

面向认知无线网络能量高效协作感知的在线节点选择算法

杨威¹, 管东林¹, 逯东辉¹, 彭立宏², 窦文华²

(1. 海军装备研究院, 北京 100036; 2. 国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 面向认知无线网络中能量高效协作感知任务需求, 提出了面向单次协作感知过程的能量最小化节点选择问题 EMNS 和面向在线协作感知的能量高效节点选择问题 OENS。证明了两问题均为 NP-hard 难题。针对 EMNS 问题, 提出采用分枝定界算法 BAB 求最优解和贪婪节点选择算法 GS 求近似解。针对 OENS 问题, 提出为每个节点引入考虑能量消耗负载均衡的动态权重系数, 基于 BAB 和 GS 算法设计了启发式的在线节点选择算法 OBAB、OGS1。仿真实验结果表明, 提出的算法可显著增加网络完成的协作感知过程次数, 可有效延长网络“生存期”。

关键词: 认知无线网络; 能量高效; 协作感知; 在线节点选择算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)07-0103-08

Online energy-efficient node selection algorithm for cooperative sensing in cognitive radio networks

YANG Wei¹, GUAN Dong-lin¹, LU Dong-hui¹, PENG Li-hong², DOU Wen-hua²

(1. Naval Academy of Armament, Beijing 100036, China;

2. School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To meet the requirement of the energy-efficient cooperative sensing applications in cognitive radio networks, the energy minimization node selection (EMNS) and the online energy-efficient node selection (OENS) problems were proposed, for one round and online cooperative sensing scenarios, respectively. Both problems were proved to be NP-hard. For EMNS, first a branch and bound algorithm BAB was proposed to find the optimal solution, then a greedy selection algorithm GS was designed to get a heuristic solution. For OENS, based on algorithms BAB and GS, two online algorithms OBAB and OGS1 were proposed, in which the weight coefficients were adopted that consider the load balancing of each node's energy consumption. Extensive experiments by simulations demonstrate that the proposed algorithms can significantly increase the number of successful cooperative sensing processes, thereby increasing the network lifetime effectively.

Key words: cognitive radio networks; energy efficient; cooperative sensing; online node selection algorithm

1 引言

随着“绿色网络”概念的提出^[1], 所有网络都面临如何降低网络中功能操作的能耗问题, 协作认知无线网络也不例外。在多 SU 对某个空间通道

进行协作感知的应用中, 由于各个 SU 的感知参数和发送功率都不尽相同, 每次参与协作所消耗的能量也不相同, 各 SU 的初始能量更存在差异, 因此存在如下 2 个问题: 1) 对于某一次协作感知过程, 在通道正确检测概率需达到给定阈值的前提下, 如

收稿日期: 2011-07-21; 修回日期: 2012-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60903223)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60903223)

何选择参与协作的 SU 节点, 使本次协作过程的能量开销最小化, 同时, 为避免对 PU 通信产生干扰, 还应使通道被 PU 占用时误检为可用的概率, 即通道的错误接入概率也小于给定阈值; 2) 考虑到协作感知过程是在线运行的, 或者说是周期性运行的。如果每一轮协作感知过程都贪婪的选取感知能力较好的 SU, 那么被选中的 SU 节点的能量将迅速消耗殆尽, 剩余 SU 可能不能成功完成协作感知过程。因此, 在设计能量高效的在线 SU 节点选择算法时, 还需充分考虑节点能量消耗是否负载均衡, 最终使网络中的所有 SU 能完成尽可能多的协作感知过程。而若能解决协作感知所面临的上述问题, 将对构建“绿色”的协作认知无线网络具有十分重要的意义。

针对以上提出的问题, 本文先后提出了面向协作认知无线网络单次协作感知过程的能量最小化的节点选择问题 (EMNS, energy minimization node selection problem) 和面向在线协作感知的能量高效节点选择问题 (OENS, online energy-efficient node selection problem)。对于 EMNS 问题, 首先将其形式化描述为一个 0-1 非线性规划模型, 通过等价变换将其转化为 0-1 线性规划模型, 并通过将其向二维费用的背包问题进行归结, 证明其为 NP-hard 的。随后提出采用分枝定界算法 (BAB, branch and bound), 求 EMNS 的最优解, 又提出采用基于贪婪选择的启发式算法 (GS, greedy selection) 求得近似优化的解。对于 OENS 问题, 通过将它对应的判定问题归结为一个 NP-complete 的不相交路径问题, 证明了 OENS 问题同为 NP-hard。随后提出为每个 SU 节点引入考虑能量消耗负载均衡的动态权重系数, 在 BAB 算法和 GS 算法的基础上, 分别设计了启发式的在线节点选择 (OBAB, online BAB) 算法和 OGS1 (online greedy selection1)。仿真实验的结果表明, OGS1 算法可有效求解 OENS 问题, 平均可完成的协作感知次数可达到用 OBAB 算法得到的近似最优解的 94%, 却极大降低了算法运行时间; 与另一种不采用动态权重系数的算法 OGS2 (online greedy selection) 相比, 也可多完成 25% 的协作感知次数。

2 相关工作

根据协作节点同时检测的通道数量的不同, 协作感知可分为多 SU 对单通道进行协作感知和多 SU

对多通道进行协作感知 2 类。本文针对多 SU 对单通道进行协作感知。其检测模型主要分为 2 种: 基于表决融合的硬检测模型^[2,3]和基于权重融合的软检测模型^[4]。在本文中采用硬检测模型中的 OR 策略, 即仅向融合中心传递判决结果标识, 以降低所传输消耗的能量。

现有关于能量高效协作感知的研究基于 2 种方式: 基于审查 (censoring) 的方法和通过优化节点感知参数使能量消耗最小化 (energy minimization) 的方法^[5]。1) 运用审查的方法可限制 SU 向融合中心传递不必要的感知结果数据。Sun 等人^[6]提出一简单的审查方法以减少向融合中心传递的比特数量。每个节点设置了 2 个检测阈值 λ_1 与 λ_2 , 且 $\lambda_1 < \lambda_2$, 若通过能量采样累积得到的采样结果 $Y_i < \lambda_1$, 则发送“0”, 若 $Y_i > \lambda_2$, 则发送“1”, 否则节点不向融合中心发送判定结果。由于采用审查方法, 最终得到的 P_d 有所降低, 但同时也减少了传输的比特数量, 因此节省了能量。2) 能量最小化方法。设每个节点的采样频率固定, 若采样时间增加, 采样次数相应增加, 每个节点能量消耗随之增加, 但每个节点的正确检测概率也增大, 从而可以用更少的节点达到最终的 P_d 要求, 而节点的减少也有可能带来总消耗能量的降低。Pham 等人^[7]针对以上发现, 提出在 P_d 需达到给定阈值的约束下, 如何选择最优的节点个数和感知时间参数, 使得协作感知消耗的能量最小化。此外, Maleki 等人^[8]提出了一种基于睡眠和审查的策略。在 P_d 需达到给定阈值 α , P_f 需小于给定阈值 β 的前提下, 求解下述模型来得到优化的睡眠频率 μ 和检测阈值 λ_1 与 λ_2 , 使得总能量消耗最小化。此外, 面向“绿色”的认知无线网络, Liu 等人^[9]提出一种基于时分复用的能量高效协作感知策略, 使得在满足检测概率阈值的前提下, 既降低能量开销又提升了系统的吞吐量。

注意到, 仅有的针对能量高效协作感知的研究都假设节点数目固定^[2~6,8]或仅给出节点数目下界^[7], 对在 P_d 需要达到给定阈值, P_f 不能超越给定阈值的前提下, 具体选择哪些参与协作的 SU 节点来使总能量开销最小化并未涉及。更重要的是, 已有研究仅考虑单次的协作感知过程, 并没有考虑在实际的系统中, 需频繁对可用频谱进行检测或利用, 因此协作感知过程应该是在线的, 周期性的。那么如何根据节点能量剩余能量负载均衡在线的选择每次

参与协作感知的节点，以在保证每次的 Pd 达到给定阈值， Pf 不超越给定阈值的前提下，能完成尽可能多的协作感知过程是需要研究的内容。与已有研究工作不同，本文针对以上问题建立优化模型并设计在线节点算法。

3 系统模型与问题定义

考虑一个包含 N 个 SU 节点，一个数据融合中心 FC，一个 PU 组成的认知无线网络。假设网络内所有节点的时间精确同步，系统时间被划分为长度均等的时间槽。在每个时间槽内，由于 PU 所占用的通道拥有一定的空闲概率，SU 中的某些节点可进行协作感知对 PU 所占用的通道进行检测，若最终获得的通道的正确检测概率 Pd 大于给定阈值 α ，错误接入概率 Pf 小于给定阈值 β ，则称为一个成功的协作感知过程。特别的，设节点 SU_i 具有初始能量 IE_i ， $1 \leq i \leq N$ ，在协作感知过程中，每个 SU 节点消耗在能量采样和向 FC 传输数据所消耗的能量之和为 C_i 。每个节点获得的通道正确检测概率为 Pd_i ，错误接入概率为 Pf_i 。

在数据融合中心 FC 采用 OR 策略^[3]。若用参数 $x_i = 1$ 表示 SU_i 参与协作过程， $x_i = 0$ 表示不参与协作过程，则 FC 计算得到的正确检测概率 $Pd(FC)$ 和错误接入概率 $Pf(FC)$ 分别为

$$\begin{aligned} Pd(FC) &= 1 - \prod_{i=1}^N (1 - x_i Pd_i) \\ Pf(FC) &= 1 - \prod_{i=1}^N (1 - x_i Pf_i) \\ x_i &\in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (1)$$

从上式得到， $Pd(FC)$ 和 $Pf(FC)$ 的值取决于选择哪些 SU 节点进行协作感知。且当参与协作的节点增多时， $Pd(FC)$ 和 $Pf(FC)$ 都将显著增加。

下面对问题定义。

1) 面向一次协作感知过程能量最优化的节点选择问题 (EMNS, energy minimization node selection problem)

在每一次协作感知过程中，优化的目标是能选择合适的参与协作的节点，使得 FC 得到的 $Pd(FC)$ 应大于给定阈值 α ， $Pf(FC)$ 应小于给定阈值 β ，以避免对 PU 的干扰。与此同时，最小化整个过程的能量消耗，其形式化描述为

$$\min \sum_{i=1}^N C_i x_i \quad (2)$$

$$1 - \prod_{i=1}^N (1 - x_i Pd_i) \geq \alpha \quad (3)$$

$$1 - \prod_{i=1}^N (1 - x_i Pf_i) \leq \beta \quad (4)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq N \quad (5)$$

注意到 EMNS 问题为一个 0-1 非线性规划问题。优化目标 (2) 是使此次协作感知的额外能量开销最小化；约束条件 (3)、(4) 分别为通道正确检测概率和错误接入概率的约束。

2) 面向在线协作感知的能量高效节点选择问题 (OENS, online energy-efficient node selection problem)

考虑一个在线的协作感知系统，SU 节点需连续进行协作感知过程，每一次过程需满足 $Pd(FC)$ 和 $Pf(FC)$ 关于其阈值的约束，不妨设每次协作感知过程中，这 2 个阈值不变。那么如何选择参与每次协作感知过程的节点，使得在系统首次不能完成协作感知过程前，能完成尽可能多次的协作感知过程。

4 问题分析与求解

4.1 问题复杂度分析

1) EMNS 的问题复杂度分析

注意到 EMNS 为一个 0-1 非线性规划问题。首先对约束 (3) 做变换并 2 边取对数，得到

$$\ln \left(\prod_{i=1}^N (1 - x_i Pd_i) \right) \leq \ln(1 - \alpha)$$

即

$$\ln(1 - x_1 Pd_1) + \ln(1 - x_2 Pd_2) + \dots + \ln(1 - x_N Pd_N) \leq \ln(1 - \alpha)$$

在 $x_i \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq N$ 的约束下，则上式等价于

$$x_1 \ln(1 - Pd_1) + x_2 \ln(1 - Pd_2) + \dots + x_N \ln(1 - Pd_N) \leq \ln(1 - \alpha)$$

同理，对约束 (4) 做变换并 2 边取对数，得到

$$\ln \left(\prod_{i=1}^N (1 - x_i Pf_i) \right) \geq \ln(1 - \beta)$$

即

$$-x_1 \ln(1 - Pf_1) - x_2 \ln(1 - Pf_2) - \dots - x_N \ln(1 - Pf_N) \leq -\ln(1 - \beta)$$

因此，得到 EMNS 的等价问题，不妨记为问题 P。

$$\text{问题 P: } \max \sum_{i=1}^N (-C_i x_i)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i \ln(1 - Pd_i) \leq \ln(1 - \alpha)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i (-\ln(1 - Pf_i)) \leq -\ln(1 - \beta)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq N$$

问题 P 可以看作是一个特殊的二维费用的背包问题，即每个物品 SU_i 拥有 2 种费用，一正一负 ($-\ln(1 - Pf_i)$ 与 $\ln(1 - Pd_i)$)，每个物品的收益为 $-C_i$ ，优化目标是选择放入的节点，使收益最大化。由于普通的 0-1 背包问题是其特例，而 0-1 背包问题的判定问题是 NP-complete 的^[10]，因此问题 P 是 NP-hard 的，问题 EMNS 也是 NP-hard 的。

2) OENS 的问题复杂度分析

本文拟通过分析，证明 OENS 问题也是 NP-hard 的。证明的思想是首先给出 OENS 这个优化问题所对应的判定问题，然后通过限制法，将判定问题归结为一个不相交路径 (DCP, disjoint connecting Path) 问题。由于后者是 NP-complete 的^[10]，故 OENS 判定问题也是 NP-complete 的，故 OENS 是 NP-hard 的。

① OENS 判定问题: 给定一个包含 N 个 SU 节点的协作感知系统，节点 SU_i 的初始能量为 IE_i ，若参与一次协作感知过程，消耗的能量为 C_i ，该判定问题回答是否能合理调度节点，使系统能满足 k 次协作感知过程，且每次感知过程中 $Pd(FC) \geq \alpha$ ， $Pf(FC) \leq \beta$ 。

② DCP 问题: 如图 1 所示，给定一个无向图 G 和 k 个不同的源目节点对 (s_i, t_i) ， $1 \leq i \leq k$ 。DCP 问题回答是否存在 k 条不相交路径，其中第 k 条路径连接源目节点对 (s_k, t_k) 。

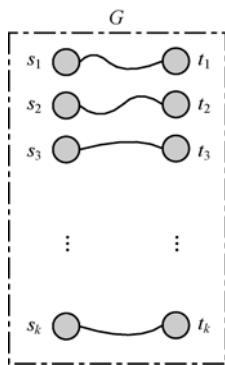


图 1 DCP 问题

③ OENS 判定问题的等价转换: 设给定一个 OENS 判定问题，构造一个无向图 G ，它包含 k 个不同的源目节点对 (s_i, t_i) ， $1 \leq i \leq k$ ，还 $1 \leq i \leq k$ 包

含若干 SU_i 节点衍生的同构节点。具体的说，对于每个 SU_i ，其衍生出的同构节点数目为 $\lfloor IE_i / C_i \rfloor$ 。

图 2 说明了无向图 G 的如何构造的。该判定问题回答是否存在 k 条不相交路径，其中，第 k 条路径连接源目节点对 (s_k, t_k) ，且若用第 k 条路径上的节点进行协作感知， $Pd(FC) \geq \alpha$ ， $Pf(FC) \leq \beta$ 。

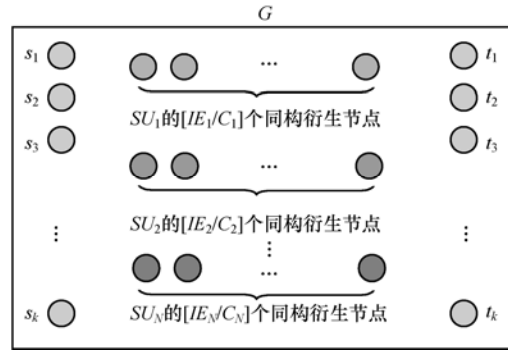


图 2 OENS 判定问题的等价转换问题

④ 对③中的问题放宽阈值约束，令 $\alpha = 0$ ， $\beta = 1$ ，即相当于无此约束，则 OENS 问题便转换为 DCP 问题。因此 OENS 判定问题也为 NP-complete 的，因此其 OENS 这个优化问题为 NP-hard 的。

综上所述，EMNS 和 OENS 问题都为 NP-难问题，需要设计启发式算法进行求解。

4.2 求 EMNS 问题的最优解算法

在为 EMNS 设计启发式算法求解之前，首先提出用分枝定界算法 (BAB, branch and bound) 对 EMNS 的等价问题 P 进行求解，用便于以在后续仿真中与启发式算法做比较。利用 BAB 算法求得解为 EMNS 问题的最优解。BAB 算法的主要思想有分放松、分枝、定界 3 部分。1) 放松: 去掉 P 中关于 x 取整数的限制，得到线性规划问题，记为 LP。求解 LP 得到解 x^* ，若 x^* 中的分量都为 0, 1 整数，则它就是 P 的最优解。否则进行分枝。2) 分枝: 选 x^* 的一个非 0, 1 分量 x_k^* ，由 LP 分枝出 2 个子问题，记为 LP1 和 LP2，它们分别在 LP 中增加一个约束条件: $x_k = 0$ 和 $x_k = 1$ ，求出它们的解。类似地，必要时对它们再进行分枝。3) 定界: 若有子问题的解分量都是 0、1，且函数值小于所记下的最优解上界，则用它取代上界。若一子问题无可行解或解大于最优解上界，则该子问题不用再分枝，可剪去。当进行到所有的子问题都分析完毕时，最优解上界就是 P 的最优解。

算法 BAB 虽然能求得 EMNS 的最优解，但当节点数目较多时，算法需存储很多叶子节点的界及相关参数，消耗非常大的内存空间，在极端情况下，会出现穷举搜索的情况。因此，接下来，本文设计一种求解 EMNS 的启发式算法。

4.3 求解 EMNS 问题的贪婪式启发算法 GS

EMNS (P) 问题实质上就是如何选择“好”的 SU 节点的问题。因此节点的选择标准为：若 SU_i 能参与此次协作感知过程，需：①消耗较低的能量 C_i ；②拥有较大的 Pd_i ；③拥有较小的 Pf_i 。为此，对所有节点根据式 (6) 排序。

$$r_i = \frac{-\ln(1 - Pd_i)}{C_i \times (-\ln(1 - Pf_i))} \quad (6)$$

GS (greedy selection) 算法的思想是根据该值从大到小的顺序加入对应的节点，直到 $Pd(FC)$ 和 $Pf(FC)$ 满足阈值约束的要求。基于这种想法，图 3 中给出该 GS 算法的伪码描述。

- | | |
|-----|--|
| 1) | 根据 $r_i = \frac{-\ln(1 - Pd_i)}{C_i \times (-\ln(1 - Pf_i))}$ 对所有 SU 排序，不妨设 $r_1 \geq r_2 \geq \dots \geq r_N$ ； $Pd(FC) = 0$ ， $Pf(FC) = 0$ ；协作感知节点集合 $S = \emptyset$ ； |
| 2) | 对序号 i 从 1 到 N 的节点，执行步骤 3~步骤 14 |
| 3) | 计算 $Pd(FC) = 1 - (1 - Pd_i)(1 - Pd(FC))$ ； |
| 4) | 计算 $Pf(FC) = 1 - (1 - Pf_i)(1 - Pf(FC))$ ； |
| 5) | 若 $(Pd(FC) \leq \alpha \ \& \ Pf(FC) \leq \beta)$ |
| 6) | $S = S \cup SU_i$ ； |
| 7) | 若 $i = N$ |
| 8) | 返回 \emptyset ，算法终止； |
| 9) | 若 $Pd(FC) > \alpha$ 且 $Pf(FC) < \beta$ |
| 10) | 返回 S ，算法终止； |
| 11) | 否则 |
| 12) | 返回 \emptyset ，算法终止； |

图 3 GS 算法的伪码描述

易知，GS 算法的时间主要消耗在采用堆排序获取各节点的 Rank 上面，因此算法的复杂度为 $O(N \log N)$ ，其中， N 为网络中 SU 的数量。

4.4 求解 OENS 问题的在线能量高效节点选择算法

为求解 OENS 问题，基于求解 EMNS 问题的 BAB 和 GS 算法，提出 2 种在线算法 OBAB 和 OGS1。其思想是为了使节点负载均衡的消耗能量，使 SU 节点尽可能多的完成协作感知过程，提出为每个节点引入关于能量的权重系数。该权重系数可保证节点负载均衡的消耗能量，这样若 SU 参与某次协作感知过程，消耗的能量就是原能量乘以权重

系数。随后，在每次协作感知过程中，将其看作一个 EMNS 问题，并利用 BAB 或 GS 算法求解。需说明的是，之所以采用这种思想，是受传统 ad hoc 网络中的最大容量在线能量感知路由问题的启发。例如在文献[11]和本文作者先前的工作[12]中，都采用了动态的关于能量的权重参数来保证能量消耗的负载均衡，以使网络能完成尽可能多的路由请求，延长网络的“生存期”。

具体的说，为 SU_i 引入权重系数 ω_i ， $1 \leq i \leq N$ 。令 $\omega_i = (RE_i / IE_i)^{-\xi}$ ，其中， $\xi > 0$ ， RE_i / IE_i 为 SU_i 的剩余能量比率，随着剩余能量 RE_i 的降低，节点剩余能量比率降低，权重系数增加的幅度加大。例如，若 $\xi = 1, 2, 4$ ， $IE_i = 10$ 时，以 RE_i 为自变量，该系数的函数如图 4 所示。

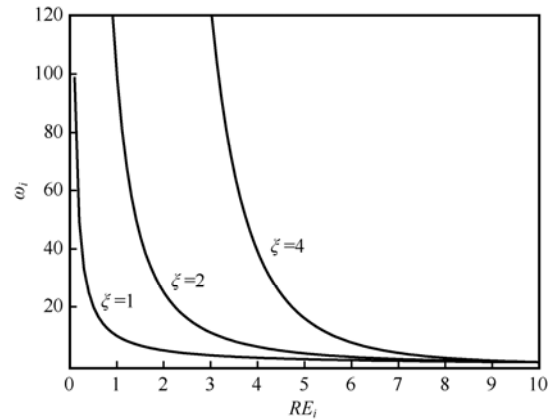


图 4 权重系数随剩余能量 RE_i 变化时的情况 ($\xi = 1, 2, 4$ ， $IE_i = 10$)

引入权重系数后，每一轮协作感知过程开始前，每个节点首先将能量消耗更新为 $\bar{C}_i = C_i \omega_i$ 。当剩余能量变小时，由权重系数的定义，其值变得很大，与原能量消耗值进行加权之后的能量消耗值变大，若利用 BAB 算法或者 GS 算法，根据节点排序原则，被选择为进行协作感知的概率就越小。特别的，称采用权重系数 $\omega_i = (RE_i / IE_i)^{-\xi}$ ， $\xi > 0$ ，利用 BAB 算法求解 OENS 的算法为 OBAB。由于子算法 BAB 得到的解为最优解，本文将 OBAB 作为解决 OENS 的近似优化的算法。此外，称采用权重系数 $\omega_i = (RE_i / IE_i)^{-\xi}$ ， $\xi > 0$ 时，利用 GS 算法的求解问题 OENS 的算法为 OGS1 算法。为与 OGS1 算法进行比较，称若 $\xi = 0$ ，即 $\omega_i = 1$ ，相当于不引入权重系数时，利用 GS 算法求解 OENS 的算法为 OGS2。由于 3 个算法有相似性，在图 5 中仅给出 OGS1 算法的伪码描述。

```

1) 初始化  $RE_i = IE_i, 1 \leq i \leq N$ ; 令完成轮数为 Accomplished Round=0;
2) 设定  $\xi > 0$ ; /* 在算法 OGS2 中, 令  $\xi = 0$  */
3) 循环执行步骤 4)~12)
4) 对序号  $i$  从 1 到  $N$  的节点, 执行步骤 5)~6)
5) 计算权重系数  $\omega_i = (RE_i / IE_i)^{-\xi}$ ;
6)  $C_i = C_i \omega_i$ ;
7)  $S = CALL(GA)$ ;

/*在 GS 中, 据  $r_i = \frac{-\ln(1-Pd_i)}{-\ln(1-Pf_i) \times C_i \times (RE_i / IE_i)^{-\xi}}$  对节点排序 */
/*在算法 OBAB, 令  $S = CALL(BAB)$  */
8) 若  $S \neq \emptyset$ 
9) 对每个  $SU_i \in S$ , 更新  $RE_i = RE_i - C_i$ ;
10) AccomplishedRound++;
11) 否则
12) 返回 AccomplishedRound 结果, 算法结束;
    
```

图 5 OGS1 算法的伪码描述

需说明的是, 由于当 ξ 较小时, 每个节点在能量消耗殆尽时才开始考虑能量的负载均衡问题, 在此之前利用 BAB 或 GS 算法使本轮能量消耗之和最小节点。而当 ξ 很大的时候, 节点一开始就考虑能量的负载均衡问题, 但带来的问题是节点消耗能量加权后, 利用 BAB 或 GS 算法得到的节点可能并不是本轮消耗能量最小的组合。但是, 若要通过理论计算得出最优的 ξ 值, 是较困难的工作。因此, 本文采用文献[11]中的方式, 即通过实验方式确定。实际上, ξ 也只是取[1,10]之间的整数值, 而没有取小数值。因此, 最后通过仿真实验得到的 ξ 值也是近似优化的整数解。

因此需在实验中合理设定 ξ 的值, 使系统尽可能完成更多的协作感知过程。

5 实验与仿真

利用 MATLAB7.0 设计仿真程序对本文提出的 OBAB、OGS1 与 OGS2 算法进行性能评价。评价的指标主要有算法能完成的协作感知过程(单位: 轮)的总数目和相应的算法运行时间。设网络中共

另有一 PU 位于网络中心, 即位于坐标 (500, 500)。实验中 N 可取 10、20、30。设 PU 运行参数 $T_{ON} = 1s$, $T_{OFF} = 1s$, 发送功率 $P_s = 1W$ 。对于每个实例中的每个节点 $SU_i, 1 \leq i \leq N$, 其检测阈值 λ_i 在 $[-30dBm, -25dBm]$ 间随机取值, $\sigma_n^2 = -3dBm$, 若 SU_i 参与协作感知过程, 需进行的采样次数 $u = 10$, 共消耗的能量为 0.01 个能量单位, 发送检测结果所消耗的能量随机分布在 0 到 0.01 个能量单位(模拟了不同节点由于发送功率不同而消耗的能量不同), 因此, C_i 在 0.01 到 0.02 个能量单位之间随机分布, SU_i 的初始能量 IE_i 在 10 到 40 个能量单位之间随机分布。若不做特殊说明, 检测阈值设定为 $\alpha = 0.9, \beta = 0.1$ 。

5.1 算法参数的选择

首先, 对 OBAB, OGS1 算法中的参数 ξ 值进行设定以获得较优化的解。特别的, 若选取 OGS1 算法, 在网络规模分别为 $N = 10, 20, 30$ 时, 每个网络规模分别产生 20 个实例, 计算当 $\xi = 2^i, i \in \{0, \dots, 10\}$ 时得到的结果。20 个实例得到的值取平均后, 结果如表 1 所示。从中可以看出, 当 $\xi < 2^6$, 平均可完成的轮数逐渐增加, 而当 $\xi \geq 2^6$ 时, 平均可完成的轮数降低。当 $\xi = 2^6$ 时, OGS1 展现了最好的性能。因此, 在后续实验中, 在算法 OBAB 和 OGS1 中令 $\xi = 2^6$ 。

5.2 网络节点数目不同时 3 种算法的比较

下面对网络节点数目不同时, 3 种算法得到的解进行比较。图 6 给出当 $N = 10$ 时, 采用 3 种算法在 20 个实例下得到的结果。图 7 又给出 3 种算法对这 20 个实例的结果的均值与平均运行时间。可以看出 OGS1 算法可实现的协作感知轮数平均为 3 224.4, 可达 OBAB 算法得到的近似优化的解 3 415.5 的 94%, 而算法所消耗的平均时间仅仅为 0.25s, 大大小于 OBAB 算法所需的 886s。同时, OGS1 算法得到的 3 224.4 轮与 OGS2 算法得到的 2 598.8 轮

表 1 参数 ξ 取值对于 OGS1 算法的影响

ξ	2^0	2^1	2^2	2^3	2^4	2^5	2^6	2^7	2^8	2^9	2^{10}
$N = 10$	3 360.7	3 371.5	3 376.8	3 378.2	3 381	3 384	3 384.1	3 376.3	3 250.3	2 820.5	2 214.8
$N = 20$	6 412.7	6 412.9	6 413.5	6 413.7	6 414.2	6 415.1	6 415.5	6 400.5	6 120.7	5 144.2	3 786.7
$N = 30$	9 416	9 418.5	9 420.1	9 420.7	9 421.7	9 421.8	9 422	9 402.7	8 948.5	7 393	5 229

有 N 个 SU 随机部署在 $1km \times 1km$ 的正方形区域内,

相比提高了 24%。实验初步表明 OGS1 算法可以有

效解决认知无线网络中面向协作感知的能量高效在线节点选择问题，这是因为在算法 OGS1 中引入了考虑了节点能量消耗负载均衡的权重系数，使得节点能量可以均匀消耗，从而使得那些单个节点 P_f 值较小， P_d 值较大的“好”（以式 (6) 作为判断标准）的节点被持续选中的概率降低，从而能和其他的“差”节点一起实现更多的协作感知过程。而 OGS2 总是利用 P_f 值较小， P_d 值较大的“好”节点，待这些节点能量耗尽后，其他相对较“差”的节点便不能再完成协作感知过程。

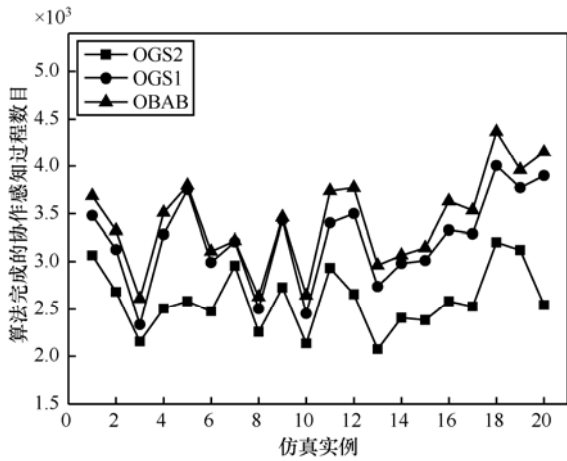


图6 N = 10 时，20 个实例下，3 种算法可完成的协作感知过程的轮数

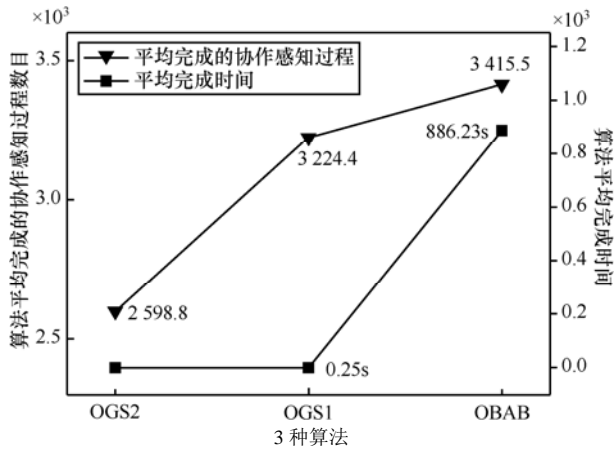


图7 N = 10 时，20 个实例下，3 种算法完成的协作感知过程的平均轮数和平均运行时间

为进一步说明，图 8 给出了某一实例运行后，节点剩余能量的分布情况，从图中可以看出，OGS1 算法由于采用负载均衡，节点最终剩余能量都集中在 0 附近。而 OGS2 算法最后的分布很不均匀， P_d 较小， P_f 较大的节点的“差”节点剩余能量较大，未被充分利用，导致了完成的结果与 OGS1 算法的结果相比大大降低。

接下来，由于当 $N = 20$ ， $N = 30$ 时，OBAB 算法的搜索空间成指数级增长，因此，不能利用该算法在有限的时间内得到较优化的解，故图 9 仅给出 20 个实例下，OGS1 和 OGS2 算法在 2 种网络节点时得到的解。在 $N = 20$ ， $N = 30$ 时，OGS1 算法得到的平均值分别为 6 406.5 和 9 485.85，与 OGS2 算法得到的解 5 645.35 和 8 753.4 相比，分别是它们的 1.13 倍和 1.08 倍。

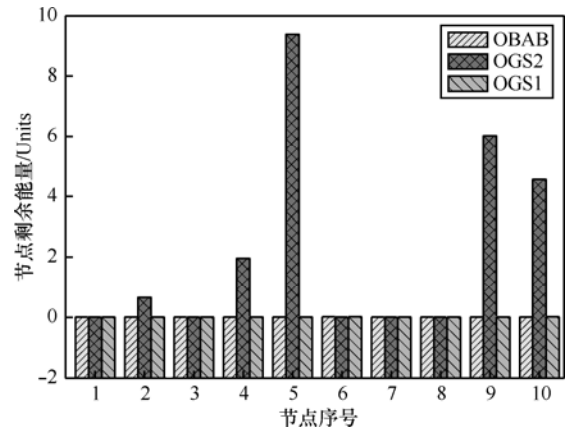


图8 N = 10 时，3 种算法在运行某一实例后，节点能量分布情况

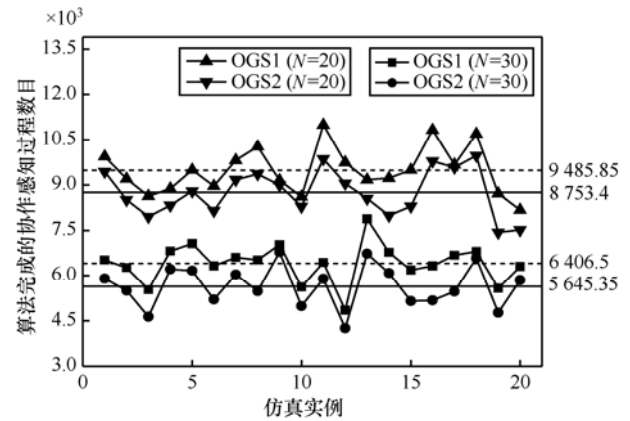


图9 N = 20, 30 时，20 个实例下，OGS1, OGS2 算法可完成的协作感知过程的轮数

6 结束语

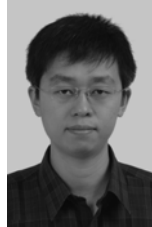
面向认知无线网络中能量高效协作感知任务需求，针对单次协作感知过程的能量最小化节点选择问题 EMNS 和在线协作感知的能量高效节点选择问题 OENS，分别提出基于贪婪节点选择的启发式算法 GS，和引入考虑能量消耗负载均衡的动态权重系数的启发式的在线节点选择算法 OGS1，显著增加了网络可完成的协作感知过程的数目，延长了网络的“生存期”。

参考文献:

- [1] 林闯,田源,姚敏. 绿色网络和绿色评价:节能机制、模型和评价[J]. 计算机学报, 2011, 34(4):593-612.
LIN C, TIAN Y, YAO M. Green network and green evaluation: mechanism, modeling and evaluation[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(4):593-612.
- [2] ZHANG W, MALLIK R K, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks[A]. Proc of 2008 Int'l Conference on Communications (ICC)[C]. Beijing, China, 2008. 3411- 3415.
- [3] PEH E C Y, LIANG Y C, GUAN Y L, *et al.* Optimization of cooperative sensing in cognitive radio networks: a sensing-throughput tradeoff view[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 5294-5299.
- [4] ARSHAD K, IMRAN M A, MOESSNER K. Collaborative spectrum sensing optimization algorithms for cognitive radio networks[J]. International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, 2010.doi: 10.1155/2010/424036.
- [5] AKYILDIZ I F, LO B F, BALAKRISHNAN R. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey[J]. Physical Communication, 2011, 4(1):40-62.
- [6] SUN C, ZHANG W, BEN K. Cluster-based cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems[A]. Proc of IEEE of 2007 Int'l Conference on Communications (ICC)[C]. 2007. 2511-2515.
- [7] PHAM H N, ZHANG Y, ENGELSTAD P, *et al.* Energy minimization approach for optimal cooperative spectrum sensing in sensor-aided cognitive radio networks[A]. Proc of ICST WiCON[C]. 2010. 1-9.
- [8] MALEKI S, PANDHARIPANDE A, LEUS G. Energy-efficient distributed spectrum sensing for cognitive sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2011,11(3):565-573.
- [9] LI Y, XIE S, ZHANG Y, *et al.* Energy-efficient spectrum discovery for cognitive radio green networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2012, 17(1):1-11.
- [10] GAREY M R, JOHNSON D S. Computer and Intractability: a Guide to the Theory of NP-Completeness[M]. W H Freeman & Co, New York, NY, USA, 1990.
- [11] PARK J, SAHNI S. An online heuristic for maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans Computers, 2006, 55(8): 1048-1056.
- [12] YANG W, LIANG W, LUO J, *et al.* Energy-aware online routing with

QoS constraints in multi-rate wireless ad hoc networks[A]. Proc of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)[C]. Caen, France, 2010. 721-725.

作者简介:



杨威 (1982-), 男, 辽宁台安人, 海军装备研究院工程师, 主要研究方向为计算机网络、无线网络的资源优化问题。



管东林 (1970-), 男, 江苏东台人, 海军装备研究院高级工程师, 主要研究方向为计算机网络。



逯东辉 (1974-), 男, 北京人, 海军装备研究院工程师, 主要研究方向为通信网络。



彭立宏 (1972-), 女, 湖南衡山人, 国防科学技术大学讲师, 主要研究方向为计算机网络。



竇文华 (1946-), 男, 山西平定人, 国防科学技术大学教授、博士生导师, 主要研究方向为高级计算机网络。