

合作感知中基于吞吐量的联合折中优化算法

姬国庆¹, 王刚², 朱洪波¹

(1. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003; 2. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为实现认知无线电资源开销和系统性能的全面优化, 建模研究了基于合作感知的认知网络的有效数据吞吐量。针对软合并融合判决模式, 基于认知网络的吞吐量建立了本地采样数与合作用户数的联合折中优化模型。通过非对称步长的 Armijo 非精确线搜索最速下降算法求出了全局最优解, 与蒙特卡洛仿真实验共同验证了优化模型的有效性。在吞吐量的最大化准则下, 实现了合作感知中本地采样数与合作用户数的联合折中优化。

关键词: 认知无线电; 合作频谱感知; 有效数据吞吐量; 软合并; 联合折中优化; 线搜索

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0071-07

Joint trade-off optimization algorithm based on cooperative spectrum sensing throughput

Ji Guo-qing¹, Wang Gang², Zhu Hong-bo¹

(1. Jiangsu Key Lab of Wireless Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The achievable data throughput of the cognitive network was modeled to optimize the overhead and performance of the cooperative system thoroughly. Considering the soft data combination decision, the joint trade-off optimization of the local sampling number and cooperative user number was modeled based on the achievable data throughput. The global optimal solution was achieved with inexact line search algorithm, which is based on Armijo rule and lopsided search step technique. Consequently, the validity of the optimization model was verified both by the numerical computation and by Monte-Carlo simulation tests. The joint trade-off optimization of the sampling number and cooperative user number was achieved in cooperative sensing based on the throughput maximizing criterion.

Key words: cognitive radio; cooperative spectrum sensing; achievable data throughput; soft combination; joint trade-off optimization; line search

1 引言

作为克服阴影效应和多径衰落的最有效感知技术, 合作频谱感知(简称合作感知)已经成为认知无线电网络的频谱感知首选技术^[1]。对融合中心

的数据合并算法的研究表明了基于用户采样数据的软合并和基于本地判决结果的硬合并各有利弊^[2]; 但共同的结论是, 随着参与合作的认知用户数目增加, 检测器的接收特性曲线(ROC, receive operating characteristic)指标, 即检验概率对虚警概率($P_D \sim P_{FA}$)

收稿日期: 2011-08-08; 修回日期: 2011-11-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2007CB310607); 国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX03003-002, 2009ZX03007-003); 国家自然科学基金资助项目(61101104)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB310607); The Important National Science and Technology Specific Project (2009ZX03003-002, 2009ZX03007-003); The National Natural Science Foundation of China (61101104)

的性能是不断提高的。然而，在合作数据汇报的时分接入模式的网络中，随着参与合作的认知用户的不断增加，融合中心可能因为接收数据的增加而陷入拥塞状态。除了感知采样时间外，认知用户还需要数倍于自身汇报时间的等待。参与合作的用户过多，在有限的感知周期中可用来传输数据的时间就会不断减少。所以，必然存在一个系统综合性能与合作感知开销的折中优化问题。有效数据吞吐量（简称吞吐量）既反映了对空闲频谱的使用效率，也反映了系统开销的效率，相当于一个系统的“性价比”指标。所以，实现吞吐量的最大化成为实现认知网络频谱感知性能优化的一个有效途径。

针对单一用户本地感知的能量检测器，文献[4]在文献[3]的基础上更系统地研究了感知采样时间与认知网络的吞吐量之间的折中优化关系，得到了实现吞吐量最大化的最佳感知时间。而合作感知的资源开销除了本地感知采样时间开销外，通常还包括认知用户向融合中心汇报采样信息所占用的时间、频谱带宽和功率等。时分接入的网络中主要是时间占比，频分接入的网络中主要是带宽占比，功率主要由信道质量决定。合作感知的性能提高往往要求合作开销的增加，但这也必然导致认知网络吞吐量指标的恶化。文献[5]和文献[6]在文献[4]基础上，通过硬合并判决的融合模式，从不同的角度分析了认知网络的吞吐量与合作开销的折中问题，得出了相应的最佳合作用户数。然而，如文献[5]所显示的结果，对于硬合并判决模式，汇报开销相对有限，合作用户数的增加对系统吞吐量的影响是轻微的，折中的需求并不强烈。数据软合并比硬合并需要占用更多的资源开销，但可以获得更优的感知性能，所以数据软合并的判决融合模式中的折中问题更加现实。基于采样数据软合并的融合模式，研究了认知网络的吞吐量与本地感知时间和参与合作的认知用户数之间的关系，将其建模成基于吞吐量最大化的二元联合优化问题。理论证明了优化问题局部解的存在；通过线搜索最速下降算法求得了全局解，仿真实验验证了理论和算法的合理性。实现了合作感知中本地感知采样数与参与合作的认知用户数的最佳配置组合。

文章的内容安排如下：作为研究的基础，第 2 节给出数据软合并的融合判决算法；基于联合优化，第 3 节建模认知网络用户的吞吐量与本地采样数和参与合作的认知用户数的折中优化模型；理论证明

其局部最优解，通过基于线搜索的最速下降法求得全局最优解，得出本地采样数和合作用户数的最佳组合；第 4 节通过蒙特卡洛仿真验证优化模型的合理性；最后是结束语。

2 软合并判决的合作感知

最基本的频谱感知过程通常建模成一个二元假设检验^[7]问题。假设认知用户的噪声环境相同，在主用户空闲(H_0)和工作(H_1)的情景下，第 i 认知用户的第 n 个采样结果 $x_i[n]$ 可以表示为

$$\begin{cases} H_0: x_i[n] = a[n] \\ H_1: x_i[n] = h_i s[n] + a[n] \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

其中， $a[n]$ 为噪声采样； $s[n]$ 为主用户信号幅度； h_i 表示主用户到第 i 认知用户的信道增益系数，包含了信道衰落因素。

2.1 本地能量检测

由于能量检测算法的简便性和合作检测的有效性，使其成为频谱感知研究的首选基础算法。能量检测的检验统计量可以由式(2)给出：

$$T_i(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_i[n]|^2 \quad (2)$$

假设认知网络系统感知采样的带宽为 W ，为满足感知性能指标而需要的本地采样数为 N ，则感知采样的消耗时间为

$$t_s = N/W \quad (3)$$

不失一般性，假设主信号与噪声都是均值为零的复高斯过程，则统计量的分布律可能出现 2 种结果。当信噪比 SNR（信号功率比噪声功率）较大时，采样数不需太大即可获得满意的检测性能，这时式(2)统计量可以用中心伽玛分布(H_0)和非中心伽玛分布(H_1)来描述^[8]。当信噪比较低时，需要较大的采样数量，这时式(2)的统计量根据中心极限定理可以近似为高斯分布^[9]。考虑合作感知的目的，关心的是信噪比较低的情景。这样，由中心极限定理可得检验统计量 $T_i(x)$ 满足高斯正态分布，考虑到信道衰落，第 i 认知用户处的信噪比可以表示为 $\gamma_i = |h_i|^2 \sigma_s^2 / \sigma_a^2$ ，其中， σ_a 和 σ_s 分别为噪声方差和主信号标准差；由检验判决中虚警概率和检测概率的定义，可推得第 i 用户的虚警概率和检测概率 $P_{i,FA}$ 和 $P_{i,D}$ 为

$$P_{i,FA} = \Pr(T_i(x) > \lambda_i | H_0) = Q((\lambda'_i - 1)\sqrt{N}) \quad (4)$$

$$P_{i,D} = \Pr(T_i(x) > \lambda_i | H_1) = Q\left(\frac{\lambda'_i - (\gamma_i + 1)\sqrt{N}}{\gamma_i + 1}\right) \quad (5)$$

其中, λ_i 和 $\lambda'_i = \lambda_i/\sigma_a^2$ 表示第 i 用户的判决门限;

$Q(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ 为高斯右尾概率函数^[10]。

应用右尾函数的反函数 $Q^{-1}(x)$ 在式中消去判决门限即可得到该用户的检测接收性能关系 ($P_{i,D} \sim P_{i,FA}$)。如果给定目标检测概率, 记为 $\bar{P}_{i,D}$, 即可由式(3)、式(4)推导出相应的虚警概率与采样数的关系为

$$P_{i,FA}(N) = Q((\gamma_i + 1)Q^{-1}(\bar{P}_{i,D}) + \gamma_i\sqrt{N}) \quad (6)$$

与文献[3]类似, 根据式(6)可以实现本地感知采样数与认知网络吞吐量间的折中优化。

2.2 能量检测的软合并合作感知

克服单一认知用户固有的不足有 2 种选择, 一是通过改善感知能力来提高性能^[11]; 然而感知能力的改善条件苛刻, 要么需要严格的主用户信息, 要么需要硬件的改变 (如多天线等), 所以难以动态实现。更加有效的方法是改进感知模式, 进行合作感知, 由网络融合中心控制执行合作感知^[12]。

如前所述, 合作感知的判决方式按接收数据的种类分为硬合并判决和软合并判决。硬合并只需由融合中心采集各个认知用户的本地二元 (0 和 1, 对应有或无) 判决结果, 通过相应的判决算法得出一个全局判决, 这种合作的控制信道最少需传递 2 个字节的信息, 从而占用较少的合作开销, 但这是以全局判决的准确性降低为代价的; 而由融合中心直接收集各认知用户对于主用户的能量采样数据, 执行软合并可以获得更优的检测性能。当然, 性能的提高增加了合作开销 (这里主要指采样时间和融合时间开销), 从而压缩了认知用户有效的数据传输时间。软合并判决模式下融合中心的检验统计量为

$$T(x) = \sum_{i=1}^M w_i T_i(x) \quad (7)$$

其中, w_i 为数据合并的加权系数, 通常与该用户的本地检验统计量 (能量采样值) $T_i(x)$ 相关, 但在一个采样周期中为常数。不失一般性, 假设其满足归一化条件:

$$\sum_{i=1}^M w_i^2 = 1 \quad (8)$$

根据确定加权系数算法的不同, 数据合并分为最大比合并 (MRC, maximum ratio combining)、等增益合并 (EGC, equal gain combining) 和选择性合并 (SC, selective combining) 等, 文中将对具有代表性的最大比合并和等增益合并进行讨论。

根据高斯分布的叠加性质, 融合中心接收的检验统计量 $T(x)$ 同样满足高斯分布, 只是均值和方差分别发生了相应的变化; 与式(6)的推导同理, 通过给定一个目标检测概率 \bar{P}_D 来讨论虚警概率:

$$P_{FA}(N, M | \bar{P}_D) = Q[Q^{-1}(\bar{P}_D)\sqrt{\sum_{i=1}^M w_i^2 (\gamma_i + 1)^2} + \sum_{i=1}^M w_i \gamma_i \sqrt{N}] \quad (9)$$

2.2.1 最大比合并

当信噪比很低时, 即 $\gamma_i \ll 1$, 则有 $\sqrt{\sum_{i=1}^M w_i^2 (\gamma_i + 1)^2} \approx 1$, 于是虚警概率表示为

$$P_{FA}(N, M | \bar{P}_D) \approx Q[Q^{-1}(\bar{P}_D) + \sum_{i=1}^M w_i \gamma_i \sqrt{N}] \quad (10)$$

通过求解最大化 $\sum_{i=1}^M w_i \gamma_i$ 可以求出最大比合并的权重系数^[4]:

$$w_i = \frac{\gamma_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \gamma_i^2}} \quad (11)$$

它满足式(8)的归一化条件。将式(11)代入式(10), 对给定目标检测概率 \bar{P}_D , 由采样数和合作用户数决定的最大比合并判决的虚警概率为

$$P_{FA}(N, M | \bar{P}_D) \Big|_{MRC} = Q[Q^{-1}(\bar{P}_D) + \sqrt{\sum_{i=1}^M \gamma_i^2} \sqrt{N}] \quad (12)$$

假设从主用户发射机到这 M 个独立的认知用户的信道遵循瑞利衰落特性, 则其各自的信噪比 γ_i 的概率分布函数由式(13)决定:

$$p(\gamma_i) = \frac{1}{\gamma_0} \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right) \quad (13)$$

其中, γ_0 为衰落信道的平均信噪比 (简化讨论, 假设每个信道的平均信噪比相同)。

2.2.2 等增益合并

如果是等增益合并, 即可令 $w_i = \frac{1}{\sqrt{M}}$ (满足式(8)条件), 代入式(9), 则有

$$P_{FA}(N, M | \bar{P}_D) \Big|_{EGC} = Q[Q^{-1}(\bar{P}_D)\sqrt{\sum_{i=1}^M (\gamma_i + 1)^2 / M} + \sum_{i=1}^M \gamma_i \sqrt{N/M}] \quad (14)$$

考虑一种最简单的情景，即各个认知用户感知主用户信号的信噪比相同，且融合中心进行等增益合并判决，即 $\gamma_i = \gamma_0$ ，且 $w_i = 1/\sqrt{M}$ 。这时式(14)就简化为最简单的软合并合作感知判决结果：

$$P_{FA}(N, M | \bar{P}_D, \gamma) = Q \left[Q^{-1}(\bar{P}_D)(\gamma + 1) + \gamma \sqrt{NM} \right] \quad (15)$$

3 本地采样数与合作用户数的联合优化

3.1 认知网络用户数据吞吐量

不失一般性，假设认知网络帧周期中一个数据传输时段包含一个数据分组。定周期式的认知网络帧结构如图 1 所示，在采样检测时间 (t_s) 之后是向融合中心汇报数据的时间和等待其他 $(M-1)$ 个用户完成汇报的时间，实际可以用于认知用户间交换数据的时间只有 $T - t_s - t_c$ 。如式(3)的定义，假设认知用户与融合中心之间的数据速率为 r ；数据分组长度为 L ，字节数一般为 32、64 或 128^[5]；认知用户采用时分接入向融合中心传输能量采样，则合作汇报时间开销为

$$t_c = ML/r \quad (16)$$

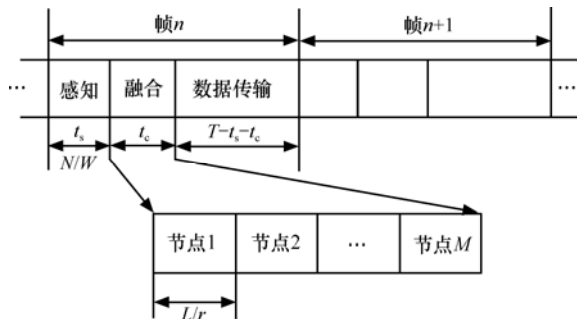


图 1 基于合作感知的认知网络用户的帧结构

参照文献[4]，不考虑主用户漏检时的情景（检测概率足够大），则认知网络的吞吐量 R 为

$$R \triangleq \frac{T - t_s - t_c}{T} (1 - P_{FA}) C_0 P(H_0) \quad (17)$$

其中， T 为认知网络的感知通信周期时长； C_0 为主用户空闲时认知网络的信道容量，根据香农公式可知其由认知网络用户间的信噪比和带宽决定，在一个感知周期内可以认为是常数； $P(H_0)$ 为主用户空闲的概率，由主用户网络决定； P_{FA} 是决定认知用户接入空闲频谱机会的虚警概率。为便于讨论，可以进一步定义归一化有效数据吞吐量（简称归一化吞吐量）为

$$\tilde{R} \triangleq R / [C_0 P(H_0)] = [(T - t_s - t_c) / T] (1 - P_{FA}) \quad (18)$$

归一化吞吐量既反映了认知网络有效数据传输的能力，也反映了对空闲频谱的使用效率。

3.2 采样数与合作用户数的联合优化

先考虑最简单的情景，将式(3)、式(16)和式(15)代入式(17)，则在已知信噪比和预定检测概率的前提下，认知网络的归一化吞吐量为

$$\tilde{R}(N, M | \bar{P}_D, \gamma) = \frac{T - N/W - ML/r}{T} [1 - P_{FA}(N, M | \bar{P}_D, \gamma)] \quad (19)$$

可见，在满足预定检测概率和虚警概率的前提下，动态调整本地采样数 N 与合作用户数 M 使吞吐量达到最大，进一步提高系统容量。与文献[4]的模型有所不同，把联合优化建模成如下的最大化二元函数的无约束优化问题：

$$\max_{N, M} \tilde{R}(N, M | \bar{P}_D, \gamma) \quad (20)$$

由于虚警概率公式中 Q 函数的存在，求出式(19)的驻点非常困难，所以无法在理论上求证式(20)的问题全局解存在的充分条件。优化问题的全局最大值解—最佳组合 (N_{opt}, M_{opt}) 将通过非精确线搜索最速下降数值算法求解并通过仿真实验来验证。

3.3 线搜索算法求解优化模型全局最优解

二元函数的最值问题需要求驻点，由于目标函数含有复杂的高斯右尾概率函数及其反函数，驻点极难求解，所以最优解的理论求解无法实现。采用基于 Armijo 非精确线搜索的最速下降法^[13]来求解优化模型的全局最优解。因为合作用户数与本地采样数大小不可比 ($N_k \gg M_k$) 的现实，对算法步长的选取是个挑战，所以在程序中采用了非对称步长的技术。具体算法如下：

- 第 1 步：对目标函数作数据初始化（参见表 1）；
- 第 2 步：选取迭代初值的本地采样数 N_0 与合作用户数 M_0 ，设定截止冗余误差 $0 \leq \varepsilon \ll 1$ ；
- 第 3 步：计算目标函数对搜索对象的梯度 $g_k = \nabla \tilde{R}(N_k, M_k)$ ，若 $\|g_k\| \leq \varepsilon$ ，则输出 $(N_{opt}, M_{opt}) = (N_k, M_k)$ 作为近似最优解；否则确定搜索方向 $d_k = -g_k$ ；
- 第 4 步：由线搜索技术的 Armijo 准则和搜索变量的比例关系确定步长因子 α_k ；
- 第 5 步：令 $[N_k, M_k] = [N_k, M_k] + \alpha_k d_k$ ；
- 第 6 步：令 $k = k + 1$ ，转到第 3 步。

不失一般性，讨论的算法基于最简单的式(15)描述的等信噪比情景。表 2 给出了 -15dB 信噪比环境下的算法计算结果。表 3 给出了不同信噪比下的计算结

果。从表中数据可以得出以下 2 个结论：一是从不同的迭代起始位置出发都可以搜索到同样的值，说明算法是完全收敛的；二是从各个方向出发都得到了同一个最大值，验证了本文所提出的算法模型优化问题的全局最优解是存在的，并且是唯一的。

表 1 数值解与仿真的系统参量

系统参量名称	参数值
感知周期	$T = 100\text{ms}$
采样带宽	$W = 1\text{MHz}$
瑞利感知信道	$\gamma_0 = -15\text{dB}$
合作信道速率	$r = 10\text{kbit/s}$
汇报数据分组	$L = 32\text{bit}$
目标检测概率	$\bar{P}_D = 0.95$
同信噪比感知信道	$\gamma = -15\text{dB}$
汇报信道	无差错

表 2 基于吞吐量最大化的本地采样数与合作用户数联合优化问题的线搜索最速下降算法结果

迭代初值 (N_0, M_0)	迭代 次数	目标函数值(归 一化吞吐量)	最佳组合 (N_{opt}, M_{opt})
(1 000, 1)	5 211	0.848 8	(~6 856, 2.1)
(1 000, 10)	5 237	0.848 8	(~6 856, 2.1)
(10 000, 1)	6 457	0.848 8	(~6 856, 2.1)
(10 000, 10)	6 509	0.848 8	(~6 856, 2.1)
(5 000, 5)	5 070	0.848 8	(~6 856, 2.1)
(7 000, 2)	3 911	0.848 8	(~6 856, 2.1)

表 3 不同信噪比环境时优化模型全局解线搜索算法结果

信噪比/dB	归一化吞吐量	本地采样数	合作用户数
-12	0.918 1	~3 800	1.17
-15	0.848 8	~6 900	2.13
-18	0.725 6	~12 100	3.79

对于该线搜索算法应用还要给出必要的说明：由于采样数与合作用户数的严重不对称性，使用了非对称步长搜索的技术，避免了搜索点在一个 N 值处止步不前。另外，归一化吞吐量函数对变量 (N_k, M_k) 的梯度值较小，选用了极小 (10^{-6}) 的截止冗余误差参数，避免了算法从不同的方向出发会停在不同的局部值点，而无法搜索到全局。

4 理论和仿真性能分析

在这一部分，通过计算机仿真的方法分别对最

简单合作感知（虚警概率参照式(15)）、瑞利信道的最大比合并感知（虚警概率参照式(12)）以及等增益合并感知（虚警概率参照式(14)）进行性能分析，以验证式(19)最优化问题全局解的存在。不失一般性，为充分保护主用户，设定目标检验概率不小于 0.95。与前文理论分析的一致，参考文献[6]的情景，数值解和仿真的系统参数由表 1 给出。

4.1 等信噪比合作感知

信噪比相同时，式(19)和式(15)联合建模了认知网络的吞吐量。假设认知用户的信噪比都等于一个平均值(-15dB)，其他的条件不变。图 2 和图 3 给出了式(15)和式(19)的理论结果，图 4 给出了用蒙特卡洛方法得出的仿真实验结果。可见，模型的数值结果与仿真实验是一致的。相应的检测性能目标由图 2 中的虚警概率特性可见是可以实现的。在认知网络用户吞吐量最大化的过程中，采样数与合作用户数可以实现类似反比关系动态调节，保证了吞吐量在任意本地采样数条件下或任意合作用户数条件下都可以实现最大化。图 5 就描述了这种关系。同时可见，在不同的信噪比环境下，要获得最大吞吐量，相应的采样数和合作节点数要同步增加；并且，

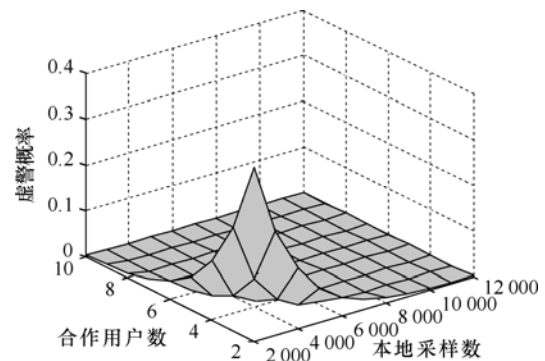


图 2 联合优化的相同信噪比软合并合作感知的认知网络用户的虚警概率（理论解）

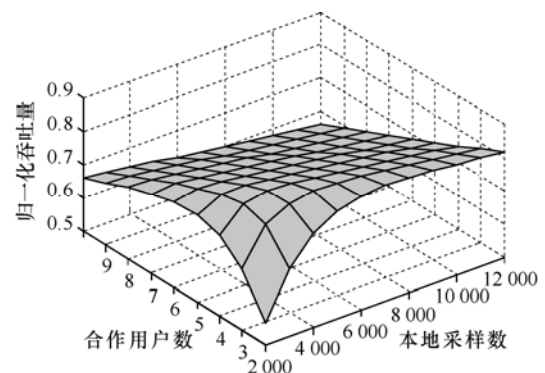


图 3 联合优化的相同信噪比软合并合作感知的认知网络用户的归一化吞吐量（理论解）

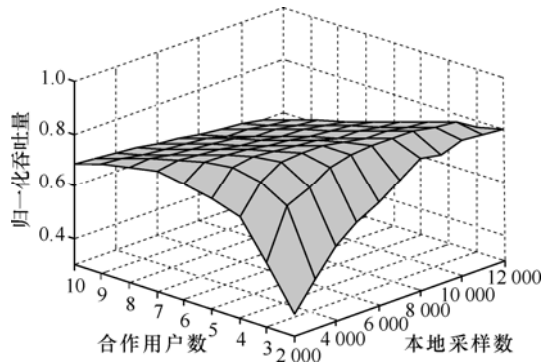


图 4 联合优化的相同信噪比软合并合作感知的归一化吞吐量 (蒙特卡洛仿真)

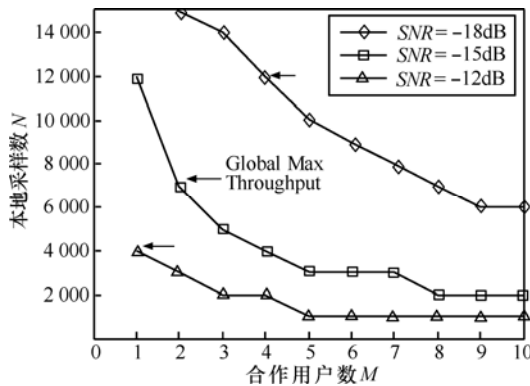


图 5 不同信噪比时数据吞吐量的局部最大 (曲线) 和全局最大 (箭头所指) 在采样数和合作用户数的空间中的分布 (目标检测概率均为 0.95)

从全局来看, 在感知目标和环境信噪比已知的情况下, 一个全局最大吞吐量是存在的, 与之对应的变量就是全局最佳组合($N_{\text{opt}}, M_{\text{opt}}$); 和表 2 的计算结果比较可见仿真与搜索算法非常吻合。

4.2 衰落信道合作感知

当需要考虑信道衰落的时候, 分别对等增益合并模式和最大比合并模式进行分析; 把式(12)或式(14)代入式(19)得到相应的吞吐量模型。瑞利信道中不同认知用户处的信噪比按式(13)的指数分布来模拟。因为 3.1 节的实验合理性, 这里只仿真信噪比的分布对式(19)吞吐量的影响。因为合作用户数目较小, 所以模拟不同用户的信噪比时做了一定的近似, 即虽然按指数分布仿真, 但取值限定在信噪比均值附近 (减少信噪比异常值的影响)。图 6 给出了瑞利信道中最大比合并 (MRC) 合作感知的归一化吞吐量的蒙特卡洛仿真结果。从图中可见, 由于只仿真了 SNR 的随机变化, 因此吞吐量沿认知户数的方向的变化变得不再平滑, 但采样数的影响是平滑的。为更清晰比较不同合并模式对吞吐量的影响, 假定一个本地采样数 (假设为 5000), 在图 7 中仿真比较了

3 种融合判决模式下合作感知的认知网络的吞吐量与合作用户数关系。从图中可见, 虽然考虑了信道的衰落, 但不同合作模式的数据吞吐量随合作用户数的变化趋势是基本一致的; 同时可见, 最大比合并的确优于等增益合并, 但差别不是很显著, 原因是限制了信噪比仿真的取值范围, 从而压制了最大比合并的优势。

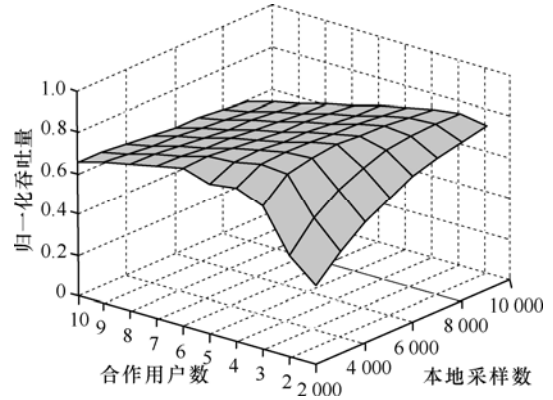


图 6 联合优化的瑞利信道中 MRC 合作感知的归一化吞吐量的蒙特卡洛仿真

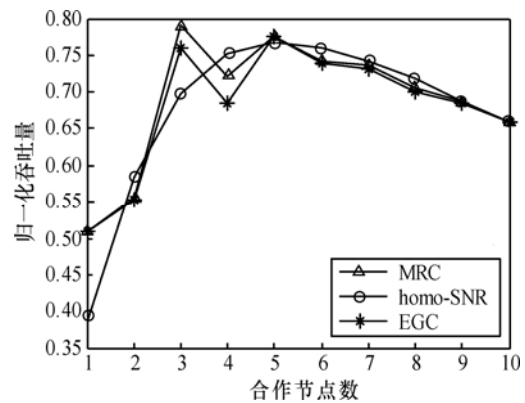


图 7 2 种瑞利信道合并感知算法与等 SNR 软合并感知的归一化吞吐量 (蒙特卡洛仿真 $N=5000$)

5 结束语

将认知网络用户的有效数据吞吐量与采样数的折中和吞吐量与合作感知用户数的折中问题相结合, 通过理论建模、算法验证和仿真实验实现了基于吞吐量最大化准则的本地感知采样与合作网络规模的联合折中优化, 揭示了系统感知开销与系统性能之间的内在联系。采样数和用户数的最佳组合充分体现了基于合作频谱感知的认知网络固有的灵活性。搜索算法和仿真实验的结果验证了优化模型的合理性, 可能为将来认知网络系统设计的实现提供必要的参考。

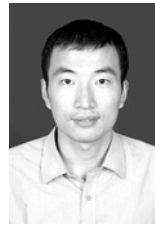
参考文献:

- [1] LETAIEF K B, ZHANG W. Cooperative communications for cognitive radio networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(6):878-893.
- [2] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116-130.
- [3] GHASEMI A, SOUSA E S. Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks[A]. Proc 4th IEEE Consumer Commun Networking Conf[C]. 2007. 1022-1026.
- [4] LIANG Y C, ZENG Y H, PEH E, *et al.* Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1326-1337.
- [5] CHOI Y J, XIN Y, RANGARAJAN S. Overhead-throughput tradeoff in cooperative cognitive radio networks[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Budapest, Hungary, 2009.1-6.
- [6] MASHREGHI M, ABOLHASSANI B. Optimum number of secondary users and optimum fusion rule in cooperative spectrum sensing to maximize channel throughput[A]. 5th International Symposium on Telecommunications[C]. Kish Island, Iran, 2010. 1-6.
- [7] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55: 523-531.
- [8] MA J, ZHAO G D, LI Y. Soft combination and detection for cooperation spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12):4502-4507.
- [9] SHEN B, KWAK K S. Soft combination schemes for cooperation spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. ETRI Journal, 2009, 31(4):263-270.
- [10] PROAKIS J G, Digital Communications[M]. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [11] JI G Q, ZHU H B. A survey of the solving strategies for the SNR walls problem in local spectrum sensing[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2011, 6(8):51-57.
- [12] UNNIKRISHNAN J, VEERAVALLI V V. Cooperative sensing for primary detection in cognitive radio[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1):18-27.
- [13] 马昌凤. 最优化方法及其 MATLAB 程序设计[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- MA C F. Optimization Method and the MATLAB Programming[M]. Beijing: China Science Press, 2010.

作者简介:



姬国庆 (1972-), 男, 江苏徐州人, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为无线通信的信号处理、电磁兼容等。



王刚 (1977-), 男, 江苏徐州人, 中国矿业大学副教授, 主要研究方向为无线传感网、物联网技术等。



朱洪波 (1956-), 男, 江苏扬州人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 南京邮电大学副校长, 主要研究方向为通信工程、无线通信与电磁兼容、移动通信与宽带无线技术。