007, Jeju, Korea. Piscataway: IEEE Press, 2007, 2: 264-269.
- [2] Guo Y, Kang G, Zhang N, et al. Outage performance of relay-assisted cognitive-radio system under spectrum-sharing constraints [J]. Electronics Letters, 2010, 46(2): 182-184.
- [3] Zou Y L, Zhu J, Zheng B Y, et al. An adaptive cooperation diversity scheme with the best-relay selection in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(10): 5438-5445.
- [4] Chen Y, Yu G, Zhang Z, et al. On cognitive radio networks with opportunistic power control strategies in fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7): 2752-2761.

- Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(10): 69-72.
- [14] 王广松, 戴旭初. 基于频域相关的宽带干涉仪测向新算法[J]. 航天电子对抗, 2006, 22(4): 52-54, 61.  
WANG Guangsong, DAI Xuchu. A novel wideband interferometer direction finding algorithm based on spectrum correlation [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2006, 22(4): 52-54, 61.
- [15] 欧连军, 邱红专, 张洪钺. 多个相关测量的融合算法及其最优性[J]. 信息与控制, 2005, 34(6): 690-695.  
OU Lianjun, QIU Hongzhan, ZHANG Hongyue. Multiple correlated measurements fusion algorithm and its optimality [J]. Information and Control, 2005, 34(6): 690-695.
- [16] 孟建. 分段采样信号的相位关联技术[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(12): 1784-1786, 1797.  
MENG Jian. Phase association method of multisection sampled data[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(12): 1784-1786, 1797.
- [17] 刘良兵, 涂亚庆, 张海涛. 频率估计的一种多段同频等长信号融合算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 194-198.  
LIU Liangbing, TU Yaqing, ZHANG Haitao. Fusion algorithm for frequency estimation of multi-section signals with same frequency and length[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(1): 194-198.
- [18] 刘良兵, 涂亚庆. 基于同频等长信号融合的频率估计快速迭代算法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2008, 20(2): 148-155.  
LIU Liangbing, TU Yaqing. Fast iterative algorithm of frequency estimation based on information fusion among signals with same frequency and length[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2008, 20(2): 148-155.
- [19] Sills J A, Black Q R. Frequency estimation from short pulses of sinusoidal signals[C] // Proceedings of the IEEE Military Communications Conference, Oct 21-24, 1996, McLean, VA, USA. Piscataway: IEEE, 1996, 3: 979-983.
- [20] Becker K. New algorithm for frequency estimation from short coherent pulses of a sinusoidal signal[J]. IEEE, Part F: Radar and Signal Processing, 1990, 137(4): 283-288.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 148 页)

- [5] Ao W C, Cheng S M, Chen K C. Power and interference control with relaying in cooperative cognitive radio networks[C] // Proceedings of the 2010 IEEE International Communications Workshops (ICC), May 23-27, 2010, Capetown, South Africa. Piscataway: IEEE, 2010: 1-5.
- [6] 唐伦, 曾孝平, 陈前斌, 等. 认知无线网络基于正交频分复用的子载波和功率分配策略[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(8): 17-22.  
TANG Lun, ZENG Xiaoping, CHEN Qianbin, et al. Novel strategy subcarrier and power allocation in OFDM-based cognitive radio networks[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(8): 17-22.
- [7] 郭艳艳, 康桂霞, 张宁波, 等. 基于认知无线电系统的协作中继分布式功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2463-2467.
- [8] GUO Yanyan, KANG Guixia, ZHANG Ningbo, et al. A distributed power allocation for cooperative transmission in cognitive radio systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(10): 2463-2467.
- [9] Zhang J W, Gursoy M C. Achievable rate and resource allocation strategies for imperfectly known fading relay channels [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009, 2009(40): 10. 1155/2009/458236.
- [10] Ren S L, Letaief K B, De Marca J R B. Outage reduction in cooperative networks with limited feedback [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(3): 748-752.
- [11] Bhashyam S, Sabharwal S, Aazhang B. Feedback gain in multiple antenna systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(5): 785-798.

(编辑 侯 湘)