

基于自适应混沌遗传算法的 QoS 组播路由

张清富

(广东阳江市广播电视大学, 广东 阳江 529500)

摘要: 经典遗传算法在解决 QoS 组播路由问题时存在易发生早熟现象、进化后期搜索效率低以及收敛后稳定性差等不足, 为此, 在遗传算法中引入混沌优化以及自适应调整交叉与变异概率两个改良措施。仿真实验表明, 改良后的算法性能优良, 在收敛速度、最优解的质量以及收敛后稳定性等方面有很大的提高。

关键词: 混沌; 自适应; 遗传算法; 早熟; QoS 组播路由

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)23-0060-03

The QoS multicast routing based on auto-adapted chaos genetic algorithm

Zhang Qingfu

(Guangdong Yangjiang RTVU, Yangjiang 529500, China)

Abstract: When the classic genetic algorithm is used to solve the QoS multicast routing problem, there are some insufficient fields, such as being prone to precocious phenomenon, low efficiency search at the late evolution and poor stability after convergence. So, two measures are taken for improvement in the genetic algorithms, which are the chaos genetic algorithm optimization and adaptive crossover and mutation probability. Simulation experiment results show that the performance of the improved algorithm is excellent, it has been greatly improved on the convergence rate, the optimal solution quality, convergence stability and so on.

Key words: chaos; auto-adapted; genetic algorithm; precocious; QoS multicast routing

QoS 是指数据通过网络时向用户提供端到端的服务质量保证, 其质量指标一般包括业务的延迟、延迟抖动、费用、带宽和丢包率等多个度量约束。如果 QoS 路由涉及两个以上的度量约束问题, 则 QoS 组播路由计算是 NP 完全 (NP-Complete) 问题^[1], 很难找到多项式时间的求解算法。

遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 是模拟生物进化过程的一种智能算法, 具有自适应性、并行性以及鲁棒性强等多方面的特点, 可有效解决 QoS 组播路由选择问题。但经典遗传算法存在易发生早熟现象、进化后期搜索效率低以及收敛后稳定性差等缺点, 而保持群体的多样性可有效避免遗传算法早熟的产生。为此, 本文在遗传算法基础上, 引入混沌优化以及早熟处理机制两个改良措施对群体进行扰动以增加群体的多样性。

1 网络模型^[2]

设组播网络模型为无向有权图 $G=(V, E)$, V 是节点的集合, E 是链路的集合。 $s \in V$ 是源节点, $t \in \{V-\{s\}\}$ 是目的节点。 M 是 t 的集合, $e \in E$ 是一条链路。对于任意

一条链路 e , 定义 5 种常用属性: 延迟 $D(e)$ 、延迟抖动 $J(e)$ 、费用 $C(e)$ 、带宽 $B(e)$ 和丢包率 $L(e)$ 。 $T(s, M)$ 是源点到各目的节点的一棵组播树, $P(s, t_i)$ 是 $T(s, M)$ 中从源点 s 到目的节点 t_i 的一条路径。 $P(s, t_i)$ 的延迟为 $D(P(s, t_i))=$

$$\sum_{e \in P(s, t_i)} D(e), P(s, t_i) \text{ 的延迟抖动为 } J(P(s, t_i)) = \sum_{e \in P(s, t_i)} J(e), P$$

$$(s, t_i) \text{ 的丢包率为 } L(P(s, t_i)) = 1 - \prod_{e \in P(s, t_i)} (1 - J(1 - L(e))), P(s,$$

$$t_i) \text{ 的费用为 } C(P(s, t_i)) = \sum_{e \in P(s, t_i)} C(e), T(s, M) \text{ 的延迟为 } D(T$$

$$(s, M) = \max(D(P(s, t_i)) | \forall t_i \in M), T(s, M) \text{ 的延迟抖动为}$$

$$J(T(s, M)) = \max(J(P(s, t_i)) | \forall t_i \in M), T(s, M) \text{ 的丢包率为}$$

$$L(T(s, M)) = \max(L(P(s, t_i)) | \forall t_i \in M), T(s, M) \text{ 的费用为}$$

$$C(T(s, M)) = \sum_{e \in T(s, M)} C(e), T(s, M) \text{ 的带宽为 } B(T(s, M)) = \min$$

$$(B(e)) | \forall e \in T(s, M). \text{ 设用户的 QoS 约束为 } R(s, M, b, d,$$

$$j, l), \text{ 以 } s \text{ 为源节点, 以 } M = \{t_1, t_2, \dots, t_m\} \subseteq V - \{s\} \text{ 为目的节$$

点集,要求从源点 s 出发找到一棵组播树 $T(s, M)$, 使得费用函数 $C(T(s, M))$ 尽量最小,且满足 QoS 约束: $B(T(s, M)) \geq b$, 延迟 $D(T(s, M)) \leq d$, $J((s, M)) \leq j$, $L(T(s, M)) \leq l$ 。可见,组播路由选择问题实质是一个最小值优化问题。

2 自适应混沌遗传算法设计

2.1 编码设计

传统的二进制编码和实数编码不能精确地描述组播树的特性,本算法采用变长整数编码这种最自然、最简单的组播路由表示方式。给定一个源点和一组目的节点,群体中的每个个体(染色体)代表一棵多播树,可用树型数据结构描述个体结构。染色体码长为目的节点的个数 m ,第 i 位上的数值表示组播树中到第 i 个目的节点的编号。例如组播树 {3, 5, 6, 4, 7, 9} 表示有 6 个目的节点,对第 1 个目的节点采用 3 号路径,对第 2 个目的节点采用 5 号路径,以此类推,每条路径是一个节点集合。

2.2 生成候选路径集合

在明确 QoS 组播要求之后,对每个目的节点 t_i ,采用 Dijkstra 前 k 条最短路算法找到从源点 s 到 t_i 的满足带宽要求的所有路径并对路径进行整数编码,而其中的路径由网络节点的编号组成(节点集),这就形成了组播树的候选路径集合。

2.3 适应度函数设计

遗传算法以个体的适应度为依据来进行“优胜劣汰”的进化选择。QoS 组播路由计算的目的是在尽量满足组播要求的条件下,寻找一棵能使得费用函数即目标

函数 $f_c = C(T(s, M)) = \sum_{e \in T(s, M)} C(e)$ 取最小值的组播树 $T(s, M)$, 适应度函数定义如下^[3-4]:

$$f(P) = (W_b f_b + W_d f_d + W_j f_j + W_l f_l) - W_c f_c \quad (1)$$

其中, $f_b = \varphi_b(B(T(s, M)) - b)$, $f_d = \varphi_d(D(T(s, M)) - d)$, $f_j = \varphi_j(J(T(s, M)) - j)$, $f_l = \varphi_l(L(T(s, M)) - l)$, $f_c = \varphi_c(C(T(s, M)) - c)$, $\varphi_b(x) = \begin{cases} 1, x \geq 0 \\ r_b, x < 0 \end{cases}$, $\varphi_d(x) = \begin{cases} 1, x \leq 0 \\ r_d, x > 0 \end{cases}$, $\varphi_j(x) = \begin{cases} 1, x \leq 0 \\ r_j, x > 0 \end{cases}$, $\varphi_l(x) = \begin{cases} 1, x \leq 0 \\ r_l, x > 0 \end{cases}$ 。

其中, f_x 表示 s 到 t_i 路径的实际值与约束值的差值, W_b 、 W_d 、 W_j 、 W_l 、 W_c 分别为 QoS 约束的权重参数, $\varphi(x)$ 为一个惩罚函数,其系数 $r_x \in (0, 1)$ 。

2.4 群体初始化

分别从到达每个目的节点候选路径集中任选一条路由组成一棵组播树作为初始群体的染色体。这样构成的组播树覆盖了所有的目的节点,群体多样性更有保证,并且消除了算法中的带宽约束,优化了网络的性能,减少了算法的搜索空间。

2.5 选择操作

2.5.1 引入 Tent 映射混沌优化

混沌优化具有伪随机性、遍历性、周期性等特征,是一种全局和局部搜索能力都很强的新型算法,但是常用的 Logistic 映射的概率密度呈两头多、中间少的分布性质,故本文在遗传算法的选择操作中采用均匀分布特性更好的 Tent 映射混沌优化,可更有效抑制遗传算法产生

早熟,并提高进化后期的收敛速度。Tent 映射表达式为:

$$x_{n+1} = \begin{cases} 2x_n, & 0 \leq x < 0.5 \\ 2(1-x_n), & 0.5 < x \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

Tent 映射在函数域空间中其概率密度的分布较均匀,可避免主要集中在变量空间的边缘区域进行搜索的不足。

2.5.2 选择进化过程

自适应混沌遗传算法采用最佳混沌个体保留法与轮盘赌选择法相结合的选择方式。利用 Tent 映射函数混沌优化群体中个体的适应度函数值,选出最佳值个体,直接遗传到子代群体中,其余个体采用轮盘赌选择法选择。

2.6 自适应交叉概率与变异概率的设计

通过监测群体适应度方差与群体当前最优解的适应度连续变化情况来判断群体是否产生早熟。采用如下群体适应度方差公式^[5]:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^P ((f_i - f_{avg})/f)^2 \quad (3)$$

$$f = \begin{cases} \max\{|f_i - f_{avg}|\}, & \max\{|f_i - f_{avg}|\} > 1 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, P 为群体规模, f_i 为个体适应度, f_{avg} 为群体平均适应度, f 为归一函数。数值实验发现,早熟收敛和群体适应度方差 σ^2 存在某种相关度:当早熟收敛产生时,在连续数次迭代中 σ^2 变化不大,趋于稳定,但是当算法收敛到全局最优解时, σ^2 同样存在以上的情况。综合考虑,判断群体产生早熟收敛的依据为:群体适应度方差与群体当前最优解的适应度的差值连续 3 次分别小于预先设定的阈值 ϵ_1 、 ϵ_2 , 即 $\Delta\sigma^2 < \epsilon_1$ 、 $\Delta f_{max} < \epsilon_2$ 。

产生早熟收敛的群体的多样性较差,个体相似度大,“劣种”较多,群体需要“突变”,这时可以加大群体的繁殖强度并增强群体的扰动,即增大交叉概率与变异概率,使其脱离局部最优解,采用如下公式:

$$P_{c_{new}} = P_{c_{old}} + \alpha(1 - \frac{i}{G}) \quad (5)$$

$$P_{m_{new}} = P_{m_{old}} + \beta(1 - \frac{i}{G}) \quad (6)$$

其中, $P_{c_{new}}$ 、 $P_{m_{new}}$ 分别为增大后的交叉概率与变异概率, $P_{c_{old}}$ 、 $P_{m_{old}}$ 分别为原来的交叉概率与变异概率, α 、 β 为增强系数, $\frac{i}{G}$ 为

调节项, i 为当前迭代次数, G 为最大迭代次数,随着迭代次数的增大,交叉概率与变异概率增大的幅度应适当减少。

2.7 交叉操作

遗传算法的全局随机搜索能力主要取决于交叉策略,本文以自适应的交叉概率进行交叉操作。在两个选中的染色体中选择一个公共基因作为交叉点,若存在两个或两个以上公共基因位时,则随机选取一个作为交叉点,交叉时,各染色体交换交叉点之后的基因段生成两个新子体,交叉过程示如图 1 所示。图中,节点 n_2 、 n_5 为潜在交叉点,选定 n_2 为交叉点。

2.8 变异操作

变异操作使遗传算法具有局部随机搜索能力,是保持群体多样性的一种有效进化操作,本文以自适应的变异概率进行变异操作。从染色体中随机选择两个基因为变异点 n_1 、 n_2 ,以路径费用为指标,采用 Dijkstra 最短路径算法计算节点 n_1 、 n_2 之间的最短路径作为变异后的新路径,变异过程如图 2 所示。

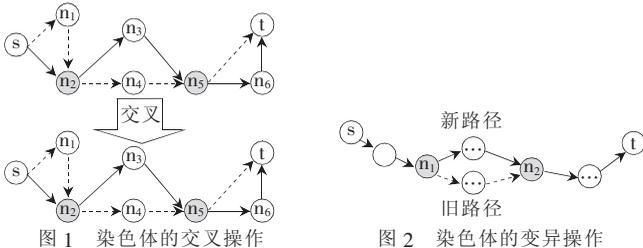


图1 染色体的交叉操作

图2 染色体的变异操作

2.9 染色体的修正操作^[7]

群体经过交叉和变异之后,可能会产生违反约束条件及产生环路的个体。修正操作就是维护违反约束条件及产生环路的染色体。修正维护操作可以采用惩罚策略和删除循环的方法来实现。

2.10 算法描述

假设网络拓扑结构和 QoS 组播要求已知。网络中包含 n 个节点,其中包括 m 个目的节点。 P 为群体规模, i 为当前进化代数, G 为最大进化次数。组播要求包括源节点 s ,目的节点集 M ,QoS 组播要求 $R(s, M, b, d, j, l)$,算法运行步骤如下:

- (1) 初始化相关参数;
- (2) 对网络节点进行整数编码,生成候选路径集并对路径进行整数编码;
- (3) 根据候选路径集随机生成初始化群体;
- (4) 计算群体中所有个体的适应度函数值 f_i ;
- (5) 根据本文描述的 Tent 混沌优化选择法进行选择操作;
- (6) 若早熟,则自适应调整交叉概率 P_c 与变异概率 P_m ,群体交叉与变异并维护;
- (7) 如果迭代次数大于 G 或当前最优解达到要求,则转到步骤(8),否则转到步骤(4);
- (8) 解码并输出群体中适应度最大的个体,此即全局最优解,算法结束。

3 仿真实验与结果分析

通过 C# 语言编写的程序实现本 QoS 组播网络路由算法^[8],采用的网络拓扑模型及网络链路参数^[4]如图 3 与表 1 所示。

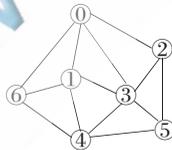


图3 组播网络拓扑结构

QoS 约束表示为 $R(s, M, b, d, j, l)$,其中,以节点 0 为源节点 s ,目的节点为集合 $M=\{4, 6, 5\}$ 。设置组播具体要求: $R(0, M, 99, 60, 20, 0.045)$,QoS 约束的权重参数 (W_b, W_d, W_j, W_l, W_c) 分别赋值 (1, 1, 1, $1E-06$),惩罚系数 (r_b, r_d, r_j, r_l) 分别取值 (1, 0.9, 0.85, 0.96),群体规模 $P=50$,最大进化次数 $G=200$,交叉概率初始值 P_c 及其增强系数 α 分别取 0.85、0.05,变异概率初始值 P_m 及其增强

系数 β 分别取 0.05、0.01。以费用的最小值为目标函数,用经典遗传算法和本文算法分别对组播路由计算进行仿真实验。结果显示,本文算法与经典 GA 在相同环境下求解速度分别为 12.512 635 s 和 13.75 621 s,本文算法明显占优。从图 4 与图 5 的收敛曲线比较可知,本算法能更快

速收敛到全局最优解且收敛后稳定性很高。

表1 网络链路参数

链路	带宽		延迟		丢包率
	/MHz	/ms	抖动/Ms		
0-1	100	10	10	0.010	
0-2	105	10	5	0.050	
0-3	107	38	15	0.013	
0-6	80	36	4	0.020	
1-3	160	50	7	0.005	
1-4	120	9	12	0.021	
1-6	150	11	16	0.012	
2-3	50	35	14	0.014	
2-5	200	10	8	0.008	
3-4	110	50	9	0.016	
3-5	130	45	5	0.012	
4-5	75	23	12	0.025	
4-6	102	35	6	0.013	

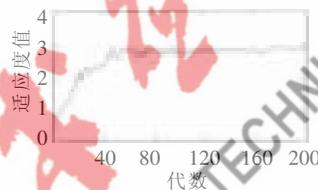


图4 经典遗传算法收敛曲线

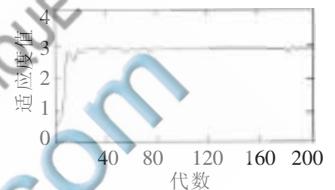


图5 本文遗传算法收敛曲线

在解决 QoS 组播路由计算问题时,经典遗传算法的群体多样性难以保证,易产生早熟现象,使搜索过早收敛于局部最优解且收敛后不够稳定。为此,本文改良了经典遗传算法,引入 Tent 映射混沌优化选择操作以及采用自适应的交叉与变异概率来处理群体早熟现象。仿真实验表明,本算法性能良好,在收敛速度、最优解质量以及收敛后稳定性等方面都很大的改善。

参考文献

- [1] Yuan Xin. Heuristic algorithms for multiconstrained quality of-service routing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(2): 244-256.
- [2] 包海洁,卢辉斌.基于遗传算法的 QoS 组播路由算法的改进[J]. 2008, 34(4): 1-3.
- [3] 王宇.基于遗传算法的 QoS 组播路由[D].成都:四川大学,2003.
- [4] 王军,马范援.基于遗传算法的 QoS 组播路由算法的适应度函数改进探索[J].微型电脑,2008, 24(8): 12-14.
- [5] 邹恩,刘泽华,方仕勇,等.基于混沌遗传算法的组播路由优化研究[J].计算机工程,2011, 37(3): 155-157.
- [6] 董勇,郭海敏.基于群体适应度方差的自适应混沌粒子群算法[J].计算机应用研究,2011, 28(3): 854-856.
- [7] 孙宝林,李腊元.基于遗传算法的 QoS 多播路由优化算法[J].计算机工程,2005, 31(14): 70-73.
- [8] 王小平,曹立明.遗传算法—理论与应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002.

(收稿日期:2011-07-07)

作者简介:

张清富,男,1979 年生,讲师,硕士,主要研究方向:算法分析与设计、进化计算。