

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.02.007

引用格式:石晓娟,张融.非理想频谱检测对主用户干扰的性能分析[J].电讯技术,2014,54(2):151-155. [SHI Xiao-juan,ZHANG Rong. Interference Performance Analysis for Primary User with Imperfect Spectrum Sensing[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(2):151-155.]

非理想频谱检测对主用户干扰的性能分析*

石晓娟¹,张 融^{2,**}

(1. 西安邮电学院,西安 710121;2. 西安电子科技大学,西安 710071)

摘 要:实际中认知中继网络的频谱检测不可能完全正确检测频谱状态,次级用户传输会对主用户传输产生干扰。在分布式协作频谱检测和集中式协作频谱检测情况下,研究了认知中继网络中非理想频谱检测对主用户干扰性能的影响。在瑞利信道下推导了非理想频谱检测条件下主用户干扰概率的数学表达式。最后,仿真结果证明了理论分析的合理性,并表明非理想频谱检测会对主用户产生较大干扰,而中继节点数目的增加可以明显降低干扰概率。

关键词:认知中继网络;频谱共享;频谱检测;干扰概率

中图分类号:TN925 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)02-0151-05

Interference Performance Analysis for Primary User with Imperfect Spectrum Sensing

SHI Xiao-juan¹,ZHANG Rong²

(1. Xi'an University of Posts and Telecommunications,Xi'an 710121,China;2. Xidian University,Xi'an 710071,China)

Abstract:Due to the imperfect spectrum sensing in practice, the secondary user's (SU's) transmission interferes with the primary user (PU) unavoidably. With distributed spectrum sensing (DSS) and cooperative spectrum sensing (CSS), this paper investigates the impact of imperfect spectrum sensing on PU in cognitive relay networks. The exact expression for interference probability of PU is derived over Rayleigh fading channels. Finally, the theoretical analysis is validated by Monte-Carlo simulations. The results show that, though the imperfect spectrum sensing leads to the interference on PU, an increase of the number of relays can compensate the loss significantly.

Key words:cognitive relay network;spectrum sharing ;spectrum sensing ;interference probability

1 引 言

近期,认知网络作为一种提高频谱效率的方法引起了广泛关注^[1]。其中,频谱检测和次级用户传输作为两个热门问题得到了深入的研究。所谓频谱检测就是在时域、频域和空域多维空间,对被分配给主用户(授权用户)频段进行不断的频谱检测,检测这些频段内主用户是否工作,从而得到频谱的使用情况。但是在实际的无线衰落信道下单节点的检测并不能保证检测结果的准确性,而协作频谱检测则

可以利用多个中继节点通过空间分集来改善系统的检测性能。在文献[2]中,作者给出了不同融合策略下系统精确的协作检测概率和虚警概率。

根据系统的检测结果,当检测到频谱空洞时次级用户采用最大功率传输信息,而当检测到主用户存在时次级用户则在干扰功率受限的条件下传输信息。前者被定义为交错模式,文献[3]在认知中继网络中此模式条件下研究了次级用户的中断性能;后者被定义为潜伏模式,文献[4]研究了单中继节

* 收稿日期:2013-08-07;修回日期:2013-12-12 Received date:2013-08-07;Revised date:2013-12-12
** 通讯作者:zhangrong_816@sina.cn Corresponding author:zhangrong_816@sina.cn

点条件下次级用户的中断性能。对于多中继的情况,文献[5]在主用户接收机干扰受限的情况下研究了次级用户的干扰概率和分集增益。文献[6]研究了主用户存在下计算了放大转发模式的干扰概率。文献[7-8]则更进一步讨论了干扰受限条件下多中继认知中继网络的性能。

可以看出,上述工作都忽视了协作检测下次级用户传输对主用户性能的干扰,并且把频谱检测和次级用户传输分开讨论。在文献[9]中作者研究了多中继节点下系统的认知传输性能。在文献[10]中作者则讨论了在瑞利衰落和 Nakagami-m 衰落信道下分布式协作频谱检测和集中式协作频谱检测下次级用户的中断性能和分集增益。此外,文献[11]在最大传输功率和峰值干扰功率下,研究了认知中继网络的干扰概率。但是,不难发现上述工作都忽视了非理想频谱检测对主用户传输的影响。据我们所知,还没有任何文献研究这个问题。因此,本文分别在分布式频谱和集中式频谱下分析了非理想频谱检测对主用户干扰性能的影响。

本文安排如下:第2节描述系统模型,第3节讨论分布式协作频谱检测和集中式协作频谱检测下非理想频谱监测对主用户干扰性能的影响,第4节给出仿真结果并加以讨论,第5节给出全文结论。

2 系统模型

在图1的认知中继网络中,存在一个主用户和一个次级用户,并且 N 个中继节点被用来进行频谱检测和帮助次级用户传送信息。主用户 u 以固定功率 P 向主用户接收机 v 发送信息。由于存在着深衰落,假设次级用户发射机 s 和次级用户接收机 d 之间不存在直接链路。次级用户通过 N 个中继节点向次级用户的接收机传送信息。假设所有结点的背景噪声均为均值为0、方差为1的高斯白噪声,并且任意两个节点之间均为瑞利衰落信道。节点 i 和节点 j 间的瞬时信道增益则用 $h_{i,j}$ 表示,则 $|h_{i,j}|^2$ 服从方差为 $\sigma_{i,j}^2$ 的指数分布,并且假设 $h_{i,j}$ 在一个传输帧内是恒定的,但从一帧到另一帧是变化的。在频谱检测阶段,所有传输共享相同的频带。在时隙 i 内,用 $H_p(i)$ 假设信道是否被主用户占用。如果信道是空的,则 $H_p(i)=H_0$,否则 $H_p(i)=H_1$ 。

通常情况下,认知系统一般包括两个阶段:频谱检测阶段和数据传输阶段。对于集中式协作频谱检测的检测阶段,中继节点检测频谱空洞的存在性并

把检测结果反馈给次级用户发射机。次级用户发射机通过“OR”判断准则决定最终检测结果 H_c 。对于分布式协作频谱检测次级用户发射机和中继节点分别单独进行检测并得到检测结果 H_d 。换句话说,如果次级用户和超过一个中继节点检测到了频谱空洞,次级用户就会传送消息。

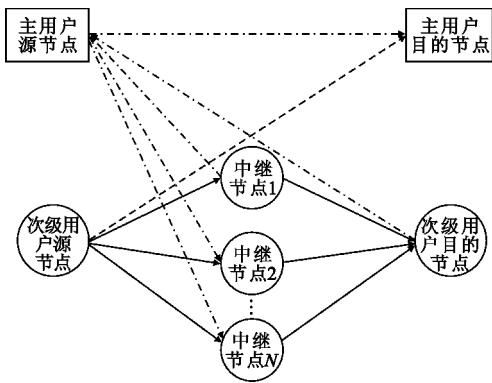


图1 系统模型
Fig. 1 System model

在数据传输阶段,中继节点工作于半双工方式并采用DF中继策略。正确解码并且在次级用户接收机处拥有最大信噪比(信道空闲时)或最大输出信号干扰噪声比(信道被主用户占用时)的中继节点被选择转发次级用户信息。此外,为保证主用户的传输,次级用户根据检测结果自主调整传输功率。当检测到频谱空洞,次级用户用最大峰值功率 $P_{\max}$ 传送信息。当检测到主用户存在时,由次级用户发射机和中继节点产生的干扰需要小于拟定的干扰门限 Q 。为了实现这个目标,在集中式协作频谱检测中次级用户和中继节点的传输功率应满足以下条件^[8]:

$$P_s(H_c=H_1)=\begin{cases} P_{\max}, & |h_{s,v}|^2 \leq \frac{Q}{P_{\max}} \\ \frac{Q}{|h_{s,v}|^2}, & |h_{s,v}|^2 > \frac{Q}{P_{\max}} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_r(H_c=H_1)=\begin{cases} P_{\max}, & |h_{r,v}|^2 \leq \frac{Q}{P_{\max}} \\ \frac{Q}{|h_{r,v}|^2}, & |h_{r,v}|^2 > \frac{Q}{P_{\max}} \end{cases} \quad (2)$$

3 主用户干扰概率

在混合交错-潜伏式的认知中继网络中,如果由次级用户对主用户造成的干扰小于门限值 Q ,则可以保证主用户的传输性能。因此,本文采用干扰

概率去估计频谱检测对主用户的影响。当频谱检测正确或是主用户不传输信息时,主用户传输性能可以得到保证。因此,只有当主用户传输且频谱检测发现空洞时会产生干扰^[9-10]。下面分别讨论分布式协作频谱检测和集中式协作频谱检测下的干扰概率。

3.1 分布式协作频谱检测

对于分布式协作频谱检测,次级用户发射机和中继节点分别独立检测频谱,只有当下面两种情况中某一种发生时才会产生干扰。

情况 1:存在主用户传输且次级用户接收机检测到了主用户传输存在。大于一个中继节点没有检测到主用户传输的存在,这些中继节点形成一个集合 C 。其中属于集合 C 并且可以正确接收主用户信息的中继节点形成集合 D 。如果集合 D 是非空集合,则集合 D 中在次级用户接收机处获得最大信道增益的中继节点用最大传输功率 $P_{\max}$ 传输次级用户信息^[13-14]。

情况 2:存在主用户传输且次级用户接收机没有检测到主用户传输存在。次级用户发射机以最大传输功率 $P_{\max}$ 传输信息,导致主用户接收机处的干扰大于干扰门限 Q 。

由此,利用全概率公式,在分布式协作频谱检测情况下次级用户对主用户的干扰概率可以表示为

$$P_{d-I} = p_{s,d} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{C \subset R \\ |C|=i}} (1 - p_{r,d})^i (p_{r,d})^{N-i} P_{C-I} + (1 - p_{s,d}) \sum_{i=0}^N \sum_{\substack{C \subset R \\ |C|=i}} (1 - p_{r,d})^i (p_{r,d})^{N-i} P_{C-I} \quad (3)$$

其中, $p_{s,d}$ 和 $p_{r,d}$ 分别表示次级用户发射机和中继节点处的检测概率, i 表示集合 C 中中继节点个数。 P_{C-I} 表示次级用户接收机可以正确检测频谱且集合 C 中存在一个以上中继节点的概率。因此, P_{C-I} 表示为

$$P_{C-I} = \sum_{m=1}^i \sum_{\substack{D \subset C \\ |D|=m}} \left(\prod_{r_l \in D} P \left(\frac{P_{\max} |h_{s,r_l}|^2}{P |h_{u,r_l}|^2 + N_0} > \gamma_{th} \right) \right) \times \prod_{r_k \in C, r_k \notin D} P \left(\frac{P_{\max} |h_{s,r_k}|^2}{P |h_{u,r_k}|^2 + N_0} < \gamma_{th} \right) \times \sum_{p=1}^m (P(C | h_{r_p,d}|^2 > \max_{r_q \in D, p \neq q} |h_{r_q,d}|^2) \times P(P_{\max} | h_{r_p,v}|^2 > Q)) \quad (4)$$

其中, $\gamma_{th} = 2^{2R} - 1$, 且 R 表示信息传输速率; P

$\left(\frac{P_{\max} |h_{s,r_l}|^2}{P |h_{u,r_l}|^2 + N_0} > \gamma_{th} \right)$ 表示中继节点 r_l 正确解码次级用户发射机信息的概率, 表示为

$$P \left(\frac{P_{\max} |h_{s,r_l}|^2}{P |h_{u,r_l}|^2 + N_0} > \gamma_{th} \right) = \int_0^{\infty} P \left(|h_{s,r_l}|^2 > \frac{(N_0 + P_x) \gamma_{th}}{P_{\max}} \right) f_{|h_{u,r_l}|^2}(x) dx = \int_0^{\infty} \int_{\frac{N_0 + P_x}{P_{\max}} \gamma_{th}}^{\infty} f_{|h_{s,r_l}|^2}(y) dy f_{|h_{u,r_l}|^2}(x) dx = \frac{1}{\frac{P \gamma_{th} \sigma_{u,r_l}^2}{P_{\max} \sigma_{s,r_l}^2} + 1} \exp \left(- \frac{N_0 \gamma_{th}}{P_{\max} \sigma_{s,r_l}^2} \right) \quad (5)$$

此外,在解码集合 D 中拥有最大信道增益的中继节点 r_p 被选择转发信息的概率被表示为

$$\Pr(|h_{r_p,d}|^2 > \max_{r_q \in D, p \neq q} |h_{r_q,d}|^2) = \int_0^{\infty} \Pr(\max_{r_q \in D, p \neq q} |h_{r_q,d}|^2 < x) f_{|h_{r_p,d}|^2}(x) dx = \int_0^{\infty} \left(1 - \exp \left(- \frac{x}{\sigma_{rd}^2} \right) \right)^{m-1} f_{|h_{r_p,d}|^2}(x) dx = \int_0^{\infty} \sum_{j=1}^{m-1} C_{m-1}^j (-1)^j \exp \left(- \frac{jx}{\sigma_{rd}^2} \right) f_{|h_{r_p,d}|^2}(x) dx = \sum_{j=0}^{m-1} \frac{C_{m-1}^j (-1)^j}{j+1} \quad (6)$$

而由被选中继节点 r_p 产生的干扰大于干扰门限 Q 的概率为

$$P(P_{\max} |h_{r_p,v}|^2 > Q) = \exp \left(- \frac{Q}{P_{\max} \sigma_{r_p,v}^2} \right) \quad (7)$$

另外,由于干扰链路和主用户传输链路是相互独立的,因此,将公式(5)~(7)代入式(4)中,可以得到 P_{C-I} 。

在公式(3)中, P_{C-I} 表示在次级用户传输机没有正确检测频谱下的干扰概率^[15]。 P_{C-I} 被表示为

$$P_{C-I} = P(P_{\max} |h_{s,v}|^2 > Q) + P(P_{\max} |h_{s,v}|^2 < Q) \times \sum_{m=1}^i \sum_{\substack{D \subset C, |D|=i \\ D \in C, |D|=i}} \left(\prod_{r_l \in D} P \left(\frac{P_{\max} |h_{s,r_l}|^2}{P |h_{u,r_l}|^2 + N_0} > \gamma_{th} \right) \right) \times \prod_{r_k \in C, r_k \notin D} P \left(\frac{P_{\max} |h_{s,r_k}|^2}{P |h_{u,r_k}|^2 + N_0} < \gamma_{th} \right) \times \sum_{p=1}^m (P(C | h_{r_p,d}|^2 > \max_{r_q \in D, p \neq q} |h_{r_q,d}|^2) \times P(P_{\max} |h_{r_p,v}|^2 > Q)) \quad (8)$$

尤其当 $i=0$ 时,意味着 R 中的所有中继节点都可以正确检测频谱。在这种情况下, P_{C-I} 可以被表示为

$$P_{C-I} = P(P_{\max} |h_{s,v}|^2 > Q) = \exp \left(- \frac{Q}{P_{\max} \sigma_{s,v}^2} \right) \quad (9)$$

将式(4)~(8)代入式(3),就可得到精确的干扰概率数学表达式。

3.2 集中式协作频谱检测

对于集中式协作频谱检测来说,所有中继节点的检测结果都被传送到次级用户发射机处,并在次级用户发射机处进行硬融合。只有当所有中继节点和次级用户发射机都认为存在频谱空洞时,主用户才传输信息。换句话说,如果次级用户发射机或一个中继节点检测到主用户的传输,则次级用户认为信道被主用户传输占用。因此,只有当所有中继节点和次级用户发射机检测到频谱空洞但存在主用户传输时,次级用户的传输才可能会降低主用户的传输性能并导致干扰发生。为此,集中式协作频谱检测的干扰概率为

$$P_{CJ} = (1 - p_{s,d})(1 - p_{r,d})^N \times [P(P_{\max} | h_{s,v}|^2 > Q) + P(P_{\max} | h_{s,v}|^2 < Q) \times \left(\sum_{m=1}^N \sum_{|D|=m} \left(\prod_{r_l \in D} P \left(\frac{P_{\max} | h_{s,r_l}|^2}{P | h_{u,r_l}|^2 + N_0} > \gamma_{th} \right) \right) \times \prod_{r_k \in R, r_k \notin D} P \left(\frac{P_{\max} | h_{s,r_k}|^2}{P | h_{u,r_k}|^2 + N_0} < \gamma_{th} \right) \times \sum_{p=1}^m P(|h_{r_p,d}|^2 > \max_{r_q \in D, p \neq q} |h_{r_q,d}|^2) \times P(P_{\max} | h_{r_p,v}|^2 > Q))] \quad (10)$$

4 仿真与分析

在本节中,我们在 matlab 环境下采用蒙特卡罗的方法仿真 100 000 次。取 $R=1 \text{ b/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$, $N=6$, $N_0=1$, $\sigma_{u,d}^2=\sigma_{s,v}^2=1 \text{ dB}$, $\sigma_{r_k,d}^2=20 \text{ dB}$, $\sigma_{r_k,v}^2=1 \text{ dB}$ ($1 \leq k \leq N$)。此外,次级用户和中继的峰值传输功率均为 $P_{\max}=8 \text{ dB}$,主用户的传输功率为 $P=10 \text{ dB}$ 。

图 2 给出了在次级用户不同检测概率 $p_{s,d}$ 下,分布式协作频谱检测和集中式协作频谱检测的干扰概率随中继节点数目 N 的变化曲线。可以看到理论值与仿真值基本重合,这验证了之前理论分析的正确性。另外,可以看出,在相同的检测概率 $p_{s,d}$ 下,随着中继节点数量的增加,主用户干扰概率会逐渐减小。即当中继节点数量增加后,可以更准确地检测到信道的使用状况,减少错误判断信道使用情况而造成的干扰。并且可以看到,干扰概率随着 $p_{s,d}$ 的增加而减小,这是因为增加 $p_{s,d}$ 可以增加次级用户检测到主用户传输信息的概率,进而正确判断信道的使用情况,减少次级用户对主用户传输的干扰。

另外,也可以看到,由于集中式协作检测考虑所有节点的频谱检测结果,集中式协作频谱检测较分布式协作频谱检测更准确,因此集中式协作频谱检测下次级用户对主用户造成的干扰更小。

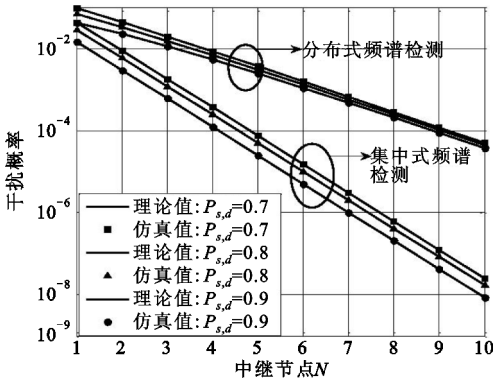


图 2 不同 $p_{s,d}$ 对干扰概率的影响
Fig. 2 Effect of $p_{s,d}$ on interference probability

图 3 给出了在不同 $\sigma_{u,r}^2$ 下,集中式协作频谱检测和分布式协作频谱检测的干扰概率随 $\sigma_{s,r}^2$ 的变化曲线。可以看出,当 $\sigma_{s,r}^2$ 增加时,主用户的干扰概率逐渐地在增加。即当 $\sigma_{s,r}^2$ 增加时,降低了中继节点正确检测频谱的能力,进而增加了次级用户对于主用户的干扰。另外,当提高主用户到中继节点的链路系数 $\sigma_{u,r}^2$ 时,可以增加中继节点正确检测频谱状态的能力,进而降低次级用户对主用户的干扰,使主用户的干扰概率降低。

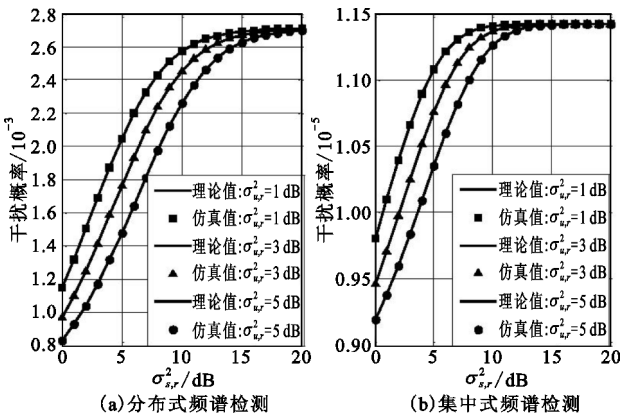


图 3 不同 $\sigma_{u,r}^2$ 对干扰概率的影响
Fig. 3 Effect of $\sigma_{u,r}^2$ on interference probability

5 结 论

本文分别在分布式协作频谱检测和集中式协作频谱检测情况下,研究了认知中继网络中非理想频

谱检测对主用户干扰性能的影响。研究结果表明,非理想频谱会对主用户产生较大干扰,但是采用集中式频谱可以获得更好的系统性能。另外,通过增加中继节点的数量可以弥补由非理想频谱检测造成的系统性能损失。

参考文献:

- [1] Zou Y, Yao Y, Zheng B. Cooperative Relay Techniques for Cognitive Radio Systems: Spectrum Sensing and Secondary User Transmissions [J]. IEEE Communication Magazine, 2012, 50(4):98-103.
- [2] Atapattu S, Tellambura C, Jiang H. Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4):1232-1241.
- [3] Lee K, Yener A. Outage performance of cognitive wireless relay networks [C]//Proceedings of 2006 IEEE Globe Telecommunications Conference. San Francisco, CA;IEEE, 2006:1-5.
- [4] Hong J, Hong B, Ban T, et al. On the Cooperative Diversity gain in Underlay Cognitive Radio Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(1):209-219.
- [5] Xu W, Zhang J, Zhang P, et al. Outage Probability of Decode-and-Forward Cognitive Relay in Presence of Primary User's Interference[J]. IEEE Communication Letters, 2012, 15(7):1252-1255.
- [6] Zou Y, Zhu J, Zheng B, et al. An adaptive cooperation diversity scheme with best-relay selection in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2011, 10(2):648-659.
- [7] Kim J, Kim D. Outage Probability and Achievable Diversity Order of Opportunistic Relaying in Cognitive Secondary Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(9):2456-2466.
- [8] Yan Z, Zhang X, Wang W. Exact Outage Performance of Cognitive Relay Networks with Maximum Transmit Power Limits[J]. IEEE Communication Letters, 2011, 15(6):1317-1319.
- [9] Win M Z, Pinto P C, Shepp L A. A Mathematical Theory of Network Interference and Its Applications[J]. Proceedings of IEEE, 2009, 97(2):205-230.
- [10] Rabbachin A, Quek T, Shin H, et al. Cognitive Network Interference[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(2):480-492.
- [11] Atapattu S, Tellambura C, Jiang H. Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4):1232-1241.
- [12] Digham F F, Alouini M, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(1):21-24.
- [13] Muller A, Speidel J. Relay selection in dual-hop transmission systems; selection strategies and performance results [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications. Beijing:IEEE, 2008:4998-5003.
- [14] Xu W, Zhang J, Zhang P, et al. Outage Probability of Decode-and-Forward Cognitive Relay in Presence of Primary User's Interference[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(8):1252-1255.
- [15] Lee J, Wang H, Andrews J G, et al. Outage Probability of Cognitive Relays Networks with Interference Constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2):390-395.

作者简介:



石晓娟(1980—),女,陕西渭南人,讲师,主要研究方向通信与信息处理;

SHI Xiao-juan was born in Weinan, Shaanxi Province, in 1980. She is now a lecturer. Her research concerns communication and information processing.

张融(1989—),男,黑龙江哈尔滨人,西安电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为认知无线电和协作通信。

ZHANG Rong was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1989. He is now a graduate student. His research interests include cognitive radio and cooperative communication.

Email:zhangrong_816@sina.cn