

用一种免疫遗传算法求解频率分配问题

罗文坚, 曹先彬, 王煦法

(中国科学技术大学计算机科学技术系, 安徽合肥 230027)

摘 要: 频率分配是一个 NP 完全问题, 本文用一种基于免疫调节机制的免疫遗传算法来求解. 该算法结构类似于遗传算法; 核心思想是将个体集构造为抗体网络, 利用免疫浓度调节机制在个体层次调节个体的多样性, 同时利用免疫网络调节理论在种群层次调整个体多样性和群体收敛性之间的动态平衡, 从而克服了一般遗传算法的不足. 本文同时用该算法解决固定频率分配和最小跨度频率分配问题, 取得了较好的效果.

关键词: 频率分配; 免疫遗传算法; 免疫浓度调节; 免疫网络调节

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0915-03

Solving Frequency Assignment Using an Immune Genetic Algorithm

LUO Wen-jian, CAO Xian-bin, WANG Xu-fa

(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: Frequency assignment problems are NP-complete. An immune genetic algorithm is proposed to solve them, which is based on the immune regulation mechanism. Its structure is similar to genetic algorithm. The kernel idea is to construct an antibody network with all individuals, to regulate individual diversity with immune density regulation mechanism at the individual level, and to regulate the balance between individual diversity and population convergence at the population level with immune network regulation mechanism. Therefore, this algorithm can avoid some deficiencies of standard genetic algorithm. We solved both the fixed frequency assignment and the minimal span frequency assignment and got better results.

Key words: frequency assignment; immune genetic algorithm; immune density regulation; immune network regulation

1 引言

频率分配是一典型的 NP 完全问题. 标准遗传算法 (Standard Genetic Algorithms: SGA) 作为一种全局随机搜索方法, 在求解这类问题时, 有其独特优点. 但其缺点也同样明显^[1]. GA 由于没有考虑个体间的内在联系, 没有考虑对个体多样性和群体收敛性间动态平衡的调整, 因而在求解问题时经常效果不佳.

本文用一种基于免疫调节的免疫遗传算法^[7] (Immune Genetic Algorithm: IGA) 来求解频率分配问题, 包括固定频率分配和最小跨度频率分配问题. 免疫遗传算法是目前计算智能研究的一个热点^[2~7]. 该算法的特色是针对 GA 的上述不足, 在利用免疫浓度调节机制在遗传操作层次调节个体多样性的同时, 利用免疫网络调节机制实现群体收敛性和个体多样性间动态平衡的调整. 文中给出了 IGA 应用于固定频率分配和最小跨度频率分配问题求解的方法, 以及与标准遗传算法比较结果.

2 频率分配问题简介

设有 n 个发射器, n 段可用频率, 频率分配问题等价于: 寻找图 G 中的一个映射 $f: V(G) \rightarrow F$; $V(G)$ 是与发射器对应的约束图 G 的顶点集合, F 是代表频率 $0, 1, 2, \dots, K-1$ 的连

续整数的集合, 约束 Φ_{ij} 为分配给发射器 i, j 的频率 f_i 和 f_j 至少应间隔的频率数. 本文考虑两种主要的电磁间隔约束, 即同信道约束和邻信道约束, 其距离分别用 d_0 和 d_1 表示.

设 f 为约束图 G 的一个频率分配, 若 G 中任意边都满足约束, 则称 f 为 0-冲突分配; 否则称为有约束冲突的分配. 对 G 的 0-冲突分配 $f: V(G) \rightarrow F$, 设 $k_1 = \max\{f_i | f_i \in F\}$, $k_2 = \min\{f_i | f_i \in F\}$, 则称 $spn(f) = k_1 - k_2$ 为 f 的信道/频率跨度. 并定义: $spn(G) = \min\{spn(f) | f \text{ 为图 } G \text{ 的 0-冲突分配}\}$ 称为约束图 G 的跨度. 使得 $spn(f) = spn(G)$ 的 0-冲突分配称为图 G 的最小分配.

频率分配问题有两种基本类型. 第一类为最小跨度分配, 即求约束图 G 的最小分配; 第二类为固定频率分配, 即对给定可用信道数, 求出冲突尽可能少的一个频率分配.

对于规则分布的全面覆盖的移动通信网, 应将地面划分成一个个形状相同、相互邻接以及全面覆盖的无线电覆盖区域. 能较好接近该要求的几何形状首推六边形, 其次是正方形. 我们对两类基本频率分配问题的正方形和六边形区域均进行了实验.

3 基于免疫调节的免疫遗传算法

3.1 算法框架

免疫调节是生物免疫系统具有的基本功能之一, 包括免

收稿日期: 2001-07-16; 修回日期: 2002-10-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69971022); 安徽省自然科学基金 (No. 00043106); 国家博士点基金

疫浓度调节机制^[3,6]和网络调节机制^[8]. IGA 保留遗传算法框架,同时将进化个体对应为抗体,群体适应度的增量作为对抗体群侵入的抗原;在免疫遗传操作层次将抗原和所有抗体组成一个网络系统,按免疫浓度调节机制控制抗体的产生,按免疫网络调节机制维持抗体多样性和群体收敛性之间的动态平衡. IGA 流程如下:

- Step 1:生成当前群体;
 Step 2: $t = 0$;
 Step 3:计算群体的平均适应度增量(若 $t = 0$, 则 $\Delta \text{AverageFit} = 0$, $\Delta \text{AverageFit} = \text{AverageFit}(t) - \text{AverageFit}(t-1)$);
 Step 4:将 $\Delta \text{AverageFit}$ 作为抗原;
 Step 5:利用基于免疫浓度调节的遗传操作生成新抗体;
 Step 6:对抗体群聚类,每类为一子抗体群;
 Step 7:在种群层次进行免疫网络调节;
 Step 8:若当前群体中还没有满意解, $t = t + 1$, 转 Step2;
 Step 9:结束.

该算法的核心是 Step5 和 Step7,随后进行介绍.

3.2 免疫浓度调节

生物免疫浓度调节机制是基于抗体的浓度进行的,抗体浓度越大,则被选中参加遗传操作的概率越小. 抗体 i 的浓度 C_i 定义为:

$$C_i = \frac{\text{和抗体 } i \text{ 亲和度大于 } \lambda \text{ 的抗体数}}{\text{抗体总数 } N}$$

即群体中相似抗体所占的比重. 其中 λ 为亲和度常数,亲和度根据两个抗体的信息熵定义^[7].

计算出每个抗体的浓度之后,便可通过选择机制进行抗体的促进和抑制调节. 在传统的适应度比例选择机制的基础上,增加基于浓度的调节概率因子. 于是个体 i 的选择概率 p_i 由适应度概率 p_f 和浓度概率 p_d 两部分组成,即

$$p_i = p_f \cdot p_d = \frac{\text{Fit}(i)}{\sum_j \text{Fit}(j)} \cdot \frac{1}{\alpha} e^{-\beta \cdot C_i} \quad (1)$$

其中 α 和 β 为常数,文中均取为 1. 从上式可以看出:个体适应度越大,选择概率越大;个体浓度越大,选择概率越小. 这样既可保留适应度高的个体,又可确保个体多样性.

3.3 免疫网络调节

在文[5]中,我们借鉴 L A Segel 的形态空间模型来描述免疫网络调节机制. 设 X, Y 是聚类生成的两子抗体群, $b(X, h, t)$ 为第 t 代时 X 抗体数, h 为 X 的半径(由 Step6 聚类获得), $b(X, h, t)$ 的演化方程为^[8]:

$$\frac{\partial b}{\partial t} = m - db(1 - \alpha) + \alpha b \quad (2)$$

其中 m 为骨髓产生的抗体数,取为 1 个单位; α 为被激活的抗体比率; r 和 d 代表增值和死亡的速率,设为常数.

对参数 α ,应考虑到抗体总受到激活和抑制两种影响. 我们引入文[5]中的综舍函数 $a(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 分别用于表示激活函数和抑制函数,并将其中的参数 a_m 和 s_m 设为 1;而参数 σ_a 和 σ_s 则应为大于 0 的常数. 设定聚类后有 N 个子抗体群,即 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_N$,子抗体群的聚类中心为 $Y_i^c (i = 1, \dots, N)$,则 X 的激活状态 $A(b)$ 和抑制状态 $S(b)$ 分别为:

$$A(b) \approx \sum_{i=1}^N a(X_i^c, Y_i^c) b(Y_i, h, t)$$

$$S(b) \approx \sum_{i=1}^N s(X_i^c, Y_i^c) b(Y_i, h, t)$$

在本文,为使算法相对简单和高效,我们设定 $\alpha = \frac{A}{qS}$. 其中 $q > 0$,为常数. 这样可以较准确描述抗体的激活比率;其特点是当 A 增加时, X 子抗体群被激活的比率增加;当 S 很大时, X 被激活的比率趋于 0,即 X 子抗体群受到抑制.

至此,算法中 Step7(即免疫网络调节)为对任意子抗体群,有:

$$b = b + \Delta b = b + \partial b / \partial t \quad (3)$$

这样,算法中的 Step7 就可在此方程指导下进行.

4 算法实现

4.1 遗传编码

把集合 $\{1, 2, \dots, n\}$ 分成 k 个子集 $P_0, P_1, \dots, P_{k-1}$; 若 $A(i) = j$, 则即区域 i 采用频率 j , $i \in P_j$. 把这 k 个子集按顺序排列,组成一个染色体 $P = P_0 P_1 \dots P_{k-1}$.

4.2 交叉

采用一致交叉. 设父代个体为 P^1, P^2 . 欲产生的子代个体为 C^1, C^2 . 通过随机产生一个二进制串 $b_0 b_1 \dots b_{k-1}$ 来决定父代个体中的哪些子集直接被子代个体继承.

如果 $b_j = 1$, 则 $C_j^m = P_j^m, m = 1, 2$; 如果 $b_j = 0, s = P_j^1$, 且 $s \neq P_j^2$, 则如果 $b_0 = 0, s$ 被放入 C_1^1 中, 否则放到 C_1^2 中.

4.3 变异算子的设计

为适合频率分配问题的求解,采用如下变异方法:

设 dis 为当前代中适应度最大值与适应度最小值之差. 对个体(代表一种频率分配)中每一条约束条件不满足的边,若 $\text{Random}() > dis / \text{Const}$, 则进行如下变异:

(1) 随机选取该边的一个顶点 u, v 为离 u 最近且 u, v 间距离大于同信道约束距离的顶点.

(2) 若存在频率 n 使得 u 与其他顶点无约束冲突, Then 将 n 分配给 u .

Else 若 u, v 的频率不同, Then 将 v 的频率分配给 u .

Else 随机产生一种频率分配给 u .

$\text{Random}()$ 是在 $[0, 1]$ 区间内产生随机数的随机函数.

当算法未收敛时, dis 值很大,因此变异概率很小;当算法趋于收敛时, dis 值减小,变异概率随之增大. 采用此种变异方法有利于在算法收敛时跳出局部极优,搜索到全局最优解.

4.4 适应度设计

定义一个染色体(代表一个频率分配)的适应度为:

$$\text{Fitness} = N - \text{violated edges}$$

其中 N 为约束图中边的条数(即约束数), violated edges 为不能满足约束条件的边数. 由此,算法中总的选择概率可通过式(1)计算出来.

5 固定频率分配问题的求解

5.1 按正方形划分复用区域

算法的参数设置为:最大进化代数 1000;交叉概率为

0.5,一致交叉;变异概率为 0.1; $d = 1$; $q = 2.5$; $r = 1$; $\sigma_s = 1.414$; $\sigma_0 = 1$.

正方形的边长为 1,区域长度 * 区域宽度 = $10 * 10$,可用频率数 = 18(0 - 17),同信道约束距离 $d_0 = 4.2$,邻信道约束距离 $d_1 = 1.5$. 总共约束数(即约束图中边的条数)为 1870.

图 1 给出了本文算法(IGA)与标准遗传算法(SGA)的求解结果比较.从图中可以看出,IGA 明显优于 SGA. IGA 在 500 到 510 代时达到收敛,满足全部约束条件.而 SGA 在 1000 代以内仅满足 1849 个约束条件,曲线波动不定,始终未能收敛.

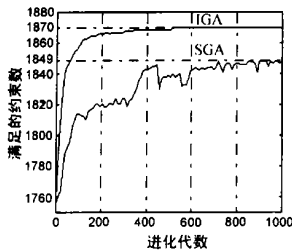


图 1 求解曲线比较(固定频率分配、正方形区域)

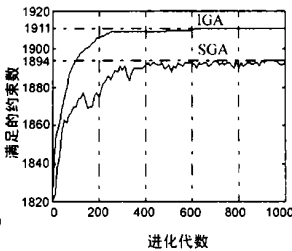


图 2 求解曲线比较(固定频率分配、六边形区域)

5.2 按六边形划分复用区域

六边形的边长为 1,区域宽度 = 10,区域长度 = 10,可用频率数 = 19(0 - 18). 其余参数设置同 5.1. 图 2 给出了用 IGA 和 SGA 求解的实验结果.

该问题的总共约束数(即约束图中边的条数)为 1915. IGA 算法收敛后求得频率分配的适应度(即满足约束的数目)在 1910 - 1911 之间. 算法在 500 代左右收敛. 而 SGA 在 1000 代内最大满足约束数为 1894,始终未能收敛. IGA 效果比 SGA 的效果要好.

6 最小跨度频率分配问题的求解

6.1 按正方形划分复用区域

正方形区域和算法的参数设置同 5.1. 图 3 是 IGA 与 SGA 的求解曲线比较. IGA 在 630 代左右得到最佳解,即 17 个频率. 但 SGA 在 720 代左右才得到最佳解.

6.2 按六边形划分复用区域

六边形区域和算法的参数设置同 5.2. 图 4 是 IGA 与 SGA 的求解曲线比较. IGA 在 3400 代左右得到最佳解,即 18 个频率. 但 SGA 在 3700 代左右才得到最佳解.

对最小跨度频率分配问题,由于其求解复杂度相对较低,

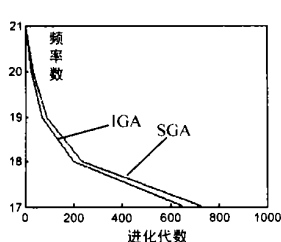


图 3 求解曲线比较(最小跨度、正方形区域)

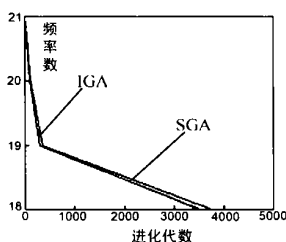


图 4 求解曲线比较(最小跨度、六边形区域)

所以,IGA 和 SGA 的求解效果都比较理想.从图 3 和图 4 可以看出,不管是正方形区域还是六边形区域,IGA 和 SGA 的求解曲线都比较平滑.这是由于 IGA 在个体层和种群层都具有调节能力,所以其求解效果优于 SGA.

7 结束语

频率分配是无线通讯中的一个典型问题. 本文利用一种基于免疫调节的免疫遗传算法来求解固定频率分配和最小跨度频率分配问题. 实验结果表明,本文的免疫遗传算法能够较好地解决频率分配问题.

参考文献:

- [1] Rudolph G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(1): 96 - 101.
- [2] Hunt J E. Learning using an artificial immune system [J]. Journal of Network and Computer Applications, 1996, 19: 189 - 212.
- [3] Ishida Y. Immunity-based systems: information system inspired from the immune system [J]. System, Control and Information, 1998, 42(9): 487 - 494.
- [4] 王磊,潘进,焦李成. 免疫规划 [J]. 计算机学报, 2000, 23(8): 806 - 812.
- [5] 曹先彬,罗文坚,王熙法. 基于免疫网络调节的改进遗传算法 [J]. 高技术通讯, 2000, 10: 23 - 27.
- [6] Ishida Y. The immune system as a prototype of autonomous decentralized systems: an overview [A]. Proc of ISADS '97 [C]. Menlo Park, CA: AAAI Press, 1997. 85 - 92.
- [7] Wenjian Luo, Xianbin Cao, Xufa Wang. An immune genetic algorithm based on immune regulation [A]. Proceedings of 2002 Congress on Evolutionary Computation [C]. Honolulu, Hawaii: IEEE Press, 2002. 801 - 806.
- [8] 漆安慎,杜婵英. 免疫的非线性模型 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1998.

作者简介:



罗文坚 男, 1974 年 11 月生于广东, 1998 年中国科学技术大学计算机科学技术系本科毕业, 同年在本系直接攻读博士. 主要研究方向为人工免疫系统及其应用.



曹先彬 男, 1969 年 1 月生于安徽, 1996 年毕业于中国科学技术大学电子科学技术系, 获博士学位. 现为中国科学技术大学计算机科学技术系副教授. 主要研究兴趣为计算智能和网络安全.