

# 基于协作频谱感知的多天线中继系统功率分配

岳文静,陆海亚,蒲昱,刘敏

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

**摘要:**文中构建了一种基于协作频谱感知的多天线频谱共享模型,为提高系统传输性能,采用了放大转发(AF)中继方式进行通信传输。文中提出的模型由一组多输入多输出主用户和多组多输入多输出认知用户构成。当认知用户需要进行通信时,其他认知用户暂时充当感知节点对主用户进行协作能量检测;若主用户未占用信道,认知用户立刻以最大发射功率进行通信;若主用户占用信道,认知用户以及中继节点需要限制自身的功率以保证对主用户的干扰在门限值以下,同时调整功率的分配使得认知通信性能最优。文中在找出最优感知时间的基础上研究了认知用户及中继节点的最优功率分配算法,并且分析讨论了不同天线数目以及不同中继数目对系统性能的影响。仿真结果表明,中继数目不能够无限制的增加,对中继节点进行一定数目的选择后进行传输效果会更好。

**关键词:**频谱感知;多天线系统;AF 中继方式;功率分配

**中图分类号:**TP31

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2015)11-0218-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.11.044

## Power Allocation in MIMO Relay System Based on Cooperative Spectrum Sensing

YUE Wen-jing, LU Hai-ya, PU Yu, LIU Min

(College of Telecommunication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** A spectrum-sharing model with Multi-Input Multi-Output (MIMO) based on cooperative spectrum sensing is proposed in this paper. In order to promote the transmission function, adopt the way of Amplify and Forward (AF) relay to transmit data. The proposed model consists of an MIMO Primary User (PU) pair and an MIMO Secondary User (SU) pair. When SU wants to transmit data, the other SUs will play a role of sensing node to be cooperative to energy detection temporarily. If the licensed band is empty, then SU will transmit data with maximum power. If PU occupies the band, SUs and relay nodes need to limit the power to ensure avoiding interference to PU. At the same time, SUs need to adjust the power distribution to make communication performance optimization possibly. Allocating power is based on finding the optimal sensing time in this paper. Also discuss the impact of the different number of antennas and the number of relaying. Simulation results show that the number of repeaters cannot be unlimited increase, relay node selection for transmission would be more effective for a certain number.

**Key words:** spectrum sensing; MIMO; AF relay; power allocation

### 1 概述

伴随着无线通信的快速发展,频谱资源日益紧缺。认知无线电作为有望解决无线频谱资源紧缺难题的技术,目前已成为业界极为关注和研究的热点<sup>[1-8]</sup>。在该技术中,认知用户(Secondary User, SU)与主用户(Primary User, PU)采用 overlay 和 underlay<sup>[6]</sup>这两种

方式共同占用频谱,从而提高频谱利用率。其中,overlay方式是指认知用户可以在主用户没有占用信道时进行通信;而 underlay 方式是让认知用户以很低的发射功率与主用户同时占用信道,此时,主用户把认知用户的传输信号当成噪声来处理。文献[9]研究了分布式感知无线网络与授权系统的频谱共享问题,以

收稿日期:2015-02-02

修回日期:2015-05-05

网络出版时间:2015-11-04

**基金项目:**中国博士后科学基金项目(2013M531393);国家级大学生创新创业训练计划项目(201410293003);江苏省博士后科研资助计划项目(1102102C);江苏省高等学校大学生创新创业训练计划立项项目(201410293003Z);南京邮电大学大学生创新训练计划项目(SZDG2014003)

**作者简介:**岳文静(1982-),女,副教授,硕士生导师,从事认知无线电、无线传感器网络、信息处理等方面的研究。

**网络出版地址:**<http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20151104.0948.012.html>

提高系统的频谱利用率和传输速率。文献[10]提出了一种基于 underlay 的系统模型,通过优化次用户数目以及感知门限以提高系统容量。

为改善传统点到点的通信性能,目前采用了中继通信技术。在中继网络中,源节点通过中继节点向目的节点发送信号。在放大转发(AF)协议中,中继节点简单放大从源节点接收到的信号,然后转发给目的节点。文献[11]研究了采用 AF 方式和基于 AF 的中继选择(S-AF)下的功率分配策略以最小化系统中断概率。文献[12]提出了限制协作中继接入数目的算法,在牺牲部分协作分集增益的情况下,大大降低了功率分配算法的复杂度。

为提高频谱使用效率,多输入多输出(MIMO)技术<sup>[8]</sup>也越来越受到关注。MIMO 系统可以有效提高信道容量。文献[13]结合认知无线电技术和 MIMO 技术,通过优化节点的发送功率来提高系统的传输速率。文献[14]在香农信道容量公式的基础上推导得到了正比于收发信天线数的 MIMO 无线信道容量公式。

受到上述技术的启发,文中结合认知无线电、中继网络和 MIMO 等技术,提出一种认知中继网络模型及功率优化分配策略。在上述模型中,认知用户都是多天线的,认知用户先对主用户进行协作能量检测,判断主用户是否占用信道,然后传输数据,并把其他认知用户节点作为自身的中继节点进行通信,这样提高了认知用户的平均传输速率。

## 2 系统模型

文中构建的系统模型主要由两个主用户节点(PT 和 PR),两个认知用户节点(S 和 D)以及由  $N$  个其他认知用户构成的中继节点组( $R_1, R_2, \dots, R_N$ )构成。其中,它们都是多天线系统,这里假设都由  $M$  根天线组成,如图 1 所示。其中,  $R_1, R_2, \dots, R_N$  充当感知节点

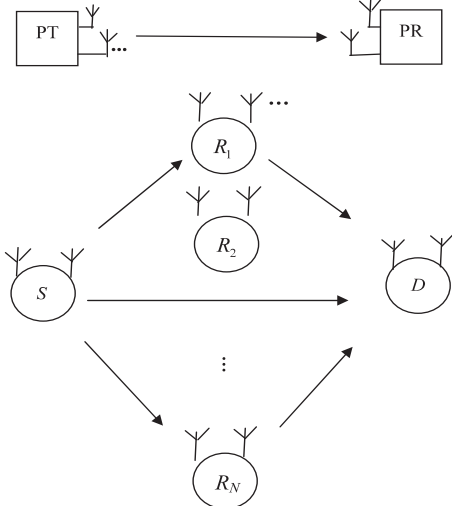


图 1 系统模型

的角色。当  $S$  需要发送信息给  $D$  时先进行信道感知,如果感知结果表明主用户 PT 未占用信道,则  $S$  以及中继节点按照自身最大功率进行数据传送;如果感知结果表明主用户 PT 占用信道,则  $S$  以及中继节点需要限制发送功率保证对主用户的干扰在限定值以内,此时可以保持  $S$  以及中继节点的总功率  $P_{\max}$  不变,对它们进行一定的功率分配来实现对主用户的影响不超过门限值。中继方式采用 AF 方式。

按照上述工作原理,相对应的数据帧结构如图 2 所示。令每帧的时长为  $T$ ,用于信道感知的时长为  $t$ ,则认知用户用于传输数据的时间为  $T - t$ 。



图 2 数据帧结构

设  $S$  到  $D$  的信道增益矩阵为  $\mathbf{H}_S$ ,信道噪声矩阵为  $\mathbf{N}_S$ ;  $S$  到  $R_k(k=1,2,\dots,N)$  的信道增益矩阵为  $\mathbf{H}_{S_k}$ ,信道噪声矩阵为  $\mathbf{N}_{S_k}$ ;  $R_k(k=1,2,\dots,N)$  到  $D$  的信道增益矩阵为  $\mathbf{H}_{kD}$ ,信道噪声矩阵为  $\mathbf{N}_{kD}$ 。其中,  $\mathbf{N}_S, \mathbf{N}_{S_k}, \mathbf{N}_{kD}$  中的元素均满足均值为 0、方差为  $\delta^2$  的高斯正态分布。

## 3 功率优化分配策略

根据上述系统模型,在第一个时隙,认知用户  $S$  发送信号  $\mathbf{x}$  给目标节点  $D$  和中继节点  $R_k$ ,所以目标节点  $D$  和中继节点  $R_k$  分别接收到的信号为:

$$\mathbf{y}_{SD} = \mathbf{H}_S \mathbf{x} + \mathbf{N}_S \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_{SR_k} = \mathbf{H}_{S_k} \mathbf{x} + \mathbf{N}_{S_k} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{y}_{SD}$  是目标节点  $D$  接收到来自发射节点  $S$  的信号;  $\mathbf{y}_{SR_k}$  是中继节点  $R_k$  接收到来自发射节点  $S$  的信号。

在第二个时隙,中继节点  $R_k$  再以 AF 的方式转发给目标节点  $D$ ,所以得出:

$$\mathbf{y}_{R_kD} = \mathbf{H}_{kD} \mathbf{A}_k \mathbf{y}_{SR_k} + \mathbf{N}_{kD} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得:

$$\mathbf{y}_{R_kD} = \mathbf{H}_{kD} \mathbf{A}_k \mathbf{H}_{S_k} \mathbf{x} + \mathbf{H}_{kD} \mathbf{A}_k \mathbf{N}_{S_k} + \mathbf{N}_{kD} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{y}_{R_kD}$  是目标节点  $D$  接收到来自中继节点  $R_k$  的信号;放大因子  $\mathbf{A}_k = \text{diag}\{a_1, a_2, \dots, a_M\}$ ,  $a_i^2 = \frac{P_{ki}}{|h_{ki}|^2 P + \delta^2}$ ,  $P_{ki}$  表示  $R_k$  的第  $i$  根天线的功率,  $h_{ki}$  表示  $R_k$  的第  $i$  根天线所在信道的增益系数,  $P$  表示  $S$  发送信号的功率。

假设输入信号矢量  $\mathbf{x}$  满足高斯分布,则其互协方差矩阵为  $\mathbf{R}_x = E(\mathbf{x}\mathbf{x}^H) = \frac{P}{M} \mathbf{I}_M$ 。因此,当检测主用户不存在时即  $H_0$  情况下,系统信道容量  $C_0$  为<sup>[8]</sup>:

$$C_0 = \frac{1}{2} \log_2 \left\{ \det \left[ \mathbf{I}_M + \sum_{k=1}^N \frac{\mathbf{H}_{kD} \mathbf{A}_k \mathbf{H}_{Sk} \mathbf{H}_{Sk}^H \mathbf{A}_k^H \mathbf{H}_{kD}^H \mathbf{P}}{(\mathbf{H}_{kD} \mathbf{A}_k \mathbf{A}_k^H \mathbf{H}_{kD}^H + \mathbf{I}_M) \delta^2 M} + \frac{\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H \mathbf{P}}{\delta^2 M} \right] \right\} \quad (5)$$

当检测主用户存在时即  $H_1$  情况下, 系统信道容量  $C_1$  为:

$$C_1 = \frac{1}{2} \log_2 \left\{ \det \left[ \mathbf{I}_M + \sum_{k=1}^N \frac{\mathbf{H}_{kD} \mathbf{A}_k \mathbf{H}_{Sk} \mathbf{H}_{Sk}^H \mathbf{A}_k^H \mathbf{H}_{kD}^H \mathbf{P}}{(\mathbf{H}_{kD} \mathbf{A}_k \mathbf{A}_k^H \mathbf{H}_{kD}^H + \mathbf{I}_M) \delta^2 M + \mathbf{H} \mathbf{H}^H \mathbf{P}_u} + \frac{\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H \mathbf{P}}{\delta^2 M} \right] \right\} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{H}$  表示主用户与认知用户  $D$  之间的信道增益矩阵;  $\mathbf{P}_u$  为主用户的发射功率。

综上, 可以得到整个系统的信道容量为<sup>[1]</sup>:

$$R = \frac{T-t}{T} [C_0 P(H_0) (1 - P_f) + C_1 P(H_1) (1 - P_d) + C_1 P(H_1) P_d + C_0 P(H_0) P_f] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M P_{ki} + P \leq P_{\max} \\ & P_{ki} \geq 0, P \geq 0, 0 \leq t \leq T \end{aligned}$$

$$\text{式中, } P_f = \prod_{k=1}^N Q_{fi}; P_d = \prod_{k=1}^N Q_{di} \circ Q_{fi} = \frac{\Gamma\left(tf, \frac{\varepsilon_i}{N}\right)}{\Gamma(tf)}, \text{表}$$

示第  $i$  个感知节点的漏检率;  $Q_{di} = \frac{\Gamma\left(tf, \frac{\varepsilon_i}{N + P_u}\right)}{\Gamma(tf)}$ , 表示

第  $i$  个感知节点的检测率。其中,  $\varepsilon_i$  是第  $i$  个感知节点的判决门限;  $N$  是噪声功率。

因此, 整个系统模型可以简化成一个优化问题:

$$\max R \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M P_{ki} + P \leq P_{\max} \\ & P_{ki} \geq 0, P \geq 0, 0 \leq t \leq T \end{aligned}$$

由于要保证整个系统感知结果的正确性, 一般虚警概率  $P_f$  ( $\leq 10\%$ ) 和漏检概率  $P_m$  ( $\leq 10\%$ ) 的值都较小, 也就是说检测概率  $P_d$  ( $\geq 90\%$ ) 相对比较大, 所以,  $C_1 P(H_1) (1 - P_d)$  和  $C_0 P(H_0) P_f$  这两项的值相对另外两项比较小, 可以忽略, 则

$$R \approx R' = \frac{T-t}{T} [C_0 P(H_0) (1 - P_f) + C_1 P(H_1) P_d]$$

其中,  $R'$  是  $R$  的近似值。

因此, 整个系统模型又可以简化为:

$$\max R' \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M P_{ki} + P \leq P_{\max} \\ & P_{ki} \geq 0, P \geq 0, 0 \leq t \leq T \end{aligned}$$

其中,  $T$  是一帧数据的时长, 是固定值。

接下来, 需要确定感知时间  $t$ 。

假设  $P_{ki}$  和  $P$  都已经固定分配好了, 对于给定的感知时间  $t$ , 令  $Q_{di} = Q$  ( $Q$  为已知的一个定值使得  $P_d \geq 90\%$ ) 可以求得所需要的判决门限值  $\varepsilon$ 。因此, 该优化问题可以近似表示为:

$$\max R' \quad (10)$$

$$\text{s. t. } Q_{di} \geq Q$$

对  $R'$  进行求导,  $t$  为自变量, 可得:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T} (R'(t))' < 0 \\ \lim_{t \rightarrow 0} (R'(t))' = +\infty \end{cases} \quad (11)$$

可以看出, 必定存在最优的感知时间  $t$  使得  $R'$  取得最大值。同理, 对  $R$  进行求导, 也得出同样的结论。接下来, 将找出的最优感知时间  $t$  带入式 (8), 则可以将功率分配模型简化为:

$$\max R \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M P_{ki} + P \leq P_{\max} \quad P_{ki} \geq 0, P > 0$$

## 4 仿真结果与分析

设置天线的数目  $M=4$ , 中继节点的个数  $N=3$ , 每一帧的时长  $T=100 \text{ ms}$ ; 设置采样频率  $f=0.1 \text{ MHz}$ ,  $Q=0.95$ ,  $P(H_0)=0.7$ ,  $P(H_1)=0.3$ 。假设信道环境满足瑞利分布。

图 3 表示的是当每一帧的长度  $T=100 \text{ ms}$  时, 根据  $R'$  和  $R$  的表达式求得在  $S$  节点获得的平均传输速率与感知时间  $t$  的关系。由图形走势可以看出,  $R'$  和  $R$  具有相同的变化趋势, 在大约  $t=1.8 \text{ ms}$  处获得最大传输速率。

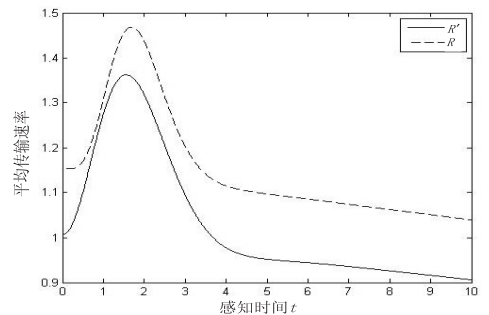


图 3 感知时间  $t$  与平均传输速率的关系

图 4 是节点的天线数目  $M$  不同时系统数据传输速率的变化图。

从图中可以看出, 发射功率相同时, 天线数目越多, 系统  $SU$  的数据传输速率也就越高。

图 5 是中继节点不同数目对系统传输性能影响。

从图中可以看出, 在相同的发射功率下, 中继节点越多, 系统的传输性能也就越好, 但是这种增长不是无限制的。与  $N=2$  增加到  $N=4$  相比,  $N=4$  增加到  $N=6$  时系统传输性能的提高程度有所降低, 这说明中继

的数量不可能无限增加来获得很高的传输速率,这是有一个饱和值的,所以中继节点的选择对系统传输的影响也很重要。

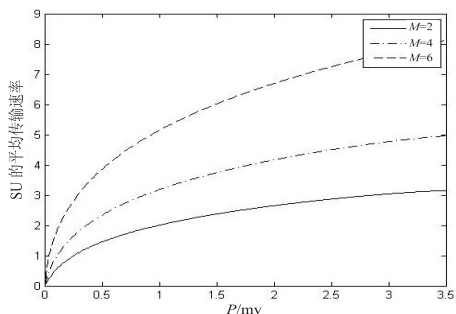


图4 不同的天线数目对系统性能的影响比较图

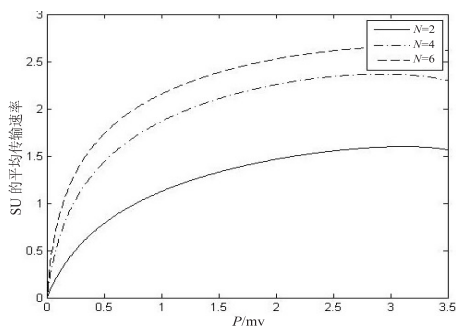


图5 不同中继数目对系统性能的影响比较图

图6是在相同的信道环境下,多天线中继系统与多天线无中继系统、单天线中继系统这两种模型的通信性能比较。

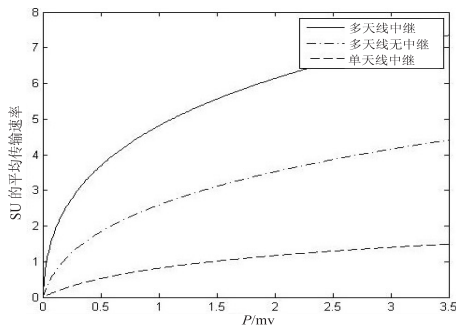


图6 相同信道环境下不同功率分配方案的平均速率比较图

由图可知,这三种方案SU的数据传输速率都随着发射功率的增加而增加。而且,在发射功率相同的情况下,多天线中继模型的性能要明显优于另外两种方案,该系统能够获得更高的传输速率。

## 5 结束语

文中主要研究的是基于频谱感知的多天线中继系统的功率分配问题,模型主要考虑了主用户存在与不存在这两种情况。在不影响主用户正常使用的前提下,对认知用户的发射功率进行分配来最大化吞吐量。从仿真的结果来看,文中提到的算法策略能够很好地满足目标,并且随着天线数目的增长,系统的性能有明

显的改善;随着中继数目的增多,系统性能也愈趋向饱和,满足实际。文中建立的模型只是理想化的,未考虑认知用户在空间上的实际分布,所以未来需要进一步研究此系统在实际空间分布上的应用。


## 参考文献:

- [1] 岳文静,武 聪,陈 志,等. 感知频谱共享下的多天线的功率优化分配算法研究[J]. 信号处理,2014,30(11):1298-1302.
- [2] Hua S, Liu H, Zhuo X, et al. Exploiting multiple antennas in cooperative cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(7): 3318-3330.
- [3] Mishra S, Trivedi A. Exploiting opportunistic decode-and-forward cooperation for cognitive radio relay channels in multi-antenna cognitive radio networks[C]//Proceedings of 2013 international conference on advances in computing, communications and informatics. Mysore, India: IEEE, 2013: 155-158.
- [4] Song Q, Ning Z, Huang Y, et al. Joint power control and spectrum access in cognitive radio networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 41(1): 379-388.
- [5] Liang Y C, Zeng Y, Peh E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [6] Zou J, Xiong H, Wang D, et al. Optimal power allocation for hybrid overlay/underlay spectrum sharing in multiband cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(4): 1827-1837.
- [7] Mclean R K, Silvius M D, Hopkinson K M, et al. An architecture for coexistence with multiple users in frequency hopping cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(3): 563-571.
- [8] 林 云,何 丰. MIMO 技术原理及应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- [9] 李红岩,贺志强,牛 凯,等. 感知无线网络中最优的分布式功率分配[J]. 北京邮电大学学报,2008,31(5):112-116.
- [10] 李美玲,袁超伟,李 琳,等. 使次系统容量最大化的协作频谱感知性能分析及优化[J]. 通信学报,2011,32(2):53-60.
- [11] 岳文静,郑宝玉,孟庆民,等. 在认知中继网络中基于放大转发与最佳中继的最优功率分配算法[J]. 中国科学:信息科学,2011,41(3):365-376.
- [12] 夏展望. 基于博弈论的协作通信中继节点的功率分配[J]. 南京工程学院学报:自然科学版,2013,11(2):50-56.
- [13] 彭 青. 认知无线电 MIMO 中基于博弈论的功率控制算法[J]. 电子测量技术,2012,35(11):129-133.
- [14] 傅海阳,陈技江,曹士珂,等. MIMO 系统和无线信道容量研究[J]. 电子学报,2011,39(10):2221-2229.

基于协作频谱感知的多天线中继系统功率分配

作者：[岳文静](#)，[陆海亚](#)，[蒲昱](#)，[刘敏](#)，[YUE Wen-jing](#)，[LU Hai-ya](#)，[PU Yu](#)，[LIU Min](#)

作者单位：[南京邮电大学 通信与信息工程学院](#)，[江苏 南京, 210003](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2015, 25(11)

引用本文格式：[岳文静](#)，[陆海亚](#)，[蒲昱](#)，[刘敏](#)，[YUE Wen-jing](#)，[LU Hai-ya](#)，[PU Yu](#)，[LIU Min](#) [基于协作频谱感知的多天线中继系统功率分配](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(11)