

基于能量约束的协作频谱感知算法研究

苏健, 宁国勤, 秦峰

(华中师范大学 信息技术系, 湖北 武汉 430079)

摘要: 为了实现绿色节能认知通信的目标, 针对协作感知和传输过程中的能量消耗问题, 提出了一种基于能量约束的集中式协作频谱感知算法。建立了系统检测寿命最大化的频谱感知模型, 对其进行了详细分析, 给出了检测寿命最大化对应参数的搜索方法。仿真结果显示, 该方法可以在满足检测精度的条件下有效延长认知网络的检测寿命, 并提高低信噪比用户参与协作的几率。

关键词: 认知无线电; 协作频谱感知; 信噪比; 能量消耗; 检测寿命

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 10004-436X(2012)Z2-0256-06

Research on a cooperative spectrum sensing algorithm based on energy-constraint

SU Jian, NING Guo-qin, QING Feng

(Department of information technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: With the aim of the realization of green energy-efficient cognitive communications, the energy consumption was mainly analyzed in the process of cooperative sensing and transmission, and an energy-efficient centralized cooperative spectrum sensing scheme was proposed. The spectrum sensing model of maximizing the detection lifetime of cognitive radio system was established and specified in detail. Furthermore, a searching method was presented to obtain the optimal detection lifetime and corresponding parameters. Simulation results reveal that the proposed scheme is able to extend detection lifetime and improve the probability of performing cooperative sensing for CR users with low SNR.

Key words: cognitive radio; cooperative spectrum sensing; energy consumption; detection lifetime

1 引言

随着无线通信技术的快速发展, 各种无线通信设备和系统不断涌现, 使得频谱资源变得日益匮乏。与此同时, 许多授权频谱的利用效率并不高^[1]。认知无线电被认为是一种可以解决频谱稀缺和频率效率问题的技术^[2,3]。在认知无线电领域中, 协作频谱感知^[4-7]是一项非常重要的研究内容, 它可以很好地解决隐藏终端问题, 并大大提高感知结果的准确性。然而, 协作感知也面临一些问题, 例如, 每次协作感知都涉及多个感知节点的参与, 总的资源

开销会比非协作感知要高, 这是不符合绿色通信要求的。其次, 每个节点的能量是有限的, 因此不可能要求它们一直参与协作。许多研究者就协作感知中的节能问题做出了一系列相关研究, 文献[4,8]在保证感知结果可靠性的前提下, 针对如何选择感知节点数目以降低资源开销的问题展开了研究。然而, Chen 在协作频谱感知算法中仅给出了目标函数^[4], 并没有提出具体的协作感知算法。而 Zhang 等人仅考虑了所有节点的检测概率和虚警概率都相同的情况^[8], 这个假设过于理想, 很难应用于实际。文献[9]在满足协作检测概率门限的条件下, 通过优化感知时间和

收稿日期: 2012-07-25

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目 (2011CDB164)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Hubei Province (2011CDB164)

节点数量来选择信噪比高的节点参与协作，目标是 minimized 能量消耗，从而使节能问题得到了一定的改善。文献[10]提出了一种时分节能的感知算法，将感知时间分成许多时隙，每个时隙去感知不同的信道，这样可以减少系统的能量消耗，但是时隙太多会导致每次感知时间减少而无法有效完成检测。另外，文献[9,10]都没有考虑单个节点的能量受限问题，也不太适用于节点信噪比都很低的情况。

因此，本文针对协作感知中多节点的能量消耗和 CR 网络的检测寿命问题，提出了一种基于能量约束的协作频谱感知方法。与文献[9,10]不同的是，在考虑能量约束和检测概率等条件情况下，通过让高、低信噪比用户联合参与协作感知，增加低信噪比用户参与协作的次数，避免了高信噪比用户能量的持续消耗，从而能够延长整个网络的检测寿命。

2 系统模型

2.1 系统网络结构

如图 1 所示，假定整个 CR 网络包含 N 个感知节点和一个数据融合中心。此外，系统中还有一个主用户 (PU, primary user)。认知用户 (或称为次用户(SU, secondary users)) 随机分布在 PU 发射机的覆盖范围内。本文中的信道模型采用自由空间传播模型。

不失一般性，将网络分成 S 个协作感知组，每组包含 M 个感知节点，其中 $1 \leq M \leq N$ ，不同组包含的节点数可能不同。 γ_i 为节点 i 接收到的 PU 信号的信噪比，信噪比大小取决于每个节点周围的无

线通信环境。在实际的协作感知中，每个 SU 的感知周期 T 都可以分为 2 个部分 T_s 和 T_t ， $T_s=T-T_t$ ，其中 T_s 为感知持续时间， T_t 为数据传输时间。

2.2 频谱检测方法

本文中 SU 采用能量检测方法进行频谱检测，用 σ_i^2 表示第 i 个 SU 接收到的 PU 信号功率， σ_n^2 表示噪声方差。由 SU 和 PU 之间的距离可知， SU_i 的接收功率为^[12]

$$\sigma_i^2 = \frac{P_{pu}}{d_i^\alpha} \tag{1}$$

其中， P_{pu} 为 PU 发射功率， d_i 为 SU_i 和 PU 之间的距离， α 为路径损耗参数，由此，可以计算出 SU_i 的信噪比为 $\gamma_i = 10 \lg(\sigma_i^2 / \sigma_n^2)$ ，那么 SU_i 的单点检测概率和虚警概率可以由高斯 Q 函数分别表示为

$$\begin{cases} P_{di} = Q\left(\frac{\lambda - 2T_s W (\gamma_i + 1) \sigma_n^2}{2\sqrt{T_s W (\gamma_i + 1) \sigma_n^2}}\right) \\ P_{fi} = Q\left(\frac{\lambda - 2T_s W \sigma_n^2}{2\sqrt{T_s W \sigma_n^2}}\right) \end{cases} \tag{2}$$

其中， W 为信道带宽， λ 为能量检测的判决门限值，

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

2.3 数据融合方式

数据融合中心和各个 SU 之间通过公共控制信道进行信息交互，交互的信息包括各 SU 的本地感知信息，数据融合中心的判决结果以及其它控制信息。

为了减少开销，将采用硬判决融合中的“OR-准则”^[9,10]。每个协作感知组的检测概率和虚警概

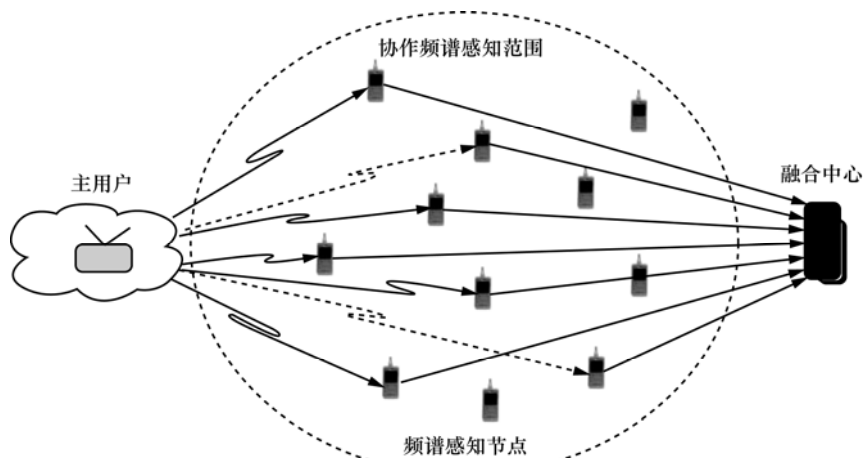


图 1 协作感知模型

率可以通过参与本组协作的 SU 检测概率和虚警概率求得：

$$\begin{cases} Q_d = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{di}) \\ Q_f = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{fi}) \end{cases} \quad (3)$$

其中， M 为每组包含的 SU 数量。当 M 增加时， Q_d 会增加，PU 被检测到的准确度会提高。与此同时， M 的增加会导致 Q_f 增大，这样可用频谱的丢失机率也会增加。另外， M 的增大会导致协作感知组的总能量消耗增大，因此 M 是一个重要的折中参数。本文采用恒虚警概率方法，给融合中心设置一个期望虚警概率值 PF_t ，然后求出单个节点的虚警概率 P_{fi} ，根据 P_{fi} 求出判决门限 λ ，最后再根据判决门限和信噪比求出 P_{di} 并计算出最后的 Q_d 。

3 基于能量约束的协作感知算法

3.1 节点能量消耗

众所周知，每个 SU 在感知过程中都会消耗能量。为了简单方便地描述能量消耗问题，定义 P_{tx} 为每个 SU 的发送功率， P_{rx} 为接收功率， E_{sc} 为 SU 每参与一次协作感知所消耗的能量， E_{tc} 为 SU 在每次数据传输过程中所消耗的能量。假设第 i 个 SU 的初始能量为 E_i^{INT} ，第 m 次参与协作后的剩余能量 $E_i^{REM}(m)$ ， E_{sc} 、 E_{tc} 和 E_i^{REM} 可以表示为

$$\begin{cases} E_{sc} = P_{rx} T_s \\ E_{tc} = P_{tx} T_t \\ E_i^{REM}(m) = E_i^{REM}(m-1) - (E_{sc} + E_{tc}), m \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中， m 为 SU_i 参与协作检测的次数， $E_i^{REM}(0) = E_i^{INT}$ 。若整个网络中的 SU 共执行了 n 次协作检测，则可以用 nT_s 来表示整个网络的检测寿命 T_{life} 。为了有效延长网络的检测寿命，不能要求高信噪比 SU 一直参与协作检测，因为每个 SU 的能量都是受限的，频繁地参与协作检测会使得高信噪比节点的能量消耗过快。但是，如果让高信噪比和低信噪比用户联合参与协作，就有可能延长检测寿命。例如，3 个高信噪比用户完成一次协作需要消耗 3 个节点的能量，如果能让这 3 个高信噪比节点分别去和那些信噪比相对较低的节点进行协作，那么检测寿命就有可能延长 3 倍。同时，那些低信噪比节点参与协作感知的机会也会增加，使得原本没有什么机会

参与协作感知的低信噪比节点参与协作的机会增加，在某种程度上保证了参与协作的公平性，尽量让每个节点都为频谱检测做出自己的贡献。

3.2 协作算法

为了更好地解决上文提出的检测寿命问题，可以增加系统中协作感知组的数量，同时尽可能保证每个协作感知组能够有效地进行频谱检测，因此给融合中心设置一个较高的目标检测概率值，当每组的协作检测概率大于这一目标值时，认为此组能够有效地进行协作检测。分组的原则是，让高信噪比用户和信噪比相对较低的用户联合起来进行协作感知，增加低信噪比用户的感知次数，从而有效延长整个系统的检测寿命，即让本地检测概率高的用户和检测概率相对低的用户进行协作，避免检测概率高的用户都分配到同一协作组，以免造成其他组的协作检测概率低于门限值而无法完成检测。将问题归纳如下。

$$\begin{aligned} & \max : T_{life} \\ & \text{subject to:} \\ & c_1 : \overline{P_{dN}} - P_{de} \leq \overline{P_{dM}} \leq \overline{P_{dN}} + P_{de} \\ & c_2 : E_i^{REM} > E_\lambda = E_{sc} + E_{tc}, i = 1, \dots, N \\ & c_3 : Q_d = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{di}) > PD_t \\ & c_4 : Q_f = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{fi}) > PF_t \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $\overline{P_{dN}}$ 表示 N 个 SU 的本地检测概率平均值， $\overline{P_{dM}}$ 表示协作感知组中 M 个 SU 的本地检测概率平均值， P_{de} 为检测概率裕量。 c_1 用来约束每个协作感知组的本地平均检测概率，避免让高信噪比用户都集中在同一个分组中。 c_2 用来约束各个 SU 的剩余能量，当节点剩余能量低于阈值 E_λ 时，将不能继续参与协作检测，可以认为该节点已经处于断电状态。 c_3 、 c_4 用来确保协作感知的检测精度。对于问题(5)可以采用搜索的方法，通过动态调整 c_1 的约束范围，比较最后求出的 T_{life} ，最大的值即为它的次优解。

基于前面的分析，协作感知算法流程如图 2 所示。具体算法的步骤如下。

S0: 初始化 N 个感知节点并编号，设置标志位向量 $FLAG=[0;0;\dots;0]$ ，标志位向量中的每个元素分别对应各个节点的状态，其中 0 表示本轮没有参与协作，1 表示本轮参与了协作。记录每个节点的信息，包括初始能量值 E_i^{INT} 、信噪比 γ_i 和检测概率

P_{di} , 此时 $P_{de}=P_{de}(0)$, $M=M(0)$, $E_i^{REM}(0) = E_i^{INIT}$, 其中 $P_{de}(0)$, $M(0)$ 和 $E_i^{REM}(0)$ 分别为检测概率裕量初值, M 初值和剩余能量初值。

S1: 从 N 个 SU 中筛选出剩余能量高于门限 E_λ 的节点, 统计节点数 N_1 , 如果 $N_1 > M$, 则继续下一步, 否则跳到 S4。

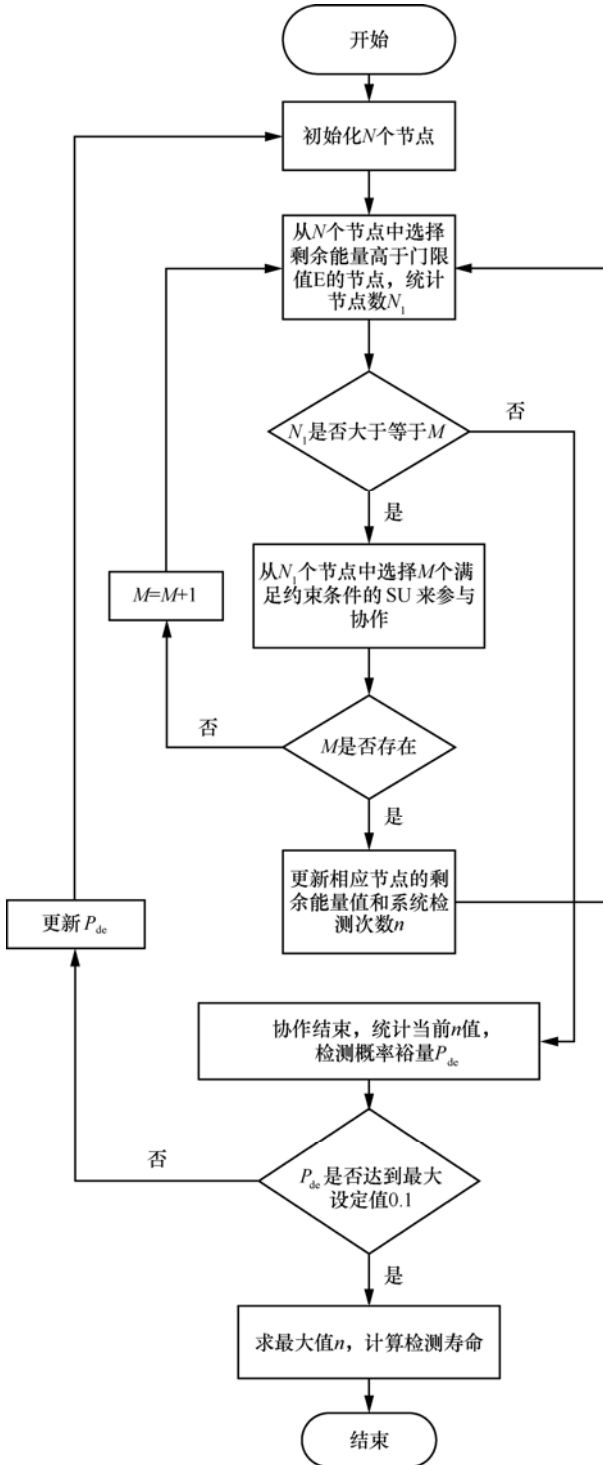


图 2 协作流程

S2: 从 N_1 个节点中选择 M 个满足 $Q_d = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{di}) > PD_t$ 和 $\overline{P_{dn}} - P_{de} \leq \overline{P_{dm}} \leq \overline{P_{dn}} + P_{de}$ 条件的 SU, 如果这样的 M 存在, 则将标志位向量 FLAG 中对应元素置 1, 并继续下一步, 否则 $M=M+1$ 并跳转到 S1。

S3: 检测标志位向量中的 1 元素, 更新对应节点的剩余能量值和系统检测次数 n : $E_i^{REM} = E_i^{REM} - (E_{sc} + E_{ic})$, $n=n+1$, 清零标志位向量 FLAG 并跳转到 S1; 若标志位向量中不存在 1 元素, 则继续下一步。

S4: 此时协作完成, 记录当前 n 值并判断检测概率裕量, 若 $P_{de} < 0.1$, 则 $P_{de}(0) = P_{de} + 0.005$, $n=0$, 并返回 S0, 否则进行下一步。

S5: 比较所有检测概率裕量下的 n 值, 找出最大的那个 n , 并计算检测寿命 T_{life} 。

4 仿真实验

为了验证本文提出的基于能量约束的协作频谱感知算法的性能, 将与文献[9]中的协作方法进行对比。假设 CR 网络中存在的 SU 为 $N=12$, 噪声方差 $\sigma_{ni}^2=1$, 每个 SU 的发射功率 $P_{tx}=1.5W$, 接收功率 $P_{rx}=1W$, 感知周期 $T=100ms$, 其中感知持续时间 $T_s=10ms$, 信道带宽 $W=100kHz$, 检测概率和虚警概率门限分别为 $PD_t=0.95$, $PF_t=0.1$ 。各个 SU 的信噪比随机分布在 $-16dB$ 到 $-8dB$ 范围内。整个 CR 网络的总能量从 $0.3J$ 到 $12J$, 它们平均分配在 12 个 CR 用户上。性能比较时, 将文献[9]中的协作方法称为方法 1, 其原理是融合中心总是选择信噪比高的节点去参与协作检测, 本文提出的方法称为方法 2。

图 3 比较了不同协作感知方法下的系统检测寿命, 横轴表示 CR 网络的总能量。从图 3 中可以看出, 2 种方法的检测寿命和系统的总能量密切相关的, 能量越大检测寿命越长。但重要的是, 采用本文提出方法 2 时, 检测寿命比方法 1 延长了近一倍, 特别是当高信噪比节点能量较低, 同时低信噪比节点能量较高时, 方法 2 的性能将更显著。这是由于在方法 1 中, 融合中心总是选择信噪比高的节点去参与协作检测, 过分追求高协作检测概率, 忽略了低信噪比节点的作用, 导致那些高信噪比节点的能量消耗很快, 因此它们不可能更好的去维持整个系统的检测寿命。然而, 在本文提出的方法 2 中, 高

信噪比用户将分布在不同的协作组，避免了协作检测时同时消耗高信噪比用户的能量，从而有效地延长了系统的检测寿命。

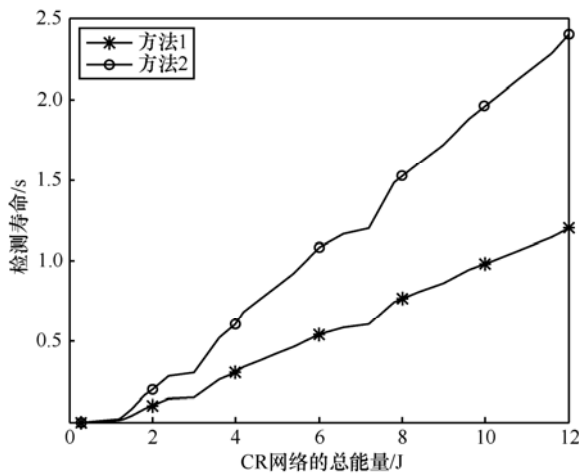


图 3 不同方法下检测寿命的比较

图 4 反应了不同信噪比节点参与协作感知的机会，横坐标表示网络中 SU 的信噪比由小到大排列。可以看出，在方法 2 中那些信噪比低于 -11dB 的 SU 参与协作的机率大大的提高了，与此同时，原本信噪比高于 -11dB 的 SU 参与协作的几率有所降低，这正是由于减少了这些高信噪比 SU 参与协作感知的次数，避免持续集中的消耗高信噪比 SU 的能量，让它们与低信噪比用户联合参与感知，将低信噪比 SU 充分利用起来，从而延长了整个认知无线网络的检测寿命。

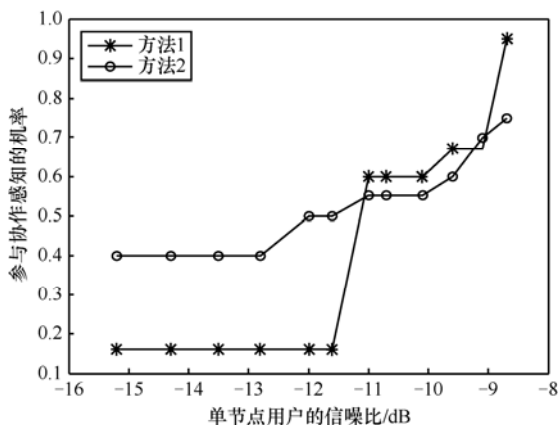


图 4 比较不同信噪比用户参与协作的概率

表 1 比较了当整个 CR 网络分成 4 组协作感知组，每组 3 个节点时，采用方法 1 和方法 2 进行协作时的检测性能。方法 1 按照信噪比大小顺序进行分组，方法 2 按照 c_1 的约束条件进行分组，此时检

测概率裕量取值为 0.05。从表 1 中可以看出，方法 1 中每组的平均信噪比分布在 -14.47dB 到 -10.67dB 之间，只有 2 组协作检测概率大于 0.95，这意味着整个系统只有 2 组协作感知组可以有效完成检测。在方法 2 中，每组的平均信噪比都集中在 -12.5dB 左右，4 组协作感知组均能有效完成检测。同时，方法 2 中的平均检测概率也要高于方法 1 中的平均检测概率。

表 1 2 种方法下的协作检测性能对比

分组号	方法 1		分组号	方法 2	
	每组平均信噪比 (dB)	每组协作检测概率		每组平均信噪比 (dB)	每组协作检测概率
1	-14.47	0.835	1	-12.73	0.970
2	-13.06	0.937	2	-12.57	0.969
3	-11.93	0.985	3	-12.53	0.991
4	-10.67	0.999	4	-12.3	0.986

5 结束语

通过对多认知节点协作检测算法的分析，提出了一种基于能量约束的协作频谱感知算法。该算法考虑了每个节点的能量消耗，将剩余能量和信噪比作为选择节点的参数，选取高信噪比和低信噪比的节点进行动态协作感知，剩余能量高的节点将具有比较高的协作机会，从而延长整个 CR 网络的检测寿命。仿真结果表明，提出的协作频谱感知算法能够有效延长 CR 网络的检测寿命，同时提高了低信噪比节点参与协作的概率。

参考文献:

- [1] Federal Communications Commission Spectrum Policy Task Report[R]. ET Docket N0.02-135, Washington, DC:FCC, 2002.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [3] JOVICIC A, VISWANATH P. Cognitive radio: an information-theoretic perspective[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(9): 3945-3958.
- [4] CHEN Y F. Optimum number of secondary users in collaborative spectrum sensing considering resources usage efficiency[J]. IEEE Communication Letters, 2008, 12(12): 877-879.
- [5] SHEN J Y, JIANG T, LIU S Y. Maximum channel throughput via cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12): 5166-5175.

- [6] FAN R, JIANG H. Optimal multi-channel cooperative sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(3): 1128-1138.
- [7] SUN X X, ZHANG T Y, TSANG D H K. Optimal energy-efficient cooperative sensing scheduling for cognitive radio networks with QoS guarantee[A]. IEEE IWCMC[C]. Limassol, Cyprus, 2011. 1825-1830.
- [8] ZHANG W, MALLIK R K, BEN L K. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks[A]. IEEE ICC[C]. New York, USA, 2008.3411-3415.
- [9] PHAM H N, ZHANG Y, ENGELSTAD P, *et al.* Energy minimization approach for optimal cooperative spectrum sensing in sensor-aided cognitive radio networks[A]. IEEE WiCON[C]. Singapore, 2010. 1-9.
- [10] LIU Y, YU R, XIE S L, *et al.* Efficient spectrum discovery with energy constraints in cognitive radio networks[A]. IEEE ICC[C]. Kyoto, Japan, 2011.1-6.
- [11] DIGHAM F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[A]. IEEE ICC[C]. Anchorage Alaska, USA, 2003.3575-3579.
- [12] LIANG E P, CHAN Y. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks[A]. IEEE WCNC[C]. Hong Kong, China, 2007. 27-32.

作者简介:



苏健(1983-), 男, 湖北荆州人, 华中师范大学硕士生, 主要研究方向为认知无线网络和传感网络协作技术、无线射频识别技术。



宁国勤(1975-), 男, 湖北孝昌人, 博士, 华中师范大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为认知无线电关键技术、无线资源管理技术。



秦峰(1984-), 男, 湖北孝感人, 华中师范大学硕士生, 主要研究方向为认知无线电关键技术。