

DOI:10.7652/xjtuxb201408005

采用空时分组编码的动态分组加权合作频谱感知方案

王兵^{1,2}, 白智全¹, 董培浩¹, 高深¹, 高鹏¹

(1. 山东大学信息科学与工程学院, 250100, 济南;

2. 四川理工学院企业信息化与物联网测控技术四川省高校重点实验室, 643000, 四川自贡)

摘要: 针对认知无线网络中存在的非理想反馈信道与用户间信道使合作频谱感知算法难以有效提高频谱检测性能的问题,提出了一种基于空时分组编码的动态分组加权合作频谱感知(DC-WCSS)方案。首先将所有未分组认知用户中具有最高用户间信道平均信噪比的两个用户分为一组,并依此将剩余用户进行两两分组,然后根据各认知用户检测结果对系统检测性能的贡献对认知用户进行加权,赋予不同权重,最后采用空时分组编码(STBC)方案将用户检测结果传输给基站进行判决。DC-WCSS 方案可依据用户间信道平均信噪比进行动态分组,并根据认知用户检测结果的可靠性设置用户权重,能有效降低反馈阶段的误码率,从而提高系统检测性能。仿真结果表明,与基于传输分集的合作频谱感知方案相比,在虚警概率为 0.3 时,DC-WCSS 方案的一次加权和二次加权后的系统检测概率可分别提升至少 20%和 30%。

关键词: 认知无线电;频谱感知;空时分组编码;动态分组;加权

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)08-0023-06

A Spectrum Sensing Scheme with Weighted Collaboration of Dynamical Clustering Using Space-Time Block Code

WANG Bing^{1,2}, BAI Zhiquan¹, DONG Peihao¹, GAO Shen¹, GAO Peng¹

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. Key Laboratory of Higher Education of Sichuan Province for Enterprise Informationalization and Internet of Things, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China)

Abstract: A dynamical clustering based weighted collaborative spectrum sensing (DC-WCSS) scheme with space-time block code is proposed to solve the problem that the traditional collaborative spectrum sensing cannot improve the detection performance of the spectrum sensing efficiently caused by the non-ideal reporting channel and inter-user channel in cognitive radio networks. At first, the proposed scheme groups the two secondary users with the highest average signal-to-noise ratio (SNR) of the inter-user channel into a cluster and the remaining users are grouped into clusters in the same way. Then, the weighted factors are assigned to the secondary users according to the contributions of their detection results to the system detection performance. Finally, the space-time block code is adopted in each cluster to enhance the resulting transmission. Since the design of the dynamical clusters based on average SNRs of the inter-user channels and the allocation of the weighted factors to the secondary users take the reliability of the users' detection results into account, the DC-WCSS scheme can decrease the bit

收稿日期: 2014-01-06。 作者简介: 王兵(1986—),男,硕士生;白智全(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61301147,61072040);四川省高校重点实验室开放基金资助项目(2013WYJ02);山东省泰山学者计划基金资助项目(10000084961028);山东省优秀中青年科学家奖励基金资助项目(2012BSE27052)。

error rate of the reporting channels and improve the system detection performance. Simulation results show that the DC-WCSS outperforms the transmit diversity based on collaborative spectrum sensing scheme and its first-weighted scheme and second-weighted scheme can get at least 20% and 30% increase in the system sensing performance, respectively, when the false alarm probability is 0.3.

Keywords: cognitive radio; spectrum sensing; space-time block code; dynamical clustering; weighted

认知无线电系统采用合作频谱感知技术快速可靠地检测频谱空穴,使认知用户接入频谱,提高了频谱利用率^[1]。但是,当用户间信道与反馈信道经历衰落等干扰时,系统性能将会大幅度下降,因此寻找一种能有效改善反馈过程误码率,提高系统检测性能的合作频谱感知方案成为研究重点。

将认知用户进行分组,并采用选择分集技术使具备最好反馈信道的用户反馈检测结果,可提高系统的检测性能^[2]。考虑到认知用户间信道通常是非理想信道,文献[3]提出了多用户动态分组方案。为了进一步降低反馈阶段误码率,文献[4-5]提出了采用空时分组编码(STBC)方式传输反馈检测结果的方案。但是,分组的用户间信道经历深度衰落等干扰时,系统检测性能将会受到影响。考虑这一问题,文献[6]提出了基于STBC的动态分组感知方案,该方案先选定一个用户,继而选择与其信道最好的用户进行分组,降低了反馈阶段误码率,但当首选用户所处环境恶劣时,用户分组后的反馈阶段误码率会升高。同时,用户的地理位置不同,其检测信道平均信噪比(SNR)也不相同,检测信道平均SNR高的认知用户其本地检测结果较可靠。因此,根据认知用户检测信道平均SNR的高低,通过分配权重来决定用户对系统检测的贡献是非常必要和有效的^[7-9]。文献[10]提出了一种分组加权合作频谱感知方案,在一定程度上提高了系统性能,但该方案假设所有用户间信道条件和同组内认知用户的检测信道条件相同,并根据认知用户反馈信道平均SNR进行加权,而实际通信中上述假设常常无法成立。此外,对检测可靠而传输条件较差或检测结果较差而传输条件良好的用户,该方案最终的判决结果也存在不确定性。

针对以上问题,本文提出一种鲁棒性更强的动态分组加权合作频谱感知(DC-WCSS)方案。该方案首先确定质量最好的用户间信道,并将使用此信道的两个用户分成一组,然后对剩余用户依此进行分组。同时,根据认知用户检测信道平均SNR的高

低对检测结果进行加权。DC-WCSS方案在反馈阶段采用STBC技术传输用户检测结果,可有效改善反馈阶段的误码率,提高系统检测性能。

1 基于空时编码的合作频谱感知

基于STBC的合作频谱感知方案将STBC技术运用到认知无线电中,主要包括认知用户、主用户、融合中心,以及各无线信道,如检测信道、反馈信道和用户间信道。假设有 N 个用户,信道均服从瑞利衰落, $\bar{\gamma}_i$ 和 $\bar{\rho}_i$ 分别表示第 i 用户的检测信道和反馈信道的平均信噪比,系统结构如图1所示。

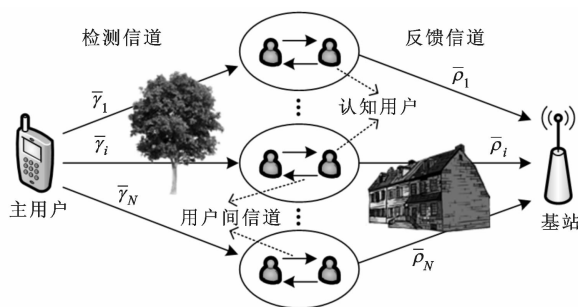


图1 基于STBC的合作频谱感知认知无线电系统结构

根据能量检测理论,单个认知用户的虚警概率 P_f 、检测概率 P_d 和漏检概率 P_m 分别为^[11]

$$P_f = \frac{\Gamma(m, \lambda/2)}{\Gamma(m)} \quad (1)$$

$$P_d = \exp\left(-\frac{\lambda}{2}\right) \sum_{k=0}^{m-2} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^k + \left[\frac{1+\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}}\right]^{m-1} \left\{ \exp\left[-\frac{\lambda}{2(1+\bar{\gamma})}\right] - \exp\left(-\frac{\lambda}{2}\right) \sum_{k=0}^{m-2} \frac{1}{k!} \left[\frac{\lambda\bar{\gamma}}{2(1+\bar{\gamma})}\right]^k \right\} \quad (2)$$

$$P_m = 1 - P_d \quad (3)$$

式中: $\bar{\gamma}$ 和 λ 分别为检测信道的平均SNR和能量检测的门限值; m 表示时间带宽积; $\Gamma(a)$ 和 $\Gamma(a, b)$ 分别为完整和不完整的伽马函数^[12]。

认知用户进行合作频谱感知时,在基站将检测结果采用“或”规则进行融合判决,检测概率 Q_d 、虚

警概率 Q_f 和漏检概率 Q_m 分别为^[3]

$$Q_d = 1 - \prod_{i=1}^N [P_{d,i}P_{e,i} + (1 - P_{d,i})(1 - P_{e,i})] \quad (4)$$

$$Q_f = 1 - \prod_{i=1}^N [P_{f,i}P_{e,i} + (1 - P_{f,i})(1 - P_{e,i})] \quad (5)$$

$$Q_m = \prod_{i=1}^N [P_{m,i}(1 - P_{e,i}) + (1 - P_{m,i})P_{e,i}] \quad (6)$$

式中: N 为认知用户的数量; $P_{d,i}$ 、 $P_{f,i}$ 和 $P_{m,i}$ 分别表示第 i 个用户的检测概率、虚警概率和漏检概率; $P_{e,i}$ 表示第 i 个用户的反馈信道误码率。如果信道传输的是 BPSK 信号, 则 $P_{e,i}$ 可根据以下公式计算^[3]

$$P_{e,i} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{\bar{\rho}}{1 + \bar{\rho}} \right)^{1/2} \right) \quad (7)$$

式中: $\bar{\rho}$ 表示认知用户反馈信道的平均信噪比。

所有认知用户首先根据用户间信道情况进行两两分组, 组内用户分别进行本地检测, 将各自检测结果发送给对方。这种信息交互可通过类似于无线局域网(WLAN)中的请求发送和清除发送协议帧来实现, 且各用户可通过循环冗余校验判断是否正确解码对方消息。如果认知用户都能正确得到对方检测结果, 则采用 STBC 技术向基站传输检测结果; 否则, 用户将采用时分多址(TDMA)方式各自反馈检测结果。以包含认知用户 U_{i1} 和 U_{i2} 的第 i 组为例, 假设 U_{i1} 和 U_{i2} 的检测结果分别为 D_{i1} 和 D_{i2} , 并各自向对方发送自己的检测结果, 如果双方都能正确解码对方的检测结果, 则可以采用 STBC 技术向基站反馈检测结果, 此时 U_{i1} 向基站发送 $\{D_{i1}, D_{i2}\}$, U_{i2} 向基站发送 $\{-D_{i2}, D_{i1}\}$; 否则, U_{i1} 和 U_{i2} 将采用 TDMA 方式反馈各自的检测结果。

对任一认知用户, 基于 STBC 方案的合作频谱感知反馈阶段的误码率为^[4]

$$P_e = (1 - P_{e,inter})^2 P_{e,STBC} + (1 - (1 - P_{e,inter})^2) P_{e,tra} \quad (8)$$

式中: $P_{e,inter}$ 为组内用户通过用户间信道交互信息的误码率; $P_{e,tra}$ 为用户直接向基站反馈检测结果的误码率, 可由式(7)得到; $P_{e,STBC}$ 为采用 STBC 方案时反馈信道的误码率, 可根据文献^[5]推得

$$P_{e,STBC} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left[\frac{\bar{\rho}}{2 + \bar{\rho}} \right]^{1/2} \sum_{i=0}^1 \binom{2i}{i} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{2}{2 + \bar{\rho}} \right) \right]^i \right\} \quad (9)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为认知用户反馈信道的平均信噪比。

从式(9)可以得出 $P_{e,STBC} < P_{e,tra}$, 而根据式(8)有 $P_{e,STBC} < P_e < P_{e,tra}$, 可见分组内认知用户间信道

误码率 $P_{e,inter}$ 将影响反馈阶段误码率 P_e 的大小, 并决定 STBC 方案对检测性能的改善程度。然而, $P_{e,inter}$ 的大小直接取决于认知用户的分组情况, 因此合理的分组方案可以保证较好的用户间信道条件, 从而为改善系统检测性能提供可能。

2 动态分组加权频谱感知方案

2.1 鲁棒性动态分组

认知用户间信道误码率越低, 反馈阶段的信道误码率就越接近于采用 STBC 技术时反馈信道的误码率, 系统检测性能就会越好; 反之, 反馈阶段信道误码率越接近于直传反馈信道的误码率, 系统的检测性能就越差。

为充分发挥 STBC 技术的优势, 改善反馈阶段信道情况, 本文提出了一种充分考虑用户间信道情况且具有更强鲁棒性的动态分组方案, 克服了文献^[6]所提方案的缺陷。本文方案的分组流程如图 2 所示。

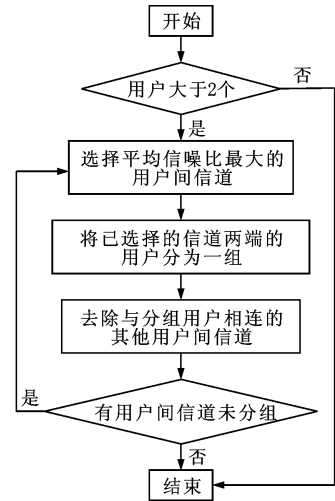


图 2 基于 STBC 方案的鲁棒性动态分组流程图

假设所有认知用户与主用户之间、认知用户之间、认知用户与基站之间的信道均不理想, 且信道状况不尽相同。首先, 系统判断未分组认知用户数量, 如果未分组用户多于 2 个, 则比较所有用户间信道 $\{C_{12}, C_{13}, \dots, C_{1N}, \dots, C_{ij}, \dots, C_{(N-1)N}\}$ 的 SNR 高低, 其中 N 为认知用户数, C_{ij} 代表第 i 个用户与第 j 个用户间的信道, $i < j$, 进而选择具有最小误码率的一条信道。不失一般性, 设选中的信道为 C_{ij} , 将使用此信道的用户 i 和 j 分为一组, 即可形成第一个用户组 (U_i, U_j) 。确定该用户组后, 将所有与用户 i 和 j 相连的用户间信道 $\{C_{mi}, m, n = i \text{ 或 } j\}$ 从信道集合 $\{C_{12}, C_{13}, \dots, C_{1N}, \dots, C_{ij}, \dots, C_{(N-1)N}\}$ 中去除, 并在

剩余认知用户中继续进行上述动态分组过程,直到所有用户都分组完毕。如果总认知用户数为奇数,则令分组后最后剩余的一个用户单独向基站反馈检测结果,分组结束。

2.2 基于 STBC 的动态分组加权合作频谱感知

基于加权的合作频谱感知方案对处于不同环境的用户赋予不同的权重,并根据检测结果更新权重,提高检测可靠的用户对系统检测性能的贡献,降低不可靠的用户对系统检测性能的影响^[7]。

假设一个认知无线电系统中有 N 个认知用户,经过动态分组后进行本地检测,得到各自检测概率,根据以下公式更新其权重因子^[8]

$$W_{ij}(n+1) = \frac{W_{ij}(n)P_{d,ij}(n)}{W_{\text{norm}}} \quad (10)$$

$$W_{\text{norm}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^2 W_{ij}(n)P_{d,ij}(n) \quad (11)$$

式中: $W_{ij}(n)$ 和 $P_{d,ij}(n)$ 分别表示第 i 组第 j 用户在第 n 次检测后更新的权重和检测概率; W_{norm} 表示权重的概率统计均值; N 和 M 分别表示认知用户数目和分组数。在检测开始时,令每个认知用户的初始权重均为 1,即 $W_{ij}(0)=1$ 。当认知用户完成第 1 次本地检测后,根据检测结果与初始权重值对权重进行更新,得到一次加权检测的权重。根据认知用户第 2 次的检测结果和一次加权重值,采用式(10)和式(11)对权重进行更新,得到二次加权检测的权重。以此类推,根据第 n 次的检测结果和上一次的权重,更新得到下一次加权检测的权重。如果某个认知用户的检测信道经历较严重干扰时,其权重会根据检测概率的下降而逐渐降低。各认知用户权重系数的调整需保证 n 次检测后所有认知用户的权重 $W_{ij}(n)$ 的总和为 N ,即

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^2 W_{ij}(n) = N \quad (12)$$

由此,可以通过增大贡献较大的认知用户的权重因子,降低处于深衰落或受严重干扰的认知用户的权重因子,来减小对判决结果的不利影响。

本文所提 DC-WCSS 方案首先将所有认知用户根据用户间信道情况进行动态分组,然后根据用户检测信道平均 SNR 的高低,对其进行加权处理,并更新和分配权重值。在此基础上,同组内的认知用户进行检测结果的交互,并将加权后的检测结果采用 STBC 经过反馈信道传输给基站,进行最终判决。令 $\bar{\gamma}_{ij}$ 和 $\bar{\rho}_{ij}$ 分别为第 i 组第 j 用户 U_{ij} 的检测信道和反馈信道的平均 SNR,对认知用户进行动态分组

后的加权合作频谱感知方案如图 3 所示。

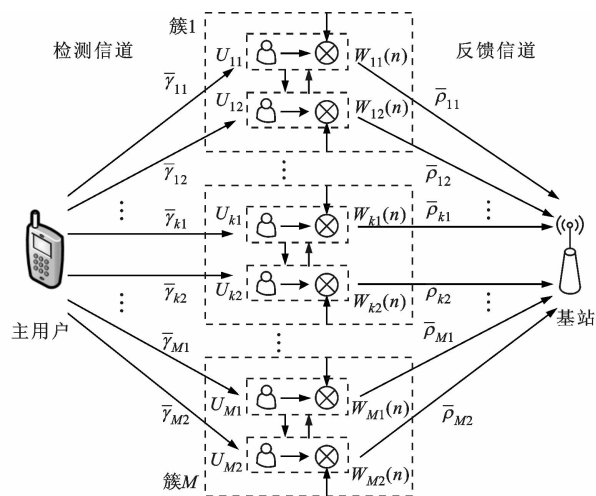


图3 基于动态分组的加权合作频谱感知系统

DC-WCSS 方案在基于 STBC 的合作频谱检测方案基础上引入了动态分组和加权检测,能显著提高系统检测性能,但计算复杂度会略有增加。

用 $P'_{d,ij}(n)$ 表示第 i 组第 j 个用户在第 n 次检测后将检测结果传到基站的检测概率,则

$$P'_{d,ij}(n) = 1 - [P_{d,ij}(n)P_{e,ij} + (1 - P_{d,ij}(n))(1 - P_{e,ij})] \quad (13)$$

式中: $P_{d,ij}(n)$ 和 $P_{e,ij}$ 分别表示第 i 组中第 j 用户在第 n 次检测后的检测概率和反馈过程的误码率。

由式(4)可得系统第 n 次检测的检测概率为

$$Q_d(n) = 1 - \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^2 W_{ij}(n)(1 - P'_{d,ij}(n)) = 1 - \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^2 W_{ij}(n)P_{d,ij}(n)P_{e,ij} - \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^2 W_{ij}(n)(1 - P_{d,ij}(n))(1 - P_{e,ij}) \quad (14)$$

式中: $W_{ij}(n)$ 表示第 i 组第 j 个用户在第 n 次检测后更新的权重。

同理, $P'_{f,ij}(n)$ 表示第 i 组第 j 个用户在第 n 次检测后将结果传到基站判决后的虚警概率,有

$$P'_{f,ij}(n) = 1 - [P_{f,ij}(n)P_{e,ij} + (1 - P_{f,ij}(n))(1 - P_{e,ij})] \quad (15)$$

式中: $P_{f,ij}(n)$ 和 $P_{e,ij}$ 分别表示第 i 组第 j 个用户在第 n 次检测后的检测概率和反馈过程的误码率。

由于虚警概率与检测信道平均 SNR 无关,无需进行加权,因此第 n 次检测的虚警概率 Q_f 为

$$Q_f(n) = 1 - \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^2 (1 - P'_{f,ij}(n)) = 1 - \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^2 P_{f,ij}(n)P_{e,ij}$$

$$\prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^2 (1 - P_{f,ij}(n))(1 - P_{e,ij}) \quad (16)$$

3 仿真结果分析

假设主用户与认知用户的距离远大于认知用户间的距离,影响用户间信道条件的障碍物在用户间随机分布。为简化分析,假设认知用户检测信道和反馈信道均符合瑞利分布,时间带宽积 m 为 5。

假设用户间信道误码率 $P_{e,inter}$ 分别为 0.02、0.1、0.2 和 0.4,并与采用理想 STBC 反馈和不采用 STBC 反馈的方案相比较。图 4 给出了认知用户间信道条件对反馈阶段误码率的影响。由图 4 可见,用户间信道误码率相同时,反馈阶段误码率随着反馈信道平均 SNR 的增大而降低。在相同的反馈信道平均 SNR 下,采用理想 STBC 反馈时,认知用户间信道是理想的($P_{e,inter}=0$),此时反馈阶段误码率最低;不采用 STBC 反馈时,认知用户之间信息交互失败($P_{e,inter}=1$),采用直传方式反馈本地检测结果,其反馈误码率最高;当 $0 < P_{e,inter} < 1$ 时, $P_{e,inter}$ 越小,反馈阶段的误码率越低,即认知用户间信道条件越好,反馈检测信息的条件也越好。当反馈阶段误码率在 10^{-2} 左右、 $P_{e,inter}=0.02$ 时,采用 STBC 的方案比不采用 STBC 方案所需要的反馈信道平均信噪比要低 5.0 dB 以上。因此,为了降低反馈阶段的误码率,对认知用户进行合理分组、保证认知用户间较好的信道条件是非常有必要的。

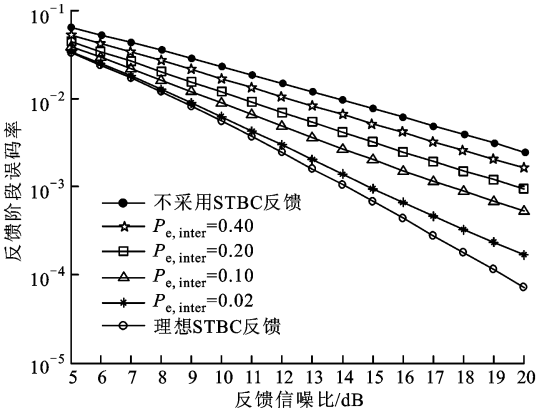


图 4 用户间信道条件对反馈阶段误码率的影响

图 5 是鲁棒性动态分组感知方案与其他方案的性能比较。假设认知用户数 $N=10$,检测信道平均信噪比 $\bar{\gamma}=10.0$ dB,反馈信道平均信噪比 $\bar{\rho}=10.0$ dB,认知用户间信道误码率在 $[0,1]$ 内随机产生。从图 5 可以看出,与传统合作频谱感知方案相比,采用 STBC 的分组方案能有效改善检测性能,而本文所提的鲁棒性动态分组方案比基于位置和固定用户的

分组方案更具优势,更接近理想 STBC 反馈传输方案的性能。在降低虚警概率方面,固定用户动态分组方案虚警概率的最小界 $Q_{f,min}$ 尚未达到 5×10^{-2} ,基于位置的分组方案 $Q_{f,min}$ 为 8×10^{-2} ,传统合作频谱感知方案 $Q_{f,min}$ 约为 1.5×10^{-1} ,而鲁棒性动态分组方案 $Q_{f,min}$ 约为 2×10^{-2} ,其更加接近理想 STBC 方案。可见,本文所提方案具有更优的鲁棒性。

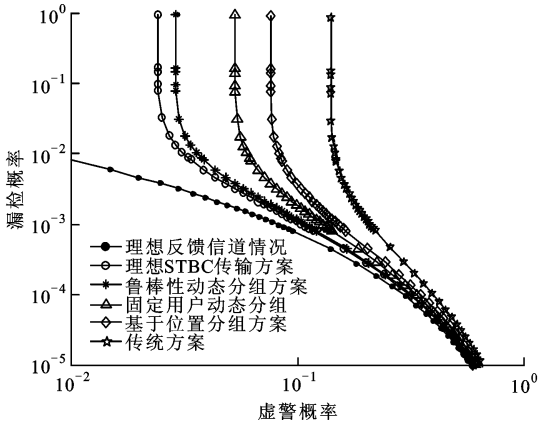


图 5 鲁棒性动态分组合作频谱感知性能曲线

图 6 描述了检测过程中不同认知用户权重的更新过程。设有 5 个检测信道不同的认知用户,第 n ($n=1,2,\dots,5$) 次检测信道的平均 SNR 如表 1 所示。每个认知用户的初始权重为 $W_i(0)=1$ ($i=n=1,2,\dots,5$)。由图 6 可见:用户 1 在第 1 次检测时检测信道条件较好,但是随后检测信道恶化,用户 1 的权重先增加,然后逐渐减小;与之相反,初期信道条件不佳的用户 4 在第 4 次检测时信道开始改善,其权重逐渐增加;用户 2、3 的信道条件不但稳定,且平均 SNR 较高,因此其权重因子均逐步增加,而用户 5 信道一直较差,故其权重不断降低。可见,用户的权重随着用户检测平均 SNR 的变化而变化,平均 SNR 越高,检测概率越大,权重越高,对系统检测的贡献越大。

表 1 检测次数对各认知用户检测信道平均信噪比的影响

检测次数	平均信噪比/dB				
	用户 1	用户 2	用户 3	用户 4	用户 5
1	10.4	8.6	7.9	5.7	5.3
2	4.9	9.4	7.7	5.8	4.6
3	4.6	9.3	8.0	6.0	4.7
4	5.4	9.1	7.8	9.0	4.9
5	4.5	8.7	7.6	8.7	4.7

图 7 给出了基于加权的合作频谱感知与传统合作感知、单用户检测的对比。设有 4 个认知用户,检测信道平均 SNR 分别为 0、3、4 和 5 dB,反馈信道

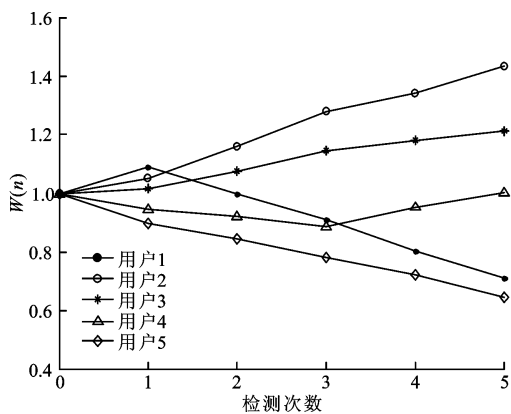


图6 不同认知用户的权重因子更新曲线

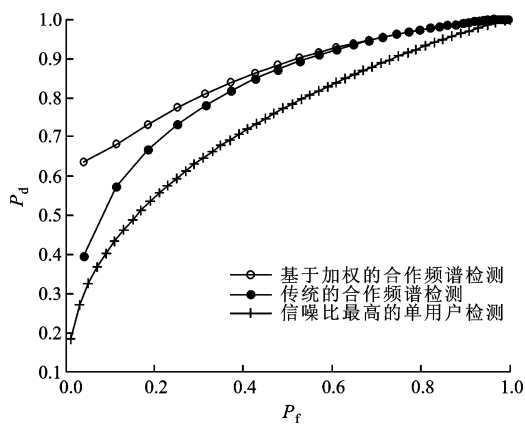


图7 加权合作频谱感知性能曲线

服从瑞利衰落分布。由图7可以看出,传统合作频谱感知性能优于单用户检测,但在弱虚警概率情况下其性能改善程度有限,而认知无线电要求虚警概率尽可能小,同时检测概率尽量大。通过加权处理,虽然计算复杂度略有增加,但系统检测性能显著提高。当虚警概率为0.1时,平均SNR最高的单用户检测概率只有0.43,传统合作频谱感知检测概率约为0.55,而加权合作频谱感知的检测概率为0.68,获得了显著提高。

图8描述了基于STBC的动态分组加权合作频谱感知方案的性能。假设有6个认知用户,检测信道平均SNR在0 dB到10 dB内随机取值,反馈信道平均SNR设置为6 dB,认知用户间的信道误码率在 $[0, 0.5]$ 间随机生成。根据前述分组方法可将用户分成3组。从图8可以看出,基于STBC的动态分组加权检测较不采用加权的动态分组检测性能优越,特别在弱虚警概率的情况下,随着检测次数的增加,检测性能进一步提高,且基于STBC的动态分组二次加权检测性能最优。当虚警概率为0.4时,仅进行动态分组的检测概率为0.88,而检测次数为

2和3时的动态分组加权检测概率分别为0.91和0.96。由此可见,基于STBC的动态分组加权检测能够有效提高系统的检测概率,改善系统性能,加权次数越多,系统性能改善越明显。但在实际情况中,随着加权次数的越多,系统检测过程的时间开销增加,由于认知无线电系统对检测时间的要求,加权次数不宜太多。

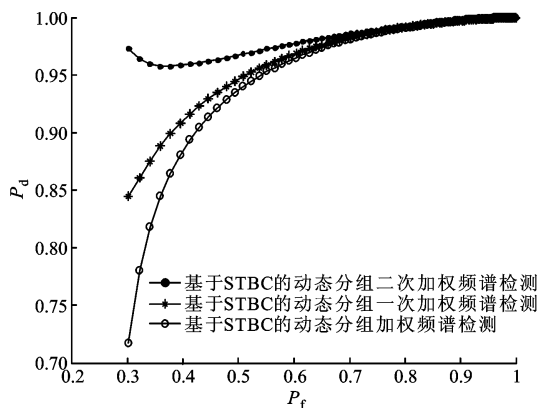


图8 基于STBC的动态分组加权合作频谱感知方案性能曲线

4 结论

本文研究了基于STBC的合作频谱感知系统中用户间信道与反馈信道对系统检测性能的影响,给出了一种更具鲁棒性的动态分组方案,并根据认知用户检测信道平均SNR对检测结果加权,提出了基于STBC的动态分组加权合作频谱感知方案。仿真结果表明,所提方案能有效降低反馈阶段信息传输的误码率,显著提高系统检测能力,且加权次数越高,系统检测能力提升越大,但复杂度会稍有增加。

参考文献:

- [1] ZHANG W, MALLIK R K, LETAIEF K. Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12): 5761-5766.
- [2] 孙剑锋, 高锦春, 刘元安, 等. 基于频谱感知结果的认知无线电用户分簇方法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 782-786.
SUN Jianfeng, GAO Jinchun, LIU Yuan'an, et al. Clustering method for cognitive radio user based on the results of spectrum sensing [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(4): 782-786.
- [3] WANG Y, FENG C, ZENG Z, et al. A robust and energy efficient cooperative spectrum sensing scheme

(下转第66页)