

提高认知多跳网络的协作频谱感知方法

刘 敏,岳文静,蒲 昱,陆海亚

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘 要:频谱感知技术是认知无线电关键技术之一。能否正确快速地感知主授权频谱,是认知用户进行通信的前提,也是衡量检测性能的标准之一。考虑衰落信道对检测性能的影响,文中提出一种在多跳认知无线网络中基于空时编码的多簇协作频谱感知方法。具体方案为:首先对认知用户进行分簇,然后根据距离对簇进行分级,最后簇头与它的上一级簇头进行 Alamouti 编码,并将编码后的感知信息通过多跳的方式发送到融合中心,以提高协作频谱感知的检测性能。仿真结果表明:采取多跳多簇认知网络不仅可以有效地减少发送的能量,而且多跳多簇认知网络的跳数和支路数会在一定范围内增强检测性能。同时,采用 Alamouti 编码之后的信道误码率得到了明显改善,检测性能得到大幅提高。

关键词:认知无线电;协作频谱感知;能量检测;空时编码

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)01-0171-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.01.037

A Method of Cooperative Spectrum Sensing of Enhancement in Cognitive Radio Multi-hop Networks

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

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

Abstract: Spectrum sensing is one of the core technology of Cognitive Radio (CR). Whether the unlicensed spectrum can be sensed quickly and correctly is not only the premise of the communication, but also one of the standard of sensing detection. Considering the noise of fading channel, a method of multi-cluster cooperative spectrum sensing based on space-time coding in multi-hop cognitive radio networks was proposed. The program is shown in detail as follow. First, divide the cognitive users into different clusters. Secondly, classify the clusters based on distance. Next, the cluster head will adopt Alamouti coding with its upper level cluster. At last, the fusion center will get the coding information of sensing results. This program will help to enhance the detection capability. Multi-cluster can reduce the power and sensing time. The simulation result suggests that suggested scheme can not only reduce the energy dissipation and improve the throughput, but also can improve the detection property in a certain scale. After Alamouti coding, the error rate decreases dramatically.

Key words: cognitive radio; cooperative spectrum sensing; energy detection; space-time coding

1 概 述

随着通信行业的发展,无线通信无疑成为通信产业中发展最快的一部分。仅蜂窝数据系统就经历了从 1G 到 4G 的飞跃,4G 较 3G 而言,拥有更快的传输速率,如果想使 4G 通信达到 100 Mbps 的传输,通信运营商必须在 3G 通信网络的基础上,进行大幅度的改造和研究,以便使 4G 网络在通信带宽上比 3G 网络的蜂

窝系统的带宽高出许多。据研究 4G 通信的 AT&T 的执行官们说,估计每个 4G 信道会占有 100 MHz 的频谱,相当于 W-CDMA3G 网络的 20 倍。这使得本就缺少的频谱资源更加短缺。不仅如此,实际情况中:在目前固定的频谱资源分配方式中,政府已授权的无线频谱资源利用率非常低。美国国家无线电在 2004 年 1 月至 2015 年 8 月期间对美国六个区域的频谱资源利

收稿日期:2015-04-22

修回日期:2015-07-28

网络出版时间:2016-01-04

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:刘 敏(1993-),女,硕士研究生,研究方向为认知无线电、信息处理等;岳文静,副教授,硕士生导师,研究方向为认知无线电、无线传感器网络、信息处理等。

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160104.1505.034.html>

用率的一项统计显示,六个区域的平均频谱利用率为 5.2%,最高的只有 13.1%,最低的只有 1%^[1]。与此同时,某些未授权频段却因竞争使用而拥挤不堪(如手机通信频段)。因此,探索新的频谱资源分配与使用方法势在必行^[2]。

动态频谱接入方式可以有效地提高频谱使用效率,而认知无线电技术就是实现动态频谱接入的关键^[3]。认知无线电技术对频谱资源的使用提出了全新的思想,它注重对频谱智能、动态的利用,可有效解决电磁频谱物理资源匮乏与利用率低之间的矛盾^[4]。2005 年,著名通信专家 Simon Haykin 教授就从信号处理的角度给出了认知无线电(CR)的定义:CR 是一个能利用人工智能技术自动地感知周围无线电环境的智能无线通信系统,具有对无线环境的自我理解和主动学习能力,实时地调整内部无线电传输参数,比如功率、频率、调制和编码方案等等,使其内部状态与外界无线信号的统计变化相适应,在不会对主用户造成干扰的前提下,实现在任何时间任何地点以任何形式执行可靠的通信,最终实现频谱资源的重复高效利用^[5]。

如何才能不影响主用户的正常通信呢?这就要求认知用户能够实时检测频谱段,找到频谱空穴,实现自身信息传输并且还需要连续检测是否有新的授权用户使用频谱段。能否正确快速地感知主授权频谱,是认知用户进行通信的前提,也是衡量检测性能的标准之一。因此,频谱感知技术是认知无线电关键技术之一。频谱检测的精度和可靠度决定了是否会侵害授权用户的正常通信。大量文献对频谱感知检测技术进行了深入研究,目前研究较多的频谱检测方法有:匹配滤波器法、循环平稳特征检测法、能量检测法等。能量检测法实现简单,是一种经典的检测算法^[6]。按照检测类型划分,主要有信号存在性检测和信号覆盖范围检测。信号覆盖型检测又包括联合检测和区域检测。联合检测能够获得较低的检测概率,而且计算复杂度低,空间利用率较低。区域检测方法采用基于区域的贝叶斯检测算法,空间效率高。对于信号存在性检测,按照检测节点个数来划分,频谱检测可分为单点检测和协作检测两种。协作频谱感知是在单点频谱感知的基础上为了提高感知的准确性而产生的感知方法,典型的单点频谱感知方法有匹配滤波器检测、能量检测以及循环平稳检测^[7]。协作频谱感知利用分集可有效提高频谱检测性能,近年来很多学者对此进行了研究。

文献[8]从频谱感知的角度分析了干扰与频谱利用率的关系。多个微时隙和次用户协作感知也用于提高系统吞吐量。文献[9]研究了感知系统与次系统容量的关系。采用最优化中继方式的协作频谱感知能够明显提高次系统能量。然而,这些文献只考虑了感知

信道为衰落信道的情况,忽略了报告信道的衰落特性。文献[10]考虑了报告信道的衰落情况,并指出随着 SU 的增加,发送本地感知结果占用的控制信道带宽会增加,这样就会占用较多的系统资源。

为了在控制信道带宽受限的条件下,减少对系统资源的占用,文中采用基于分簇的协作频谱感知方法。同时,通过对不同等级的簇头间利用空时编码来减少由于衰落信道引入的误码率,从而改善检测性能。所做的工作主要有:在多跳认知无线网络下,首先对多跳认知网络的感知节点进行分簇,然后再根据距离划分感知簇的等级,且同一等级的簇头相互不发送信息。接着,各感知用户进行本地感知,各簇内感知用户将自己的感知信息发送给簇头,簇头融合信息做出判决,并将判决信息沿支路逐级发送给融合中心。能否正确将感知信息发送到融合中心?这不仅与各认知用户的本地检测有关,还与报告信道的性能有关。比如,在瑞利衰落信道下,由于存在阴影和多径效应,信道会产生误码,即将 0 错传为 1,将 1 错传为 0。在这种情况下,感知信息和判决信息都不可靠。针对该问题,通过对不同等级的簇头间利用 Alamouti 编码^[11],来改善误码率,提高检测性能,优化感知结果。

2 协作频谱感知

在多跳认知网络中,采用多簇的方式来检测主用户(Primary User, PU)是否存在,感知模型如图 1 所示。

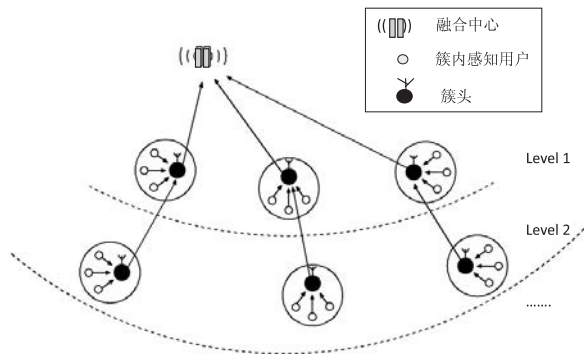


图 1 协作频谱感知模型

首先对多跳认知网络的感知节点进行分簇,然后再根据距离划分感知簇的等级,且同一等级的簇头相互不发送信息。最后不同等级的簇头间利用 Alamouti 进行编码,将编码后的感知信息逐级沿支路向上发送到融合中心。

首先,对感知节点进行分簇,在每簇中有且仅有一个簇头能够获得这一簇内的认知用户发送的本地感知结果,簇头进行融合,并给出 1 比特的判决结果^[12]。其次,根据距离将簇划分等级,假设最低级簇头需要 i 跳才能将感知信息发到融合中心。文中为了简单,假

设 $i=4$ 。最后,不同等级的簇头间利用空时编码进行编码,然后将编码后的信息沿支路逐级向上发送自己的判决结果到融合中心。

感知帧结构如图 2 所示。

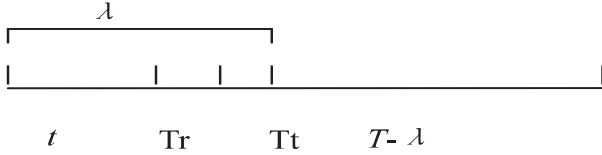


图 2 数据帧结构

所有认知用户在 t 时间内完成各自的本地频谱感知,并在 Tr 时间内将自己的感知结果发送给簇头,簇头将判决信息编码并在 Tt 的时间内逐级向上发送给融合中心。因此,提出的方案主要有 4 个实现步骤:簇内感知、簇头融合、簇头间信息编码和信息融合。

第一步:簇内感知。

假设一簇内有 N 个认知用户。每个簇内的认知用户在 t 时间内完成各自的本地频谱感知。不失一般性,假设认知用户以能量检测器为本地检测算法。在 Rayleigh 信道下,簇内认知用户的本地虚警概率和检测概率为^[5]:

$$pf = \frac{\Gamma(\mu, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(\mu)} \quad (1)$$

$$p_{d-Rayleigh} = e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{n=0}^{\mu-2} \frac{1}{n} \left(\frac{\lambda}{2} \right)^n + \left(\frac{1+r}{r} \right)^{\mu-1} \left[e^{-\frac{\lambda}{2(1+r)}} - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{n=0}^{\mu-2} \frac{1}{n} \left(\frac{\lambda r}{2(1+r)} \right)^n \right] \quad (2)$$

第二步:簇头融合。

各认知用户将自己的感知信息发给簇头。簇头采取与融合的判决方式。

考虑到簇内的传输信道为衰落信道,传输必然会引入误码。用 $pe^{(ij)}$ 来表示第 i 簇内的第 j 个用户传输引入的误码率。假设第 j 个簇内的认知用户独立同分布,且具有相同的平均信噪比,用 \bar{r}_i 来表示。同时若信号采用 BPSK 调制方式,则 $pe^{(ij)}$ 可以表示为^[13]:

$$pe^{(ij)} = pe^{(i)} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{r}_i}{1 + \bar{r}_i}} \right) \quad (3)$$

其中,第 i 个簇头收到各簇内认知用户的检测率与虚警率,如式(4)。

$$\begin{cases} pf_i = pf^{(ij)}(1 - pe^{(i)}) + pe^{(i)}(1 - pf^{(ij)}) \\ pd_i = pd^{(ij)}(1 - pe^{(i)}) + pe^{(i)}(1 - pd^{(ij)}) \end{cases} \quad (4)$$

经簇头融合后,簇头相应的虚警概率和检测概率分别为:

$$Pf = \prod_{i=1}^n pf_i = [pf(1 - pe) + (1 - pf)pe]^n \quad (5)$$

$$Pd = \prod_{i=1}^n pd_i = [pd(1 - pe) + (1 - pd)pe]^n \quad (6)$$

第三步:簇头间信息编码。

簇头融合本簇内的感知信息之后,需要将其判决结果与相邻簇头的判决结果进行编码后逐级传输给融合中心。假设每个簇头配有两根天线,为了让簇头与它上一级簇头能够进行编码,规定两根天线中有一根天线仅传送自己的判决信息,另一根传送下一级簇头传送的判决信息。

具体规则如下:其中 D_i ($D_i = 0$ or 1) 表示第 i 级簇头的判决信息。

第一级簇头发送其判决结果到第二级簇头。

在第一个阶段,第 1 级簇头的两根天线都发送 D_1 ,在第二阶段,第 1 级簇头的两根天线发送 $-D_1$ 。

第二级簇头发送其判决结果给第三级簇头。

在第一个阶段,第 2 级簇头的一根天线发送 D_2 ,另一根天线发送接收的上级的判决信息 D_1 ,在第二阶段,第 2 级簇头的一根天线发送判决信息 $-D_2$,而另一根发送 $-D_1$ 。

第三级簇头发送其判决结果到第四级簇头。

在第一个阶段,第 3 级簇头的一根天线发送 D_3 ,另一根天线发送接收的上级的判决信息 D_1D_2 ,在第二阶段,第 3 级簇头的一根天线发送 $-D_3$,另一根发送 $(-D_1 - D_2)$ 。

以此类推,直到信息发送到融合中心。

第四步:信息融合。

融合中心获得各支路发送过来的编码信息之后,需要先进行解码,并采取或门融合判决,从而获得最终的判决结果。即融合中心处的虚警概率 Qf 与检测概率 Qd 分别为^[11]:

$$Qf = 1 - \prod_{j=1}^3 (1 - PF^j) \quad (7)$$

$$Qd = 1 - \prod_{j=1}^3 (1 - PD^j) \quad (8)$$

其中, PD^j, PF^j 分别指第 j 条支路簇头(即第 j 级簇头)的检测率和漏检率。

由于是在 Rayleigh 衰落信道上传输,误码的存在会影响检测性能。因此第 $(j+1)$ 级簇头的虚警率和检测率表示如下^[14]:

$$PF^{j+1} = PF^j(1 - Pe^j) + (1 - PF^j) Pe^j \quad (9)$$

$$PD^{j+1} = PD^j(1 - Pe^j) + (1 - PD^j) Pe^j \quad (10)$$

其中:

$$Pe = \left(\frac{1-r}{2} \right)^2 (2-r) \quad (11)$$

$$r = \sqrt{\frac{\bar{r}}{1 + \bar{r}}} \quad (12)$$

3 系统仿真

图 3 通过数值仿真来验证编码之后检测性能能够有效提高。仿真中选取为四跳多簇认知网络。选取平均信噪比 $\bar{r} = 10$, 门限值 $\lambda = 4$, 一簇内的认知用户数目 $n = 5$ 。

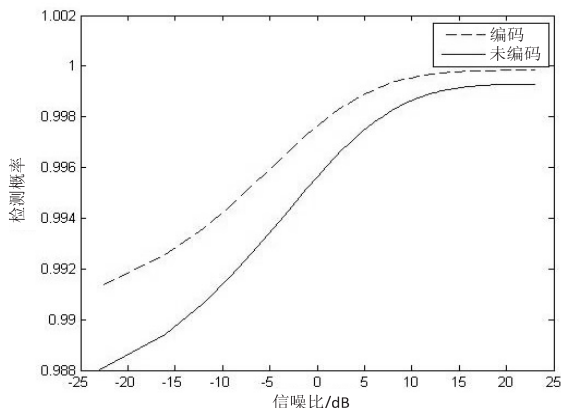


图 3 编码对检测概率的影响

图中可以明显看出,随着信噪比的增加,检测概率 Q_d 也随之增加,并且编码之后的检测性能要明显高于未编码的检测性能。

图 4 用数值仿真验证在瑞利衰落信道中,编码能够有效减少信道上的误码,增强可靠性,提高检测性能。仿真时采取四跳多簇认知网络。

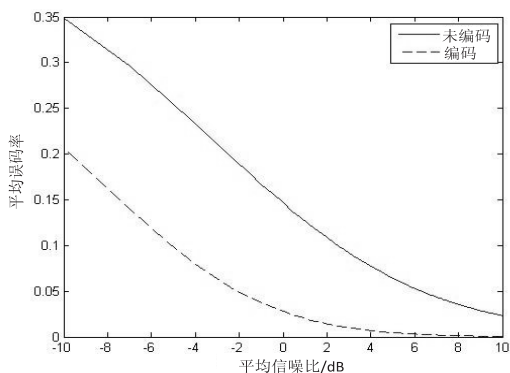


图 4 编码对衰落信道误码率的影响

从图中可以明显看出,平均误码率均随着平均信噪比的增大而减少,并且随着平均信噪比的不断增大,平均误码率的值逐渐趋于 0。在给定平均信噪比的情况下,编码信道的平均误码率要比未编码信道平均误码率小,即对瑞利衰落信道进行编码,能够有效减少平均误码率,提高可靠性,增强检测性能。

图 5 表明,多跳认知网络中的跳数也能影响检测性能。仿真中取平均信噪比 $\bar{r} = 2$, 门限值 $\lambda = 8$, 一簇内的认知用户数目 $n = 10$ 。

由图可知,在小信噪比时,随着跳数的增加,检测性能明显好转;而在大信噪比时,两者差异不大。

图 6 用来验证在一定范围内,在四跳多簇认知网

络中,检测性能可以随着支路的增加而增加。仿真中取平均信噪比 $\bar{r} = 2$, 门限值 $\lambda = 8$, 一簇内的认知用户数目 $n = 10$ 。

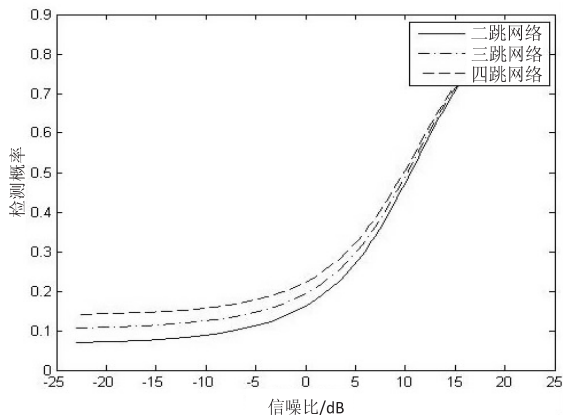


图 5 多跳网络中不同跳数对检测率的影响

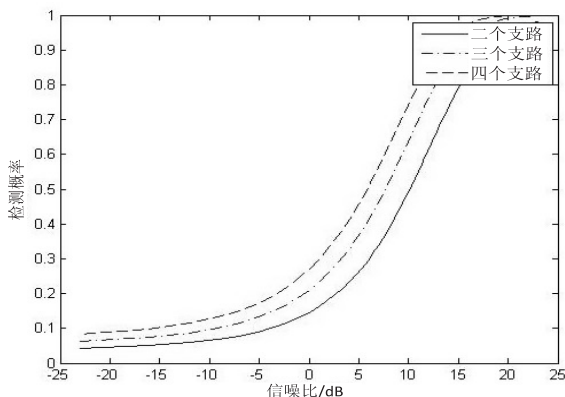


图 6 多跳多簇网络中不同支路下的检测性能

由图中可知,随着信噪比的增加,不同支路数的检测性能都有不同程度的增加,其中四个支路的检测性能要明显优于两个支路和三个支路的检测性能。

4 结束语

在认知无线网络中,为了提高认知系统的检测性能,采取多跳多簇认知网络。采取多簇多跳认知网络不仅可以切实有效地节省发送能量,提高吞吐量,而且多跳多簇认知网络中的支路数和跳数都能在一定程度上增强检测性能。

由于报告信道的不理想性,常常伴有错误的存在,影响最后的判决结果。因此在文中模型中不同级别的簇头间采取 Alamouti 编码。从仿真中可以明显看出,编码之后的信道误码率得到明显改善,能够提高检测效率,从而增强检测性能。

参考文献:

- [1] 张高飞. 认知无线电频谱感知和功率分配研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.

同步精度要求不是很高的同步系统来说,如 CPU 级的时钟同步,这个精度已经够用了。

4 结束语

综上所述,PTPd 实现的 IEEE1588 精准时钟同步协议的微秒级的同步精度虽然没有达到 IEEE1588 协议规定的纳秒级同步精度,但是它要远远优于传统 NTP 协议的几百毫秒级的同步精度,因此,将 PTPd 实现的 IEEE1588 精准时钟同步协议应用于载人航天某航天器嵌入式软件第三方评测的分布式仿真测试系统前端中,同时配合仿真测试前端的 FPGA,进行分级时钟同步,取得了令人满意的同步精度,顺利完成了对某航天器嵌入式主控软件的第三方测试任务。同时也为 IEEE1588 精准时钟同步协议的推广使用拓宽了道路。

参考文献:

- [1] Cisco Systems, Inc. Network time protocol; best practices white paper[EB/OL]. 2008. <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/availability/high-availability/19643-ntpm.html>.
- [2] 李晓珍. 基于 IEEE1588 的网络时间同步系统研究[D]. 北京:中国科学院, 2011.
- [3] Li Dejun, Wang Gang, Yang Canjun, et al. IEEE 1588 based time synchronization system for a seafloor observatory network[J]. Journal of Zhejiang University Sci C, 2013, 14(10): 766-776.
- [4] Zhang Xiangli, Tang Xiaoqi, Chen Jihong. Time synchroniza-

(上接第 174 页)

- [2] 王钦辉, 叶保留, 田宇, 等. 认知无线网络中频谱分配算法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 147-154. [3] 刘婷婷. 认知无线电中关键技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [4] 王超, 陈少刚, 武明川. 认知无线电下的频谱管理建议[J]. 中国科技信息, 2014(22): 202-203.
- [5] 张奎鹏. 认知无线电中的协作频谱感知关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [6] 张培, 孟庆民, 朱卫平. 一种可以减少时间的频谱感知方法[C]//2010 年通信理论与信号处理学术年会. 北京: 电子工业出版社, 2010: 238-242.
- [7] 夏东瀛. 认知无线电系统中的频谱分配算法的研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [8] Amir G, Elvino S S. Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing[J]. Journal of Communications, 2007, 2(2): 71-82.
- [9] Liang Y C, Zeng Z, Pech E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on

tion of hierarchical real-time networked CNC system based on ethernet/internet[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(11-12): 1145-1156.

- [5] 陈敏. 基于 NTP 协议的网络时间同步系统的研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [6] IEEE Std 1588-2008. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]. New York: IEEE, 2008.
- [7] Zhong Chongquan, Jin Haibo, Han Yechen, et al. Research and implement of distributed network motion control system[J]. Informatics in Control, Automation and Robotics, 2011, 2: 383-391.
- [8] 张洪源. 基于 IEEE1588 的数字化变电站时钟同步技术的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [9] 魏丰, 孙文杰. IEEE-1588 协议时钟同步报文的精确时间标记方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1): 162-169.
- [10] 陈永标. IEEE 1588 时间精确同步协议(PTP)在电力系统应用的可行性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [11] 常夏勤. IEEE1588 时间同步协议分析与实现[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [12] 苏宇. 嵌入式实时测试前端的设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [13] 张亚超. 基于 IEEE1588 协议的嵌入式网络节点研究与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [14] 宋升金, 许永辉, 姜守达. 基于 PTPd 改进的高精密时钟同步实现[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(2): 72-75.

Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.

- [10] Li Meiling, Yuan Chaowei, Li Lin, et al. Performance analysis and optimization of cooperative spectrum sensing for maximizing secondary throughput[J]. Journal on Communications, 2011, 32(2): 53-60.
- [11] Letaief K B, Zhang W. Cooperative communication for cognitive radio networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 878-893.
- [12] 刘鑫, 谭学治, 马琳. 认知无线电多簇联合频谱感知算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(1): 50-54.
- [13] 岳文静, 郑宝玉, 孟庆民, 等. 衰落信道下提高协作频谱感知能力的方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(2): 207-218.
- [14] Kozal A S B, Merabti M, Bouhafs F. Spectrum sensing-energy tradeoff in multi-hop cluster based cooperative cognitive radio networks[C]//Proc of 2014 IEEE INFOCOM Workshops on green cognitive communications and computing. [s. l.]: [s. n.], 2014: 765-770.

提高认知多跳网络的协作频谱感知方法

作者：[刘敏](#)，[岳文静](#)，[蒲昱](#)，[陆海亚](#)，[LIU Min](#)，[YUE Wen-jing](#)，[PU Yu](#)，[LU Hai-ya](#)
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](#)[ISTIC](#)
英文刊名：
年，卷(期)：2016(1)

引用本文格式：[刘敏](#)，[岳文静](#)，[蒲昱](#)，[陆海亚](#)，[LIU Min](#)，[YUE Wen-jing](#)，[PU Yu](#)，[LU Hai-ya](#) [提高认知多跳网络的协作频谱感知方法](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2016(1)