

文章编号: 1001-0920(2003)04-0441-04

## 多目标优化遗传算法在移动网络规划中的应用

李满林, 杜 雷, 闻英友, 王玉娜, 王光兴  
(东北大学 网络与通信研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:** 将多目标遗传算法 NSGA-II 应用于移动网络规划中的自动基站布置。采用多维实数向量的编码方式, 使用状态转移矩阵对遗传算子进行描述。对 NSGA-II 算法进行改进, 在进化操作中增加了随机数变换算子和删除算子, 加快了算法的收敛并避免了早熟。仿真结果证明该算法能逼近 Pareto 域, 并在该域中均匀分布, 经一次运行便可提供更多基站分布候选方案。

**关键词:** 移动网络规划; 小区规划; 自动基站布置; 多目标优化; 遗传算法; NSGA-II

中图分类号: TP18 文献标识码: A

## Applications of multiple objective genetic algorithms in mobile networks planning

LI Man-lin, DU Lei, WEN Ying-you, WANG Yu-na, WANG Guang-xing

(Networks and Communication Research Center, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Genetic algorithms is applied into the automatic cell placement of mobile networks planning. Multiple-dimension real-numbered vectors are adopted as the coding method to represent the base station placement. Status transfer matrix is introduced to annotate the genetic operator states. Some new operators, such as random number transform operator and delete operator, are also inspired to accelerate the convergence without leading to premature. Simulation results show that such algorithm can approach the Pareto front as near as possible, and can spread toward the whole front. The proposed algorithm can provide more reasonable solutions once for all.

**Key words:** Mobile networks planning; Cell planning; Automatic cell placement; Multiple objective optimization; Genetic algorithms; NSGA-II

### 1 引 言

随着我国移动用户的爆炸性增长以及通信事业的迅猛发展, 移动网络不断延伸和扩容, 从而使网络规划问题显得日益突出。如何在保证网络服务质量 (QoS) 的前提下尽可能降低成本, 是网络规划问题的关键所在。本文着重讨论移动网络规划中的基站布置问题。

基站布置问题条件如下:

1) 输入条件: 数字地图, 包括用于计算电波传输衰减的高程模型 (DEM), 用于选择站址和计算成本的地表覆盖模型 (DOM) 和建筑物分布模型 (BDM), 作为站址选择辅助信息的人口分布模型和业务分布模型。

2) 约束条件: 面积覆盖率、业务覆盖率、系统容量及服务等级等下限, 设备成本、维护成本、无线资源、干扰等上限。

收稿日期: 2002-08-27; 修回日期: 2002-10-21。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (69973011)。

作者简介: 李满林 (1963—), 男, 辽宁辽阳人, 博士生, 从事移动网络规划、多目标优化的研究; 王光兴 (1937—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事宽带网络技术、网络管理等研究。

3) 输出: 基站个数及对应位置坐标, 每个基站架设天线的个数, 每个天线的高度、方向角、仰角、主瓣张角、发射功率, 传输、复用设备的连接路线等。

求解过程就是在所有待定的可变参数中寻找满足限制条件的最优组合。显然, 此问题是一个多目标的组合优化问题, 且为 NP-complete 问题。

基站的设置位置和数目直接影响到网络的覆盖范围和信号质量; 因其价格昂贵, 又直接影响整个网络的投资成本。以往, 基站的位置主要是由工程师依据经验和实地测量进行选择。显然, 这种“经验”是不科学的, 经常与实际的最优配置相差甚远。数字地图的出现为基站的布置提供了有利的辅助信息, 但目前主要是用它来进行覆盖分析和干扰预测, 工程师仍需反复调整设计和调整基站的位置, 以一种经验指导下的“盲搜索”进行规划。

文献[1]提出采用模拟退火算法自适应实现基站定位的算法。[2]提出了集成化的蜂窝网络规划方法, 以业务需求点概念为核心, 考虑了用户行为、电波传输以及无线资源分配问题。[3]采用经典的二进制表示法将遗传算法应用于无线网络规划。[4]引入实数表示法来描述基站位置, 提出了相应的遗传算子, 并考虑了成本控制问题。

文献[4]虽然考虑了多目标的优化问题, 然而所采用的将多目标加权求和转化为单目标的方法具有一定的局限性<sup>[5]</sup>, 它不能找到非凸 Pareto 最优域中的解。为此, 本文采用多目标优化算法 NSGA- , 并对算法进行了改进。文中给出了 Pareto 最优域的概念, 介绍了高效的 NSGA- ; 进而阐述了改进算法的具体实现和仿真结果, 并讨论了改进算法在移动网络规划中所取得的效果。

## 2 基本概念

### 2.1 Pareto 最优域

单目标优化问题目标函数单一, 因此其解可以进行完全排序, 而多目标优化则不然。

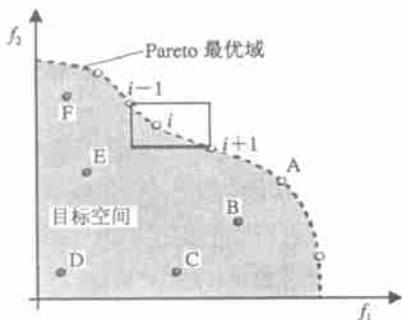


图 1-2 Pareto 最优解集及其对应的拥挤距离

以移动网络规划中的基站布置问题为例, 如图 1 所示,  $f_1$  表示覆盖率,  $f_2$  反比于成本。显然, A 优于 B, B 优于 C, 但是对于 B 和 E 两个解却不能断定孰优孰劣。多目标优化问题中的目标函数往往是相互关联甚至相互矛盾的, 并不存在唯一解, 使其相对于所有的目标函数是全局最优的。由于在搜索空间中没有其他解在所有目标函数上优于该解, 因此在广义上称其为最优解。这些解构成了一个最优解集(如图 1 虚线所示), 称为 Pareto 最优解。它是由那些任一目标函数值的提高都必须以牺牲其他目标函数值为代价的解组成的集合, 称为 Pareto 最优域, 简称 Pareto 集。

胜出的概念定义如下: 假设求解一个最大值的优化问题, 考虑两个判决向量  $a, b \in X$ , 如果

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}: f_i(a) \leq f_i(b)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, n\}: f_j(a) > f_j(b)$$

则称  $a$  胜出  $b$ 。

### 2.2 NSGA- 算法

NSGA- 算法<sup>[6]</sup>是对 NSGA 算法<sup>[7]</sup>的改进, 相对于 NSGA 而言, NSGA- 具有以下优点:

1) 提出新的基于分级<sup>[9]</sup>的快速非胜出排序算法, 将计算复杂度由  $O(mN^3)$  降到  $O(mN^2)$ , 其中:  $m$  表示目标函数的数目,  $N$  表示种群中个体的数目;

2) 为了标定分级快速非胜出排序后同级中不同元素的适值, 也为使准 Pareto 域中的元素能扩展到整个 Pareto 域, 并尽可能均匀遍布, 文献[6]提出了拥挤距离的概念(如图 1 中方框所示), 采用拥挤度比较算子代替需要计算复杂的共享参数的适值共享方法;

3) 引入了保优机制, 扩大了采样空间, 经选择后参加繁殖的个体所产生的后代同其父代个体共同竞争来产生下一代种群, 因此有利于保持优良的个体, 迅速提高种群的整体水平。

## 3 算法的设计实现及仿真研究

### 3.1 基因的映射与初始化

基因的映射采用文献[4]提出的实数表示方法。每一个体代表一种基站布置方案, 种群中个体的基因组为  $g = (c_1, c_2, \dots, c_k)$ 。式中: 染色体  $c_i = (x, y)$ ,  $(x, y)$  为基站位置在数字地图中的坐标;  $i = 1, 2, \dots, k, k$  为染色体长度。若  $c_i = (\text{Null}, \text{Null})$  表示此染色体为空, 则不代表基站位置。基因组不仅可以表示基站的位置, 而且可以表示基站的数目。

为了对算法进行验证, 只选取两个较有代表性且互相矛盾的目标函数: 面积覆盖率和成本(成本正

比于基站个数)。采用增加限制条件的适值分配算法,以避免无谓的搜索。选择面积覆盖率下限、基站个数下限和基站个数上限作为限制条件。在根据目标函数值进行基于胜出概念分级之前,如果两个个体中有一个不满足限制条件,则它将被胜出;如果两个个体都不满足限制条件,则比较哪个个体超出限制条件更少,对目标函数值超出限制条件的部分加权取标量和,数值小的将胜出。

初始化产生第一代种群,使这些个体尽可能接近 Pareto 最优域。在基站布置问题中,令初始化概率等于由基站个数上下限所确定的基站个数均值占染色体个数的百分比,即(基站个数上限 - 基站个数下限) / 2 / k。当产生的随机数小于此概率时,随机产生一个基站坐标;当产生的随机数大于此概率时,将此染色体置空。基因组长度即染色体数目 k 取 (1.2 × 基站个数上限)。

### 3.2 选择、交叉与变异算子

本文在选择过程中采用了排序的方法。计算适值后同时更新个体的索引,使得较优的个体拥有较小的索引值,并配合随机数变换算子产生随机数  $\sigma \in [0, 1]$ , 计算  $[\sigma \times \sigma \times k]$ , 即为选中的个体索引值。此算子的使用虽然增加了少量计算量,但却有效地提高了高适值个体的繁殖能力。然后采用竞赛法<sup>91</sup> 确定参加繁衍的个体,并在排序的同时引入了删除算子,将种群中相同的个体删除,避免了高适值个体迅速占领整个种群而引起早熟。

在交叉算子中采用了循环交叉策略,确定参加繁殖的个体依次选索引为第  $i$  和第  $i + 1 (i = 1, 2, \dots, k - 1)$  的个体进行交叉,并将第  $k$  个个体和第 1 个个体交叉,这样共产生  $k$  个后代。交叉是根据选定的两个双亲对应位置的染色体状态进行的。假设  $Farther = (\dots, f_i, \dots)$ ,  $mother = (\dots, m_i, \dots)$ ,  $f_i$  和  $m_i$  分别代表父亲和母亲的第  $i$  个染色体,则

$$(f_i, m_i) \quad \{ (g, g), (g, \text{Null}), (\text{Null}, g), (\text{Null}, \text{Null}) \}$$

其中:  $g$  表示该染色体位置不为空 (Null),  $i = 1, 2, \dots, k$ 。定义以上父代对应位置染色体  $(f_i, m_i)$  的状态依次为 1, 2, 3, 4, 并令他们的后代  $Child = (\dots, c_i, \dots)$ ,  $c_i \in \{g, \text{Null}\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ 。定义后代对应位置染色体  $(c_i)$  的状态依次为  $g, n$ , 则染色体交叉状态转移矩阵  $M_{\text{cross}}$  为

$$\begin{bmatrix} p_{1n}, c_i = \text{Null} & p_{2n}, c_i = \text{Null} & p_{3n}, c_i = \text{Null} & p_{4n}, c_i = \text{Null} \\ p_{1g}, c_i = (m_i + f_i) / 2 + \xi(0, |m_i - f_i|) & p_{2g}, c_i = f_i + \xi(0, r) & p_{3g}, c_i = m_i + \xi(0, r) & p_{4g}, c_i = U \end{bmatrix}$$

其中:  $p_{ij}$  表示状态  $i$  向状态  $j$  转移的转移概率,  $i = 1, 2, 3, 4, j = g, n$ ; 矩阵中元素的第 2 项表示交叉后代相应位置染色体的产生方法,  $(m_i - f_i)$  表示双亲相应染色体向量对应坐标之差,  $\xi(x, y)$  表示以  $x$  为均值  $y$  为方差的高斯变量,  $r$  表示按自由空间计算的基站覆盖半径,  $U$  表示定义在基站所分布的二维区间上的均匀分布变量。

变异操作在交叉操作之后进行,对某个染色体进行变异操作后的个体为  $Mut = (\dots, m_i, \dots)$ ,  $m_i \in \{g, \text{Null}\}$ 。式中:  $g$  表示该染色体位置不为空 (Null),  $i = 1, 2, \dots, k$ 。依次定义这两种状态为  $g, n$ , 染色体变异状态转移矩阵  $M_{\text{mut}}$  定义为

$$\begin{bmatrix} p_{nn}, m_i = \text{Null} & p_{ng}, m_i = U \\ p_{gn}, m_i = \text{Null} & p_{gg}, m_i = c_i + \xi(0, r) \end{bmatrix}$$

### 3.3 仿真研究

为了验证算法的正确性,本文对 10 km × 10 km 的目标区域进行规划。为了简化参数,假设目标区域平坦,采用自由空间传播模型,使用全向天线。覆盖面积为圆形,经计算可得出覆盖半径约为 2.2 km。选择覆盖率和成本两个目标函数,其中成本以基站个数衡量。其他参数如表 1 所示。

表 1 仿真研究的其他参数

参 数	数 值	参 数	数 值
种群中个体数	50	交叉率	0.6
覆盖目标门限	70%	基站个数上限	10
变异率	0.1	基站个数下限	5

染色体交叉状态转移矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.8 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

染色体变异状态转移矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 \\ 0.8 & 0.8 \end{bmatrix}$$

对于终止条件的选择,可以基于种群整体适值门限或特殊个体适值门限,也可基于收敛或早熟的判断等<sup>101</sup>,本文采用较为简单的基于繁殖代数门限的终止条件。仿真结果如图 2 所示。参数不需要进行太大修改便可迅速收敛,并接近于 Pareto 最优域。

## 4 NSGA-II 改进后的效果

本文对所采用的 NSGA- 算法进行改进,引入了增加限制条件的分级适值分配算法,分配给不

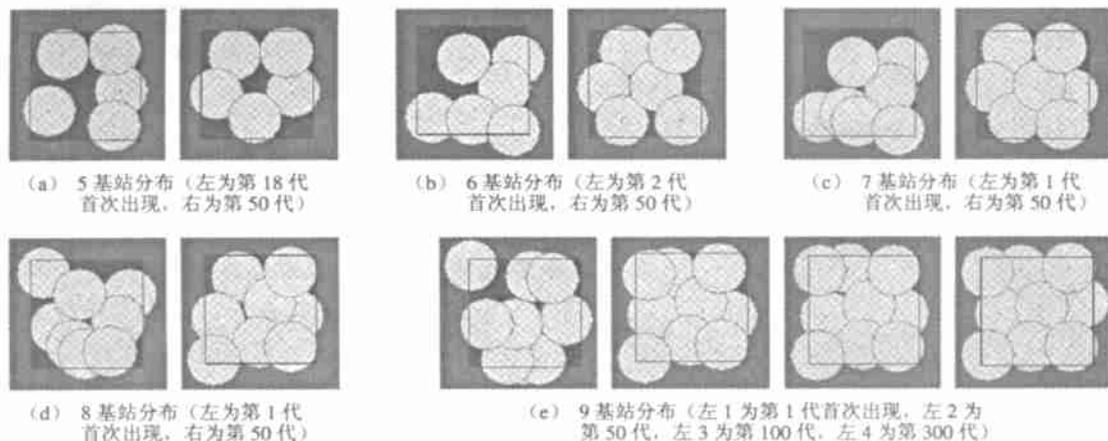


图 2 经一次运行各基站分布方案的首次出现和之后的状态

满足限制条件的解的适值均低于满足限制条件的解。限制条件的采用将求解空间进一步缩小,减小了随机搜索窗口,避免了无谓的进化计算,从而加快了算法的收敛速度。多次试验结果表明,收敛速度反比于基站个数上限和下限之差。

对于 NSGA- 算法,本文引入了排序和随机数变换算子。NSGA- 在进行选择时使用无序的索引,随机数由均匀分布的随机变量产生。采用竞赛法可使高适值个体的生存能力相对增高,但在仿真中发现,因为限制条件的使用,使得每一级中的个体数量并不是很多,从而低等级的个体大量充斥着选择后待繁殖的群体。为此引入了排序的方法,将产生的随机数经平方率变换,换算成相应的索引值。这样便增大了小索引值个体被选中的概率,使排在前 25% 的个体被选择的总体概率达到 50%,比原先的几率增加了一倍。实验结果证明,该算子的采用大大避免了无谓的随机搜索,迅速加快了收敛速度,配合较大的变异概率可以避免早熟的出现。

本文引入了删除算子。在进行胜出比较时,如果两个个体互不胜出,则判断它们是否相同,如果相同则删除其中一个个体。没有引入删除算子之前, NAGA- 算法如果种群中出现了相同的个体,并且适值相对较高,则它会以一定的概率在种群中繁殖。当此个体超过一定数量以后,它将以近乎指数的速率繁殖,快速占领几乎整个种群,从而产生早熟。删除算子的采用避免了早熟的发生,仿真结果证明它是有效的。

文中采用染色体状态转移矩阵  $M_{cross}$  和  $M_{mut}$ , 分别描述交叉算子和变异算子,使得对算子的描述更加全面直观,便于使用随机过程理论来分

析各种状态变换产生的条件及其结果,有利于引导本文算法向目标方向前进。

## 5 结 语

本文将多目标优化算法 NSGA- 引入移动网络规划,克服了将多目标函数加权求和转化为单目标优化问题只能找到凸 Pareto 最优域,以及经一次运行只能提供一种方案的缺陷。仿真结果表明,将改进的 NSGA- 引入移动网络规划,可以大大加快求解时间,并避免早熟现象。该算法只需一次运行便可提供多种可行的基站布置方案,并使这些方案在 Pareto 最优域中均匀分布,为在保证服务等级的前提下降低网络成本提供了一种有效的方法。

本文的工作仅是一个开端,今后应充分考虑各种相应的地理模型和业务模型,采用实际的电波传播模型,对更多的参数进行优化,例如增加基站功率以及天线各个参数的规划能力。

## 参考文献(References):

- [1] Thomas Fritsch, Kurt Tutschku, Kenji Leibnitz. Field strength prediction by ray-tracing for adaptive base station positioning in mobile communication networks[A]. *2nd ITG Conf on Mobile Communication 95*[C]. Neu Ulm, 1995. 135-139.
- [2] Kurt Tutschku, Notker Gerlich, Phuoc Tran-Gia. An integrated approach to cellular network planning[A]. *7th Int Telecommunication Network Planning Symp* [C]. Sydney, 1996.
- [3] Calegari P, Cuidec F, Kuonen P, et al. Genetic approach to radio network optimization for mobile systems[A]. *Proc IEEE VTC 97*[C]. Phoenix, 1997. 2: 755-759.

(下转第 448 页)

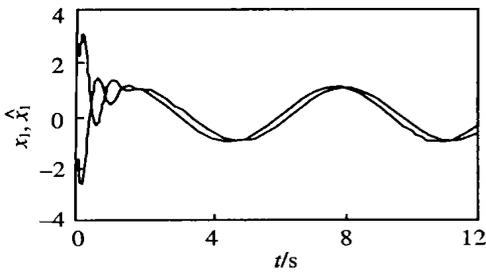
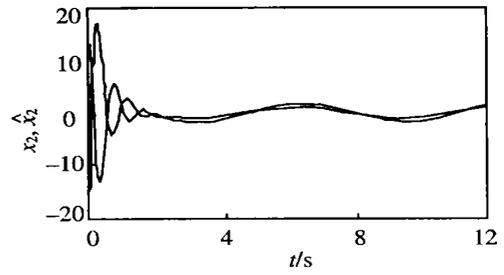
(a)  $x_1$  及其估计  $\hat{x}_1$ (b)  $x_2$  及其估计  $\hat{x}_2$ 

图 1 系统的状态和估计

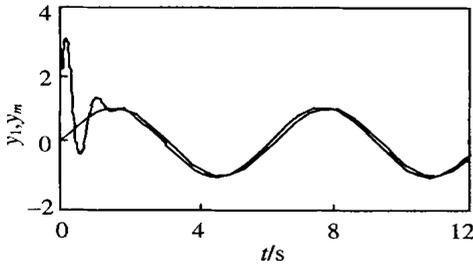
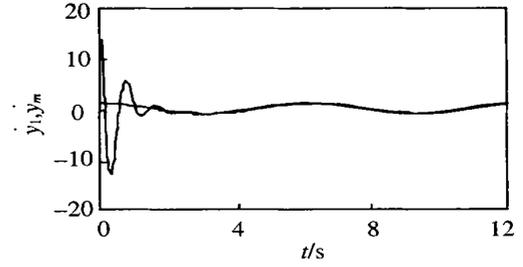
(a) 输出  $y$  和  $y_m$ (b)  $y_1$  和  $y_m$ 

图 2 输出跟踪及其参考信号

## 参考文献(References):

- [1] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. *IEEE Trans Fuzzy Systems*, 1993, 1(2): 146-155.
- [2] Chen B S, Lee C H, Chang Y C.  $H_\infty$  tracking design of uncertain nonlinear SISO systems: Adaptive fuzzy approach[J]. *IEEE Trans Fuzzy Systems*, 1996, 4(1): 32-43.
- [3] Tong S C, Chai T Y. Fuzzy adaptive control for a class of nonlinear systems[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, 101(1): 31-39.
- [4] Chai T Y, Tong S C. Fuzzy direct adaptive control for a class of nonlinear systems[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, 103(3): 379-389.
- [5] 佟绍成. 基于观测器非线性不确定系统的自适应模糊控制[J]. *控制与决策*, 2002, 17(4): 391-396. (Tong S C. Fuzzy adaptive output tracking control of nonlinear systems[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(4): 391-396.)
- [4] Jin K H. Genetic approach with a new representation for base station placement in mobile communications[A]. *Proc IEEE VTC 01*[C]. Atlantic, 2001. 860-864.
- [5] Zitzler E. *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*[M]. Shaker Verlag, 1999. 11-12.
- [6] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[A]. *Proc of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conf*[C]. Paris, 2000. 849-858.
- [7] Srinivas N, Deb K. Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms[J]. *Evolutionary Computation*, 1995, 2(3): 221-248.
- [8] Goldberg D E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*[M]. Massachusetts: Addison-Wesley, 1983.
- [9] Hancock P J B. An empirical comparison of selection methods in evolutionary algorithm[A]. *Evolutionary Computing: AISB Workshop*[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1994. 80-94.
- [10] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

(上接第 444 页)