

## 基于认知无线电系统的协作中继分布式功率分配算法

郭艳艳<sup>①②</sup> 康桂霞<sup>①</sup> 张宁波<sup>①</sup> 张平<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

<sup>②</sup>(山西大学物理电子工程学院 太原 030006)

**摘要:** 协作通信与直接通信相比能够显著提高系统性能。协作通信中的一个关键问题是管理中继节点及有效地进行功率分配。尤其对于频谱共享的认知无线电(Cognitive Radio, CR)系统, 协作方案的设计不仅要最大限度地提高认知网络协作的功率效率, 而且需要最小化对主系统的干扰。该文针对认知无线电系统的协作通信问题, 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)模式下的功率分配及联合优化算法, 在保证主系统传输性能不受影响的前提下, 提高认知系统的传输速率。仿真结果表明该文提出的自适应协作传输方案, 和直接传输及等功率传输方案相比获得了进一步的性能增益, 中断概率显著下降。

**关键词:** 认知无线电系统; 协作分集; 中断概率; 分布式功率分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)10-2463-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00957

## A Distributed Power Allocation for Cooperative Transmission in Cognitive Radio Systems

Guo Yan-yan<sup>①②</sup> Kang Gui-xia<sup>①</sup> Zhang Ning-bo<sup>①</sup> Zhang Ping<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Beijing University of Posts and Telecommunications, Ministry of Education, Beijing 100876, China)

<sup>②</sup>(School of Physics and Electronics Engineering ShaXi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** The cooperative communication can get better performance of systems than the direct transmission. In particular, how to manage cooperative relays and allocate power among them especially for Cognitive Radio (CR) is one of the most important issue in wireless cooperative diversity systems. For CR systems, cooperative power allocation strategy need consider avoiding the interference with the primary (licensed) users. In this paper, a distributed transmit power allocation algorithm for multi-relays based on Amplify and Forward (AF) cooperative transmission is proposed for spectrum sharing CR systems. It optimizes the performance of the CR system, while the interference experienced by the licensed users is limited. The simulations validate the effectiveness of proposed algorithm by comparing it with the direct transmission and the scheme where equal weights are assigned to the relays.

**Key words:** Cognitive Radio (CR); Cooperative diversity; Outage probability; Distributed power allocation

### 1 引言

无线频谱已成为现代通信中不可或缺的宝贵的资源, 无线频谱共享技术成为新一代无线移动通信的核心技术, 认知无线电能充分利用频谱资源实现频谱共享, 解决未来频谱资源短缺(尤其低频段)和现有频谱资源未被充分利用的矛盾。在认知无线电系统(Cognitive Radio, CR)中, 若认知无线电系统工作于共道模式的发射功率过大, 就会对工作于该频段上的主系统(Primary System, PS)通信造成干

扰。为了量化认知无线电系统产生的干扰, 美国联邦通信委员会(Federal Communication Committee, FCC)提出了干扰温度(interference temperature)<sup>[1]</sup>的概念。认知无线电系统的应用前提是其产生的干扰温度处于主系统设定的界限以内。

协作通信与直接通信相比能提供空间分集增益, 实现目标用户高速、高可靠性的数据传输。协作通信中的一个关键问题是如何分配和管理中继节点。文献[2-6]提出了基于非认知网络中继节点的最佳选取及功率分配算法, 文献证明了在中继已知信道状态信息的情况下, 协作分集能够显著地提高系统性能。但是, 对于频谱共享的认知网络, 协作方案的设计还要考虑对主系统的影响, 即不仅需要最大限度地提高认知网络协作的功率效率, 而且需要

2009-07-03 收到, 2010-03-11 改回

国家科技支撑计划项目(2008BAH24B02), 国家 863 计划项目(2009AA02Z412), 北京市科技新星项目(2007A046)和高等学校学科创新引智计划项目(B07005)资助课题

通信作者: 郭艳艳 luegyy@163.com

最小化对主系统的干扰。

已经有一些研究针对认知无线电系统下的协作中继功率分配问题。Mietzner 等人<sup>[7,8]</sup>针对认知系统和授权系统同时工作在相同无线信道的协作模式,提出了分布式传输功率分配方法,该方法中,协作节点功率分配仅仅依靠协作节点和主系统接收设备间的信道状态信息,不考虑认知系统中自己的信道状态(包括源到目的节点,源到中继节点及中继到目的节点的信道状态)的影响,而这恰恰是影响传统的协作通信中协作节点选择及功率分配的关键因素。

本文针对认知无线电系统的协作通信问题,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)模式下的功率分配及联合优化算法,在保证主系统不受影响的前提下,优化认知网络的系统性能。

本文的主要内容安排如下:首先给出基于放大重传的多中继协作系统模型;接下来,理论上推导基于放大重传的功率分配优化模型;然后,根据优化模型提出分布式功率分配方案;最后给出分布式功率方案的数值仿真。结果表明本文提出的自适应协作传输获得了进一步的性能增益,中断概率显著下降。

## 2 系统模型

### 2.1 认知系统模型描述

图 1 为认知无线电系统协作传输应用场景,考虑 CR 系统包括一个源节点(source),  $N$  个协作中继节点(relay)和一个目的节点(destination)。假设 CR 系统和主系统同时在相同的频带上发送和接收信号。CR 系统的数据传输应该保证主系统的传输不被打断。假设 CR 系统的中继节点及目的节点距离主系统的源足够远,不受主系统的干扰。

在 CR 系统,假定信道是平稳衰落信道,并且所有中继节点知道源节点到自己及自己到目的节点间的信道状态。进一步假设传输时隙分成两部分,在第一部分时间段,源广播消息到目的节点及协作

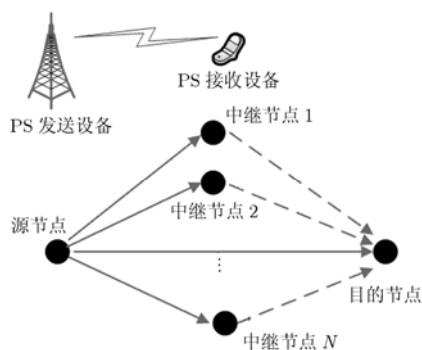


图 1 认知系统下的协作系统模型

中继节点,称广播阶段;在第二部分时间段,协作中继节点转发从源节点接收的消息,称协作阶段。

在广播阶段,源发射信号  $x$ ,目的节点和中继节点接收的信号分别为

$$y_{s,d} = h_{s,d}x + w_{s,d} \quad (1)$$

$$y_{s,i} = h_{s,i}x + w_{s,i} \quad (2)$$

这里  $h_{s,d}$  和  $h_{s,i}$  分别是源节点到目的节点、源节点到中继节点  $i$  的信道增益,  $w_{s,d}$  和  $w_{s,i}$  是在广播阶段目的节点及中继节点  $i$  的接收噪声,假设文中所有接收的噪声服从复高斯分布,均值为零,方差为  $\sigma_n^2$ 。

在放大转发协作模式下,协作阶段目的节点接收中继节点发送的信号为

$$\begin{aligned} y_{r,d} &= \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2}} h_{i,d} (h_{s,i}x + w_{s,i}) + w_{r,d} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{h_{s,1}h_{1,d}}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,1}|^2}} & \dots & \frac{h_{s,N}h_{N,d}}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,N}|^2}} \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix} x \\ &\quad + \begin{bmatrix} \frac{w_{s,1}h_{1,d}}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,1}|^2}} & \dots & \frac{w_{s,N}h_{N,d}}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,N}|^2}} \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix} + w_{r,d} \\ &= \mathbf{Hf}x + \mathbf{Wf} + w_{r,d} \end{aligned} \quad (3)$$

这里  $h_{i,d}$  是协作节点到目的节点的信道增益;  $w_{r,d}$  是目的节点在协作阶段的接收噪声,  $\frac{1}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2}}$  是协

作节点的功率归一化因子,由于中继对接收到的信号进行放大转发时需要将转发信号进行能量归一化,即所有节点都以等能量发射信号。向量  $\mathbf{f} = [\alpha_1 \dots \alpha_N]^T$  是功率权重因子。合并式(1)和式(3),可以得到

$$\begin{bmatrix} y_{s,d} \\ y_{r,d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{s,d} \\ \mathbf{Hf} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} w_{s,d} \\ \mathbf{Wf} + w_{r,d} \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(4),得到目的节点的信噪比

$$\gamma_d = \frac{P_{co}\mathbf{f}^H\mathbf{H}^H\mathbf{Hf} + P_s|h_{s,d}|^2}{P_{co}\mathbf{f}^H\mathbf{W}^H\mathbf{Wf} + |w_{r,d}|^2 + |w_{s,d}|^2} \quad (5)$$

这里  $P_s$  是源节点的发射功率,  $P_{co}$  是参与协作的所有中继节点发射的总功率。文中调整向量  $\mathbf{f}$  达到最大化目的节点的信噪比,如文献[5]所述,在协作模式下,信噪比的优化可以用下式描述

$$\gamma_{r,d} = \max_{\mathbf{f}} E \left\{ \frac{P_{co}\mathbf{f}^H\mathbf{H}^H\mathbf{Hf}}{P_{co}\mathbf{f}^H\mathbf{W}^H\mathbf{Wf} + |w_{r,d}|^2} \right\} \quad (6)$$

可以看到,中继节点的传输功率和信道状态  $h_{i,d}$  和  $h_{s,i}$  有关,在不考虑对主系统的影响时,CR 系统

中继节点的传输功率应该由信道状态  $h_{i,d}$  和  $h_{s,i}$  决定。文献[5]给出了优化方法

$$\begin{aligned} \gamma_{r,d} &= \max_{\mathbf{f}} E \left\{ \frac{P_{co} \mathbf{f}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{f}}{\mathbf{f}^H \left[ P_{co} \mathbf{W}^H \mathbf{W} + |w_{r,d}|^2 \mathbf{I}_N \right] \mathbf{f}} \right\} \\ &= \max_{\mathbf{f}} \frac{\mathbf{f}^H E \left\{ \left[ P_{co} \mathbf{W}^H \mathbf{W} + |w_{r,d}|^2 \mathbf{I}_N \right]^{-1} \right\} P_{co} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{f}}{\mathbf{f}^H \mathbf{f}} \\ &= \max_{\mathbf{f}} \frac{\mathbf{f}^H \mathbf{A} \mathbf{f}}{\mathbf{f}^H \mathbf{f}} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可以看到,  $\gamma_{r,d}$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的瑞利熵, 能够得到  $\lambda_{r,d} = \lambda_{\max}$ , 这里,  $\lambda_{\max}$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的最大特征值, 对应的优化值  $\mathbf{f}$  为矩阵最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应方程的解。

## 2.2 主系统干扰模型

假设主系统中源以固定的功率  $P_p$  及速率  $R_p$  和接收设备进行通信。源发射信号  $x_p$ , 则主系统接收设备在认知系统源节点广播阶段的接收信号为

$$y_{s,p} = h_p x_p + h_{s,p} x + w_{s,p} \quad (8)$$

这里  $h_p$  为主系统源设备到接收设备的信道增益;  $h_{s,p}$  为 CR 系统源节点到主系统接收设备的信道增益,  $w_{s,p}$  为主系统接收设备在广播阶段接收的噪声。则这时主系统接收设备接收信噪比为

$$\gamma_{s,p} = \frac{|h_p|^2 P_p}{|h_{s,p}|^2 P_s + |w_{s,p}|^2} = \frac{|h_p|^2 P_p}{|h_{s,p}|^2 P_s + \sigma_n^2} \quad (9)$$

由于主系统的发射功率及噪声一定, 则应该调整源节点的发射功率  $P_s$ , 满足  $|h_{s,p}|^2 P_s \leq \zeta$ 。这里, 定义  $\zeta$  是主系统的最大干扰门限。

在协作阶段, 主系统接收设备的接收信号为

$$\begin{aligned} y_{r,p} &= h_p x_p + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2}} h_{i,p} (h_{s,i} x + w_{s,i}) + w_{r,p} \\ &= h_p x_p + \left[ \frac{h_{s,1} h_{1,p}}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,1}|^2}} \cdots \frac{h_{s,N} h_{N,p}}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,N}|^2}} \right] \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix} x \\ &\quad + \left[ \frac{w_{s,1} h_{1,p}}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,1}|^2}} \cdots \frac{w_{s,N} h_{N,p}}{\sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,N}|^2}} \right] \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix} + w_{r,p} \\ &= h_p x_p + \mathbf{H}_{r,p} \mathbf{f} x + \mathbf{W}_{r,p} \mathbf{f} + w_{r,p} \end{aligned} \quad (10)$$

这里  $h_{i,p}$  为 CR 系统中继节点  $i$  到主系统接收设备的信道增益;  $w_{r,p}$  为主系统接收设备在协作阶段接收的噪声。

那么, 在协作阶段, 主系统接收设备的信噪比为

$$\begin{aligned} \gamma_p &= \frac{|h_p|^2 P_p}{P_{co} \mathbf{f}^H \text{diag} \left\{ |h_{1,p}|^2, \cdots, |h_{N,p}|^2 \right\} \mathbf{f} + |w_{r,p}|^2} \\ &= \frac{|h_p|^2 P_p}{I_N + \sigma_n^2} \end{aligned} \quad (11)$$

同样, 在协作阶段, 所有协作节点的传输功率应该小于主系统的最大干扰门限  $\zeta$ , 即

$$I_N = P_s \mathbf{f}^H \text{diag} \left\{ |h_{1,p}|^2, \cdots, |h_{N,p}|^2 \right\} \mathbf{f} \leq \zeta \quad (12)$$

这里  $I_N$  为协作阶段主系统接收设备接收到的总干涉功率。

## 3 分布式功率分配算法

为了最大化 CR 系统目的节点的信噪比, 结合上面所述, 优化问题可以表示为

$$\max_{\mathbf{f}} E \left\{ \frac{P_{co} \mathbf{f}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{f}}{P_{co} \mathbf{f}^H \mathbf{W}^H \mathbf{W} \mathbf{f} + |w_{r,d}|^2} \right\} \quad (13a)$$

$$\text{s.t. } I_N = \mathbf{f}^H \text{diag} \left\{ |h_{1,p}|^2, \cdots, |h_{N,p}|^2 \right\} \mathbf{f} \leq \zeta \quad (13b)$$

$$|h_{s,p}|^2 P_s \leq \zeta \quad (13c)$$

由上面的优化公式可以看出, 中继节点的传输功率不仅仅由 CR 系统源节点到中继节点, 中继节点到目的节点的信道状态有关; 考虑主系统的最大干扰门限影响, CR 系统中继节点的传输功率还和中继节点到主系统接收设备的信道状态有关。因此, 中继节点功率分配要由 CR 系统中源节点到所有中继节点, 所有中继节点到目的节点, 及所有中继节点到主系统接收设备的信道状态联合决定, 由此可见, 式(6)的优化方法不适用于 CR 系统。

得到上面优化问题解是很困难的, 需要一个中心网络节点(例如目的节点或者一个特定的中继节点)得到所有的信道状态, 并且利用群举法得到最优解, 并且, 计算完成后, 中心节点需要告知每一个中继节点它的发射功率。本文提出了一种分布式功率分配方法, 中继节点  $i$  仅仅根据当前的和自己相关信道状态  $h_{s,i}$ ,  $h_{i,d}$  及  $h_{i,p}$  来决定自己的传输功率, 具体功率分配如下:

$$\mathbf{f}_p = \beta \left[ \frac{h_{s,1}^* h_{1,d}^* |h_{s,1}|^2}{h_{1,p}^* \sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,1}|^2}} \sqrt{P_{co}} \cdots \frac{h_{s,N}^* h_{N,d}^* |h_{s,N}|^2}{h_{N,p}^* \sqrt{\sigma_n^2 + |h_{s,N}|^2}} \sqrt{P_{co}} \right]^T \quad (14)$$

这里  $\beta = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{|h_{s,i}|^6 |h_{i,d}|^2}{|h_{i,p}|^2 (\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2)}}$  是归一化常

量, 目的是为了满 足  $\mathbf{f}_p^H \mathbf{f}_p = P_{co}$ , 由目的节点在广播信道中周期广播  $\beta$  和  $P_{co}$  值.  $N$  个中继节点总发射功率按如下步骤计算:

$$(1) \text{ 计算总功率 } P_{co} = \frac{N\zeta}{\sum_{i=1}^N |h_{i,p}|^2};$$

(2) 根据式(14), 计算得到中继节点  $i$  的发射功率

$$P_i = \beta^2 \frac{|h_{s,i}|^6 |h_{s,i}|^2}{|h_{i,p}|^2 (\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2)} P_{co};$$

(3) 计算协作阶段协作节点总的干涉  $I_N =$

$$\beta^2 P_{co} \sum_{i=1}^N \frac{|h_{s,i}|^6 |h_{s,i}|^2}{\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2};$$

(4) 某些情况下可能存在  $I_N > \zeta$ , 这时候, 中继节点总的发射功率不变, 去掉最小的发射功率的中继节点, 即中继个数  $N = N - 1$ , 目的是使得  $I_N \leq \zeta$ .

#### 4 CR 系统中断概率分析

针对本文提出的分布式功率分配算法, 这部分分析它对 CR 系统性能的影响, 当采用多中继协作传输, 系统的互信息为

$$\chi = \frac{1}{2} \lg \left[ 1 + \left( P_s |h_{s,d}|^2 + P_{co} \mathbf{f}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{f} \right) \mathfrak{R}^{-1} \right] \quad (15)$$

这里  $\mathfrak{R} = E \left\{ \begin{bmatrix} w_{s,d} \\ \mathbf{W} \mathbf{f} + w_{r,d} \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} w_{s,d} \\ \mathbf{W} \mathbf{f} + w_{r,d} \end{bmatrix} \right\}$ , 将式(14)中

的  $\mathbf{f}_p$  代入

$$\begin{aligned} \mathfrak{R} &= 2\sigma_n^2 + \mathbf{f}_p^H E \{ \mathbf{W}^H \mathbf{W} \} \mathbf{f}_p \\ &= 2\sigma_n^2 + \mathbf{f}_p^H \text{diag} \left\{ \frac{\sigma_n^2 |h_{1,d}|^2}{\sigma_n^2 + |h_{s,1}|^2}, \dots, \frac{\sigma_n^2 |h_{N,d}|^2}{\sigma_n^2 + |h_{s,N}|^2} \right\} \mathbf{f}_p \\ &= \sigma_n^2 \left[ 2 + \frac{P_{co}}{\sum_{i=1}^N \frac{|h_{s,i}|^6 |h_{i,d}|^2}{|h_{i,p}|^2 (\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2)}} \right. \\ &\quad \left. \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|h_{s,i}|^6 |h_{i,d}|^4}{|h_{i,p}|^2 (\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2)^2} \right] \quad (16) \end{aligned}$$

$$\chi = \frac{1}{2} \lg \left[ 1 + \frac{1}{\sigma_n^2} \left( P_s |h_{1,d}|^2 + P_{co} \frac{\left( \sum_{i=1}^N \frac{|h_{s,i}|^4 |h_{i,d}|^2}{|h_{i,p}| (\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2)} \right)^2}{\sum_{i=1}^N \frac{|h_{s,i}|^6 |h_{i,d}|^2}{|h_{i,p}|^2 (\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2)}} \right) \right. \\ \left. \cdot \left( 2 + P_{co} \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|h_{s,i}|^6 |h_{i,d}|^4}{|h_{i,p}|^2 (\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2)^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{|h_{s,i}|^6 |h_{i,d}|^2}{|h_{i,p}|^2 (\sigma_n^2 + |h_{s,i}|^2)}} \right)^{-1} \right] \quad (17)$$

在协作模式下, CR 系统的中断概率为

$$P_{out} = \Pr(\chi < R_s) \quad (18)$$

这里  $R_s$  为 CR 系统要求的速率。

#### 5 仿真结果

本文在准静态瑞利平坦衰落信道下对分布式功率分配算法的效果进行了仿真。仿真中, 取  $R_p = 1$  bps/Hz, 节点  $i$  和节点  $j$  之间信道的平均信道增益与距离  $d_{i,j}$  的  $\alpha$  次方成反比, 即  $h_{i,j} = cd^{-\alpha}$ , 其中  $c$  是与传播环境有关的常数,  $\alpha$  是路径损耗指数, 仿真中取  $\alpha=3$ ,  $c=1$ ; 定义主系统接收设备的坐标为 (0,50), CR 系统源节点的坐标为 (0,0), 目标节点的坐标为 (80,0), 中继节点随机分布在源节点和目标节点之间。

首先, 设置  $\zeta = -50$  dB, 图 2 给出了分布式功率分配算法和直接传输及等功率分配算法的比较, 可以看出, CR 协作系统中, 由于主系统的干涉门限的影响, 等功率分配算法的系统性能比直接传输差, 而且, 等功率分配下, 协作节点的数目的增加不能改善系统的性能。但是, 分布式功率分配算法提高了 CR 系统的性能。随着系统噪声的减小, 得到更好的系统性能。图 3 给出了分布式功率分配算法下, 在系统噪声变化时, 不同的中继节点数目对 CR 系统性能的影响, 可以看出, 中继数目的增加, 系统性能变得更好。

其次, 设置  $\sigma_n^2 = -100$  dB, 图 4 给出了主系统最大干涉门限  $\zeta$  变化时, 采用不同的传输方式对主系统性能的影响, 可以看到, 和直接传输及等功率分配方式比较, 分布式功率分配得到相同的主系统性能。

#### 6 结束语

本文提出了基于 CR 系统的中继节点功率分配

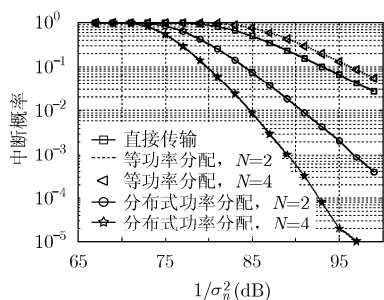


图 2 不同传输方式下的系统性能比较

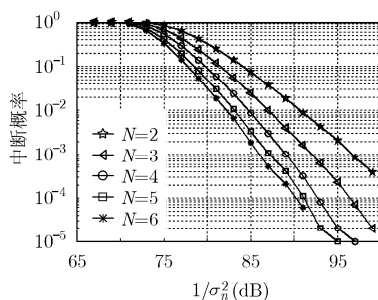


图 3 分布式功率分配中中继数目对 CR 系统性能比较

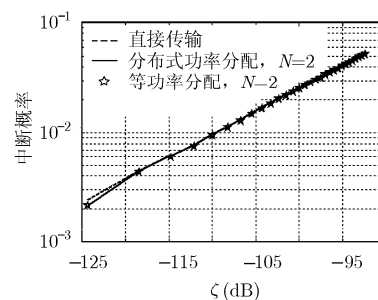


图 4 主系统接收设备最大干扰门限对主系统中断概率

算法, 算法不需要中心节点进行控制, 只需要目的节点周期性地广播很少的系统信息, 中继节点根据和自己相关信道信息进行分布式功率计算, 算法实现简单。而且功率分配算法综合考虑了 CR 系统内部信道状态信息及主系统接收设备的干扰门限的影响。仿真表明, 和直接传输及等功率分配算法比较, 分布式功率分配算法提高了网络的性能。

### 参考文献

- [1] Federal Communications Commission. Spectrum policy task force report. ET Docket No. 02-135, Nov. 2002.
- [2] Hammerstrom I, Kuhn M, and Wittneben A. Impact of relay gain allocation on the performance of cooperative diversity networks. Proc. VTC 2004 Fall, Los Angeles, CA, Sept. 2004, 1815-1819.
- [3] Deng X and Haimovich A. M. Power allocation for cooperative relaying in wireless networks. *IEEE Communication Letter*, 2005, 9(11): 994-996.
- [4] Zhao Y, Adve R, and Lim T. J. Improving amplify-and-forward relay networks: optimal power allocation versus selection. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2007, 6(8): 3114-3123.
- [5] Ding Zhi-guo, Chin Woon-hau, and Leung Kin K. Distributed Beamforming and Power Allocation for

Cooperative Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2008, 7(5): 1817-1822.

- [6] 邹玉龙, 郑宝玉. 基于分布式中继选择的自适应协作传输方案, 电子学报, 2009, 1(1): 13-20.
- Zou Yu-long and Zheng Bao-yu. Adaptive cooperative transmission scheme based on distributed relay selection. *Acta Electronic Sinica*, 2008, 7(5): 1817-1822.
- [7] Mietzner J, Lampe L, and Schober R. Distributed transmit power allocation for relay-assisted cognitive-radio systems. Proc. Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, California, USA, Nov. 2007: 792-796.
- [8] Mietzner J, Lampe L, and Schober R. Performance analysis for a fully decentralized transmit power allocation scheme for relay-assisted cognitive-radio systems. *IEEE GLOBECOM 2008*. New Orleans, LA, USA, Nov. 2008: 1-6.

郭艳艳: 女, 1976 年生, 博士生, 研究方向为无线通信协作传输和认知无线电技术。

康桂霞: 女, 1972 年生, 副教授, 研究方向为无线通信信道估计及传感器网络技术。

张宁波: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为无线通信 MIMO 及多天线技术。

张平: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 3G 和 B3G 无线通信理论和技术的研究。