

一种用于变电站内频谱感知的双门限加权序贯检测方法

姚继明, 刘世栋, 张 波

(中国电力科学研究院, 江苏 南京 211106)

摘 要: 频谱资源是限制变电站内的传感终端发展的重要因素, 基于认知无线电的无线终端可动态检测空闲频谱资源进行数据传输。变电站内复杂的无线环境给频谱感知带来麻烦, 快速准确的频谱感知意义重大。本文研究恶意节点对协作频谱感知性能的影响, 给出一种基于声望值的双门限加权的序贯检测方法, 该方法通过对融合数据进行加权来提高感知性能, 缩短感知时间, 减少判决样本, 能够进行恶意节点的判断。仿真结果验证了本方法具有更好性能。

关键词: 变电站; 认知无线电; 频谱感知; 序贯检测; 恶意节点

0 引言

智能变电站是智能电网发展的一部分, 是未来发展的趋势, 现阶段已经取得了一定的成果, 对变电站内各种电力设施部署无线传感终端进行实时监测是智能化的前提, 但由于在一定范围内无线传感终端数量较大, 而频谱分配方式固定、频率资源有限, 导致频谱资源匮乏, 传输冲突增多, 通信性能降低, 不利于实时信息的获取, 所以未来频谱资源的短缺成为无线传感终端难以克服的瓶颈^[1]。

认知无线电^{[2][3]} (Cognitive radio, CR) 是一种内容认知型的智能无线电, 能够智能的检测到空闲频谱资源并进行动态的频谱资源分配利用, 弥补了传统固定频谱分配方式的不足, 大大提高频谱资源的利用效率。基于认知无线电技术设计的各种传感终端 (本文也称之为节点) 可以使用频谱感知技术^[4]进行该频段的使用情况侦测, 在不影响授权节点正常负控业务下利用空闲频谱资源进行监测数据的传输; 同时各终端基于分布式协作技术进行空闲信道的统筹分配, 在不造成单点处理瓶颈的前提下使带宽的利用率达到局部最优。

由于变电站内无线通信终端种类繁多, 频谱资源分布范围较宽, 使用的频谱资源变换频率较大, 而且存在着各种电磁干扰, 这给频谱利用带来了不利因素, 所以进行快速、准确的频谱感知对于利用空闲频谱资源、提高频谱利用效率有着重要的意义。现有频谱感知技术主要分单节点的感知^[5]和协作感知^[6]两大类。文^{[7][8]}对单个节点常用的感知方法进行了介绍, 但是这些算法都有一定的局限性而且单个节点独立执行本地频谱检测的过程中容易受到多径、阴影以及本地干扰等不利因素影响, 检测性能不好。为了提高频谱检测的可靠性, 协作频谱感知^[9]得到了越来越多的研究, 研究表明协作频谱感知能够很好提高整个系统的性能。分布在一定范围的传感终端可能会出现发送错误判决结果的情况, 对总的判决结果会造成一定的影响。本文称正确检测概率很低的节点为恶意节点, 并对此进行研究。

已有的协作频谱感知方法分硬融合判决^{[10][11]}和软融合判决^{[12][13][14]}, 由于软融合判决有着更高的准确度, 所以得到了更多的研究。主要的软融合方法有贝叶斯检测^[12]、序贯检测^[13] (Sequential Probability Ratio Test, SPRT) 以及加权序贯检测^[14] (Weighted SPRT, WSPRT) 等, 但这些算法没有考虑恶意节点存在的情况或者考虑到但判决方法不太合理, 本文在此基础上提出了一种新的判决方法, 该方法是基于声望值的双门限加权协作方法, 根据赋予节点的声望值的动态变化, 在协作融合过程中动态分配加权系数进行加权, 判断恶意用户的存在, 仿真结果表明该方法有着更好的检测性能。

1 问题分析

1.1 协作感知系统模型

由于单个节点的判决容易受到无线环境的影响, 判决结果受多径、阴影效应以及本地干扰等因素干扰较大, 判决结果可信度不高, 为了对抗这些不利因素增加整个认知无线电系统的检测可靠性, 越来越多的研究使用协作感知^[6]来代替单个节点的感知, 具体模型如图 1 所示。

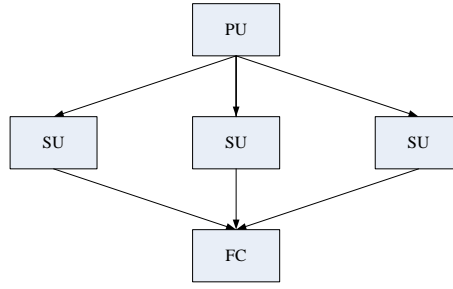


图 1 协作感知模型图

如图 1 所示，图中的 PU(Primary User)表示主节点，一般也称授权节点，SU(Secondary User)表示各个感知的节点，FC (Fusion Center) 表示融合中心，每个感知节点分别对授权节点所拥有的频段进行感知，并把感知结果送给融合中心，融合中心根据一定的判决规则得到最终的判决结果，然后反馈给各个节点，从而使各个节点得知频谱资源的占用情况。我们用二元假设检验问题来表示感知节点的判决情况， H_0 表示感知节点检测到授权节点信号不存在， H_1 表示检测到授权节点的存在，也就是

$$\begin{cases} H_0 : x(t) = n(t) \\ H_1 : x(t) = h(t)s(t) + n(t) \end{cases} \quad (1)$$

这里 $x(t)$ 代表感知节点接收到的信号， $s(t)$ 表示授权节点传输的信号， $h(t)$ 表示信道衰减系数且与 $s(t)$ 独立， $n(t)$ 表示加性高斯白噪声。我们假设各感知节点之间是相互独立的，而且所有的处在同一区域的感知节点和主节点都使用相同的频谱分配方案。

我们很容易理解因为感知节点和授权节点之间的信道环境不同，不同的感知节点提供不同可靠性的判决结果，因此我们用参数 γ 来表示判决结果的可信程度。那么最后总的判决结果的表达式可表示如下

$$S_dec = f(SU_i_dec, \gamma_i) \quad i = 1, L, n \quad (2)$$

其中 S_dec 表示总的判决结果， SU_i_dec 表示第 i 个感知节点的判决结果， γ_i 表示第 i 个感知节点的判决结果的可信度。

1.2 协作算法及分析

如图 1 所示，在协作检测过程中，信息融合中心需要对各感知节点发送的数据进行融合，如何对各节点的感知结果进行融合处理是一个重要问题，因为融合算法的选择和系统性能有着密切的关系。本文主要研究基于软融合的协作算法。

贝叶斯检测^[12]：它是一种固定协作节点数的检测，需要知道当授权节点存在或者不存在的条件下感知节点的检测概率，即 $P(u_i | H_1)$ 和 $P(u_i | H_0)$ ，而且需要知道授权节点的先验概率，即 $P_0 = P(u_0 = 0)$ 和

$P_1 = P(u_0 = 1)$ 。这里 u_i 表示第 i 个感知节点的判决结果， u_0 表示授权节点的判决结果。由于不同的判决会带来不同的影响，所以要给不同的判决分配不同的代价系数，贝叶斯检测的目标就是最小化一次判决的最小风险，贝叶斯检测方法可表示为：

$$\prod_{i=1}^n \frac{p(u_i | H_1)}{p(u_i | H_0)} > \frac{P_0(C_{10} - C_{00})}{P_1(C_{01} - C_{11})} \quad (3)$$

这里的 C_{ij} 表示判决结果为 H_i 而实际为 H_j 的风险系数， P_j 表示假设为 H_j 的先验概率， j 的取值范围是 0,1。

一般地， u_i 的条件概率由下面两式得到

$$P(u_i | H_1) = \begin{cases} P_{d_i} & , u_i = 1 \\ 1 - P_{d_i} & , u_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$P(u_i | H_0) = \begin{cases} P_{fa_i} & , u_i = 1 \\ 1 - P_{fa_i} & , u_i = 0 \end{cases} \quad (5)$$

该方法是一种固定样本数的检测，也即不管总的判决条件是否达到，都需要所有协作节点发送判决数据，该方法浪费一定的传输资源，而且没有考虑恶意节点存在的情况也即没有考虑节点判决结果的可靠性。

序贯检测^[13]：它是一种非固定样本数（或非固定时间）的检测，事先不确定观测时间而是留在检测过程中确定，它所需要的样本数根据判决门限来确定，如果达到了判决条件就不需要其他节点继续发送感知信息，否则就需要其他节点继续发送信息，直至满足判决条件。序贯检测的统计判决量可表示如下：

$$S_n = \prod_{i=1}^n \frac{P[u_i | H_1]}{P[u_i | H_0]} \quad (6)$$

这里采样数目 n 是一个变量，可以是所有协作节点个数中的任意数。

该方案采用双门限检测方案，目的是得出更准确的判断。在给定虚警概率（授权节点不存在，但检测到存在） P_f 和漏检概率（授权节点存在，但没有检测出来） P_{md} 的条件下，两门限可以分别表示为：

$$\eta_1 = \frac{1 - P_f}{P_{md}}, \eta_0 = \frac{P_f}{1 - P_{md}} \quad (7)$$

具体的判决规则如下：

$$\begin{cases} S_n \geq \eta_1 \Rightarrow \text{判决为 } H_1 \\ S_n \leq \eta_0 \Rightarrow \text{判决为 } H_0 \\ \eta_0 \leq S_n \leq \eta_1 \Rightarrow \text{继续观察} \end{cases}$$

相对于固定样本数检测来说，序贯检测考虑到了总判决条件的满足性，是一种非固定样本数的检测，节省了传输资源，在每个感知节点有比较低的检测性能也能够通过接收更多的本地频谱感知的结果来达到判决所需要的门限，但一般协助的数目比较有限，而且该方法同样没有考虑单个节点判决结果的可靠性。

加权序贯检测^[14]：该方法是在序贯检测的基础上提出的，是一种基于声望值的加权序贯检测方法。该方法的主要思想是首先给每个感知节点分配相同的初始声望值 1，然后每个节点分别执行本地判决并做出相应决策，再根据融合中心的需要，一些感知节点把判决数据发送给融合中心，由融合中心根据一定的融合规则给予不同的感知数据赋予不同的权系数（这些权系数和节点的声望值密切相关），然后通过计算得到最终的判决结果，最后把最终的判决结果和单个节点的判决结果相比较，如果声望值一致就加 1 否则减 1，接着进行下一个周期的检测。

WSPRT 定义的判决变量如下：

$$W_n = \prod_{i=1}^n \left(\frac{P[u_i | H_1]}{P[u_i | H_0]} \right)^{w_i} \quad (8)$$

其中加权的权系数 w_i 是声望 γ_i 的函数，即

$$w_i = f(\gamma_i) \quad (9)$$

具体表达式为：

$$f(\gamma_i) = \begin{cases} 0 & \gamma_i < -g \\ \frac{\gamma_i + g}{\max(\gamma_i) + g} & \gamma_i > -g \end{cases} \quad (10)$$

γ_i 表示第 i 个节点的声望， $-g$ 表示判断一个节点是否是恶意节点的门限。

该算法是一种非固定样本数的检测，提出了一种判断恶意节点的方法，并且考虑到了单个节点判决结

果的可靠性，并通过加权的方法来提高判决的准确度。加权序贯检测的仿真结果表明，使用该算法可以减少恶意节点的影响，提高了系统的检测性能。但该算法的恶意节点判决方法和加权系数的定义都存在着一一定的局限性，下面进行详细的分析。

首先是判定恶意节点的门限选择问题，一方面从公式（10）中我们可以看出判定的门限是固定的，这在实际的通信系统中是不太合理的，比如一个节点进行 100 次感知后，假如有 45 次正确判决，也即正确判决概率是 0.45，但根据文^[14]中恶意节点的定义方法该节点会被判决为恶意节点，实际上该节点还算是比较正常的节点；另一方面很少有恶意节点一直发送错误数据从而使自己的声望值低于该门限，比如有的感知节点参与协作的次数在 g 的范围内，就算它一直发送错误数据，也不会被判决为恶意节点。还有的恶意节点可以根据自身的声望值情况调整自己的发送错误次数，在快达到判定门限值时跳出协作，等下一周期时重新参与协作，分配新的初始声望值，这样就可以使声望值一直维持在门限之上，而系统就会一直认为该节点为正常节点。

其次，从仿真结果来看，该方法需要更多的样本数来进行判决，这点可以从加权系数公式得到验证。这样就会有两点不太合适。一是如果需要更多的样本数就会需要更多的传输信道资源，而且样本数越多，融合处理时间肯定越长，这样检测时间就会越长，这与认知无线电的快速感知意愿相违背；二是在实际的协作过程中，参与协作的节点数目有限，如果有太多的恶意节点进行干扰，融合中心的判决条件就无法达到，这样就会出现错误判决。

2 双门限加权判决方法

2.1 算法思想

鉴于此种情况，本文在加权序贯检测基础上给出了一种改进的基于声望值的双门限加权序贯检测的感知方法，该方法首先根据感知节点的可信程度进行加权，与 WSPRT 的加权方法不同的是本文采用双门限的加权，正确检测概率低于下界的感知节点，判定为恶意节点，然后通过对其数据进行加权变不利为有利，从减缓判决条件满足变为加快判决条件满足，而对于检测概率大于上界的感知节点，通过新的加权来使它的数据在判决过程中占的比例更大，这样就更有利于判决，对于在门限之间的节点由于还不能做出很明确的判断，就做一般的加权。通过后面的仿真结果可以看出，这种改进方法可以更好的提高系统检测性能，而且减少了判决所需的样本数。

其次该方法给出了新的更合理的判定恶意节点的方法。相比传统的加权方法，该方法不是根据声望值来判定恶意节点，而是根据感知节点的正确判决概率来判定，而且融合中心记录每个感知节点的协作历史信息，这样一来，像上面分析加权序贯检测缺点时列举的例子情况就不会出现，这样的判决方法更合理。

通过以上分析，定义新的加权系数如下：

$$f(\gamma_i) = \begin{cases} \frac{\gamma_i}{\max(\gamma_i) - \gamma_i} & N_i / N \leq 0.2 \\ \frac{\gamma_i + g}{\max(\gamma_i) + g} & 0.2 < N_i / N < 0.8 \\ 1 + \frac{\gamma_i + g}{\max(\gamma_i) + g} & N_i / N \geq 0.8 \end{cases} \quad (11)$$

这里的 γ_i 和 g 与上面的意义相同， g 的作用是防止正常节点的加权值出现负值的情况，本文取感知节点声望的初始值为 1，声望值更新的方法和一般的加权方法相同，即如果单个感知节点的判决结果和融合中心的判决结果一致，那么声望值就加 1，否则减 1。 N_i 表示第 i 个节点的正确判决次数， N 表示总的判决次数。这样设置加权系数的原因是：

1) 当节点的正确判决概率小于 0.2 时，节点的检测性能已经很差，可以判定为恶意节点，本文这样取

值是为了更好说明恶意节点的影响，具体的门限值不同也会造成不同的检测性能，由于篇幅有限，本文没有深入讨论门限取值问题。依据本公式恶意节点的定义，当某个节点被判定为恶意节点时，其声望值为负值，其值与最大声望值的相对差值越大，就说明恶意程度就越大，就应该进行更大程度的加权，以减少恶意节点的影响，通过该形式的加权就对前文提到的恶意节点发送的数据进行合理纠正。

2) 当节点的正确判决概率大于 0.8 时，节点的可信度就很高，此时可以进行一个更大程度的加权，使该节点的数据在判决过程中所占到的比例更大，这样更容易使融合中心做出判决，而且使判决条件更快满足，可以减少判决样本数。

3) 当节点的正确判决概率处于这两者之间时，节点的可靠性还有待进一步观察，所以只是进行一般的加权。

2.2 算法流程

基于以上算法的思想，该算法的具体操作流程是：

首先是融合中心选择特定的频率段，根据一定的规则给可能的参与协作的用户分配初始声望值，并记录每个用户的终端信息，以防止前文讲述的情况的出现；

其次单个用户分别进行频谱感知，根据融合中心给出的单用户判决规则分别得到各自的判决结果，并等待融合中心的指令做好向融合中心发送融合数据和判决结果的准备；

然后融合中心分先后顺序（可以根据声望值的大小进行排序）对参与协作的用户发出发送数据的指令，并同时开始进行加权判决，一旦判决条件满足就不再发出指令，否则继续发出，直至所有协作用户都收到指令并发送数据，如果此时判决条件仍然不能得到满足，就判决授权用户不存在，即频谱资源空闲；

接下来对声望值进行更新，融合中心依据总的判决结果和单个用户的判决结果分别进行比较，根据文中的声望更新规则对各用户的声望值进行更新；

再次融合中心计算每个用户的正确判决概率，并依据恶意用户的判决规则进行恶意用户的判断，同时根据用户的声望值和加权公式进行加权系数的更新；

这样就完成了一次频谱感知的过程，接下来开始进行下一个周期的检测，流程同上。

新的方法的检测流程图如图 2 所示。

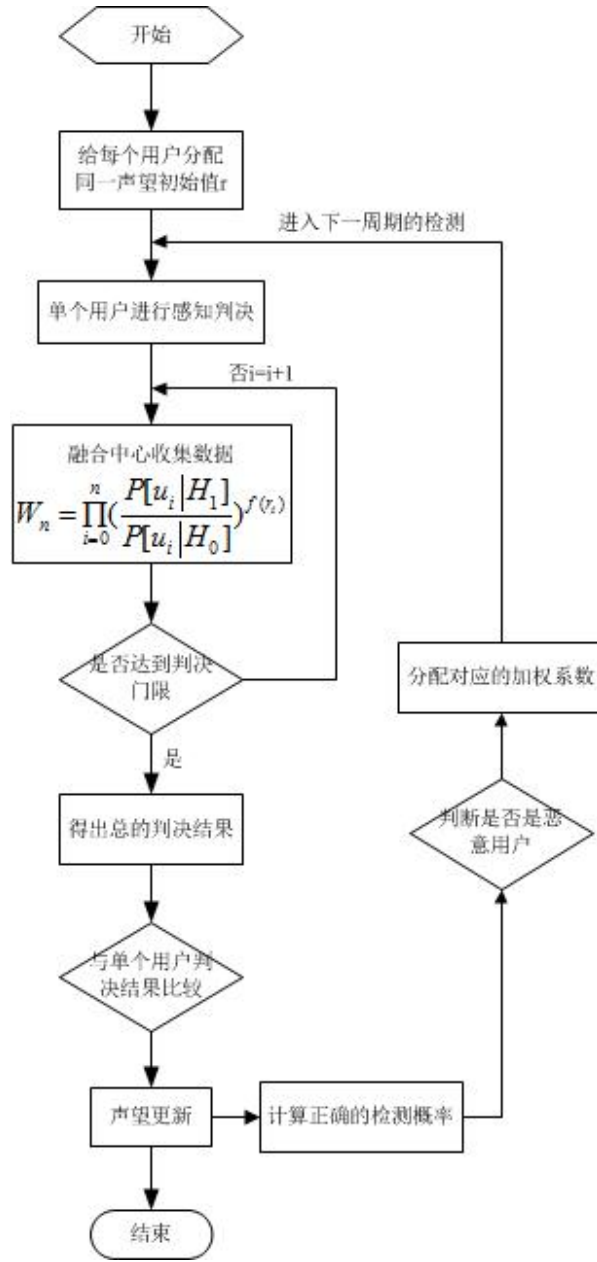


图 2 改进的加权序贯检测流程图

3 性能仿真比较

下面进行性能仿真分析，本文主要对SPRT、贝叶斯方法、WSPRT和本文提出的方法进行比较，我们假设初始阶段给每个节点分配相同的声望值 1，参数 g 的取值为 5，各个节点之间检测是相互独立的，信道衰减系数也是相互独立的，各个节点都能够对授权节点信号进行很好的感知，授权节点出现与否的概率是相同的为 0.5，虚警概率为 0.01，漏检概率为 0.01。对于贝叶斯检测，本文采用与序贯检测相同的门限进行检测，而文^[11]是单独设置的门限，本文这样进行性能比较才更合理。协作的总节点数为 20，进行 1000 次周期检测，恶意节点数目不定，而且本文假设在不存在恶意节点的影响下，系统能够一直进行正确检测。

通过仿真我们可以从图 3 中看出，随着恶意节点数量的增多，SPRT 方法的检测性能越来越差，在恶意节点数量很大时，正确检测概率接近为 0，也就是说恶意节点达到了扰乱总的判决结果的目的，从而实现个人的目的。贝叶斯检测的方法性能也比较差，这是因为该方法直接接收所有节点的数据而不去考虑数据的可信度，而 WSPRT 和 SPRT 相比较明显的提高了检测性能，在恶意节点不是很多的情况下，能够很好地消除恶意节点的影响，但是在协作节点数目一定的情况下，而且恶意节点比较多时，能够进行正确检

测的能力有限,本文中提出的方法采用了新的判决恶意节点的准则,而且利用了恶意节点发送的数据,通过对错误数据进行加权,让恶意节点发送的数据变成有利于判决的数据,更有利于融合中心做出正确的判决,从图中可以看出,本文提出的方法在恶意节点比较多的情况下也能够获得较高的正确检测概率,提高了系统的检测性能。

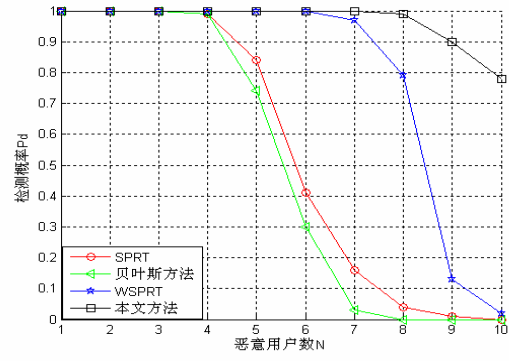


图3 正确检测概率与恶意节点关系图

由于 WSPRT 和本文提出的方法和 SPRT 相比,都是多了加权的步骤,也就是让可信度越高的节点的数据权重系数越大,可信度越低的节点权重系数越小,低到一定程度的节点的数据将不会被采用,以此来减少恶意节点的影响。但是从图4中可以看出,由前文分析可得知由于 WSPRT 加权方法受到加权系数的限制,需要更多的样本数来做出判决。而本文提出的通过利用恶意节点的数据和加大判决准确率高的节点的判决权重方法大大降低了检测所需要的平均样本数。

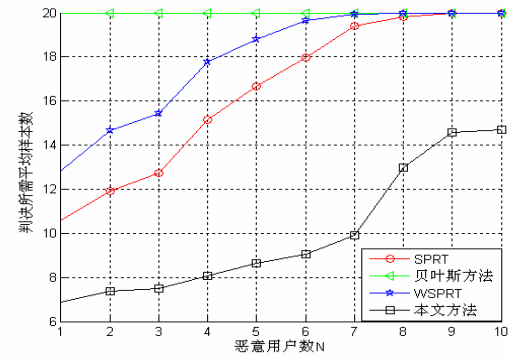


图4 判决所需平均样本数与恶意节点关系图

4 结论

认知无线电是一种智能无线电技术,能够有效的提高有限的频谱资源的利用效率。而频谱感知是认知无线电的关键技术之一,只有在检测的基础上才能更好地使用空闲频谱资源。各种无线传感终端是传感网络的重要组成部分,对智能变电站各种设施进行监测发挥着重要作用,而具有认知功能的传感终端可以更灵活的使用频谱资源,提供可靠的数据传输,减少传输信道的冲突概率,提高专网的频谱资源利用率。本文提出一种改进的基于可信度的加权协作感知方案,和其他的融合方案相比较,该方法不仅能有效的提高正确检测概率,而且能够减少判决所需要的样本数,并且给出了新的判定恶意节点的方法。

参考文献:

[1] 何廷润.物联网发展需以频谱资源有效供给为前提[J].通信世界,2010(3):28-35.

[2] S. Haykin. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications[J].IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 2005,23(2):201-220.

[3] J.Mitola. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications[J].Mobile Networks and Applications,2001,6(5):435-441.

- [4] Ghasemi A, Sousa E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges and design trade-offs[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 32-39.
- [5] D.Cabric, S.M.Mishra and R.W.Brodersen. Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios[C]. In Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers,2004:772-776.
- [6] Sepideh Zarrin and Teng Joon Lim. Composite Hypothesis Testing for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio[C], IEEE International Conference on Communications, 2009:1-5.
- [7] F.F.Digham, M.S.Alouini and M.K.Simon, On the energy detection of unknown signals over fading channels[C]. In Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC'03), 2003:3575-3579.
- [8] Digham F F, Alouini M S, Simon M K. On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels [J], IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(1): 21-24.
- [9] Mishra S M, Sahai A, Brodersen R W. Cooperative sensing among cognitive radios[C], IEEE International Conference on Communication ,2006,4:1658-1663.
- [10] Z. Quan, S. Cui, and A. H. Sayed. Optimal Linear Cooperative for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks[C], IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008,2(1):28-40.
- [11] Liang ,Ying-Chang and Peh,Edward. Optimization for cooperation sensing in cognitive radio network[C], Wireless Communications and Networking Conference,2007.WCNC 2007. 2007:27-32.
- [12] L.Lu, S.-Y.Chang and J.Zhang. Technology Proposal Clarifications for IEEE 802.22 WRAN Systems[J/OL], Mar. 2006, available at: <http://www.ieee802.org/22/>.
- [13] Yeelin Shei and Yu T. Su. A Sequential Test Based Cooperative Spectrum Sensing Scheme for Cognitive Radios[C], IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. 2008: 2204 – 2213.
- [14] Ruiliangchen, Jung-Min Park and Kaigui Bian. Robust Distributed Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks[R], Technical Report TR–ECE-06-06, Dept..of Electrical and Computer Engineering, 2006.

作者简介:

姚继明 (1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 电力通信技术。