

异构无线网络中基于多用户分集的协作频谱感知算法^①

李 屹^② 纪 红

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要 研究了协作通信与认知无线电的结合,针对 TD-SCDMA 系统和 WiMAX 系统组成的异构无线网络,提出了一种基于多用户分集的协作频谱感知机制。根据该算法, WiMAX 用户被分成若干个簇,选择每个簇内瞬时信道条件最好的 WiMAX 用户协作检测频谱,并利用软硬结合的判决手段,既保证检测性能,又不增加复杂度。分析和仿真表明,该算法一方面保证了频谱检测的可靠性,降低了虚警概率,另一方面减少了通信开销,提高了判决消息传输的可靠性,达到了提升频谱利用率的目的。

关键词 认知无线电(CR), 协作频谱感知, 多用户分集, 异构无线网络

0 引 言

无线资源管理的一个核心问题是频谱管理。以宽带无线接入标准 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) 为例,它虽然已成为与 WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access)、CDMA2000 (Code Division Multiple Access 2000) 和 TD-SCDMA (Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access) 并列的 3G 标准,市场前景被普遍看好,但频率资源问题仍然是其发展进程中的决定性环节。尽管 WiMAX 标准规定是在 10GHz-66GHz 及 2GHz-11GHz 范围内的授权和非授权频率下运行,但因为这些频段内已有许多种特定用途的业务,如微波雷达、航空导航、遥感遥测、卫星通信等,所以 2GHz 到 66GHz 频段内能够供 WiMAX 使用的频谱资源会有很大的缩水。

目前,世界各国正着手讨论为 WiMAX 开放 2.3GHz-2.7GHz、3.3GHz-3.6GHz、5.7GHz-5.825GHz 三个频段。由于 2.xGHz 距离无线局域网(WLAN) (2.4GHz) 较近,容易与 WLAN 进行整合,使设备商将来在设计 WiMAX/WLAN 双模产品时,能节省许多整合高频组件的成本。韩国已将 2.3GHz-2.4GHz 频段用于部署 WiMAX 系统,引人注目的是,这 100MHz 带宽在中国分给了 TD-SCDMA。WiMAX 如何与现有的各种无线通信系统共存并共同发展的问

题引发了人们广泛而深入的探讨。

在异构无线网络环境中,若能利用认知无线电(cognitive radio, CR)技术实现频谱共享,则可以极大提高频谱资源的利用率,缓解当前无线业务高速率、宽带化的需求与频谱资源稀缺之间的矛盾。美国联邦通信委员会(FCC)出台了一个政策,允许 WiMAX 利用 CR 技术,使用 700M 左右的广播频段。IEEE 802.16 工作组也成立 IEEE 802.16h 小组,发展具有认知能力的 WiMAX 系统以解决共存问题。这也为 WiMAX 与 TD-SCDMA 的融合提供了一个可借鉴的思路。当然,这要求 WiMAX 基站和终端都具有 CR 的频谱感知功能,以便准确地获知当前有哪些频段是空闲可用的。当第一用户(TD-SCDM 系统用户)出现时, WiMAX 系统用户应具备迅速检测到第一用户信号的能力,并立即让出其占用的频段,或调整发射功率,以免对第一用户造成有害的干扰。

频谱感知的性能受到接收信号强度的限制。多径衰落可能导致接收信号的强度大大减弱,严重降低频谱感知的性能。阴影效应引起的“隐蔽端”问题也会使 CR 用户无法检测到第一用户的出现,发生误判。于是,研究者提出了协作频谱感知(cooperation spectrum sensing)技术以提高频谱检测的可靠性^[1]。传统的协作频谱感知技术虽然有效降低了漏检概率,却导致虚警概率偏高。同时,由于无线信道固有的阴影和多径衰落,可能使频谱感知的结果无法可靠地传输到认知基站。为了克服这些缺陷,本

^① 863 计划(2007AA01Z221)和国家自然科学基金重点项目(60832009)资助。

^② 男,1977 年生,博士生;研究方向:无线通信系统与网络;联系人, E-mail: wodexiaolu@sohu.com (收稿日期:2008-05-23)

文针对 TD-SCDMA 和 WiMAX 组成的异构无线网络,借鉴多用户分集的思想,在任意时刻都选择瞬时信道条件最好的认知用户检测频谱,同时利用软硬结合的判决手段,向认知基站发送 2 比特频谱检测的判决结果。该算法一方面保证了频谱检测的可靠性,降低了虚警概率,另一方面减少了通信开销,提高了判决结果传输的可靠性,达到了提升频谱利用率和系统吞吐量的目的。

1 协作频谱感知

频谱感知本质上是一个二元假设检验问题,其中的几个关键参数包括:检测概率 P_d , 漏检概率 P_m 和虚警概率 P_f , 式

$$P_d = \Pr(\text{判决} = H_1 | H_1) \quad (1)$$

$$P_f = \Pr(\text{判决} = H_1 | H_0) \quad (2)$$

$$P_m = \Pr(\text{判决} = H_0 | H_1) \quad (3)$$

其中 H_0 表示频段空闲, H_1 表示频段已被占用。协作频谱感知是将多个独立的 CR 用户的判决结果都提交给 CR 基站处理,一般分三步走:

▷ 每一个认知无线用户在本地独立地进行频谱检测,并作出二元判决;

▷ 所有认知无线用户将本地的判决结果发给公共接收端,即 CR 基站(或 AP);

▷ CR 基站(或 AP)将这些二元判决结果以一定准则合并,作出最终判决。

每一个参与协作的认知无线用户的判决结果均为一个比特,“1”代表第一用户是活动的(信道忙),“0”代表第一用户是静默的(信道闲)。本地判决结果通过控制信道被发送到公共接收端,即 CR 基站(或 AP)。CR 基站对所有这些“1”和“0”作逻辑“或”运算,运算得到最终的判决结果,并通过控制信道反馈给认知无线用户。这种判决方式称之为硬判决。假设有 K 个 CR 用户向 CR 基站发送判决结果,那么硬判决协作频谱感知的虚警概率 Q_f 为

$$\begin{aligned} Q_f &= \Pr(H_1 | H_0) = 1 - \Pr(H_0 | H_0) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_{f,i}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $P_{f,i}$ 代表第 i 个 CR 用户频谱检测的虚警概率。相应地,硬判决协作频谱感知的漏检概率 Q_m 为

$$Q_m = \Pr(H_0 | H_1) = \prod_{i=1}^k P_{m,i} \quad (5)$$

其中 $P_{m,i}$ 代表第 i 个 CR 用户频谱检测的漏检概率。

由式(4)和(5)可见,只要有一个参与协作的 CR 用户检测到第一用户出现,CR 基站就认为特定频段正被占用,所以硬判决协作感知的漏检概率 Q_m 很低,且随协作 CR 用户数的增加而指数减少。尽管如此,硬判决协作感知却造成虚警概率 Q_f 偏高,并随着 K 的增加而指数上升。可见,参与协作的 CR 用户数并非越多越好,因为 Q_f 偏高意味着某些空闲的频段得不到有效的利用,换言之-频谱利用率不高,这违背了 CR 技术的初衷。

与硬判决相对应的是软判决,即每一个 CR 用户不在本地做出判决,而是将接收信号处理之后的输出,如能量检测的输出值,连同本地的接受信噪比一起报告给 CR 基站,由 CR 基站按一定准则进行多路数据合并(如等增益合并、最大比合并、选择性合并等),最后根据数据合并的结果做出判决。相比之下,软判决方法的准确性要好很多,但控制信道需要的带宽会比较大。另外,由于信道不理想,发给 CR 基站的判决信息越复杂,越容易出错。因此,有必要结合软硬两种判决手段,在判决准确性和通信开销之间寻求一个合理的折衷。

2 基于多用户分集的协作频谱感知

基于多用户分集的协作频谱检测方法在任何时候均选择信道条件最优的 CR 用户完成协作频谱感知,其系统模型如图 1 所示。

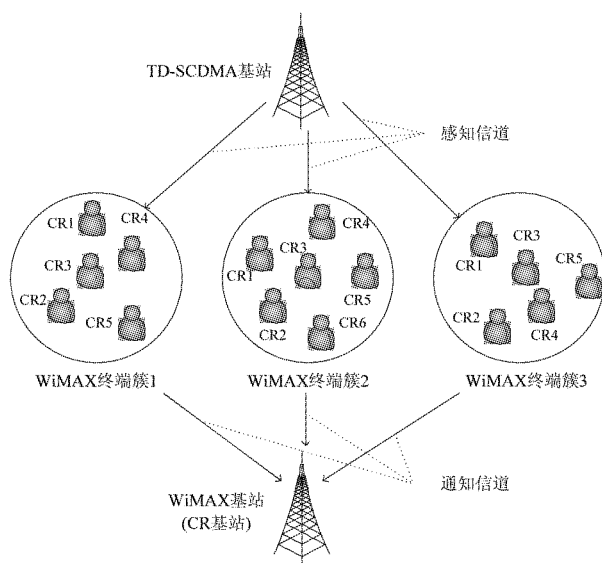


图 1 基于多用户分集的协作频谱感知模型

首先,TD-SCDMA 小区和 WiMAX 小区重叠覆盖区域内的 WiMAX 用户被分成若干个簇,分簇方案可

参考文献[2]和[3]中介绍的分布式算法。每个簇内瞬时接收信噪比最高的用户可作为临时簇头,由簇头节点协作完成频谱感知,而簇内其它节点不参加频谱检测。最后,簇头节点将本地频谱检测的结果发送到 WiMAX 基站,由 WiMAX 基站作出最终判决。采用这种方案的理由如下:

第一,频谱检测的准确性取决于信道条件较好的 CR 用户。相反,接收信噪比较低的 CR 用户却往往导致 CR 基站处发生误判,使虚警概率 Q_f 偏高,而且参与协作的 CR 用户中,这类低信噪比的终端越多,误判概率就越大。在任何时刻均选择信噪比最高的 CR 用户协作完成频谱检测,这样既能保证检测的准确性,又能降低虚警概率 Q_f ,可谓一举两得。

第二,簇内节点彼此之间的距离相对很近,可以认为它们的感知信道有相同的平均信噪比,且感知信道之间有较强的相关性。实际上 WiMAX 基站处要作出正确的判决,需要多个独立的 WiMAX 终端的频谱检测结果。如果参与协作的 WiMAX 终端之间有较强的相关性,则协作频谱感知的性能会大打折扣。

本文提出的算法仅利用簇头去执行协作频谱感知,这需要簇头之间的感知信道彼此独立,才能真正发挥作用。文献[4,5]考虑信道经历阴影效应,并给出信道间的相关系数为

$$\rho = \exp\left(-\frac{|\Delta d|}{d_{\text{cor}}} \ln 2\right) \quad (6)$$

其中 Δd 为两个节点间的距离, d_{cor} 为使信道不相关的节点间最小距离。由式(6)可见,两节点相距越远,两信道间的相关性就越低。这个结论不仅适用于阴影信道,对多径衰落信道也是成立的。但是,簇头之间的距离也不宜过大,否则造成簇数太少,以致参与协作频谱感知的节点数不足,影响判决的准确性。根据仿真实验结果,对于小区覆盖半径为 4~6 km 的 WiMAX 系统,簇头间的最佳距离为 50m,也即分簇时,取簇的直径为 50m 左右为佳。

3 软硬结合的判决方法

WiMAX 终端完成频谱检测之后,下一步是要把检测的结果报告给 WiMAX 基站。如果每一个 WiMAX 终端都了解上行信道的状态信息,发送检测结果的任务可由信道条件最好的用户完成,但这需要终端实时跟踪上行信道的情况,进而会导致控制

信道的开销较大,也会使终端的功耗水平较高。本文假设 WiMAX 终端不具备上行信道的先验知识,仍由簇头节点自身发送频谱检测的结果给 WiMAX 基站。簇头节点对 TD-SCDMA 基站的接收信噪比最高,它是最佳的频谱检测者,但未必具有最好的 WiMAX 上行信道,所以发送的判决消息的比特数越少越好,以尽可能降低传输出错的概率。

硬判决发送比特数最少的判决消息,复杂度也最低,但检测性能欠佳;软判决发送多个检测结果的加权平均值,检测性能优越,但复杂度较高;软硬结合的判决方法则吸取两者的优点^[6],发布两比特的判决消息,对落在不同判决区域的协作用户的数量取加权值,一方面保证了检测性能,另一方面不增加复杂度,其基本原理如图 2 所示。

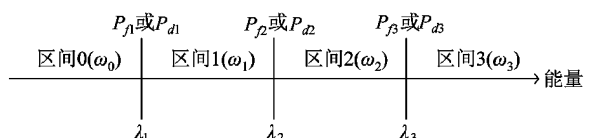


图 2 软硬结合的判决方法

每个 CR 用户(WiMAX 终端)用能量检测法感知频谱,检测到的能量区域可分为四个区间,相应地有三个判决阈值,即 λ_1, λ_2 和 λ_3 , 分别对应三个虚警概率 P_{f1}, P_{f2} 和 P_{f3} , 以及三个检测概率 P_{d1}, P_{d2} 和 P_{d3} 。这比只有一个判决门限,两个能量区间的硬判决方法,准确性要提高很多。由文献[7]可得

$$P_{f_i} = \frac{\Gamma(u, \frac{\lambda_i}{2})}{\Gamma(u)} \quad (7)$$

$$P_{d_i} = e^{-\frac{\lambda_i}{2}} \sum_{n=0}^{u-2} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda_i}{2}\right)^n + \left(\frac{1 + \bar{\gamma}_i}{\bar{\gamma}_i}\right)^{u-1} \left[e^{-\frac{\lambda_i}{2(1+\bar{\gamma}_i)}} - e^{-\frac{\lambda_i}{2}} \sum_{n=0}^{u-2} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda_i \bar{\gamma}_i}{2(1+\bar{\gamma}_i)}\right)^n \right] \quad (8)$$

$$P_{m_i} = 1 - P_{d_i} \quad (9)$$

其中 u 为时间带宽积, $\bar{\gamma}_i$ 为簇 i 中簇头的平均接收信噪比, $\Gamma(\cdot)$ 和 $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 分别是完整和不完整的 Gamma 函数。

软硬判决的执行程序是^[6]:若检测值落在区间 0, 向 WiMAX 基站发送判决结果“00”,若检测值落在区间 1, 则发送判决结果“01”,若检测值落在区间 2, 发送判决结果“10”,若检测值落在区间 3, 发送判决结果“11”。WiMAX 基站判定第一用户正占用信道

的条件是:收到 1 个“11”,或收到 L 个“10”,或收到 $2L$ 个“01”。于是,可以给每个判决结果分配一个权值, $\omega_0 = 0, \omega_1 = 1, \omega_2 = 2, \omega_3 = 2L$, 设加权值 $\bar{N} = \sum \omega_i N_i$, 其中 N_i 是检测值落在区间 i 的 WiMAX 终端数,将 $\bar{N}$ 与门限值 $N_T = 2L$ 相比,当 $\bar{N} \geq N_T$ 时,判定第一用户正在占用特定频段,否则判定该频段处于空闲状态。

设协作频谱检测的虚警概率为 Q_f , 对于每个 CR 用户,其能量检测值大于 λ_1, λ_2 和 λ_3 时的虚警概率分别为 P_{f1}, P_{f2} 和 P_{f3} , 按照软硬判决程序可得

$$1 - Q_f = \sum_{i=0}^k \left\{ \binom{N}{i} (1 - P_{f1})^{N-i} \sum_{j=0}^{l(i)} \binom{i}{j} (P_{f1} - P_{f2})^{i-j} (P_{f2} - P_{f3})^j \right\} \quad (10)$$

式(10)是求 $\bar{N} = (N - i)\omega_0 + (i - j)\omega_1 + j\omega_2 < N_T$ 的概率,这里 $k = N_T - 1$, 代表 i 值的上限, N 为簇头节点数,即参与协作检测的 WiMAX 终端数,其中检测值大于 λ_1 的 i 个,检测值大于 λ_2 的 j 个,检测值大于 λ_3 的 0 个,于是有

$$(i - j)\omega_1 + j\omega_2 < N_T \quad (11)$$

$$j < \frac{N_T - i\omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \quad (12)$$

当 $i < L$ 时, j 的上限 $l(i)$ 可以取到 i , 用 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整,则有

$$l(i) = \min \left\{ \left\lfloor \frac{N_T - i\omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right\rfloor, i \right\} \quad (13)$$

假设簇头的感知信道经历独立同分布的(i.i.d)的衰落过程,则协作检测概率 Q_d 为

$$Q_d = 1 - \sum_{i=0}^k \left\{ \binom{N}{i} (1 - P_{d1})^{N-i} \sum_{j=0}^{l(i)} \binom{i}{j} (P_{d1} - P_{d2})^{i-j} (P_{d2} - P_{d3})^j \right\} \quad (14)$$

协作漏检概率 Q_m 为

$$Q_m = 1 - Q_d \quad (15)$$

软硬判决法的关键在于三个判决阈值 λ_1, λ_2 和 λ_3 的确定。定义 $\beta_1 = P_{f1}/(1 - P_{f1}), \beta_2 = P_{f2}/P_{f1}, \beta_3 = P_{f3}/P_{f2}$, 将式(8)代入式(14),用数值法可以求得最优的 L, β_2 和 β_3 , 使得 Q_d 值最大,再将(10)改写为

$$(1 - Q_f)(1 + \beta_1)^N = \sum_{i=0}^k \binom{N}{i} \left\{ \sum_{j=0}^{l(i)} \binom{i}{j} (1 - \beta_2)^{i-j} (\beta_2 - \beta_2\beta_3)^j \right\} \quad (16)$$

由式(16)求得 β_1 , 进一步可得到 λ_1, λ_2 和 λ_3 最

优解。

4 判决消息传输差错率

设簇 i 中的 WiMAX 终端数为 M_i , $\eta_{j,i}$ 代表簇 i 中节点 j 的上行信道的信噪比。由于簇内节点彼此距离较近,可近似认为随机变量 $\eta_{1,i}, \eta_{2,i}, \dots, \eta_{M_i,i}$ 都服从均值为 $\bar{\eta}_i$ 的指数分布。 $\eta_{\text{head},i}$ 代表簇 i 中簇头的上行信道的信噪比,其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{M_i}{\bar{\eta}_i} e^{-\frac{x}{\bar{\eta}_i}} (1 - e^{-\frac{x}{\bar{\eta}_i}})^{M_i-1} \quad (17)$$

于是,对于既定 $\eta_{\text{head},i}$, 采用二进制相移键控(BPSK)调制方式时,判决消息的传输差错概率为

$$P_{e,i|\eta_{\text{head},i}} = Q(\sqrt{2\eta_{\text{head},i}}) \quad (18)$$

其中 $Q(\cdot)$ 是 Q 函数,因此, Rayleigh 衰落信道下,判决消息的平均传输差错率为^[8]

$$\begin{aligned} P_{e,i} &= \int_0^\infty P_{e,i|\eta_{\text{head},i}} f(\eta_{\text{head},i}) d\eta_{\text{head},i} \\ &= \sum_{m=0}^{M_i-1} \binom{M_i-1}{m} (-1)^{M_i-m-1} \frac{M_i}{2(M_i-m)} \\ &\quad \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\eta}_i}{M_i-m+\bar{\eta}_i}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

5 仿真结果及讨论

本节给出基于多用户分集的协作频谱感知算法的漏检概率 Q_m 和虚警概率 Q_f 的仿真结果,如图 3 和图 4 所示。

设 N_{sum} 个 WiMAX 终端被分为四个簇,相应的簇头节点数 $N = 4$, 仿真中取初始值 $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 1$, 逐一增加至 $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 5$, 即 N_{sum} 从 4 增至 20。 $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = 10\text{dB}, \bar{\gamma}_3 = \bar{\gamma}_4 = 5\text{dB}, \bar{\eta}_1 = \bar{\eta}_2 = \bar{\eta}_3 = \bar{\eta}_4 = 10\text{dB}$, 信道均采用瑞利衰落模型,取 $L = 2, \beta_2 = 0.14, \beta_3 = 0.07$ 。由仿真结果可见,传统的硬判决协作频谱感知虽然具有最优的漏检概率 Q_m , 但其虚警概率 $Q_f \geq 0.1$, 且其性能随着 WiMAX 终端数的增加逐渐达到 0.8 左右,大大降低了频谱利用率。等增益比合并(EGC)软判决方式和多用户分集协作检测(软硬判决)方式不仅漏检概率 Q_m 在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 之间,远好于 IEEE 802.22 建议的 0.1, 同时还能获得非常好的虚警概率 Q_f 性能, Q_f 甚至达到 0.005, 在 Q_m 和 Q_f 之间达到一个较好的平衡。EGC 软判决方式与多用户分集协作方式的检测性能十分接近,但 EGC 方式需要将接收信号处理之后的输

出,连同本地的接受信噪比一起报告给 WiMAX 基站,由 WiMAX 基站进行多路数据合并,最后根据数据合并的结果做出判决,因此控制信道需要的带宽很大,传输出错的概率也较高。相比之下,利用软硬判决的多用户分集协作检测的通信开销会小很多。

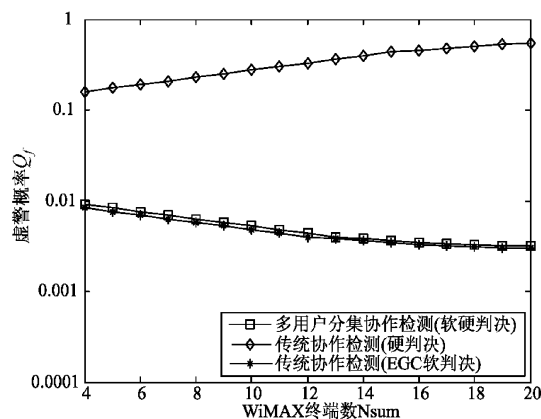


图3 三种协作频谱感知算法的虚警概率 Q_f

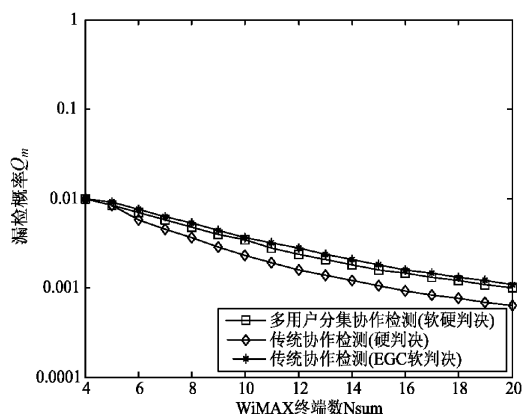


图4 三种协作频谱感知算法的漏检概率 Q_m

6 结 论

本文提出了异构无线网络中一种基于多用户分集的协作频谱感知策略。该方法一方面利用接收信噪比水平最高的认知用户检测频谱,在保证频谱感知正确率的基础上,降低虚警概率;另一方面在认知用户本地使用软硬结合的判决手段,仅向认知基站发送两比特判决信息,既使得通信开销水平较低,又保证了判决结果传输的可靠性,达到了提升频谱利用率的目的。

TD-SCDMA 和 WiMAX 基站相对都是大功率的,因此比较容易检测到对方是否正在工作,彼此之间的频谱感知近似可以看作是对称的。如果异构无线

网络中还包含 WLAN、Bluetooth、ZigBee、WSN 等发射功率较小的系统,彼此之间的频谱检测就变成了非对称的,小功率系统在其中便处于弱势。这种情况下,如何既满足第一用户的干扰温度要求,又满足认知用户最小信干噪比的要求? 大功率系统用户又如何准确地检测到小功率系统用户的出现? 多用户的冲突问题如何避免? 一个备选的解决思路是:引入基于博弈模型的功率控制,实现在保证第一用户不受有害干扰的前提下“贪婪”地增加认知用户的发送功率。不过,纳什均衡是否存在,其存在的条件和收敛速度是什么? 这些问题需要进一步探讨,是本文下一步要做的工作。

参考文献

- [1] Ghasemi A, Sousa E. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), Baltimore, USA, 2005. 131-136
- [2] Younis O, Fahmy S. Distributed clustering in ad hoc sensor networks: a hybrid energy-efficient approach. In: Proceedings of the Conference on Computer Communications (INFOCOM), Hong Kong, China, 2004. 629-640
- [3] Bandyopadhyay S, Coyle E. An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. In: Proceedings of the Conference on Computer Communications (INFOCOM), San Francisco, CA, USA, 2003. 1713-1723
- [4] Fu I K, Wong W C, Chen D, et al. Path-loss and Shadow Fading Models for IEEE 802.16j Relay Task Group. IEEE C802.16j-06/045r1, 2006
- [5] Matsui M, Shiba H, Akabane K, et al. A novel cooperative sensing technique for cognitive radio. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Athens, Greece, 2007. 99-103
- [6] Ma J, Li Y. Soft Combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. In: Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom), Washington D. C., USA, 2007. 3139-3143
- [7] Digham F F, Alouini M S, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communication, Anchorage, Alaska, USA, 2003. 5. 3575-3579
- [8] Sun C H, Zhang W, Letaief K B. Cluster-based cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), Glasgow, Scotland, UK, 2007. 2511-2515

Multi-user diversity for cooperative spectrum sensing in heterogeneous wireless networks

Li Yi, Ji Hong

(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

In order to achieve spectrum sharing in the heterogeneous wireless environment consisting of TD-SCDMA system and WiMAX system, a robust cooperative spectrum sensing scheme based on multi-user diversity is proposed. According to the scheme, the WiMAX users are separated into a few clusters and the most favorable user is selected in each cluster to detect spectrum. A softened hard decision scheme is used to achieve a good tradeoff between the detection performance and the complexity. The analytical and simulation results show that the proposed approach can enhance the sensing performance and improve the spectrum efficiency by reducing the false alarm probability and the transmission overhead.

Key words: cognitive radio (CR), cooperation spectrum sensing, multi-user diversity, heterogeneous wireless networks