

## 认知无线网络中基于协作水平的协作门限与功率联合优化

张纬良\* 郑宝玉 岳文静

(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

**摘要:** 将协作传输技术用于认知无线网络不仅增强了系统抗衰落能力,而且有效提高了频带利用率。但是,中继节点何时必须参与协助源节点传输信息是一个值得考虑的问题。该文提出一种基于协作水平的中继协作准则。首先给出协作水平的定义和表达式,并基于此式推导了系统平均带宽利用率和误符号率公式,然后由二者的折中得到关于协作门限和功率比的性能函数。为了使系统获得最优性能,文中采用粒子群优化算法联合优化协作门限和功率比。仿真结果表明,良好的源节点到目的节点的链路状态和尽量使用中继参与协作均有助于系统性能的最优化。

**关键词:** 认知无线网络; 协作门限; 功率分配; 粒子群优化算法

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2322-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00263

## Joint Optimization of Cooperative Threshold and Power Based on Cooperation Level in Cognitive Radio Networks

Zhang Wei-liang Zheng Bao-yu Yue Wen-jing

(Institute of Signal Processing and Transmission,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Cooperative transmission for cognitive radio networks not only enhances the anti-fading capability of the system, but also improves the bandwidth efficiency. But it's really a worth considering issue when the relay node should assist the source node to transmit information. This paper proposes a cooperative guideline based on cooperative level. Firstly the notion of cooperative level is defined, then the expressions of system bandwidth utilization and the average symbol error rate are deduced, finally the system performance function is got through the compromise between the cooperative thresholds and power ratio. This paper also employs particle swarm optimization algorithm to solve optimal cooperative threshold and optimal power ratio. The simulation results verify the performance of the proposed scheme and show that good link state from source node to destination node and cooperative transmission by the relay node are both useful for optimizing the system performance.

**Key words:** Cognitive radio networks; Cooperative threshold; Power allocation; Particle Swarm Optimization (PSO)

### 1 引言

认知无线电是一种能有效提高频谱利用率的无线通信技术<sup>[1]</sup>,它可以检测频谱空洞并在不影响主用户网络通信的情况下为次用户网络提供接入服务。为了衡量次用户对主用户通信的干扰程度,文献[2]提出了认知无线网络中干扰温度的概念。当次用户和主用户共享同一段频谱时,次用户对主用户的干扰必须限制在一定范围内以确保主用户通信的服务质量(Quality of Service, QoS)得到满足。文献[3]研究了在干扰温度限制下认知网络的中断性能。

协作通信是一种能够有效对抗信道衰落,增加系统吞吐量的空间分集技术。文献[4-6]提出了3种用于协作通信的中继方案:放大转发(Amplify-and-Forward, AF),解码转发(Decode-and-Forward, DF)和编码协作(Coded Cooperation, CC)。在众多协作通信方案中<sup>[4]</sup>,均没有考虑中继节点是否有必要进行协作的问题,因为中继节点并不总是需要参与协作通信。许多文献对协作通信在认知无线网络中的应用作了多方面的研究。文献[7,8]分别提出了认知网络中协作节点信道和功率分配的有效算法,文献[9]分析了用中断概率作为QoS指标的通信系统与其干扰功率之间的关系。文献[10-12]研究了在多个中继情况下的中继选择问题,但对节点何时参与协作的问题没有做深入的探讨。文献[13]同时分析了中继节

2011-03-21 收到, 2011-07-13 改回

国家自然科学基金(60972039, 60905040)和江苏省自然科学基金重点项目(BK2010077)资助课题

\*通信作者: 张纬良 nupt.wlzhang@163.com

点选择和何时协作的问题，但是没有考虑认知环境下对次用户的功率限制。

本文在以上工作的基础上提出了一种在认知无线网络环境下基于协作水平的中继协作准则，给出了协作水平的定义和表达式，并基于此式推导了系统平均带宽利用率和误符号率公式，然后由二者的折中得到关于协作门限和功率比的性能函数。为了使系统获得最优性能，本文采用粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 求解性能函数的全局最优解。

本文余下的内容是这样安排的：第 2 节给出本文使用的系统模型，第 3 节提出协作水平的概念并描述求解最优协作门限和最优功率比的粒子群算法，第 4 节进行计算机仿真分析，最后总结全文。

## 2 系统模型及中继协作准则描述

### 2.1 系统模型

考虑如图 1 所示的认知无线系统，它由主用户网络(primary network)和次用户网络(secondary network)构成。图中实线表示有用信号，虚线表示干扰信号。系统中所有用户均配置单天线，既可接收数据又可以发送数据。假设在进行数据传输之前，次用户已经完成对系统可用频带的感知，且所有信道均是瑞利信道，次用户网络的信道相互正交并采用时分双工模式通信。主用户发射机(Primary Transmitter, PT)发送数据到主目的节点(Primary Destination, PD)的同时，次用户网络的发射机(Secondary Transmitter, ST)可以在中继(Secondary Relay, SR)协助下发送数据到次目的节点(Secondary Destination, SD)。中继节点 SR 何时需要协助源节点 ST 进行数据传输将由其协作水平  $\alpha$  与协作门限值  $\alpha_T$  进行比较后判定，关于协作水平  $\alpha$  及协作门限  $\alpha_T$  的定义将在 2.2 节给出。

图 2 展示了在一个时隙  $T$  内次用户的处理过程。时隙  $T$  分两个子时隙  $T_1$  和  $T_2$ ， $T_1$  时隙 ST 广播发送数据，PD, SR, SD 均可接收； $T_2$  时隙内 SR 要么发送在  $T_1$  时隙内收到的 ST 数据，要么保持空闲，

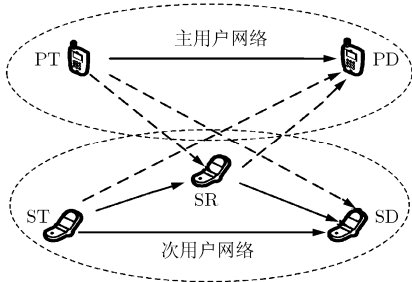


图 1 认知无线网络系统模型

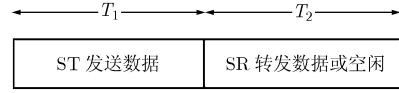


图 2 中继传输协议时隙处理过程

且当 SR 进行协作的同时，其发送数据也可被 PD、SD 接收，SD 采用最大比合并(Maximal-Ratio Combining, MRC)。显然 ST, SR 发送的数据对于 PD 来说是干扰信号，故其发射功率应该受到一定限制。

假设所有节点发送信号均为单位能量，PT, ST, SR 发送功率分别记为  $P_{PT}$ ,  $P_{ST}$ ,  $P_{SR}$ ，节点  $i$  到节点  $j$  的信道系数为  $h_{i,j}$ ，发送信号为  $x_i$ ,  $i \in \{PT, ST, SR\}$ ,  $j \in \{PD, SD, SR\}$ ,  $h_{i,j}$  建模为零均值方差为  $\sigma_{i,j}^2$  的复高斯随机变量。直接传输时，PD 和 SD 接收信号分别为

$$y_{PD} = \sqrt{P_{PT}}h_{PT,PD}x_{PT} + \sqrt{P_{ST}}h_{ST,PD}x_{ST} + n_{PD} \quad (1)$$

$$y_{SD} = \sqrt{P_{ST}}h_{ST,SD}x_{ST} + \sqrt{P_{PT}}h_{PT,SD}x_{PT} + n_{SD} \quad (2)$$

协作传输时，SR, PD, SD 接收信号为

$$y_{SR} = \sqrt{P_{PT}}h_{PT,SR}x_{PT} + \sqrt{P_{ST}}h_{ST,SR}x_{ST} + n_{SR} \quad (3)$$

$$y_{PD} = \sqrt{P_{PT}}h_{PT,PD}x_{PT} + \sqrt{P_{ST}}h_{ST,PD}x_{ST} + n_{PD} \quad (4a)$$

$$y_{PD} = \sqrt{P_{PT}}h_{PT,PD}x_{PT} + \sqrt{P_{SR}}h_{SR,PD}x_{SR} + n_{PD} \quad (4b)$$

$$y_{SD} = \sqrt{P_{ST}}h_{ST,SD}x_{ST} + \sqrt{P_{SR}}h_{SR,SD}x_{SR} + n_{SD} \quad (5)$$

$n_{SR}$ ,  $n_{PD}$ ,  $n_{SD}$  是零均值功率谱密度为  $N_0$  的加性高斯白噪声，式(4a)和式(4b)分别表示在 ST 和 SR 干扰下 PD 的接收信号。

### 2.2 中继协作准则

中继节点并非总是有必要协助源节点发送数据。中继节点协作能力的大小跟信源到中继节点和目的节点的瞬时信道增益、节点发射功率有关。若源到中继的链路质量很好，则中继始终能够正确译码。定义协作水平

$$\alpha = P_{ST} |h_{ST,SD}|^2 / P_{SR} |h_{ST,SR}|^2 \quad (6)$$

同时记系统协作门限为  $\alpha_T$ ，表示协作水平值的上限。如果  $\alpha > \alpha_T$  则信源 ST 仅与目的节点进行直接传输，称直接传输模式，并用  $\psi = \{P_{ST} |h_{ST,SD}|^2 > \alpha_T P_{SR} |h_{ST,SR}|^2\}$  表示；如果  $\alpha \leq \alpha_T$  则信源将使用中继并采用选择解码转发(SDF)模式传输数据，称协作传输模式，并用  $\bar{\psi} = \{P_{ST} |h_{ST,SD}|^2 \leq \alpha_T P_{SR} |h_{ST,SR}|^2\}$  表示。

参考文献[9]，本文用中断概率来表征主用户网络传输的 QoS。假设主用户网络的中断概率门限值为  $P_{out-T}$ ，中断速率为  $R_p$ ，由文献[4]得主用户网络在式(4a)情况下中断概率为

$$P_{\text{out}} = P_r \left( \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\text{PT}} |h_{\text{PT,PD}}|^2}{P_{\text{ST}} |h_{\text{ST,PD}}|^2 + N_0} \right) < R_p \right)$$

$$= 1 - \frac{\gamma_{\text{PT}} \sigma_{\text{PT,PD}}^2}{\gamma_{\text{PT}} \sigma_{\text{PT,PD}}^2 + \gamma_{\text{ST}} \sigma_{\text{ST,PD}}^2 \zeta} \exp \left( -\frac{\zeta}{\gamma_{\text{PT}} \sigma_{\text{PT,PD}}^2} \right) \quad (7)$$

$\gamma_{\text{PT}} = P_{\text{PT}}/N_0$  和  $\gamma_{\text{ST}} = P_{\text{ST}}/N_0$  分别表示 PT 和 ST 的发射信噪比(SNR),  $P_r(\cdot)$  表示求概率,  $\zeta = 2^{R_p} - 1$ , 由  $P_{\text{out}} \leq P_{\text{out-T}}$  得

$$P_{\text{ST}} \leq \frac{\sigma_{\text{PT,PD}}^2 P_{\text{PT}}}{\sigma_{\text{ST,PD}}^2 \zeta} \left[ \frac{\exp(-\zeta/\gamma_{\text{PT}} \sigma_{\text{PT,PD}}^2)}{1 - P_{\text{out-T}}} - 1 \right] \quad (8)$$

从式(8)可以看出若  $\exp(-\zeta/\gamma_{\text{PT}} \sigma_{\text{PT,PD}}^2) \geq 1 - P_{\text{out-T}}$  则  $P_{\text{ST}} \leq 0$ , 意味着此时次用户无法使用该信道。系统初始化阶段取最大平均功率

$$P_{\text{ST}} = \frac{\sigma_{\text{PT,PD}}^2 P_{\text{PT}}}{\sigma_{\text{ST,PD}}^2 \zeta} \left[ \frac{\exp(-\zeta/\gamma_{\text{PT}} \sigma_{\text{PT,PD}}^2)}{1 - P_{\text{out-T}}} - 1 \right] \quad (9)$$

同理可得  $P_{\text{SR}}$ 。令  $P_{\text{SR}}/P_{\text{ST}} = \beta$ , 则  $\psi = \{ |h_{\text{ST,SD}}|^2 > \alpha_T \beta |h_{\text{ST,SR}}|^2 \}$ ,  $\bar{\psi} = \{ |h_{\text{ST,SD}}|^2 \leq \alpha_T \beta |h_{\text{ST,SR}}|^2 \}$ 。

系统初始化  $\beta$  后,  $\alpha_T$  的值可以作为系统参数给出。本文在第3节有关于求解  $\alpha_T$  的最优解  $\alpha_{T\text{-OP}}$  的内容, 所以该协作准则在一帧内完整的流程如下:

(1)源节点 ST 计算第  $k$  帧  $\alpha_T$  的最优协作门限  $\alpha_{T\text{-OP}}$  和最优功率比  $\beta_{\text{OP}}$ ;

(2)进行最优功率分配并令  $\alpha_T = \alpha_{T\text{-OP}}$ , 同时将当前协作水平  $\alpha$  与  $\alpha_T$  比较, 若  $\alpha > \alpha_T$  则采用直接传输模式, 否则采用协作传输模式。源节点 ST 通过控制信令将此信息通知 SR 和 SD;

(3)计算第  $(k+1)$  帧, 重复以上过程。

### 3 最优协作门限和最优功率比

频带利用率和系统误符号率是用来表征系统性能的两个重要参量, 本小节通过对系统频带利用率和误符号率的分析得到关于  $\alpha_T$ ,  $\beta$  的表达式, 然后基于系统性能的折中定义目标函数, 最后描述了求解全局最优解的粒子群算法。

#### 3.1 平均带宽效率

我们首先计算直接传输模式和协作中继模式被采用的概率, 然后利用计算出来的概率得到带宽效率的近似表达式。

直接传输模式的概率可以表示如下:

$$P_r(\psi) = P_r \left( |h_{\text{ST,SD}}|^2 > \alpha_T \beta |h_{\text{ST,SR}}|^2 \right)$$

$$= \int_0^\infty P_{|h_{\text{ST,SR}}|^2} \left( \frac{|h_{\text{ST,SD}}|^2}{\alpha_T \beta} \right) P_{|h_{\text{ST,SD}}|^2} \left( |h_{\text{ST,SD}}|^2 \right) d|h_{\text{ST,SD}}|^2 \quad (10)$$

其中  $|h_{i,j}|^2$  服从均值为  $\sigma_{i,j}^2$  的指数分布,  $p_X(x)$  和  $P_X(x)$  分别表示变量  $x$  的概率密度函数(PDF)和累积概率分布函数(CDF)

$$\left. \begin{aligned} p_X(x) &= \frac{1}{\sigma_{i,j}^2} \exp(-x/\sigma_{i,j}^2) U(x) \\ P_X(x) &= P_r(X \leq x) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$U(x)$  是阶跃函数, 将式(11)代入式(10)得

$$P_r(\psi) = 1 - \int_0^\infty \frac{1}{\sigma_{\text{ST,SD}}^2} \cdot \exp \left( -\left( \frac{|h_{\text{ST,SD}}|^2}{\sigma_{\text{ST,SD}}^2} + \frac{|h_{\text{ST,SD}}|^2}{\alpha_T \beta \sigma_{\text{ST,SR}}^2} \right) d|h_{\text{ST,SD}}|^2 \right)$$

$$= \frac{\sigma_{\text{ST,SD}}^2}{\sigma_{\text{ST,SD}}^2 + \alpha_T \beta \sigma_{\text{ST,SR}}^2} \quad (12)$$

中继协作模式的概率为

$$P_r(\bar{\psi}) = 1 - P_r(\psi) = \frac{\alpha_T \beta \sigma_{\text{ST,SR}}^2}{\sigma_{\text{ST,SD}}^2 + \alpha_T \beta \sigma_{\text{ST,SR}}^2} \quad (13)$$

若用传输单位符号对信道的利用率(Symbol Per Channel Using, SPCU)来表示对带宽效率的度量, 则直接传输模式带宽效率为 1 SPCU, 而中继协作模式带宽效率为 0.5 SPCU, 所以平均频谱效率为

$$R_s = P_r(\psi) + \frac{1}{2} P_r(\bar{\psi}) = \frac{2\sigma_{\text{ST,SD}}^2 + \alpha_T \beta \sigma_{\text{ST,SR}}^2}{2\sigma_{\text{ST,SD}}^2 + 2\alpha_T \beta \sigma_{\text{ST,SR}}^2} \quad (14)$$

#### 3.2 平均误符号率

假设次用户采用 4PSK 调制, 定义系统平均误符号率 SER 为

$$P_r(e) = P_r(e|\psi) \cdot P_r(\psi) + P_r(e|\bar{\psi}) \cdot P_r(\bar{\psi}) \quad (15)$$

其中  $P_r(e|\psi) \cdot P_r(\psi)$  表示直接传输下的 SER,  $P_r(e|\bar{\psi}) \cdot P_r(\bar{\psi})$  表示中继协作模式下的 SER。

(1)直接传输 SER 直接传输的瞬时信噪比为

$$\gamma^\psi = \frac{P_{\text{ST}} |h_{\text{ST,SD}}|^2}{N_0} \quad (16)$$

直接传输的条件 SER 为

$$P_r(e|\psi; |h_{\text{ST,SD}}|^2) = \Phi(\gamma^\psi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{3\pi}{4}} \exp \left( -\frac{\gamma^\psi}{2 \sin^2 \theta} \right) d\theta \quad (17)$$

参照文献[13], 令  $t = |h_{\text{ST,SD}}|^2$ , 将式(17)对  $t$  求平均可得

$$P_r(e|\psi) P_r(\psi) = F_1 \left( 1 + \frac{P_{\text{ST}} \sigma_{\text{ST,SD}}^2}{2N_0 \sin^2 \theta} \right) - F_1 \left( 1 + \frac{\sigma_{\text{ST,SD}}^2}{\alpha_T \beta \sigma_{\text{ST,SR}}^2} + \frac{P_{\text{ST}} \sigma_{\text{ST,SD}}^2}{2N_0 \sin^2 \theta} \right) \quad (18)$$

其中  $F_1(x(\theta)) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{3\pi}{4}} \frac{1}{x(\theta)} d\theta$ 。

(2) 中继协作传输 SER 中继协作传输目的点采用最大比合并(MRC), 合并器输出瞬时信噪比可以写为

$$\gamma^{\bar{\psi}} = \frac{P_{ST} |h_{ST,SD}|^2 + \tilde{P}_{SR} |h_{SR,SD}|^2}{N_0} \quad (19)$$

在 SR 正确译码 ST 信息情况下,  $\tilde{P}_{SR} = P_{SR}$ , 否则  $\tilde{P}_{SR} = 0$ 。令  $t_1 = |h_{ST,SD}|^2$ ,  $t_2 = |h_{ST,SR}|^2$ ,  $t_3 = |h_{SR,SD}|^2$ , 则中继协作传输条件 SER 为

$$P_r(e|\bar{\psi}, t_1, t_2, t_3) = \Phi(\gamma^{\bar{\psi}}) \Big|_{\tilde{P}_{SR}=0} \Phi\left(\frac{P_{SR}t_2}{N_0}\right) + \Phi(\gamma^{\bar{\psi}}) \Big|_{\tilde{P}_{SR}=P_{SR}} \Phi\left(\frac{P_{SR}t_2}{N_0}\right) \quad (20)$$

参考文献[13], 将式(20)对  $t_1, t_2, t_3$  求平均可得

$$P_r(e|\bar{\psi})P_r(\bar{\psi}) = F_2\left(\frac{1}{\pi^2}, P_{ST}, 0, \frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}\right) - F_2\left(\frac{1}{\pi^2}, P_{ST}, P_{SR}, \frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}\right) + F_1\left(\left[1 + \frac{\sigma_{ST,SD}^2}{\alpha_T \beta \sigma_{ST,SR}^2} + \frac{P_{ST} \sigma_{ST,SD}^2}{2N_0 \sin^2 \theta}\right] \cdot \left[1 + \frac{P_{SR} \sigma_{SR,SD}^2}{2N_0 \sin^2 \theta}\right]\right) \quad (21)$$

其中

$$F_2(C, x, y, \theta_1, \theta_2) = C \int_0^{\theta_1} \int_0^{\theta_2} \left\{ d\theta_1 d\theta_2 \sqrt{\left[1 + \frac{\sigma_{ST,SD}^2}{\alpha_T \beta \sigma_{ST,SR}^2} + \frac{x \sigma_{ST,SD}^2}{2N_0} \cdot \left(\frac{1}{\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2}\right)\right] \left[1 + \frac{x \sigma_{ST,SD}^2}{2N_0 \sin^2 \theta_1}\right] \cdot \left[1 + \frac{y \sigma_{SR,SD}^2}{2N_0 \sin^2 \theta_1}\right]}\right\} \quad (22)$$

联立式(18)和式(21), 得到在高信噪比条件下 SER 的一个上界<sup>[14]</sup>为  $P_r(e) \leq (\Delta/\gamma)^2$

$$\Delta^2 \approx \frac{4\eta^2(1-\eta)\sigma_{SR,SD}^2 + 7\eta^3\sigma_{ST,SR}^2}{2\alpha_T(1-\eta)\sigma_{ST,SD}^2\sigma_{ST,SR}^2\sigma_{SR,SD}^2} + \frac{\sigma_{SR,SD}^2(1-\eta) + 2\eta\sigma_{ST,SR}^2}{10\eta^4(1-\eta)^2\sigma_{ST,SD}^2} \quad (23)$$

其中  $\gamma = (P_{ST} + P_{SR})/N_0$ ,  $\eta = 1/(1+\beta)$ , 称  $\Delta$  为协作增益。

### 3.3 最优协作门限和最优功率比优化

本节同时选取  $R_s$  和  $\Delta$  为优化目标来寻找最优协作门限  $\alpha_{T-OP}$  和最优功率比  $\beta_{OP}$ 。从提高系统性能

的角度来看, 应使  $R_s$  尽可能大, 而  $\Delta$  尽可能小, 称  $\Delta/R_s$  为系统性能函数, 故该最优化问题可写为

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\alpha_T, \beta} \Delta/R_s \\ \text{s.t.} \quad 0 < \alpha_T \\ \quad \quad 0 < \beta \end{array} \right\} \quad (24)$$

式(24)是关于  $\alpha_T$  和  $\beta$  的非凸优化, 联合优化了协作门限  $\alpha_T$  和发送功率比  $\beta$ , 不易求出其解析解, 但可用启发式算法求解。为了防止在搜索过程中陷入局部最优, 需采用全局最优搜索算法。

粒子群优化算法是一种有效求解全局最优解的搜索方法, 其首先在解空间中初始化一群粒子, 并用位置、速度和适应度值 3 项指标表示该粒子特征。位置是优化问题的一个潜在解, 速度决定了粒子运动的方向和距离, 适应度值是由目标函数计算得到。所有粒子适应度值最优的位置记为群体极值, 迭代过程最终的群体极值即为最优解  $(\alpha_{T-OP}, \beta_{OP})$ 。用 2 维向量  $\mathbf{X} = [x_1, x_2]^T$  表示一个粒子, 粒子速度为  $\mathbf{V} = [v_1, v_2]^T$ , 个体极值为  $\mathbf{G} = [g_1, g_2]^T$ , 种群极值为  $\mathbf{Q} = [q_1, q_2]^T$ , 粒子的速度和位置更新公式为

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{V}_i^{k+1} = \omega \mathbf{V}_i^k + m_1 n_1 (\mathbf{G}_i^k - \mathbf{X}_i^k) + m_2 n_2 (\mathbf{Q}_i^k - \mathbf{X}_i^k) \\ \mathbf{X}_i^{k+1} = \mathbf{X}_i^k + \mathbf{V}_i^{k+1} \end{array} \right\} \quad (25)$$

式中  $\omega$  为惯性权重,  $k$  为迭代次数,  $m_1, m_2$  为加速度因子,  $n_1, n_2$  为 [0,1] 之间随机数, 算法流程图见图 3。

## 4 数值仿真

基于上述分析, 本节对  $\alpha_T, \beta$  与 SER, 系统性能函数之间的变化关系进行了数值仿真。仿真中的信道均采用瑞利信道, 加性高斯白噪声功率  $N_0 = -60$  dBm, 主用户网络中断概率门限值  $P_{out-T} = 10^{-4}$ , 节点最大发射功率  $P_{max}^{ST} = P_{max}^{SR} = 0.3$  mW。

图 4(a) 描述了  $\beta = 1$  时平均误符号率 SER 与  $\alpha_T$

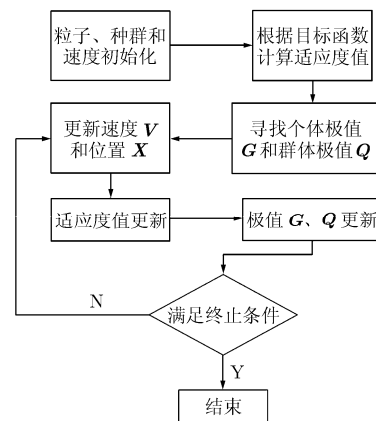


图 3 粒子群优化算法流程

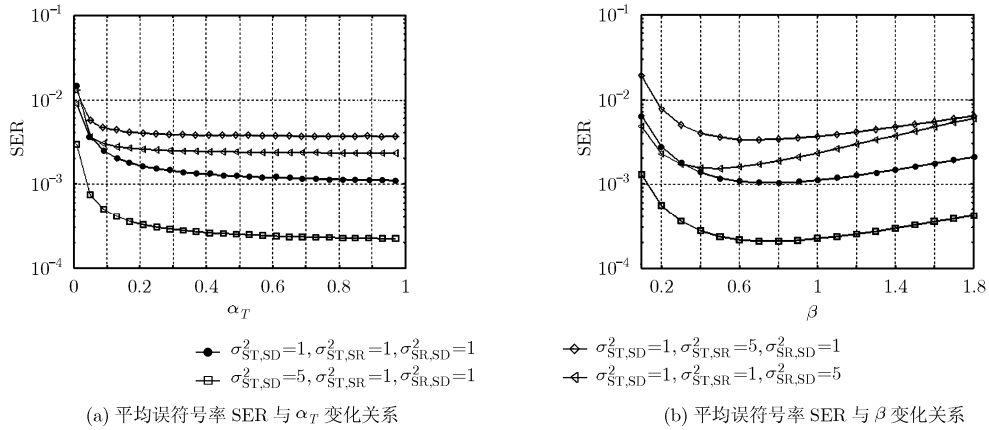


图 4 平均误符号率 SER 与  $\alpha_T, \beta$  的变化关系

变化关系，图 4(b)描述了  $\alpha_T = 1$  时平均误符号率 SER 与  $\beta$  变化关系。信噪比设为 20 dB，总体上 SER 随着  $\alpha_T$  单调递减，而在相同的信道条件下，SER 与功率比  $\beta$  并没有相同的变化关系。

图 5(a)描述了  $\beta = 1$  时目标函数  $\Delta/R_s$  与  $\alpha_T$  的变化关系。在 4 种不同的信道下最优协作门限分别为  $\alpha_{T-OP} = 0.43, \alpha_{T-OP} = 0.90, \alpha_{T-OP} = 0.09$  和  $\alpha_{T-OP} = 0.18$ ，特别地当  $\sigma_{ST,SD}^2 = 5, \sigma_{ST,SR}^2 = 1, \sigma_{SR,SD}^2 = 1$  时，目标函数值最小，且此时的  $\alpha_{T-OP}$  相对最大，说明采用协作传输模式的概率增大，系统的带宽效率和误符号率达到最优的折中。图 5(b)描述了  $\alpha_T = 1$  时目标函数  $\Delta/R_s$  与  $\beta$  的变化关系。在 4 种不同的信道下最优功率比分别为  $\beta_{OP} = 0.63, \beta_{OP} = 0.70, \beta_{OP} = 0.54$  和  $\beta_{OP} = 0.39$ ，且当  $\sigma_{ST,SD}^2 = 5, \sigma_{ST,SR}^2 = 1, \sigma_{SR,SD}^2 = 1$  时，目标函数值最小，达到最优折中，此时中继 SR 参与协作的概率最大。由此可得下面的结论：良好的直接链路状态和尽量使用中继参与协作有助于系统性能的最优化。

表 1 给出采用粒子群优化算法优化系统性能函数得到的最优协作门限  $\alpha_{T-OP}$  和最优功率比  $\beta_{OP}$ 。仿

真中共选取 9 组信道，搜索区域限定  $0 < \alpha_T < 100, 0 < \beta < 100$ 。从表中可以看出  $\beta_{OP}$  比较稳定，基本维持在 0.6 左右，这对于确定 ST 和 SR 的发射功率具有重要指导意义，此时的平均带宽利用率  $R_s$  基本处于区间[0.8,0.9]。最优协作门限  $\alpha_{T-OP}$  和协作增益  $\Delta$  的波动相对较大，说明随着信道参数的变化，需不断调整门限值，对于缓慢变化的信道而言该计算所带来的开销可以忽略不计。

### 5 结束语

针对协作中继节点何时必要参与协作的问题，本文提出了一种基于协作水平的中继协作准则。考虑到认知无线网络中次用户对主用户的干扰，文中首先给出了协作水平的定义和表达式，然后基于此表达式推导了系统的平均带宽效率和误符号率公式，二者皆是关于协作门限和功率分配比的函数。为了得到最优协作门限和最优功率比，文中采用粒子群优化算法求解目标函数的全局最优解。该方法可以有效搜索全局最优解且实现简单，在缓慢变化的信道中该方法仅带来很少的计算开销。文章最后

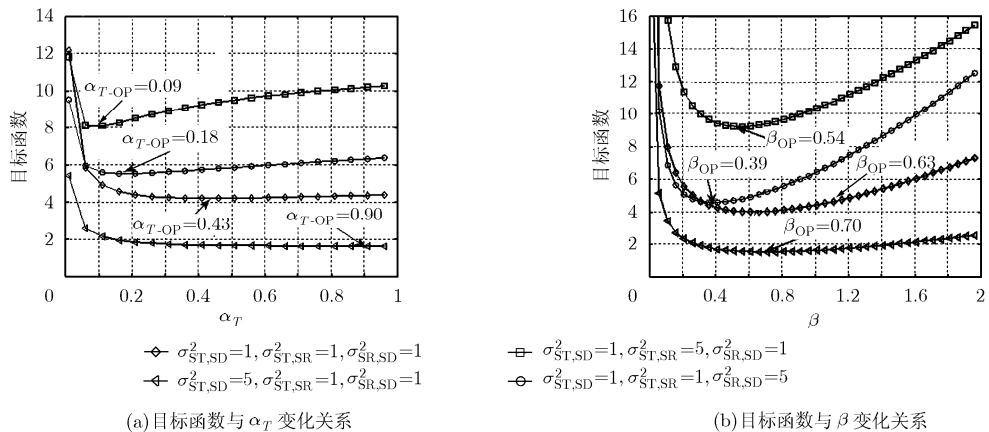


图 5 目标函数与  $\alpha_T, \beta$  的变化关系

表 1 粒子群优化算法联合优化  $\alpha_T$  和  $\beta$ 

$\sigma_{ST,SD}^2$	$\sigma_{ST,SR}^2$	$\sigma_{SR,SD}^2$	$\alpha_{T-OP}$	$\beta_{OP}$	$R_s$	$\Delta$
1	1	1	0.90	0.65	0.82	3.27
2	1	1	1.24	0.62	0.86	2.23
1	2	1	0.37	0.72	0.82	4.36
1	1	2	0.76	0.54	0.85	3.47
2	2	2	0.44	0.60	0.89	3.05
3	2	1	0.66	0.68	0.89	2.37
1	2	3	0.28	0.57	0.87	4.60
3	1	2	1.28	0.52	0.91	1.90
2	1	3	0.95	0.48	0.91	2.52

的仿真表明良好的直接链路状态和尽量使用中继参与协作有助于系统性能的最优化，而且最优功率分配比较为稳定，这一结论对于确定源节点和中继节点的功率分配方案具有指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] Mitola J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio[D]. [Ph. D. dissertation], Stockholm Royal Institute, 2000.
- [2] Xing Yiping, Mathur C N, Haleem M A, *et al.* Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(4): 423-433.
- [3] Lee Jemin, Wang Hano, Andrews J G, *et al.* Outage probability of cognitive relay networks with interference constrains[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(2): 1-7.
- [4] Hunter T E and Nosratinia A. Cooperative diversity through coding[C]. Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory, Laussane, Switzerland, 2002: 220-225.
- [5] Laneman J N, Tse D N C, and Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [6] Hunter T E and Nosratinia A. Diversity through coded cooperation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(2): 283-289.
- [7] Zhao Guodong, Yang Chenyang, Li Dongdong, *et al.* Channel allocation for cooperative relays in cognitive radio networks[C]. 2010 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), Dallas, Texas, 2010: 3258-3261.
- [8] Jayasinghe L K S and Rajatheva N. Optimal power allocation for relay assisted cognitive radio networks[C]. 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall, Ottawa, Canada, 2010: 6-9.
- [9] Kandukuri S and Boyd S. Optimal power control in interference-limited fading wireless channels with outage-probability specifications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(1): 46-55.
- [10] Naeem M, Lee D C, and Pareek U. An efficient multiple relay selection scheme for cognitive radio systems[C]. 2010 IEEE International Conference on Communications Workshops, South Africa, Capetown, 2010: 1-5.
- [11] Zou Yulong, Zhu Jia, Zheng Baoyu, *et al.* An adaptive cooperation diversity scheme with best-relay selection in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(10): 5438-5445.
- [12] Li Liying, Zhou Xiangwei, Xu Hongbing, *et al.* Simplified relay selection and power allocation in cooperative cognitive radio systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(1): 33-36.
- [13] Ibrahim A S, Sadek A K, Su Wei-feng, *et al.* Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with?[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2814-2827.
- [14] Liu K J R, Sadek A K, Su W, *et al.* Cooperative Communications and Networking [M]. London: Cambridge University Press, 2009: 220-234.

张纬良：男，1986年生，硕士生，研究方向为协作通信和认知无线电。

郑宝玉：男，1945年生，教授，博士生导师，研究方向为智能信号处理、通信信号处理和量子信号处理等。

岳文静：女，1982年生，博士，讲师，研究方向为认知无线电。