

多信道频谱感知与频谱接入的优化与折衷

Multi-Channel Spectrum Sensing and Spectrum Access: Optimization and Tradeoffs

中图分类号:TN92 文献标识码:A 文章编号:1009-6868 (2009) 02-0039-04

摘要:基于贝叶斯推理的多信道频谱感知方法和思想,文章通过多个认知用户随机地选择部分信道进行协作感知并利用特殊设计的贝叶斯推理法则来快速有效地获取所有信道的活动状态。贝叶斯推理的多信道频谱感知方法也是多分辨率频谱感知的基础,具有重要的应用价值。文章还通过分析多用户多信道条件下频谱感知和频谱接入之间复杂而微妙的内在联系,对其进行适当地优化与折衷,以提高认知系统的性能和效率。

关键词:多信道频谱感知;多分辨率频谱感知;频谱接入;优化与折衷

Abstract: Based on Bayesian Inferring, this paper introduces a novel multi-channel spectrum sensing method, which uses only the partial channel information sensed by collaborating cognitive users to retrieve all the channel states. This idea sheds a light to the more general multi-resolution spectrum sensing problem, and is of practical significance. Then, by investigating the intrinsic relationship between spectrum sensing and spectrum access in multi-user and multi-channel environment, the paper makes a tradeoff between these two processes to improve the system throughput and efficiency.

Key words: multi-channel spectrum sensing; multi-resolution spectrum sensing; spectrum access; optimization and tradeoffs

张朝阳/ZHANG Zhao-yang

(浙江大学 信息与通信工程研究所, 浙江 杭州 310027)

(Institute of Information and Communication Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

受限,既无必要也不可能同时对所有信道进行感知。但是如何从有限信道的感知信息中获得部分甚至全景的频谱状态信息,则仍然是一个较为复杂的问题。另一方面,频谱感知与频谱接入实际上是相互约束和相互影响的两个过程。在多(认知)用户和多信道的条件下,不同于普遍的认识,认知无线通信系统中的频谱接入和频谱感知并不仅仅是分别体现认知用户之间的竞争性和协作性^[5-6],也不仅仅是时间上相互接续的两个独立过程。事实上,频谱感知中多(认知)用户之间的协作性实际上也同样影响了它们在频谱接入中的有效性和竞争性。因此,完美的认知无线通信系统的协议设计必须综合地体现出频谱感知和频谱接入的优化与折衷^[7-9]。

本文将要介绍的第一项研究内容是用以建立一种新颖的分布式随机多信道感知机制和方法,该方法由多个认知用户随机地选择部分信道进行感知,并利用特殊设计的贝叶斯推理法则来快速有效地获得所有信道的活动状态^[10]。这项工作是多用户条件下多信道频谱感知以及多分辨率频谱感知的一个有益的尝试。本文将要介绍的另一项研究工作将力求

认知无线电作为多系统共存、资源共享与泛网融合的新兴手段,将对未来无线通信技术的体制和机制带来深刻的影响。实际应用中,认知无线电必须解决两个众所周知的基本问题^[1-2]:如何在尽可能宽的频段内实现快速有效的频谱感知;如何根据感知的频谱信息实现最佳的频谱接入。频谱感知的根本目标是保证

频谱资源的动态可用性,而频谱接入的根本目标则是保证频谱资源的利用效率。

在数百兆赫兹乃至数吉赫兹的动态共享频谱范围内,依据授权频谱的自然分隔或者基于认知用户的频谱需求对共享频谱进行多信道划分,可以提高感知的精度、降低感知的复杂性同时增加频谱接入的机会,由此产生了宽带频谱感知中最为典型的多信道频谱感知的问题^[2-3]。多信道频谱感知也是多分辨率频谱感知^[4]的特殊情形,具有重要的研究价值。通常由于单个认知用户的感知能力往往

基金项目:国家重点基础研究发展规划(“973”计划)项目(2009CB320405);国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2007AA01Z257);国家自然科学基金资助项目(60802012)

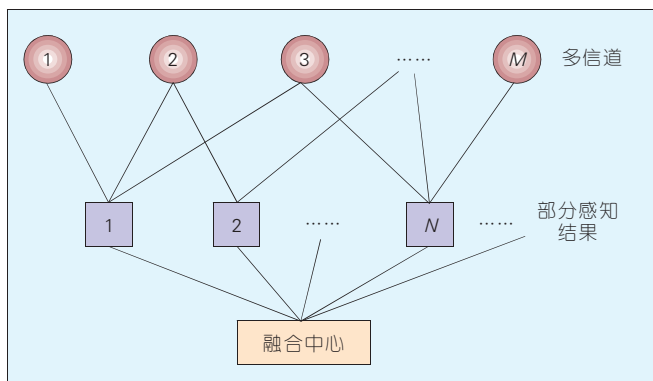


图1
多信道感知方法的
贝叶斯网络

揭示频谱感知与频谱接入之间复杂而微妙的内在联系,有关结果将为认知系统接入协议的优化设计提供一定的参考^[1]。

1 基于贝叶斯推理的多信道频谱感知

现有的多信道频谱感知广泛采用逐信道扫描的方法(例如对广播频段进行调谐搜索),这有很大的局限性。显然,它很难满足认知通信系统频率捷变和频谱共享动态性和实时性的要求。事实上,认知科学早就揭示了在认知和学习过程中,可以针对部分的观测结果通过合理的推理步骤来实现知识的综合并形成合理的架构;反过来也可以通过分析知识架构的缺陷和不足来实现主动的认知和学习。这一基本思想对于设计多信道频谱感知的具体方法具有重要的启示。

在我们所提出的一系列方法中,首先让每个认知用户按照优化设计的随机分布(例如孤波分布),从所有需要感知的信道中随机选择若干信道进行感知。这些部分信道的感知结果以硬判决或软判决信息的形式通过特定的方式发送给其他对等用户或融合中心。当任意认知用户或者融合中心获得足够多的部分感知信息时,这些部分感知信息序列与由全部信道状态所构成的未知序列形成了一个具有特殊结构、可推理的贝叶斯网络,如图1所示。该贝叶斯网络实际上是一个典型的二部图,但是具有特

殊的校验规则,因此借助于特殊设计的置信传播(BP)推理算法(例如基于“或”运算的BP算法),即可快速准确地获得所有信道的频谱活动状态。

作为示例,假设系统有4个认知用户和4个信道,每个认知用户最多感知的信道数目为2。每个信道被不同的主用户所占用,且占用概率均为0.5。每个主用户信号均采用任意的可靠传输方式(例如二进制相移键控(BPSK)调制)进行传输,每个信道上的信噪比均为 SNR ,背景噪声均为i.i.d复高斯过程。所有认知用户均根据理想孤波分布从所有需要感知的信道中随机选择部分信道进行感知,其检

测统计量均来自于经典的能量检测方法,此时融合中心的贝叶斯推理方法为基于“或”的BP算法。

方法一中,认知用户将所感知的部分信道的能量和作为感知结果发送给融合中心,当融合中心接收到的感知结果的数目不少于信道总数目时,融合中心即采用基于“或”运算的置信传播算法对所有信道上主用户的活动状态做出推理和判决。方法二中,每当融合中心完成一次基于“或”的置信传播推理,即对已确知主用户空闲的信道进行释放(即告知认知用户该信道不再感知),从而避免对状态确知的信道进行重复感知,提高检测效率。方法三中,认知用户对自己的感知结果进行硬判决,当置信度较高时将判决结果报告给融合中心,并采用与方法二类似的边检测边释放策略。

仿真结果(如图2所示)表明,方法一的检测性能最好,方法二其次,方法三最差;但方法二在系统规定的最大感知次数内能准确检测出信道状态的概率较方法一和方法三高。例如当 $SNR = -2$ dB时,方法一的检测概率

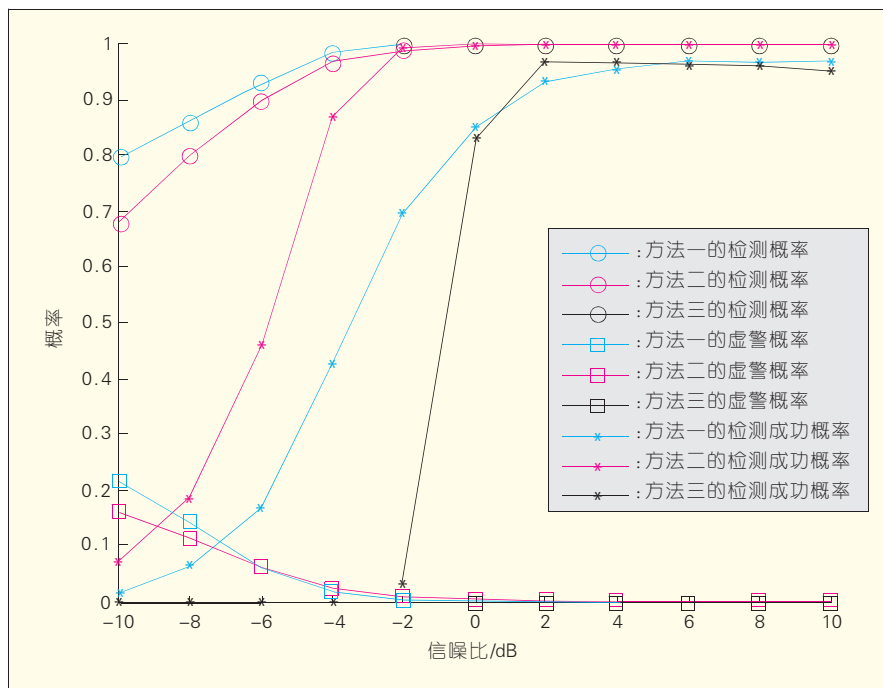


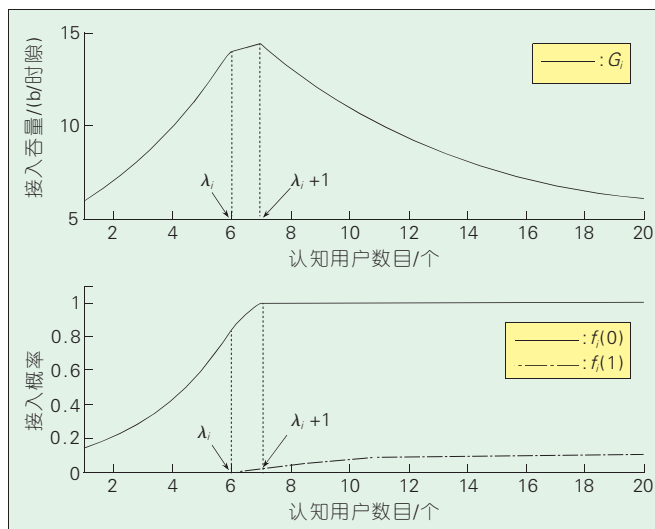
图2 多信道感知方法的性能

接近1,虚警概率接近0,在系统规定的最大感知次数内判决出所有信道活动状态的概率达到0.7;方法二的检测概率达到0.98,虚警概率接近0,在系统规定的最大感知次数内判决出所有信道活动状态的概率接近1;方法三的检测概率达到0.97,虚警概率接近0,但在系统规定的最大感知次数内判决出所有信道活动状态的概率仅0.023。这主要是由于方法二和方法三采用了边检测边释放的方法,状态已确定的信道的感知误差会对其余信道的状态分析判决造成影响,且方法三中只有部分认知用户将有效的感知信息发送给融合中心,因此在低信噪比下方法三检测性能较差,在认知无线通信系统规定最大感知次数内能判决出信道的活动状态的概率也较方法二差;但方法三能较好地节省带宽和功率开销,且推理算法较方法一和方法二简单,易于实现,复杂度低。

2 多信道频谱感知与频谱接入:优化与折衷

一般情况下,频谱接入总是作为频谱感知的后续过程而发生,单个认知节点在频谱接入的过程中通常也不对相同的频谱进行感知,这表明频谱感知和频谱接入实际上互为约束。然而,频谱感知和频谱接入的关系并不仅仅如此简单。在多(认知)用户和多信道条件下,不仅可以让多个用户对多个信道按照随机或特定的方式进行频谱接入,也可以由多个用户对多个信道按照随机或特定的方式进行频谱感知;而同一个用户所感知信道的多少,直接影响到它接入机会的多少;同一个信道被不同用户感知的次数的多少,不仅决定了该信道被(协作)感知的准确性,也同时决定了该信道被不同用户接入的竞争性和有效性。因此,在多用户和多信道条件下,认知系统的频谱感知与频谱接入具有非常复杂而微妙的内在联系,它们并不是两个相互独立的过程,二者之间蕴含着特定的优化与折衷。这也意味着认知系统接入协议的设计必须综合考虑频谱感知和频谱接入的相互影响。

图3
频谱感知与频谱接入
的优化与折衷



者之间蕴含着特定的优化与折衷。这也意味着认知系统接入协议的设计必须综合考虑频谱感知和频谱接入的相互影响。

当各信道被主用户占用的概率及信道特性已知时,如果以所有认知用户频谱接入的总吞吐量作为优化目标,则频谱感知和频谱接入的优化与折衷实际上要同时解决两个相互约束的问题:每一个认知用户应该如何选择信道与其他认知用户进行协作感知;每一个认知用户应该如何根据协作感知的结果与其他协作用户竞争接入同一个被感知空闲的信道。这一优化问题对于认知系统的协议设计有至关重要的意义,但由于其复杂性,往往难以得到显式的解,不过幸运的是,某些启发式的算法总是很有效的。

作为示例,我们考虑这样一个基本问题:给定每个信道被主用户占用的概率 θ_i 以及可行的传输速率上界 $R_i (i=1,2,\dots,M)$, 以及每个信道上主用户允许被认知用户中断的概率上限 ζ_i 。对这 N 个认知用户和 M 个信道,最优的频谱感知和频谱接入策略是下述联合优化问题的解:

$$\begin{aligned} \max \sum_{i=1}^M R_i (1-\theta_i) (Q_{\text{false},i} f_i(1) + 1 - Q_{\text{false},i}) f_i(0) \\ \text{s.t.} \\ (1-Q_{\text{miss},i}) f_i(1) + Q_{\text{miss},i} f_i(0) \leq \zeta_i \\ Q_{\text{miss},i} = P_{\text{miss},i}^{n_i} \end{aligned}$$

$$Q_{\text{false},i} = 1 - (1 - P_{\text{false},i})^{n_i}$$

$$\sum_{i=1}^M n_i \leq N$$

其中, $P_{\text{false},i}$ 和 $P_{\text{miss},i}$ 分别为信道 i 被单个认知用户感知之后的虚警和漏检概率; $Q_{\text{false},i}$ 和 $Q_{\text{miss},i}$ 分别为信道 i 被 n_i 个认知用户协作频谱感知之后的虚警和漏检概率; 概率对 $(f_i(0), f_i(1))$ 是信道 i 的频谱接入策略, 分别表示信道 i 的协作感知结果为空闲和占用状态下认知用户的接入概率。全部的 n_i 和 $(f_i(0), f_i(1))$ 构成了最优的频谱感知和频谱接入策略。

上述问题是非凸的整数规划。但可以证明,对每个信道 i , 其最优的协作频谱感知策略 n_i 总在某一个特殊的拐点 λ_i 附近取得, 由此也可以确定最优的频谱接入策略 $(f_i(0), f_i(1))$, 此时认知系统亦具有最大的接入吞吐量。如图3所示, 对于 $\theta_i=0.5$ 和 $\zeta_i=0.1$ 的情况, 在特定的拐点 λ_i 附近, 信道 i 的接入吞吐量随着 n_i 的增大而由递增变为递减。当 $n_i \ll \lambda_i$ 时, 频谱感知的协作性不足, 而频谱接入的竞争性过度, 因而影响系统的总吞吐量; 相反, 当 $n_i \gg \lambda_i$ 时, 频谱感知相对充分, 但频谱接入却相对不足, 同样不能使系统吞吐量达到最佳。系统的最大吞吐量也在 $n_i = \lambda_i$ 或 $\lambda_i + 1$ 处获得。

3 结束语

多信道频谱感知是认知无线通

信系统宽带频谱感知的典型场景。在单用户感知能力受限的条件下,频谱感知可以通过多用户协作并借助于适当的认知推理手段来实现。本文所介绍的基于贝叶斯推理的多信道频谱感知方法,能够实现快速有效的宽带频谱感知,该方法也是多分辨率频谱感知的思想基础,具有重要的应用。同时,在多用户多信道条件下,频谱感知和频谱接入具有复杂而微妙的内在联系,通过在二者之间进行适当的优化与折衷,将能够显著提高认知系统的性能和效率。这方面的研究工作必将成为认知无线通信系统的研究热点,对其协议优化设计有重要的意义。

4 参考文献

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23 (2): 201-220.
- [2] CABRIC D, MISHRA S M, BRODERSEN R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios[C]//Conference Record of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers: Vol 1, Nov 7-10, 2004, Pacific Grove, CA, USA. 2004: 772-776.
- [3] QUAN Zhi, CUI Shuguang, SAYED A H, et al. Spatial-spectral joint detection for wideband Spectrum spectrum sensing in cognitive radio networks[EB/OL]. <http://arxiv.org/abs/0801.3049v1>.
- [4] ZHANG Qiwei, KOKKELER A B J, SMIT G J M. An efficient multi-resolution spectrum sensing method for cognitive radio[C]//Proceedings of Third International Conference on Communications and Networking in China(ChinaCom'08), Aug 25-28, 2008, Hangzhou, China. 2008: 1226-1229.
- [5] GHASEMI A, SOUSA E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments[C]//Proceedings of 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'05), Nov8-11, 2005, Baltimore, MD, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 131-136.
- [6] MISHRA S M, SAHAI A, ROBERT W. Brodersen r w. Cooperative Sensing among Cognitive Radios[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'06), Vol 4, Jun 11-15, 2006, Istanbul, Turkey. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1658-1663.
- [7] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25 (3): 589-600.
- [8] LAI Lifeng, GAMAL H E, JIANG Hai, et al. Cognitive medium access: exploration, exploitation and competition[EB/OL]. <http://www.ece.osu.edu/~helgamel/cognitive%20radio%20nov11.pdf>.
- [9] SU Hang, ZHANG Xi. Cross-Layer Based Opportunistic MAC Protocols for QoS Provisionings Over Cognitive Radio Wireless Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 118-129.
- [10] 张朝阳, 王培雅, 等. 认知无线通信系统中基于推理的快速多信道联合检测方法: 中国, 200810121878.5[P]. 2008年10月.
- [11] HUANG Hui, ZHANG Zhaoyang, CHENG Peng, et al. Opportunistic spectrum access in cognitive radio system employing cooperative spectrum sensing[C]//VTC-Spring'2009, to appear.

收稿日期: 2009-01-05

作者简介



张朝阳, 浙江大学教授、博导, 研究领域为多用户信息论与新型编码理论、认知无线电与认知无线网络、协作中继通信、无线Mesh网络等。已承担国家级基金与科技计划项目10余项, 发表论文100余篇, 其中被SCI、EI收录60余篇。

中兴通讯推出业界最小WiMAX 16e RRU

2009年2月, 中兴通讯宣布在全球率先推出基于WiMAX 16e的最新RRU产品R9110。该产品不仅支持业界最领先的BF4×8多天线技术, 同时也是业界最小和唯一的一款支持不连续频段双载波的RRU。

该RRU产品由于采用了BF4×8多天线技术, 可有效增强单站信号质量、增大覆盖面积、提高整网性能, 因此相比以往采用MIMO技术的产品, 可有效减少35%~50%的站点数、极大降低运营商建网和维护成本。同时, 该RRU可支持不连续频段双载波, 上下行频段跨度可达100 MHz, 这意味着今后拥有传统FDD频段的运营商建网所必须的RRU、天线、铁塔等设备和配套设施可以减少一半。该款产品, 将极大降低运营商的TCO, 保护了运营商投资, 同时也使得网络工程建设变得更加灵活简便。

据权威行业研究机构In-Stat近日发布的报告显示, 2008年全年WiMAX合同新增迅猛, 中兴通讯表现尤为突出, 总数位列三甲。截止2008年11月, 中兴通讯已在全球签订超过30个WiMax合同。

中兴通讯SDR提案入围GSMA全球移动大奖短名单

2009年2月, 基于中兴通讯创新SDR技术的两款基站产品ZXSDR B8200和ZXSDR R8860顺利进入了GSMA全球移动大奖技术创新奖的短名单。GSMA全球移动大奖是移动通信领域最权威的奖项, 本次中兴通讯是唯一一家进入短名单的中国企业。

SDR通过软件设置实现不同调制方式、不同无线标准之间的灵活配置和转换。中兴通讯基于SDR技术的系列一体化基站创新性的改变了运营商建网模式, 利用全新的多制式统一平台, 将传统必须分别建设的两个网络转变为一次建设, 打造全新的2G/3G统一移动网络, 完美整合网络资源。同时网络还具备向未来HSPA+/LTE网络平滑演进的能力, 大大降低网络升级难度。SDR的应用将“灵活组网”和“高效组网”实现了完美结合。

2009年1月, 中兴通讯SDR 8000系列产品获中国联通WCDMA一期18个省的网络建设。中兴通讯SDR基站设备已在中国内地与香港、印度、土耳其等多个国家和地区得到了规模商用, 全球商用数量已达35 000台。