

雷达-通信共存系统中雷达脉冲串信号的高效协同感知算法

王 瑞* 易辉跃 胡宏林
(上海无线通信研究中心 上海 200335)

摘 要: 该文针对与雷达共存的认知无线电通信系统,为实现通信系统对雷达频段空闲频谱的机会利用,提出一种对转动扫描雷达脉冲串信号的高效协同感知算法。该算法由中心处理节点协同各感知节点进行感知,通过各协作感知节点的相似度判决处理和中心处理节点的基于时序准则判别的数据融合方法,提高了检测概率并降低了虚警概率。相比于现有的雷达信号感知方法,该感知算法无需雷达先验信息,在快速可靠感知雷达脉冲串信号的同时,能够确定雷达的特征参数,如扫描周期、扫描方向、距离等。最后,仿真结果表明了所提算法的有效性和正确性。

关键词: 雷达频段机会利用; 转动扫描雷达; 协同感知

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)03-0521-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00479

An Efficient Cooperative Sensing Algorithm for Radar Pulse Train Detection in Radar-communication Coexistence System

Wang Rui Yi Hui-yue Hu Hong-lin
(Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 200335, China)

Abstract: For a cognitive radio communication system coexisting with radar to access the radar spectrum opportunistically, an efficient Cooperative Sensing Algorithm (CSA) for swept radar pulse train is proposed. There is a central processing node which cooperates with other sensing nodes to sense a radar spectrum channel. Moreover, the similarity judgment of the single node and data fusion based on time-series identification of the central processing node can greatly improve the probability of detection and reduce the probability of false alarm. Compared to existing methods of sensing radar signal, the proposed algorithm can quickly and reliably detect swept radar pulse train without any prior information on the radar. At the same time, the radar parameters, such as rotation period, scanning direction, distance etc., can be acquired. Finally, simulation results show the effectiveness and correctness of the algorithm.

Key words: Radar spectrum opportunistically utility; Swept rotation radar; Cooperative sensing

1 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术通过机会式地利用“空白频谱”,能有效地缓解无线频谱的短缺和提高频谱利用率,近年来受到研究者极大的关注。目前,在利用CR技术实现无线局域网与雷达设备的共存方面,人们进行了大量的研究工作。为实现通信系统对雷达频段空闲频谱的机会利用,关键问题是如何实现对雷达信号的可靠感知。ITU-R M.1652^[1], ITU-R M.2034^[2]和 ITU-R M.2115^[3]针对这一问题做了相应的研究。ITU-R M.1652 中给出了雷达信号检测和相关动态频率选

择(Dynamic Frequency Selection, DFS)检测步骤。但是,该方法无法区分雷达脉冲串和干扰脉冲串,并且无法在短时间内判断感知脉冲串信号是否来自于转动扫描雷达及获得雷达相应参数。为了高效地共享雷达频段,需要一个具有良好感知能力的次级感知通信系统^[4,5]。文献[4]提出了一个基于信噪比的加权感知算法来提高感知精确度。在文献[5]中,为了改善感知性能,研究了扫描雷达的旋转机制,给出了基于协同感知机制的感知节点分簇选择算法。但是,文献[4,5]的协同感知机制需要感知设备已知雷达系统的先验信息(如雷达扫描周期),这个要求在实际应用中不能得到满足,从而限制了该感知算法的可靠性和实际应用。为了更加可靠、高效地检测雷达信号,必须研究有效的频谱感知方法。文献[6-8]在协作式频谱感知方面做了很多研究,证明了协同感知算法能够有效的改进感知性能。

2010-05-14 收到, 2010-09-06 改回

上海市自然科学基金(08ZR1418500), 国家科技重大专项项目(2009ZX03007-004, 2009ZX03003-002, 2009ZX03003-007)和国家863 计划重点项目(2009AA011800)资助课题

*通信作者: 王瑞 rui.wang@shrcwc.org

本文针对雷达-通信共存的认知无线电系统,提出了一种高效协同检测转动扫描雷达脉冲串信号的新方法。该算法无需雷达的先验信息,通过多个感知节点的协同合作,提高了雷达脉冲串信号的检测概率,降低了虚警概率;并且可以快速(小于一个雷达扫描周期)判断被感知脉冲串信号是否来自于一个转动扫描雷达,同时得到雷达扫描的特征参数。

2 系统模型及协同感知算法

考虑如图1所示的与雷达共存的认知无线电通信系统。初级系统为典型的转动扫描雷达;假设次级认知无线电系统为蜂窝通信网络,且有 n 个基站,由各基站进行频谱感知。可将其中一个基站作为中心处理节点,也可以设置一个单独实体作为中心处理节点。该中心处理节点具有信息收集、处理的功能。由于各次级基站间采用有线连接,故中心处理节点可实时地进行信息收集与处理。为了避免对初级系统造成干扰,次级系统需要周期性地组织感知节点进行感知活动。

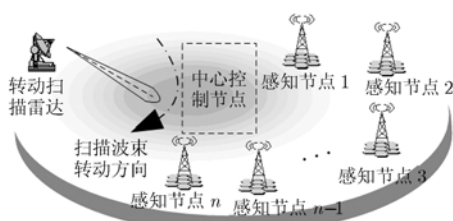


图1 认知无线电系统与转动扫描雷达的共存场景图

由于转动扫描雷达主瓣波束窄、能量高,旁瓣能量较低,因此分布在不同位置的感知节点落入同一个雷达主瓣内的时刻会有先后顺序,即感知节点的感知时序根据感知节点的位置分布和雷达的扫描方向服从一定的规律。针对转动扫描雷达脉冲串信号的上述特征,提出了一个高效协同感知算法。该算法由中心处理节点选择一个感知节点专门针对雷达频段的某一个信道进行感知,称为中心感知节点。为了在绝对保护雷达频段的同时,不减少次级通信系统对该信道的使用机会,其他感知节点在不影响中心感知节点正常感知的情况下,可利用该信道进行通信。例如,在蜂窝通信系统中,假设基站覆盖范围半径为 r ,若两个基站间距离 $d > 2r$,则可认为它们之间不会产生同频干扰。具体感知步骤如下:

(1)中心处理节点首先选择一个中心感知节点针对雷达频段的某一信道进行感知,当其感知到一个脉冲串信号后,将该脉冲串信号的特征信息(包括脉冲宽度和脉冲重复周期)和感知时刻发送给中心

处理节点;

(2)中心处理节点在中心感知节点附近选择若干个感知节点,称为协作感知节点。中心处理节点向这些节点发送一个感知指令(包括中心感知节点感知到脉冲串信号的特征信息),通知其停止在该信道上的通信,开始对该信道进行感知;

(3)若某协作感知节点在该信道上感知到一个脉冲串信号,进行相似度判决处理,若满足相似性要求,将该脉冲串信号的感知时刻上报给中心处理节点;

(4)若中心处理节点收到多个协作感知节点上报的感知时刻信息,则依据相应的专家规则进行数据融合,根据融合结果判断是否有转动扫描雷达以及获得该雷达的相应特征参数;

(5)若中心处理节点在设定时间内没有收到任何协作感知节点上报的感知时刻信息,则通知这些协作感知节点停止感知,恢复各自的通信,同时由中心感知节点继续对该信道进行感知。

3 中心处理节点的融合策略

雷达-通信共存的认知无线电系统中,初级系统转动扫描雷达的行为非常有规律,如扫描速度、转动方向等是相对固定的参量。因此,不同感知节点落入雷达主瓣波束内的感知时刻服从一定的先后顺序。基于这种特有的时序关系建立了一个判断雷达信号出现的专家系统;在融合感知结果的过程中,利用次级系统各节点的位置信息,可以得到转动扫描雷达的特征参数。

如表1所示,根据收到的感知时刻报告数目和相应的时序准则,建立如下专家规则。

表1 融合策略中的时序判别专家规则

协作感知节点数目	中心处理节点收到的感知时刻报告数目	是否满足一致的时序准则	决策结果
5-10 个	=1	时序准则 1	若满足相应的时序准则,则判决为发现一个转动扫描雷达;否则判决为中心感知节点虚警。
	=2	时序准则 2	
	>2	时序准则 3	

首先,中心处理节点任选一个感知节点作为中心感知节点针对雷达频段的某一信道进行感知。根据收到的感知报告数目采用不同的时序准则判别机制。3种时序准则的相应内容如下:

时序准则 1 中心处理节点收到一个来自协作

感知节点的感知时刻报告,通过与中心感知节点感知时刻的比较,得到一个时刻差。基于对雷达系统绝对保护的目的,此时认为感知信道被某一转动扫描雷达占用,可以判断出雷达扫描的切向方向,但是并不能得到雷达的具体方位信息和扫描周期,需要继续感知。

时序准则 2 中心处理节点收到 2 个感知时刻报告,可以得到 2 组时刻差,下面基于这种情况给出一个计算实例。

以图 1 定义的一个雷达-通信共存的认知无线电系统为例,为了方便描述,假定感知节点 1 既为中心处理节点,又为中心感知节点。感知节点 1 首先对雷达频段的某一信道进行感知,在时刻 t_1 感知到一个脉冲串信号的出现,随后感知节点 1 向其周围节点发出感知指令。感知节点 2 和感知节点 3 分别在 t_2 和 t_3 时刻感知到具有相同特征的脉冲串信号,其感知过程的时序图如图 2 所示。

如图 3 所示,假设次级通信系统基站的覆盖半径为 500 ~ 600 m。感知节点 1、感知节点 2 和感知节点 3 彼此之间的距离分别为 $r_1 = 1.5$ km, $r_2 = 1$ km, $r_3 = 1.75$ km。因此,感知节点之间不会产生相互干扰。通过感知时刻的测量和比较,可得 $\Delta t_1 = 0.06$ s, $\Delta t_2 = 0.075$ s。

(1) 由余弦定理 $\cos(\angle\alpha + \angle\beta) = (r_1^2 + r_2^2 - r_3^2) / (2 \cdot r_1 \cdot r_2)$, 可得

$$\angle\alpha + \angle\beta = 60^\circ \quad (1)$$

(2) 由于雷达距离次级系统较远 (> 10 km), 而电磁波传播速度为 $c = 3 \times 10^8$ m/s, 因此忽略各感知节点在雷达波束径向扫描方向上的距离差, 则各感知节点在雷达扫描波束切向方向上的距离差与感知时间差成比例, 即

$$\frac{a}{b} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \quad (2)$$

(3) 根据三角形关系, 可得

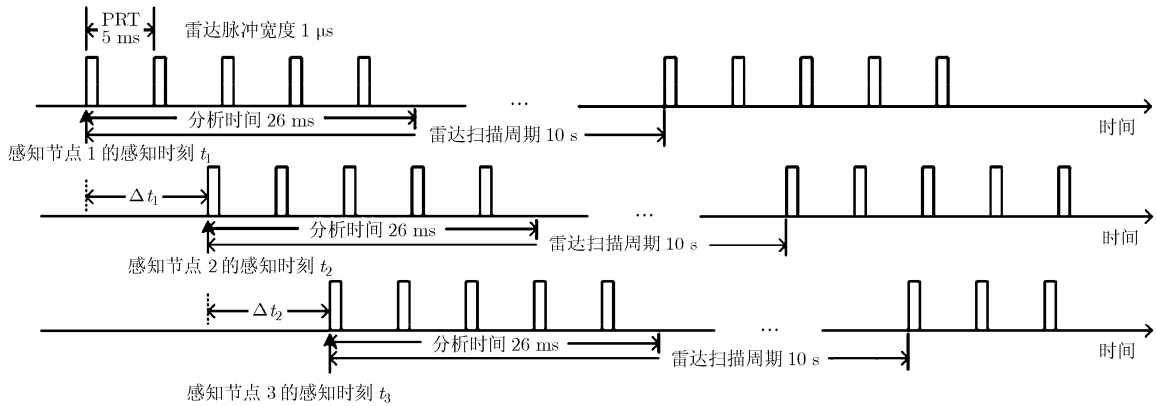


图 2 时序准则 2 的协同感知时序图

$$\sin\alpha = a/r_1, \quad \sin\beta = b/r_2 \quad (3)$$

(4) 联合式(1)-式(3)可以解出 $\angle\alpha = 20^\circ$, $a = 0.51$ km。

通过上述计算过程,可以确定雷达波束的扫描方向是顺时针扫描,先后经过感知节点 1, 节点 2, 节点 3, 并且其波束扫描的径向方向与感知节点 1, 节点 2 的连线的夹角为 $\angle\alpha = 20^\circ$ 。

假设继续感知 10 s 后,感知节点 1 又检测到了相同的雷达信号,并且随后感知节点 2, 节点 3 分别经历了 Δt_1 和 $\Delta t_1 + \Delta t_2$ 后也检测到了该雷达信号,则可以判断该雷达的扫描周期为 $T_{\text{rotation}} = 10$ s, 雷达与感知节点的径向距离为 $R = \frac{a \times T_{\text{rotation}}}{2\pi \times \Delta t_1} = 13.62$ km。

时序准则 3 当中心处理节点收到多于 2 个感知时刻报告时,能够得到多组时刻差。依据感知时刻的先后顺序,依次将每 3 个协作感知节点分为一组。参考时序准则 2 中的分析方法,每组感知节点都可以判断得出雷达波束的扫描方向(顺时针或者逆时针方向),若结果一致,则判断该信道被转动扫描雷达占用;若各组得到的扫描方向互相矛盾,则判断中心感知节点虚警,该信道没有被占用。

由以上分析可知,本文提出的基于时序判别专家规则的数据融合方法并不是对各本地感知结果进行简单的数学计算或者阈值比较,而是根据收集到的感知结果数目进行分类,依据相应的时序准则进行分析判断,若过多协作感知节点上报虚警结果,会对中心处理节点的融合过程产生极大的干扰。因此,需要研究降低虚警概率的单节点信号检测方法。

4 单节点信号感知与检测算法

4.1 信号模型

对于感知节点 i , 信号检测问题的假设为

$$H_0 : y_i = n_i \quad (4)$$

$$H_1 : y_i = s_i + n_i \quad (5)$$

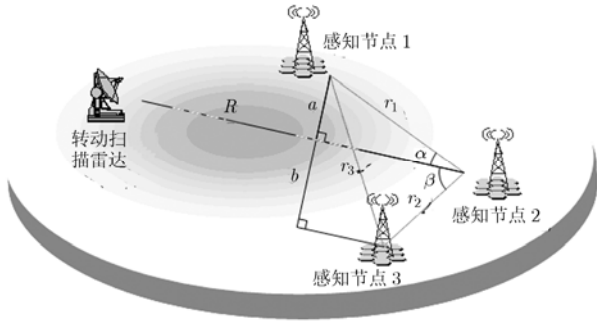


图3 协同感知融合策略的一个计算实例示意图

式中 s_i 是初级系统(雷达)信号。 n_i 为感知节点 i 的噪声, 且可假设各个感知节点的局部噪声是独立同分布的, 服从标准高斯分布, 即 $n_i \sim N(0,1)$ 。而且, 假设 s_i 与 n_i 相互独立。 H_0 假设代表初级系统频谱为空白状态; H_1 假设代表初级系统在被检测频谱内活动。

4.2 小波检测算法

对于单个感知节点的信号检测算法, 当考虑没有任何关于初级系统的先验信息的情况时, 可采用经典的能量检测方法^[9]。但是, 由于能量检测无法确定被检测信号的起止时间和特征参数, 如脉冲串信号的重复周期、脉宽等, 文献[10]给出了基于小波变换的脉冲信号检测方法。利用小波变换, 可有效地对脉冲上升沿和下降沿进行检测和定位。文献[10]中小波检测算法的原理简述如下。信号 $y(\tau)$ 的小波变换可表示为

$$W_\sigma(t) = \int_{t-2\sigma}^t \psi_{a,\sigma}(\tau - t)y(\tau)d\tau \quad (6)$$

式(6)中 $\psi_{a,\sigma}(\tau) := \psi_a(\tau + \sigma) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{\tau + \sigma}{a}\right)$ 为小波函数 $\psi(\tau)$ 的伸缩和平移变换, 其中 $a(>0)$ 是尺度参数, $\sigma = \sigma(a)(>0)$ 是平移参数。考虑一个单脉冲信号, 即

$$s(t) = u(t - t_1) - u(t - t_2), \quad t_1 < t_2 \quad (7)$$

其中 $u(\cdot)$ 是单位阶跃函数, 而 t_1 和 t_2 是信号改变的時刻。则其小波变换为^[10]

$$W_\sigma(t) = \begin{cases} -\Psi_a(t_1 - t + \sigma), & t_1 < t < t_1 + 2\sigma \\ \Psi_a(t_2 - t + \sigma), & t_2 < t < t_2 + 2\sigma \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可见, $W_\sigma(t)$ 在脉冲上升和下降时刻 t_1 , t_2 附近不为 0, 而在其它位置为 0。因此, 利用此特性可对脉冲进行检测与定位。图 4(a)给出了加入高斯白噪声的脉冲串信号, 信噪比为 10 dB。经过 haar 小波变换后, 在尺度参数 $a = 8$ 上的检测结果如图

4(b)所示。由图 4(b)的变换结果可以看出, 利用上述小波变换可以有效地对脉冲上升沿和下降沿进行定位, 从而得到脉冲信号的宽度和重复周期。当信噪比降低时, 可通过增大小波变换的尺度因子, 以获得更好的检测效果。为了提高检测性能, 可采用更为有效的小波多尺度积分法和小波多尺度乘法^[11]。

4.3 相似度判决

通过上面的分析可知, 本文所提算法采用多个感知节点协同合作的目的是消除虚警, 同时提高次级系统对雷达的感知精确度。因此, 各协作感知节点的感知过程可以采用恒虚警准则^[9]来设置能量检测算法的检测门限, 以保证较小的虚警概率。然而, 在不能造成较多漏警的要求下, 虚警情况仍然会经常发生。此时, 本文提出一个相似度判决算法来剔除某些干扰造成的虚警。依据式(9), 式(10)分别计算协作感知节点本地感知脉冲串信号的脉冲宽度(Pulse Wide, PW)和脉冲重复周期(Pulse Repetition Time, PRT)与中心感知节点对应参数的偏差, 若小于某个门限, 则该脉冲串信号满足相似性要求, 判断该脉冲串信号是与中心感知节点感知到的相同来源的脉冲串信号, 将该脉冲串信号的感知时刻汇报给中心处理节点, 这也有效减少了上报量, 避免了不必要的信令开销。

$$\frac{|PW_{\text{ln}} - PW_{\text{csn}}|}{PW_{\text{csn}}} < TH_{\text{pw}} \quad (9)$$

$$\frac{|PRT_{\text{ln}} - PRT_{\text{csn}}|}{PRT_{\text{csn}}} < TH_{\text{prt}} \quad (10)$$

其中 PW_{ln} , PW_{csn} 分别为本地感知信号的脉冲宽度, 中心感知节点处感知信号的脉冲宽度; TH_{pw} , TH_{prt} 分别为脉冲宽度和脉冲重复周期的门限。

图 5 给出协作感知节点处经过相似度判别处理前后的单点检测结果对比, 门限设置为 0.5。如图 5(a)所示, 经过相似度判决处理后, 虚警概率较未经处理的能量检测算法大幅降低。如图 5(b)所示, 当信噪比较低的时候, 检测概率会有相应的损失。但是, 当信噪比升高时, 检测概率的损失会逐渐减小。

5 仿真结果及分析

针对本文所提出的高效协同感知算法进行仿真验证。初级系统为一个典型转动扫描雷达, 其特征参数如表 2 所示。次级通信系统的基站覆盖半径 $r = 500 \text{ m}$, 两两基站之间的距离 $d > 2r$ 。基站与雷达之间的距离 $D > 10 \text{ km}$ 。协作感知基站数目为 $N = 8$ 。由本文所提算法的具体感知步骤可知, 是

否需要协作感知节点进行感知是由中心感知节点的感知结果决定的,因此,为了对雷达系统提供绝对保护,中心感知节点需具有较高的检测概率,此时根据恒虚警准则^[9]设置检测门限 $P_d = 0.99$ 。但是,在保证中心感知节点检测概率的同时会带来较大的虚警概率。虚警情况的经常发生会极大降低雷达频段的频谱次级利用率,因此,根据恒检测准则^[9]设置协作感知节点的虚警概率 $P_{fa} = 0.1$ 或 $P_{fa} = 0.01$ 。同时,假设在所研究的认知无线电通信系统与雷达共存的场景中,除了由接收机内高斯白噪声带来的虚警外,可能存在以下两种产生虚警的原因:随机干扰(非脉冲串信号),多个协作感知节点位于同一个干扰信号作用范围内(干扰信号是脉冲串信号,多个协作感知节点同时感知到该信号),其出现概率如表2中所示。在中心感知节点处,其本地信号检测并不能区别这两种特殊的干扰信号与雷达脉冲串信号的差别,此时,都会通知中心处理节点,从而触发

表2 仿真参数

初级系统(一个典型转动扫描雷达)	仿真信号组成	出现概率(%)
频率(GHz)	2.3	来自转动扫描雷达脉冲串信号
脉冲重复周期(ms)	5	随机干扰信号
脉冲宽度(μs)	1	具有脉冲串特性的干扰信号
3 dB 主瓣宽度($^\circ$)	0.92	(覆盖区域较大)
雷达扫描周期(s)	10	

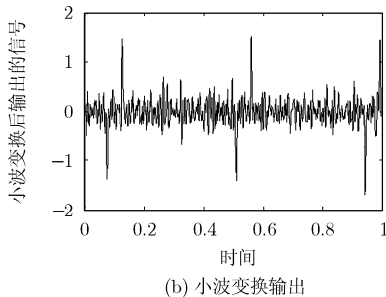
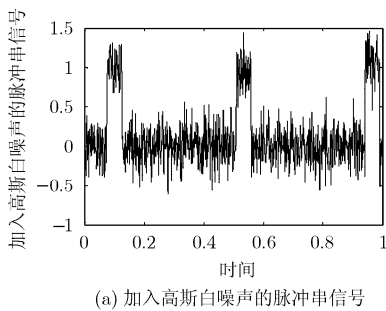


图4 加入高斯白噪声的脉冲串信号小波变换结果

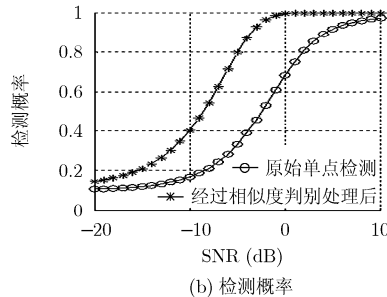
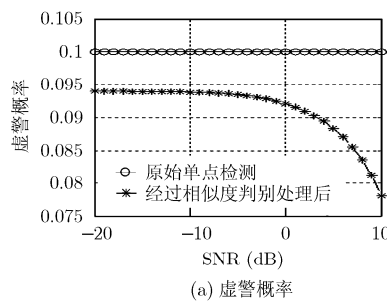


图5 原始单点信号检测和经过相似度判别处理后的虚警概率、检测概率曲线对比图

协同感知过程。使用 matlab7.6.0 进行计算机仿真实验,将所提算法与传统融合策略“OR 准则”和“AND 准则”^[9]做出比较,分析这3种融合算法剔除上面所述两种虚警情况的能力。

由图6可见,本文所提协同感知算法(Cooperative Sensing Algorithm: CSA)的检测概率略低于“OR 准则”,高于“AND 准则”;虚警概率均低于“OR 准则”和“AND 准则”,有更好的感知性能。同时,图6(a),6(b)中恒虚警概率 P_{fa} 分别设置为0.1,0.01,通过对比可知,在本文所提协同感知算法中,设置更低的恒虚警概率没有明显降低系统的全局虚警概率,反而损害了低信噪比处的检测概率。因此,为了获得更好的整体感知效果和效率,应该综合考虑检测概率、感知节点数和虚警概率的设置。

6 结束语

针对与雷达共存的认知无线电通信系统,为实现通信系统对雷达频段空闲频谱的机会利用,本文提出一种对转动扫描雷达脉冲串信号的高效协同感知算法。该算法由中心处理节点协同各感知节点针对雷达频段某一信道进行感知,收集各节点上报的感知结果和感知时刻信息进行数据融合,以实现雷达脉冲串信号精确地感知。仿真实验结果证明,相比于现有的感知方法,所提的高效协同感知算法能够有效剔除虚警现象,并且能够在没有任何关于雷达脉冲串信号先验信息的情况下,确定雷达的特征参数,如雷达的扫描周期、扫描方向和距离等。

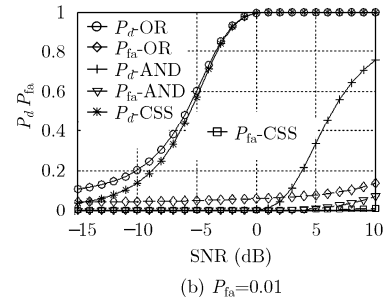
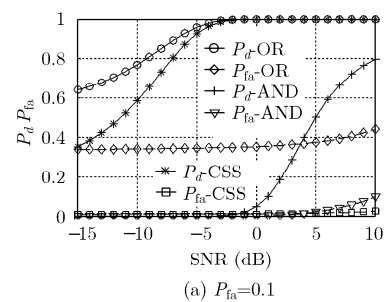


图6 仿真结果对比图

参 考 文 献

- [1] Rec. ITU-R M.1652 1. Dynamic frequency selection (DFS) in wireless access systems including radio local area networks for the purpose of protecting the radio determination service in the 5 GHz band [S]. 2003.
- [2] Rec. ITU-R.M. 2034. Impact of radar detection requirements of dynamic frequency selection on 5 GHz wireless access system receivers [S]. 2003.
- [3] Rec. ITU-R.M. 2115. Testing procedures for implementation of dynamic frequency selection [S]. 2007.
- [4] Wang L S, Williams C, and Doufexi A, *et al.* Weighted cooperative sensing for pulse radar signals [C]. IET Seminar on Wideband and Ultrawideband Systems and Technologies: Evaluating Current Research and Development, London, UK, Nov.6, 2008: 1–5.
- [5] Wang L S, Doufexi A, and Williams C, *et al.* Cognitive node selection and assignment algorithms for weighted cooperative sensing in radar systems [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, Hungary, 2009: 1–6.
- [6] Yucek T and Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(1): 116–130.
- [7] Jeong S S, Jeon W S, and Jeong D G. Collaborative spectrum sensing for multiuser cognitive radio systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(5): 2564–2569.
- [8] Letaief K B and Zhang W. Cooperative communications for cognitive radio networks [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5): 878–893.
- [9] El-Saleh A A, Ismail M, and Ali M A M, *et al.* Capacity optimization for local and cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. *International Journal of Electronics, Circuits and Systems*, 2009, 3(3): 69–75.
- [10] Ohsumi A, Ijima H, and Kuroishi T, *et al.* Online detection of pulse sequence in random noise using a wavelet [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(9): 2526–2531.
- [11] Xu Y L, Zhang H S, and Han Z H. The performance analysis of spectrum sensing algorithms based on wavelet edge detection [C]. Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing, China, 2009: 1487–1490.

王 瑞: 女, 1985 年生, 工程师, 研究方向为无线通信系统中的动态频谱共享技术和认知无线电技术.

易辉跃: 男, 1970 年生, 副研究员, 研究方向为无线通信理论、通信信号处理、智能天线和多天线多载波通信系统等.

胡宏林: 男, 1975 年生, 研究员, 研究方向为分布式通信系统、Mesh 网络等.