

不同衰落信道下的协作感知性能研究

郭云玮, 刘 全, 高 俊

(海军工程大学 通信工程系, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 认知无线网络中, 协作频谱感知技术可以有效地缓解由于信道衰落、阴影等因素造成感知性能下降的问题。该文对不同衰落信道环境下的本地感知性能进行了系统分析; 研究了基于能量检测的协作感知方案在不同 K-N 决策融合准则以及不同协作用户数量条件下的感知性能; 在此基础上, 讨论了空间阴影相关性对协作感知性能的影响。数值分析和仿真研究的结果表明, 本地感知在衰落信道下的性能较 AWGN 信道下有较大程度的恶化, 其中尤以 Suzuki 信道下的性能最差, 而基于 K-N 决策融合的协作感知一般在 OR 准则条件下最优, 且随着次用户数量增加而改善。为了克服阴影相关性的不利影响, 应尽量使节点间距增大。当协作范围一定时, 用户数较少但更为分散的协作具有更好的感知性能。

关键词: 认知无线电; 频谱感知; 协作感知; 阴影相关性

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2011)05-0013-04

Performance of Cooperative Spectrum Sensing over Different Fading Channels

GUO Yun-wei, LIU Quan, GAO Jun

(Department of Communication Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In cognitive radio network, cooperative spectrum sensing is regarded as an effective scheme to mitigate the degradation of sensing performance, which is brought about by some factors, such as channel fading, shadowing, etc. In this paper, analyze the performance of local spectrum sensing over different fading channels in detail, and investigate the performance of cooperative spectrum sensing based on the energy detection and K out of N decision fusion with different numbers of cooperative users. Furthermore, discuss the effect on the sensing performance due to the spatially correlated shadowing. Finally, from the numerical analysis and simulation results, can get a conclusion that the degradation of local performance is more serious over fading channels than that over AWGN channel, in particular, Suzuki channel provides the worst-case scenario under all the listed channels, and the OR rule is usually the best choice for cooperative sensing performance, which is improved with the number of users increasing. In order to mitigate the unfavorable effect of correlated shadowing, the node distance should be increased. In addition, a fewer number of users but more decentralized cooperation maybe has a better sensing performance than that in a dense sensing network in a fixed small area.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; cooperative sensing; correlated shadowing

0 引 言

当前, 频谱利用率低下的问题严重制约着无线通信的发展。认知无线电(CR)技术^[1]通过实现伺机的动态频谱接入^[2], 打破了现有的静态频谱管理体制, 可以从根本上缓解频谱资源紧张的问题^[3]。该技术的首要问题就是如何快速而准确地感知授权频谱的使用情况, 因此, 频谱感知是实现 CR 的关键技术之一^[4]。

在复杂的无线信道中, 多径衰落、阴影以及本地干

扰等因素严重影响了本地频谱感知性能, 而通过协作可以有效克服以上弊端, 显著地提高检测性能^[5]。协作感知中, 各协作用户的检测信息通过控制信道送至融合中心, 再根据一定的准则进行融合判决^[6]。信息融合通常可分为决策融合和数据融合^[7]。决策融合算法由于所需的通信开销较小, 控制信道带宽也较窄, 有利于 CR 技术的实现, 因此得到更广泛的研究^[8]。K-N 准则是最典型的决策融合准则, 其中 K 的最佳取值要根据应根据具体的信道条件来确定^[9]。当前, 大多数文献中没有对不同衰落信道下的协作感知性能做出系统地分析研究, 如文献[10]给出了不同衰落信道下本地检测概率计算的闭合表达式, 但没有仿真加以验证, 也没有考虑协作感知的情况。文献[9]只是分别研究了衰落和阴影信道中的协作感知性能, 没有将两

收稿日期: 2010-09-20; 修回日期: 2010-12-02

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2009AAJ208, 2009AAJ116)

作者简介: 郭云玮(1983-), 男, 江西新余人, 硕士生, 研究方向为认知无线电频谱感知技术; 高 俊, 教授, 博士生导师, 研究方向为软件无线电, 数字通信理论与技术。

者综合加以分析。文献[11]没有给出协作中阴影相关性的具体算法以及随距离的变化情况等。

针对上述问题,笔者主要进行了以下几个方面的研究:(1)分析并仿真验证了不同衰落信道下的频谱感知性能;(2)以 Suzuki 信道为例,研究了基于 K-N 准则的协作频谱感知性能;(3)讨论了两种拓扑结构下的阴影相关性对感知性能的影响,给出具体算法并进行仿真验证。

1 系统模型

文中研究的系统模型中, N 个协作用户同时并独立地进行本地频谱检测,对是否存在主用户信号做出判决,再通过控制信道将判决结果以“0/1”形式传送至信息融合中心,由其根据 K-N 准则做出最终决策。假设控制信道是完善的(无误码传输),且各用户的平均信噪比相同。通过遵循 Neyman-Pearson 准则的 CROC 曲线进行检测性能的分析。

由于文中重点是研究复杂信道环境下的协作感知性能,因而本地检测中采用较为简单的能量检测算法。根据 Urkowitz 给出的经典能量检测原理^[12],将检测模型视为一个二元假设问题,以第 i 个协作用户为例,抽样求和后的检测统计量用 Y_i 表示, $i \in [1, N]$, H_0 和 H_1 分别表示假设不存在和存在主用户信号, TW 表示观测时间与感知频带带宽的乘积,通常用 m 表示, γ_i 表示本地检测的信噪比,研究表明检测统计量分别服从中心卡方分布和非中心卡方分布^[10, 12]。

$$Y_i \sim \begin{cases} \chi_m^2, & H_0 \\ \chi_m^2(2m\gamma_i), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

然后将检测统计量与相应的检测门限进行比较并做出 0/1 判决,并由中心根据 K-N 准则对其进行融合,做出的最终判决。特别的,当 K 取值为 1, $\lceil N/2 \rceil$ 和 N 时,分别对应 OR、Majority 和 AND 准则。

2 本地频谱感知

(1) 无衰落的 AWGN 信道。

在 AWGN 信道下,第 i 个协作用户的检测概率、虚警概率和漏检概率分别用 P_{di} 、 P_{fi} 和 P_{mi} 表示^[10]:

$$P_{di} = P\{Y_i > \lambda_i \mid H_1\} = Q_m(\sqrt{2m\gamma_i}, \sqrt{\lambda_i}) \quad (2)$$

$$P_{fi} = P\{Y_i > \lambda_i \mid H_0\} = 1 - \Gamma(\lambda_i/2, m) \quad (3)$$

$$P_{mi} = 1 - P_{di} \quad (4)$$

其中, $Q_m(\cdot, \cdot)$ 表示 Marcum Q 函数, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 表示不完全的 gamma 函数^[9]。

(2) 各种不同的衰落信道。

在考虑各种衰落、阴影和相关等因素影响的复杂信道环境时,由(3)式可知,虚警概率 P_{fi} 只与本地噪

声功率有关,不受信噪比影响。因此 P_{fi} 是一致的。但衰落环境下信道增益发生变化,导致信噪比 γ_i 随之变化,用 $f_{\gamma_i}(x)$ 表示 γ_i 的概率密度函数(PDF),则平均检测概率 \bar{P}_d 可表示为^[9]:

$$\bar{P}_{di} = \int_{\gamma_i} Q_m(\sqrt{2mx}, \sqrt{\lambda_i}) f_{\gamma_i}(x) dx \quad (5)$$

在衰落和阴影的影响下,实际接收信噪比记为 SNR_i (或 γ),其 dB 表示形式 $\text{SNR}_{i,\text{dB}}$ 可由三部分组成^[11]:

$$\text{SNR}_{i,\text{dB}} = \overline{\text{SNR}}_{\text{dB}} + P_{\text{-Shadow}_m} + P_{\text{-Fading}_m} \quad (6)$$

A) Rayleigh 信道。

在信道特性服从 Rayleigh 分布时,信噪比 γ 的 PDF 可以表示为^[10]:

$$f_{\gamma}(x) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{x}{\gamma}\right), \quad \text{其中 } \bar{\gamma} \text{ 为平均信噪比} \quad (7)$$

B) Nakagami 信道。

在信道特性服从 Nakagami 分布时,信噪比 γ 的 PDF 可以表示为^[10]:

$$f_{\gamma}(x) = \frac{1}{\Gamma(\varepsilon)} \left(\frac{\varepsilon}{\gamma}\right)^{\varepsilon} x^{\varepsilon-1} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\gamma}x\right) \quad (8)$$

其中 ε 是 Nakagami 参数, $\varepsilon = \infty$ 时,信道为 AWGN 信道, $\varepsilon = 1$ 时,信道为 Rayleigh 信道。

C) 对数正态分布(Log-normal)阴影信道。

无线通信中,较大障碍物引起的信号阴影效应一般服从对数正态分布,即接收功率的 dB 形式服从正态分布, σ_{dB} 为对数阴影效应下方差的 dB 表示,则该信道下信噪比 γ 的 PDF 表达式为^[11]:

$$f_{\gamma}(x) = \frac{10}{\ln(10)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{dB}}^2 x}} \exp\left(-\frac{(10\log(x) - 10\log(\bar{\gamma}))^2}{2\sigma_{\text{dB}}^2}\right) \quad (9)$$

D) Suzuki 信道。

将同时考虑经历 Rayleigh 衰落和对数阴影效应的信道称之为 Suzuki 信道^[11]。此时,信噪比 γ 的 PDF 可以表示为^[11]:

$$f_{\gamma}(x) = \int_0^{\infty} \frac{1}{s^2} \frac{10}{\ln(10)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{dB}}^2}} \exp\left(-\frac{x}{s} - \frac{(10\log(s) - 10\log(\bar{\gamma}))^2}{2\sigma_{\text{dB}}^2}\right) ds \quad (10)$$

在不同的信道环境下,进行基于能量检测的 Monte-Carlo 仿真,并与理论曲线进行比较,其中 $m = 5$; $\sigma_{\text{dB}} = 6$; $\overline{\text{SNR}}_{\text{dB}} = 5$; $\varepsilon = 3$,仿真次数为 50000。如图 1 所示,理论曲线与仿真曲线拟合得很好,理论结果得到了验证。同时可以看出,在相同条件下,Suzuki 信道下的检测性能最差。

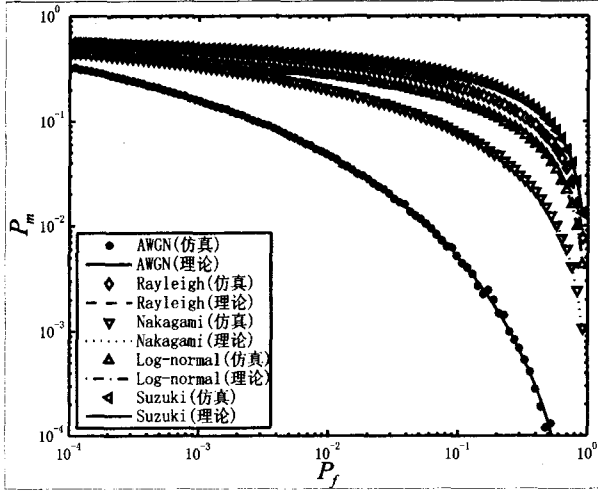


图1 不同衰落信道下的本地感知性能 CROC 曲线

3 协作频谱感知

考虑独立同分布 (I. I. D) 的情况, 此时各协作用户平均信噪比 $\bar{\gamma}$ 相同, 信噪比 γ 的 PDF 也一致。根据式(5), 协作用户的具有相同的平均检测概率 \bar{P}_d :

$$\bar{P}_d = \int_{\gamma} Q_m(\sqrt{2m\gamma}, \sqrt{\lambda}) f_{\gamma}(x) dx \quad (11)$$

则采用 K-N 融合准则时, 协作的平均检测概率 \bar{Q}_d , 虚警概率 Q_f 和漏检概率 \bar{Q}_m 分别为^[9]:

$$\bar{Q}_d = \sum_{i=k}^N \binom{N}{i} \bar{P}_d^i (1 - \bar{P}_d)^{N-i} \quad (12)$$

$$Q_f = \sum_{i=k}^N \binom{N}{i} P_f^i (1 - P_f)^{N-i} \quad (13)$$

$$\bar{Q}_m = 1 - \bar{Q}_d \quad (14)$$

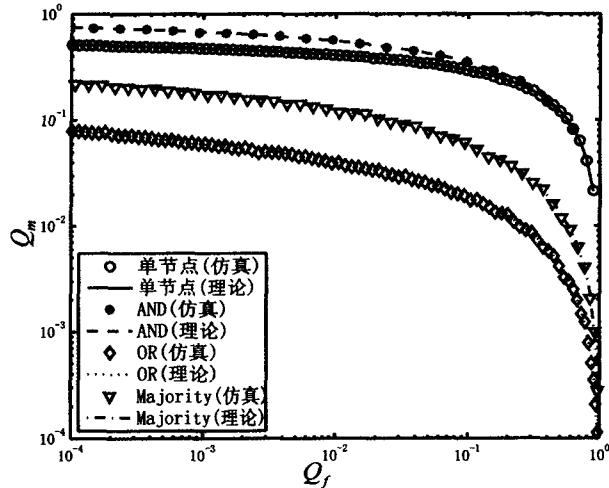


图2 采用 K-N 准则的协作 CROC 曲线

以 I. I. D 的 Suzuki 信道为例, 如图 2 所示, 在 K-N 准则下, 仿真参数取 $m = 5$; $\sigma_{dB} = 10$; $\overline{\text{SNR}}_{dB} = 6$; $N = 4$, 由 CROC 曲线可以看出, 采用 OR 融合准则时具有

更优的检测性能, 图 3 中采用 OR 融合准则, 仿真分析了协作用户数与感知性能的关系, 其中 $m = 5$; $\sigma_{dB} = 15$; $\overline{\text{SNR}}_{dB} = 5$ 。显然, 随着协作用户数的增加, 协作性能也相应提高。对 Rayleigh 等衰落信道下的性能进行仿真, 也得到了以上类似结论。

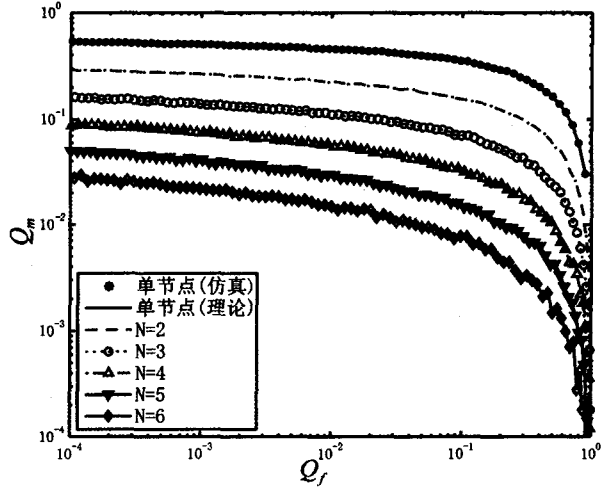


图3 协作用户数与感知性能的关系

4 空间阴影相关性

实际情况中, 对数正态分布信道往往是非独立分布的, 即需要考虑各协作用户 (也称节点) 之间的空间阴影相关作用。下面以 Suzuki 信道为例, 分析阴影相关对协作感知性能的影响, 以及与节点间距的关系。

一般阴影相关性由相关系数决定^[9], 将协作用户 i 与用户 j 之间的空间阴影相关系数记为 R_{ij} , 节点间距用 d_{ij} 表示, α 为取决于外部环境的常数, 一般城市环境下, $\alpha \approx 0.1204$, 农村环境下, $\alpha \approx 0.002$ 。

$$R_{ij} = \exp(-\alpha d_{ij}), i, j \in [1, N] \quad (15)$$

若不考虑相关性时, 第 i 个用户的阴影效应记为 $P_{\text{-Shadow}_{m,i}}$, 有

$$P_{\text{-Shadow}_{m,i}} = \sigma_{dB} X_i \quad (16)$$

其中 X_i 是服从标准正态高斯分布的随机变量, 当考虑相关性影响时, 由于第 i 个用户与 N 个用户都存在相关性, 其阴影效应改为:

$$P_{\text{-Shadow}_{m,i}} = \sum_{j=1}^N \sqrt{R_{ij}} \sigma_{dB} X_j \quad (17)$$

$$\text{构造协方差矩阵 } C_{ij}, \text{ 由 } R_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{D_i} \sqrt{D_j}} = \frac{C_{ij}}{\sigma_{dB}^2}, \text{ 即}$$

$C_{ij} = R_{ij} \sigma_{dB}^2$, 有:

$$P_{\text{-Shadow}_{m,i}} = \sum_{j=1}^N \sqrt{C_{ij}} X_j \quad (18)$$

由(6)式, 在 Suzuki 信道下, 第 i 个用户的接收信噪比 dB 形式更改为:

$$\text{SNR}_{r,dB,i} = \overline{\text{SNR}}_{dB} + P_{\text{-Shadow}_{m,i}} + P_{\text{-Fading}_{m,i}} \quad (19)$$

由(5)式得到各个协作用户的检测概率,再根据 K-N 准则可以得到协作感知的性能。

由以上分析可知,研究相关性的关键是根据节点间的距离构建协方差矩阵,下面分别以圆周分布和二维分布这两种网络拓扑结构来分析其阴影相关性,并进行 Monte-Carlo 仿真,仿真次数为 100000。

A. 圆周分布。

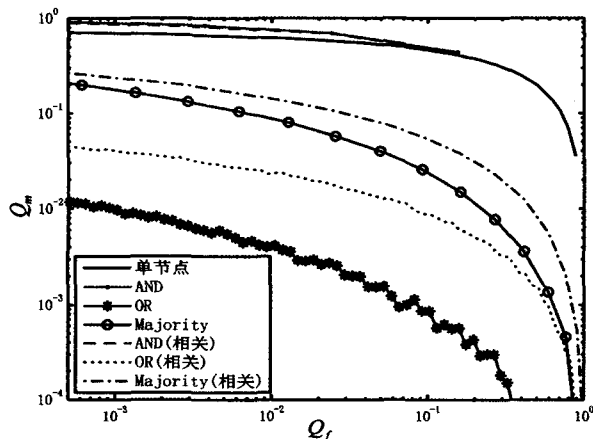
假设 N 个协作用户在半径为 r 的圆周上等间隔分布,则节点间距 $d_{ij} = 2r \sin(\pi|i-j|/N)$, 有:

$$P_{\text{-Shadow}_{\text{ave}},i} = \sum_{j=1}^N \sqrt{R_{ij}} \sigma_{\text{dB}} X_j = \sum_{j=1}^N \sqrt{\exp(-2\alpha r \sin(\pi|i-j|/N))} X_j \quad (20)$$

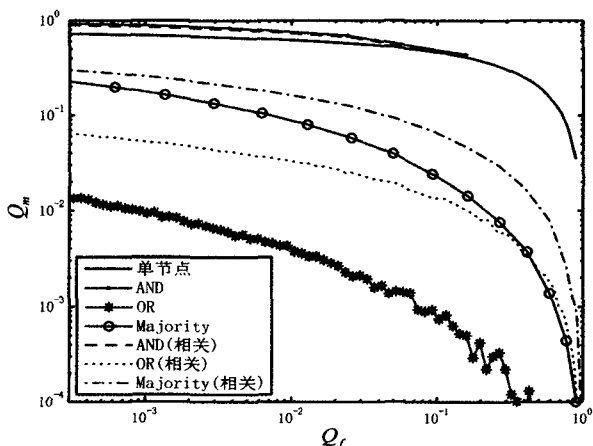
B. 二维分布。

文中的二维分布是假设 N 个用户均匀分布在一个 $n \times n$ 的网格中 ($N = n \times n$), 每个小网格的边长记为 d , 节点间距用 d_{ij} 表示。

$$P_{\text{-Shadow}_{\text{ave}},i} = \sum_{j=1}^N \sqrt{R_{ij}} \sigma_{\text{dB}} X_j = \sum_{j=1}^N \sqrt{\exp(-\alpha d_{ij})} X_j \quad (21)$$



(a) 圆周分布



(b) 二维分布

图 4 阴影相关条件下的协作 CROC 曲线

如图 4 所示,以 Suzuki 信道为例,对两种拓扑结构下,存在阴影效应的协作感知进行了仿真,取参数 N

$= 16; r = 20; d = 25; m = 5; \sigma_{\text{dB}} = 8; \overline{\text{SNR}}_{\text{dB}} = 0$, 可以很明显看出,阴影相关性降低了协作感知性能。

由(15)(17)式分析可知,节点间距越小,阴影相关系数就越大,阴影效应就越明显,协作感知性能下降就越严重。图 5 仿真了节点间距与协作性能的关系,其中仿真参数 $N = 12, m = 5; \sigma_{\text{dB}} = 8; \overline{\text{SNR}}_{\text{dB}} = 0$, 节点间距分别取 5、10、15、20。如图所示, CROC 曲线证实了以上结论。

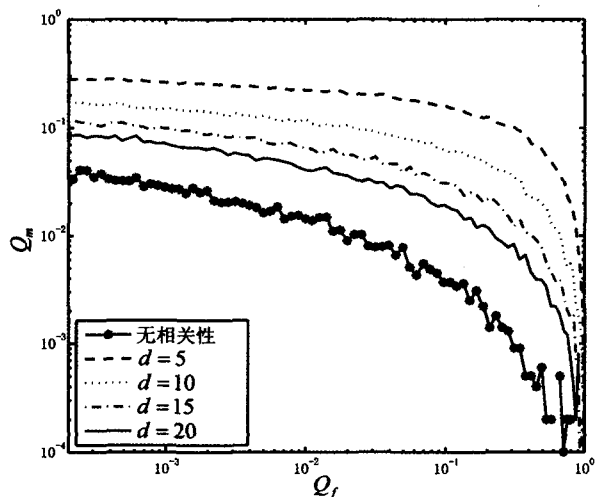


图 5 空间阴影相关效应下,节点间距与感知性能的关系

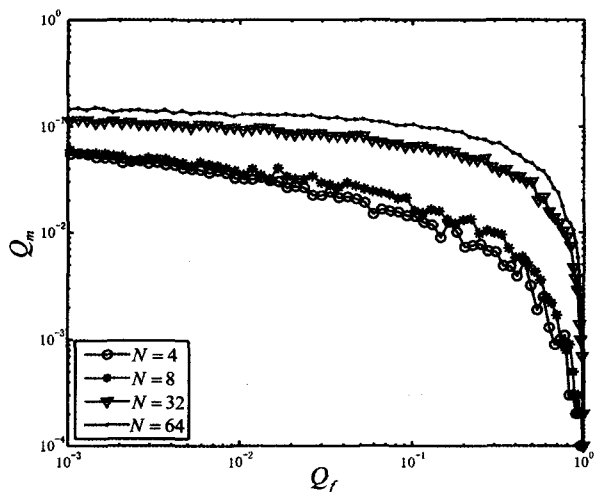


图 6 一定范围的圆周分布下,用户数与协作性能的关系

在一定范围内,协作用户数增多,节点间距就缩短,阴影相关效应将越严重。此时采用用户数较少但位置更为分散的协作感知,有可能获得更好的感知性能。以圆周分布为例,假设半径为一定值进行仿真,其中参数 $r = 10; m = 5; \sigma_{\text{dB}} = 8; \overline{\text{SNR}}_{\text{dB}} = 0$, 用户数 N 分别取 4、8、32、64。由图 6 的 CROC 曲线可以看出,由于阴影相关性的影响,随着用户数的增加,协作性能反

性组外的属性取值不同,根据需要则要把一行数据中的不相同属性值连接到另一行数据的末尾成为同一行数据输出。

4 结束语

随着信息化发展及企业规模的不断扩大,“信息孤岛”问题已经成为阻碍企业信息化进程的主要因素,数据集成是解决“信息孤岛”问题的根本方法。文中通过对比已有数据集成方法,结合现代企业的具体应用需求,提出了一种基于 SOA 架构和本体技术的数据集成框架。系统将异构数据源以 Web Service 的形式进行封装,同时引入本体技术,利用本体描述领域概念的优势,较好解决了数据集成中数据的异构性问题,实现了数据访问的透明性。

下一步的主要工作是:改进本体的生成规则,减少人工干预,提高本体生成的自动化程度。

参考文献:

- [1] 吴国新,吉逸. EDI 技术研究及其实现[J]. 计算机研究与发展,1998,35(2):108-113.
- [2] 李亚楠,刘连忠,贾燧星. 数据交换研究[J]. 计算机技术与发展,2008,18(2):5-8.
- [3] 王艳敏,谢强,丁秋林. 基于本体和 Web Services 的数据

(上接第16页)

而下降了。

5 结束语

研究了基于能量检测和 K-N 融合准则的协作频谱感知方案在不同衰落信道环境下的感知性能,并讨论了阴影相关性对协作性能的影响。仿真结果表明,通过协作感知可以有效地提高频谱感知性能,并且采用 OR 准则进行融合时的性能最优。另外,空间阴影相关性会对协作感知的性能造成不利影响,且随着节点间距的减小,阴影相关效应越明显。当协作范围一定时,采用更为分散的网络拓扑结构可以大大降低阴影相关性,因而获得更好的感知性能。

参考文献:

- [1] 孙丽艳. 基于激励机制的认知无线电自私行为研究[J]. 计算机技术与发展,2009,19(10):170-173.
- [2] 郭彩丽,张天魁,曾志民,等. 认知无线电关键技术及应用的研究现状[J]. 电信科学,2006(8):50-55.
- [3] 林琳,周贤伟,薛楠,等. 认知无线电网络安全路由问题研究[J]. 计算机技术与发展,2010,20(1):159-162.
- [4] 刘子琦,冯春燕,曾志民,等. 认知无线网络中物理层频谱检测算法的研究[J]. 电信科学,2009(3):64-69.

交换平台[J]. 计算机技术与发展,2010,20(5):112-116.

- [4] 姜代红. 数据仓库技术在系统集成中的应用研究[J]. 徐州工程学院学报,2005,20(5):59-61.
- [5] 乐鑫喜,刘清. 异构数据库集成系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用,2005,41(4):175-177.
- [6] 杨建武,陈晓欧. XML 相关标准综述[J]. 计算机科学,2002,29(2):25-28.
- [7] Berardi D. Automatic Service Composition: Models, Techniques and Tools[D]. Roma: Universita' di Roma "La Sapienza", 2005.
- [8] Brainz S M. A Semantic Web Services[J]. IEEE Intelligent System, 2002,17(1):76-77.
- [9] 刘奎,赵晓静. 一种基于本体的 Web 服务发现框架[J]. 计算机技术与发展,2008,18(2):112-114.
- [10] Decker S, Erdmann M, Fensel D, et al. Ontobroker: Ontology based access to distributed and semi-structured information [C]//Proceedings of DS-8 on Semantic Issues in Multimedia Systems. Boston: Kluwer Academic Publisher, 1999:351-369.
- [11] 徐德智,贾栋,王建新. 基于本体的 XML 语义集成和查询的研究[J]. 计算机技术与自动化,2007,26(1):77-80.
- [12] Baader F, McGuinness D L, Nardi D, et al. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [5] Yucek T, Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009,11(1):116-130.
- [6] 郭晨,彭涛,王文博. 认知无线网络中合作频谱感知机制的优化[J]. 电子与信息学报,2009,31(7):1525-1530.
- [7] 刘全,高俊,关建新,等. 认知无线网络链路层关键技术的研究进展[J]. 电讯技术,2010,50(3):90-98.
- [8] Ma J, Li G Y, Juang B H. Signal processing in cognitive radio [J]. Proceedings of the IEEE, 2009,97(5):805-823.
- [9] Ghasemi A, Sousa S. Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing[J]. Journal of Communications (JCM), 2007,2(2):71-82.
- [10] Digham F, Alouini M, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [C]//proceedings of IEEE International Conference on Communications. Alaska, USA: IEEE, 2003:3575-3579.
- [11] Kyperountas S, Correan N, Shi Q, et al. Performance analysis of cooperative spectrum sensing in Suzuki fading channels [C]//proceedings of 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. 2007. Orlando, USA: IEEE, 2007:428-432.
- [12] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals [J]. Proceedings of the IEEE, 1967,55:523-531.