

A Best Relay Set Selection Scheme for Cooperative Transmission in Cognitive Radio Network

Shunlan Liu, Chunxia Wang, Jie Yu, Wei Fang

Department of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang
Email: wcx1506@163.com

Received: Jan. 22nd, 2015; accepted: Feb. 6th, 2015; published: Feb. 10th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, a best relay set selection scheme based on Decode and Forward and received SNR maximization is proposed for cooperative communication in Cognitive Radio system, and the closed-form expression of outage probability based on the proposed scheme is derived. Furthermore, the proposed scheme is compared with traditional direct communication scheme and the random relay selection scheme in terms of outage probability through numerical experimentation. Numerical results illustrate that the proposed scheme can greatly decrease outage probability.

Keywords

Cognitive Radio, Cooperative Communication, Relay Set Selection, Decode and Forward, Outage Probability

基于认知无线电通信系统的最优中继集合选择方案

刘顺兰, 王春霞, 余杰, 方伟

杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州
Email: wcx1506@163.com

收稿日期：2015年1月22日；录用日期：2015年2月6日；发布日期：2015年2月10日

摘要

针对认知无线电通信系统的协作通信问题，本文提出一种基于解码转发和接收信噪比最大化的最优中继集合选择方案，同时理论推导出基于该最优中继集合选择方案的认知无线电通信系统的中断概率，并对传统直接通信(direct)方案，随机选择中继方案和本文提出的方案进行了性能仿真，仿真表明本文提出的方案能有效降低认知无线电系统的中断概率。

关键词

认知无线电，协作通信，中继集合选择，解码转发，中断概率

1. 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术[1]的提出，解决了传统低效的固定频谱分配政策[2]无法满足快速增长的无线业务所带来的频谱资源需求[3]的问题。CR 技术虽然能高效利用频谱资源实现频谱共享，但若 CR 系统中发射功率过大，就会对工作于同频段上的主系统(Primary System, PS)造成干扰[4]。针对量化 CR 系统产生的干扰，美国联邦通信委员会率先提出了干扰温度[5]的概念。因此 CR 系统应用的前提是其产生的干扰处于 PS 设定的干扰温度界限内。协作通信相比于传统的直接通信，能有效对抗信道衰弱，且能增加系统的吞吐量[6]，成为最近这些年来的研究热点。针对协作通信中，如何分配和管理中继节点，文献[7]-[9]研究了基于非 CR 系统的中继选择方案。然而基于 CR 系统的中继选择方案还需考虑对 PS 的影响，本文提出一种在 CR 系统中基于解码转发协议和接收信噪比最大化的最优中继集合选择方案，从理论上推导了基于该方案的 CR 系统的中断概率，并进行性能仿真，得出该方案能有效地降低 CR 系统的中断概率。

2. 系统模型

基于 CR 系统的协作模型如图 1 所示，在 PS 中，源节点 PT 将信息数据发送给目的节点 PD。在 CR 系统中，将传输时隙分成两个阶段，第一阶段，源节点 ST 使用相同的频段广播信息发送到目的节点 SD 和中继节点 $R_i (i=1,2,\dots,M)$ ；第二阶段， $R_i (i=1,2,\dots,M)$ 首先对接收信号进行解码，然后在成功解码

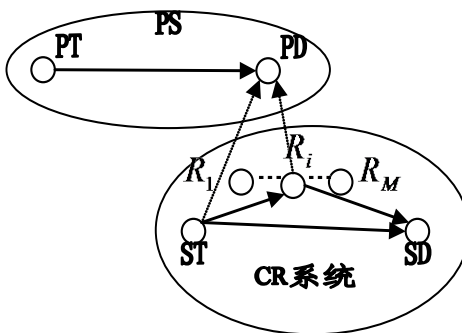


Figure 1. Cooperative model based on CR system
图 1. 基于 CR 系统的协作模型

的中继集合中,采用接收信噪比最大化准则选择最优中继集合后将信息转发给 SD。由于 CR 系统中的 ST 是采用和 PS 相同的频段来发送信息数据,因此 CR 系统的数据传输是以 PS 的数据传输不受影响为前提条件。假设以下信道均为瑞利衰落信道,且 SD 已知 $R_i (i=1,2,\dots,M)$ 至自己和 $R_i (i=1,2,\dots,M)$ 至 PD 间的信道状态。图 1 中的虚线表示的是 ST 和 $R_i (i=1,2,\dots,M)$ 对 PD 的干扰,假设 $R_i (i=1,2,\dots,M)$ 和 SD 均距离 PT 足够远,即不会受到 PT 的干扰。

第一阶段,SD 和 $R_i (i=1,2,\dots,M)$ 在 k 时隙接收到的信号为:

$$y_{SD}(k,1) = \sqrt{P_{ST}} h_{ST-SD}(k) x_s(k) + n_{SD}(k) \quad (1)$$

$$y_i(k,1) = \sqrt{P_{ST}} h_{ST-i}(k) x_s(k) + n_i(k) \quad (2)$$

其中, $x_s(k)$ 为 ST 的发送信号, P_{ST} 为 ST 的发送功率, $h_{ST-SD}(k)$, $h_{ST-i}(k)$ 分别为 ST 到 SD, $R_i (i=1,2,\dots,M)$ 的信道衰落系数,分别服从零均值,方差为 σ_{ST-SD}^2 , σ_{ST-i}^2 的复高斯分布,相互独立, $n_{SD}(k)$ 和 $n_i(k)$ 分别是 SD 和 $R_i (i=1,2,\dots,M)$ 的接收噪声,假设所有噪声均服从零均值,方差为 N_0 的复高斯分布。

第二阶段,所有成功解码的中继组成集合 D , 其中 $D = \varnothing$ 表示无中继能成功解码信号,或

$$D = D_d = \{R_{j_1}, R_{j_2}, \dots, R_{j_m}\} \quad (j_i \in \{1,2,\dots,M\}, d=1,2,\dots,2^M-1)。$$

1) 当 $D \neq \varnothing$ 时,若假设在 D 中我们选择最优中继集合 α 来转发信号,则 SD 接收信号为

$$y_{SD}(k,2|D \neq \varnothing) = \sum_{i \in \alpha} \sqrt{P_R} h_{i-SD}(k) x_s(k) + n_{SD}(k) \quad (3)$$

P_R 为中继 $R_i (i \in \alpha)$ 的发送功率, $h_{i-SD}(k)$ 为 $R_i (i \in \alpha)$ 到 SD 的信道衰落系数,服从零均值,方差为 σ_{i-SD}^2 的复高斯分布,且相互独立。将式(1)和式(3)进行最大比合并,得到 SD 接收信噪比为

$$\text{SNR}_{SD}(k, D \neq \varnothing) = \frac{P_{ST} |h_{ST-SD}(k)|^2 + P_R \sum_{i \in \alpha} |h_{i-SD}(k)|^2}{N_0} \quad (4)$$

PD 在第一阶段的接收信号为

$$y_{PD}(k,1) = \sqrt{P_{PT}} h_{PT-PD}(k) x_p(k) + \sqrt{P_{ST}} h_{ST-PD}(k) x_s(k) + n_{PD}(k) \quad (5)$$

其中, $x_p(k)$ 为 PT 的发送信号, P_{PT} 为 PT 的发送功率, $h_{PT-PD}(k)$, $h_{ST-PD}(k)$ 分别为 PT, ST 到 PD 的信道衰落系数,分别服从零均值,方差为 σ_{PT-PD}^2 , σ_{ST-PD}^2 的复高斯分布, $n_{PD}(k)$ 为 PD 的接收噪声。PD 的接收信干比为

$$\text{SINR}_{PD}(k,1) = \frac{P_{PT} |h_{PT-PD}(k)|^2}{P_{ST} |h_{ST-PD}(k)|^2 + N_0} \quad (6)$$

当满足 $P_{ST} |h_{ST-PD}(k)|^2 \leq \xi$, 即 $P_{ST} \leq \xi / |h_{ST-PD}(k)|^2$ 时, (ξ 是 PS 的最大干涉门限), CR 系统不干扰 PS。PD 在第二阶段的接收信号为

$$y_{PD}(k,2) = \sqrt{P_{PT}} h_{PT-PD}(k) x_p(k) + \sum_{i \in \alpha} \sqrt{P_R} h_{i-PD}(k) x_s(k) + n_{PD}(k) \quad (7)$$

其中, $h_{i-PD}(k)$ 为 $R_i (i \in \alpha)$ 到 PD 的信道衰落系数,服从零均值,方差为 σ_{i-PD}^2 的复高斯分布, PD 的接收信干比为

$$\text{SINR}_{PD}(k,2) = \frac{P_{PT} |h_{PT-PD}(k)|^2}{\sum_{i \in \alpha} P_R |h_{i-PD}(k)|^2 + N_0} \quad (8)$$

为了使 CR 系统不干扰 PS，则需满足

$$\sum_{i \in \alpha} P_R |h_{i\text{-PD}}(k)|^2 \leq \xi \quad (9)$$

$$P_R \leq \xi / \sum_{i \in \alpha} |h_{i\text{-PD}}(k)|^2 \quad (10)$$

2) 当 $D = \varnothing$ 时，ST 重复发射在第一阶段发射的信号，即 SD 在第二阶段接收到的信号为

$$y_{\text{SD}}(k, 2) = \sqrt{P_{\text{ST}}} h_{\text{ST-SD}}(k) x_s(k) + n_{\text{SD}}(k) \quad (11)$$

此时应满足 $P_{\text{ST}} \leq \xi / |h_{\text{ST-PD}}(k)|^2$ ， P_{ST} 取最大值，将式(1)和式(11)进行最大比合并，得到 SD 的接收信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{SD}}(k, D = \varnothing) = \frac{2P_{\text{ST}} |h_{\text{ST-SD}}(k)|^2}{N_0} = \frac{2\xi |h_{\text{ST-SD}}(k)|^2}{N_0 |h_{\text{ST-PD}}(k)|^2} \quad (12)$$

3. 基于 CR 通信系统的最优中继集合选择方案

本节首先介绍不考虑对 PS 的影响时的最佳中继集合选择方案，然后研究考虑对 PS 影响时的最佳中继集合选择方案，以比较两者的不同之处。

当不考虑对主系统 PS 的影响时，由式(4)可得，

$$\text{best relay set} = \arg \max_{\alpha \subseteq D} \{\text{SNR}_{\text{SD}}(k, D \neq \varnothing)\} = \arg \max_{\alpha \subseteq D} \left\{ \sum_{i \in \alpha} |h_{i\text{-SD}}(k)|^2 \right\} \quad (13)$$

转发的中继数目越多，那么信噪比越大，即 $\alpha = D$ 时， $\text{SNR}_{\text{SD}}(D \neq \varnothing)$ 最大。

考虑对 PS 影响时的最优中继集合选择方案，将式(10)和 $P_{\text{ST}} \leq \xi / |h_{\text{ST-PD}}(k)|^2$ 代入式(4)，得到 SD 的接收信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{SD}}(k, D \neq \varnothing) = \frac{\frac{\xi |h_{\text{ST-SD}}(k)|^2}{|h_{\text{ST-PD}}(k)|^2} + \sum_{i \in \alpha} |h_{i\text{-SD}}(k)|^2}{\sum_{i \in \alpha} |h_{i\text{-PD}}(k)|^2} \quad (14)$$

则

$$\text{best relay set} = \arg \max_{\alpha \subseteq D} \left\{ \frac{\sum_{i \in \alpha} |h_{i\text{-SD}}(k)|^2}{\sum_{i \in \alpha} |h_{i\text{-PD}}(k)|^2} \right\} \quad (15)$$

当仅选择 $\left(|h_{i\text{-SD}}(k)|^2 / |h_{i\text{-PD}}(k)|^2 \right)$ 最大的中继，记为 $|h_{\text{max-SD}}(k)|^2 / |h_{\text{max-PD}}(k)|^2$ ，来转发信号时， $\text{SNR}(k, D \neq \varnothing)$ 最大，即最优中继集合 α 中只有一个中继，且该中继为所有成功解码的中继集合中 $|h_{i\text{-SD}}(k)|^2 / |h_{i\text{-PD}}(k)|^2$ 最大的中继，现对该结论进行证明。

假设任选一中继集合 $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 为 SD 转发信号，且假设 $|h_{i\text{-SD}}(k)|^2 = x_i |h_{\text{max-SD}}(k)|^2$ ， $|h_{i\text{-PD}}(k)|^2 = y_i |h_{\text{max-PD}}(k)|^2$ ， $(i = 1, 2, \dots, n)$ ，因为

$$\frac{|h_{i\text{-SD}}(k)|^2}{|h_{i\text{-PD}}(k)|^2} = \frac{x_i |h_{\text{max-SD}}(k)|^2}{y_i |h_{\text{max-PD}}(k)|^2} \leq \frac{|h_{\text{max-SD}}(k)|^2}{|h_{\text{max-PD}}(k)|^2} \quad (16)$$

所以 $x_i \leq y_i$ ($i=1,2,\dots,n$), 因此

$$\frac{\sum_{i=1}^n |h_{i\text{-SD}}(k)|^2}{\sum_{i=1}^n |h_{i\text{-PD}}(k)|^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i |h_{\text{max-SD}}(k)|^2}{\sum_{i=1}^n y_i |h_{\text{max-PD}}(k)|^2} \leq \frac{|h_{\text{max-SD}}(k)|^2}{|h_{\text{max-PD}}(k)|^2} \quad (17)$$

所以仅选择 $|h_{i\text{-SD}}(k)|^2 / |h_{i\text{-PD}}(k)|^2$ 最大的中继转发信号时, $\text{SNR}(k, D \neq \varnothing)$ 最大。

由全概率公式, 基于本方案的 CR 系统中断概率 P_{outage} 可表示为:

$$P_{\text{outage}} = \Pr(D = \varnothing) \Pr(\text{outage} | D = \varnothing) + \sum_{d=1}^{d=2^M-1} \Pr(D = D_d) \Pr(\text{outage} | D = D_d) \quad (18)$$

由式(2)和 $P_{\text{ST}} \leq \xi / |h_{\text{ST-PD}}(k)|^2$ 可得(其中 P_{ST} 取最大值), 中继 R_i ($i=1,2,\dots,M$) 的接收信噪比为:

$$\text{SNR}_i(k, 1) = \frac{P_{\text{ST}} |h_{\text{ST-}i}(k)|^2}{N_0} = \frac{\xi |h_{\text{ST-}i}(k)|^2}{N_0 |h_{\text{ST-PD}}(k)|^2} \quad (19)$$

则 R_i ($i=1,2,\dots,M$) 无法正确得到解码信号的概率为:

$$\Pr(\text{lb}(1 + \text{SNR}_i(k, 1)) < R) = \Pr\left(\frac{|h_{\text{ST-}i}(k)|^2}{|h_{\text{ST-PD}}(k)|^2} < \psi\right) = \frac{\psi \sigma_{\text{ST-PD}}^2}{\psi \sigma_{\text{ST-PD}}^2 + \sigma_{\text{ST-}i}^2} \quad (20)$$

式中, R 为 CR 系统通信速率, $\psi = (2^R - 1)N_0 / \xi$ 。

$D = \varnothing$ 的概率为:

$$\Pr(D = \varnothing) = \prod_{i=1}^M \left(\frac{\psi \sigma_{\text{ST-PD}}^2}{\psi \sigma_{\text{ST-PD}}^2 + \sigma_{\text{ST-}i}^2} \right) \quad (21)$$

同时, 得到系统的中断概率为:

$$\Pr(\text{outage} | D = \varnothing) = \Pr\left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \text{SNR}_{\text{SD}}(k, D = \varnothing)) < R\right) = \frac{\tau \sigma_{\text{ST-PD}}^2}{\tau \sigma_{\text{ST-PD}}^2 + \sigma_{\text{ST-SD}}^2} \quad (22)$$

式中, $\tau = (2^{2R} - 1)N_0 / 2\xi$ 。

$D = D_d$ 的概率为:

$$\Pr(D = D_d) = \prod_{i \in D_d} \left(1 - \frac{\psi \sigma_{\text{ST-PD}}^2}{\psi \sigma_{\text{ST-PD}}^2 + \sigma_{\text{ST-}i}^2} \right) \prod_{i \notin D_d} \left(\frac{\psi \sigma_{\text{ST-PD}}^2}{\psi \sigma_{\text{ST-PD}}^2 + \sigma_{\text{ST-}i}^2} \right) \quad (23)$$

同时, 得到系统的中断概率为:

$$\begin{aligned} \Pr(\text{outage} | D = D_d) &= \Pr\left\{ \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{\xi}{N_0} \left(\frac{|h_{\text{ST-SD}}(k)|^2}{|h_{\text{ST-PD}}(k)|^2} + \max_{i \in D_d} \left\{ \frac{|h_{i\text{-SD}}(k)|^2}{|h_{i\text{-PD}}(k)|^2} \right\} \right) \right) < R \right\} \\ &= \prod_{i \in D_d} A_i(\theta), \end{aligned} \quad (24)$$

上式中, $\theta = 2\tau$ 。将式(21), 式(22), 式(23), 式(24)代入式(18), 便可得认知无线电系统中断概率 P_{outage} 。

4. 仿真分析

经过上述分析, 本节对系统模型进行了仿真, 设定 $\sigma_{m,n}^2 = d_{m,n}^{-\beta}$, 其中 β 是损耗指数, 取值为 3, $d_{m,n}$

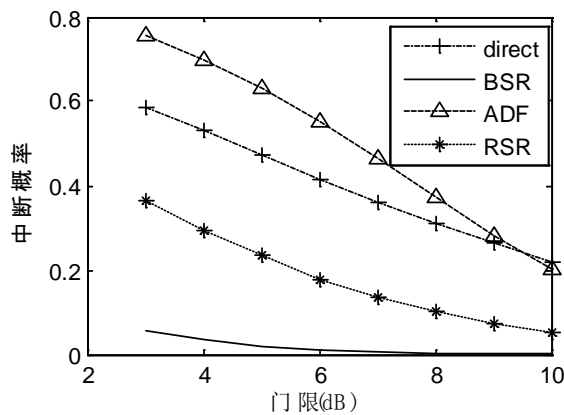


Figure 2. The comparison of outage probability under different threshold ξ
 图 2. 不同门限 ξ 取值下的中断概率比较

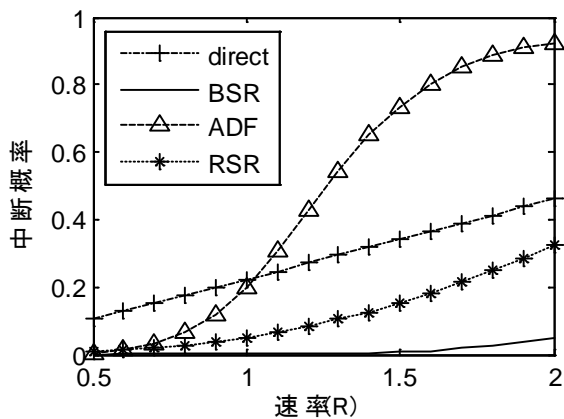


Figure 3. The comparison of outage probability under different rate R
 图 3. 不同速率 R 取值下的中断概率比较

为节点 m 和节点 n 之间的距离。CR 和 PS 系统中各节点在坐标系中的位置如下：ST 坐标为 $(-1,0)$ ，SD 坐标为 $(1,0)$ ，PT 坐标为 $(-2.5,1.5)$ ，PD 坐标为 $(0,1)$ ，中继节点随机分布在 ST 和 SD 之间。

当 CR 系统通信速率 $R = 1$ bps/Hz 时，图 2 给出本文提出的最优中继集合选择(Best Relay selection, BRS)方案和传统直接通信(direct)方案，随机选择中继方案(Random Relay Selection, RRS)的中断概率随 ξ 的变化情况。仿真结果表明门限 ξ 越大，系统中断概率越小，且 BRS 方案中断概率最小。

图 3 给出了 $\xi = 10$ dB 时，各方案对性能的影响，结果表明通信速率 R 越小，系统中断概率越小，且本文提出的 BRS 方案性能最优。

5. 总结

协作通信方案与传统直接通信方案相比，大大提高了系统性能。但协作通信中，如何管理和选择中继节点还是一个关键问题，特别是对于频谱共享的 CR 系统，方案的设计在最大限度地提高 CR 系统的性能的同时，要最小化对 PS 的干扰。本文提出的最优中继集合选择方案，在推导了基于该方案的 CR 系统的中断概率的基础上，对三种方案的性能进行仿真比较，得出本方案能有效地降低 CR 系统的中断概率。

参考文献 (References)

- [1] Simon, H. (2005) Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, **23**, 201-220.
- [2] Visotsky, E., Kuffner, S. and Peterson, R. (2005) On collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sharing. *International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore, 8-11 November 2005, 338-345.
- [3] Wang, C.-L., Chen, H.-W. and Chou, Y.-R. (2011) A credibility-based cooperative spectrum sensing technique for cognitive radio systems. *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference*, Yokohama, 15-18 May 2011, 1-5.
- [4] 郭艳艳, 康桂霞, 张宁波, 等 (2010) 基于认知无线电系统的协作中继分布式功率分配算法. *电子与信息学报*, **10**, 2463-2467.
- [5] Xing, Y.P., Mathur, C.N., Haleem, M.A., Chandramouli, R. and Subbalakshmi, K.P. (2007) Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **6**, 423-433.
- [6] Laneman, J.N., Tse, D.N.C. and Wornell, G.W. (2004) Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, **50**, 3062-3080.
- [7] Bletsas, A., Khisti, A., Reed, D.P. and Lippman, A. (2006) A simple Cooperative diversity method based on network path selection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **24**, 659-672.
- [8] Zou, Y.L., Zheng, B.Y., Zhu, W.-P. and Cui, J.W. (2008) An optimal relay selection scheme for cooperative diversity. *9th International Conference on Signal Processing*, Beijing, 26-29 October 2008, 1800-1803.
- [9] Beres, E. and Ader, R. (2008) Selection cooperation in multi-source cooperative networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **7**, 118-127.