

## 基于离散粒子群优化算法的合作感知调度方案

张星, 王野, 杨艺, 张钦宇

(哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东 深圳 518055)

**摘 要:** 采用 CTMC 模型分析了网络状态的统计特性, 考虑各个次用户感知能力的差异性, 分别从主用户和次用户的角度出发, 建立了 2 个关于次用户调度方案的整数规划问题。提出了通过离散粒子群优化算法求解所建问题, 并与传统的随机调度方案和基于信噪比的贪婪调度方案进行了比较。仿真结果表明, 所提调度方案获得的感知性能更高。

**关键词:** 认知无线电; 多授权认知无线网络; 合作感知调度; 离散粒子群优化算法

**中图分类号:** TN925

**文献标识码:** A

## Cooperative spectrum sensing scheduling scheme based on discrete particle swarm optimization algorithm

ZHANG Xing, WANG Ye, YANG Yi, ZHANG Qin-yu

(College of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** The statistical characteristics of the network state changes were analyzed by using the CTMC model. Considering the difference of each secondary user's sensing ability, two integer programming problems on cooperative sensing scheduling scheme were established from two aspects: the primary users and the secondary users respectively. A discrete particle swarm optimization algorithm was proposed to solve the integer programming problems, and compared with the traditional random scheduling scheme and greedy scheduling scheme based on SNR. The simulation results show that the cooperative sensing scheduling scheme based on discrete particle swarm optimization algorithm is superior to random scheduling scheme and greedy scheduling scheme based on the SNR, which gets a higher spectrum sensing accuracy.

**Key words:** cognitive radio, cognitive radio network with multiple licensed network, cooperative sensing scheduling, discrete particle swarm optimization

### 1 引言

无线应用的爆炸式增长, 使频谱资源出现了严重的紧缺局面。然而, 紧缺的频谱资源并没有得到充分的利用。根据 FCC 的调查研究发现, 授权频谱的利用率仅为 15%~85%, 在某些时间段频谱处在空闲浪费的状态<sup>[1]</sup>。认知无线网络 (CRN, cognitive radio network) 是提高频谱利用率和缓解频谱资源紧张的一种有效方式。CRN 中的次用户 (SU, secondary user) 在不干扰授权网络 (LN, licensed network) 中的主用户 (PU, primary user) 传输的前

提下, 通过频谱感知技术实时检测 LN 中信道的状态, 接入发现的空闲信道, 并在 PU 再次出现时, 及时退出该信道<sup>[2]</sup>, 即 PU 具有抢占式优先级, 可以抢占 SU 占用的信道。

然而 PU 的抢占式优先级以及空闲信道的空时变化特性会导致 CRN 的性能不稳定。随着网络融合技术的发展以及异构网络的普及, CRN 与多个 LN 交互逐渐成为可能。这种交互给 SU 提供了更多的频谱接入机会和网络选择, 使 CRN 的服务质量能够得到保障。本文将与多个 LN 交互的 CRN 称为多授权认知无线网络 (CRNMLNS, cognitive radio

收稿日期: 2016-07-28; 修回日期: 2016-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501140)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61501140)

network with multiple licensed networks)。

频谱感知作为实现 CRN 的第一步,是保障 PU 的性能不受干扰的基础,决定着 CRN 后续工作能否正常开展。相比与单个 LN 交互的 CRN 频谱感知,CRNMLNS 的频谱感知面临着更多的挑战,如待感知的信道数成倍增加、频带不连续且跨度大、不同 LN 的网络特性不同、SU 对不同信道的检测能力不同等。

CRNMLNS 的频谱感知问题可被看成是一个复杂的多信道感知问题,目前,在多信道感知问题的研究中,文献[3]建立了多信道合作频谱感知的数学模型,并通过穷举算法和贪婪算法来优化 SU 的分配,从而提高 CRN 的吞吐量。文献[4]在 SU 数量大于待感知信道数的多信道系统模型下,研究了 SU 数量有限和无限这 2 种情况下的多信道合作感知优化问题。文献[5]将需要感知出的可用信道数作为约束条件,对 SU 进行分簇,每个簇各自合作感知一个不同的信道,最小化达到指定可用信道数的时间。文献[6]提出在感知时间较短、待感知信道数较多以及 SU 数量较少时采用序列感知策略最佳,而在其他情况下则采用并行感知策略来最大化 CRN 吞吐量,提出了一种适用于所有情况的混合时序——并行感知策略,通过额外的开销来达到最佳的感知性能。文献[6]的作者在文献[7]中进一步详细讨论了在所有 SU 检测能力同构和所有 SU 检测能力异构这 2 种情况下 3 种感知策略的内存消耗和计算复杂度。以上文献都是通过优化 SU 的调度方案来提高多信道感知的性能,但都存在着一些不足。

文献[3~6]假设“每个 SU 的感知能力相同”不合理。感知性能取决于信道条件,在实际网络中,各个 SU 接收机相对同一 PU 发射机之间的距离不等,各个 SU 在接收 LN 信道上的信号时面临的信道衰落不同,导致不同 SU 面对同一信道时获得的信噪比不同。

此外,以上文献都只研究了每个 SU 一次仅能检测一个信道的情况,没有考虑一个 SU 可以检测多个信道的情况。当信道不连续且 SU 数量大于信道数时,可以给 SU 配备多条射频链<sup>[8]</sup>来接收多个频带的信号,再通过合作频谱感知来提高频谱感知精度。

针对以上不足,本文在研究 CRNMLNS 的频谱感知问题时,将综合考虑各个 SU 感知能力的差异性,各个 LN 之间的频带不连续以及每个 SU 可以

检测多个 LN 等情况,对 SU 进行合作感知调度来完成频谱感知,采用 CTMC 模型分析 CRNMLNS 网络状态变化的统计特性,分别从 PU 和 SU 这 2 个角度出发对 SU 的合作感知调度方案进行建模。从 PU 的角度出发,在保证 SU 不会错过太多的频谱接入机会的条件下,通过合作感知调度使错误检测出的空闲信道数最少;从 SU 的角度出发,在满足 PU 受到的干扰低于规定门限的约束条件下,通过合作感知调度使正确检测出的空闲信道数最多。本文提出一种基于离散粒子群优化(DPSO, discrete particle swarm optimization)算法的合作感知调度方案,并将该调度方案与传统的随机调度方案和基于信噪比的贪婪调度方案进行算法对比与仿真验证。仿真结果表明,在 CRNMLNS 同构和异构这 2 种场景下,相比于随机调度方案和基于信噪比的贪婪调度方案,本文所提基于 DPSO 算法的合作感知调度方案获得的感知性能更优,即正确检测出的空闲信道数更多,错误检测出的空闲信道数更少。

## 2 网络模型

### 2.1 网络结构

CRNMLNS 的网络结构如图 1 所示。在一个有限的地理范围内,分布着一些 LN,用集合  $\mathcal{M}=\{1,2,\dots,M\}$  表示。CRN 由 SU 和融合中心(FC, fusion center)组成。SU 可以机会式地使用这些 LN 共享的正交信道,假设  $LN_m$  共享的信道数为  $N_m$ 。本文采用时分复用的信道使用方式,即每个信道在同一个时刻只服务一个用户。不失一般性,假设 PU 和 SU 的行为服从马尔可夫性<sup>[9]</sup>。单位时间内 PU 到达  $LN_m$  的数量服从参数为  $\lambda_p^m$  的泊松分布,在  $LN_m$  中停留的时间服从参数为  $\mu_p^m$  的指数分布;单位时间内 SU 到达各个 LN 的数量服从参数为  $\lambda_s$  的泊松分布,在各个 LN 中停留的时间服从参数为  $\mu_s$  的指数分布。

根据信道所处的状态,将 LN 共享的信道分为带内信道和带外信道<sup>[10]</sup>。被 SU 占用的信道称为带内信道,空闲的和被 PU 占用的信道称为带外信道。带内信道上的 SU 周期性地感知 PU 是否出现,当感知到 PU 接入时, SU 及时退出该信道。未接入信道的 SU 可以通过频谱感知技术对带外信道进行感知并接入被检测为空闲状态的信道。本文研究的是带外信道的感知。设参与带外信道

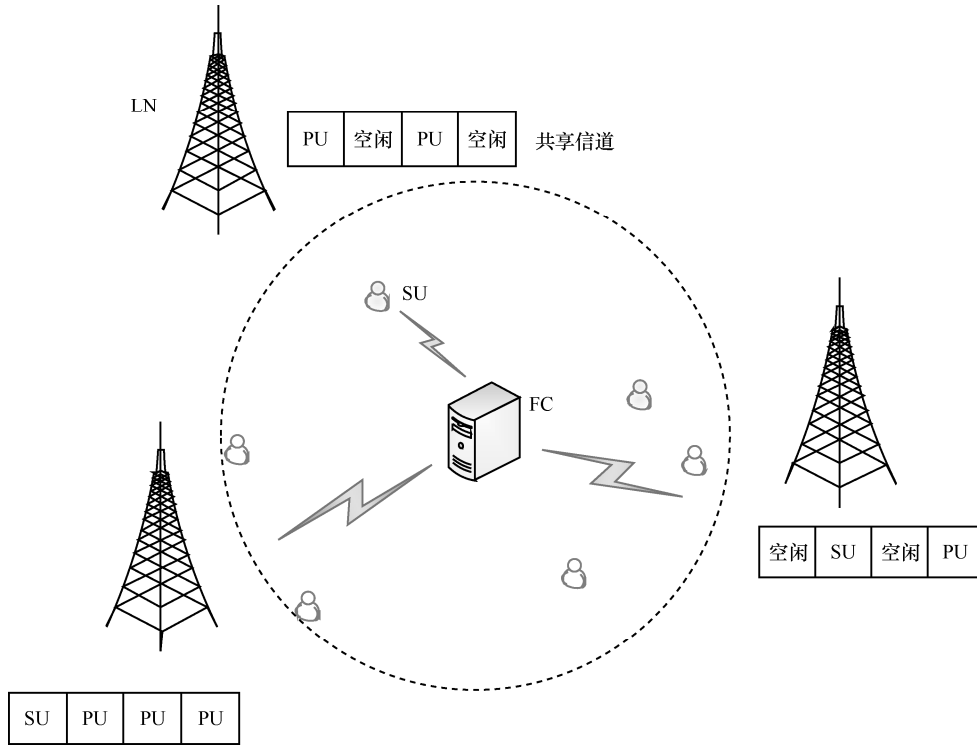


图 1 CRNMLNS 的网络结构

感知的 SU 用集合  $\mathcal{K}=\{1,2,\dots,K\}$  表示，且  $K>M$ 。考虑 SU 机身小、电量小的特点，假设给每个 SU 配备  $N_{RFC}(N_{RFC}<M)$  个可调的射频链，每个射频链一次可检测一个 LN。设  $SNR_{k,m}$  为  $SU_k$  在检测  $LN_m$  时获得的平均信噪比。为了减少衰落、阴影以及隐藏终端问题对频谱感知性能的影响，本文采用合作频谱感知方式。

CRNMLNS 的工作流程如图 2 所示。首先 FC 根据设定的合作感知调度方案，给参与带外感知的每个 SU 分配一组 LN 去感知。SU 独自感知完成后，将各自的本地感知结果上传到 FC，FC 对上传的感知结果进行融合来判决网络的最终状态。当 SU 需要进行动态频谱接入时，就向 FC 发起信道接入请求。FC 根据收到的信道接入请求，进行相应的接入调度。最后是对网络性能进行评估，如网络吞吐量、SU 的阻塞率、SU 的掉话率等。本文主要研究

SU 的合作感知调度问题。

### 2.2 网络状态分析

不完美感知会对 SU 的动态频谱接入造成影响，要精确地获得每个 LN 的信道使用统计特性是很困难的。本文假设 SU 的动态频谱接入是在完美感知的基础上开展的。针对 PU 和 SU 的接入，采用基于频谱切换和贪婪网络选择策略的接入方式。假设 PU 完全不知道 SU 的信息，PU 和 SU 的接入过程分别如图 3(a)和图 3(b) 所示。

本文采用 CTMC 模型来分析 CRNMLNS 中网络状态的变化。根据信道所处的状态，将网络状态描述为  $s=(n_p, n_s)$ ，其中， $n_p=(n_p^1, n_p^2, \dots, n_p^M)$ 、 $n_s=(n_s^1, n_s^2, \dots, n_s^M)$  分别表示每个 LN 中被 PU 占用的信道个数和被 SU 占用的信道个数。网络状态空间  $\Omega$  可以表示为

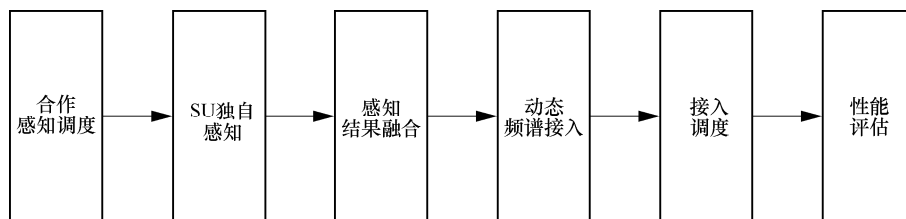


图 2 CRNMLNS 工作流程

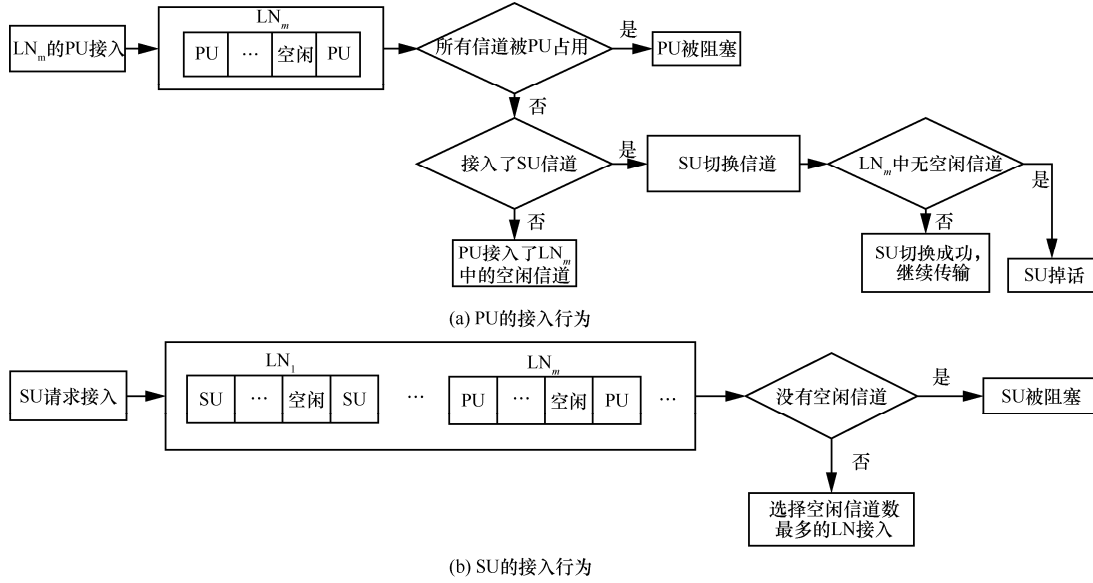


图 3 PU 和 SU 的接入过程

$$\Omega = \{s | n_p^m \geq 0, n_s^m \geq 0, n_p^m + n_s^m \leq N_m, \forall m \in \mathcal{M}\} \quad (1)$$

在各种网络状态下, SU 选择各个 LN 接入的概率矩阵即网络接入选择方案用  $\theta$  表示。若状态空间  $\Omega$  中共有  $S$  种状态, 则  $\theta$  是一个  $S \times M$  的矩阵,  $\theta = \{\theta_{s,m}\}, \forall s \in \Omega, \forall m \in \mathcal{M}$ 。矩阵元素  $\theta_{s,m}$  表示在网络状态为  $s$  时, SU 选择  $LN_m$  接入的概率。根据 SU 将选择一个具有空闲信道数最多的 LN 接入的贪婪网络选择策略,  $\theta_{s,m}$  定义为

$$\theta_{s,m} = \begin{cases} 1, & m = \arg \max_m (N_m - n_p^{m'} - n_s^{m'}), \\ \forall m' \in \mathcal{M}, N_m - n_p^m - n_s^m \neq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$n_m$  是一个第  $m$  位为 1, 其余位为 0 的向量。 $n_p \pm n_m$  表示在  $LN_m$  中增加或减少一个 PU,  $n_s \pm n_m$  表示在  $LN_m$  中增加或减少一个 SU。网络状态变化的 CTMC 模型如图 4 所示。

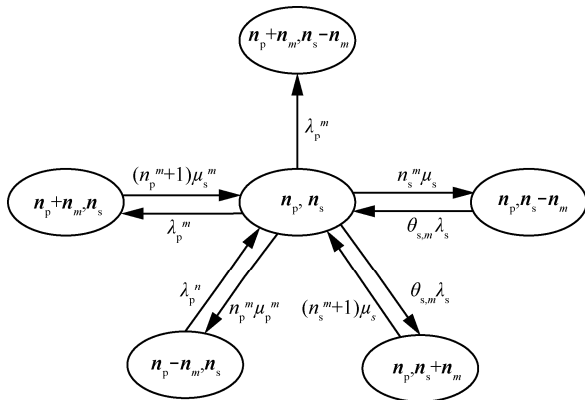


图 4 网络状态变化的 CTMC 模型

假设当前状态  $s=(n_p, n_s)$ , 根据图 4 的接入模型, CTMC 模型的  $S \times S$  维无穷小生成矩阵  $A^\theta$  如式(3)所示, 其中,  $\forall m \in \mathcal{M}$ 。

$$A^\theta(s, s') = \begin{cases} \lambda_p^m, s' = (n_p + n_m, n_s), n_p^m + n_s^m < N_m \\ \lambda_p^m, s' = (n_p + n_m, n_s - n_m), n_p^m + n_s^m = N_m \\ n_p^m \mu_p^m, s' = (n_p - n_m, n_s) \\ \theta_{s,m} \lambda_s, s' = (n_p, n_s + n_m), n_p^m + n_s^m < N_m \\ n_s^m \mu_s, s' = (n_p, n_s - n_m) \\ A^\theta(s, s) = - \sum_{s', s' \neq s} A^\theta(s, s') \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

基于各态历经稳态理论, 可通过方程组(4)解出 CRNMLNS 各种状态出现的稳态概率  $\pi = \{\pi(s)\}, \forall s \in \Omega$ , 其中,  $e=[1, 1, \dots, 1]^T$ 。

$$\begin{cases} \pi A^\theta = 0 \\ \pi e = 1 \end{cases} \quad (4)$$

在感知前已知 CRNMLNS 中已接入信道的 SU 的分布情况, 假设  $LN_m$  中被 SU 占用的信道个数  $n_s^m = j$ , 则在  $LN_m$  中存在  $i$  个被 PU 占用的信道的条件概率为

$$\pi_{PU|SU}^m(i | j) \approx \frac{\sum_{n_p^m=i, n_s^m=j} \pi(s)}{\sum_{n_s^m=j} \pi(s)}, 0 \leq i \leq N_m - j, 0 \leq j \leq N_m \quad (5)$$

设  $LN_m$  中空闲信道的个数为  $n_{IDLE}^m$ , 根据  $n_p^m + n_s^m + n_{IDLE}^m = N_m$ , 可知当  $LN_m$  中存在  $j$  个被 SU

占用的信道时,  $LN_m$  中有  $k$  个空闲信道的条件概率为

$$\begin{aligned} \pi_{IDLE|SU}^m(k|j) &= \pi_{PU|SU}^m(N_m - k - j|j), \\ 0 \leq k \leq N_m - j, 0 \leq j \leq N_m \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.3 合作频谱感知

#### 1) 单点感知

在 PU 信号特征未知的情况下, 能量检测法以其快速、易实现的特点被广泛使用<sup>[11]</sup>。本文采用能量检测法进行单点感知。虚警概率和漏检概率是衡量频谱感知性能的 2 个关键指标。虚警概率是指空闲信道被误检为存在 PU 信号的概率, 漏检概率是指存在 PU 信号的信道被误检为空闲信道的概率。虚警导致 SU 错失频谱接入机会, 漏检导致 SU 接入 PU 占用的信道, 对 PU 的信号传输造成干扰。根据文献[12], 能量检测法得到的虚警概率  $P_f$  和漏检概率  $P_e$  之间的关系为

$$P_e = Q\left(\frac{2E_s - Q^{-1}(P_f)\sqrt{MN_0^2}}{\sqrt{MN_0^2 + 4E_s N_0}}\right) \quad (7)$$

其中,  $Q(\cdot) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$  是标准正态分布的尾概率函数,  $\frac{N_0}{2}$  是双边噪声功率谱密度。一个感知周期内共采样  $2M$  个信号,  $E_s$  是每个感知周期的平均采样能量, 通过式(8)可以估计  $\frac{E_s}{N_0}$  的值。

$$\frac{E_s}{N_0} = SNR_{k,m} + M \quad (8)$$

#### 2) 结果融合

SU 完成单点感知之后, 将本地感知结果上传到 FC 进行结果融合。常见的融合规则有软融合、硬融合等<sup>[12]</sup>。考虑 SU 和 FC 之间的控制信道带宽有限, 本文采用 SU 上传 1 bit 本地检测结果的硬融合规则来完成合作感知。硬融合主要分为逻辑与和逻辑或 2 种, 接下来将分别介绍。在感知结果中, 用“1”表示信道被 PU 占用, “0”表示信道空闲。

对于逻辑与 (&) 的硬融合规则, 根据“0&0=0, 0&1=0, 1&1=1”可知, 只要有一个 SU 的检测结果为 0, 信道就被判定为空闲信道。这给 SU 带来了更多的频谱接入机会, 但可能存在漏检的情况。为了避免 PU 被干扰的太多, 必须限制漏检概率。假设  $SU_k$  在检测  $LN_m$  时获得的虚警概率和漏检概率

分别用  $P_f(k,m)$  和  $P_e(k,m)$  表示。合作感知调度方案表示为  $\psi = \{\psi_{k,m}\}$ ,  $\forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}$ , 其中,  $\psi_{k,m} \in \{0,1\}$  表示  $SU_k$  是否检测  $LN_m$ , “1”表示检测, “0”表示不检测。对于  $LN_m$ , 在逻辑与的硬融合规则下, SU 之间的合作虚警概率  $F_f^m$  和合作漏检概率  $F_e^m$  分别定义为

$$F_f^m = \prod_{k \in \mathcal{K}} [P_f(k,m)]^{\psi_{k,m}} \quad (9)$$

$$F_e^m = 1 - \prod_{k \in \mathcal{K}} [1 - P_e(k,m)]^{\psi_{k,m}} \quad (10)$$

对于逻辑或 (|) 的硬融合规则, 根据“0|0=0, 0|1=1, 1|1=1”可知, 只要有一个 SU 检测出该信道存在 PU, 就判定该信道被 PU 占用。这很好地保护了 PU 信号的传输, 但可能存在虚警的情况。为了满足 SU 的频谱接入需求, 应限制虚警概率。对于  $LN_m$ , 在逻辑或的硬融合规则下, SU 之间的合作虚警概率  $F_f^m$  和合作漏检概率  $F_e^m$  分别为

$$F_f^m = 1 - \prod_{k \in \mathcal{K}} [1 - P_f(k,m)]^{\psi_{k,m}} \quad (11)$$

$$F_e^m = \prod_{k \in \mathcal{K}} [P_e(k,m)]^{\psi_{k,m}} \quad (12)$$

综上, 针对 SU 希望获得更多的频谱接入机会的目标, 应采用逻辑与的硬融合规则。而对于 PU, 希望信道被漏检的个数越少越好, 则采用逻辑或的硬融合规则。

## 3 问题建模

本文分别从 SU 和 PU 的目标出发, 通过优化合作感知调度方案  $\psi$  来提高 CRNMLNS 的频谱感知精度。

### 3.1 SU 的目标函数

假设  $LN_m$  中实际存在  $n_{IDLE}^m$  个空闲信道, 则根据式(9), 从中正确检测出  $i$  个空闲信道的概率为

$$P_{right}^m(i|n_{IDLE}^m) = \binom{n_{IDLE}^m}{i} (1 - F_f^m)^i (F_f^m)^{n_{IDLE}^m - i} \quad (13)$$

在  $LN_m$  中正确检测出的空闲信道数用  $R(m)$  表示, 根据式(6)和式(13)得到  $R(m)$ 。其中,  $E_{\pi_{IDLE|SU}}$  表示在条件稳态概率  $\pi_{IDLE|SU}$  下获得的正确检测出的空闲信道数的均值。

$$\begin{aligned} R(m) &= E_{\pi_{IDLE|SU}} [P_{right}^m(i|n_{IDLE}^m)] \\ &= \sum_{n_{IDLE}^m=0}^{N_m - n_s} \sum_{i=0}^{n_{IDLE}^m} i \cdot P_{right}^m(i|n_{IDLE}^m) \pi_{IDLE|SU}(n_{IDLE}^m | n_s^m) \end{aligned} \quad (14)$$

从 SU 的角度出发, 通过有效的合作感知调度方案  $\psi$ , 在保障 PU 受到的干扰低于规定门限, 即限制合作漏检概率  $F_e^m$  的前提下, 使正确检测出的空闲信道数最多, SU 的目标函数为

$$\max R = \max \sum_{m=1}^M R(m) \quad (15)$$

约束条件为

$$C_1: \psi_{k,m} \in \{0,1\}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}$$

$$C_2: \sum_{m=1}^M \psi_{k,m} \leq N_{\text{RFC}}, \forall k \in \mathcal{K}$$

$$C_3: F_e^m < C_e^m, \forall m \in \mathcal{M}$$

上述目标函数中, 待优化的参数为合作感知调度方案  $\psi$ 。其约束条件  $C_1$  表示  $SU_k$  是否检测  $LN_m$ ,  $C_2$  表示每个 SU 最多感知  $N_{\text{RFC}}$  个 LN,  $C_3$  表示  $F_e^m$  必须低于给定的常量  $C_e^m$ , 避免对 PU 造成过大的干扰。根据 IEEE 802.22 标准, 设置  $F_e^m = 0.1, \forall m \in \mathcal{M}$ 。

### 3.2 PU 的目标函数

假设  $LN_m$  中实际存在  $n_p^m$  个被 PU 占用的信道, 则根据式(12), 其中有  $j$  个被漏检为空闲信道的概率为

$$P_{\text{wrong}}^m(j | n_p^m) = \binom{n_p^m}{j} (F_e^m)^j (1 - F_e^m)^{n_p^m - j} \quad (16)$$

在  $LN_m$  中被漏检的信道数用  $W(m)$  表示, 根据式(5)和式(16)得到  $W(m)$ 。其中,  $\pi_{\text{PU|SU}}$  表示在条件稳态概率  $\pi_{\text{PU|SU}}$  下获得的漏检信道数的均值。

$$\begin{aligned} W(m) &= E_{\pi_{\text{PU|SU}}} [P_{\text{wrong}}^m(j | n_p^m)] \\ &= \sum_{n_p^m=0}^{N_m - n_s^m} \sum_{j=0}^{n_p^m} j \cdot P_{\text{wrong}}^m(j | n_p^m) \pi_{\text{PU|SU}}(n_p^m | n_s^m) \end{aligned} \quad (17)$$

从 PU 的角度出发, 通过有效的合作感知调度方案  $\psi$ , 采用奈曼皮尔逊准则, 在限制合作虚警概率  $F_f^m$  的前提下, 希望 PU 占用的信道被错误感知为空闲信道的个数最少, PU 的目标函数为

$$\min W = \min \sum_{m=1}^M W(m) \quad (18)$$

约束条件为

$$C_4: \psi_{k,m} \in \{0,1\}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}$$

$$C_5: \sum_{m=1}^M \psi_{k,m} \leq N_{\text{RFC}}, \forall k \in \mathcal{K}$$

$$C_6: F_f^m < C_f^m, \forall m \in \mathcal{M}$$

约束条件  $C_6$  表示  $F_f^m$  必须低于给定的常量  $C_f^m$ ,

保证 SU 不会错过太多空闲信道的接入机会。根据 IEEE 802.22 标准, 设置  $F_f^m = 0.1, \forall m \in \mathcal{M}$ 。

## 4 调度方案设计

### 4.1 随机调度方案

随机调度方案是指让每个 SU 等概率地随机选择  $N_{\text{RFC}}$  个 LN 进行感知的方案。这种调度方案适用于在信道条件未知的情况下使用。根据建立的 CRNMLNS 模型, 在  $M$  个 LN 中选出其中  $N_{\text{RFC}}$  个的组合共有  $L = C_M^{N_{\text{RFC}}}$  种, 则对于每个参与感知的 SU 将有  $L$  种调度方案可以选择。将各个 SU 的调度方案合并就构成了 CRNMLNS 的合作感知调度方案。随机调度方案的伪代码如下。

输入  $K, M, N_{\text{RFC}}, N_m(m=1,2,\dots,M)$

输出  $R$  或  $W; \psi$

1) for  $k=1:K$  //为每个 SU 选择感知方案

2) scheduling( $k$ )=从  $(1,2,\dots,L)$  中等概率随机选择 1 个值; //  $L = C_M^{N_{\text{RFC}}}$

3)  $\psi(:,k) = \text{scheduling}(k)$ ; //对应的调度方案

4) end for

5) ObjectiveFunction; //计算目标函数值

### 4.2 基于信噪比的贪婪调度方案

在信道条件已知的情况下, 可采用基于信噪比的贪婪调度方案。相比于随机调度方案, 基于信噪比的贪婪调度方案是调度每个 SU 去检测前  $N_{\text{RFC}}$  个信噪比高的 LN。通过提高空间分集增益来提高感知精度。基于信噪比的贪婪调度方案伪代码如下。

输入  $K, M, \text{SNR}_k, N_{\text{RFC}}, N_m(m=1,2,\dots,M)$

输出  $R$  或  $W, \psi$

1) for  $k=1:K$  //为每个 SU 选择感知方案

2) [value, order] = sort( $\text{SNR}_k$ , 'descend');  
//将向量  $\text{SNR}_k$  按降序排列

3)  $\psi(\text{order}(1:N_{\text{RFC}}), k) = 1$  //取出前  $N_{\text{RFC}}$  个 LN 作为  $SU_k$  的调度方案

4) end for

5) ObjectiveFunction; //计算目标函数值

### 4.3 基于 DPSO 算法的合作感知调度方案

本文要求解的是 2 个带约束的多元整数规划问题, DPSO 算法是一种解决多元整数规划问题的有效手段<sup>[13]</sup>。DPSO 算法的粒子包含位置和速度 2 个属性, 粒子的位置对应目标函数的解, 速度则是用来作为位置优化的依据, 通过群体协作和迭代来更

新粒子的位置，从而找到最优解。解的好坏由适应度函数来评价，一般直接将目标函数作为适应度函数使用。根据前面建立的 CRNMLNS 模型和目标函数，每个 SU 在  $M$  个 LN 中选择  $N_{RFC}$  个 LN 来感知的组合有  $L=C_M^{N_{RFC}}$  种，待优化参数  $\psi$  与粒子位置  $x$  之间的编码关系如图 5 所示。SU $_k$  的调度方案为  $(\psi_{k,1}, \psi_{k,2}, \dots, \psi_{k,M})$ ，对应粒子位置的第  $k$  维  $x_k$ 。

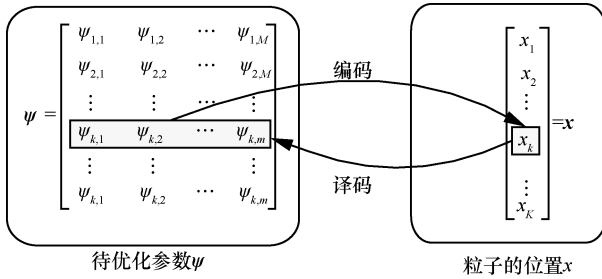


图 5 合作感知调度方案  $\psi$  与粒子位置  $x$  之间的编码关系

其中， $\psi_{k,m} \in \{0,1\}, \sum_{m=1}^M \psi_{k,m} \leq N_{RFC}, x_k \in \{1,2,\dots,L\}$

设当前迭代次数为  $t$ ，最大迭代次数为  $T$ ，粒子群群体大小为  $N$ ，根据图 5 的编码关系可知，每个粒子的位置和速度都是  $K$  维。DPSO 算法的求解步骤如下。

1)  $t=0$ ，创建初始粒子群。

创建粒子群，即初始化每个粒子的位置和速度。设粒子  $i$  的位置为  $x_i^t = (x_{i,1}^t, \dots, x_{i,k}^t, \dots, x_{i,K}^t)$ ， $i=1,2,\dots,N$ 。在处理待优化函数的约束条件时，将粒子位置的取值限制在约束条件构成的可行解区域，根据图 5 的编码关系， $x_{i,k}^t \in \{1,2,\dots,L\}$ 。为快速地收敛到最优位置，取一般的等概率随机生成粒子位置的方式，改用以  $L$  种调度方案的归一化平均信噪比作为概率来生成粒子的位置。粒子速度的取值范围由粒子位置取值范围的宽度决定<sup>[14]</sup>，设粒子  $i$  的速度为  $v_i^t = (v_{i,1}^t, \dots, v_{i,k}^t, \dots, v_{i,K}^t)$ ， $i=1,2,\dots,N$ ，其中， $-L \leq v_{i,k}^t \leq L$ 。

2) 计算初始粒子群各粒子的适应度(fitness)。

采用待求解的优化函数作为适应度函数来评价粒子位置的好坏，即解的好坏。

① 针对 SU 的目标函数

$fitness=R$ 。设  $p_i=(p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,K})$  为粒子  $i$  迭代至今的最优位置，则  $p_i = \arg \max_{x_i^t} (fitness(x_i^t))$ ， $t' = 0, 1, \dots, t$ ；

$p_g=(p_{g,1}, p_{g,2}, \dots, p_{g,K})$  为群体迭代至今的最优位置，则

$p_g = \arg \max_{x_i^t} (fitness(x_i^t))$ ， $i=1,2,\dots,N, t'=0,1,\dots,t$ 。

② 针对 PU 的目标函数

$fitness=W$ 。迭代至今的个体最优

$p_i = \arg \min_{x_i^t} (fitness(x_i^t))$ ， $t'=0,1,\dots,t$ ，群体最优

$p_g = \arg \min_{x_i^t} (fitness(x_i^t))$ ， $i=1,2,\dots,N, t'=0,1,\dots,t$ 。

3)  $t=t+1$ ，更新每个粒子的速度  $v$ 。

DPSO 算法的速度更新为

$$v_{i,k}^t = \omega v_{i,k}^{t-1} + c_1 r_1 (p_{i,k} - x_{i,k}^{t-1}) + c_2 r_2 (p_{g,k} - x_{i,k}^{t-1}) \quad (19)$$

其中， $\omega$  是惯性权重， $c_1$ 、 $c_2$  是加速度因子， $r_1$ 、 $r_2$  是介于 0 和 1 之间的随机数。系数  $\omega, c_1, c_2$  是控制 DPSO 算法是否收敛以及收敛速度的决定性因子。 $\omega$  直接控制粒子是继续在局部搜索还是跳出当前局部区域往外搜索，根据文献[13,14]，本文的  $\omega$  采用线性递减策略： $\omega=0.9 - \frac{0.5t}{T}$ ，随着迭代次数增加，粒子的位置

越来越靠近最优解，粒子的速度也应该越来越小。 $c_1$ 、 $c_2$  控制自身最优位置与全局最优位置对下一时刻速度的影响程度，也是决定粒子能否找到最优解的关键因子， $c_1$ 、 $c_2$  的取值需满足  $c_1+c_2>4\omega$ ，来保证算法的收敛性<sup>[15]</sup>，本文直接设置  $c_1=c_2$ 。关于粒子速度越界，若  $v_{i,k}^t < -L$ ，则  $v_{i,k}^t = -L$ ；若  $v_{i,k}^t > L$ ，则  $v_{i,k}^t = L$ 。

4) 更新粒子的位置  $x$ ，确定新粒子群。

DPSO 算法采用归一化的速度作为位置更新的依据。使用 *sigmoid* 函数对粒子的速度进行归一化。

$$sigmoid(v_{i,k}^t) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{i,k}^t)} \quad (20)$$

粒子位置  $x_{i,k}^t$  取值集合为  $\{1,2,\dots,L\}$ ，将  $[0,1]$  等比例划分为  $L$  个子区间，根据求得的  $sigmoid(v_{i,k}^t)$  所处的区间，更新位置  $x_{i,k}^t$  的取值。

$$x_{i,k}^t = \begin{cases} 1 & sigmoid(v_{i,k}^t) \in [0, \frac{1}{L}) \\ 2 & sigmoid(v_{i,k}^t) \in [\frac{1}{L}, \frac{2}{L}) \\ \vdots & \vdots \\ L & sigmoid(v_{i,k}^t) \in [\frac{L-1}{L}, 1] \end{cases}, i=1,2,\dots,N, k \in K \quad (21)$$

5) 计算新粒子群中每个粒子的适应度，更新

$p_i$  和  $p_g$ 。

① 针对 SU 的目标函数

如果  $fitness(\mathbf{x}'_i) > fitness(\mathbf{p}_i)$ , 则  $\mathbf{p}_i = \mathbf{x}'_i$ ; 否则  $\mathbf{p}_i$  不变。设  $\mathbf{x}'_g$  为当前粒子群中适应度值最大的位置, 即  $\mathbf{x}'_g = \arg \max_{\mathbf{x}'_i} (fitness(\mathbf{x}'_i)), i=1,2,\dots,N$ 。如果  $fitness(\mathbf{x}'_g) > fitness(\mathbf{p}_g)$ , 则  $\mathbf{p}_g = \mathbf{x}'_g$ ; 否则  $\mathbf{p}_g$  不变。

② 针对 PU 的目标函数

如果  $fitness(\mathbf{x}'_i) < fitness(\mathbf{p}_i)$ , 则  $\mathbf{p}_i = \mathbf{x}'_i$ ; 否则  $\mathbf{p}_i$  不变。设  $\mathbf{x}'_g$  为当前粒子群中适应度值最小的位置, 即  $\mathbf{x}'_g = \arg \min_{\mathbf{x}'_i} (fitness(\mathbf{x}'_i)), i=1,2,\dots,N$ 。如果  $fitness(\mathbf{x}'_g) < fitness(\mathbf{p}_g)$ , 则  $\mathbf{p}_g = \mathbf{x}'_g$ ; 否则  $\mathbf{p}_g$  不变。

6) 如果  $t=T$ , 算法结束, 得到最优的调度方案  $\mathbf{p}_g$ ; 否则跳到步骤 3)。

基于 DPSO 算法的合作感知调度方案伪代码如下。

输入  $c_1, c_2, N, K, M, N_{RFC}, SNR_{k,m} (k=1,2,\dots, K, m=1,2,\dots, M), T$

输出  $R$  或  $W, \psi$

1) for  $k=1:K$

2) for  $i=1:L$

3) 计算  $SU_k$  针对第  $i$  组 LN 的归一

化信噪比;

4) end for

5) end for

6) for  $n=1:N$

7) for  $k=1:K$

8)  $x(n,k)$  = 根据得到的概率  $p$  从  $\{1,2,\dots, L\}$  中选择一个值;

9)  $v(n,k) = 2Lrand - L$ ;

10) end for

11) end for

12) 计算初始粒子群各粒子的适应度 ( $fitness$ )

并存储自身最优  $\mathbf{p}_i$  和群体最优  $\mathbf{p}_g$ ;

13) for  $t=1:T$

14)  $w = 0.9 - \frac{0.5t}{T}$ ; // 惯性权重

15) 更新各粒子的速度  $\mathbf{v}$ ;

16) 更新各粒子的位置  $\mathbf{x}$ ;

17) 更新  $\mathbf{p}_i$  和  $\mathbf{p}_g$ ;

18) end for

19) 对最优粒子  $\mathbf{p}_g$  位置进行译码得到  $\psi$ ;

20) ObjectiveFunction; // 计算目标函数值

## 5 仿真与结果分析

### 5.1 仿真环境

无线信道的衰落主要包含路径损耗、阴影衰落、多径衰落以及噪声, 其中, 路径损耗占绝大部分。本文采用 COST-231 Hata 模型来计算路径损耗, 路径损耗<sup>[15]</sup>为

$$PL = (44.9 - 6.55 \lg(h_{BS})) \lg d + 45.5 + (35.46 - 1.1h_{MS}) \lg F_m - 13.82 \lg(h_{BS}) + 0.7h_{MS} + C \quad (22)$$

其中,  $h_{BS}$ 、 $h_{MS}$  分别是指 LN 基站和 SU 的高度, 单位为 m;  $d$  是指 SU 与 LN 基站之间的距离, 单位为 km;  $F_m$  是  $LN_m$  的中心频率, 单位为 MHz;  $C$  是中心修正因子, 采用大城市为中心,  $C=3$  dB。

阴影衰落服从标准差为 8 dB 的正态分布, 多径衰落采用 Clarke 平坦衰落模型, 噪声采用高斯白噪声模型。其余仿真参数及取值如表 1 所示。

表 1 仿真参数及取值

参数	含义	取值
$M$	LN 个数	3
$N_m$	各个 LN 共享的信道数	[4, 4, 4]
$K$	参与感知的 SU 个数	6
$N_{RFC}$	每个 SU 感知的 LN 个数	2
$\lambda_p^m / (\text{个} \cdot \text{s}^{-1})$	PU 的到达速率	[0.5, 0.5, 0.5]
$\mu_p^m / (\text{个} \cdot \text{s}^{-1})$	PU 的离开速率	[0.5, 0.5, 0.5]
$\lambda_s / (\text{个} \cdot \text{s}^{-1})$	SU 的到达速率	1
$\mu_s / (\text{个} \cdot \text{s}^{-1})$	SU 的离开速率	0.5
$h_{BS}/\text{m}$	基站高度	32
$h_{MS}/\text{m}$	SU 的高度	1.5
$F_m/\text{MHz}$	LN 的中心频率	[1 900, 2 300, 3 400]
$N$	粒子群大小	100

### 5.2 仿真结果及性能分析

#### 5.2.1 同构 CRNMLNS 环境

在每个 LN 的网络特征都相同的同构 CRNMLNS 环境下, 3 种调度方案在 2 个目标函数上得到的仿真结果如图 6 和图 7 所示。图中横坐标为已接入信道的 SU 分布的索引, 索引 0 表示 LN 中没有被 SU 占用的信道, 随着索引值增加, SU 占用的信道逐渐增多, 直到所有信道都被 SU 占用, 没有信道可感知, 所以图中的曲线最后都归于 0。



从 2 幅图中可以看出，基于信噪比的贪婪调度方案由于提升了空间分集增益，其性能优于随机调度方案，而本文提出的基于 DPSO 算法的合作感知调度方案则比前 2 个调度方案得到的性能更优，即针对 PU 得到的漏检信道数更少，针对 SU 得到的正确检测出的空闲信道数更多。

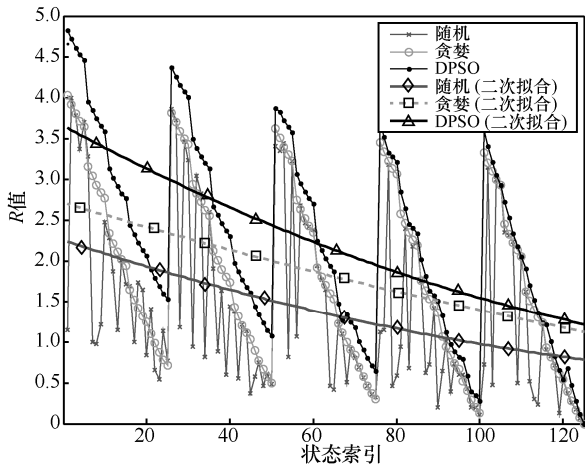


图 6 同构 CRNMLNS 的 R 值

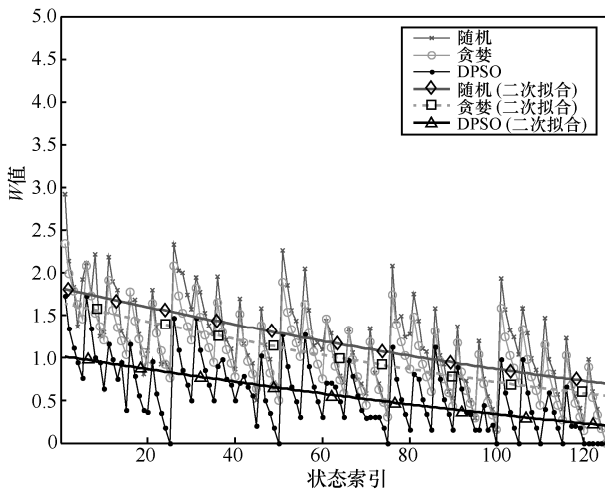


图 7 同构 CRNMLNS 的 W 值

### 5.2.2 异构 CRNMLNS 环境

在各个 LN 的网络特征不同的异构 CRNMLNS 环境中，设各个 LN 中共用的信道数分别为[5, 4, 3], PU 的到达速率分别为[0.5, 1.0, 1.5], 3 种调度方案仿真的结果如图 8 和图 9 所示。图 8 显示基于信噪比的贪婪调度方案在 R 上的性能略微低于基于 DPSO 算法的调度方案。仿真结果表明，在异构环境下，基于 DPSO 算法的合作感知调度方案获得的感知性能仍优于随机调度方案和基于信噪比的贪婪调度方案。

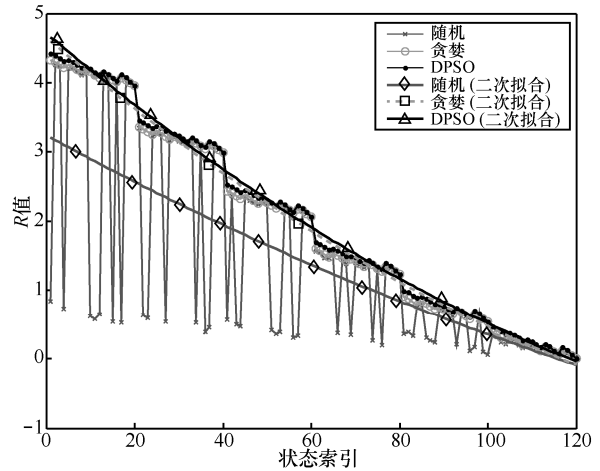


图 8 异构 CRNMLNS 的 R 值

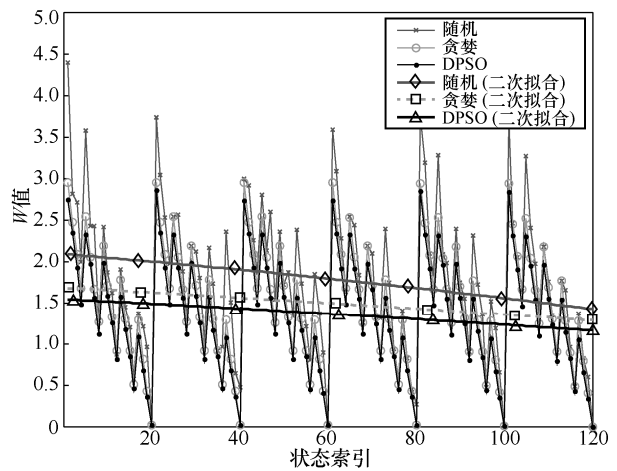


图 9 异构 CRNMLNS 的 W 值

为了验证理论分析与仿真结果的一致性，在异构 CRNMLNS 环境下，针对 2 个目标函数分别绘制了在各个 LN 中，SU 调度个数的直方图以及获得的性能直方图，结果如图 10 和图 11 所示。图 10 是对应 SU 的目标函数获得的结果，图 10(a) 表示 3 种调度方案在所有 SU 分布状态索引下获得的平均 R 值，图 10(b)是对应各个 LN 中调度的平均 SU 个数。图 11 对应 PU 的目标函数。从 2 幅图中可以看出，在 3 个 LN 中 PU 对信道的平均使用率分别为 20%、45%、65%的情况下，LN<sub>1</sub> 的信道使用率最小且共享的信道数最多，不管是从 PU 还是从 SU 的需求考虑，派去感知 LN<sub>1</sub> 的 SU 都应该是最多的，这与仿真结果图 10 和图 11 中基于 DPSO 算法的合作感知调度方案相一致，所以相比随机调度方案和基于信噪比的贪婪调度方案，本文提出的基于 DPSO 算法的合作感知调度方案得到的感知性能更优。

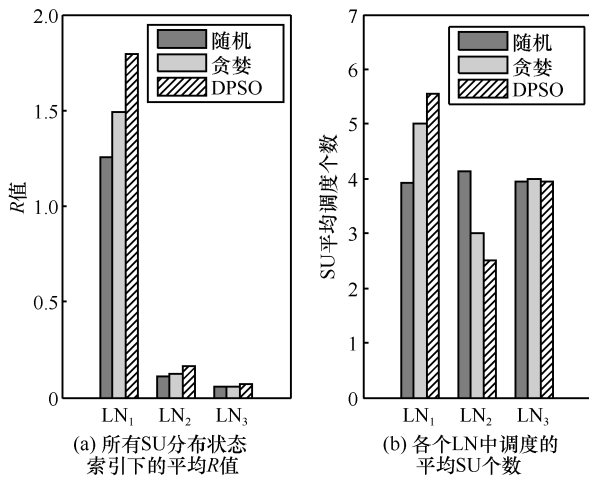


图 10 SU 角度下的平均  $R$  值及 SU 平均调度个数

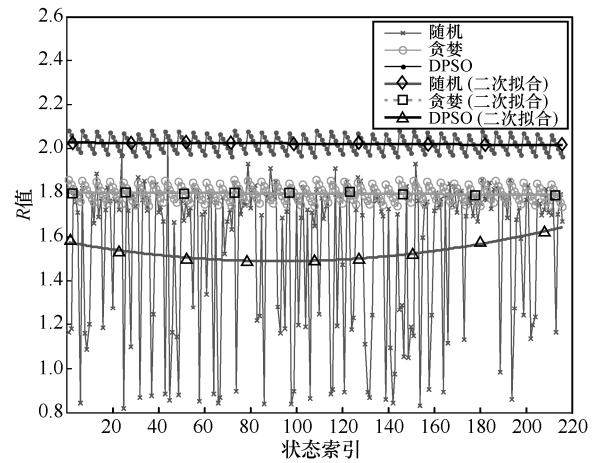


图 12 以 PU 到达速率为变量的  $R$  值

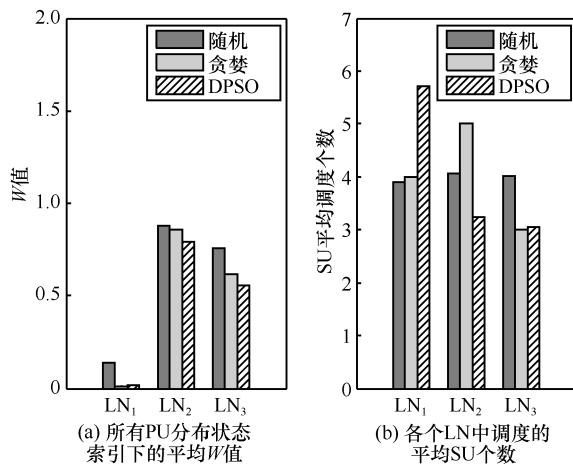


图 11 PU 角度下的平均  $W$  值及 SU 平均调度个数

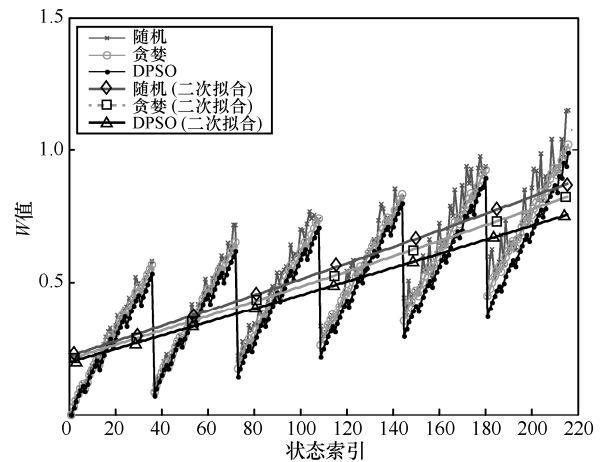


图 13 以 PU 到达速率为变量的  $W$  值

PU 包含 2 个特征，服务时长和到达速率。在实际应用中，PU 的服务时长是根据自身业务需求而定，一般是固定的，而 PU 的到达速率却是很难获得的。接下来将分析在不同的 PU 到达速率下 3 种合作感知调度方案的感知性能。假设 3 个 LN 中 PU 的到达速率取值范围都是  $\lambda_p^m \in [0, 0.4], \forall m \in \mathcal{M}$ ，其余参数与异构 CRNMLNS 的仿真参数相同。在 3 个 LN 的 PU 到达速率以 0.05 为间隔的三重循环变化下，3 种合作感知调度方案的感知性能如图 12 和图 13 所示。图中横轴为 3 个 LN 的 PU 到达速率变化的索引。

从图 12 和图 13 可以看出，不管 PU 的到达速率怎么变化，基于信噪比的贪婪调度方案优于随机调度方案，而基于 DPSO 算法的合作感知调度方案又优于基于信噪比的贪婪调度方案。因此，基于 DPSO 算法的合作感知调度方案在不同的 CRMLN 环境下都能获得很好的性能。

## 6 结束语

本文针对多授权认知无线电网络的频谱感知问题，通过对参与感知的 SU 进行合作感知调度来提高频谱感知的精度。本文采用 CTMC 模型分析了多授权认知无线网络状态变化的统计特性，综合考虑了各个 SU 感知能力的差异性，分别从 PU 和 SU 的角度出发，建立了 2 个关于 SU 调度方案的整数规划问题。首先采用了传统的随机调度方案，之后针对已知的信道条件，采用了基于信噪比的贪婪调度方案，通过提升空间分集增益来提高频谱感知精度。为进一步优化合作感知调度方案，本文提出了通过 DPSO 算法求解建立的整数规划问题，得到了基于 DPSO 算法的合作感知调度方案。仿真结果表明，不管在同构还是异构的多授权认知无线网络环境下，相比于随机调度方案和基于信噪比的贪婪调度方案，本文所提基于 DPSO 算法的合作感知调度方案获得的感知性能更优。

## 参考文献:

- [1] FCC B. ET docket No 03-222. Notice of proposed rule making and order[R]. CFP Multit Edu, 2003.
- [2] MITOLA J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio[D]. Royal Institute of Technology, 2000.
- [3] YU H G, TANG W B, LI S Q. Optimization of cooperative spectrum sensing in multiple-channel cognitive radio networks[C]//Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011). Houston, TX, USA, 2011: 1-5.
- [4] XU J L, CHEN M, WANG N. Optimal cooperative spectrum sensing in multi-channel cognitive radio networks[C]//International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). Hangzhou, China, 2013: 1-6.
- [5] SENADJI B, CHANG K. Hybrid multi-channel cooperative spectrum sensing to satisfy channel target[C]//IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). London, UK, 2013: 2301-2305.
- [6] AZARFAR A, LIU C H, FRIGON J F, et al. Cooperative spectrum sensing scheduling optimization in multi-channel dynamic spectrum access networks[C]//IEEE Global Communications Conference. 2014: 810-815.
- [7] LIU C H, AZARFAR A, FRIGON J F, et al. Robust cooperative spectrum sensing scheduling optimization in multi-channel dynamic spectrum access networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, (99):1.
- [8] QUAN Z, CUI S G, SAYED A H, et al. Wideband spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//IEEE International Conference on Communications. Beijing, China, 2008: 901-906.
- [9] ZHANG N, LIANG H, CHENG N, et al. Dynamic spectrum access in multi-channel cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(11):2053-2064.
- [10] ANAMALAMUDI S. Energy-efficient hybrid ccc-based mac protocol for cognitive radio ad hoc networks[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(1): 358-369.
- [11] HUMBLET P, AZIZPGLU M. On the bit error rate of lightwave systems with optical amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(11): 1576-1582.
- [12] 夏巧桥. 认知无线电多信道联合感知算法研究与优化[D]. 武汉: 武汉大学, 2014: 21-25.  
XIA Q Q. Research and optimization of multi channel joint sensing algorithm for cognitive radio[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014: 21-25.
- [13] 郭文忠, 陈国龙, 陈振. 离散粒子群优化算法研究综述[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 632-636.  
GUO W Z, CHEN G L, CHEN Z. Review of discrete particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2011, 39(5): 632-636.
- [14] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Trans Evol Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [15] BANIMELHEM O, AL-ZU'BI M M, AL SALAMEH M S. Hata path loss model tuning for cellular networks in Irbid city[C]//IEEE International Conferences on Computer and Information Technology. Liverpool, UK, 2015.

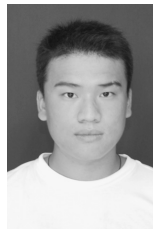
## 作者简介:



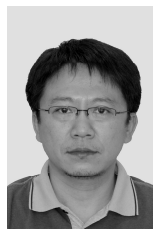
张星(1992-), 女, 四川宜宾人, 哈尔滨工业大学(深圳)硕士生, 主要研究方向为认知无线网络。



王野(1983-), 男, 黑龙江佳木斯人, 哈尔滨工业大学(深圳)助理教授, 主要研究方向为认知无线电和认知网络。



杨艺(1985-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学(深圳)博士生, 主要研究方向为认知无线电和认知网络。



张钦宇(1972-), 男, 江苏扬州人, 哈尔滨工业大学(深圳)教授, 主要研究方向为认知无线电、5G移动通信、深空通信、信息论等。