



## 利用多目标 PSO 优化的累积时延和信道容量联合优化的频谱切换算法

张煜培<sup>1</sup>, 赵知劲<sup>1,2</sup>, 郑仕链<sup>2</sup>

(1. 杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 中国电子科技集团第 36 研究所通信系统信息控制技术  
国家级重点实验室, 浙江 嘉兴 314001)

**摘要:** 目前频谱切换中多以单目标优化设计目标信道, 为了满足大容量实时传输要求, 需要综合考虑累积切换时延和有效信道容量。对此构建了目标信道设计的多目标函数, 提出了求解离散多目标优化问题的粒子群算法 (DMOPSO), 给出了种群编码、更新方式离散化设计。仿真结果表明, 所提出的频谱切换算法得到的最优信道访问解集能够兼顾网络的实时性和高吞吐率, 算法复杂度较低。

**关键词:** 多目标优化; 频谱切换; 累积时延; 信道容量; 粒子群优化

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018114

## Spectrum handoff method by using joint optimization of cumulative delay and channel capacity based on multi-objective PSO

ZHANG Yupei<sup>1</sup>, ZHAO Zhijin<sup>1,2</sup>, ZHENG Shilian<sup>2</sup>

1. School of Telecommunication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

2. State Key Lab of Information Control Technology in Communication System of No.36 Research Institute,  
China Electronic Technology Corporation, Jiaxing 314001, China

**Abstract:** At present, a single target optimization function is often used in channel design. While in order to meet the large capacity real-time transmission, it is necessary to consider the cumulative delay and channel capacity simultaneously. The multi-objective function of the target channel design was constructed, and discrete multi-objective particle swarm optimization algorithm (DMOPSO) was proposed to solve it. The discretization design of the population coding and updating was given. The simulation results show that the optimal channel set obtained by proposed spectrum handoff algorithm can take into account the real-time and high throughput of the network, while needing the low complexity.

**Key words:** multi-objective optimization, spectrum handoff, cumulative delay, channel capacity, particle swarm optimization

收稿日期: 2017-10-09; 修回日期: 2018-02-27

通信作者: 赵知劲, Zhaozj03@hdu.edu.cn

基金项目: “十二五”国防预研项目 (No.41001010401)

Foundation Item: 12th Five-Year National Defense Advanced Research Program (No.41001010401)

## 1 引言

无线设备的快速增长导致频带接入需求急剧增加,而美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的调查表明,高达85%授权频谱未被充分利用<sup>[1]</sup>。认知无线电(cognitive radio, CR)是一种解决频谱利用率低下和日益增长的频带接入需求之间矛盾的技术,认知用户(secondary user, SU)在空时变化的无线电环境中寻找频谱空穴,自适应调整自身参数,机会式接入未被主用户使用的授权频带<sup>[2]</sup>。为了不影响主用户(primary user, PU)通信,当认知用户使用的信道中突然出现优先级高的PU时,认知用户必须离开当前信道,寻找新的空闲信道,以保证通信的连续性,这一过程即频谱切换<sup>[3]</sup>。频谱切换是认知无线网络的关键技术之一<sup>[4]</sup>。

目标信道对频谱切换来说至关重要,因为目标信道是通信得以维持的希望。目前,按照目标信道序列的长度,可以将其分为3类:1个目标信道、2个目标信道和2个以上目标信道。参考文献[5]基于动态规划选择剩余空闲时间最长的一个信道作为目标信道。参考文献[6]提出一种混合主被动频谱切换的频谱切换算法,考虑非理想检测对切换的影响,选择累积切换时延最小的一个信道。参考文献[7]提出将保护信道作为备用信道,频谱切换时,如果有空闲信道就切换到空闲信道,否则切换到保护信道,以切换时延最短为衡量标准。参考文献[8]提出一种基于抢占式续传优先权M/G/m排队理论的频谱切换模型,以传输时间为评价标准。可是这些算法目标信道只有1个或2个,存在很大的切换失败风险。参考文献[9-10]选择多个目标信道,其中,参考文献[9]提出一种结合动态规划与二分法(DPB)算法,以降低能耗为衡量标准;参考文献[10]仿真了目标信道长度分别为5、6、7和8时的切换时延,提出按信道空闲时间排序,使得累积切换时延最小。

以上参考文献主要从单个角度衡量频谱切换性能,而实际切换过程中,信道容量也是一个很重要的参考因素,即使切换次数很少,如果信道容量较小,也无法满足认知用户的通信需求。目前只有少数文献涉及这方面工作,参考文献[11-12]以最大化系统吞吐量为衡量标准,参考文献[11]只有1个目标信道和1个备用信道,仍存在较大的切换失败概率。参考文献[12]提出分组传输思想以最大化吞吐量,但未考虑平均累积时延的影响。参考文献[13]提出利用加权方式将信道容量和切换失败概率同时优化,但是它们对于权重或目标给定次序较敏感,并且权重并不能准确反映用户优化需求。

针对上述问题,本文在先应式感知频谱切换环境<sup>[12]</sup>中引入累积切换时延和有效信道容量作为频谱切换的评价标准,选择目标信道序列,以降低切换失败概率。这是一个多目标优化问题,传统穷举算法搜索所有目标信道排列,导致复杂度高。MOPSO<sup>[14]</sup>是一种经典的解决多目标优化的进化算法,但这种算法用于解决连续域优化问题,而本文的自变量是信道访问顺序,是离散的。因此本文提出离散多目标粒子群优化(discrete multi-objective particle swarm optimization, DMOPSO)算法解决本文构建的多目标优化问题,得到频谱切换算法。该算法复杂度低,能够兼顾网络的实时性和高吞吐率。

## 2 频谱切换优化模型

### 2.1 问题描述

考虑在认知无线网络(cognitive radio network, CRN)中,有 $N$ 个独立信道, SU1和SU2正在其中一个空闲信道上通信,某一时刻主用户突然接入该信道,为了维持通信, SU1和SU2需执行频谱切换。由于SU1和SU2所处环境不同,频谱空穴信息可能不同<sup>[15]</sup>,因此SU1和SU2在通信过程中对各自感知到的频谱空穴信息进行交



互，由此可以得到双方共同的频谱空穴信息，二者均空闲的信道即认知无线电频谱切换时待尝试的信道，记这些共同的空闲目标信道序列（除了当前通信信道外）为  $\{c_i \in \{1, 2, \dots, N\}\}_{i=1}^M$ ，总数为  $M$  且  $M \leq N$ ，以周期  $T$  对该序列依次进行访问，因此这  $M$  个信道的全排列构成了搜索的解空间  $\Omega$ ，其维数为  $M! \times M$ 。图 1 给出了认知用户依据目标信道序列切换的示意。认知用户首先接入  $c_{k1}$  信道，阴影部分表示认知用户  $SU_1$  和  $SU_2$  在握手，以调整通信参数，所需时间为  $T_h$ ，由于  $M$  个目标信道的确立是通过周期性感知得出的结果，因此信道是否真的空闲是概率事件。若在  $c_{k1}$  握手期间或者在通信期间，主用户突然出现，则认知用户需停止当前通信，依次访问  $c_{k2}, \dots, c_{ki}, \dots$  直至找到空闲信道，代表本次切换成功；若访问完  $M$  个信道，仍未发现空闲信道，则本次切换失败。

### 2.2 频谱切换失败概率

假设信道空闲时间服从指数分布<sup>[10]</sup>，信道空闲时间概率密度函数为：

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{c_i}} e^{-\frac{1}{\theta_{c_i}} x}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中， $\theta_{c_i}$  表示  $c_i$  信道的平均空闲时间。假设目标信道序列为  $[c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_M]$ ，令认知用户访问第  $i$  个信道  $c_i$  失败的概率为  $\bar{P}_i$ ，即在当前握手过程中突然有主用户接入该信道或在此以前主用户接入该信道并一直占用，则在  $c_i$  上握手失败的概率为：

$$\bar{P}_i = \int_0^{(i-1)T+T_h} \frac{1}{\theta_{c_i}} e^{-\frac{1}{\theta_{c_i}} x} dx = 1 - e^{-\frac{1}{\theta_{c_i}} [(i-1)T+T_h]} \quad (2)$$

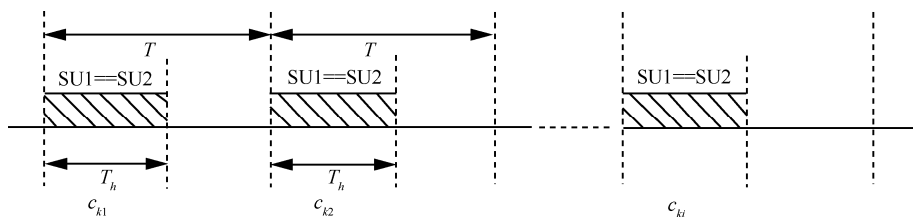


图 1 频谱切换示意

则在  $c_i$  上握手成功的概率为：

$$P_i = 1 - \bar{P}_i = e^{-\frac{1}{\theta_{c_i}} [(i-1)T+T_h]} \quad (3)$$

则本次频谱切换失败的概率为：

$$P_{\text{fail}} = \prod_{i=1}^M \bar{P}_i = \prod_{i=1}^M \left( 1 - e^{-\frac{1}{\theta_{c_i}} [(i-1)T+T_h]} \right) \quad (4)$$

在经过  $i$  ( $1 \leq i \leq M$ ) 次握手之后切换成功的概率为：

$$\Pr\{L = i\} = \begin{cases} e^{-\frac{T_h}{\theta_{c_i}}}, & i = 1 \\ e^{-\frac{1}{\theta_{c_i}} [(i-1)T+T_h]} \prod_{j=1}^{i-1} \left( 1 - e^{-\frac{1}{\theta_{c_j}} [(j-1)T+T_h]} \right), & i = 2, 3, \dots, M-1, M \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 累积切换时延

由第 2.1 节和第 2.2 节的分析可知，累积切换时延 (ACHD) 由两部分构成，一部分是切换成功时产生的时延，另一部分是切换失败时产生的时延，其衡量本次切换过程中平均消耗时间，累积切换时延<sup>[6,10]</sup>为：

$$\begin{aligned} E[D] &= \sum_{i=1}^M iT \cdot \Pr\{L = i\} + MT \cdot P_{\text{fail}} \\ &= T \cdot e^{-\frac{T_h}{\theta_{c_i}}} + \sum_{i=2}^M \left( iT \cdot e^{-\frac{1}{\theta_{c_i}} [(i-1)T+T_h]} \prod_{j=1}^{i-1} \left( 1 - e^{-\frac{1}{\theta_{c_j}} [(j-1)T+T_h]} \right) \right) + \\ &\quad \frac{MT}{\prod_{i=1}^M \left( 1 - e^{-\frac{1}{\theta_{c_i}} [(i-1)T+T_h]} \right)} \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.4 有效信道容量

假设 CRN 总带宽为  $B$ ，均分为  $N$  个信道，则每个信道带宽为  $B/N$ ， $c_i$  信道的信噪比为  $\text{SNR}_{c_i}$ ，其衡量本次切换过程中获得的平均信道容量，有效信道容量 (AECC) [13]为:

$$E[C] = \sum_{i=1}^M \frac{B}{N} \text{lb}(1 + \text{SNR}_{c_i}) \cdot \Pr\{L=i\}$$

$$= \frac{B}{N} \text{lb}(1 + \text{SNR}_{c_1}) \cdot e^{-\frac{T_h}{\theta_{c_1}}} +$$

$$\sum_{i=2}^M \left( \frac{B}{N} \text{lb}(1 + \text{SNR}_{c_i}) e^{-\frac{1}{\theta_{c_i}}[(i-1)T + T_h]} \prod_{j=1}^{i-1} \left( 1 - e^{-\frac{1}{\theta_{c_j}}[(j-1)T + T_h]} \right) \right) \quad (7)$$

### 2.5 目标函数设计

本文目标是寻找一个最优信道解向量  $c^* = [c_1, c_2, \dots, c_M] \in \Omega$ ，使得累积切换时延最小的情况下，有效信道容量最大，因此可抽象为式 (8) 所示的多目标优化问题 (multi-objective optimization problem, MOP)。

$$c^* = \begin{cases} \arg \min_{c \in \Omega} E[D] \\ \arg \min_{c \in \Omega} -E[C] \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) 包含 2 个目标函数，事实上这 2 个目标函数相互制约，因此很难找到一个  $c^*$  使得两个目标函数同时达到最优解。只能找到一个折中解的集合，这一组解集称为非支配解集 (nondominated set) 或 Pareto (帕拉托) 最优解集 [14] (Pareto-optimal set)。以下 2 个定义从 Pareto 最优角度对此多目标优化频谱切换问题进行形式化描述。

**定义 1** Pareto 支配 (Pareto dominance): 一个信道解集  $c = [c_1, c_2, \dots, c_M] \prec c' = [c'_1, c'_2, \dots, c'_M]$  ( $\prec$  表示支配) 当且仅当  $\min E[D] \leq \min E'[D] \wedge -E[C] \leq -E'[C]$ ，否则，称两个解互不支配。

**定义 2** Pareto 前沿 (Pareto front, PF): 所有互不支配的信道解集构成 Pareto 最优解，这些

最优解集在目标空间形成 Pareto 前沿。

## 3 频谱切换算法

### 3.1 MOPSO 算法

Coello 于 2004 年提出了经典的求解多目标问题的粒子群优化算法 MOPSO，该算法引入外部档案 Archive 并应用自适应网格法维护 Archive 中的非支配解 [14]，算法主要步骤描述如下。

**步骤 1** 初始化粒子群  $P$ ，随机产生每个粒子的位置 (初始默认个体最优值  $p = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}]$ ) 和速度，计算每个粒子的目标函数值，令  $\text{Archive} = []$ 。

**步骤 2** 将  $P$  中非支配解加入 Archive 中，利用自适应网格选择密度最小的粒子作为  $g = [g_1, g_2, \dots, g_d]$ 。

**步骤 3** 按照式 (9) 更新粒子速度  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}]$  和位置  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}]$ :

$$v'_{ij} = w \cdot v_{ij} + r_1(p'_{ij} - x_{ij}) + r_2(g_j - x_{ij}) \quad j=1,2,\dots,d \quad (9)$$

$$w = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \cdot t}{I} \quad (10)$$

$$x'_i = x_{ij} + v'_{ij} \quad (11)$$

其中， $v'_{ij}$  指第  $t$  次迭代时第  $i$  个粒子的第  $j$  维子空间的速度； $d$  是粒子维数； $w$  是权重值，根据式 (10) 线性递减更新， $w_{\max}$  和  $w_{\min}$  是常数，分别表示权重最大值和最小值； $I$  是迭代总次数； $r_1$  和  $r_2$  是两个服从 [0,1] 均匀分布的随机变量； $p'_{ij}$  和  $g_j$  分别是第  $i$  个粒子目前为止搜索到的局部最优解  $p$  和所有粒子目前搜索到的全局最优解  $g$  的第  $j$  个元素。

**步骤 4** 计算每个粒子的目标函数值实现  $p$  的更新。

**步骤 5** 更新  $p$ 。根据粒子飞行过程中获得的当前解和上次的  $p$  比较，若当前解支配  $p$ ，令当前解为  $p$ ；若二者互不支配，则从二者之间随机选择一个作为  $p$ 。



**步骤6** 如果终止条件成立,输出 Archive 集,否则转步骤2。

### 3.2 DMOPSO 算法

由于 MOPSO 主要应用于连续域情况,本文自变量是信道访问顺序,是离散的,因此需要对编码方式和位置更新式离散化,以适用于频谱切换优化问题。

#### 3.2.1 编码

用粒子位置表示目标信道访问顺序,通过迭代更新粒子得到新的目标信道序列,以  $E[D]$  和  $-E[C]$  为适应度函数评价粒子,寻找近似最优解。本文目标信道序列是离散的十进制整数,故按照下列步骤对其进行离散二进制编码并对编码后的序列纠正以确保不重复。

设目标信道访问序列中有  $M$  个信道,则信道编号的集合为  $\Theta = [0, 1, 2, \dots, M-1]$ ; 每个信道编号用  $L = \text{ceil}(\text{lb}M)$  bite 来表示,  $\text{ceil}$  表示向上取整,则每个粒子编码的维数为  $d = LM$ 。由于算法中初始化信道序列是随机的,因此可能出现重复的信道,所以按以下步骤1~步骤5纠正编码。

**步骤1 解码:** 将第  $i$  个粒子位置  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$  十进制解码后,序列为  $\mathbf{z}_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iM})$ 。其中  $z_{ij}$  由  $\mathbf{x}_i$  中的  $(x_{i,(j-1)L+1}, \dots, x_{i,jL})$  解码求得。

**步骤2 映射:** 通过  $\mathbf{z}_i = (z_{i1} \bmod M, z_{i2} \bmod M, \dots, z_{iM} \bmod M)$  将其映射到  $\Theta$  中。

**步骤3** 将  $\mathbf{z}_i$  中不同元素置于集合  $P$  中,当  $P$  中元素个数  $\text{num}(P) < M$  时执行步骤4和步骤5,否则停止。

**步骤4**  $\mathbf{z}_i$  中出现两个相同元素时,在集合  $\Psi = \Theta - P$  中随机选择一个元素  $\lambda_i$  来替代。

**步骤5** 更新  $P = [P \ \lambda_i]$ ,  $\Psi = \Theta - P$ , 若  $\Psi = \emptyset$ , 则停止; 否则转步骤4。

#### 3.2.2 离散位置更新

由式(11)可知,在连续域中,位置更新是通过本次的速度值加上次的位置值实现的,但在

本文中,位置值只能在“0”或“1”中选取,参考文献[16]提出利用 Sigmoid 函数进行位置更新,如式(13)所示,思想是将粒子速度作为其位置更新的概率,该函数表达式及图形如式(12)和图2(a)所示。

$$S(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}} \quad (12)$$

$$x_{ij}^t = \begin{cases} 0, & \text{rand} < S(v_{ij}^t) \\ 1, & \text{rand} \geq S(v_{ij}^t) \end{cases} \quad (13)$$

该函数虽然将位置值约束到[0,1]上,但当速度负向增大时,其位置改变的概率趋近于0,这不合常理,本文引入“V”型函数<sup>[18]</sup>,如图2(b)所示,该函数不仅将速度值约束到[0,1]上,而且满足当速度的绝对值较小时,其位置改变概率小,当速度绝对值较大时,其位置改变概率也较大。因此本文使用式(15)进行位置更新。

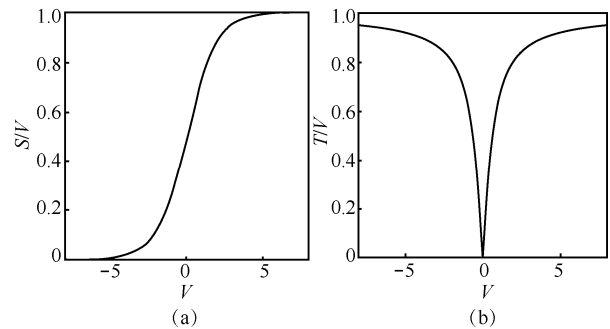


图2 Sigmoid 函数和 V 型函数图像

$$T(v) = \left| \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi}{2}v\right) \right| \quad (14)$$

$$x_{ij}^t = \begin{cases} 1 - x_{ij}^t, & \text{rand} < T(v_{ij}^t) \\ x_{ij}^t, & \text{rand} \geq T(v_{ij}^t) \end{cases} \quad (15)$$

#### 3.2.3 最优值更新

最优值更新包括个体局部最优值  $p$  更新和全局最优值  $g$  更新,首先根据定义1求出每个粒子的适应度函数  $E[D]$  和  $-E[C]$  以确定是否是非支配解,然后按照第3.1节步骤2和步骤5分别更新  $g$  和  $p$ 。

### 3.3 频谱切换算法主要步骤

将上述离散多目标优化算法应用于本文切换优化模型, 就得到本文提出的频谱切换算法, 仍记为 DMOPSO, 主要步骤描述如下。

**步骤 1 初始化:** 利用目标信道访问次序按照第 3.2.1 节方式对粒子位置  $\mathbf{x}$  编码, 随机初始化粒子速度令粒子的初始位置为个体局部最优值  $\mathbf{p}$ , 支撑集  $NP=[ ]$ , 设置最大迭代次数  $I$ , 令  $t=1$ 。

**步骤 2** 判断  $t \leq I$  是否成立, 若成立执行步骤 3~步骤 5, 否则转步骤 6。

**步骤 3** 根据每个粒子的位置  $\mathbf{x}$ , 利用式 (6) 和式 (7) 计算每个粒子的目标函数值  $E[D]$  和  $-E[C]$ , 确定非支配解加入  $NP$  中, 利用自适应网格选择密度最小的粒子作为  $\mathbf{g}$ 。

**步骤 4** 按照式 (9) 和式 (15) 更新每个个体的速度  $\mathbf{v}$  和位置  $\mathbf{x}$ , 计算每个粒子的目标函数值。

**步骤 5** 按照第 3.2.3 节方式更新个体局部最优值  $\mathbf{p}$ 。

**步骤 6** 输出 Archive 集中的非支配解集 (PF 前沿) 作为结果集。

## 4 算法仿真与性能分析

### 4.1 参数设置

仿真参数设置如下: 信道访问周期  $T = 40 \text{ ms}$ , 握手时间  $T_h = 4 \text{ ms}$ , 目标信道数  $M = 8$ , 各信道的平均空余时间  $t = [49 \ 108 \ 199 \ 132 \ 98 \ 81 \ 69 \ 30]$ 。各信道信噪比 SNR 服从  $[0 \ 20] \text{ dB}$  上的均匀分布。CRN 网络总带宽为  $B = 50 \text{ MHz}$ , 均分给 500 个信道。DMOPSO 算法中, 种群个体维数  $d=24$ ,  $w_{\max} = 0.9$ ,  $w_{\min} = 0.4$ 。

为了权衡算法性能和复杂度, DMOPSO 的种群规模和迭代次数必须合理设置。下面以仿真分析确定之。当种群规模为 100 时, 由本文提出的 DMOPSO 算法得到的  $E[D]$  和  $-E[C]$  随粒子群迭代次数的关系曲线如图 3 所示。

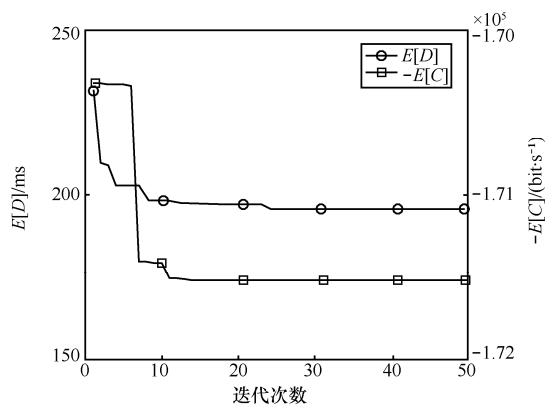


图 3  $E[D]$  和  $-E[C]$  随迭代次数变换曲线

由图 3 可以看出, 随着迭代次数的增加,  $E[D]$  和  $-E[C]$  逐渐减小, 最后趋于稳定, 说明此时达到最小值。其中  $E[D]$  的收敛速度比较快, 当迭代到第 10 次时已趋于不变, 而  $-E[C]$  在迭代 25 次后趋于稳定。下文仿真中, 选取 DMOPSO 算法的迭代次数  $I$  为 30。

仿真得到的 DMOPSO 算法  $E[D]$  和  $-E[C]$  随粒子种群规模曲线如图 4 所示。由图可见, 随着种群规模的增大,  $E[D]$  和  $-E[C]$  逐渐减小, 最后趋于稳定。两个目标函数当种群规模大于 80 后基本不变, 说明此时达到最小值。下面仿真中选择种群规模  $N$  为 80。

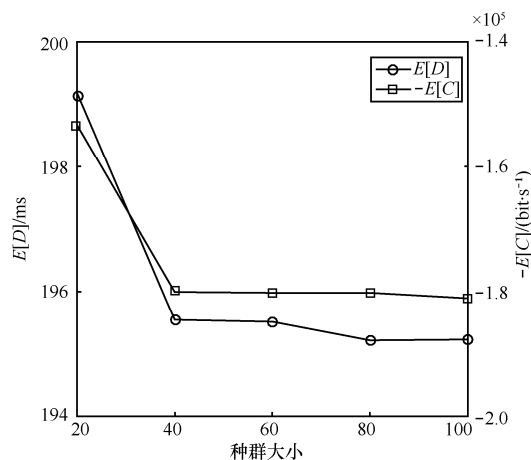


图 4  $E[D]$  和  $-E[C]$  随种群大小变换曲线

### 4.2 频谱切换性能分析

#### 4.2.1 寻优性能

为了分析本文所提出的频谱切换算法



DMOPSO 的有效性,与利用 Sigmoid 函数如式(12)所示更新粒子位置的多目标粒子群优化方法作比较,并记为 DMOPSO-S。设各个信道信噪比随机选取为  $SNR=[8\ 17\ 12\ 10\ 10\ 2\ 15\ 4]$ ,各个信道空闲时间随机选取为  $t=[129\ 177\ 159\ 57\ 145\ 168\ 137\ 192]$ 。理论的 Pareto 前沿 (TPF) 是利用穷举搜索算法在经过  $8!=40\ 320$  次试验得出的结果。

2 种算法求解得到的 Pareto 前沿 (PF) 分别如图 5 和图 6 所示。标有“□”的表示错误的 Pareto

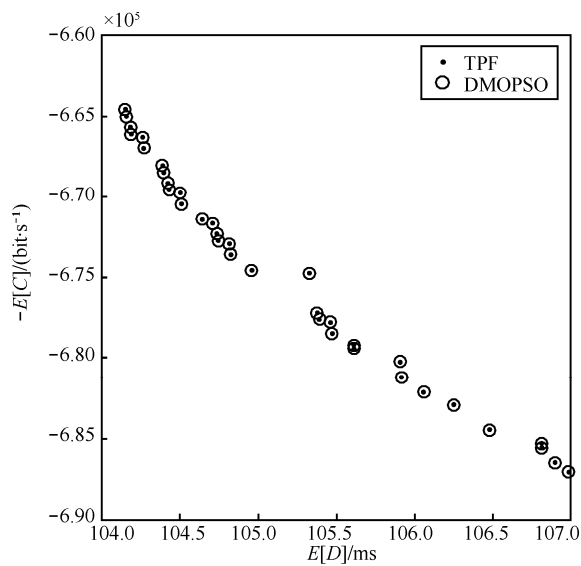


图 5 DMOPSO 算法求得的 PF

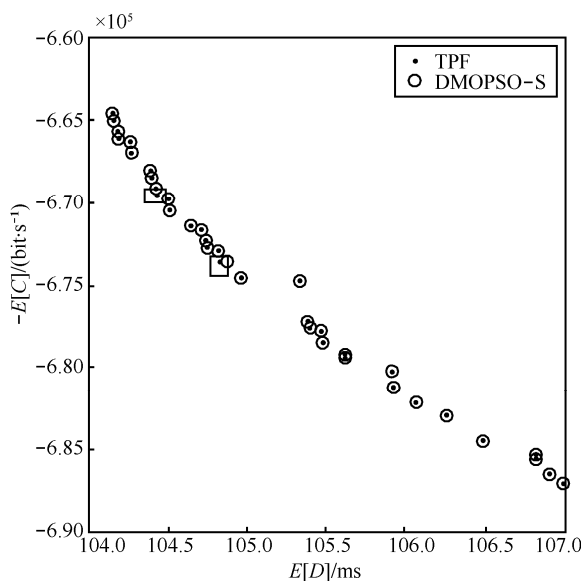


图 6 DMOPSO-S 算法求得的 PF

最优解。由于本文中目标函数不连续、不可微也不可导,因此得到的最优解集是零散的点,但是可以看出,2 种算法能较好地逼近理论的 Pareto 前沿,说明 2 种算法应用于本文切换模型都是有效的。同时可以看出“V”型函数相较于 Sigmoid 函数,增大了位置变化的概率,搜索能力更强。

利用参考文献[14]中定义的错误率 (ER) 衡量算法性能,如式(16)所示, $n$  表示非支配解的个数。当第  $i$  个解属于 TPF,则  $e_i=0$ ,否则为 1。表 1 给出了 200 次实验的 2 种算法错误率。从表 1 中可以看出,DMOPSO 的平均错误率比 DMOPSO-S 减少 4.7 倍。

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (16)$$

表 1 两种算法的错误率

ER	DMOPSO-S	DMOPSO
最好	0.0	0.0
最差	0.094 5	0.037 0
平均	0.059 6	0.012 6
中位数	0.028 9	0.0
标准差	0.052 1	0.011 8

DMOPSO 算法复杂度主要取决于粒子速度和位置的更新,当粒子种群规模为  $N$ ,迭代次数为  $I$ ,每次更新粒子位置和速度的时间复杂度为  $O(N)$ ,经过  $I$  次迭代后,所需算法的复杂度为  $O(IN)$ 。该算法的复杂度较低,能满足频谱切换的要求。

#### 4.2.2 频谱切换性能

下面分析 DMOPSO 算法的频谱切换性能,并与最小切换时延算法<sup>[10]</sup>、基于最大信道容量算法<sup>[13]</sup>和随机顺序访问算法<sup>[17]</sup>进行比较。

图 7 给出了初始化的粒子群和 DMOPSO 算法得到的最优信道解集在目标空间的分布。由图 7 可以看出,初始化的粒子种群能够在目标空间内近似均匀地分布,这为寻找最优信道解集提供了

保证。经过 30 次迭代后，本文算法最终得到的最优信道解集在图 7 的左下方，其中每个点代表了一种信道访问序列，任意的两个点都在一个目标函数上优于另一个点，而在另一个目标函数上劣于另一个点。为了方便以下讨论，将本文算法得到的最优信道解集依次编号为 1~10。

参考文献[10]最优解对应图 7 编号 1 的最优解，其目标函数值为  $(E[D], -E[C]) = (141.7 \text{ ms}, -5.6967 \times 10^5 \text{ bit/s})$ ，该点的目标信道序列按照信道空闲时间递减顺序排序。以参考文献[10]算法得到的结果为参考，图 7 中各个编号的结果与之对比，得到目标函数值的增减量见表 2。从表 2 可以看出，编号 1 可以达到最小的切换时延，但是未考虑容量的影响，因此在容量增加量方面劣于其他点代表的访问序列，例如编号 6 在时延上仅仅增加 0.50%，但是在容量上增加了 3.04%，对于数据量大的通信网络来说，应优先选择编号 6 的解。

参考文献[13]最优解对应图 7 编号 10 的最优解，目标函数值为  $(E[D], -E[C]) = (146.6 \text{ ms}, -5.99 \times 10^5 \text{ bit/s})$ ，该点的目标信道序列按照信噪比递减排序。图 7 中各个编号的结果与之对比，得到的目标函数值增减量见表 3。从表 3 可以看出，

参考文献[13]的算法可以达到最大的系统容量，但是未考虑切换时延的影响，因此时延大于本文 DMOPSO 算法，对时延敏感的业务参考文献[13]不适用。

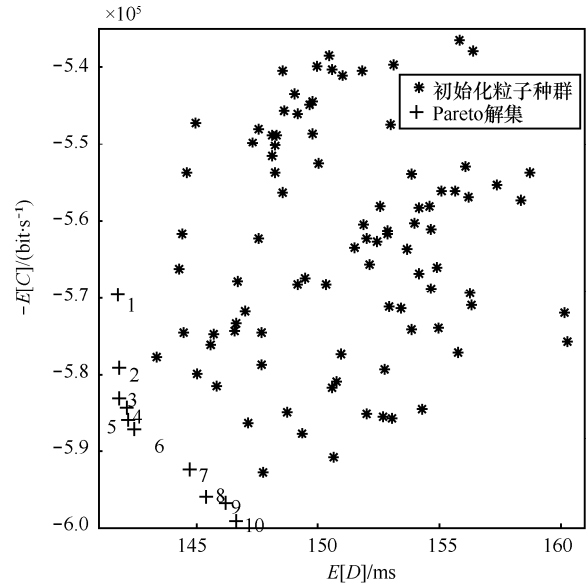


图 7 Pareto 最优解及初始化种群在目标空间的分布

为了衡量 DMOPSO 算法和随机顺序访问算法<sup>[17]</sup>性能，随机选取各信道空闲时间 ( $t$ ) 和信噪比 (SNR)，以参考文献[17]算法得到的结果为参考，图 7 中各个编号的结果与之对比，得到的目标函数值增减量见表 4。随机顺序访问算法虽然时

表 2 DMOPSO 相较于参考文献[10]在信道容量增加量和时延减少量百分比

评价	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
容量增加量	—	1.67%	2.35%	2.56%	2.84%	3.04%	4.00%	4.61%	4.75%	5.16%
时延减少量	—	-0.04%	-0.05%	-0.25%	-0.30%	-0.50%	-2.08%	-2.57%	-3.16%	-3.44%

表 3 DMOPSO 相较于参考文献[13]在信道容量增加量和时延减少量百分比

评价	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
容量增加量	—	-0.39%	-0.52%	-1.10%	-2.01%	-2.21%	-2.47%	-2.67%	-3.31%	-4.90%
时延减少量	—	0.28%	0.84%	1.31%	2.84%	3.03%	3.08%	3.27%	3.29%	3.33%

表 4 DMOPSO 相较于参考文献[17]在信道容量增加量和时延减少量百分比

评价	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
容量增加量	24.95%	27.04%	27.88%	28.15%	28.50%	28.76%	29.95%	30.71%	30.89%	31.40%
时延减少量	12.19%	11.88%	11.24%	10.72%	9.00%	8.79%	8.73%	8.52%	8.50%	8.46%





间复杂度很低,但是本文 DMOPSO 算法的信道容量高于其 24%以上,时延降低 8%以上。

分析 DMOPSO、参考文献[10]、参考文献[13]和参考文献[17]4 种算法的切换失败概率<sup>[15]</sup>。计算得到参考文献[10]、参考文献[13]和参考文献[17]的切换失败概率分别为 0.004 7、0.005 和 0.011 8, DMOPSO 算法的 10 个最优信道解集所对应的切换失败概率如图 8 所示,表 5 给出了参考文献[10]、参考文献[13]和参考文献[17]相对 DMOPSO 算法的 10 个最优信道解集的切换失败概率减小百分比(0 表示二者切换失败概率相同)。

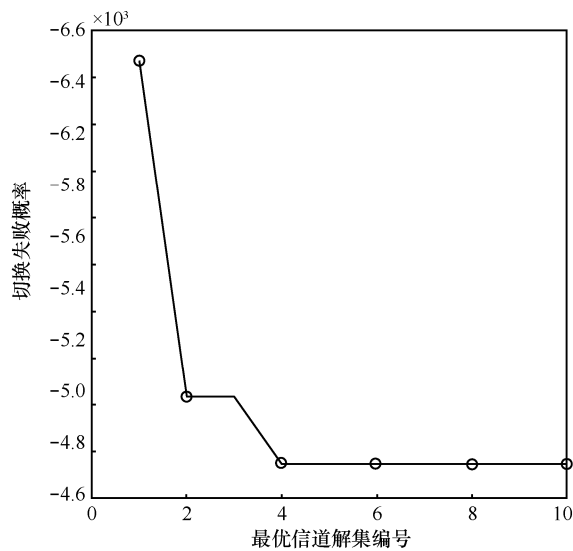


图 8 最优信道解集对应的切换失败概率

由表 5 可知,参考文献[10]、参考文献[13]和 DMOPSO 算法的失败概率均较小,说明 3 种算法的有效性;参考文献[17]的随机顺序访问算法的失败概率较高;参考文献[10]算法虽然能达到最小的失败概率,但是该算法未考虑切换时延,而本文算法编号 3 以后的最优信道解集的访问顺序能达

到和参考文献[10]同样低的失败概率;本文算法编号 2 以后的最优信道解集的访问顺序的失败概率都比参考文献[13]算法的小,而且参考文献[13]算法未考虑切换时延。所以相比较而言,本文算法能同时兼顾较小切换时延、较高信道容量和较低切换失败概率。

## 5 结束语

频谱切换是主用户和认知用户维持自身通信质量的关键技术之一。目前频谱切换中目标信道的设计方法大多只引入单个切换性能度量,难以满足实际需求,为此,本文综合考虑信道容量和切换时延两个性能指标要求;同时为了降低复杂度,提出离散多目标粒子群算法。仿真表明所提算法能够很好地求解离散多目标优化的频谱切换问题,同时兼顾了网络的实时性和高吞吐率。

## 参考文献:

- [1] LALA N A, UDDIN M, SHEIKHC N A. Novel hybrid spectrum handoff for cognitive radio networks[J]. International Journal of Wireless & Microwave Technologies, 2013, 3(1): 1-10.
- [2] 冯岩, 孙浩, 许颖, 等. 动态频谱共享研究现状及展望[J]. 电信科学, 2016, 32(2):112-119.  
FENG Y, SUN H, XU Y, et al. Review and prospect on the research of dynamic spectrum sharing [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(2): 112-119.
- [3] TIWARI K, RASTOGI A. Spectrum handoff in cognitive radio network[J]. International Journal of Advanced Research in Computer Communication Engineering, 2016, 5(4): 1025-1030.
- [4] 张平, 李建武, 冯志勇, 等. 认知无线网络基础理论与关键技术研究[J]. 电信科学, 2014, 30(2): 1-13.  
ZHANG P, LI J W, FENG Z Y, et al. Research on basic theory and key technology of cognitive radio network [J]. Telecommunications Science, 2014, 30(2): 1-13.
- [5] ZHANG W, CHAI K Y. Sequential sensing based spectrum handoff in cognitive radio networks with multiple users[J].

表 5 DMOPSO 算法的切换失败概率相对参考文献[10]、参考文献[13]和参考文献[17]减小百分比

评价	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
参考文献[10]	-26.67%	-5.71%	-5.71%	0	0	0	0	0	0	0
参考文献[13]	-22.22%	0	0	6.06%	6.06%	6.06%	6.06%	6.06%	6.06%	6.06%
参考文献[17]	82.35%	134.5%	134.5%	148.7%	148.7%	148.7%	148.7%	148.7%	148.7%	148.7%

- Computer Networks, 2014, 58(1): 87-98.
- [6] 马彬, 包小敏, 谢显中. 认知无线网络中基于混合频谱切换的最优目标信道选择算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 31-37.  
MA B, BAO X M, XIE X Z. Optimal target channel selection algorithm based on hybrid spectrum handoffs in cognitive radio networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(1): 31-37.
- [7] ZAHED S, AWAN I, CULLEN A. Analytical modeling for spectrum handoff decision in cognitive radio networks[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2013, 38(1): 98-114.
- [8] 杨小龙, 谭学治, 关凯. 认知无线网络中基于抢占式排队论的频谱切换模型[J]. 物理学报, 2015, 64(10): 108403.  
YANG X L, TAN X Z, GUAN K. Spectrum handoff model based on preemptive queuing theory in cognitive radio networks[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(10): 108403.
- [9] YANG X, TAN X. Energy-efficient target channel sequence design for spectrum handoffs in cognitive radio networks[J]. China Communications, 2017, 14(5): 207-217.
- [10] ZHENG S, YANG X, CHEN S, et al. Target channel sequence selection scheme for proactive-decision spectrum handoff[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(12): 1332-1334.
- [11] USMAN M, KHAN M S, VUVAN H, et al. Energy-efficient channel handoff for sensor network-assisted cognitive radio network[J]. Sensors, 2015, 15(8): 18012-39.
- [12] KUMAR K, MISHRA G P, PRAKASH A, et al. A proactive spectrum handoff scheme with efficient spectrum utilisation for cognitive radio ad hoc networks[J]. International Journal of Internet Protocol Technology, 2017, 10(3): 160.
- [13] 许蒙迪, 金明, 童景文. 一种基于切换失败概率和认知用户信道容量联合优化的访问策略[J]. 电信科学, 2016, 32(9): 82-88.  
XU M D, JIN M, TONG J W. A channel visiting strategy based on joint optimization of probability of handoff failure and capacity of secondary user[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(9): 82-88.
- [14] COELLO C A C, PULIDO G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [15] 郑仕铤, 杨小牛. 认知无线电频谱切换目标信道访问机制[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2213-2217.  
ZHENG S L, YANG X N. Target channel visiting scheme for spectrum handoff in cognitive radio[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(9): 2213-2217.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]// IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 12-15, 1997, Hyatt Orlando, Orlando, Florida, USA. Piscataway: IEEE Press, 1997: 4104-4108.
- [17] SHOKRI-GHADIKOLAEI H, FISCHIONE C. Analysis and optimization of random sensing order in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(5): 803-819.
- [18] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, YANG X S. Binary bat algorithm[J]. Neural Computing & Applications, 2014, 25(3-4): 663-681.

## [作者简介]



张煜培 (1995-), 男, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为认知无线电、频谱感知、频谱切换算法。



赵知劲 (1959-), 女, 杭州电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知无线电、通信信号处理、自适应信号处理等。

郑仕铤 (1984-), 男, 中国电子科技集团第 36 研究所通信系统信息控制技术国家级重点实验室博士生, 主要研究方向为认知无线电、进化算法、压缩感知。