

# 认知无线网络中多信道频谱感知周期优化算法

刘洋<sup>1,4</sup> 崔颖<sup>2</sup> 李鸥<sup>1</sup> 刘伟俊<sup>3</sup>

(1. 解放军信息工程大学信息系统工程学院, 郑州, 450001; 2. 中国人民解放军 65017 部队, 沈阳, 110162; 3. 中国人民解放军 91269 部队, 湛江, 524088; 4. 中国人民解放军 65022 部队, 沈阳, 110162)

**摘要:** 为了使认知无线电次用户发现并使用更多的空闲频谱资源, 提出了一种多信道频谱感知周期优化算法。针对实际网络中各授权信道使用规律的不同, 本文基于交替更新理论建立了多信道状态转移模型, 将各信道感知周期的选取建模为一个带约束条件的多目标优化问题, 并采用遗传算法对其求解, 获得了相对较优的多信道感知周期向量。仿真结果表明, 本文提出的目标函数能够有效衡量多信道空闲频谱资源检测率。当目标网络中包含 8 个授权信道时, 所提算法可发现的空闲频谱资源占实际空闲频谱资源的 68.23%, 相对于以相同周期对各信道进行频谱感知的 OFDM 机制提高 17.68%。

**关键词:** 认知无线网络; 多信道; 频谱感知; 感知周期; 遗传算法

中图分类号: TN92 文献标志码: A

## Spectrum Sensing Period Optimization Algorithm in Multi-channel Environment for Cognitive Radio Networks

Liu Yang<sup>1,4</sup>, Cui Ying<sup>2</sup>, Li Ou<sup>1</sup>, Liu Weijun<sup>3</sup>

(1. Department of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou, 450002, China; 2. Troop 65017 of PLA, Shenyang, 110162, China; 3. Troop 91269 of PLA, Zhanjiang, 524088, China; 4. Troop 65022 of PLA, Shenyang, 110162, China)

**Abstract:** In order to discover and employ more spectrum opportunities for the secondary users in cognitive radio networks, a multi-channel spectrum sensing period optimization algorithm is proposed. The main idea of this method is to set unequal sensing period for each licensed channel, which has different usage pattern. We first construct the multi-channel states transition model by alternating renewal theory. Secondly, based on the continuous-time Markov chain, the choice of the multi-channel sensing period is modeled as a constrained multi-objective optimization problem. Finally, the multi-objective optimization problem is solved by genetic algorithms. The simulation results validate the performance of the derived objective function. When there are eight licensed channels in the target network, the proposed algorithm discovers 68.23% of free spectrum opportunities, which brings up to 17.68% more opportunities than the OFDM sensing method.

**Key words:** cognitive radio networks; multi-channel; spectrum sensing; sensing period; genetic algorithms

## 引言

认知无线网络是提高频谱资源利用率的有效方法之一,近年来已成为通信领域的研究热点。为发现更多的空闲频谱资源,最为理想的方法是对授权信道进行时域上的连续检测。然而,由于硬件及能量上的限制,次用户(Secondary user, SU)通常难以实现。一种可行的方法是周期性感知<sup>[1]</sup>,即每隔一段时间对信道状态进行一次检测。在周期性感知中,感知周期的长短(对信道检测频率的高低)是影响频谱资源检测率的主要因素。如果感知周期过大,会导致信道的部分状态变化不能被SU发现,造成空闲频谱资源漏检;如果感知周期过小,则会导致SU在同一信道状态上的频繁检测,增加不必要的能量开销。因此有必要对感知周期的数学模型及算法进行优化,该问题的研究对进一步提高频谱利用率具有客观的现实意义。目前,国内外在感知周期方面的现有研究中,大多是以SU接入时间最大化<sup>[2]</sup>或检测能量最小化<sup>[3]</sup>为原则,而且对单信道感知周期的研究居多<sup>[4,5]</sup>。考虑实际网络中通常包含多个授权信道,SU若能同时了解它们的信道状态,则可在提高自身吞吐量的同时,减小主用户(Primary user, PU)返回信道时的切换时延。文献[6]基于OFDM感知机制,对多信道感知周期优化问题进行了研究,在保证PU一定服务质量的前提下,将感知周期的选取建模为一个带约束条件的非线性优化问题,并给出了该机制下最优感知周期的选取方法。然而,与文献[6]类似,在优化多信道感知周期的现有研究中,大多均简单假设SU是以相同的周期对各信道进行感知<sup>[7,8]</sup>,却忽略了PU对授权信道的使用规律(信道负载)差异。实际上,当各授权信道的使用规律不同时,SU若能以不同的周期对其进行感知,那么多信道条件下的频谱资源检测率将有望得到进一步提高。

本文以最大化空闲频谱资源检测率为目标,对多信道感知周期优化问题进行了研究。首先,基于交替更新理论建立了使用规律不同的多信道状态转移模型。通过分析频谱感知过程中可能影响SU发现或使用空闲频谱资源的两种情况,由连续时间马尔科夫理论推导出衡量多信道空闲频谱资源检测率的目标函数。然后,采用遗传算法(Genetic algorithms, GA)对确立的多目标优化问题进行求解。同时,为提高GA在本文应用背景下的算法性能,本文还对其进行了改进。最后,通过仿真实验将本文算法与现有优化算法进行对比,验证了所提算法的性能。

## 1 系统模型

### 1.1 多信道频谱感知流程

假设目标网络中包含 $M$ 个连续的授权信道, $N$ 个SU和一个中心节点(Center node, CN)组成一跳可达的次用户网络。为避免单点感知存在的隐藏终端<sup>[9]</sup>及阴影效应<sup>[10]</sup>等问题,假设SU以协作的方式对目标网络进行频谱感知。图1给出了 $M=2, N=3$ 时的协作频谱感知时序图。由图1可见,3个SU分别根据信道1,2的感知周期 $T_1$ 和 $T_2$ 对其进行协作频谱感知。SU在每次单点感知结束后,分别将各自的感知结果发送至CN,并由CN对信道状态做出最终判决。此后,CN根据该判决结果制定频谱分配方案并将其发布给SU。最后,再由SU完成对指定信道的机会频谱接入。

与单信道协作频谱感知流程所不同,多信道条件下为保证协作频谱感知的性能,假设当SU正使用某信道进行通信时,若此时认知系统需要对其他信道进行协作频谱感知,则该用户应暂停数

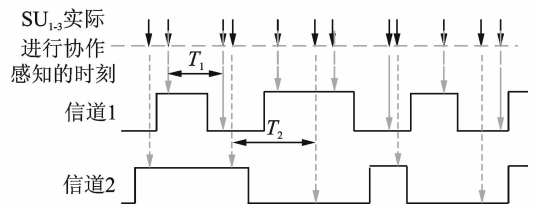


图1 协作频谱感知时序图

Fig. 1 Timing sequence diagram of cooperative sensing

据传输并参与协作感知,之后再返回传输状态并完成数据传输。此机制虽然以牺牲 SU 的部分通信时间为代价,但却有效避免了隐藏终端问题的发生<sup>[11]</sup>,使 PU 业务得到了进一步的保障。另外,在检测 PU 返回信道方面,规定当某空闲信道已分配给 SU 使用时,则停止对该信道的协作频谱感知,而由 CN 采用由文献[12]提出的过零检测法,检测该信道的 PU 是否返回,从而有效避免了使用感知静默周期所带来的频谱资源浪费问题。

由于本文是以提高空闲频谱资源检测率为目标,对多信道感知周期优化问题进行的研究。因此为了缩小问题涉及范围,文中并没有考虑 SU 的信息回传方式、回传信道可靠性以及 CN 采用何种融合准则等细节问题,而将 CN 的最终判决结果假定为与实际信道状态相一致。

### 1.2 多信道状态转移模型

考虑实际网络中各授权信道使用规律的不同,将其建模为参数不同的开关信道使用模型。图 2 给出了多信道中,任意信道  $i$  的信道状态转移图,  $i = 1, 2, \dots, M$ 。由图 2 可见,任意信道  $i$  都具有 ON, OFF 两种状态,而且状态转移概率为 1。其中, ON 表示信道被 PU 占用, OFF 表示信道空闲。在业务流方面,假设  $i$  信道的授权用户分别以速率  $u_i^{-1}$  和  $\lambda_i^{-1}$  的泊松过程到达和离开信道。由泊松过程的定义可知, ON/OFF 状态的持续时间长度  $X_i$  和  $Y_i$ , 分别服从参数为  $u_i$  和  $\lambda_i$  的指数分布。由此可以得到 ON/OFF 状态分别服从指数分布的交替更新过程,其状态转移时序图如图 3 所示。其中,  $X_i$  和  $Y_i$  的概率密度函数表达式分别为

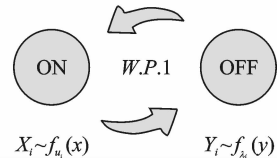


图 2 开关信道状态转移模型

Fig. 2 States transition diagram of switching channel

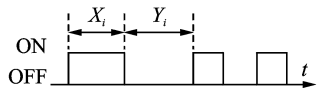


图 3 信道状态转移时序图

Fig. 3 Timing sequence of channel states transition diagram

$$f_{u_i}(x) = u_i^{-1} e^{-x/u_i} \quad (1)$$

$$f_{\lambda_i}(y) = \lambda_i^{-1} e^{-y/\lambda_i} \quad (2)$$

若用  $\hat{u}_i$  和  $\hat{\lambda}_i$  分别表示交替更新过程发生很长一段时间之后,任意时刻  $t$  处于 ON, OFF 状态的统计概率,则由交替更新理论可知<sup>[13]</sup>

$$\hat{u}_i = u_i / (u_i + \lambda_i) \quad (3)$$

$$\hat{\lambda}_i = \lambda_i / (u_i + \lambda_i) \quad (4)$$

另外,  $\hat{u}_i$  和  $\hat{\lambda}_i$  还表示信道处于 ON, OFF 状态的时间与总时间的统计比例。

## 2 问题建模

首先对频谱感知过程中,可能影响 SU 发现或使用空闲频谱资源的两种情况进行分析,然后将推导出衡量多信道空闲频谱资源检测率的目标函数。

SU 对开关信道的频谱感知过程,实际上是通过一些离散的采样点对信道状态进行的检测,而实际的状态转换时刻通常难以获得。如图 4 中,  $T_i$  表示  $i$  信道的协作频谱感知周期。观测信道是 SU 基于周期性感知,从实际信道获得的信道状态观测值。如图可见,由于采样点 C 没有恰好位于信道忙闲转换的下降沿(点 B)上,使得 SU 误认为  $i$  信道是从 C 点才开始空闲的,从而造成了 B, C

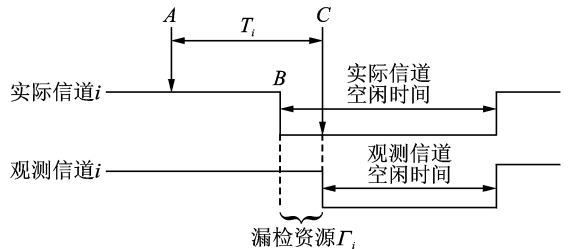


图 4 漏检资源

Fig. 4 Undiscovered opportunities

两点间空闲频谱资源的漏检。将  $i$  信道的漏检资源记作  $\Gamma_i$ , 并将  $\Gamma_i$  占  $i$  信道总频谱资源的比例记为  $\xi_i$ 。由于  $\xi_i$  的存在, 使得  $i$  信道可发现的空闲频谱资源通常小于该信道实际的空闲频谱资源。

在观测信道  $i$  的空闲频谱资源中, 由于接入该信道的 SU 需要周期性的参与其他信道的协作频谱感知, 因此占用了该信道的部分空闲频谱资源。如图 5 中,  $T_j$  表示  $j$  信道的协作频谱感知周期,  $\tau_j$  表示  $j$  信道的感知时间,  $j=1, 2, \dots, M$  且  $j \neq i$ , 则  $\tau_j$  就是 SU 由于参与  $j$  信道的协作频谱感知而占用的  $i$  信道的空闲频谱资源, 将这部分资源占  $i$  信道总频谱资源的比例记为  $\eta_i$ 。由于  $\eta_i$  的存在, 会导致  $i$  信道可用的频谱资源通常小于该信道可发现的空闲频谱资源。图 4 中, 实际信道  $i$  发生频谱资源漏检的概率等于 A 点检测结果为 ON 且 C 点检测结果为 OFF 的概率。若用  $A_{1,i}$  表示事件: {A 点检测结果为 ON},  $C_{0,i}$  表示事件: {C 点检测结果为 OFF}, 并用  $\Lambda_i$  表示事件: {空闲频谱资源漏检发生}, 则由条件概率可知

$$P(\Lambda_i) = P(A_{1,i}C_{0,i}) = P(A_{1,i})P(C_{0,i} | A_{1,i}) \quad (5)$$

设  $Q_i$  代表  $i$  信道的状态转移速率矩阵

$$Q_i = \begin{pmatrix} -\lambda_i & \lambda_i \\ u_i & -u_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

则由柯尔莫哥洛夫方程可知<sup>[13]</sup>,  $i$  信道的连续时间马尔科夫状态转移概率矩阵  $\exp(Q_i t)$  可表示为

$$\exp(Q_i t) = \begin{pmatrix} \hat{u}_i + \hat{\lambda}_i e^{-(\lambda_i + u_i)t} & \hat{\lambda}_i [1 - e^{-(\lambda_i + u_i)t}] \\ \hat{u}_i [1 - e^{-(\lambda_i + u_i)t}] & \hat{\lambda}_i + \hat{u}_i e^{-(\lambda_i + u_i)t} \end{pmatrix} \quad (7)$$

由于 A, C 两点间的距离为  $T_j$ , 因此

$$P(C_{0,i} | A_{1,i}) = \hat{u}_i [1 - e^{-(\lambda_i + u_i)T_j}] \quad (8)$$

将式(3,8)代入(5)可得,  $i$  信道上任意采样点后发生频谱资源漏检的概率为

$$P(\Lambda_i) = \frac{u_i^2}{(u_i + \lambda_i)^2} [1 - e^{-(u_i + \lambda_i)T_j}] \quad (9)$$

在交替更新理论中, 任意时刻  $t$  的年龄是指, 从  $t$  时刻到它上一次更新发生的时刻之间的时间长度<sup>[13]</sup>。因此, 图 4 中的漏检资源  $\Gamma_i$  即为信道状态转为 OFF 后, 第一个采样点的年龄, 其概率密度函数为  $\bar{F}_i(t)/\hat{\lambda}_i$ 。其中  $\bar{F}_i(t) = 1 - F_i(t)$ ,  $F_i(t)$  是  $X_i + Y_i$  的分布函数。因此只要求出  $F_i(t)$  就可以求出漏检情况发生时, 单位周期内漏检资源  $\Gamma_i$  的条件期望  $E(\Gamma_i | \Lambda_i)$ 。

令随机变量  $Z_i = X_i + Y_i$ 。由于  $X_i$  和  $Y_i$  相互独立且均是格点的, 因此其联合概率密度函数  $f(x_i, y_i) = f(x_i)f(y_i)$ ,  $0 \leq y_i \leq z_i$ 。由卷积公式及式(1,2)可得

$$\begin{aligned} f_{Z_i}(z_i) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(z_i - y_i, y_i) dy_i \\ &= \frac{1}{\lambda_i - u_i} (e^{-z_i/\lambda_i} - e^{-z_i/u_i}) \end{aligned} \quad (10)$$

$\Gamma_i$  的概率密度函数为

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_i^{-1} \bar{F}_i(t) &= \hat{\lambda}_i^{-1} [1 - \int_0^t f_{Z_i}(z) dz] \\ &= \frac{1}{\lambda_i (\lambda_i - u_i)} (\lambda_i e^{-t/\lambda_i} - u_i e^{-t/u_i}) \end{aligned} \quad (11)$$

因此, 任意周期内漏检资源  $\Gamma_i$  的条件期望为

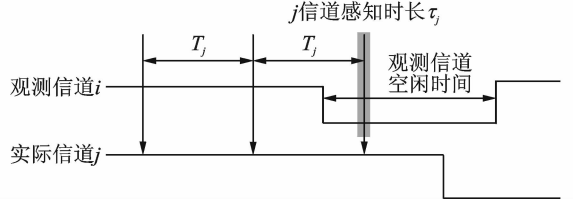


图 5 占用资源

Fig. 5 Occupied opportunities

$$E(\Gamma_i | \Lambda_i) = \int_0^{T_i} t \bar{F}_i(t) \hat{\lambda}_i^{-1} dt = \frac{\lambda_i^2 [\lambda_i - e^{-T_i/\lambda_i} (\lambda_i + T_i)] - u_i^2 [u_i - e^{-T_i/u_i} (u_i + T_i)]}{\lambda_i (\lambda_i - u_i)} \quad (12)$$

由式(9,12)可得,任意感知周期内漏检资源的期望为  $E(\Gamma_i) = P(\Lambda_i)E(\Gamma_i | \Lambda_i)$ 。由于交替更新过程中 ON/OFF 状态更新一次所用时间的期望为  $u_i + \lambda_i$ ,其中包含采样周期的个数为  $(u_i + \lambda_i)/T_i$ ,从而每个 ON/OFF 转换过程中漏检资源的期望为  $E(\Gamma_i)(\mu_i + \lambda_i)/T_i$ 。因此,漏检资源占  $i$  信道总频谱资源的比例为

$$\xi_i(T_i) = \frac{E(\Gamma_i)(\mu_i + \lambda_i)/T_i}{\mu_i + \lambda_i} = \frac{u_i^2 \{ \lambda_i^2 [\lambda_i - e^{-T_i/\lambda_i} (\lambda_i + T_i)] - u_i^2 [u_i - e^{-T_i/u_i} (u_i + T_i)] \}}{T_i \lambda_i (\lambda_i - u_i) (\lambda_i + u_i)^2 [1 - e^{-(\lambda_i + u_i)T_i}]^{-1}} \quad (13)$$

由于使用  $i$  信道通信的 SU 花费了部分通信时间参与  $j$  信道的协作频谱感知,而且  $j$  信道的感知周期和感知时间分别为  $T_j$  和  $\tau_j$ 。因此  $i$  信道的可用频谱资源被检测  $j$  信道占用的比例为  $\tau_j/T_j$ 。从而  $i$  信道被检测其他信道占用的比例之和为  $\sum_{j=1, j \neq i}^M \tau_j/T_j$ 。因此, $i$  信道被占用的资源占其总频谱资源的比例为

$$\eta_i(\mathbf{T}, \boldsymbol{\tau}) = [\hat{\lambda}_i - \xi_i(T_i)] \sum_{j=1, j \neq i}^M \frac{\tau_j}{T_j} \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_N)$  和  $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)$  分别是由各信道感知周期和感知时间组成的向量。由式(13,14)可得, $i$  信道的可用频谱资源占其总频谱资源的比例为

$$\Omega_i(\mathbf{T}, \boldsymbol{\tau}) = \hat{\lambda}_i - \xi_i(T_i) - \eta_i(\mathbf{T}, \boldsymbol{\tau}) \quad (15)$$

由式(13~15)可见,减小  $T_i$  或增大  $T_j$  都能够提高  $i$  信道的空闲频谱资源检测率  $\Omega_i$ 。亦即在多信道条件下,为提高某一信道的空闲频谱资源检测率,就要减小该信道的感知周期并增大其他信道的感知周期,而这又会引起其他信道空闲频谱资源检测率的降低。因此该问题属于多目标优化问题,其目标函数可表示为

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\mathbf{T}} \quad & \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Omega_i(\mathbf{T}, \boldsymbol{\tau}) \hat{\lambda}_i^{-1} \\ \text{s. t.} \quad & T_i > 0 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \end{aligned} \quad (16)$$

## 3 多目标优化问题求解

### 3.1 经典遗传算法

GA 是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局搜索方法,能够在近似解的质量和求解效率间达到较好的折衷,其基本流程为<sup>[14]</sup>如下。

首先,随机生成代表问题可能潜在解集的一个初始种群,其中种群是由经过基因编码的一定数量的个体组成。基因编码是从表现型到基因型的映射,通常使用的编码方法包括:二进制编码、Gray 编码和浮点编码等。初始种群产生后,按照优胜劣汰的原则,逐代进化产生适应度更高的种群。每一代根据个体适应度挑选个体,并借助遗传算子(选择、交叉和变异)产生代表新解集的种群。此过程与自然进化过程中的后代比前代更适应于环境相似,末代种群中的最优个体经过基因译码,即可作为问题的近似最优解。

本文将代表感知周期向量  $\mathbf{T}$  的一组 0/1 码作为种群中的一个个体,编码的长度等于信道个数与感知周期量化位数的乘积。这种用 0/1 码代表个体的形式,即为个体的基因型。基因型个体在遗传算子

的作用下,便产生了新一代的种群。由于基因译码是从基因型到表现型的映射,因此上述新生种群经过基因译码便会呈现出十进制的感知周期向量形式,将其带入适应度函数便可以得到种群中不同个体的适应度。由于本文是以最大化空闲频谱资源检测率为目标,因此选择了式(16)作为适应度函数,从而个体的适应度便等于该感知周期向量能够获得的空闲频谱资源检测率。

### 3.2 改进遗传算法

通过分析式(16)可以发现,感知周期向量  $\mathbf{T}$  的量化精度直接决定了目标函数解的质量,而且事先仅由各信道的使用规律参数难以估计最优解的范围。因此需要增加 GA 中个体的编码位数并使用较大的种群规模,从而保证最终解的质量以及解的多样性。但由此却带来了算法收敛缓慢和遗传算子寻优能力下降等问题。其主要原因在于,GA 中新一代种群由遗传算子产生,而较大的量化位数会增加遗传算子中“交叉”和“变异”结果的随机性,因而减慢了算法朝最优值方向收敛的速度。另外,在如图 6 所示的按个体适应度,依概率“选择”子代个体的方法中(又称轮盘赌法),较大的种群规模会增加劣质个体的数量,使优质个体的适应度并不明显高于其他劣质个体,因此降低了优质个体被选中的几率,导致算法寻优能力下降。针对上述问题,本文提出了两种进化机制对经典 GA 进行了改进。

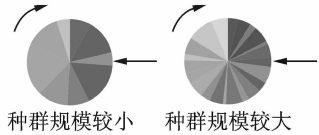


图 6 不同种群规模的轮盘赌法

Fig. 6 Roulette methods under different scale of populations

精英填充保留机制。由于子代个体的产生具有一定的随机性,因此可能出现个体适应度极低甚至为负值(出现了  $T$  小于  $\tau$  的情况)的情况,而且在下一轮进化中,这些个体很可能通过“交叉”将其他个体的性能变差。为此用当前父代群体中的优质个体将其替换,从而增大了优质个体被选中的概率。

子代预选机制。精英填充保留机制虽然替换了种群中的劣质个体,但由于进化过程的随机性,仍然会有部分子代个体的适应度低于其父代,即发生了“退化”现象。为避免该现象的发生,本文将新生子代个体的适应度与其父代进行对比。如果子代的适应度高于父代,则子代可存活。否则,由父代代替子代,进入下一轮进化。基于上述分析以及对改进机制的介绍,本文给出了改进 GA 的算法流程图如图 7 所示。

## 4 仿真与性能分析

在 MATLAB 7.9 中,本文将改进 GA 与经典 GA 的算法性能进行对比。另外,为进一步分析比较本文算法的性能,还对文献[6]基于 OFDM 机制,以相同周期对各信道进行感知的算法进行了仿真。当目标网络中各授权信道的使用规律不同时,若以不同的周期分别对其进行感知,的确可使多信道条件下的频谱资源检测率得到较大提高。仿真参数设置如下:各信道 ON/OFF 状态的持续时间分别服从指数分布,分布参数分别为:  $\mu = [1.0, 1.5, 1.0, 2.5, 0.5, 2.0, 1.5, 1.5]$ ,  $\lambda = [1.5, 2.5, 2.0, 1.0, 2.0, 3.0, 1.0, 2.5]$  的左数 4, 6, 8 组

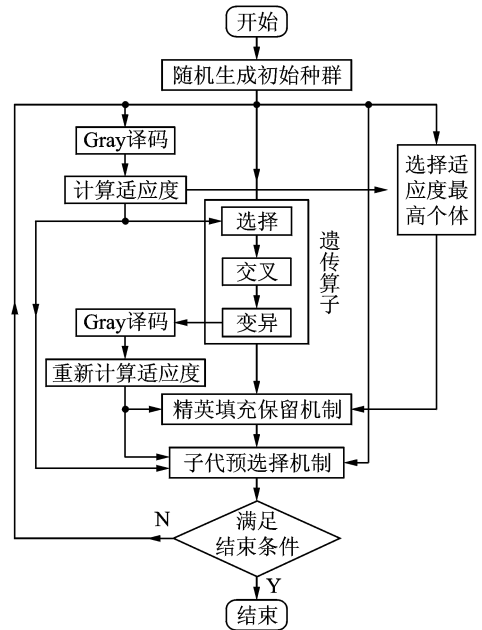


图 7 改进 GA 算法流程图

Fig. 7 A block diagram for improved GA

(s)。各信道的感知周期均采用 9 bit 量化,量化精度为 1 ms,感知时间均设为  $\tau=5$  ms。GA 的初始种群规模为 80,进化终止代数数为 200,基因编码方式为 Gray 码,以式(16)作为适应度函数。遗传算子中的选择过程使用轮盘赌法,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.01。如无特别说明,本文的仿真结果均为 1 000 次蒙特卡洛实验的均值。

图 8 和图 9 分别给出了目标网络中包含  $M=6$  个授权信道时,经典 GA 与改进 GA 群体进化过程的单次仿真结果。

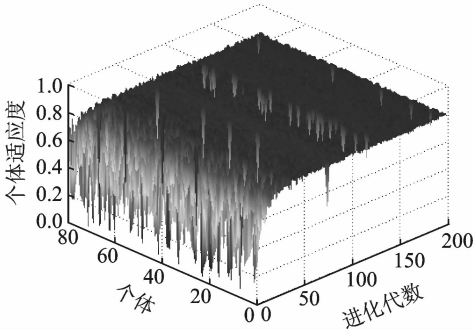


图 8 经典 GA 的单次进化过程

Fig. 8 Evolutionary process of classic GA

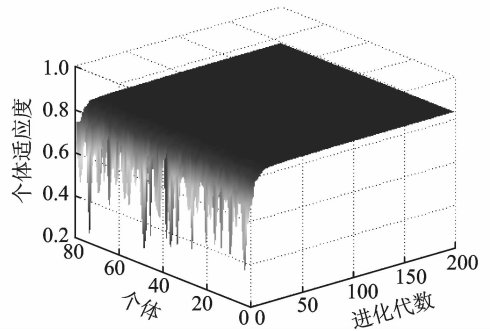


图 9 改进 GA 的单次进化过程

Fig. 9 Evolutionary process of improved GA

由图 8 可见,在经典 GA 的单次进化过程中,个体的适应度会不断提高而且之间的差别在不断减小。该现象表明经典 GA 正在朝最优值方向收敛,但从中也可以看到“退化”现象的发生,而且即使在进化终止阶段,个体间的适应度差异仍然较大,说明算法仍没有完全收敛,由此可以说明经典 GA 存在收敛缓慢这一问题。

由图 9 可见,改进 GA 较经典 GA 的收敛速度有所提高,而且有效避免了“退化”现象的发生。其主要原因在于,“精英填充保留机制”有效增强了算法的寻优能力,而且“子代预选机制”对进化的方向进行了约束,因此算法的收敛速度会得到明显提高。另外,为进一步验证改进 GA 的算法性能,在图 10 中,本文还给出了与图 8 和图 9 对应的蒙特卡洛实验结果。由图 10 可见,当群体进化到 30 代左右时,改进 GA 群体适应度的均值基本与最大值重合,说明此时算法已经收敛,而且改进 GA 收敛后的适应度明显高于经典 GA,表明改进 GA 具有更强的局部寻优能力。

图 11 和图 12 分别给出了 OFDM 机制与改进 GA 在被检测信道数分别为  $M=4, 6, 8$  时的仿真结果。由图 11 可见,在 OFDM 感知机制下的确存在最优的感知周期,可使空闲频谱资源的检测率达到最优。当目标网络中包含  $M=8$  个授权信道时,最优的感知周期可检测出实际空闲频谱资源的 50.55%。而由图 12 可以看出,在同样情况下,改进 GA 的频谱资源检测率为 68.23%,较 OFDM 机制提高了 17.68%。由此可以验证,当目标网络中各授权信道的使用规律不同时,若以不同的周期分别对其进行频谱感知,的确可以获得空闲频谱资源检测率的较大提高。

另外,由图 12 还可以发现,随着被检测信道

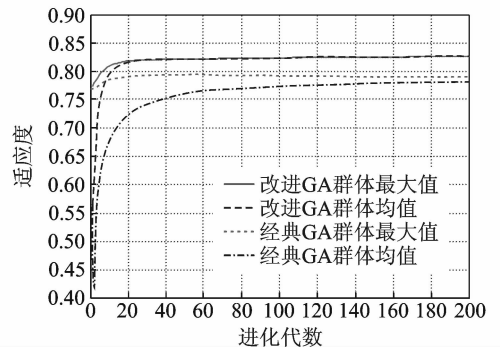


图 10 经典 GA 与改进 GA 的适应度比较

Fig. 10 Comparison of fitness for classic GA and improved GA

数量的减少, 频谱资源检测率在逐渐提高。这是因为当被检测信道数量较少时, 各信道被其他信道协作频谱感知所占用的频谱资源  $\eta_i$  就会相对减少, 而且此时多目标优化问题中相互制约的条件也相应减少, 因此空闲频谱资源检测率会得到明显的提高。

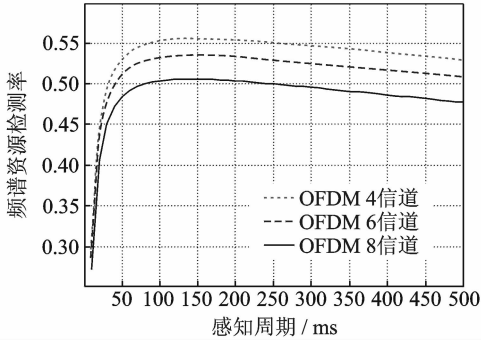


图 11 OFDM 机制频谱资源检测率

Fig. 11 Detection rates of spectrum opportunities based on OFDM scheme

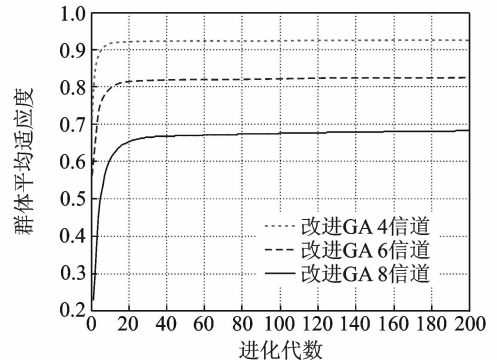


图 12 改进 GA 群体平均适应度

Fig. 12 Mean fitness of improved GA

## 5 结束语

考虑实际网络中各授权信道使用规律的不同, 本文提出了一种多信道感知周期优化算法。该算法能够根据信道间的负载差异, 分别为其设置不同的感知周期, 从而使多信道条件下的空闲频谱资源检测率得到较大提高。由于本文是基于 GA 对多目标优化问题进行的求解, 因此获得的感知周期向量是相对满意解而非最优解。最后, 由仿真分析可以发现, 随着被检测信道数量的减少, 频谱资源检测率会逐渐提高。因此在下一步工作中, 针对含有大量授权信道的目标网络, 应根据 SU 对吞吐量以及切换时延的需求, 对授权信道的分组算法进行研究, 以便使 SU 的服务质量得到进一步的提高。

## 参考文献:

- [1] 胡晓宁, 胡捍英, 佘国锋. 认知无线电协作频谱感知机制的优化[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(6): 691-696.  
Hu Xiaoning, Hu Hanying, Wu Guofeng. Optimization for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2011, 26(6): 691-696.
- [2] Zhang Ning, Wang Wei, Zhang Zhaoyang. NPS: Non-periodic sensing for opportunistic spectrum access[C]// *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Suzhou: IEEE, 2010: 1-5.
- [3] Michele S, Maurizio M. Optimization of non-convex multiband cooperative sensing with genetic algorithms[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Suzhou: IEEE, 2011, 5(1): 87-96.
- [4] Lee G, Ko J, Oh S, et al. Sensing and transmission parameter determination for cognitive radio networks[C]// *Information Networking (ICOIN)*. Bangkok, Thailand: IEEE Computer Society & IEICE Communications Society, 2012: 364-367.
- [5] Lu Lu, Li G Y, Li Shaoqian. Optimum periodic spectrum sensing for CR networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(12): 1-4.
- [6] 徐任晖, 陈明, 张剑锋, 等. 认知无线电 OFDM 系统的最优频谱感知周期选择[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 6(3): 98-102.  
Xu Renhui, Chen Ming, Zhang Jianfeng, et al. Sensing period optimization for OFDM-based cognitive radio[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(3): 98-102.
- [7] Paysarvi-Hoseini P, Beaulieu N C. Sequential multichannel joint detection framework with non-uniform channel sensing durations for cognitive radio networks[C]// *2011 IEEE International Conference (ICC)*. Kyoto: IEEE Communication Society, 2011: 1-6.
- [8] Eryigit S, Bayhan S, Tuna T. Energy-efficient multi-channel cooperative sensing scheduling with heterogeneous channel con-



ditions for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, PP(99): 1-11.

- [9] 郭晨,彭涛,王文博. 认知无线网络中合作频谱感知机制的优化[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1525-1530.  
Guo Chen, Peng Tao, Wang Wenbo. Optimization of cooperative spectrum sensing mechanisms in cognitive radio networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(7): 1525-1530.
- [10] 郭艳艳,康桂霞,张宁波,等. 基于认知无线电系统的协作中继分布式功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2463-2467.  
Guo Yanyan, Kang Guixia, Zhang Ningbo, et al. A distributed power allocation for cooperative transmission in cognitive radio systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(10): 2463-2467.
- [11] Khalid L, Anpalagan A. Cooperative sensing with correlated local decisions in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(2): 843-849.
- [12] Lee W, Cho D H. Enhanced spectrum sensing scheme in cognitive radio systems with MIMO antennae[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(3): 1072-1085.
- [13] Whitt W. Stochastic process[M]. Springer-Verlag New York incorporation: Softcover reprint of hardcover 1st edition, 2002: 71-79.
- [14] 邢英,何炳发. 改进遗传算法在双弯曲反射面天线设计中的应用[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(4): 520-523.  
Xing Ying, He Bingfa. Improved genetic algorithm application to design of doubly curved reflector antenna[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(4): 520-523.

#### 作者简介:



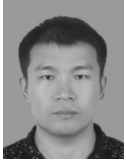
**刘洋** (1981-), 男, 博士, 研究方向: 认知无线网络数据链路层, E-mail: liuyang0925@sohu.com.



**崔颖** (1981-), 女, 硕士, 研究方向: 网络安全。



**李鸥** (1961-), 男, 教授, 研究方向: 无线通信网络、无线传感器网络、认知无线网络和无线自组织网络等。



**刘伟俊** (1978-), 男, 工程师, 研究方向: 信号处理。