

使次系统容量最大化的协作频谱感知性能分析及优化

李美玲^{1,2}, 袁超伟¹, 李琳¹, 杨睿哲³

(1. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024;

3. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘 要: 针对认知无线网络中 SU 数、检测门限、带宽、频谱利用率和次系统容量间关系的分析表明, 一方面 C-CSS 不仅可降低虚警率、提高频谱利用率, 还可利用较少的 SU 实现较高的次系统容量; 另一方面在 SU 数一定且满足目标要求时, C-CSS 与 T-CSS 实现最大次系统容量所要求的检测门限不同。提出协作频谱感知优化算法, 利用 NP 准则通过直接对数学模型求解即可得到使次系统容量最大的 SU 数和相应检测门限。理论分析和仿真结果均表明, 所提算法在保证目标检测率的前提下最大化了次系统容量。

关键词: 认知无线电; 协作频谱感知; 次系统容量; 带宽; 频谱利用; 检测门限

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)02-0053-08

Performance analysis and optimization of cooperative spectrum sensing for maximizing secondary throughput

LI Mei-ling^{1,2}, YUAN Chao-wei¹, LI Lin¹, YANG Rui-zhe³

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

3. College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The relationship among SU, detection threshold, bandwidth, spectrum utilization and secondary throughput in cognitive radio networks was analyzed, which indicates the lower false alarm probability, higher spectrum utilization and larger secondary throughput with less SU in C-CSS(censoring based cooperative spectrum sensing), besides, the required detection threshold for maximizing the secondary throughput different with the traditional CSS under given SU number and the objective demand. Based on the NP criticism, an optimal cooperative spectrum sensing algorithm for maximizing the secondary throughput was proposed by solving the mathematic model to obtain the optimal party of SU and detection threshold. Theoretical analysis and simulation results show that the maximized secondary throughput achieved by the proposed optimal algorithm, while maintaining the given detection probability.

Key words: cognitive radio; cooperative spectrum sensing; secondary throughput; bandwidth; spectrum utilization; detection threshold

1 引言

在认知无线网络(CRN, cognitive radio net-

works)中, 次用户(SU, secondary user)必须利用有效的频谱感知技术准确地感知空闲信道, 并在不干扰主用户(PU, primary user)的情况下选择最佳可用

收稿日期: 2010-07-06; 修回日期: 2010-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872149)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60872149)

信道接入, 提高频谱利用率^[1~4]。然而隐藏的终端问题, 往往使得 SU 无法准确地检测出 PU 是否存在。协作频谱感知 (CSS, cooperative spectrum sensing) 利用分集作用可有效解决上述问题, 近年来很多学者对此进行了研究^[5~14]。

文献[5~7]研究了用户间的协作即感知分集阶数对感知性能的影响; 文献[8]从频谱感知的角度分析了干扰与频谱利用率的关系; 文献[9]和文献[10]研究了感知时间与次系统容量的关系。但以上研究都只是针对感知信道存在衰落的情况, 在实际中报告信道也存在衰落, 文献[11]首次指出报告信道衰落会对 CSS 性能产生影响。而以上研究均有一个共同的结论, 即 SU 越多 CSS 性能越好。但文献[12]和文献[13]指出随着 SU 数的增加, 发送本地感知结果占用的控制信道带宽会增加, 从而会占用较多的系统资源。在本地频谱感知后利用删余发送方式可节约发送本地感知结果占用的控制信道带宽, 节约系统资源^[13]。文献[14]以频谱检测时最小化系统总的误码率为目标研究了最佳的 SU 数, 使得在系统检测性能和控制信道带宽方面进行折中。在 CSS 中, 衡量频谱感知性能好标准有 2 种: 一是确保主用户受一定保护即给定目标检测率下, 使虚警率最小化; 二是在给定目标虚警率下使检测率最大化^[15,16]。而系统总的误码率包括虚警率和漏检率 2 部分, 如果从实际应用角度考虑, 固定其中一个性能参数而优化另外一个的话, 按照文献[14]中的方法, 不论采用何种决策规则均无法从理论上找到最佳的 SU 数。此外, 检测门限也是影响感知性能好坏的一个关键因素。

本文主要从 SU 的角度研究系统性能, 针对感知信道和报告信道均存在衰落的情况, 综合分析 CRN 中的 SU 数、检测门限、带宽、频谱利用率和次系统容量之间的关系, 研究 CRN 中的以下 2 个问题: 第一, 感知分集阶数与频谱利用率、次系统容量的关系。感知分集阶数越大, 即协作的 SU 越多, 发现空闲谱的机会越大, SU 的接入机会增加, 从而可提高次系统容量; 但另一方面, 感知分集阶数越大, 发送本地感知结果占用的控制信道带宽越多, 用于传输的带宽越少, 信道的利用效率会降低, 从而降低次系统的容量。因此需要研究如何用尽可能少的 SU 实现较高的次系统容量, 并尽可能地节约控制信道带宽。第二, 检测门限与检测性能、次系统容量的关系。在频谱感知过程中, 检测门限的

选择直接影响到检测性能。检测门限越低, 检测率越高, 检测性能越好, PU 受保护程度越强; 但同时虚警率也增大, 对 SU 而言其接入机会减少, 信道被重利用的概率降低从而会降低次系统的容量。因此如何设计合理的检测门限既能使得 PU 受保护又能使次系统容量最大化值得进一步研究。

针对以上问题, 本文以检测率来衡量 PU 受保护的程^[5~7], 以虚警率来衡量频谱利用率^[8], 在感知信道和报告信道均存在衰落的情况下, 深入研究带宽、频谱利用率、次系统容量与 SU 数和检测门限之间的关系。研究发现, 一方面, 基于删余的协作频谱感知(C-CSS, censoring based CSS)不仅可有效节约控制信道带宽、降低虚警率, 而且还可以利用较少的 SU 实现较高的次系统容量; 另一方面, 次系统可获得的容量本质上受 SU 数和检测门限的影响, 而且当 SU 数一定时, 为了保证目标检测率, C-CSS 与 T-CSS 使次系统容量达到最大时所要求的检测门限是不同的。鉴于此, 本文以次系统容量为优化目标, 进一步对最优检测门限的选择进行了讨论, 基于 NP 准则提出了基于最优检测门限的最优化算法, 算法在保证目标检测率的前提下有效地最大化了次系统容量。仿真结果与理论分析相一致。

2 系统模型与分析

2.1 模型介绍

本文考虑集中式认知无线电系统的协作频谱感知过程。设 H_0 和 H_1 分别表示 PU 未占用信道和占用信道 2 种假设状态。SU_{*i*} ($i=1,2,\dots,N$) 采用能量检测法独立地执行本地频谱感知, 并将本地决策结果 $D_i(D_i \in \{0,1\})$ 通过报告信道发送到 CR 融合中心(FC, fusion center)。

本地感知结果可以以 TDMA 方式发送到 FC, 即每个时隙只允许一个 SU 发送其本地决策结果到 FC, 如图 1(a)所示, 当发送的本地决策值数 M 增加时, 发送本地感知结果占用的报告时间 τ_r 增加, 从而总的感知时间会增加, 这样在周期性的频谱感知中当 PU 返回欲占用信道时 SU 却不会及时退出信道, 从而会对主信号产生干扰^[12]。为了确保 PU 受到足够保护不会被干扰, 可通过在正交频带上并行的发送本地决策值以解决由于感知时间长而对主信号造成干扰的问题^[6,7,12]。本文考虑以 OFDMA 方式发送本地感知结果, 其发送方式如图 1(b)所示, 带宽资源用子带衡量。

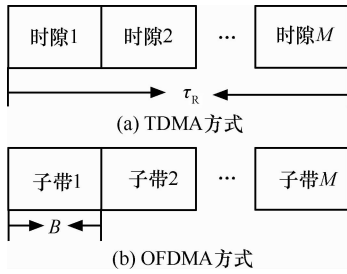


图1 本地感知结果发送模式

传统 CSS 中^[12], SU_i 执行本地频谱感知时, 不论 SU_i 检测的能量值 Y_i 是否大于预定义的门限值 λ_i , 都将决策值发送到 FC, 当能量值大于门限值时发送 “1”, 小于门限值时发送 “0”。而决策值 “0” 实际上对融合结果不起作用。显然, 传统算法中发送本地决策值将会浪费很多带宽。为了节约资源, 提出一种基于删余的协作频谱感知(C-CSS), 只有当 SU_i 检测的能量值大于预定义的门限值时(即 SU_i 的本地判决值 D_i 为 “1” 时)才将本地决策值发送到 FC, 否则 SU_i 将不发送任何值, 而继续检测 PU 信号或保持休眠状态。

为方便后面的分析比较, 这里用 M_C 表示 C-CSS 中实际发送的本地决策值数, 并认为 SU 收到的信号是独立同分布的。则按照模型中对实际发送的本地决策值数的描述, 根据贝叶斯原理, M_C 的均值可由式(1)计算:

$$M_C = \lceil N(P_0 P\{Y > \lambda | H_0\} + P_1 P\{Y > \lambda | H_1\}) \rceil \quad (1)$$

其中, P_0 表示信道空闲, 即信道未被 PU 占用的概率, P_1 表示信道被 PU 占用的概率, 且 $P_0 + P_1 = 1$; $\lceil \cdot \rceil$ 表示上取整。

假设报告信道上的错误传输概率为 p_e , 则 C-CSS 中经报告信道后单个 SU 的本地虚警率 $P_{f,c}$ 和检测率 $P_{d,c}$ 分别为

$$P_{f,c} = P\{Y > \lambda | H_0\}(1 - p_e) = p_f(1 - p_e) \quad (2a)$$

$$P_{d,c} = P\{Y > \lambda | H_1\}(1 - p_e) = p_d(1 - p_e) \quad (2b)$$

其中, p_f 和 p_d 分别为感知信道为瑞利衰落信道下单个 SU 的本地虚警率和检测率^[12]。

最后, FC 对收到的所有值融合并作出最终的决策。这里采用 k/n 规则进行融合^[5,16], 则 C-CSS 的虚警率 $Q_{f,c}$ 和检测率 $Q_{d,c}$ 可计算如下:

$$Q_{f,c} = \sum_{i=K_C}^{M_C} \binom{M_C}{i} P_{f,c}^i (1 - P_{f,c})^{M_C - i} \quad (3a)$$

$$Q_{d,c} = \sum_{i=K_C}^{M_C} \binom{M_C}{i} P_{d,c}^i (1 - P_{d,c})^{M_C - i} \quad (3b)$$

其中, $K_C \in \{1, 2, \dots, M_C\}$ 。

为了方便后面的比较分析, 这里给出 T-CSS 的虚警率 Q_f 和检测率 Q_d ^[11,12]:

$$Q_f = \sum_{i=K}^M \binom{M}{i} \left((1 - 2p_e)p_f + p_e \right)^i \left(1 - \left((1 - 2p_e)p_f + p_e \right) \right)^{M-i} \quad (4a)$$

$$Q_d = \sum_{i=K}^M \binom{M}{i} \left((1 - 2p_e)p_d + p_e \right)^i \left(1 - \left((1 - 2p_e)p_d + p_e \right) \right)^{M-i} \quad (4b)$$

其中, $M=N$ 为 T-CSS 中实际发送的本地决策值数。

2.2 问题分析

问题 1 在 CRN 中, 通过对空闲谱的检测概率可以衡量频谱的利用情况^[8]。空闲谱被正确检测的概率由 $1 - Q_f$ 决定, Q_f 越小, 空闲谱被正确检测的概率越高, 频谱被充分利用的可能性就越高。由 2.1 节的描述可知, Q_f 与本地检测门限 λ 及实际发送的本地决策值数 M 有关。当 λ 一定, 也即 p_f 给定时, Q_f 为 M 的单调增函数, 因此 M 越小, Q_f 越低, 频谱利用率越高; 而当 M 一定时, 检测门限 λ 设置的越高, 本地虚警率 p_f 越小, 则虚警率 Q_f 越低, 频谱利用率就越高, 但同时检测率也下降, 这就会对 PU 造成干扰。可见, 虚警率和检测率均受 M 与 λ 的双重影响, 而 M 与 λ 本身有着内在联系。因此, M 与 λ 存在一个折衷问题。

问题 2 在 CRN 中 SU 接入信道有 2 种情况: 一是 PU 未占用信道即信道空闲, 且 SU 正确检测出空闲信道, 其发生概率为 $P_0(1 - Q_f)$; 二是 PU 占用信道但 SU 未检测出信道被占用, 其发生概率为 $P_1(1 - Q_d)$ 。用 δ_0 和 δ_1 分别表示信道空闲和信道被占用时次系统可获得的容量。则从频谱感知的角度, 带宽与次系统平均容量的关系可表示为

$$\begin{aligned} C &= \frac{W - MB}{W} \delta_0 P_0 (1 - Q_f) + \frac{W - MB}{W} \delta_1 P_1 (1 - Q_d) \\ &= \frac{W - MB}{W} (\delta_0 P_0 (1 - Q_f) + \delta_1 P_1 (1 - Q_d)) \\ &= (1 - M\alpha) (\delta_0 P_0 (1 - Q_f) + \delta_1 P_1 (1 - Q_d)) \\ &= \delta_0 P_0 (1 - M\alpha) (1 - Q_f) + \delta_1 P_1 (1 - M\alpha) (1 - Q_d) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\alpha = B/W$ 表示发送 1bit 本地决策值占用的控制信道带宽 B 与总带宽 W 的比值。

在实际的频谱共享场合，更为关注的是在 PU 得到一定保护前提下，如何尽可能增加 SU 充分利用频谱的机会，提高次系统的容量。对于我们需要的特定场合给定目标检测率 \bar{Q}_d 时，对 C 起主要影响的为式 (5) 中左边一式。为方便分析，定义归一化容量为

$$\tilde{C}(\lambda) = (1 - M\alpha)(1 - Q_f(\lambda)) \quad (6)$$

可以看出，次系统容量受 M 与 Q_f 的双重影响。一方面， M 越小，用于传输数据的可用带宽越多，次系统可获得的容量就越高。由于 $M_c \leq M$ ，因此 C-CSS 方案可减少发送的本地决策结果数，节约控制信道带宽，降低虚警率，提高次系统的容量；另一方面，为了满足目标检测率，要求本地检测率 $p_{d,C} \geq p_d$ ，故 C-CSS 中满足目标要求的检测门限相比 T-CSS 方案较低，这样 C-CSS 的本地虚警率 $p_{f,C}$ 又会增加，所以最终 $Q_{f,C}$ 是增大还是减小无法直接确定，因而次系统容量如何变化也不确定。后面的仿真结果表明，在 λ 一定的情况下，C-CSS 相比 T-CSS 虚警率降低，次系统容量提高。当达到目标检测率 $\bar{Q}_d = 0.9$ 的要求时，C-CSS 方案要求的检测门限更低，但次系统容量却不会因此而降低，也就是说 C-CSS 可以利用较少的 SU 获得较高的次系统容量。

3 优化算法

3.1 优化模型

针对 2.2 节的问题，一方面由于 C-CSS 相比 T-CSS 方案实际发送的本地决策值数可能会减少即 M 减小，导致在相同检测门限 λ 下二者次系统容量不同；另一方面，在满足相同目标检测率前提下，实现最大次系统容量时，C-CSS 需求的 SU 和相应的检测门限均不同于 T-CSS。因此不论是 T-CSS 还是 C-CSS，其中的 M 与 λ 对次系统容量的影响是相互关联的，即存在优化的 (M, λ) 对可以在保证目标检测率的前提下使次系统容量最大化。

由式(6)知， \tilde{C} 是 λ 的函数，所以根据 NP 准则^[17,18]，上述优化问题转化为以下约束问题：

$$\begin{cases} \max_{\lambda} \tilde{C}(\lambda) = (1 - M\alpha)(1 - Q_f(\lambda)) \\ \text{s.t. } Q_d \geq \bar{Q}_d \end{cases}$$

给定 M ，选择某一检测门限 λ_0 ，使得 $Q_d(\lambda_0) = \bar{Q}_d$ ，选取任一门限 $\lambda_1 \leq \lambda_0$ ，有 $Q_d(\lambda_1) \geq Q_d(\lambda_0)$ ， $Q_f(\lambda_1)$

$\geq Q_f(\lambda_0)$ ，因而 $\tilde{C}(\lambda_1) \leq \tilde{C}(\lambda_0)$ ，所以约束条件中等号成立时对应的变量值为优化值，即 λ_0 可以在保证目标检测率的前提下最大化次系统容量。

在传统算法中，优化值是通过仿真而获得。首先求出所有检测门限相应的目标值(检测率或虚警率)，然后逐一比较从而得到使目标值最大或最小时的最优检测门限值，这种方法虽然可以在后台运行实现，但不灵活。而本文提出的优化算法可以直接通过对数学模型求解得到最优的检测门限值，因此更具有灵活性和适用性。

3.2 算法设计

虽然 C-CSS 方案与 T-CSS 方案实际发送的本地决策值数不同，但它们都与 N 有关，而本文所关注的也是感知分集阶数 N 与检测门限 λ 和其他性能参数之间的关系问题。优化目标为次系统容量 \tilde{C} 的最大化，其本质也是与 N 和 λ 有关，故本文优化算法的具体处理过程如下。

1) 对于每一个 N ，采用一定的算法寻找其相应的最优检测门限 λ_N^{opt} 。根据上节对最优值的分析可知，最优的检测门限值 λ_N^{opt} 可采用多种算法通过求方程 $Q_d(\lambda) = \bar{Q}_d$ 的根获得。其中 Newton-Raphson 法具有较快的收敛速度，但其需要有精确的迭代函数表达式^[10,18]。由第 2 节的描述可知， Q_d 可精确地表示为 λ 的函数，因而采用 Newton-Raphson 法能够寻找到每个 N 对应的最优的检测门限值 λ_N^{opt} ，从而求出优化的容量 $\tilde{C}^{opt}(\lambda_N^{opt})$ 。具体方法为，首先令 $g(\lambda_N^{opt}) = Q_d(\lambda_N^{opt}) - \bar{Q}_d$ ，此为利用 Newton-Raphson 法时需要确立的目标优化函数，然后按以下步骤执行。

第一步：选取精度 ε ，及初始点 $\lambda_N^{opt}(1)$ ，并令 $i=1$ ；

第二步：如果 $|g(\lambda_N^{opt}(i))| < \varepsilon$ ，停止；否则转到第三步；

第三步：令 $\lambda_N^{opt}(i+1) = \lambda_N^{opt}(i) - g(\lambda_N^{opt}(i)) / g'(\lambda_N^{opt}(i))$ 。然后，令 $i=i+1$ ，并执行第二步。

需要说明的是，在上述求解 λ_N^{opt} 的过程中，需要结合式(2b)和式(4b)综合进行。

2) 求出采用最优检测门限值 λ_N^{opt} 时相应的本地虚警率 $p_f^{opt}(\lambda_N^{opt})$ 和本地检测率 $p_d^{opt}(\lambda_N^{opt})$ 。

3) 利用第 2) 步的结果，根据式(4a)计算出采用最优检测门限值 λ_N^{opt} 时相应的总的虚警率 $Q_f^{opt}(\lambda_N^{opt})$ 。

4) 利用第 3)步的结果，由式(6)计算最优的归一化容量 $\tilde{C}^{\text{opt}}(\lambda_N^{\text{opt}})$ 。

对于 C-CSS 方案求最优值的过程，比较得知， $M_C \leq M$ ，为了满足目标检测率， $p_{d,c}^{\text{opt}} \geq p_d^{\text{opt}}$ ，故使 C-CSS 方案中的次系统容量达到最大值时的最优检测门限 $\lambda_{N,C}^{\text{opt}}$ 相比 T-CSS 方案可能会低，即 $\lambda_{N,C}^{\text{opt}} \leq \lambda_N^{\text{opt}}$ ，后面的仿真结果也说明了这一点。

4 仿真结果与分析

4.1 仿真说明

本文仿真结果主要包括 2 部分。第一部分为基本的仿真结果，旨在验证 C-CSS 与 T-CSS 在带宽、频谱效率与次系统容量方面的差别，并引出进而验证前面所提优化算法的合理性，包括图 2 和图 3；第二部分为采用优化算法后对 C-CSS 与 T-CSS 的比较，进一步验证 C-CSS 的优势，并说明 C-CSS 可以利用较少的 SU 实现较高的次系统容量。由于 C-CSS 中实际发送的本地决策值数与信道空闲概率和感知信道平均信噪比有关；而虚警率与感知信道平均信噪比和报告信道上的错误传输概率有关，所以仿真中也给出了这些性能参数对 C-CSS 与 T-CSS 各自具体影响情况不同的结果图，包括图 4、图 5 和图 6。

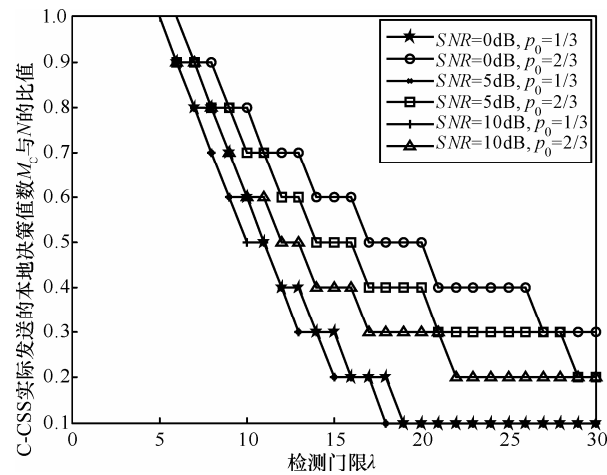
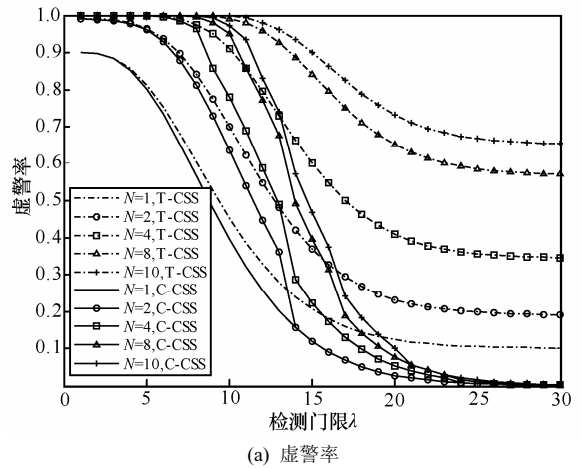


图 2 C-CSS 对带宽节约示意图

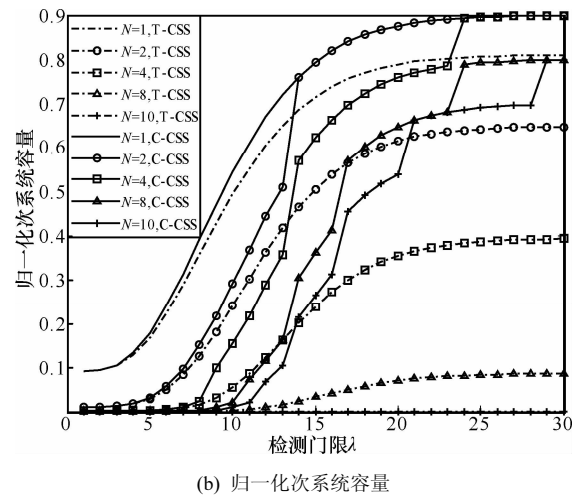
4.2 结果与分析

图 2 所示为 C-CSS 方案对带宽节约情况示意图。纵坐标为实际发送的本地决策值数与 SU 数之比 M_C/N ，横坐标为本地检测门限 λ (为归一化值^[14])。由图 2 可以看出，随着 λ 的增大， M_C/N 减小。事实上， λ 设置的越高， p_f 和 p_d 越低，本地判

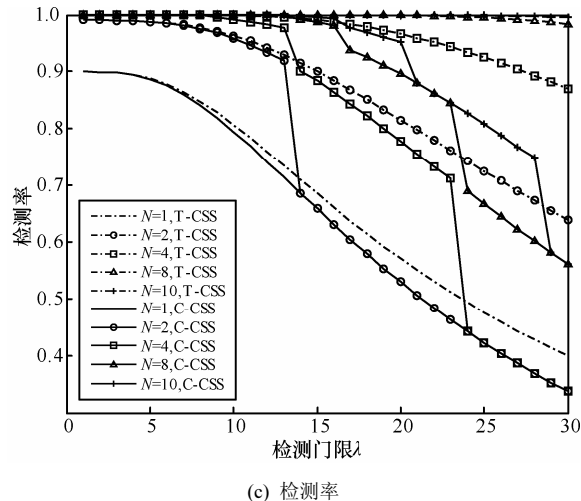
决为“1”的个数越少，实际发送的决策值数 M_C 相应的也越小，从而占用的控制信道带宽越少。由图 2 还可以看出，对于给定的 λ ，感知信道平均信噪比 SNR 越大，发送本地决策值占用的控制信道带宽越多；信道空闲概率 P_0 越大，发送本地决策值占用的控制信道带宽越少。



(a) 虚警率



(b) 归一化次系统容量



(c) 检测率

图 3 C-CSS 与 T-CSS 性能比较

图 3 所示为 C-CSS 方案与 T-CSS 方案性能比较图,图中实线表示 C-CSS 方案,虚线为 T-CSS 方案。仿真中取 $K=1, p_e=0.1, P_0=0.5, SNR=10\text{dB}, \alpha=0.1$ 。由图 3(a)和 3(b)可以看出,在门限一定时,C-CSS 方案可降低虚警率,大大提高次系统容量,且 N 越大,效果越明显。尤其当 $N=10$ 时,即 T-CSS 方案发送本地决策值占用带宽达到极限时,使得次系统容量为 0,而 C-CSS 方案中实际发送的本地决策值数小于 10,只占用一部分带宽,明显提高了次系统容量;另一方面,当 N 一定时,随着检测门限 λ 的提高,虚警率下降,次系统容量会增加,也就是说检测门限 λ 越大次系统容量越高,但同时从图 3(c)可以看到,随着检测门限 λ 的提高,检测率也会下降,而在达到目标检测率 $\bar{Q}_d = 0.9$ 时,C-CSS 方案要求的检测门限更低,但容量却不会因此而降低,其对比如表 1 所示。当 $N=2$ 时,为了满足目标检测率要求,虽然 T-CSS 的最优检测门限值 15 大于 C-CSS 的最优检测门限值 13,但前者 0.5 的次系统容量却不大于后者的 0.52,而当 $N=4$ 时这种差别更为明显。此外 $N=2$ 时 C-CSS 实现的次系统容量 0.52 大于 $N=4$ 时 T-CSS 实现的次系统容量 0.38。

表 1 C-CSS 与 T-CSS 最优检测门限及相应容量对比

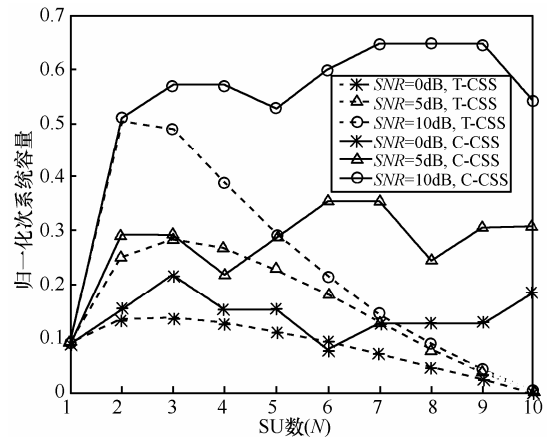
方案	SU 数 (N)	满足 \bar{Q}_d 的最优门限 λ	该 λ 处对应的归一化容量
T-CSS	2	15	0.5
	4	27	0.38
C-CSS	2	13	0.52
	4	14	0.9

总之,相同 N 下,为了满足目标检测率要求,C-CSS 方案相比 T-CSS 方案要求的检测门限更低;C-CSS 方案可以利用较少的 N 获得较高的次系统容量,节约控制信道带宽。

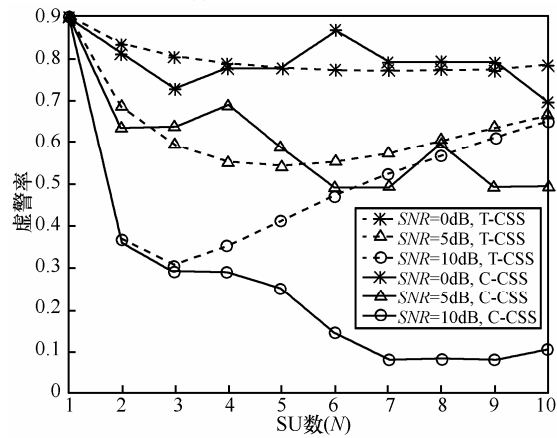
图 4 所示为不同感知信道平均信噪比下采用优化算法时 C-CSS 方案与 T-CSS 方案性能对比。4(a)为次系统归一化容量随认知用户数的变化情况。可以看出,当 N 一定时,随着 SNR 的增加,次系统容量增大。这主要是因为为了满足目标检测率,信噪比越高,要求的检测门限越高,目标虚警率 Q_f^{opt} 和 Q_{fc}^{opt} 越小,次系统容量越大,故 \tilde{C}_c^{opt} 与 \tilde{C}_c^{opt} 均增大;且 $\tilde{C}_c^{\text{opt}} > \tilde{C}_c^{\text{opt}}$,即采用 C-CSS 方案相比 T-CSS 方案可获得更高的次系统容量。

随着 N 的增大, \tilde{C}_c^{opt} 先增大后降低,这是因为,当 N 由 1 增为 2 时,由于分集作用,使得协作频谱检

测性能远远大于单点检测性能,即虚警率 Q_f^{opt} 会大大降低,因而 \tilde{C}_c^{opt} 迅速增大;当 N 继续增大时,发送本地决策结果占用的带宽会增加,且带宽增加对 \tilde{C}_c^{opt} 影响较大,因而 \tilde{C}_c^{opt} 又降低。而 C-CSS 方案中,由于 N 增大, M_C 也会相对增大,为了保证目标检测率要求, p_{dc}^{opt} 必须小,即应该将检测门限 $\lambda_{N,C}^{\text{opt}}$ 设的高点,从而 p_{fc}^{opt} 随之降低,而虚警率 Q_{fc}^{opt} 是增大还是减小取决于 M_C 与 p_{fc}^{opt} 对其影响程度。如图 4(a)和图 4(b)所示, Q_{fc}^{opt} 随着 N 的增大而降低,而 \tilde{C}_c^{opt} 基本呈增大趋势。



(a) 归一化次系统容量



(b) 虚警率

图 4 不同 SNR 下采用优化算法 2 种方案的性能比较

图 5 所示为不同 P_0 下采用优化算法时 C-CSS 方案与 T-CSS 方案性能对比。可以看出, T-CSS 方案的虚警率 Q_f^{opt} 和次系统容量 \tilde{C}_c^{opt} 与 P_0 无关。而 C-CSS 方案的虚警率 Q_{fc}^{opt} 随着 P_0 的增大而增大; \tilde{C}_c^{opt} 受 Q_{fc}^{opt} 与 M_C 的双重影响, M_C 越小, \tilde{C}_c^{opt} 越大; Q_{fc}^{opt} 越大, \tilde{C}_c^{opt} 越小。 \tilde{C}_c^{opt} 的具体变化情况如图 5(a) 所示, Q_{fc}^{opt} 的变化情况如图 5(b) 所示。

图 6 所示为报告信道上传输有误 ($p_e=0.1$) 和

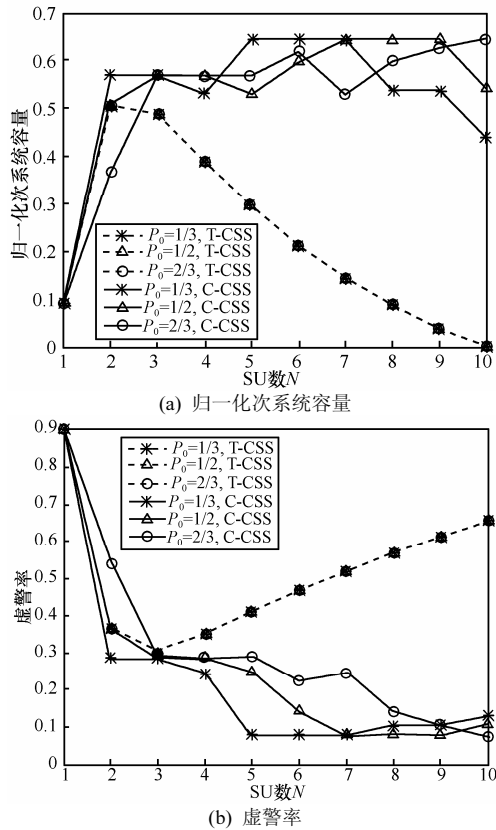


图 5 不同 P_e 下采用优化算法 2 种方案的性能比较

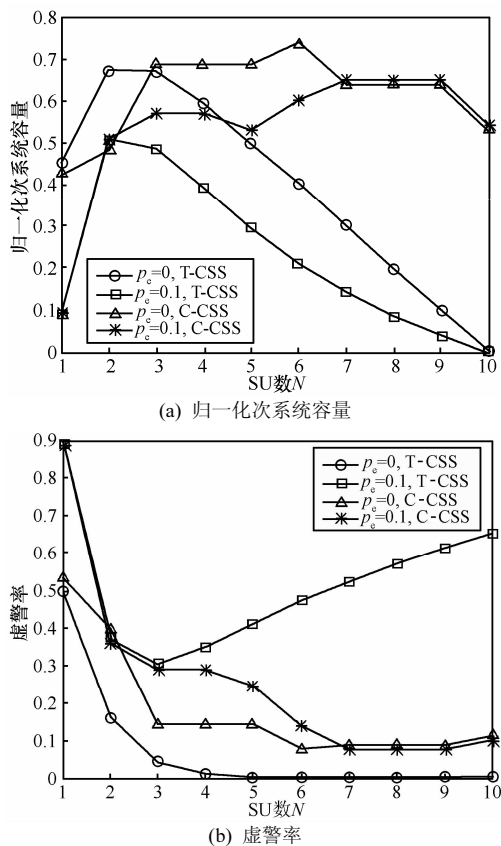


图 6 不同 p_e 下采用优化算法 2 种方案的性能比较

传输无误 ($p_e=0$) 时 C-CSS 方案与 T-CSS 方案性能对比。由图可以看到, 当报告信道上传输无误时, C-CSS 方案的虚警率大于 T-CSS 方案, 当 $N>2$ 时, 由于 $M_c < M$, 故 $\tilde{C}_c^{opt} > \tilde{C}^{opt}$; 当报告信道上传输有误时, 相比 T-CSS 方案, C-CSS 方案的虚警率大大降低, 故次系统容量也大大提高。

5 结束语

本文研究了一种可有效节约控制信道带宽的 C-CSS 方案, 它利用较少的 SU 获得了较高的次系统容量; 从次用户的角度分析了 CRN 中带宽、频谱利用率及次系统容量之间的关系; 提出了一种优化的协作频谱感知算法, 算法通过直接对数学模型求解, 使得 PU 在受到一定保护的前提下最大化了次系统容量。需要说明的是, 本文只是示例性的取 $\alpha=0.1$ 为例对性能做了分析。事实上, 控制信道带宽与感知时间也是有关的, 若帧结构设计中预留的报告时间较长, 则需要的控制信道带宽就低; 若占用的控制信道带宽多, 则需要的报告时间就短, 具体关系较为复杂。后续将会把带宽与感知时间联合起来进行考虑, 研究其对协作频谱感知性能的影响。

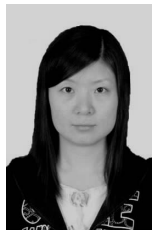
参考文献:

- [1] FCC. Spectrum policy task force report[EB/OL]. <http://www.fcc.gov/sptf/reports.html>.
- [2] WEISS T, JONDRAL F. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency[J]. IEEE Commun Mag, 2004, 42(3): S8-S14.
- [3] AKYILDIZ I, LEE W, VURAN M, et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. Computer Networks Journal(Elsevier), 2006, 50(13):2127-2159
- [4] CABRIC D, MISHRA S M, BRODERSEN R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios [A]. Proc 38th Asilomar Conf Signals, Syst, Computers[C]. United States, 2004. 772-776.
- [5] GHASEMI A, SOUSA E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments[A]. Proc 1th IEEE Int Symp New Front Dynamic Spect Netw DySPAN[C]. Baltimore, MD, United States, 2005.131-136.
- [6] GANESAN G, LI Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, part I: two user networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6): 2204-2212.
- [7] GANESAN G, LI Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio,

- part II: multiuser networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6): 2214-2222.
- [8] AMIR G, ELVINO S S. Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing[J]. Journal of Communications, 2007, 2(2): 71-82.
- [9] LIANG Y C, ZENG Y H, PEH E, *et al.* Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [10] SHEN J Y, JIANG T, LIU S Y, *et al.* Maximum channel throughput via cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10): 5166-5175.
- [11] ZHANG W, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing with transmit and relay diversity in cognitive radio networks-[transaction letters][J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 4761-4766.
- [12] LETAIEF K B, ZHANG W. Cooperative communications for cognitive radio networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 878-893.
- [13] SUN C, ZHANG W, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints[A]. IEEE Wireless Commun Networking Conf[C]. Kowloon, China, 2007. 1-5.
- [14] ZHANG W, MALLIK R K, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. China, 2008. 3411-3415.
- [15] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 55(1): 21-24.
- [16] AMIR G, ELVINO S S. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks[A]. Pro 4th IEEE Annu Consum Commun Netw Conf[C]. Las Vegas, NV, United States, 2007. 1022-1026.
- [17] BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

- [18] GRIFFITHS D V, SMITH I M. Numerical Methods for Engineers[M]. London: Blackwell Scientific, 1991.
- [19] GRADSHTEIN I S, RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. New York: Academic Press, 2000.

作者简介:



李美玲 (1982-), 女, 山西宁武人, 北京邮电大学博士生、讲师, 主要研究方向为无线通信关键技术。



袁超伟 (1960-), 男, 湖南常德人, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为未来移动通信中的关键技术。



李琳 (1982-), 女, 辽宁沈阳人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为高阶相位调制、星座映射和编码协作。



杨睿哲 (1982-), 女, 河北怀来人, 博士, 北京工业大学讲师, 主要研究方向为无线通信。