

IP/DWDM 光 Internet 中一种演化-单纯形 QoS 组播路由算法^{*})

王兴伟¹ 高楠¹ 吴铁艳² 黄敏¹

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)¹ (东北大学国际合作与交流处 沈阳 110004)²

摘要 本文设计了一种 IP/DWDM 光 Internet 中的 QoS 组播路由算法。在给定用户请求的情况下,基于演化-单纯形算法构造带宽、延迟、延迟抖动与出错率受限且费用优化的 QoS 组播路由树,兼顾网络负载均衡。仿真结果表明,该算法是可行和有效的,明显优于基于传统遗传算法的 QoS 组播路由算法。

关键词 IP/DWDM 光 Internet, QoS, 组播, 路由, 演化-单纯形算法

An Evolutionary-simplex-algorithm-based QoS Multicast Routing Algorithm in IP/DWDM Optical Internet

WANG Xing-Wei¹ GAO Nan¹ WU Tie-Yan² HUANG Min¹

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)¹

(International Cooperation & Exchange Office, Northeastern University, Shenyang 110004)²

Abstract In this paper, a QoS multicast routing algorithm in IP/DWDM optical Internet is proposed. Given a user request, a bandwidth, delay, delay jitter and error rate bounded and cost optimized QoS multicast routing tree is constructed based on the evolutionary-simplex-algorithm, taking network load balancing into account. Simulation results have shown that it is not only feasible and effective but also advantageous over its counterpart based on the traditional genetic algorithm.

Keywords IP/DWDM optical Internet, QoS, Multicast, Routing, Evolutionary-simplex-algorithm

1 引言

IP/DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)光 Internet 是下一代互联网 NGI(Next Generation Internet)主干网的核心组网技术之一^[1],而服务质量 QoS(Quality of Service)与组播是其必备的能力。因此,在 IP/DWDM 光 Internet 中支持 QoS 组播是非常必要的^[2],需要进行有效的 QoS 组播路由。

已经证明,QoS 组播路由问题是 NP 难的^[3],需要设计非 NP 类算法解决它。文[4,5]分别提出延迟受限且费用最低的启发式算法来解决 QoS 组播路由问题。文[6]提出的“破圈回滚”组播路由算法首先寻求生成的组播树代价最小,然后再考虑满足用户通信延迟的要求,比较均衡地考虑了延迟和代价在路由搜索过程中的折衷。但是,这几种算法的时间复杂度均较大。文[7]提出的启发式算法在一棵最短延迟树的基础上更换不满足约束的节点,在一定程度上降低了算法的复杂度,但不具备良好的参数扩展性。文[8]提出的算法在一棵树的基础上通过禁忌搜索来改进不符合 QoS 约束的路径。虽然该算法时间复杂度较低,但找到的树常不是费用最优的。文[9~12]提出基于遗传算法的 QoS 组播路由算法,虽然算法时间复杂度不高,但是容易收敛到局部最优解。文[13,14]分别引入人工神经网络和基于启发式算法,进一步提出基于混合遗传算法的 QoS 组播路由算法,虽然在一定程度上克服了解易于早熟的问题,但交叉与变异操作复杂,计算开销大。文[15]在遗传操作中引入免疫概念,改善了 QoS 组播路由算

法的收敛速度和寻优能力。文[16]在多种群并行遗传算法的基础上引入模拟退火算法,得到的解具有较高的精度,且算法收敛速度较快。但是,上述两种算法只考虑了一种 QoS 约束。

本文设计了一种演化-单纯形 QoS 组播路由算法,在演化算法中加入局部寻优效率高的单纯形法,加快搜索和优化种群,从而克服传统遗传算法存在的早熟和停滞等问题。该算法考虑带宽、延迟、延迟抖动和出错率约束,构造费用优化的 QoS 组播路由树,兼顾网络负载均衡。仿真结果表明,该算法明显优于基于传统遗传算法的 QoS 组播路由算法。

2 模型描述

2.1 网络模型

将 IP/DWDM 光 Internet 抽象成由节点和边组成的连通图 $G(V, E)$, V 是节点集, E 是边集。假设每个节点 $v \in V$ 都有组播能力,即配置有分光器,能将输入光信号分叉成任意数目的输出光信号。对任意节点 $v \in V$,考虑以下参数:处理延迟 $\Delta(v)$;波长转换延迟 $t(v)$ (若无波长转换,则 $t(v)=0$);延迟抖动 $j(v)$ 。对任意边 $e \in E$,考虑以下参数:可用波长集 $\Lambda(e)$, $\Lambda(e) \subseteq \lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w\}$, Λ 是每条边支持的波长集合, $W = |\Lambda|$;可用波长带宽集 $B(e) = \{b(e_{\lambda_i}) \mid \forall \lambda_i \in \Lambda(e)\}$, $b(e_{\lambda_i})$ 是可用波长 λ_i 上的可用带宽;传输延迟 $\delta(e)$;出错率 $er(e)$;费用 $c(e)$ 。

2.2 数学模型

定义用户 QoS 组播请求为 $R(s, D, Del_B, Er_B, J_B, B_B)$ 。

^{*})新世纪优秀人才支持计划资助;国家自然科学基金资助项目(60473089);国家发改委 CNGI 示范工程资助项目(CWGI-04-13-27、CNGI-04-6-2T 和 CNGI-04-15-7A)。王兴伟 博士,教授,博士生导师,主要研究领域为下一代互联网、IP/DWDM 光 Internet 及移动无线 Internet。

其中, s 为组播源节点; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 为目的节点集, $m = |D|$; Del_B 为延迟需求; Er_B 为出错率需求; J_B 为延迟抖动需求; B_B 为带宽需求。

构造支持 s 与 D 之间 QoS 组播通信的一棵组播路由树 $T(s, D)$ 。令 $P_T(s, d_i)$ 表示在 $T(s, D)$ 上从 s 到 $d_i \in D (i=1, 2, \dots, m)$ 的光路, 则 $P_T(s, d_i)$ 的延迟为:

$$Del(P_T(s, d_i)) = \sum_{e \in P_T(s, d_i)} \delta(e) + \sum_{v \in P_T(s, d_i)} (\Delta(v) + t(v)) \quad (1)$$

$P_T(s, d_i)$ 的出错率为:

$$Er(P_T(s, d_i)) = 1 - \prod_{e \in P_T(s, d_i)} (1 - er(e)) \quad (2)$$

$P_T(s, d_i)$ 的延迟抖动为:

$$J(P_T(s, d_i)) = \sum_{v \in P_T(s, d_i)} j(v) \quad (3)$$

$T(s, D)$ 的费用为:

$$C(T(s, D)) = \sum_{e \in T(s, D)} c(e) \quad (4)$$

$T(s, D)$ 的延迟为:

$$Del(T(s, D)) = \text{Max}\{Del(P_T(s, d_i)) \mid \forall d_i \in D\} \quad (5)$$

$T(s, D)$ 的延迟抖动为:

$$Er(T(s, D)) = \text{Max}\{Er(P_T(s, d_i)) \mid \forall d_i \in D\} \quad (6)$$

$T(s, D)$ 的出错率为:

$$J(T(s, D)) = \text{Max}\{J(P_T(s, d_i)) \mid \forall d_i \in D\} \quad (7)$$

$T(s, D)$ 的带宽为:

$$B(T(s, D)) = \text{Min}_{e \in T(s, D)} \{b(e_i) \mid \lambda_i \in \Lambda(e)\} \quad (8)$$

定义用户 QoS 满意度为:

$$\text{Sat}(T(s, D)) = \begin{cases} 0 & (Er(T(s, D)) > Er_B) \vee (J(T(s, D)) > J_B) \vee (Del(T(s, D)) > Del_B) \\ A \times f_d + B \times f_j + C \times f_{er} & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

其中, A, B 和 C 为小于 1 的正数, 分别表示延迟、延迟抖动和出错率对用户 QoS 满意度的影响权重, $A+B+C=1$ 。

$$f_d = \phi(Del(T(s, D)), Del_B) \quad (10)$$

$$f_j = \phi(J(T(s, D)), J_B) \quad (11)$$

$$f_{er} = \phi(Er(T(s, D)), Er_B) \quad (12)$$

$$\phi = (x, y) = e^{1-\frac{x}{y}} \quad (x \leq y) \quad (13)$$

本文算法的目标是寻找一棵 QoS 组播路由树 $T(s, D)$, 使得

$$C(T(s, D)) \rightarrow \text{Min}(C(T(s, D))) \quad (14)$$

$$\text{Sat}(T(s, D)) \rightarrow \text{Max}(\text{Sat}(T(s, D))) \quad (15)$$

s. t.

$$Del(T(s, D)) \leq Del_B \quad (16)$$

$$Er(T(s, D)) \leq Er_B \quad (17)$$

$$J(T(s, D)) \leq J_B \quad (18)$$

$$B(T(s, D)) \geq B_B \quad (19)$$

为了有助于均衡网络负载, 本文算法优先使用波长资源丰富的边, 为此边 e 上的费用函数定义为:

$$c(e) = W - |\Lambda(e)| \quad (20)$$

3 算法设计

3.1 解的表达

在本文中, 染色体采用基于路径编号的整数编码方式。对图 $G(V, E)$ 进行处理, 若边 e 上所有可用波长的可用带宽均小于 B_B , 则删除该边, 而后采用 Dijkstra 第 K 最短路算

法^[17]为 s 到 $d_i (i=1, 2, \dots, m)$ 找以费用为权重且延迟、延迟抖动和出错率满足用户要求的路径, 若没有找到任何满足条件的路径, 则与用户协商, 如果用户可以适当放宽其 QoS 需求, 则重新找路, 直到为每个 d_i 都找到至少一条满足条件的路径为止。按找到的顺序依次对到各 d_i 路径编号, 编号为 $1, 2, \dots, n_{d_i} (1 \leq n_{d_i})$, 得到 $\Phi_{d_i} = \{1, 2, \dots, n_{d_i}\}$, n_{d_i} 为 d_i 实际找到的路径数。

因此, 染色体长度为 m , 编码为 $a_{d_1}, a_{d_2}, \dots, a_{d_m}$, 每个基因都对应从 s 到 d_i 的一条满足条件路径的编号。若 $a_{d_i} = a$, 则表示从 s 到 d_i 选择 Φ_{d_i} 中的第 a 条路径, $a=1, 2, \dots, n_{d_i}$; 若 $a_{d_i} = 0$, 则表示没有从 Φ_{d_i} 中选取路径。将与染色体中各基因对应的路径归并在一起得到一张图, 用其最小生成树作为问题的解。如果对应的最小生成树不能覆盖全部目的节点, 则为不可行解。

3.2 适宜函数

按照文[18]中的波长分配算法对染色体 S 对应的树 $T(s, D)$ 进行波长预分配, 而后计算其适宜值。适宜函数定义如下:

$$f(S) = \frac{Cn \times \text{Sat}(T(s, D))}{C(T(s, D)) + (m - \text{count}(T(s, D))) \times \rho} \quad (21)$$

其中, $\text{count}(T(s, D))$ 为与染色体 S 对应的树 $T(s, D)$ 中包含的目的节点个数, ρ 和 Cn 为正常数。如果 $T(s, D)$ 中没有包含所有目的节点, 则与 S 对应的解不可行, 加惩罚值。显然, 适宜值越大, 染色体对应的解越好。

3.3 演化操作

初始种群生成采用如下步骤:

步骤 1: 置种群规模为 PS , 计数器 $i=0$;

步骤 2: 随机生成染色体 S_i ;

步骤 3: $i=i+1$;

步骤 4: 若 $i < PS$, 转步骤 2; 否则, 初始种群生成完毕, 结束。

为了加快种群进化, 从父代种群中选取 $PS \times (1 - P_c)$ 个最优染色体直接进入子代种群, 而对剩余的 $PS \times P_c$ 个染色体进行交叉操作得到子代染色体, 采用简单和多点交叉^[19], 交叉时随机选择一种。这里, P_c 为交叉概率。

根据变异概率 P_m 从种群中选取染色体进行变异操作。若被选染色体中含有值为 0 的基因 a_{d_i} , 则采用深度优先搜索^[17]找到从 s 到 d_i 的一条路径; 若其不是 Φ_{d_i} 中编号所对应的路径, 则将其编号 $n_{d_i} + 1$ 为并添入 Φ_{d_i} , 置 $a_{d_i} = n_{d_i} + 1$; 若其是 Φ_{d_i} 中编号 a 对应的路径, 则置 $a_{d_i} = a$ 。若被选染色体中不含值为 0 的基因, 则使用非均匀变异^[19], 随机变异染色体的一个基因。

3.4 单纯形操作

当算法过早收敛即出现早熟现象时, 对种群采用单纯形操作^[20], 以缓解之。一般有两种判断早熟的方法^[20]: 种群中最优染色体与最差染色体适宜值之差小于设定阈值; 种群中最优染色体适宜值连续不发生变化。前一种判断方法较为有效^[20], 本文采用之。

在本文中, 染色体长度是 m , 根据单纯形算法的要求, 在种群中需要随机选取 $m+1$ 个染色体进行单纯形操作, 以产生 $m+1$ 个更优的染色体, 步骤如下:

步骤 0: 置单纯形操作最大迭代次数为 SH , 单纯形操作当前迭代次数 $Sh=0$, 定义变量 NM ;

步骤 1: 随机选取 $m+1$ 个染色体 $S_1, S_2, \dots, S_{m+1}$ 作为初

始顶点,并以其适宜值 $f(S_1), f(S_2), \dots, f(S_{m+1})$ 作为单纯形各个初始顶点的函数值;

步骤 2:若 $Sh \geq SH$, 则用单纯形的顶点替换种群中的被选染色体, 算法结束; 否则, $Sh = Sh + 1$;

步骤 3: 计算剔除函数值最小点 S_w 后单纯形的重心 S_w , 并以 S_w 和 S_w 计算单纯形的最差反射点 S_{wr} 和最差反射函数 $f(S_{wr})$;

步骤 4: 计算剔除函数值最大点 S_b 后单纯形的重心 S_b , 并以 S_b 和 S_b 计算单纯形的最佳反射点 S_{br} 和最佳反射函数 $f(S_{br})$;

步骤 5: 若 $f(S_{br}) \geq f(S_{wr})$, 则 $NM=1, f(S_i) = f(S_{br})$; 否则, $NM=0, f(S_i) = f(S_{wr})$;

步骤 6: 若 $f(S_i) > f(S_b)$, 则反射成功; 否则, 转步骤 12;

步骤 7: 若 $NM=1$, 则以 S_{br} 和 S_b 为基本点计算扩张点 S_{bo} 和函数值 $f(S_{bo})$;

步骤 8: 若扩张成功, 则以 S_{bo} 代替 S_w , 并重新计算单纯形顶点; 否则, 以 S_{br} 代替 S_w , 并重新计算单纯形顶点。转步骤 11;

步骤 9: 若 $NM=0$, 则以 S_{wr} 和 S_w 为基本点计算扩张点 S_{wo} 和函数值 $f(S_{wo})$;

步骤 10: 若扩张成功, 则以 S_{wo} 代替 S_w , 并重新计算单纯形顶点; 否则, 以 S_{wr} 代替 S_w , 并重新计算单纯形顶点;

步骤 11: 将计算得到的新的顶点替换原来的顶点; 转步骤 2;

步骤 12: 反射失败, 用单纯形的顶点替换种群中的被选染色体, 算法结束。

3.5 算法流程

本文提出的 IP/DWDM 光 Internet 中的基于演化-单纯形算法的 QoS 组播路由算法步骤如下:

步骤 0: 设置种群规模为 PS 、最大进化次数为 H 、单纯形操作最大迭代次数为 SH 、早熟阈值为 Es 、交叉概率为 P_c 、变异概率为 P_m 、初始化当前进化次数 h 和当前单纯形操作迭代次数 Sh 均为 0; 按 3.3 节生成初始种群;

步骤 1: 若 $h \geq H$, 算法结束; 否则, $h = h + 1$;

步骤 2: 计算种群中染色体适宜值。若 $f(S_b) - f(S_w) \leq Es$, 则按 3.4 节对种群进行单纯形操作, S_b 和 S_w 分别是最优和最差染色体;

步骤 3: 按 3.3 节选取 $PS \times (1 - P_c)$ 个父代最优染色体直接作为子代染色体;

步骤 4: 按 3.3 节从剩余的 $PS \times P_c$ 个父代染色体中选取父母交叉生成子代染色体;

步骤 5: 按 3.3 节以 P_m 变异子代染色体;

步骤 6: 将子代种群作为新的父代种群, 转步骤 1。

算法结束时, 在种群中选取适宜值最大的染色体作为问题的解。

4 仿真研究与讨论

基于多个实际(如 CERNET 和 NSFNET)和虚拟网络拓扑^[21], 进行了仿真实现和性能评价。比较运行本文算法(以下简称算法 1)、基于传统遗传算法的 QoS 组播路由算法^[18](以下简称算法 2)和基于穷举法的 QoS 组播路由算法(以下简称算法 3)分别得到的组播路由树适宜值、用户 QoS 满意度与计算时间, 结果见表 1。在表 1 中, 组播节点比例是指参加组播的节点占网络节点总数的比例。综合比较, 算法 1 优于

算法 2 和算法 3。

表 1 组播路由树适宜值、用户 QoS 满意度和计算时间比较

组播节点比例	用户 QoS 满意度 算法 1; 算法 2; 算法 3	适宜值 算法 1; 算法 2; 算法 3	计算时间 算法 1; 算法 2; 算法 3
13.04%	1.000; 1.000; 1.000	1.000; 1.000; 1.000	1.000; 1.068; 0.058
21.74%	1.000; 1.007; 1.006	1.000; 1.002; 1.003	1.000; 1.143; 0.527
30.43%	1.000; 0.996; 1.001	1.000; 0.991; 1.003	1.000; 1.164; 3.164
39.13%	1.000; 0.994; 1.001	1.000; 0.979; 1.017	1.000; 1.121; 18.981
47.83%	1.000; 0.986; 1.008	1.000; 0.972; 1.021	1.000; 1.080; 94.934
56.52%	1.000; 0.985; 1.013	1.000; 0.969; 1.028	1.000; 1.135; 284.827
65.22%	1.000; 0.988; 1.012	1.000; 0.986; 1.025	1.000; 1.113; 1424.166
73.91%	1.000; 0.994; 1.011	1.000; 0.987; 1.015	1.000; 1.033; 3589.749
82.61%	1.000; 0.991; 1.009	1.000; 0.993; 1.014	1.000; 1.021; 1708.417
91.30%	1.000; 0.993; 1.007	1.000; 0.992; 1.010	1.000; 1.056; 9493.933

结论 本文设计了一种演化-单纯形 QoS 组播路由算法, 支持 IP/DWDM 光 Internet 中的 QoS 组播应用。该算法既考虑了用户的 QoS 需求, 又兼顾了网络负载均衡。仿真结果表明, 该算法是可行和有效的。

参考文献

- Louchet H, Hodzic A, Petermann K. Analytical model for the performance evaluation of DWDM transmission systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1219~1221
- Wittmann R, Zitterbart M. Multicast communication: protocols, programming, and applications [M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufman, 2000
- Chen B, Wang J P. Efficient routing and wavelength assignment for multicast in WDM Networks [J]. IEEE Journal in Communications, 2002, 20(1): 97~109
- Tseng K B, Huang J F. An efficient multicast routing algorithm in WDM networks [C]. 2004 Intl. Conf. on Communications, Circuits and Systems, Paris France, 2004
- Wu L T, Hong P H, Ke K W. On the multicast scheduling mechanisms for interconnected WDM optical networks [C]. IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco USA, 2003
- Zhao J, Hassanein H, Wu J, Luo J. CRMA: a cycle-breaking multicast routing algorithm for supporting QoS over the Internet [J]. IEEE Press, 2003, 285~293
- 余燕萍, 仇佩亮. 一种时延和时延抖动受约束的启发式多播路由算法[J]. 通信学报, 2003, 24(2): 132~137
- Wen L Y. A heuristic algorithm for the multi-constrained multicast tree [J]. LNCS 2839, 2003, 78~89
- Wang X W, Cheng H, Cao J N, Wang Z J, Huang M. QoS-driven multicast tree generation using genetic algorithm [J]. LNCS 2834, 2003(9): 404~413
- Tran H T. QoS multicast routing with delay constraints [C]. Annals of Telecommunications, Lausanne Switzerland, 2004
- Din D R. Genetic algorithms for multiple multicasts on WDM ring network [J]. Computer Communications, 2004, 27(9): 840~856
- 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
- Haghighat A T, Faez K, Dehghan M A. GA-based heuristic algorithms for QoS based multicast routing [J]. Knowledge-Based Systems, 2003, 16(6): 305~312
- Daru P, Du M H, Wang Y K, Yuan Y B. A hybrid neural network and genetic algorithm approach for multicast QoS routing [J]. LNCS 3174, 2004, 269~274
- 刘芳, 冯小军. 免疫组播路由选择算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(6): 676~681
- Wang X W, Cheng H, Zheng L D, Li J, Huang M. A multi-population-parallel-genetic-simulated-annealing-based QoS routing and wavelength assignment integration algorithm for multicast in DWDM networks [C]. Asia Pacific Advanced Network 2003, Seoul Korea, 2003
- Dijkstra E W. A note on two problems in connection with graphs [J]. Numerical Mathematics, 1959(1): 269~271
- 王兴伟, 程辉, 李佳, 黄敏. 一种 IP/DWDM 光因特网中的组播路由算法[J]. 东北大学学报, 2003, 24(12): 1165~1168
- Du X L, Zeng D. An effective algorithm from global optimization: evolutionary-simplex algorithm [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 46~51
- Cui J W. An improved global optimization method and its application to the inversion of surface wave dispersion curves [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(3): 521~527
- Wang X W, Chen M H, Wang Q, Huang M, Cao J N. Research on the virtual topology design methods in grid-computing supporting IP/DWDM-based NGI [J]. LNCS 3251, 2004, 277~284