

参数可调的克隆多播路由算法*

刘芳⁺, 杨海潮

(西安电子科技大学 计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710071)

A Clone Based Multicast Algorithm with Adjustable Parameter

LIU Fang⁺, YANG Hai-Chao

(School of Computer Science and Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-29-8201023, Fax: +86-29-8201023, E-mail: f63liu@163.com

Received 2003-09-05; Accepted 2003-11-11

Liu F, Yang HC. A clone based multicast algorithm with adjustable parameter. *Journal of Software*, 2005,16(1):145-150. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/145.htm>

Abstract: The problem of computing delay-constrained minimum-cost multicast trees is of great interest in the last few years. So far, the Bounded Shortest Multicast Algorithm (BSMA) has been thought to be the best constrained multicast algorithm. However, the large computation time restricts its application. As a global optimizing algorithm, Genetic algorithm (GA) is applied to solve the problem of multicast more and more. GA has more powerful searching ability than traditional algorithm, however, the property of "prematurity" makes it difficult to get a good multicast tree. A Clonal Strategies (CS) based multicast algorithm is presented in this paper, which saliently solves the "prematurity" problem in Genetic based multicast algorithm. Furthermore, the algorithm is accelerated by using an adjustable parameter to reduce the search space. The algorithm has the property of simple realization and flexible control. The simulated results show that CS has better performance than BSMA and GA.

Key words: multicast; BSMA (bounded shortest multicast algorithm); GA (genetic algorithm); clonal strategy; delay constrained

摘要: 近年来,时延受限的代价最小多播树问题备受关注.到目前为止,BSMA(bounded shortest multicast algorithm)算法被认为是最好的受限多播路由算法;然而,过长的计算时间限制了其应用.作为一种全局优化算法,遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)被越来越多地应用于多播路由问题.与传统的算法相比,遗传算法的全局搜索能力更强,但其易“早熟”的特点使它并不总是能得到最优多播树.提出的基于克隆策略的多播路由算法,有效地解决了“遗传”多播路由算法中的“早熟”问题,并通过引入一个可调因子缩小了搜索空间,加快了算法的收敛速度.算法实现简单、控制灵活.仿真结果表明,该算法的性能优于 BSMA 算法和传统的遗传算法.

关键词: 多播路由;BSMA;遗传算法;克隆策略;时延限制

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60073053, 60133010 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2002AA135080 (国家高技术研究发展计划(863))

作者简介: 刘芳(1963—),女,湖南华容人,教授,主要研究领域为智能信息处理,模式识别;杨海潮(1978—),男,硕士生,主要研究领域为人工智能,多播路由算法.

近年来,随着越来越多的时延敏感的网络应用,如视频会议、远程教学以及其他分布式多媒体应用的出现,时延受限多播路由算法也逐渐被人们所关注.在过去的几年里,已经提出了很多启发式路由算法^[1-3],然而,这些算法普遍存在的问题是算法的复杂度太大,实现复杂.仿真结果表明^[4],这些算法得到的多播树费用通常较大.

大多数确定性算法在有限的时间内都不能得到费用较小的多播树.因此,人们将目光转向了遗传算法^[5].从多数仿真看来,遗传算法取得了比确定性算法更好的结果,但其易“早熟”的特性也影响了算法性能的进一步提高.为此,本文提出克隆多播路由算法,该算法有效地克服了早熟现象.而且通过引入一个可调因子,缩小了算法的无效搜索空间,加快了收敛速度.仿真表明,该算法是有效的、可行的,与 BSMA(bounded shortest multicast algorithm)算法和遗传算法解决同类问题相比具有更令人满意的结果.

1 多播路由问题模型

通常地,通信网络可以被表示为一个有向连通图 $Graphic(V, E)$, V 表示节点的集合, E 表示边集合.对于 $\forall u, v \in V$, 分别用 $delay(u, v)$, $cost(u, v)$ 表示弧 (u, v) 上的时延和费用.一般地,弧 (u, v) 和 (v, u) 具有不同的时延和费用.

设 S 为多播会话的源节点, D 为信宿节点的集合, $D \cup S \subseteq V$, $|D|$ 表示信宿节点总数.令 $MT = (V_{MT}, E_{MT})$ 表示多播树. $P_{MT}(S, D[i])$ 表示 MT 中从源节点到信宿节点 $D[i]$ 的一条路径.时延约束多播路由问题可以表述为寻找满足式(1)、式(2)的一棵生成树.

$$Cost(MT) = \min \left(\sum_{(u,v) \in E_{MT}} cost(u, v) \right) \tag{1}$$

$$\sum_{(u,v) \in P_{MT}(S, D[i])} delay(u, v) \leq \Delta (\Delta \text{为时延约束}), i \in 1 \sim |D| \tag{2}$$

2 克隆策略^[6]的基本思想

克隆策略根据生物学免疫系统的抗体克隆选择机理,通过构造合适的克隆算子来求解优化问题.克隆策略可以在一定程度上克服进化算法中的早熟现象^[6],其操作过程可如图 1 所示.

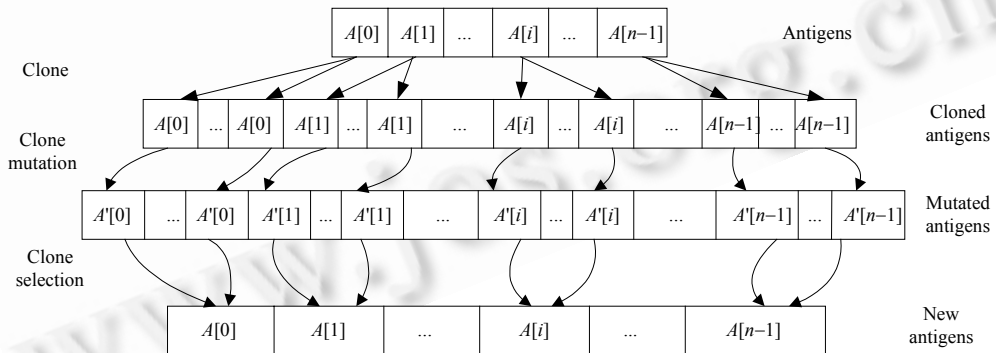


Fig.1 The process of clonal strategies

图 1 克隆策略操作过程

克隆(clone).对于每个抗体 $A[i]$ 按一定的规模复制到新的抗体群中,复制规模根据抗体的亲和度自适应调节,并且与一个常数因子有关.

克隆变异(clone mutation).为了保留原始种群的信息,变异操作只作用于克隆后的抗体群.

克隆选择(clone selection).在每个原始抗体 $A[i]$ 及由它变异克隆后的抗体 $A'[i]$ 群中选出亲和度最大的抗体替代原始抗体 $A[i]$.

将上述过程迭代执行,直到最优抗体亲和度不再变化和达到算法执行次数的上限,中止算法.

3 基于克隆策略的时延受限的多播路由算法

3.1 求解备选路径集

本文选择备选路径时使用的伪代码如下.由于算法每步扩展的都是未访问节点,并对时延进行检测,因此选出的路径都满足时延限制并且不会出现环路.

```

1.  recurSearRout(int ID) {
2.    //先将当前就要访问的的节点压入栈
    中
3.    CurrentLinkStack.push_back(ID);
4.    //设置已访问标志
5.    setVisitSig(ID,true);
6.    //如果分组已经到达Source
7.    if(ID==SourceID){
8.      添加这一条到达源节点的路径;
9.      //ID节点退栈
10.     CurrentLinkStack.pop_back();
11.     return;
12.   }
13.   //如果当前节点不是目标节点,
14.   //对其邻居如下操作
15.   for(int i=0;i<ID.getDegree;i++){
16.     tempID=ID.getNeighbor(i);
17.     if (加入tempID节点后的时延
18.     <=Δ && tempID没有在栈中){
19.       //递归调用
20.       recurSearRout(tempID);
21.     }
22.   }
23.   //当前节点退栈
24.   CurrentLinkStack.pop_back();
25.   //恢复未访问标志
26.   setVisitSig(ID,false);
27.   return;
28. }

```

为了加快算法的收敛速度,必须缩小搜索空间,即备选路径集合.根据最小生成树^[7]算法可以假定,组成最优多播树的路径必然包含到达某些目的结点的最短路径.因此本文的做法是只选择备选路径集中代价最小的若干路径组成新的“备选路径集”.在路由算法的具体实施过程中,可以通过引入可调参数 k (k 的含义参见第 3.2 节中的“编码机制”)来扩大或缩小“备选路径集”,这样做基本不会增加算法的额外负担.

3.2 克隆多播路由算法

信源节点备选路径信息放在名为 D 的数组中,数组的长度即为请求多播会话的组成成员数 $|D|$,数组元素的数据结构如下:

```

D[i]{
  ID=i; //请求多播会话的节点的标识
  P; //从目的到该源节点的路径集合
  |P|; //到该源节点的路径总数
}

```

(1) 编码机制

目标节点的个数 $|D|$ 就是抗体 *Antigen* 的编码长度,每个码位 *Antigen*[i] 对应于各自的 $D[i]$,抗体 *Antigen* 就对应一棵多播树.源节点到每个目标节点的备选路径数量的多少决定了搜索空间的大小.为了获得更为有效和相对较小的搜索空间,本文引入了动态可调参数 k ($k \in (0, 100)$),令抗体 *Antigen* 每个码位 *Antigen*[i] 的取值范围为 $0 \sim |P| \times k\% - 1$ 之间的任一整数,该码值的含义是路径集合 $D[i].P$ 中代价最小的 $\text{Int} \lceil |P| \times k\% \rceil$ 条路径中的一条.由此编码机制形成的搜索空间是动态可变的.本文中 k 值是按如下方法进行调节的:

1. 先令 k 取一个较小的值 k_0 ,步长 $d_k = d_0 > 0$,且 $k_0\%, d_0\% \ll \alpha$.
2. 进行克隆多播路由算法操作.
3. 如果最优亲和度连续 n 次 (n 的取值应小于作为算法结束的条件迭代次数)不变,转 4;否则,转 2.
4. 令 $k = k + d_k$,若 $k\% \leq \alpha$,令 $d_k = -d_0$, $k = \alpha \times 100 + d_k$.
5. 如果 $d_k > 0$,令 $d_k = d_k + d_k$.
6. 若 $k \leq k_0$,停止算法;否则,转 2.

其中 α 的取值为 0.4~0.5 之间的一个浮点数 (α 的取值为一经验值), k_0 的值视 $|P|$ 的大小而定,当 $|P|$ 较大时, k_0 可以取

的相应小一些.在这样的取值下可缩小搜索空间,使算法收敛速度加快.

(2) 亲和度函数的建立

亲和度函数可以定义如下:

$$\Phi(\text{Antigen}) = 1 / \text{COST}(\text{Antigen}) \quad (3)$$

(3) 产生初始抗体群

抗体群记为 AntigenSet . 其中的每个元素 $\text{AntigenSet}[i]$ ($i \in 0 \sim \text{PoPScale}-1$, PoPScale 是抗体群规模) 即 Antigen 采用随机产生的方式. 将一个随机整数 $\text{RAND}(\text{RAND} \in 0 \sim |P| \times k\% - 1)$ 赋给 $\text{Antigen}[i]$, $i \in 0 \sim |D|-1$.

(4) 克隆

对抗体群 AntigenSet 中的每一个抗体按如下规模克隆到新的抗体群, 记为 CloneAntis 中:

$$Q[i] = \text{Int} \left[N_C * \frac{\Phi(\text{AntigenSet}[i])}{\sum_{j=0}^{\text{PopScale}-1} \Phi(\text{AntigenSet}[j])} \right] \quad (4)$$

N_C 为一大于 PoPScale 的整数, $\text{Int}[\cdot]$ 表示上取整数.

(5) 变异

变异操作只对新抗体群 CloneAntis 进行而不对 AntigenSet 进行, 按选定的变异概率对每个抗体 Antigen 的每个码位赋一随机值, 与进化算法相比, 克隆策略的变异概率要大一些.

(6) 克隆选择

选择规则如下:

$$\text{AntigenSet}[i] = \begin{cases} \text{CloneAntis}[j], & \Phi(\text{AntigenSet}[i]) < \Phi(\text{AntigenSet}[j]) \\ \text{AntigenSet}[i], & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $i \in 0 \sim \text{PopScale}-1$, $j \in \sum_{r=0}^{i-1} Q[r] \sim \sum_{r=0}^i Q[r]$.

4 算法复杂度分析

设网络节点总数为 n , 则搜索备选路径的时间复杂度为 $O(n)$; 对备选路径按代价进行快速排序的时间复杂度为 $O(\log(|P|))$; 求解最优多播树的时间复杂度为 $O(S \times N_C \times |D|)$, S 为算法的迭代次数, 其大小和 N_C 的值都可以被控制为与 n 线性相关, 因此时间复杂度近似为 $O(n^2 \times |D|)$. 而 BSMA 算法的时间复杂度近似为 $O(|n|^3 \log |n|)^{[1]}$, 可见本算法具有更小的时间复杂度.

5 仿真实验

实验比较了本文算法、BSMA 算法以及 $\text{GA}^{[8]}$ 算法得到的时延受限的多播树的费用. 在网络节点数为某值的情况下, 随机产生多个网络拓扑, 并分别在上边运行各种算法 50 次, 仿真结果取统计平均值. 随机网络生成了利用了文献[7]中的方法.

实验中, 本文算法令 k 的初值等于 5, 并取变异概率为 0.5; 令 GA 算法的变异概率为 0.05, 交叉概率等于 0.6^[5]. 两种算法的种群规模都取为网络节点数的 3 倍, 克隆策略中的常数 N_C 取为种群规模的 1.5 倍. 两种算法均以适应度连续迭代 50 次不变作为算法结束的条件. 同时, 为了测试 BSMA 算法得到的多播树的最小费用, 仿真时并不限制其替换超边的数量.

从图 2~图 4 可以看出, CS 所得的多播树的费用明显小于其他两种算法. 图 6 是 GA 和 CS 作用于图 5 所示网络时的迭代情况的比较. 算法开始时, GA 所得的多播树费用较小, 迭代到 40 代以后, GA 与 CS 的比值就逐渐变大, 说明 GA 陷入了早熟, 而 CS 则找到了代价更小的多播树.

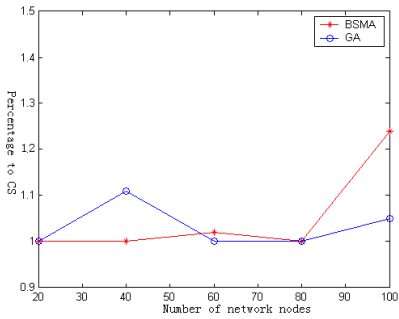


Fig.2 Percentage of GA and BSMA to CS versus number of network node, multicast group size equal to 5% of the number of network nodes
图 2 目标节点占网络节点总数 5%时,GA,BSMA 所得多播树的费用和 CS 的比值

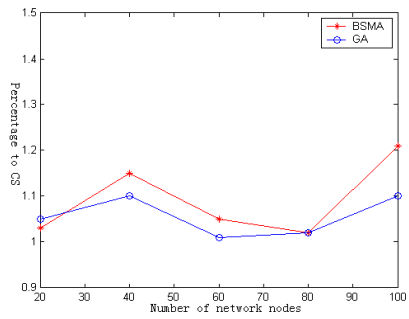


Fig.3 Percentage of GA and BSMA to CS versus number of network node, multicast group size equal to 15% of the number of network nodes
图 3 目标节点占网络节点总数 15%时,GA, BSMA 所得多播树的费用和 CS 的比值

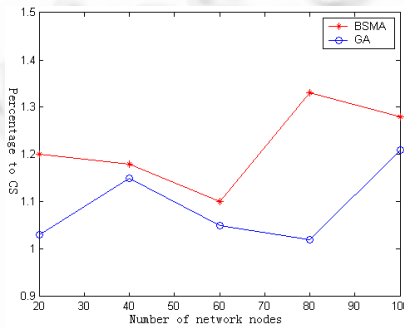


Fig.4 Percentage of GA and BSMA to CS versus number of network node, multicast group size equal to 30% of the number of network nodes
图 4 目标节点占网络节点总数 30%时,GA,BSMA 所得多播树的费用和 CS 的比值

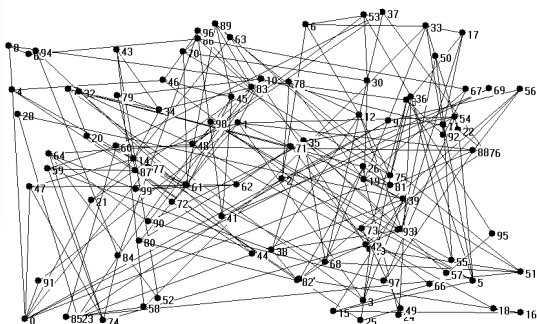


Fig.5 Random network with 100 nodes

图 5 100 节点的随机网络

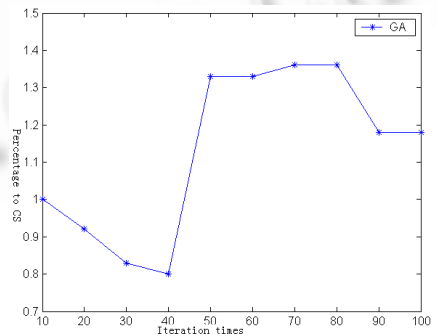


Fig.6 Percentage of GA to CS versus iteration times, multicast group size equal to 30% of the number of network nodes
图 6 目标节点占网络节点总数 30%时,GA 所得多播树的费用和 CS 的比值随迭代次数的变化

6 结 论

本文利用克隆策略解决多播路由问题,克服了遗传算法中的“早熟”现象,取得了比确定性算法和遗传算法更好的结果,并且通过引入一个可调参数缩小了备选路径集,加快了算法的收敛速度.但当备选路径集庞大时, k 值的选取就会变得很困难,目前我们还未能给出相应的理论分析及推导.

References:

- [1] Parsa M. An interative algorithm for delay-constrained minimum-cost multicasting. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1998,6(4): 461–474.
- [2] Kompella VP, Pasquale JC, Polyzos GC. Multicast routing for multimedia communication. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1993,1(3):286–292.
- [3] Widyono R. The design and evaluation of routing algorithms for real-time channels. Technical Report, Tr-94-024, Tenet Group, Department of EECS, University of California at Berkeley, 1994.
- [4] Salama HF. Evaluation of multicast routing algorithm for real-time communication on high-speed networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Commuications*, 1997,15(3):332–345.
- [5] Chen GL, Wang XF, Zhuang ZQ, Wang DS. *Genetic Algorithm and its Applications*. Beijing: Posts & Telecom Press, 1996 (in Chinese).
- [6] Jiao LC, Du HF. Development and prospect of the artificial immune system. *Acta Electronica Sinica*, 2003,31(10):1540–1549 (in Chinese with English abstract).
- [7] Waxman BM. Routing of multiple connections. *IEEE Journal of Selected Areas in Commuications*, 1988,6(9):1617–1622.
- [8] Wang XH, Wang GX. A multicast routing approach with delay constrained minimum-cost based on genetic algorithm. *Journal of China Institute of Communications*, 2002,23(3):112–117 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [5] 陈国良,王煦法,庄镇泉,王东生.遗传算法及其应用.北京:人民邮电出版社,1996.
- [6] 焦李成,杜海峰.人工免疫系统进展与展望.电子学报,2003,31(10):1540–1549.
- [8] 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.通信学报,2002,23(3):112–117.