

一种面向中继协作频谱感知系统的自适应全局最优化算法

张茜 刘光斌 余志勇 郭金库

An adaptive global optimization algorithm of cooperative spectrum sensing with relay

Zhang Qian Liu Guang-Bin Yu Zhi-Yong Guo Jin-Ku

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 018404 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.018404

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018404>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地月平动点导航星座的概要设计与性能分析

Outline design and performance analysis of navigation constellation near earth-moon libration point

物理学报.2014, 63(24): 248402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248402>

Kalman 滤波辅助的室内伪卫星相对定位算法

Indoor pseudolite relative localization algorithm with kalman filter

物理学报.2014, 63(22): 228402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228402>

用于随机解调器压缩采样的重构判定方法

Reconstruction verification for random demodulator based compressed sampling

物理学报.2014, 63(22): 228401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228401>

基于中国余数定理的欠采样下余弦信号的频率估计

Frequency estimation of undersampled sinusoidal signal based on chinese remainder theorem

物理学报.2014, 63(19): 198403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198403>

基于混沌序列和 RIPless 理论的循环压缩测量矩阵的构造

Construction of a circulant compressive measurement matrix based on chaotic sequence and RIPless theory

物理学报.2014, 63(19): 198402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198402>

一种面向中继协作频谱感知系统的自适应全局最优化算法*

张茜[†] 刘光斌 余志勇 郭金库

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

(2014年7月2日收到; 2014年9月27日收到修改稿)

该文研究了冗余中继, 次用户及中继用户数目, 检测门限, 信道传输错误率等因素对中继协作频谱感知系统性能的影响, 并提出一种新的自适应全局最优化算法. 该算法基于获得最大无干扰功率的自适应中继选择方法, 确定备选认知中继集合; 单个次用户以信道传输错误率最小为准则, 从备选认知中继集合中自适应选择最佳中继, 使总体检测率最大; 在给定目标检测率的条件下, 以系统吞吐量最大为准则, 给出了自适应全局最优化算法. 仿真实验结果表明新算法信道传输精度高, 信道吞吐量大, 节约带宽资源.

关键词: 频谱感知, 中继协作, 自适应, 全局最优

PACS: 84.40.Ua, 95.85.bh, 07.05.Hd, 07.50.Qx

DOI: 10.7498/aps.64.018404

1 引言

认知无线电技术是提高频谱利用率的新兴技术^[1-4], 近期关于认知无线电中协作频谱感知技术的研究, 主要集中在采用合理中继选择方案以获得较高的分集增益从而对抗无线信道衰落^[5-11]. 文献[5]研究指出利用中继协作技术可以有效抵抗无线信道衰落, 提高认知无线网络的分集增益; 文献[6]进一步研究了认知无线网络中的中继协作协议, 利用中继协作优化感知时间, 增强次用户的接收信号强度, 提高无线网络感知性能; 文献[7, 8]指出虽然中继协作技术可以有效地抵抗信道衰落, 但其缺点是需占用较多的系统资源, 并且加大了对主用户的干扰; 文献[10]研究表明使用最佳中继选择方案的协作分集方案可以实现与多中继协作方案相同的分集复用增益; 文献[11]研究了参与感知的次用户数量对信道吞吐量的影响, 并提出了相关优化算法, 但并未深入讨论不同的中继选择方

案对吞吐量的影响.

可见, 目前中继协作频谱感知中有关最佳中继选择的研究取得了巨大的成果, 但是还存在仅考虑报告信道的传输条件并将其作为最佳中继选择的评价指标, 缺乏对冗余中继干扰, 信道吞吐量, 开机次用户和中继用户数目, 最大无干扰传输功率^[12]等系统资源因素的综合考虑. 综合考虑上述因素, 通过基于最大无干扰功率的自适应中继取舍方法, 确定备选认知中继集合, 在不影响主用户正常通信的前提下, 节约系统开销, 避免不必要的资源浪费; 单个次用户以信道传输错误率最小为准则, 得到局部检测率最大的中继选择方案; 在给定目标检测率的条件下, 优化给定方案的检测门限; 利用排列组合方法, 以系统吞吐量最大为目标, 得到全局最佳的中继选择方案, 提高了系统信道吞吐量, 并确保系统所有次用户在要求的错误传输概率内工作, 最终达到提高协作频谱感知网络系统全局的信道传输精度, 信道吞吐量等感知性能, 并且节约带宽资源的效果.

* 国家自然科学基金(青年科学基金)(批准号: 61201120)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: snmeg@163.com

2 信号传输模型和检测性能数学模型

2.1 信号传输模型

为了节省硬件资源,最大限度的保护主用户,中继,融合中心选择系统中其他次用户,融合中心单独设置,各节点采用OFDMA方式进行数据传输^[10],调制方式为BPSK.系统信号传输过程见图1:首先如箭头“ $\cdots \rightarrow$ ”,表示次用户 $CU_1, CU_2, \dots, CU_N$ 接受授权主用户LU发送的频谱数据信号,并进行初步处理;接着如箭头“ $\rightarrow$ ”,表示次用户 $CU_1, CU_2, \dots, CU_N$ 将初步处理的信号,采取通过自身直接发给融合中心FC,或者自身直接发给融合中心FC的同时也发给中继两种方式发送数据;最后如箭头“ $\dashrightarrow$ ”,各中继将初步处理的信号传输至融合中心FC.

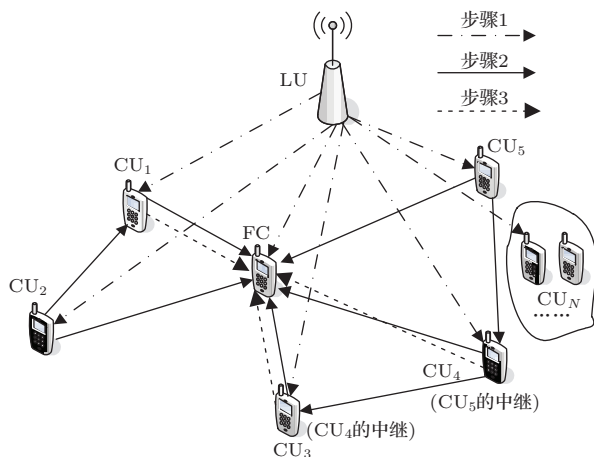


图1 中继协作频谱感知系统

2.2 检测性能数学模型

考虑如图1所示 N 个独立次用户,其覆盖范围远远小于其与主用户之间的距离.第 i 个CU检测器在时刻 t 上接收到的信号 $x_i(t)$ 可描述为

$$x_i(t) = \begin{cases} n_i(t), & H_0, \\ h_i s(t) + n_i(t), & H_1, \end{cases} \quad (1)$$

其中, H_0 表示信道空闲, H_1 表示信道被占用, $n_i(t)$ 是加性高斯白噪声, $s(t)$ 为LU发射信号, $h_i(t)$ 为感知信道增益.

能量检测法^[13]通过计算观测时间内信号的能量,然后将其与一个给定的门限参数 λ_i 进行比较,从而判断主用户是否存在,观测统计量为:

$Y_i = \frac{1}{M_i} \sum_{t=1}^{t=M} x_i^2(t)$, M_i 表示观测时间窗内的取样个数,通常取 $M_i = 2u_i = 2\tau_{Si}W_i$, W_i 表示观测频段的带宽, τ_{Si} 称为观测时间, u_i 为时间带宽积.

在高斯白噪声,平均信噪比 $\bar{\gamma}_i$ 的瑞利衰落信道环境,能量检测算法的观测统计量在 H_0 和 H_1 两种情况下,分别满足自由度为 $2u_i$ 的中心卡方分布和非中心卡方分布^[10].这样第 i 个CU的虚警率 p_{fi} ,漏检率 p_{mi} ,检测率 p_{di} 可以计算如下:

$$\begin{aligned} p_{fi} &= \bar{p}_{fi} = \hat{p}_{fi} \\ &= 1 - \frac{1}{\Gamma(u_i)} \int_0^{\lambda_i/2} e^{-t} t^{u_i-1} dt, \end{aligned} \quad (2)$$

$\Gamma(\cdot)$ 是伽玛函数,

$$\begin{aligned} p_{di} &= e^{-\lambda_i} \sum_{n=0}^{u_i-2} \frac{1}{n!} (\lambda_i/2)^n + ((1+\bar{\gamma}_i)/\bar{\gamma}_i)^{u_i-1} \\ &\times \left[e^{-\lambda_i/2} \sum_{n=0}^{u_i-2} \frac{1}{n!} (\lambda_i \bar{\gamma}_i/2(1+\bar{\gamma}_i))^n - e^{-\lambda_i/2(1+\bar{\gamma}_i)} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

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

在实际的场景中,要求 $p_{fi}, p_{mi} \in (0, 0.5)$, $p_{di} \in (0.5, 1)$.

则单个用户CU通过中继转发或者直接发送到融合中心的虚警率 $\mathcal{P}_{fi}$,检测率 $\mathcal{P}_{di}$,漏检率 $\mathcal{P}_{mi}$ 模型为

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{fi} &= \Pr(H_1|H_0) \\ &= p_{fi}(1 - p_{Ei}) + (1 - p_{fi})p_{Ei}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{di} &= \Pr(H_1|H_1) \\ &= p_{di}(1 - p_{Ei}) + (1 - p_{di})p_{Ei}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{mi} &= \Pr(H_0|H_1) \\ &= p_{mi}(1 - p_{Ei}) + (1 - p_{mi})p_{Ei}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, p_{Ei} 为结合阶跃函数,次用户CU将感知数据通过中继转发或者直接发送到融合中心时的错误概率,详细计算如(26)式, $p_{Ei} \in (0, 0.5)$.

数据融合中心FC对收到的全部判决信号采用“或”准则进行最终信息融合,并给出最终的决策值 Θ_1 (观察频带占用)和 Θ_0 (观察频带空闲),可以得到总的虚警率 Q_f ,检测率 Q_d ,漏检率 Q_m 为

$$\begin{aligned} Q_f &= \Pr\{\Theta_1|H_0\} \\ &= 1 - (1 - \mathcal{P}_{f1})(1 - \mathcal{P}_{f2}) \cdots \end{aligned}$$

$$\times (1 - \mathcal{P}_{fi}) \cdots (1 - \mathcal{P}_{fN}), \quad (8)$$

$$Q_d = \Pr\{\Theta_1|H_1\} \\ = 1 - \mathcal{P}_{m1}\mathcal{P}_{m2} \cdots \mathcal{P}_{mi} \cdots \mathcal{P}_{mN}, \quad (9)$$

$$Q_m = \Pr\{\Theta_0|H_1\} \\ = 1 - \mathcal{P}_{d1}\mathcal{P}_{d2} \cdots \mathcal{P}_{di} \cdots \mathcal{P}_{dN}. \quad (10)$$

对于(2)—(10)式, 不加证明的给出以下结论:

结论 1 $p_{fi}(\lambda)$ 和 $p_{di}(\lambda)$ 是 λ 的减函数; $\mathcal{P}_{fi}(p_{fi}, p_{Ei})$ 是 p_{fi} , p_{Ei} 的增函数; $\mathcal{P}_{di}(p_{di}, p_{Ei})$ 是 p_{di} 的增函数, 是 p_{Ei} 的减函数; $Q_f(\mathcal{P}_{f1}, \mathcal{P}_{f2} \cdots \mathcal{P}_{fN})$ 和 $Q_d(\mathcal{P}_{d1}, \mathcal{P}_{d2} \cdots \mathcal{P}_{dN})$ 分别是 $\mathcal{P}_{f1}, \mathcal{P}_{f2}, \cdots, \mathcal{P}_{fN}, \mathcal{P}_{d1}, \mathcal{P}_{d2}, \cdots, \mathcal{P}_{dN}$ 的增函数.

3 自适应全局最优化算法原理与实现

3.1 基于获得最大无干扰功率的备选认知中继选择方案

令 $G \in \{0, 1\}$ 表示主用户的实际接入频谱状态, 0 表示主用户未接入授权频谱(非活跃态), 1 表示主用户接入授权频谱(活跃态), 使用概率 Q_p 表示主用户处于活跃态的概率, 记作 $Q_p = \Pr\{G = 1\}$. 这样第 i 个次用户 CU_i 检测到空闲频谱的概率为

$$Q_{vi} = Q_{ri} + Q_{wi} = (1 - p_{fi}) \\ \times (1 - Q_p) + (1 - p_{di}) \times Q_p, \quad (11)$$

其中, Q_{ri} 和 Q_{wi} 分别是第 i 个次用户 CU_i 判定结果为空闲频谱时, 该结果是正确和错误的判定结果的概率.

所以, 第 i 个次用户 CU_i 决定接入当前空闲频谱, 对主用户的干扰概率为

$$Q_{inti} = Q_{wi}/Q_{vi} \\ = \frac{(1 - p_{di}) \times Q_p}{(1 - p_{fi}) \times (1 - Q_p) + (1 - p_{di}) \times Q_p}. \quad (12)$$

另一方面, 如果利用 h_{LU-CU_i} 表示主用户 LU 到第 i 个次用户 CU_i 的瞬时信道增益, 由于授权主用户 LU 到第 i 个次用户 CU_i 的信道功率增益 $|h_{LU-CU_i}|^2$ 服从指数分布, 所以, 信道功率增益的均值为^[14]

$$|\bar{h}_{LU-CU_i}|^2 = d_{LU-CU_i}^{-a}, \quad (13)$$

其中, a 是授权主用户 LU 到第 i 个次用户 CU_i 的路径损耗指数, d_{LU-CU_i} 是主用户 LU 到第 i 个次用户 CU_i 之间的距离.

所以, 为了避免第 i 个次用户 CU_i 对主用户的干扰, 次用户最大无干扰功率限 $P_{door-CU_i}$ 为^[15]

$$P_{door-CU_i} = \frac{I_{th}}{|\bar{h}_{LU-CU_i}|^2 Q_{inti}}, \quad (14)$$

其中, I_{th} 是主用户 LU 的干扰温度门限.

则次用户 CU_i 的发射功率 P_{CU_i} 应该不大于其对应的最大无干扰功率限, 表示如下:

$$P_{CU_i} \leq P_{door-CU_i} = \frac{I_{th}}{|\bar{h}_{LU-CU_i}|^2 Q_{inti}}. \quad (15)$$

次用户 CU_i 将初步处理的主用户 LU 发送的频谱数据信号, 通过自身直接发给融合中心 FC, 次用户 CU_i 广播其检测结果信号为 x_{CU_i} , 发射功率为 P_{CU_i} , h_{CU_i-CU} 为第 i 个次用户 CU_i 到融合中心 FC 的信道功率增益系数, n_{CU_i} 是次用户 CU_i 到融合中心 FC 信道上的加性高斯白噪声, 且其均值为 0, 方差为 N_0 .

则融合中心 FC 收集到的信号和平均信噪比可表示为

$$y_{CF-CU_i} = \sqrt{P_{CU_i}} h_{CU_i-CU} x_{CU_i} + n_{CU_i}, \quad (16)$$

$$\text{SINF}_{CF} = \frac{P_{CU_i} |h_{CU_i-CU}|^2 |x_{CU_i}|^2}{N_0} = \Gamma_{CF}^i. \quad (17)$$

错误传输概率 p_{E-CF}^i 按下式计算^[16]:

$$p_{E-CF}^i = \frac{1}{2} \int_{\lambda_{FC}^i}^{\infty} p(\lambda, \text{SINF}_{CF}) \text{erfc}(\sqrt{\lambda}) d\lambda \\ = \frac{1}{2} \int_{\lambda_{FC}^i}^{\infty} p(\lambda, \frac{P_{CU_i} |h_{CU_i-CU}|^2 |x_{CU_i}|^2}{N_0}) \\ \times \text{erfc}(\sqrt{\lambda}) d\lambda, \quad (18)$$

其中 λ_{FC}^i 为融合中心 FC 解码的判决门限, Γ_{CF}^i 为平均信噪比, $p(\lambda, \Gamma_{CF}^i)$ 为信道信噪比概率密度函数, 一般为指数函数: $p(\lambda, \Gamma_{CF}^i) = \frac{1}{\Gamma_{CF}^i} e^{-\lambda/\Gamma_{CF}^i}$.

(18) 式给出了次用户 CU_i 错误传输概率 p_{E-CF}^i 和发射功率 P_{CU_i} 的关系式, 这时若利用最大无干扰功率限 $P_{door-CU_i}$ 发送信号, 就可计算出对应的最小错误传输概率 $P_{E-CF-th}^i$ 为

$$P_{E-CF-th}^i \\ = \frac{1}{2} \int_{\lambda_{FC}^i}^{\infty} p\left(\lambda, \frac{P_{door-CU_i} |h_{CU_i-CU}|^2 |x_{CU_i}|^2}{N_0}\right) \\ \times \text{erfc}(\sqrt{\lambda}) d\lambda. \quad (19)$$

由(18), (19)式可知 $p_{\text{E-CF}}^i$ 大于 $p_{\text{E-CF-th}}^i$, 所以可通过比较 $p_{\text{E-CF-th}}^i$ 与系统要求的报告错误概率 p_{gd} 的大小判断 CU_i 是否需要中继转发. 若符合(20)式, 则该次用户开机工作就必须使用中继协作; 若符合(21)式, 则次用户 CU_i 以功率限 $p_{\text{door-CU}_i}$ 进行通信, 不需要中继协作, 就能保证将错误传输概率控制在系统要求的范围内:

$$p_{\text{E-CF-th}}^i > p_{\text{gd}}, \quad (20)$$

$$p_{\text{E-CF-th}}^i \leq p_{\text{gd}}. \quad (21)$$

基于获得最大无干扰概率方法对次用户进行分组, 选择出备选认知中继集合的分组算法总结如下, 记为算法1.

算法1

输入 参与感知的次用户集合 S , 数量为 N ;

1) 初始化: C 表示需要中继转发的次用户集合, 令 $C = \phi$, R 表示不需要中继转发的次用户集合, 令 $R = \phi$, $i = 1$;

2) 根据(19)式计算 $p_{\text{E-CF-th}}^i$;

3) 若 $p_{\text{E-CF-th}}^i$ 符合(20)式, 将次用户 CU_i 加入 C , 否则加入 R ;

4) 若 $i < N$, $i = i + 1$ 转到2), 否则中止.

输出 备选认知中继用户集合 R .

3.2 基于总检测率最大的最佳中继选择方案

在3.1节研究的基础上, 进一步讨论在给定需要中继转发的次用户集合和备选认知中继用户集合的情况下, 如何获得使总检测率最大的中继选择方案的问题.

中继协作频谱感知过程如图2所示, 图中任意两个节点间的传输链路均为瑞利衰落信道, 一个时隙内平坦. 其中: Γ_{CF}^i , Γ_{CS}^i , Γ_{SF}^i 分别为次用户 CU_i 到融合中心 FC , CU_i 到其对应的认知中继用户 CU_j , CU_i 对应的认知中继用户 CU_j 到融合中心 FC 链路上的平均信噪比.

3.2.1 次用户通过中继转发至融合中心的错误传输概率

如箭头“ $\rightarrow$ ”所示, 次用户 CU_i 将初步处理的频谱数据信号, 直接发给融合中心 FC 的同时也发给中继用户 CU_j , 中继用户 CU_j 接收到次用户 CU_i 信号后, 信噪比大于一个阈值时就会对其进行解码

转发, 设中继用户 CU_j 的解码转发门限为 λ_{SR}^i , 噪声服从瑞利衰落分布, 信噪比的概率密度函数为 $p(\lambda, \Gamma_{\text{CS}}^i)$, 因此中继用户 CU_j 会转发次用户 CU_i 信号的概率为^[16]

$$p_{\text{TRAN}}^i = \int_{\lambda_{\text{SR}}^i}^{\infty} p(\lambda, \Gamma_{\text{CS}}^i) d\lambda. \quad (22)$$

系统采用BPSK调制, 则由中继用户 CU_j 传输时错误传输概率为

$$p_{\text{E-TRAN}}^i = \frac{1}{2} \int_{\lambda_{\text{SR}}^i}^{\infty} p(\lambda, \Gamma_{\text{CS}}^i) \text{erfc}(\sqrt{\lambda}) d\lambda. \quad (23)$$

如图2箭头“ $\dashrightarrow$ ”所示, 中继 CU_j 将 CU_i 初步处理的频谱数据信号传输给融合中心 FC . 当中继用户 CU_j 将错误解码结果传至融合中心 FC , 规定此时终端联合解码的错误概率为 $p_{\text{e-e}}^i$; 当中继用户 CU_j 将正确解码结果传至融合中心 FC , 此时 FC 采用最大比合并(MRC)方式进行联合解码时错误概率为^[16]

$$p_{\text{E-MRC}}^i = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{\Gamma_{\text{CF}}^i + \Gamma_{\text{SF}}^i}{1 + \Gamma_{\text{CF}}^i + \Gamma_{\text{SF}}^i}} \right] \right\}^2 \sum_{l=0}^1 \left\{ \frac{1+l}{2} \times \left(\frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{\frac{\Gamma_{\text{CF}}^i + \Gamma_{\text{SF}}^i}{1 + \Gamma_{\text{CF}}^i + \Gamma_{\text{SF}}^i}} \right] \right)^2 \right\}. \quad (24)$$

因此由上述(22)–(24)式可知中继用户 CU_j 接收到次用户 CU_i 发送的数据后, 进行解码并且将数据转发给融合中心 FC 的总的错误传输概率为

$$p_{\text{E-C-R-F}}^i = p_{\text{E-TRAN}}^i p_{\text{e-e}}^i + (1 - p_{\text{E-TRAN}}^i) p_{\text{E-MRC}}^i. \quad (25)$$

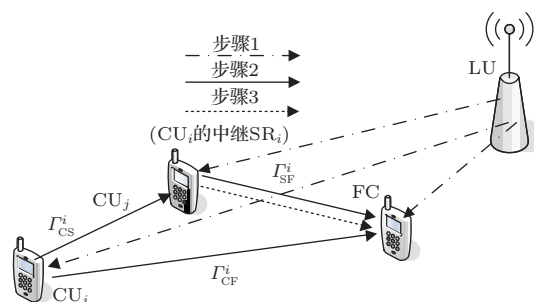


图2 考虑信噪比不同的中继协作频谱感知过程

3.2.2 次用户直接发送至融合中心的错误传输概率

次用户将感知数据直接发送至融合中心的错误传输概率可按(18)式计算.

综上所述, 根据 (18), (22), (25) 式可知图 2 所示次用户发送的感知数据在整个报告信道上的错误概率为

$$p_{Ei} = \text{step}(\kappa)p_{\text{TRAN}}^i p_{E-C-R-F}^i + [1 - \text{step}(\kappa)]p_{E-C-F}^i, \quad (26)$$

式中, $\text{step}(\kappa)$ 为阶跃函数, $\kappa > 0$, $\kappa < 0$ 分别代表有, 无中继.

为了研究报告信道传输错误对系统总检测率的影响, 引入定理 1.

定理 1 在基于中继的协作感知系统, 采用中继转发方式的各次用户选择使错误传输概率最小的次用户作为认知中继, 才能使系统的总体检测率最大. 将这种方案命名为局部最优中继选择方案.

证明 假设参与感知的次用户集合为 C_N , 采用中继传输方式的次用户集合为 C_R , Q_d^1 为 C_R 中次用户均选择错误传输概率最小的认知中继得到的总体检测率, Q_d^2 为集合 C_R 中有 m 个次用户未选择错误传输概率最小的认知中继得到的总体检测率. 由假设和结论 1 可知:

$$P_{dm}^1 > P_{dm}^2 (m = 1, 2 \cdots i) \Rightarrow Q_d^1 > Q_d^2.$$

由于 m 个次用户是随意选取的, 因此问题得证.

由此结论可以看出, 以最小错误传输概率为准则进行中继选择所形成的中继方案, 可以在采用相同检测门限的情况下, 使局部总检测率最大. 因此, 在给定采用中继转发的次用户集合和备选认知中继用户集合的情况下, 根据上述原则确定中继选择方案的方法总结为算法 2.

算法 2

输入 参与协作感知的次用户集合, 记为 S , 采用中继转发的次用户集合记为 $C = \{CU_1^C, CU_2^C, \cdots, CU_l^C\}$, C 中包含 l 个次用户, 备选认知中继集合记为 $R = \{CU_1^R, CU_2^R \cdots CU_m^R\}$, R 中包含 m 个次用户, 具体如下:

1) 初始化令 $i = 1$, 系统局部最优错误传输概率和 $p_{\text{best-C-R}} = 0$;

2) 对采用中继转发的次用户 CU_i^C , 分别从 $CU_1^R, CU_2^R, \cdots, CU_m^R$ 中选择一个作为认知中继, 根据 (26) 式分别求出其对应的错误传输概率 $p_{E1}, p_{E2} \cdots p_{Em}$. 从中选出错误率最小的一个, 记为 $p_{\min-CU_i}$, 就是次用户 CU_i^C 能得到的最小的错误传输概率, 将对应的局部最优中继记为 $CU_{i-\text{best}}$, 且 $CU_{i-\text{best}} \in R$;

3) $i = i + 1$ 若 $i \leq l$ 转至步骤 2), 否则转至 4);

4) 令 $G(S) = \{\{CU_1^C, CU_{1-\text{best}}\}, \{CU_2^C, CU_{2-\text{best}}\}, \cdots, \{CU_l^C, CU_{l-\text{best}}\}\}$; 式中 $\{a, b\}$ 表示 a 选择 b 作为其认知中继. 程序结束.

输出 $G(S)$ 就是如定理 1 所述的最佳中继选择方案.

在本节研究的基础上, 3.3 节将继续研究不同中继选择方案和检测门限对系统吞吐量的影响, 并证明在相同认知用户参与感知的情况下, 采用其他中继选择方案虽然可以通过减小检测门限提高检测率, 但同时会降低系统吞吐量.

3.3 基于信道吞吐量最大的参数优化算法

文献 [11] 在报告信道条件为独立同分布的情况下, 研究了参与感知用户数量和检测门限对系统吞吐量的影响. 本节将在 3.2 节研究的基础上, 继续研究不同中继选择方案和检测门限对系统吞吐量的影响, 并解决了在保证目标检测率 Q_d 的条件下使系统吞吐量 C 最大的参数优化问题.

图 3 为系统带宽分配情况图, W 表示总的系统带宽, N 为参与协作感知的次用户数目, l 为采用中继转发的次用户数目, B 为每发送 1 bit 本地决策值占用的报告信道带宽, 过程一为数据传输阶段; 过程二和过程三为信号发送本地决策值阶段. 由此可见, 发送 $N + 2l$ 个独立的本地决策值, 要消耗 $(N + 2l)B$ 的带宽, 剩下 $W - (N + 2l)B$ 的带宽用于数据传输.

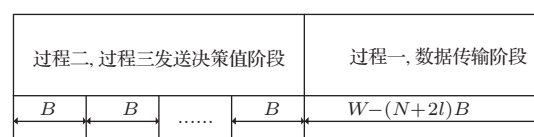


图 3 中继协作频谱感知系统带宽分配情况图

定义 $P_1 = Q_p$ 为主用户 LU 存在的概率, $P_0 = 1 - Q_p$ 为 LU 不存在的概率, δ_0 表示主用户 LU 不存在时单位带宽上 CU 可获得的吞吐量, δ_1 表示主用户 LU 存在时单位带宽上 CU 可获得的吞吐量, $\alpha = B/W$ 为每发送 1 bit 本地决策值所占用的报告信道带宽与总带宽的比值, $G(S)$ 表示次用户集合 S 对应的中继选择方案.

根据上述定义并参考文献 [11], 则系统正确检测到主用户不存在的概率为: $P_0(1 - Q_f)$, 次用户可

获得的吞吐量为 $\frac{W - (N + 2l)B}{W} \delta_0$; 系统错误检测到主用户不存在的概率为 $P_1(1 - Q_d)$, 次用户可获得的吞吐量为 $\frac{W - (N + 2l)B}{W} \delta_1$.

由于在参与协作感知的次用户集合确定的情况下, 将 Q_d 和 Q_f 均表示为中继选择方案 $G(S)$ 和检测门限 λ 的函数, 则 CU 可获得的吞吐量为

$$C(G(S), \lambda) = C_0(G(S), \lambda) + C_1(G(S), \lambda), \quad (27)$$

其中,

$$C_0(G(S), \lambda) = \frac{W - (N + 2l)B}{W} \times \delta_0 P_0(1 - Q_f(G(S), \lambda)), \quad (28)$$

$$C_1(G(S), \lambda) = \frac{W - (N + 2l)B}{W} \times \delta_1 P_1(1 - Q_d(G(S), \lambda)), \quad (29)$$

N 表示集合 S 中包含的次用户数量, l 表示采用中继转发的次用户数量.

下面分析 (27) 式的变化情况.

固定 $G(S)$, 则 N , l 和各次用户报告信道的传输错误率均为定值, 根据结论 1, 当 λ 增大时, 总检测率, 虚警率变小, 吞吐量变大; 当 λ 减小时, 总检测率, 虚警率增大, 吞吐量变小.

当 λ 确定而 $G(S)$ 不确定时, 由于 l , Q_d , Q_f 的同时变化, 增大了对吞吐量变化定量分析的难度, 因此, 重点在采用中继转发方式的次用户集合 (记为 CU) 确定的情况下, 讨论中继选择方案的变化对系统吞吐量的影响. 为了便于定量分析, 给出定理 2.

定理 2 在基于中继的协作感知系统中, 当参与感知的次用户集合, 采用中继转发方式的次用户集合, 总检测率均相同的情况下, 当且仅当采用定理 1 规定的局部最优中继选择方案时, 系统可以得到最大的吞吐量.

证明 令 $G_1(S)$ 为局部最佳中继选择方案, $G_2(S)$ 为满足给定条件的任意其他方案. 由条件可知 $N_1 = N_2$, $l_1 = l_2$, $Q_d^1 = Q_d^2$, 因此吞吐量的大小取决于虚警概率的大小. 虚警概率越小, 吞吐量越大.

根据上节的结论, 若采用相同的门限值 λ_0 , $G_1(S)$ 情况下的总检测率大于 $G_2(S)$ 情况下的总检测率, 假设 $G_1(S)$ 在门限值为 λ_0 的情况下可以达到总检测率 Q_d^1 , 则采用 $G_2(S)$ 时为了使 $Q_d^2 = Q_d^1$,

只能减小本地检测的门限值, 即根据假设条件, 必然有 $\lambda_2 < \lambda_1$, 从而 $p_{fi}^2 > p_{fi}^1$, 又由于 $G_2(S)$ 不是定理 1 规定的局部最优中继选择方案, 因此至少有一个次用户在两种方案中选择认知中继时满足 $p_{Ei}^2 > p_{Ei}^1$, 根据结论 1 得出

$$\mathcal{P}_{fi}^2 > \mathcal{P}_{fi}^1 \Rightarrow Q_f^2 > Q_f^1 \Rightarrow C^1 > C^2,$$

由于 $G_2(S)$ 是任意选取的, 所以问题得证.

根据定理 2, 当采用中继转发的次用户集合 CU 确定时, 能使系统吞吐量最大的中继选择方案 $G(S)$ 就可根据算法 2 得到.

在此继续讨论 $G(S)$ 为最佳中继方案且保证 Q_d 的情况下使系统吞吐量最大的优化模型:

$$\max_{\lambda} C(\lambda) = C_0(\lambda) + C_1(\lambda), \quad (30)$$

目标检测率约束条件:

$$Q_d(\lambda) \geq \bar{Q}_d;$$

最佳中继选择方案: $G(S)$ 固定.

在协作频谱感知系统中, 需要寻求检测率与吞吐量的折衷, 根据 λ 对吞吐量的影响可以看出, 在给定目标检测率的情况下, 当系统检测率 $Q_d(\lambda)$ 与目标检测率 $\bar{Q}_d$ 相等时, 可以得到最大的系统吞吐量. 因此, 根据文献 [11], 令 $f(\lambda) = Q_d(\lambda) - \bar{Q}_d$ ($\lambda > 0$) 建立非线性寻优模型, 使用 Newton-Raphson 算法 [11] 求解, 求得对应的门限值参数 λ_0 和吞吐量 $C(\lambda_0)$.

3.4 全局最佳中继选择方案及模型参数求解算法

上述 3.1 节利用最大无干扰功率, 确定了系统中备选认知中继集合, 3.2 节在采用中继转发的次用户集合确定的情况下, 研究了使系统检测率最大的中继选择算法, 3.3 进一步在该集合不变的情况下, 证明了 3.2 节给出的最佳中继选择方案可以使系统的吞吐量达到最大. 综上所述, 为了确定全局最佳中继选择方案, 可以利用算法 1 计算出备选认知中继用户集合, 减小认知中继选择范围; 利用排列组合方法, 遍历参与感知次用户集合和采用中继转发的次用户集合的各种情况, 针对每种情况, 利用算法 2, 确定该情况下使系统检测率最大的方案; 利用 Newton-Raphson 算法 [11], 根据目标检测率求出对应该方案的门限值和吞吐量; 最后挑选使系统

吞吐量最大的一种方案,也就是全局的最优方案.具体算法如下:

算法3

输入 所有开机的次用户集合为 S_{all} , 数量为 N_{max} , 目标检测率 Q_d .

1) 初始化: $N = 2$, 吞吐量 C_{max} , 初始化令 $C_{\text{max}} = 0$, 门限值 λ_0 , 利用算法1, 计算出 S_{all} 中备选认知中继用户集合 R_{all} ;

2) 利用排列组合算法, 将所有开机次用户集合 S_{all} 中的元素分为 $C_{N_{\text{max}}}^N$ 组, 每组有 N 个元素, 有 $C_{N_{\text{max}}}^N$ 种组合方式, 令 $C_{N_{\text{max}}}^N = \gamma$, 记分组为 S_i ($i = 1, 2, \dots, \gamma$), S_i 表示每次迭代时所有参与感知的次用户集合;

3) 令 $i = 1$;

4) 令 $l = 1$;

5) 利用排列组合算法, 将 S_i 中的元素分为 C_N^l 组, 每组有 l 个元素, 有 C_N^l 种组合方式, 令 $C_N^l = \beta$, 记分组为 CU_j , ($j = 1, 2, \dots, \beta$), CU_j 表示每次迭代时采用中继转发的次用户集合;

6) 令 $j = 1$;

7) 当次迭代中采用中继转发的次用户集合和备选认知中继用户集合分别取 CU_j 和 $R_{\text{all}} \cap S_i$, 根据算法2 进行最佳中继选择, 输出局部最优中继方案 $G_{i,j}$;

8) 根据方案 $G_{i,j}$ 和系统要求的目标检测率, 利用 Newton-Raphson 算法求出检测门限值 $\lambda_{i,j}$, 吞吐量 $C_{i,j}$, 比较 $C_{i,j}$ 和 C_{max} 的大小, 若 $C_{i,j} > C_{\text{max}}$, 令 $\lambda_0 = \lambda_{i,j}$, $C_{\text{max}} = C_{i,j}$, $G_{\text{best}} = G_{i,j}$;

9) 若 $j < \beta$, $j = j + 1$, 返回7), 否则转到下一步;

10) 若 $l < N$, $l = l + 1$ 返回5), 否则转下一步;

11) 若 $i < \gamma$, $i = i + 1$, 返回4), 否则转下一步;

12) 若 $N < N_{\text{max}}$, $N = N + 1$, 返回2), 否则程序结束.

输出 全局最优中继选择方案 G_{best} , 就能够在本地检测的门限值为 λ_0 时, 在满足目标检测率 Q_d 的要求下, 达到系统最大吞吐量 C_{max} .

当感知用户数量增加时, 算法3的复杂度会增大.同时, 在实际场景中, 随着感知分集阶数的增加, 系统吞吐量会降低, 导致其降低的原因: 一方面是感知分集阶数的增加带来的信令开销; 另一方面是信道传输错误率导致虚警率的增加, 第4节仿真实验时将出现这种情况.因此, 为了降低算法复杂

度, 可在算法3 的第8)步加入判断模块, 当随着感知分集阶数增加吞吐量不再增加时, 中止程序, 则当前得到的 $G_{\text{best}} = G_{i,j}$, $\lambda_0 = \lambda_{i,j}$, $C_{\text{max}} = C_{i,j}$ 就是相应全局最佳选择方案, 本地检测门限值和吞吐量.

4 仿真实验及分析

4.1 信道条件对次用户最小错误传输概率的影响分析

感知信道距离和报告信道环境能够影响次用户的最小错误传输概率.设定系统要求的错误传输概率限为 $p_{\text{gd}} = 0.16$. 图4 仿真条件: $a = 2.425$, $Q_p = 0.2$, $I_{\text{th}} = 0.1 \text{ mW}$, $\bar{\gamma}_i = 10 \text{ dB}$, $u_i = 5$, $p_{\text{fi}} = 0.1$, 次用户 CU_i 到融合中心 FC 的距离 $d_{\text{CU}_i-\text{FC}} = 100 \text{ m}$, 噪声均值为0, 方差 $N_0 = 0.3$, 横坐标为感知信道的距离 $d_{\text{LU}-\text{CU}_i}$, 纵坐标为次用户最小错误传输概率 $p_{\text{E-CF-th}}^i$, 可以看出, 随着感知信道距离的增加(次用户与主用户之间的距离), 次用户的错误传输概率逐渐减小, 这是由于随着感知信道距离的增加, 次用户最大无干扰功率限就可以提高, 从而降低了错误传输概率.

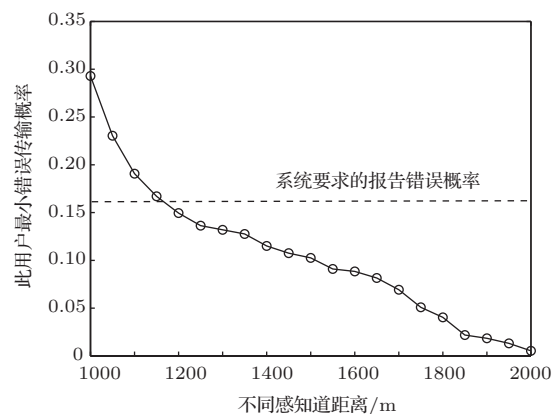


图4 不同感知信道距离对应的次用户最小错误传输概率

图5 仿真条件: 设定感知信道距离 $d_{\text{LU}-\text{CU}_i} = 1500 \text{ m}$, 其他仿真条件如图4, 横坐标为次用户 CU_i 到融合中心 FC 的加性高斯白噪声方差 N_0 , 纵坐标为次用户的最小错误传输概率 $p_{\text{E-CF-th}}^i$, 由图中可以看出, 随着报告信道噪声方差的增加(即报告信道条件恶劣), 次用户的最小错误传输概率逐渐增加, 这是由于随着噪声的增大, 次用户即使以最大无干扰功率限发送信号, 仍然会带来很大的

错误传输概率。

由以上实验可以看出, 信道条件对次用户的最小错误传输概率有很大的影响, 也就是说, 在认知无线电系统中, 对于不同的次用户最小错误传输概率是不一样的, 所以要通过判断次用户的最小错误传输概率与系统要求的报告错误概率 p_{gd} 的关系以自适应判断某个 CU_i 是否需要设置中继点进行辅助通信。

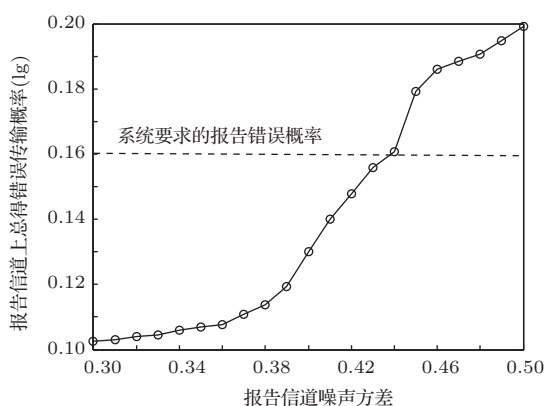


图5 不同报告信道噪声对应的次用户最小错误传输概率

4.2 不同中继选择方案对系统感知性能的影响分析

为了比较不同方案对系统性能的影响, 本节对比分析本文 All-best-adoptiv 方案, Arbitrary-relay (任意中继), No-relay (不用中继) 三类方案的效果。

考虑在笛卡尔坐标系 xoy 上存在一个认知无线网络: 主用户坐标 $(-1000, 0)$, $I_{th} = 0.1$ mW, $Q_p = 0.2$, $a = 2.425$, $N_{max} = 15$, 备选认知中继数目 $N_{SR} = 4$, 次用户集中在原点 $(0, 0)$ 周围 200×200 的区域内, 每个次用户 CU_i 时间带宽积 $u_i = 5$, $p_{fi} = 0.1$, 感知信道上的平均信噪比为 10 dB, 次用户 CU_i 到融合中心 FC 的加性高斯白噪声, 且其均值为 0, 方差全为 $N_0 = 0.5$, 信噪比 Γ_{CF}^i , Γ_{SF}^i , Γ_{CS}^i 随机选取, 其范围为 -20 dB 到 20 dB, $\lambda_{FC}^i = 1$, $p_{e-e}^i = 0.1$. 此时考虑一旦开机就必须要有中继协作的次用户数目 $N_{SR} = 4$, $N = 10$ 个次用户开机, 其中有 $l = 7$ 个开机次用户采用中继转发。

图6横坐标为中继解码转发的门限 λ_{SR}^i , 纵坐标为报告信道上总的错误传输概率, 可以看出, 与另外两种方案相比, 本文方案在相同中继解码转发门限的条件下可明显降低报告信道上总的错误传

输概率; 图7转发门限全为1, 横坐标为系统总虚警率, 纵坐标为对应的总漏检率, 由图7可以看出, Arbitrary-relay 方案相比 No-relay 方案仅有较小的性能提高. 相比于 Arbitrary-relay 方案和 No-relay 方案, 本文 All-best-adoptive 方案在相同总漏检率的情况下, 其总虚警率更小, 并且明显降低了虚警界, 这是由于虚警界是由报告信道上的错误传输概率导致的, 而本文方案可以有效降低报告信道上的错误传输概率。

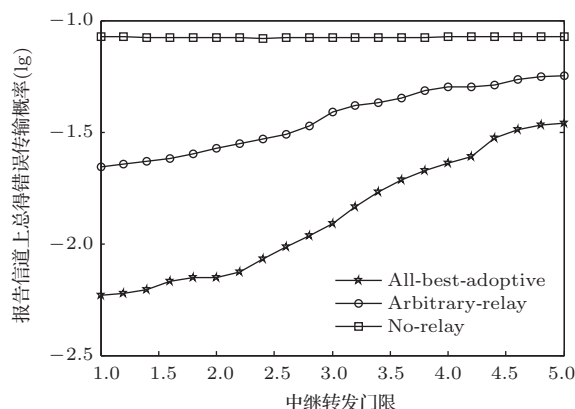


图6 不同方案报告信道上总错误传输概率比较

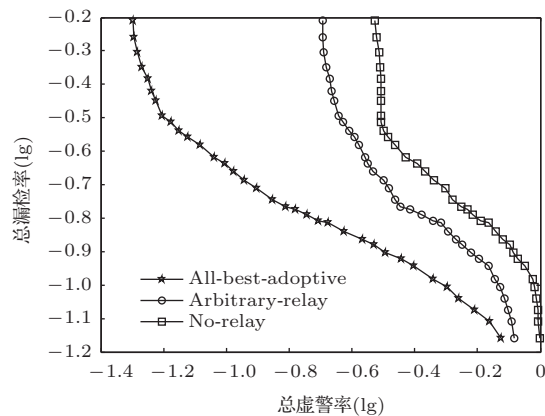


图7 不同方案的检测性能比较

4.3 不同中继方案对系统吞吐量的影响分析

本节主要研究不同认知中继方案对系统吞吐量的影响, 并验证算法3的有效性. 考虑一个认知无线网络, 设定约束条件为 $N_{max} = 8$, 备选中继数目 $N_{SR} = 4$, 目标检测率 $\bar{Q}_d = 0.9$, $u_i = 5$, $B/W = 0.1$, $p_{E-C-R-F}^i$, p_{E-C-F}^i 在 $0-0.1$ 之间随机选取, 信息融合采用“或”准则, 采用算法3进行求解。

表 1 为感知信道上的平均信噪比分别为 5 dB, 10 dB, 满足约束条件后次用户归一化吞吐量随中继选择方案的变化情况. 表中 N 和 l 对应的数据是与 N 和 l 相同的一族中继选择方案中, 使系统吞吐量最大的方案对应的数据.

表 1 中继协作多用户系统不同模型参数下系统各项指标

次用 户数	中继 数目	噪声 /dB	检测 门限	吞吐量	虚警率
1	1	5	2.1978	0.1282	0.0899
		10	2.3830	0.1343	0.0885
2	1	5	4.3682	0.2388	0.0943
		10	4.4547	0.2658	0.0935
2	2	5	8.2391	0.2643	0.0837
		10	8.3260	0.2851	0.0705
3	1	5	10.5126	0.3648	0.0789
		10	10.6740	0.3952	0.0575
3	2	5	8.6566	0.4973	0.0423
		10	10.1522	0.4711	0.0401
3	3	5	14.2392	0.5239	0.0331
		10	14.5349	0.5486	0.0319
4	1	5	14.7436	0.5385	0.0343
		10	14.6567	0.5760	0.0328
4	2	5	19.5959	0.6258	0.0359
		10	20.3221	0.6547	0.0310
4	3	5	7.9438	0.6354	0.0363
		10	7.4537	0.6446	0.0359
5	1	5	8.3377	0.5438	0.0383
		10	8.6270	0.5929	0.0376
5	2	5	8.8159	0.5521	0.0448
		10	8.7052	0.5730	0.0435
5	3	5	9.4118	0.4555	0.0454
		10	9.5883	0.4964	0.0449
6	1	5	9.6728	0.4673	0.0474
		10	10.0557	0.4608	0.0450
6	2	5	10.1746	0.4307	0.0495
		10	11.4904	0.4442	0.0482
6	3	5	36.3653	0.4099	0.0509
		10	37.5977	0.4134	0.0483

由表 1 可以看出, 当次用户 CU 的个数 N , 中

继数目 l 及目标检测率 $\bar{Q}_d$ 一定时, 随感知信道平均信噪比 SNR 的增加, 次用户吞吐量增大. 其原因是为了满足目标检测率的要求, 感知信道上的信噪比越高, 要求的检测门限越高, 导致目标虚警率减小, 次用户吞吐量增加; 目标检测率 $\bar{Q}_d = 0.9$ 和平均信噪比 SNR 一定时, 随着 N, l 的增大, 次用户吞吐量先增加后降低, 主要原因是当 N, l 由小变大时, 起初阶段由于分集作用, 使得协作频谱检测的性能远远高于单节点的检测性能, 即虚警率会大大降低, 因而次用户吞吐量迅速增加, 当 N, l 继续增大时, 发送本地决策结果所占用的报告信道带宽不断增加, 且带宽增加对次用户的吞吐量影响较大, 因而次用户吞吐量又会降低. 所以, 并非 N, l 越大, 次用户可以获得的吞吐量就越高. 在不同感知信道条件下, 为了满足目标检测率的要求, 使次用户吞吐量最大化所对应的感知分集阶数是不同的. 如表 1 所示感知信道平均信噪比 5 dB 时, 使次用户吞吐量最大的次用户数量和中继转发数量分别为 $N = 4, l = 3$; 感知信道平均信噪比 10dB 时, 则为 $N = 4, l = 2$. 在获得最大次用户吞吐量后, 当感知信道平均信噪比不变时, 再增加协作 CU 数目就没有意义, 只会增大系统开销, 造成不必要的资源浪费. 本例中, 在 5 dB 的信道条件下, 得到 $N = 4, l = 3$ 对应的方案后, 接下来若判断增加协作 CU 数量反而带来吞吐量的降低, 就可中止程序运行.

5 结 论

该文通过分析次用户发射功率对主用户的影响, 确定备选认知中继集合, 然后证明了采用中继转发的单个用户以报告信道传输错误率最小为准则得到的中继选择方案, 在检测门限相同的情况下, 与其他方案相比可以获得最大的检测率; 最后分析了在目标检测率确定的条件下, 上述中继选择方案可以得到最大的信道吞吐量, 在此基础上, 利用排列组合方法设计了全局自适应最优化算法, 解决了中继协作频谱感知系统性能受冗余中继干扰, 受开机次用户和中继用户数目, 检测门限非优化设计, 信道传输错误率等因素影响导致性能下降的问题. 该算法是一种全局最优方法, 仿真实验证明, 利用其建模并优化中继协作频谱感知系统, 网络信道传输精度高, 信道吞吐量, 且节约带宽资源.

参考文献

- [1] Laska J, Bradley W, Rondeau T 2011 *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* Aachen, May 3–6, 2011 p156
- [2] Mishali M, Eldar Y C 2011 *IEEE Signal Processing Magazine*. **28** 102
- [3] Zu Y X, Zhou J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 019501
- [4] Zhang X J, Lu Y, Tian F, Sun Z X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 078401 (in Chinese) [张学军, 鲁友, 田峰, 孙知信 2014 物理学报 **63** 078401]
- [5] Liu Y, Peng Q C, Shao H Z, Peng Q H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 078406 (in Chinese) [刘允, 彭启琮, 邵怀宗, 彭启航 2013 物理学报 **62** 078406]
- [6] Yin C, Tan X Z, Ma L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 118402 (in Chinese) [殷聪, 谭学治, 马琳 2014 物理学报 **63** 118402]
- [7] Zheng S L, Yang X N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148402 (in Chinese) [郑仕链, 杨小牛 2012 物理学报 **61** 148402]
- [8] Zhang Q, Jia J, Zhang J 2009 *IEEE Communications Magazine* **47** 111
- [9] Zou Y, Yao Y D, Zheng B 2010 *IEEE Transactions on Wireless Communications* **9** 2676
- [10] Laneman J N, Tse D N, Wornell G W 2013 *IEEE Transactions on Information Theory* **50** 3062
- [11] Hunter T E, Sanayei S, Nosratinia A 2006 *IEEE Transactions on Information Theory* **52** 375
- [12] Zhang J C, Fu N, Qiao L Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 030701 (in Chinese) [张京超, 付宁, 乔立岩 2014 物理学报 **63** 030701]
- [13] Ikki S S, Ahmed M H 2010 *IEEE Transactions on Communications* **58** 68
- [14] Li M L, Yuang C W, Li L, Yang R Z 2011 *Journal on Communications* **2** 53 (in Chinese) [李美玲, 袁超伟, 李琳, 杨睿哲 2011 通信学报 **2** 53]
- [15] Mark B L, Nasif A O 2009 *IEEE Transactions on Wireless Communications* **8** 2505
- [16] Shen J, Liu S, Wang Y 2009 *IET Communication* **3** 1016
- [17] Yulong Zou, Jia Zhu, Baoyu Zheng, Sulan Tang 2010 *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)* Miami Florida, Dec 6–10 2010, p1
- [18] Yue W J, Zheng B Y, Meng Q M 2011 *Science China: Information Science* **41** 365 (in Chinese) [岳文静, 郑宝玉, 孟庆民 2011 中国科学: 信息科学 **41** 365]
- [19] Peng M G, Wang W B 2009 *Collaborative Wireless Communication Principle and Application* (Beijing: China Machine Press) p255 (in Chinese) [彭木根, 王文博 2009 协同无线通信原理与应用 (北京: 机械工业出版社) 第 255 页]

An adaptive global optimization algorithm of cooperative spectrum sensing with relay^{*}

Zhang Qian[†] Liu Guang-Bin Yu Zhi-Yong Guo Jin-Ku

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

(Received 2 July 2014; revised manuscript received 27 September 2014)

Abstract

In this paper is carried out an investigation that the performance of the cooperative spectrum sensing with relay may be interfered by redundant relays, the number of busy cognitive users (CUs) and the secondary relay(SR), detection threshold and transmission error of the channel, so that a global adaptive optimization algorithm is proposed. In this algorithm, based on the maximum interference-free power relay selection (MIFPRS), the set of secondary relay is defined adaptively; and in order to reach a maximum of the probability of detection, the single cognitive user minimizes the transmission error of the channel and selects the relay from the set of secondary relays. To achieve the maximum of the total channel throughput under the given probability of detection, ale ues the entire adaptive optimization algorithm. Numerical simulations demonstrate that the proposed algorithm has a high degree of channel transmission precision, and a large amount of channel throughput, so as to spend less frequency band.

Keywords: spectrum sensing, relay-assisted, adaptive, global optimization

PACS: 84.40.Ua, 95.85.bh, 07.05.Hd, 07.50.Qx

DOI: [10.7498/aps.64.018404](https://doi.org/10.7498/aps.64.018404)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61201120).

† Corresponding author. E-mail: snmeg@163.com