

业务感知的自适应协作频谱感知算法

邱恭安 章国安*

(南通大学电子信息学院 南通 226019)

摘要: 为提高次用户接入业务端到端传输性能, 该文提出通过感知节点检测性能和业务类型的频谱检测与资源分配联合优化方法。首先, 将上周期全局检测性能构造的有效检测指数作为调节权值, 计算信道状态自适应协作门限, 据此选择协作模式, 以最大化有效检测区间, 并根据频带稳定性和有效性特征构造可用频谱空间。随后, 基于业务请求接入速率将接入业务分为时延敏感业务和可靠性敏感业务两类, 通过业务属性匹配的频谱分配算法提高接入业务的端到端传输成功率。仿真显示, 在不同信道状态下, 所提算法通过自适应调整全局检测性能扩大了 Rayleigh 衰落信道的有效频谱检测区间, 降低了时延敏感业务的中断概率。

关键词: 频谱检测; 频谱分配; 自适应协作; 业务感知

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-0866-07

DOI: 10.11999/JEIT160582

Service Awareness Based Adaptive Cooperative Spectrum Sensing Algorithm

QIU Gong'an ZHANG Guo'an

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Joint optimization of cooperative spectrum detection and resource allocation based on the service profile is investigated to enhance end-to-end transmission performance of the secondary users by selecting the sensing nodes. At first, the adaptive cooperation thresholds are adjusted according to the weight of available detection index based on the global detection metrics in the last round. And the optimal cooperative mode can be selected to maximize the available sensing region. The idle channels are managed depend on the stability and the available bandwidth metrics for different secondary users. Then, the secondary users can be divided into two categories based on the requested rates, delay sensitive services and reliability sensitive services. The idle channels for the secondary users with different quality of service demands are selected depend on the service profile for enhancing end-to-end transmission performance. Simulation results show that the proposed algorithm can expand the available sensing region through adjusting the global detection metrics adaptively in Rayleigh fading channel and increase the resource utility by decreasing the outage of delay sensitive services.

Key words: Spectrum detection; Spectrum allocation; Adaptive cooperation; Service awareness

1 引言

协作频谱感知(Cooperative Spectrum Sensing, CSS)系统通过同频段多个次用户(Secondary User, SU)间的协作检测并机会使用主用户(Primary User, PU)空闲授权频带, 以提高频谱利用率^[1]。在协作频谱检测中, 不同信道中 SUs 节点具有差异化检测能力^[2], 处于恶劣信道的 SUs 往往具有较低检测概率或较高的上传错误概率, 降低了系统全局检测性

能, 因此, 选择检测性能优的 SUs 参与协作频谱检测是有效协作的方式, 但需要获取信道的实时状态信息^[3]。由于 PUs 业务的多样性和绝对优先占用频带, 获得的可用空闲频带资源具有差异化频谱特征, 不能为所有 SUs 业务提供端到端业务 QoS(Quality of Service)确保的传输。目前, 由性能各异的节点组成的无线网络趋于综合承载不同属性的 SUs 业务, 因此, 差异化 SUs 处理是应用实践对 CSS 系统优化的需要。

为减小衰落信道的影响^[4,5], 根据信道准实时状态动态调整能量检测的信噪比(Signal Noise Rate, SNR)门限, 使系统达到有效的检测概率和虚警概率, 或者根据信道状态自适应地选择次用户协作融

收稿日期: 2016-06-03; 改回日期: 2016-11-22; 网络出版: 2017-01-22

*通信作者: 章国安 gzhang@ntu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61371113, 61601248)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61371113, 61601248)

合以提高系统检测性能，但是信道状态信息存在陈旧性，且计算复杂度高。针对 SUs 节点差异化检测能力^[6,7]，通过报告信道接入时隙管理屏蔽恶劣信道中 SUs 节点参与协作检测，或应用证据理论估计 SUs 节点检测结果的可信度，选择性地上传本地检测结果，一定程度上避免恶劣信道带来的系统检测性能劣化，但固定的融合方法导致系统全局检测性能降低，甚至检测结果不正确。实际上，可用频谱属性参数，包括有效带宽、连续持续空闲时间、不同时间段的 PU 活动规律等，具有不同特征，适合传输不同 QoS 需求的 SU 业务。因此，业务属性关联的频谱检测和分配方法能够提高接入业务的端到端传输成功率，提高 16% 的能量效率^[8,9]。通过估计噪声功率感知可用频谱带宽的协作频谱检测方法将频谱检测与 SUs 业务属性关联，为 SUs 提供最大化的有效频谱带宽^[10]，但仅确保系统检测概率大于最小要求，虚警率没有作为优化约束条件。在频谱分配与业务属性关联上^[11,12]，通过业务优先级区分接入或调整 SU 行为减小接入碰撞概率，降低业务传输中断概率，但是较难保障不同业务接入的公平性。在累积干扰和功率约束条件下，通过联合优化频谱检测、频谱接入和频谱分配最大化空闲频谱吞吐量^[13]，或根据 SUs 业务属性自适应地构建分簇实现对不同信道的检测和接入以最大化空闲频谱吞吐量^[14]，但是，当接入业务存在差异化 QoS 需求时，接入业务属性不能与信道特征自适应，频谱检测和分配联合优化策略不能保证时延敏感业务端到端传输性能需求。

针对衰落信道的时变性和 SUs 业务的差异性，在满足全局最小性能基础上，本文提出自适应信道状态选择协作频谱检测模式，通过降低协作信噪比门限最大化有效频谱检测区间，获得最多空闲频带资源。其次，基于业务匹配的频谱属性实现业务感知的频谱管理，分为稳定性有效和带宽有效频谱。最后，通过不同业务的频谱特征化分配，实现业务区分的空闲频带选择机制，为差异化业务提供 QoS 保证的信道接入，减小业务传输中断概率，通过提高业务传输成功率来提高频谱效率。

2 系统模型

2.1 协作频谱检测模型

通常，在本地频谱检测中 PU 和 SUs 间没有信息交换，故当 SU 节点基于能量检测方法对 PU 状态进行检测时，将接收信号总能量的判决值与预设判决门值比较判断 PU 信号存在与否，建模为二元假设检验：

$$x(k) = \begin{cases} n(k), & H_0 \\ h(k) \cdot s(k) + n(k), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中， $x(k)$ 为第 k 信道中 SU 接收到的信号， $s(k)$ 为第 k 信道中 PU 发射信号， $h(k)$ 为第 k 信道增益， $n(k)$ 为第 k 信道中噪声信号， H_1 和 H_0 分别表示 PU 存在和不存在状态。

设认知无线网络(Cognitive Radio Networks, CRN)有 M 个次用户，第 k 信道中 SU 的本地检测概率和虚警率分别为 P_{dk} , P_{fk} ，则在“或”(OR)融合规则下协作频谱检测的全局检测概率 Q_d^{or} 和全局虚警率 Q_f^{or} 为

$$Q_d^{\text{or}} = 1 - \prod_{k=1}^M (1 - P_{dk}^{\text{or}}), \quad Q_f^{\text{or}} = 1 - \prod_{k=1}^M (1 - P_{fk}^{\text{or}}) \quad (2)$$

在“并”(AND)融合规则下协作频谱检测系统全局检测概率 Q_d^{and} 和全局虚警率 Q_f^{and} 为

$$Q_d^{\text{and}} = \prod_{k=1}^M P_{dk}^{\text{and}}, \quad Q_f^{\text{and}} = \prod_{k=1}^M P_{fk}^{\text{and}} \quad (3)$$

2.2 业务感知模型

设业务接入属性为 (R, d, D) ，其中， R 为业务请求接入速率， d 为业务时延上限， D 为业务持续传输时间，则根据请求接入速率特征和 QoS 指标，SUs 业务可分为时延敏感业务和吞吐量敏感业务两类^[15]。时延敏感业务要求端到端传输时延小于时延上限，需要持续传输的时间较大，通常具有较小的请求接入速率。吞吐量敏感业务具有较大的时延容忍度，通常为突发性业务，具有较大的请求接入速率以最大化业务吞吐量，因此，基于业务请求接入速率特征可实现 SUs 业务属性感知。

在实际应用中，不同业务请求接入速率具有多样性，因此，业务区分门限设置具有差异性，容易引起不同业务的传输性能动态变化。鉴于不同无线网络接入链路的传输能力，本文选择链路公平速率作为业务区分门限进行不同属性业务的感知区分，为接入业务提供稳定的网络传输性能。设某链路全部 SUs 业务请求接入速率分别为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$ ，且 $R_1 < R_2 < \dots < R_M$ 。所有速率等于 R_i 的 SUs 业务为业务 i ，在 t 时刻，网络接入点中业务 i 的数量为 x_i ，则 SUs 业务的数量集描述为 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ 。若令 $R_0 = 0$ ， C 为空闲频带有效带宽，SUs 业务公平共享有效空闲频带，则由 Max-Min 份额算法可得链路公平速率 R_F 为

$$R_F = C / \sum_{i=0}^M x_i \quad (4)$$

在网络状态稳定时，SUs 接入业务感知区分实现如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \text{SUs} = & \{\text{DelaySUs} \mid R < R_F\} \\ & \cup \{\text{ThroughputSUs} \mid R \geq R_F\} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)能够一定程度上自适应接入链路有效带宽。当有效带宽大或接入 SUs 数小时, R_F 较大, 请求接入速率小于 R_F 的吞吐量敏感 SUs 业务被认为是时延敏感业务而分配高稳定频谱, 但其接入速率小, 不会给接入的时延敏感 SUs 业务带来大的传输波动, 相反借助该动态区分特征, 在满足时延敏感业务 QoS 性能要求的前提下, 实现 SUs 接入业务在整个可用频谱空间上的负载均衡。

3 业务感知的自适应协作频谱检测

通常, 不同特征的空闲频带分布于整个频谱空间, 通过频谱检测获得的空闲频带往往不连续, 而不同 SUs 希望接入能保障其业务传输质量的空闲频带, 因此, 检测并接入与其 QoS 要求匹配的空闲频带是业务区分的频谱感知基础。基于频谱检测能力对 SUs 节点进行分簇, 即 SUs 节点选择加入接收 SNR 最大的信道分簇作为备用本地频谱检测节点, 由系统根据当前信道状态选择参与协作检测的节点对指定频带进行本地检测, 并上传本地检测结果至数据融合中心(Fusion Center, FC)实现全局协作融合, 由 FC 作出频谱状态判决。业务感知的自适应协作频谱检测模型如图 1 所示, 频谱管理组件将新生的空闲频带匹配频谱特征库, 实现不同属性空闲频带的区管理, 为时延敏感业务接入分配稳定性有效空闲频谱, 吞吐量敏感业务接入分配带宽有效空闲频谱。

3.1 自适应协作频谱检测方法

根据 SU 位置信息和检测能力, 将 M 个 SU 节点分为 L 个簇分别进行协作频谱检测, 每个簇检测相应的 PUs 信道, 每个簇内有 N 个 SU 节点。为减少对主用户的干扰, IEEE 802.22 规定 SU 节点应在 2 s 内完成频谱检测, 系统检测概率 P_d 不小于 0.9, 虚警概率 P_f 不大于 0.1, 因此, 定义协作频谱检测中满足最小全局检测性能的 SU 信噪比区间为有效频谱检测区间, 即:

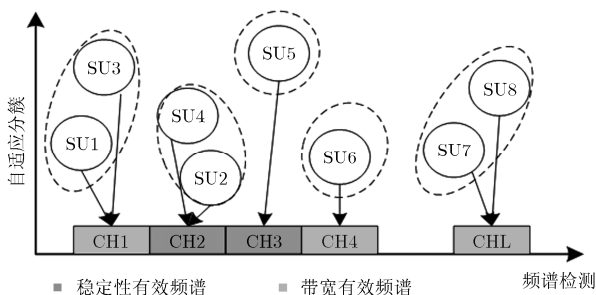


图 1 业务感知的自适应协作频谱检测模型

$$D_R = \{\text{SNR} \geq \gamma\} \quad (6)$$

其中, γ 是给定融合规则下协作 SUs 节点接收 SNR 门限。自适应协作方法在满足最小检测性能的基础上, 通过扩展有效频谱检测区间获得最大可用空闲频谱以最大化 SUs 业务接入和有 QoS 保障的业务传输, 即归纳为多约束条件下的有效检测区间最大化如下:

$$\begin{aligned} & \max_{\gamma, E, \zeta} D_R \\ & \text{s.t. C1: } Q_d \geq 0.9, Q_f \leq 0.1 \\ & \text{C2: } E = \min \left(\sum_{k=1}^L E_k \right), 1 \leq k \leq L \\ & \text{C3: } \zeta = \min \left(\sum_{k=1}^L \zeta_k \right), \zeta_k = \frac{n_k}{N_i} \cdot T_s, \\ & \quad 1 \leq i \leq M, 1 \leq k \leq L \end{aligned} \quad (7)$$

其中, Q_d 和 Q_f 为全局检测概率和全局虚警概率。 E 和 ζ 分别为检测周期内总能耗和总检测开销, E_k 和 n_k 分别为第 k 簇内节点能耗和参与本轮协作频谱检测的 SUs 节点数。 ζ_k 为第 k 簇的检测开销, N_i 为第 k 簇内节点总数, T_s 为频谱检测时间。条件 C1 保证频谱检测的最小性能要求, C2 和 C3 保证频谱检测系统具有最小的能量消耗和最优的无线频谱效率。

在满足系统检测性能指标的条件下, 通过自适应信道状态的协作模式选择, 最小化协作检测要求的 SNR 门限, 以最大化有效检测区间。定义全局频谱检测有效指数为 $I = Q_d / Q_f$, 则 SUs 节点自适应协作门限 γ_T 为

$$\gamma_T = \frac{9}{I} \gamma, \quad \gamma = \gamma_{\text{or}} \text{ or } \gamma_{\text{and}} \quad (8)$$

其中, I 为前一周期全局检测性能指标 Q_d 和 Q_f 更新值, γ_{or} 和 γ_{and} 分别是 OR 和 AND 融合规则下分簇协作频谱检测模式要求的最小 SNR 门限。在条件 C1 约束下, 有效指数 I 将不小于 9, 由式(8)知, 自适应协作 SNR 门限 γ_T 将不大于分簇协作 SNR 门限 γ , 因此, 式(7)最大化有效检测区间的解存在。

设分簇内节点数为 N_i , 由式(2)可得 OR 融合规则分簇协作频谱检测时簇内 SU 平均检测概率 $\overline{P_d^{\text{or}}}$ 和平均虚警率 $\overline{P_f^{\text{or}}}$ 分别为

$$\overline{P_d^{\text{or}}} = 1 - \sqrt[N_i]{1 - Q_d}; \quad \overline{P_f^{\text{or}}} = 1 - \sqrt[N_i]{1 - Q_f} \quad (9)$$

设瑞利衰落信道中, 独立 SU 节点检测概率和虚警率分别为 $P_{d,\text{Ray}}$ 和 $P_{f,\text{Ray}}$, 令 $P_{f,\text{Ray}} = \overline{P_f^{\text{or}}}$ 求得能量检测门限 λ_{or} , 令 $P_{d,\text{Ray}} = \overline{P_d^{\text{or}}}$ 求得分簇协作节点 SNR 最小门限值为 $\gamma_{\text{or}} = f_{\text{or}}(\lambda_{\text{or}}, u, \overline{P_d^{\text{or}}})$, 其中, u 为能量检测器的时间带宽积, 此时, 有效检测区间为 $D_R^{\text{or}} = \{\text{SNR} \geq \gamma_{\text{or}}\}$ 。同理, 由式(3)可得 AND 融合

规则分簇协作频谱检测时，簇内 SU 平均检测概率 $\overline{P}_d^{\text{and}}$ 和平均虚警率 $\overline{P}_f^{\text{and}}$ 分别为

$$\overline{P}_f^{\text{and}} = N_f \sqrt{Q_f}; \quad \overline{P}_d^{\text{and}} = N_f \sqrt{Q_d} \quad (10)$$

令 $P_{f,\text{Ray}} = \overline{P}_f^{\text{and}}$ 求得能量检测门限 λ_{and} ，令 $P_{d,\text{Ray}} = \overline{P}_d^{\text{and}}$ 求分簇协作节点 SNR 最小门限为 $\gamma_{\text{and}} = f_{\text{and}}(\lambda_{\text{and}}, u, \overline{P}_d^{\text{and}})$ ，此时，有效检测区间为 $D_R^{\text{and}} = \{\text{SNR} \geq \gamma_{\text{and}}\}$ 。

根据 SUs 节点检测指定信道的实时状态，算法通过调整 γ_T 实现全局最优的协作频谱检测模式选择，如图 2 所示。算法执行过程为：首先，所有 SUs 节点在其具有最大接收 SNR 的指定信道中建立分簇，推举簇首 CH，分别计算 OR 和 AND 融合规则下分簇协作频谱检测要求的最小 SNR 门限 γ_{or} 和 γ_{and} 。其次，根据上一周期检测性能 (Q_d 和 Q_f) 计算全局频谱检测有效指数 I (初始值 $I_0 = 9$)，更新自适应协作门限 γ_T 为 γ_{Tor} 和 γ_{Tand} 。随后，比较分簇簇首 SNR 与 γ_{Tor} 值，若 $\text{SNR} < \gamma_{\text{Tor}}$ ，选择 OR 规则全节点协作检测模式。否则，进一步与 γ_{Tand} 比较，若 $\text{SNR} \in [\gamma_{\text{or}}, \gamma_{\text{and}}]$ ，选择分簇协作模式，由簇首代表分簇检测指定信道 PU 状态并上传至数据融合中心 FC，并应用 OR 规则进行协作融合判决。若 $\text{SNR} \geq \gamma_{\text{and}}$ ，选择 AND 规则分簇协作检测模式，以减小全局虚警概率。最后，FC 将全局判决结果回传给分簇簇首，由簇首在本簇内广播指定信道状态。在不同信道和信道状态中，SUs 节点检测结果具有差异性，在满足系统最低性能条件下，算法通过调整协作门限 γ_T 选择差异化的协作检测模式以最大化有效检测区间 $D_{\text{RT}} = \{\text{SNR} \geq \gamma_T\}$ ，得到尽可能多的空闲信道。

为评估自适应协作对有效检测区间的影响，定义系统有效检测区间偏移量为

$$\varepsilon = D_{\text{RT}} - D_R = \{\gamma_T - \gamma\} = \left\{ \gamma \left(\frac{9}{I} - 1 \right) \right\} \quad (11)$$

其中， D_R 为 D_R^{or} ($\gamma = \gamma_{\text{or}}$) 或 D_R^{and} ($\gamma = \gamma_{\text{and}}$)。在全局检测性能满足 C1 约束条件下，当 $I = Q_d / Q_f < 9$ 时，偏移量 $\varepsilon > 0$ ，系统调节协作模式以最大化有效检测区间，获得尽可能多的可用空闲信道数。当 $I = Q_d / Q_f > 9$ 时，偏移量 $\varepsilon < 0$ ，通过减小有效检测区间来满足系统约束条件，取得全局最优化。

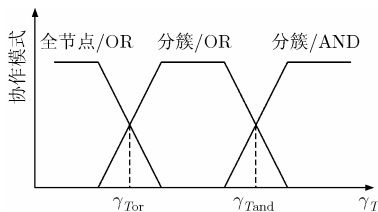


图2 自适应协作模式

3.2 业务匹配的频谱管理

基于次用户业务的时延和吞吐量差异化属性，相应地选择空闲频带的有效带宽 B_A 和稳定指数 ψ 描述空闲信道的特征，实现业务感知的频谱管理。设频谱检测时间为 T_s ，SU 在空闲频带中传输业务数据时间为 T_t ，则系统频谱感知效率 η 为

$$\eta = T_t / (T_t + T_s) \quad (12)$$

设第 k 信道带宽为 $B(k) = W_k \cdot \log_2(1 + \text{SNR}_k)$ ， W_k 为第 k 信道物理带宽，其有效带宽 $B_A(k)$ 为

$$B_A(k) = \eta \cdot B(k) \quad (13)$$

由于 PU 随机地占用或退出授权频带，将 PU 行为建模为两状态转移的生灭过程，忙周期为 T_{ON} ，空闲周期为 T_{OFF} ，且 $T_{\text{ON}} + T_{\text{OFF}} = 1$ ，则第 k 信道的频谱稳定指数 $\psi_k, k = 1, 2, \dots, L$ 为

$$\psi_k = T_{\text{OFF}} / (T_{\text{ON}} + T_{\text{OFF}}) \quad (14)$$

频谱有效带宽 B_A 是空闲信道的可用带宽，反映了空闲信道能为接入业务提供的有效传输速率，而频谱稳定指数 ψ 是 PU 空闲周期状态，反映了空闲信道能为接入业务提供持续传输的机会，因此，基于有效带宽和稳定指数构建频谱特征库实现业务感知的频谱划分，如图 3，共分为 4 类空闲信道，其中 ψ_T 为稳定指数门限 (主用户占用授权频带的统计平均概率)， R_F 为业务感知门限， W 为信道物理带宽，且设最小 B_A 均满足时延敏感业务最小速率要求。当空闲信道特征指数位于 $S4 = \{S \mid (R_F > B_A(k)) \cap (\psi_k < \psi_T)\}$ 子空间时，频谱管理组件放弃该类信道的机会接入以减小对 PU 干扰。

4 业务感知的频谱分配

在时变衰落信道中，根据可用信道质量可通过自适应调制最优化信息传输速率，保证通信信道的传输质量。而业务感知的频谱分配方法能为接入业务分配 QoS 匹配的可用信道，改善业务端到端的传输质量。

4.1 业务感知的频谱分配方法

通过关联频谱特征和接入 SUs 业务 QoS 需求进行差异化信道选择，如图 4 所示。频谱管理组件通

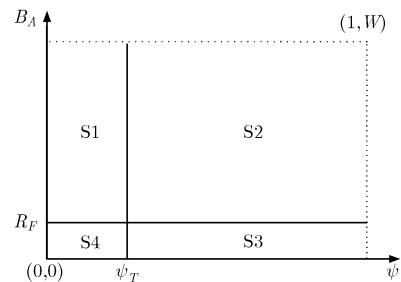


图3 频谱划分模型

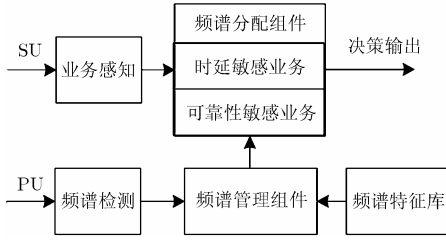


图 4 业务感知的频谱分配模型

过频谱特征库匹配将可用信道分为稳定性有效频谱和带宽有效性频谱，构建业务属性关联的可用频谱空间进行管理。基于业务感知门限和稳定指数门限划分空闲频谱空间得到可用频谱子空间 S1~S3:

$$S1 = \{S | (R_F \leq B_A(k)) \cap (\psi_k < \psi_T)\} \quad (15)$$

$$S2 = \{S | (R_F \leq B_A(k)) \cap (\psi_k \geq \psi_T)\} \quad (16)$$

$$S3 = \{S | (R_F > B_A(k)) \cap (\psi_k \geq \psi_T)\} \quad (17)$$

其中，第 k 信道频谱特征指数分别为 $B_A(k) \in (0, W_k)$, $\psi_k \in (0, 1)$ 。根据美国联邦通信委员会统计，3 GHz 以下频谱利用率低于 30%，因此，取稳定指数门限 $\psi_T = 0.3$ ，业务感知门限 R_F 由接入链路状态确定。频谱分配组件从与业务请求 QoS 匹配的可用频谱空间中为 SUs 选择接入信道。频谱分配算法为：当 SU 请求接入业务为时延敏感业务时，分配组件优先从频谱子空间 S3 中分配可用信道，次选子空间 S2 中可用信道；当 SU 为吞吐量敏感业务时，分配组件优先分配频谱子空间 S1 中可用信道，次选 S2 子空间可用信道；当两类业务竞争接入 S2 频带时，时延敏感业务具有相对优先权 (Non-preemptive priority)。

在多业务综合承载的无线网络中，对保障接入业务传输质量的需求比最大化吞吐量的需求要多。因此，在为时延敏感 SU 业务选择稳定指数高的空闲信道接入时，有效带宽作为次要条件，以减小业务中断概率为优化目标。在为吞吐量敏感 SU 业务选择有效带宽大的空闲信道时，频谱稳定指数作为次要条件，以最大化次用户吞吐量为优化目标。同类业务间基于 CSMA/CA 竞争接入空闲信道。

4.2 时延敏感业务的中断概率分析

对于无线信道 k , PU 建模为通断 Markov 链^[6], ON 表示 PU 占用频带 k 状态，其以概率 α_k 持续占用该频带，以概率 $1 - \alpha_k$ 退出频带 k , OFF 表示频带 k 空闲状态，其以概率 β_k 继续空闲，以概率 $1 - \beta_k$ 占用该频带，且有 $\alpha_k, \beta_k \in [0, 1]$ ，则系统状态转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} \alpha_k & 1 - \alpha_k \\ 1 - \beta_k & \beta_k \end{bmatrix} \quad (18)$$

由相应概率母函数的级数展开可求得系统忙周期和空闲周期分别为

$$T_{ON} = \frac{1}{1 - \alpha_k}; \quad T_{OFF} = \frac{1}{1 - \beta_k} \quad (19)$$

在第 k 频带上，PU 优先占用，SU 机会使用该频带，则第 k 频带中业务建模为抢占型优先排队模型。在系统稳态平衡时，PU 从空闲周期转移到忙周期将导致 SU 业务传输中断，即 PU 从 OFF 状态经 n 步转移到 ON 状态概率为

$$P_{OFF-ON}(n) = \beta_k^{n-1}(1 - \beta_k) \quad (20)$$

此时，系统空闲频谱稳定指数 ψ_k 为

$$\psi_k = \frac{T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}} = \frac{1 - \alpha_k}{2 - \beta_k - \alpha_k} \quad (21)$$

业务感知频谱分配方法基于可用频谱空间分布特征为 SUs 选择 QoS 保障的空闲信道，则实时业务传输中断概率 P_{ot} 为

$$P_{ot}(n) = [1 - P_f(\lambda_k)] \cdot \psi_k \cdot \beta_k^{n-1}(1 - \beta_k) \quad (22)$$

其中， $P_f(\lambda_k)$ 为能量检测门限为 λ_k 时的第 k 频带虚警率。

5 仿真计算与分析

针对高信噪比和低信噪比两种瑞利衰落信道特征，仿真统计比较了所提算法、固定分簇协作检测算法及文献[4]中自适应门限协作频谱检测算法的有效频谱检测区间。设主用户信号为 QPSK 调制信号，检测周期为 50 ms，考虑 SU 实际有限能量、单个簇内节点数上限为 9 的要求，仿真取时间带宽积为 5，生成 25 个 SUs，划分为 5 个节点簇。由式(9)和式(10)可计算出固定分簇协作时分簇门限值分别为 $\gamma_{or} = 1.3$ dB 和 $\gamma_{and} = 6.2$ dB，则固定分簇协作频谱检测算法据此门限进行协作融合，所提算法根据式(8)进行动态协作选择融合，文献[4]自适应门限根据文中式(20)计算得到。当簇首信噪比均小于 γ_{or} 时，分簇协作不能满足系统检测性能下限，均退化为全节点协作 OR 规则融合模式，没有对该信道条件下检测性能进行比较。

针对低信噪比状态，设簇内 SUs 节点信噪比取值范围为 $[-4, 6]$ dB，且保证 4 个分簇中每个簇至少有一个节点 $SNR \in [\gamma_{or}, \gamma_{and}]$ ，1 个分簇中所有节点信噪比在取值范围内随机取值，则融合中心选择 OR 融合规则，3 种协作算法的系统检测区间分布如图 5。针对高信噪比状态，设簇内 SUs 节点信噪比取值范围为 $[0, 10]$ dB，且保证 4 个簇中每个簇至少有一个节点 $SNR \geq \gamma_{and}$ ，1 个簇中所有节点信噪比在取值范围内随机取值，则融合中心选择 AND 融合规则，3 种协作算法的系统检测区间分布如图 6 所示。

图 5 显示, 在 C1 约束条件下, 相较于固定分簇协作算法, 本文所提算法有效检测区间 ($D_R = \{SNR \geq \gamma\}$) 扩大约 25%, 且在有效检测区间内系统检测概率平均提高 5.34%。相较于自适应门限协作算法, 本文所提算法有效检测区间扩大约 10%。仿真中设置 1 个簇节点 SNR 随机取值, 当该簇所有节点 SNR 均小于 1.3 dB 时, 本文算法选择该簇退出检测而仅由 4 个簇进行协作检测, 以避免因少量信道恶化导致全局检测性能降级。当所有簇首 SNR 分布在门限值 1.3 dB 附近, 全局虚警率高于 0.1 门限时, 将采用全节点协作模式, 以增大约束条件 C2 和 C3 为代价换取检测性能的提高。

图 6 显示, 在满足 C1 条件下, 本文算法通过降低对分簇协作 SNR 门限要求, 优化 C2 和 C3 约束条件, 扩展有效频谱检测区间。当簇首 SNR 分布于门限值 $\gamma_{and} = 6.2$ dB 附近时, 采用 AND 融合规则能减小虚警率, 但也会降低系统检测概率, 导致系统进入有效检测区间之外, 算法通过延缓使用 AND 融合规则, 保证系统处于有效工作状态。相较于固定分簇协作算法, 有效检测区间扩大约 20%, 且全局虚警率平均减小 1.72%; 相较于自适应门限协作算法, 有效检测区间扩大约 17%。仿真假定一个簇随机地处于信道恶化状态, 导致固定分簇协作算法不能动态调整协作节点的选择, 系统检测性能受该簇首影响而较差。高信噪比时, 单节点具有较高的检测能力, 自适应门限协作检测算法仅当单节点处于恶劣信道状态时调整门限选择协作节点, 全局检测性能最优。

为比较业务匹配的频谱分配方法对 SUs 接入业务 QoS 性能的改善, 仿真设 25 个 SUs 接入语音 (RT: Real Time, 64 kbps 和 1 Mbps) 和数据 (BE: Best Effort, 10 Mbps 和 2 Mbps) 对应为时延敏感和可靠性敏感业务, 业务区分速率界值随接入业务数变化。设系统频谱感知效率 $\eta = 0.9$, 系统有 3 个 WCDMA PUs 信道 (5 MHz) 和 2 个 GSM PUs 信道 (200 kHz),

GSM 信道的 PUs 按生灭概率 $\alpha_k, \beta_k \in [0,1]$ 随机生成, WCDMA 信道的 PUs 按生灭概率 $\alpha_k, \beta_k \in [0.5,1]$ 随机生成。基于频谱分配使用最佳用户信道选择算法 (Channel Selection then Best User Assignment, CSBUA)^[14], 将空闲信道 k 分配给当前信道检测概率 p_d^k 最大且 QoS 保障的 SU。设加权公平队列 (Weight Fair Queue, WFQ) 调度频谱决策算法中赋予时延敏感业务接入优先权, 权值固定为 0.8, 仿真比较了不同业务分布状态下时延敏感业务的中断概率, 如图 7。

图 7 显示, 两类算法的时延敏感业务中断概率均随时延敏感业务减少而降低, 但在时延敏感业务高密度分布状态下, WFQ 算法中断概率过大。由于其赋予时延敏感业务接入优先权, 此时, 导致过多时延敏感业务被接入 WCDMA 信道, 但该信道中 PUs 出现概率较大, 从而更多的 SUs 业务被迫中断传输, 而所提算法仅将部分速率较高的时延敏感业务接入 WCDMA 信道, 其中断概率明显减少。

6 结束语

在衰落信道中, 无差异化的频谱分配将增大接入业务的传输中断概率, 因此, 基于业务属性联合优化频谱检测与频谱分配, 实现业务接入与传输关联来优化频谱效率和业务端到端传输性能。在满足全局最小性能基础上, 自适应 SUs 节点检测能力, 通过全局检测指数对分簇协作门限信噪比进行加权以最大化有效检测区间, 获得最多的可用空闲频带, 仿真统计显示能扩展有效频谱检测区间约 20%。基于频带有效带宽和稳定指数特征实现业务感知的频谱管理和频谱分配, 为接入 SUs 业务分配能保证 QoS 传输的频带, 降低了时延敏感业务的中断概率。在高密度接入业务的无线网络中, 通过在具有电源供应的核心节点增加接入控制功能, 调节网络承载业务类型分布, 实现干扰约束下业务接入公平性和可靠性敏感业务吞吐量最大化有待进一步研究。此

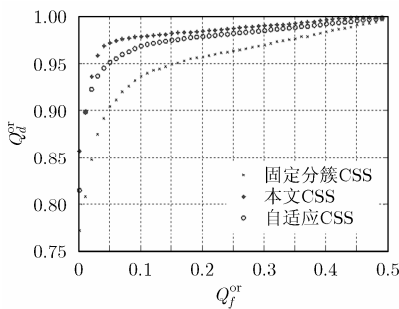


图 5 OR 准则低信噪比 ($\gamma_{or} \leq SNR < \gamma_{and}$) 时有效检测区间

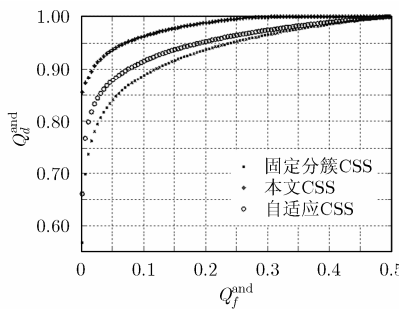


图 6 AND 准则高信噪比 ($\gamma_{and} \leq SNR$) 时有效检测区间

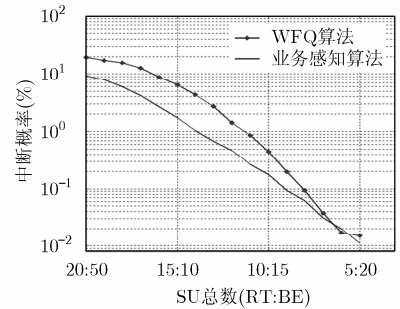


图 7 时延敏感业务中断概率

外, 基于链路公平速率的业务区分是绝对的业务区分, 对可变速率业务而言缺乏自适应性, 因此, 模糊业务感知下的频谱分配性能有待验证。

参 考 文 献

- [1] 岳文静, 郑宝玉, 孟庆民, 等. 衰落信道下提高协作频谱感知能力的方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(2): 207-218.
YUE Wenjing, ZHENG Baoyu, MENG Qingmin, *et al.* Robust cooperative spectrum sensing schemes for fading channels in cognitive radio networks[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2011, 41(2): 207-218.
- [2] MASOTA M T, MZYECE M, and NTLATLAPA N. Spectrum decision in cognitive radio networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(3): 1088-1107. doi: 10.1109/SURV.2012.111412.00160.
- [3] OMER A E. Review of spectrum sensing techniques in cognitive radio networks[C]. International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics & Embedded Systems Engineering, Khartoum, Sudan, 2015: 439-446. doi: 10.1109/ICCNEEE.2015.7381409.
- [4] SOBRON I, DINIZ P S R, MARTINS W A, *et al.* Energy detection technique for adaptive spectrum sensing[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(3): 617-627. doi: 10.1109/TCOMM.2015.2394436.
- [5] NALLAGONDA S, ROY S D, and KUNDU S. Combined diversity and improved energy detection in cooperative spectrum sensing with faded reporting channels[J]. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2016, 28(2): 170-183. doi: 10.1016/j.jksuci.2014.04.009.
- [6] LEE Dongjun. Adaptive random access for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(2): 831-840. doi: 10.1109/TWC.2014.2360857.
- [7] 于美婷, 赵林靖, 李钊. 基于 DS 证据理论的协作频谱感知改进方法[J]. 通信学报, 2014, 35(3): 168-173. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.03.019.
YU Meiting, ZHAO Linjing, and LI Zhao. Improved cooperative spectrum sensing scheme based on Dempster-Shafer theory in cognitive radio network[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(3): 168-173. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.03.019.
- [8] XU Yuhua, ALAGAN A, WU Qilmi, *et al.* Decision-theoretic distributed channel selection for opportunistic spectrum access: Strategies, challenges and solutions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 1689-1713. doi: 10.1109/SURV.2013.030713.00189.
- [9] JANATIEN N, HASHEMI M M, and SUN Sumei. Joint versus separate spectrum sensing and resource allocation in OFDMA-based cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications*, 2015, 10(7): 839-847. doi: 10.1049/iet-com.2015.0912.
- [10] RAKOVIC K, DENKOVSKI D, ATANASOVSKI V, *et al.* Capacity-aware cooperative spectrum sensing based on noise power estimation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(7): 2428-2441. doi: 10.1109/TCOMM.2015.2433297.
- [11] 刘俊彤, 王可人, 张兴良, 等. 基于不同需求等级改进的动态频谱分配算法[J]. 探测与控制学报, 2014, 36(1): 32-36.
LIU Juntong, WANG Keren, ZHANG Xingliang, *et al.* Improved dynamic spectrum allocation algorithm based on different levels of service demand[J]. *Journal of Detection & Control*, 2014, 36(1): 32-36.
- [12] 金顺福, 解洪亭, 赵媛. 带有组间切换的认知无线网络混合式信道分配策略及性能研究[J]. 通信学报, 2013, 34(12): 11-19. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2013.12.002.
JIN Shunfu, XIE Hongting, and ZHAO Yuan. Hybrid channel allocation strategy with group switching and performance evaluation in cognitive radio network[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(12): 11-19. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2013.12.002.
- [13] ZHAO Nan. Joint optimization of cooperative spectrum sensing and resource allocation in multi-channel cognitive radio sensor networks[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2016, 35(7): 2563-2583. doi: 10.1007/s00034-015-0153-9.
- [14] KHALD L and ANPALAGAN A. Adaptive assignment of heterogeneous users for group-based cooperative spectrum sensing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(1): 232-246. doi: 10.1109/TWC.2015.2469667.
- [15] RAHMAN D M, YOUSOF N, and KAUSHIK R C. Spectrum allocation and QoS provisioning framework for cognitive radio with heterogeneous service classes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(7): 3938-3950. doi: 10.1109/TWC.2014.2319307.
- [16] ZAMEN B, ABBAS Z H, and LI F Y. Spectrum occupancy and residual service analysis in CRNs using a multi-server queueing model[C]. IEEE 81st Vehicular Technology Conference, Glasgow, Scotland, 2015: 1-5. doi: 10.1109/VTCSpring.2015.7146102.

邱恭安: 男, 1973 年生, 博士、副教授, 主要研究方向为认知无线网络、车联网。

章国安: 男, 1965 年生, 博士、教授, 主要研究方向为认知车载无线网络。