

# 一种基于克隆策略的多播路由算法<sup>1</sup>

刘 芳 杨海潮

(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

**摘 要:** 该文针对网络计算中的 NP-complet 问题——带时延约束的多播路由问题, 提出了一种基于克隆策略的路由算法。仿真实验表明, 与基于遗传算法的多播路由算法相比, 该算法具有更快的收敛速度和更好的全局寻优能力, 而且算法稳定、灵活, 操作简单。

**关键词:** 多播路由, 克隆策略, 时延约束

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)11-1825-05

## A Multicast Routing Algorithm Based on Clonal Strategies

Liu Fang Yang Hai-chao

(Computer Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** An algorithm based on Clonal Strategies(CS) is presented to deal with the delay-constrained and least-cost multicast routing problem known as NP-complet. Simulations show that compared with those based on genetic algorithm, the multicast routing based on CS has faster converging speed and better ability of global searching with the property of stabilization, agility and operating simply.

**Key words** Muticast routing, CS, Delay-constrained

### 1 引言

近年来, 随着电视会议、远程教学、视频点播等网络多媒体业务迅速发展, 对网络的传输时延, 资源的占用提出了更高的要求。多播技术是网络支持多媒体业务的关键技术之一, 因此, 找到一个有效的多播路由算法是非常必要的。

多播路由是网络中由单一源点到多个指定目的节点的通信形式。确定多播路由的一般做法是, 构造一棵包括源节点和目的节点, 且叶子节点为目的节点的多播树, 信息沿这棵树确定的路径进行发送时, 信息只需在树的分枝处进行复制, 这样能够节省网络资源。

已经证明, 多播路由问题属于 NP 完全 (Nondeterministic Polynomial Complete) 问题, 针对这一问题, 已经提出的无约束多播路由算法有 DNH(Distance Network Heuristic)<sup>[1]</sup>, SPH (Shortest Path Heuristic)<sup>[2]</sup> 等算法。针对加了 QoS 限制的多播路由问题, 也有很多带约束的多播路由算法, 如 BSMA(Bounded Shortest Multicast Algorithm)<sup>[3]</sup>, CDKS(Constrained Dijkstra Heuristic)<sup>[4]</sup> 等。这些算法普遍存在的问题是不能很好地平衡多播树的费用与时延限制, 算法的复杂度太大。

作为一种全局优化算法, 遗传算法<sup>[5]</sup> 被越来越多地应用于解决多播路由问题<sup>[6-8]</sup>。与传统的算法相比, 遗传算法在时间的控制上更为灵活, 但算法的迭代次数还是显得偏大, 有时还存在找不到最优多播树的问题, 而且当网络规模变大时, 算法的性能明显下降。为此本文提出

<sup>1</sup> 2003-05-30 收到, 2003-09-06 改回

国家自然科学基金 (60372045 和 60133010) 资助项目

一种基于克隆策略的时延限制的多播路由算法, 仿真表明, 该算法不仅有效可行, 而且比使用进化算法解决同类问题的其他算法具有更快的收敛速度和更高的效率。

## 2 克隆策略

### 2.1 算法简介

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是通过生物进化过程中的繁殖、变异、竞争和选择等行为的模仿来实现的。它强调群体中的优胜劣汰以及优势新个体的产生。传统的遗传算法有 3 个算子: 选择算子、交叉算子和变异算子。传统的遗传策略则不包含交叉算子, 只靠选择和变异算子来实现进化。

由于遗传算法在搜索过程中并未提供反馈机制, 所有算子的运作纯粹以概率为导向, 造成寻优过程可能会出现退化和早熟现象, 或者是收敛速度过慢。针对这种情况, 刘若辰等人在文献 [9] 中提出了克隆策略 (Clonal Strategies, CS)。其基本思想是以克隆选择算子和克隆变异算子代替遗传策略中的选择和变异算子, 引入反馈机制, 使寻找最优解的过程变得更有“目的”性, 从而提高了收敛速度, 并避免了遗传策略中的早熟、退化现象。

### 2.2 算法描述

为了便于说明, 先做以下符号约定, 令 clone 为克隆算子, mut 为变异算子, sel 为克隆选择算子,  $f$  为亲和度函数, antibody 表示抗体 ( $x_i$ ), pop 表示抗体群 ( $A$ ), cost 为多播树代价。

步骤 1 随机在解空间产生初始抗体群:  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 令  $A = X$ ;

步骤 2 根据以下规则得克隆规模  $\{(k_1, k_2, \dots, k_n); k_i \geq 1, i = 1, \dots, n\}$ ,

$$k_i = \text{Int} \left[ N_c \cdot \frac{f(x_i)}{\sum_{j=0}^{n-1} f(x_j)} \right] \quad (1)$$

$N_c$  为一大于  $n$  的整数,  $\text{Int}[\bullet]$  表示上取整。

步骤 3 克隆 (clone): 将向量  $A$  中的每个分量  $x_i$  分别乘一个  $k_i$  维的单位向量  $I_{k_i}$ , 即对每个分量  $x_i$ , 分别复制  $k_i$  份。

$$\begin{aligned} B = \text{clone}(A) &= \{(x_1 I_{k_1}, x_2 I_{k_2}, \dots, x_n I_{k_n}), I_{k_i} = (1, 1, \dots, 1)_{k_i}\} \\ &= \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1k_1}; x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2k_2}; \dots; x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nk_n}\} \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $x_{ij} = x_i$ ,  $B$  为经过克隆后所得的抗体群。

步骤 4 变异 (mut): 变异算子 mut 的选择应根据具体情况确定, 文献 [9] 中采用的是高斯变异。

$$\begin{aligned} C = \text{mut}(B) &= \{\text{mut}(x_1 I_{k_1}), \text{mut}(x_2 I_{k_2}), \dots, \text{mut}(x_n I_{k_n})\} \\ &= \{x'_{11}, x'_{12}, \dots, x'_{1k_1}; x'_{21}, x'_{22}, \dots, x'_{2k_2}; \dots; x'_{n1}, x'_{n2}, \dots, x'_{nk_n}\} \end{aligned} \quad (3)$$

步骤 5 克隆选择 (sel):  $D = \text{sel}(A, C)$ , 且满足

$$\begin{aligned} f(D) = f(\text{sel}(A, C)) &= \{\max(f(x_1), f(x'_{11}), \dots, f(x'_{1k_1})), \max(f(x_2), f(x'_{21}), \dots, \\ &f(x'_{2k_2})), \dots, \max(f(x_n), f(x'_{n1}), \dots, f(x'_{nk_n}))\} \end{aligned} \quad (4)$$

步骤 6 若满足收敛条件或停机准则, 终止算法; 否则,  $A = D$ , 转步骤 3。

可以看出, 克隆的实质是在进化中, 在一代最优解的附近, 根据亲和度的大小, 产生一个变异解的群体从而扩大了搜索范围, 有助于防止进化早熟和搜索陷于局部极小值。

## 3 时延受限的多播路由问题的描述

通信网络可以表示为无向图  $G = (V, E)$ , 其中  $V$ ,  $E$  分别表示网络节点和链路的集合,

假设  $G$  为简单图, 即网络中任意节点对间最多存在一条链路. 对于网络中任意两节点  $u, v$ , 定义  $d(u, v), c(u, v)$  分别表示  $u, v$  间链路的时延和费用. 设  $s$  为多播路由的源节点,  $M \subseteq V - \{s\}$  为多播组. 多播组端节点的个数, 即目的节点的个数也记为  $M$ .  $T = (V_T, E_T)$  为多播树,  $P_T$  为从源节点到某一目的节点的路径. 则时延受限的多播问题可以表示为:

$$\text{COST}(T) = \min\left(\sum_{(u,v) \in E_T} c(u, v)\right) \quad (5)$$

$$\sum_{(u,v) \in P_T(s,t)} d(u, v) \leq \Delta; \quad \forall t \in M \quad (6)$$

$\Delta$  为最大时延.

从式 (5),(6) 可以看出, 多播问题实际上就是一个约束优化问题, 即如何求得在式 (6)(时延) 约束下式 (5)(代价) 的最小值.

## 4 基于克隆策略的多播路由算法

该算法总体分为两步:

- (1) 求出满足时延条件的备选路径集.
- (2) 从备选路径集中找出最优多播树.

### 4.1 算法步骤

(1) 求出备选路径集 利用深度优先搜索找出由源节点  $s$  到达任一目的节点  $d_i (d_i \in M)$  的所有满足时延约束的备选路径集  $\Omega_{d_i}$ .

(2) 编码与产生初始抗体群 对于每个多播组端节点  $d_j$  的备选路径集  $\Omega_{d_j}$ , 假设其中有  $n_{d_j}$  条备选路径, 令  $n_i = \max(n_{d_j}), (\forall d_j \in M)$ . 即  $n_i$  为具有最多备选路径的目标节点的备选路径数, 令集合  $\Omega_i = \{0, 1, 2, \dots, n_i - 1\}$ , 可用  $\Omega_i$  中的元素标识到达任意目标节点的某一条路径.

从集合  $\Omega_i$  中每次任选一数字, 共选择  $M$  次, 将这  $M$  个数字按选择先后的顺序组成向量, 用此向量表示一个初始抗体, 记为 antibody. 每个这样的抗体就对应了一棵多播树, 而向量中的每个元素 antibody[ $r$ ] 则对应了到达某一目的节点的一条路径. 将上述过程共进行  $n$  次, 可以得到初始抗体群记为 pop[0].

(3) 计算亲和度 对于那些备选路径数  $n_{d_k} = n_i$  的目标节点  $d_k$ , 集合  $\Omega_i$  中任意的数都对应到达该目标节点的一条实际路径. 此时, 定义路径代价为  $\text{cost}(d_k) = \sum_{(u,v) \in P_T(s,d_k)} c(u, v)$ .

对于那些备选路径数  $n_{d_k} < n_i$  的目标节点  $d_k$ , 当  $j \in [0, n_{d_k} - 1]$  时,  $j$  对应到达该目标节点的一条实际的路径, 其路径代价的定义同上; 当  $j \in [n_{d_k}, n_i - 1]$  时,  $j$  并不实际对应一条路径. 此时可令  $\text{cost}(d_k) = \text{Max}$ . 可定义亲和度函数为  $f = \sum \text{Max} - \text{cost}(d_k), d_k \in M$

(4) 克隆 对当前抗体群 pop[ $t$ ] 进行克隆操作, 既可利用单克隆也可利用多克隆操作. 设当前抗体群 pop[ $t$ ] 为一  $n$  维列向量, 那么克隆操作可简单表述为  $\text{clonepop}_{n \times m}[t] = \{\text{pop}_1[t] \times I_m, \text{pop}_2[t] \times I_m, \dots, \text{pop}_n[t] \times I_m\}$

在这里, pop[ $t$ ] 相当于式 (2) 中的  $A$ , 表示初始抗体群, pop[ $t$ ] 就表示式 (2) 中的分量  $x_i$ ;  $I_m$  即式 (2) 中  $k_i = k_j = m (i, j \in 1 \sim n)$  的情况; 那么  $\text{clonepop}_{n \times m}[t]$  即式 (2) 中的  $B$ . 当  $m = 1$  时, 该操作为单克隆操作.  $m > 1$  时为多克隆操作.

(5) 克隆变异 对  $\text{clonepop}_{n \times m}[t]$  群体进行克隆变异操作, 变异概率的选择可以与原始抗体群  $n$  和克隆规模  $m$  之积成反比. 在文献 [9] 中使用的是高斯变异, 本文为操作简单起见, 采用的按位变异, 即随机选取一整数  $a \in [0, n_i - 1]$  按照变异概率取代  $\text{clonepop}_{i \times j}[t] \text{antibody}[r]$ , ( $i < n, j < m, r \in [1, M]$ ) 上原有的值.

(6) 克隆选择 对父代抗体群  $pop[k]$  和变异后的克隆抗体群  $clonepop_{n \times m}[t]$  进行克隆选择, 组成下一代群体  $pop[t + 1]$ . 其选择准则按式 (4) 进行, 即

$$pop_{i \times 1}[t + 1] = \begin{cases} clonepop_{i \times j}[t], & pop_{i \times 1}[t] < clonepop_{i \times j}[t], j \in [1, m] \\ pop_{i \times 1}[t], & \text{其他} \end{cases}$$

其中  $i \in [1, n]$

计算  $pop[t + 1]$  中每个个体的亲和度, 若新一代群体中存在最优个体, 则算法中止; 否则,  $t = t + 1$  转第 (4) 步.

### 4.2 算法复杂度

该算法的时间复杂度与抗体群规模  $n$ , 克隆的规模  $m$ , 算法的迭代次数  $t$  有关. 算法复杂度为  $O(tmn)$ .

## 5 仿真实例及结果分析

本文仿真所采用的网络拓扑如图 1(文献 [8]) 所示, 图中各边上的树枝分别代表费用与时延. 源节点和目的节点的取值为  $s = 1, D = \{7, 11, 14, 16, 18\}$ . 在实验中, 最大时延限制分别取为  $\Delta = 9, 25$ . 实验以抗体的亲和度不再变化或到达算法的最大迭代次数为终止条件, 最大

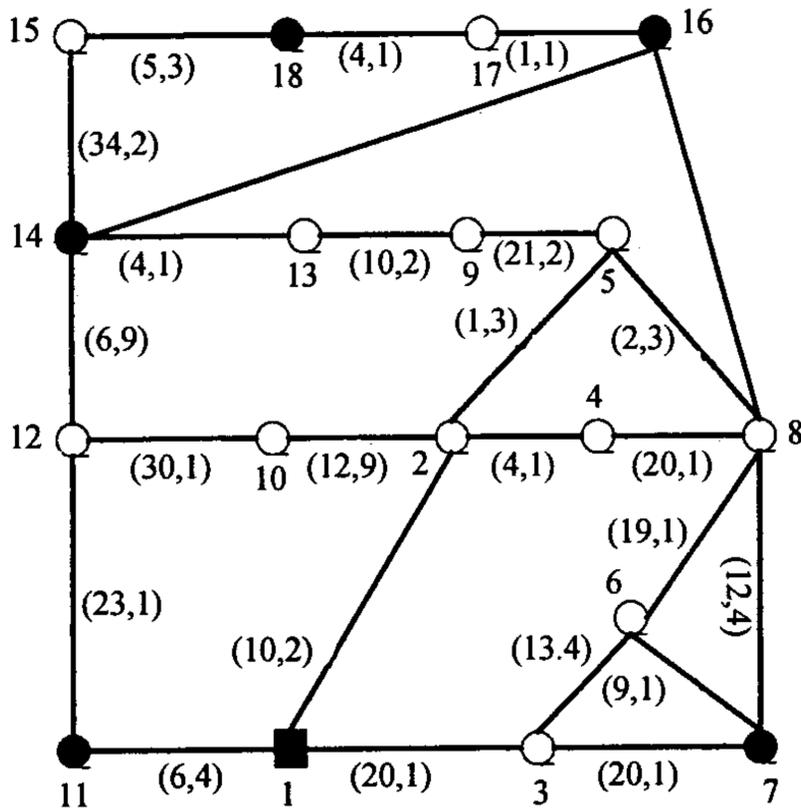


图 1 随机网络

次数设为 100. 为了便于比较, 两种算法采用了相同的种群规模. 图 2 即为  $\Delta = 25$  时算出的多播树, 其代价为 71, 时延为 12. 图 3 为  $\Delta = 9$  时的结果, 其代价为 92, 时延为 8.

在  $\Delta = 25$  时, 100 次实验中, 有 36 次都是在 10 代之内即可得到最优解; 在  $\Delta = 9$  时, 本算法的平均迭代次数为 4 代, 迭代次数大于 10 的仅有 3 次. 表 1 给出了利用遗传算法<sup>[7]</sup>和克隆算法解决图 1 所示网络的多播路由问题的收敛分布情况, 图 4(a), 4(b) 是两种算法在不同的时延限制下的多播树费用及时延收敛曲线的比较. 可见, 当时延限制较小时, 本算法的收敛效果与遗传算法相

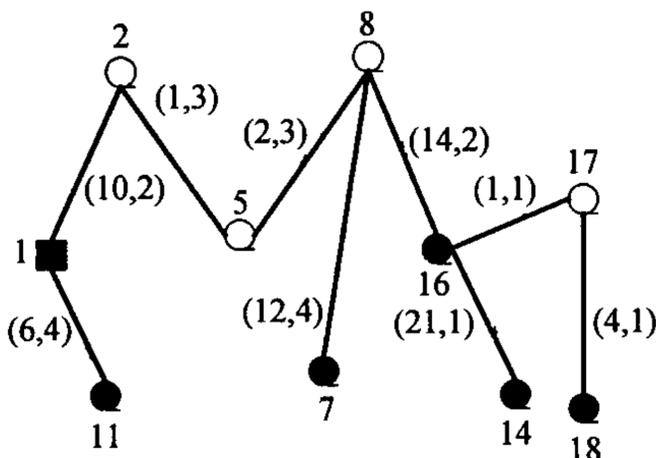


图 2  $\Delta = 25$  时的最优多播树

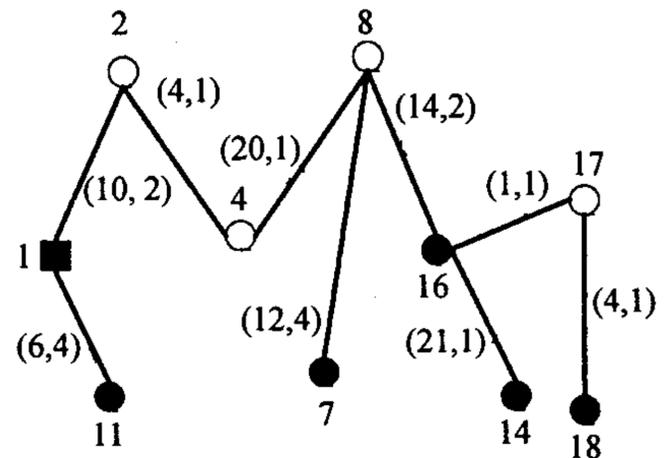
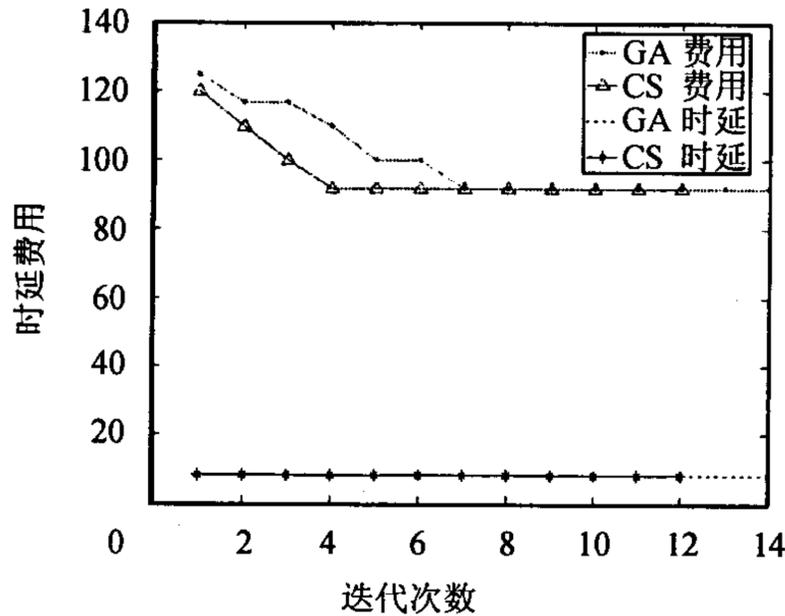


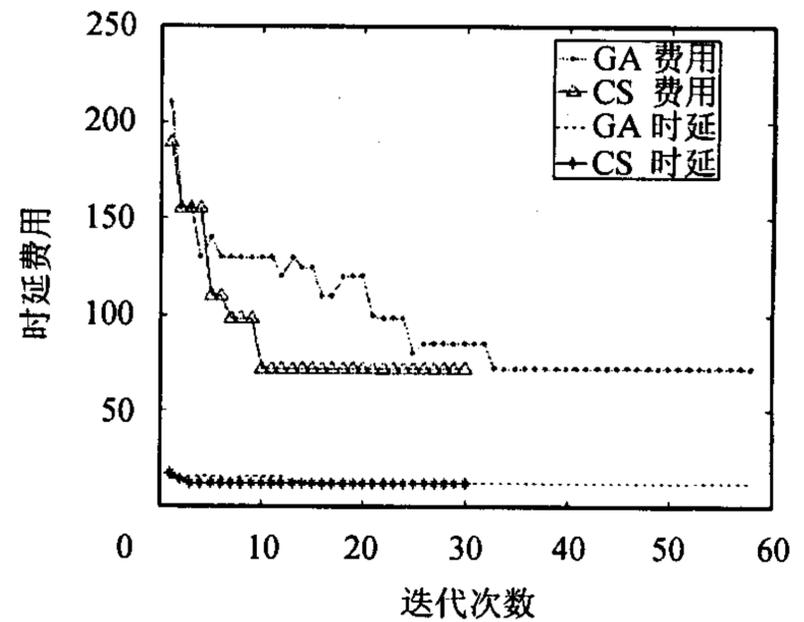
图 3  $\Delta = 9$  时的最优多播树

表 1 CS 和 GA 收敛于最优解及次优解的情况

迭代次数	收敛于最优解的次数 ( $\Delta = 9$ )		收敛于最优解的次数 ( $\Delta = 25$ )	
	遗传算法 [7]	克隆策略	遗传算法 [7]	克隆策略
1 ~ 10	85	97	0	36
11 ~ 30	13	3	11	60
> 30	2	0	41	4
收敛于次优解的次数	0	0	48	0



(a)  $\Delta=9$



(b)  $\Delta=25$

图 4 CS 和 GA 搜索多播树费用及时延随迭代次数的变化

近；当时限变大时，本算法的效果明显优于遗传算法，值得注意的是前者有 48 次只得到了次优解，而本算法在规定的最大迭代次数内不存在得不到最优解的情况。

## 6 结论

克隆策略在遗传算法的基础上引入了反馈机制，与后者相比其搜索过程更有“目的”性。因此，将克隆策略用于多播路由问题时，必然会得到更快的收敛速度。但该算法也存在不够稳定的缺点，当时延限制变大时，效果变差，这一点可以从表 1 看出。尽管如此，与基于传统遗传算法的多播路由算法相比，基于克隆策略的多播路由算法的优势还是明显的。

## 参 考 文 献

- [1] Kou L. A fast algorithm for the Steiner trees. *Acta Informatic*, 15(2): 141-145.
- [2] Takahashi H. An approximate solution for the Steiner problem in graphs, *Math. Japonica*, 24(6): 573-577.
- [3] Mehrdad Parsa. An interative algorithm for delay-constrained minimum-cost multicasting. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 6(4): 461-474.
- [4] Salama H F. Evaluation of multicast routing algorithm for real-time communication on high-speed networks. *IEEE J on Sel. Areas in Comm*, 15(3): 332-345.
- [5] 陈国良等. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1996: 28-98.
- [6] 石坚, 邹玲等. 遗传算法在组播路由选择中的应用. *电子学报*, 2000, 28(5): 88-89.
- [7] 王新红, 王光兴. 基于遗传算法的时延受限代价最小组播路由选择方法 [J]. *通信学报*, 2002, 23(3): 112-117.
- [8] 刘莹. 计算机网络中的多播路由算法. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 2002.12.
- [9] 刘若辰, 杜海峰, 焦李成. 免疫克隆策略. [研究报告], 西安: 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 2002 年.

刘 芳: 女, 1963 年生, 教授, 主要从事智能信息处理的研究.

杨海潮: 男, 1978 年生, 硕士生, 主要从事人工智能和路由算法的研究.