

文章编号: 1005-3026(2003) 12-1165-04

一种 IP/ DWDM 光因特网中的组播路由算法

王兴伟¹, 程 辉¹, 李 佳², 黄 敏²

(1. 东北大学 计算中心, 辽宁 沈阳 110004; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 研究了 IP/ DWDM 光因特网的集成 QoS(Quality of Service) 组播路由与波长分配算法, 给定组播请求与用户 QoS 需求, 提出的算法基于遗传算法 GA 来构造一棵柔性 QoS 组播树, 并基于波长图方法对组播树进行波长分配, 一体化考虑路由选择和波长分配问题, 从而使 QoS 组播树费用和用户 QoS 满意度都趋近优化, 该算法还考虑了 IP/ DWDM 光因特网的负载均衡问题. 仿真实验表明, 算法是可行和有效的.

关 键 词: IP/ DWDM 光因特网; 集成 QoS 组播路由; 遗传算法; 负载均衡
中图分类号: TP 393.14 **文献标识码:** A

支持服务质量 QoS(Quality of Service) 和组播(Multicast) 是下一代互联网所要具备的基本能力. IP/ DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 光因特网则是下一代互联网的主要组网技术^[1]. 因此, 在 IP/ DWDM 光因特网中支持 QoS 组播是非常必要的. IP/ DWDM 光因特网中实现 QoS 组播, 需要进行有效的路由选择, 找到费用优化的组播树, 并为之分配波长. 寻找这样一棵 QoS 组播树的问题是 NP-hard 问题^[2].

近几年来, 国内外学术界对 IP/ DWDM 光因特网中的 QoS 组播问题进行了研究, 提出了多种算法^[3~6], 但上述研究都是基于刚性 QoS 约束, 即给出单一的延迟上界值. 由于网络信息存在不精确性和动态性, 且用户 QoS 需求一般情况下都是柔性的, 所以用一个区间来度量比较合理^[7]. 这个区间的大小取决于用户和应用. 本文基于波长图^[8]思想构造了一种最小化组播树延迟的波长分配算法, 将组播树构造与波长分配一体化考虑, 使 QoS 组播树费用和用户 QoS 满意度都趋近优化, 提供柔性 QoS 组播支持.

1 模型描述

1.1 IP/ DWDM 光因特网模型

IP/ DWDM 光因特网可以表示为一个有向连通图 $G(V, E)$. 其中, V 是节点(波长路由器或者

OXC) 的集合, E 是边(光纤) 的集合. 每条边都由两根分别在链路的两个方向传输数据的反向光纤构成, 将每根有向光纤称为链路.

设每个光节点 $v_i \in V$ 都有组播能力, 即配置有分光器(optical splitter)^[9], 能将一个输入光信号分叉成任意数目的输出信号. 由于波长转换技术代价较高, 因此只为部分节点配置全域波长转换器^[9]. 网络中任意两不同波长之间的转换延迟都一样, 即 $t(v_i) = t$. 如果在某次组播会话中未在节点 v_i 处进行波长转换, 则 $t(v_i) = 0$.

每一条链路 $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$ 具有如下参数:

可用波长集: $\lambda(e_{ij}), \lambda(e_{ij}) \subseteq \lambda, \lambda$ 是每条边支持的波长集合, $\lambda = \{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w \}, W = | \lambda |$;

传输延迟: $\delta(e_{ij}), \delta(e_{ij}) = \delta(e_{ji})$;

链路费用: $c(e_{ij})$.

1.2 数学模型

在图 $G(V, E)$ 中, 定义一个组播请求为 $R(s, D, B)$. 其中, 组播通信的源节点为 s , 目的节点集合为 $D = (d_1, d_2, \dots, d_m), D \subset V$. 定义 B 为用户的端到端延迟需求区间.

构造 s 与 D 进行组播通信的一棵路由树 $T = (X, F), X \subseteq V, F \subseteq E$.

T 的费用定义为

$$Cost(T) = \sum_{e_{ij} \in F} c(e_{ij}) . \tag{1}$$

收稿日期: 2003-07-24
基金项目: 国家自然科学基金与朗讯贝尔实验室中国基础科学研究院联合资助项目(60003006, 70101006); 国家高技术研究发展计划项目(2001A A121064).
作者简介: 王兴伟(1968-), 男, 辽宁盖州人, 东北大学教授; 黄 敏(1968-), 女, 福建长乐人, 东北大学教授.

IP/DWDM 光因特网中光路上的通信延迟由两部分构成: 链路传输延迟和波长转换延迟。在树 T 中, 给出源节点 s 与任一目的节点 d_i 的会话光路 $P(s, d_i)$ 上的延迟

$$D_{sd_i} = \left[\sum_{v_i \in P(s, d_i)} t(v_i) + \sum_{e_{ij} \in P(s, d_i)} \delta(e_{ij}) \right] \cdot (2)$$

树 T 的延迟定义为

$$Delay(T) = \max\{D_{sd_i} \mid \forall d_i \in D\} \cdot (3)$$

即源节点到所有目的节点的最大延迟。

设 $B = [B_{low}, B_{high}]$, 用户 QoS 满意度定义为

$$Degree(QoS) = \begin{cases} 100\% & Delay(T) \leq B_{low}; \\ \frac{B_{high} - Delay(T)}{B_{high} - B_{low}} & B_{low} < Delay(T) < B_{high}; \\ 0 & Delay(T) \geq B_{high} \cdot \end{cases} \quad (4)$$

为了有助于网络负载均衡及提高组播树的波长分配成功率, 应该优先使用可用波长资源丰富的边。这可以通过对边上的费用函数进行合理定义来调节。例如, 通过定义启发式费用函数, 使可用波长资源丰富的边费用较小, 反之则大。在算法中, 链路 e_{ij} 上的费用定义为

$$c(e_{ij}) = W - |\lambda(e_{ij})| \cdot (5)$$

2 算法设计

2.1 波长分配算法

采用二进制编码来表示解, 每一个解对应的都应该是一棵覆盖给定节点集 U (由源节点和所有目的节点构成) 的树 $T_i(X_i, F_i)$ 。用解所对应网络图的最小生成树(森林)作为 T_i , 并对 T_i 进行剪枝。

如果 $T_i(X_i, F_i)$ 只含一棵树, 则进行波长分配, 否则, 不进行波长分配。构造的波长分配算法的目标是通过最小化波长转换次数使树 T_i 的延迟最小, 从而使用户 QoS 满意度最高。

先对 T_i 构造波长图 WG , T_i 上每条边的可用波长集 $\lambda(e_{ij})$ 是已知的。方法如下:

1) $N = |X_i|$, $w = |\bigcup_{e_{ij} \in F_i} \lambda(e_{ij})|$, 在 WG 中, 创建 $w \times N$ 个节点, 即 v_{ij} , $1 \leq i \leq w$, $1 \leq j \leq N$ 。所有的节点被组织成一个 w 行 N 列的矩阵。行 i 表示 T_i 中一个相应的波长 λ_i , 列 j 表示 T_i 中一个相应的节点 v'_j , 对 i 和 λ_i 的关系, j 和 v'_j 的关系分别建立映射表, 以便于将来还原到 T_i 中。

2) 对 $i = 1, 2, \dots, w$, 在第 i 行, 如果在 T_i 中, 从节点 v'_j 到节点 v'_h 存在链路 $e'_{jh} = (v'_j,$

$v'_h)$, 且在这条链路上波长 λ_i 可用, 则在波长图 WG 中, 添加一条边 (v_{ij}, v_{ih}) , 并将 e'_{jh} 上的传输延迟 $\delta(e'_{jh})$ 作为权重分配给这条边。

3) 对 $j = 1, 2, \dots, N$, 在第 j 列, 如果节点 v'_j 有波长转换能力, 则对 $\forall i_1, i_2, i_1 \neq i_2$, 在节点 $v_{i_1 j}$ 和节点 $v_{i_2 j}$ 之间添加一条边 $(v_{i_1 j}, v_{i_2 j})$, 并将波长转换延迟 t 作为权重分配给这条边。

经过以上三步, 波长图 WG 构造完毕。

为方便起见, 将 WG 中的顶点用 $1 \sim w \times N$ 之间的顺序节点号标记。 i 行 j 列的顺序节点号为

$$x = (i - 1) \times N + j \cdot (6)$$

将波长图 WG 视同于一个普通网络拓扑图, 运行如下算法。

输入 波长图 WG , w 行 N 列矩阵中源节点 s 和所有目的节点所在的列号 $j_s, j_{d_1}, \dots, j_{d_m}$ 。

输出 树 T_i 中的波长分配。

```
begin
for(  $k = 1, k \leq m, k++$  ) 1
{
    for(  $i = 1, i \leq w, i++$  ) ④
    {
         $x_i = (i - 1) \times N + j_s$ ; (四)
        for(  $j = 1, j \leq N, j++$  ) ¼
        {
             $y_{jk} = (j - 1) \times N + j_{d_k}$ ; ½
            运用 Dijkstra 算法在波长图中寻找节点  $x_i$  到节点  $y_{jk}$  的最短路径  $P(x_i, y_{jk})$ ;
        }
         $P(x_i, y_k) = \min\{P(x_i, y_{jk}), 1 \leq j \leq N\}$ ; ¾
    }
     $P(x, y_k) = \min\{P(x_i, y_k), 1 \leq i \leq w\}$  ⑧
}
end
```

对上述算法的注释: 1 是计算源节点 s 到每个目的节点的最短光路; ④是计算波长平面 i 上的源节点到每个目的节点的最短光路; (四)是计算波长平面 i 上的源节点号; ¼ 是计算波长平面 i 上的源节点到某目的节点所在列不同波长平面上的目的节点的最短光路; ½ 是计算位于 j 行、 j_{d_k} 列的目的节点号; ¾ 是选出波长平面 i 上的源节点到目的节点 d_k 的最短光路; ⑧是选出源节点 s 到目的节点 d_k 的最短光路。

对波长图中的顺序节点 x , 其对应原矩阵中的行号为

$$i = (x - 1)/N + 1,$$

(7)

列号为

$$j = (x - 1)\bmod N + 1.$$

(8)

用式(7)、(8)和步 1)中创建的两个映射表,可以很方便地将 WG 中由顺序节点号组成的光路还原为树 T_i 上的链路和波长,从而完成了波长分配。

该波长分配算法的时间复杂度为 $O(mN^2w^4)$, m 是目的节点数, N 是 T_i 中的节点数, w 是至少在 T_i 的一条链路上可用的波长数。三者都是小整数。此外,因为对除最终解以外的所有其他解的波长分配都是一种预分配策略,目的是得到光路的端到端延迟,所以算法运行过程中需要存储的数据较少,对存储空间的要求较低。

2.2 适应函数

解 S 的适宜值由适应函数 f 计算得到,它由其对应的树(森林) $T_i(X_i, F_i)$ 的费用 $Cost(T_i)$ 和 $Degree(QoS)$ 决定。将对应多棵树的解的费用加罚值,同时将该解的 $Degree(QoS)$ 取较小值。另外,由于算法设计目标包括较好地满足用户 QoS 需求,所以 $Degree(QoS)$ 越高,适宜值应该越低。适应函数如下。

$$f(S) = \frac{Cost(T_i) + [count(T_i) - 1] \times \rho}{Degree(QoS)} = \frac{\sum_{e_{ij} \in F_i} c(e_{ij}) + [count(T_i) - 1] \times \rho}{Degree(QoS)}.$$

(9)

其中, $count(T_i)$ 为 T_i 中树的个数, ρ 为常数。这样,通过该适应函数得到的解的适宜值越小,解越好。

2.3 生成初始种群

初始种群根据种群规模的大小,由随机生成的染色体组成。由于染色体是随机生成,因此可能某些染色体是“不好”的,即不包含全部组节点。

解决该问题的办法是,先生成一个特殊的染色体 S , 当且仅当 $v_i \in U$, v_i 才出现在 S 中。然后,将该染色体与每个随机生成的染色体取并操作,即

$$S_i \vee S \rightarrow S_i.$$

2.4 交叉、变异

交叉采用单点交叉,交叉点随机选择。

根据变异率进行变异操作。变异时也会出现“不好”的染色体。将变异后的染色体与生成初始种群中的特殊染色体取并操作。

2.5 选择策略

用赌轮法(Monte Carlo 选择)作为选择染色体的策略。采用转换函数,将小的适宜值转换成赌轮中的大扇面:

$$f'(S_i) = \max_{S_j \in S}[f(S_j)] - f(S_i) + \min_{S_j \in S}[f(S_j)].$$

(10)

这里, S' 是染色体的集合(种群)。

设赌轮的面积为 1,则每个染色体在赌轮中的面积就是上述转换过的染色体适宜值占种群适宜值总和的比例值。通过取 0, 1 之间的随机数并找到它落在赌轮上的位置,就可以选择染色体。

3 仿真研究与讨论

基于 NSFNET 网络拓扑^[10]进行了仿真研究。

参考已有的仿真模型^[6],边上的传输延迟在 1~ 10 ms 之间生成且跟边的长度成正比;波长转换延迟设为 1~ 10 ms 之间的一个常数。按节点度数由高到低的顺序,选取前 50% 的节点配置波长转换器。设 $|W| = 20, 10 \leq |\lambda(e_{ij})| \leq 15$ 。另外,如果某些染色体的适宜值太大,会屏蔽其他染色体之间的差异,因此当某个染色体的 $Degree(QoS)$ 小于一个较小正值或者其对应的解不可行时, $Degree(QoS)$ 一律取此较小正值。

3.1 组播树费用评估

将运行算法得到的组播树的费用与穷举法得到的最优费用进行对照,如表 1。

表 1 组播树费用仿真结果

Table 1 Simulation results of the cost

会话号	会话节点数占总节点数比率/%	最优组播树费用	算法运行次数	
			$R \leq 1\%$	$1\% < R \leq 5\%$
1	21.43	22	850	0
2	28.57	25	978	0
3	35.71	43	100	812
4	42.86	50	957	43
5	50.00	50	519	481
6	57.14	55	894	96
7	64.29	55	1000	0
8	71.43	68	981	19
9	78.57	67	972	28
10	85.71	73	1000	0

表中, R 为求得的组播树费用与最优费用的差值(即此组播树费用的偏差)占最优费用的比率。仿真实验中,每个组播会话运行 1 000 次,得到 1 000 个解。

会话节点随机选取,由稀疏模式(sparse mode)到密集模式(dense mode),具有一般性。从表中看出,对于 NSFNET 这样实际的网络拓扑,算法在组

成员稀疏模式和密集模式时求得组播树的费用质量精确度都非常高,有些时候甚至达到最优。

3.2 组播树 QoS 性能评估

本文定义了用户 QoS 满意度,在评价染色体适宜值时考虑了它的 QoS 性能,选择染色体时兼顾费用和端到端最大延迟。为了评估组播树的 QoS 性能,计算出运行 GA 但不考虑用户 QoS 满意度时得到的组播树的延迟,将运行算法得到的组播树的延迟与其进行对比,如图 1。从图 1 中可以看到,相较于不考虑 QoS 的情况,算法得到的组播树的延迟较小,有效地改善了组播树的 QoS 性能。

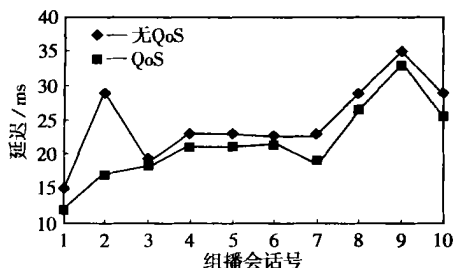


图 1 QoS 性能比较

Fig. 1 Comparison of QoS performance

4 结 论

本文抽象出 IP/DWDM 光因特网的模型,并进一步抽象出 IP/DWDM 光因特网中 QoS 组播的数学模型。基于网络信息的不精确性和用户 QoS 需求的可伸缩性,定义了用户 QoS 满意度的概念。然后,基于 GA 和波长图思想,构造了一种用于 IP/DWDM 光因特网的集成 QoS 组播路由算法。通过 GA 和启发式费用函数的设计,提出的算法能够在考虑网络负载均衡的前提下找到一棵费用近优的路由树;同时,以最小化组播树延迟为

目标进行波长分配,使组播树具有较好的 QoS 性能。算法将波长预分配集成到组播树构造过程中,实现了路由选择和波长分配的一体化。对算法进行了仿真实验,分别评估了费用和组播树延迟。结果表明,算法很好地解决了 IP/DWDM 光因特网中的 QoS 组播路由问题。

参考文献:

- [1] Green P. Progress in optical networking [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2001, 39(1): 54- 61.
- [2] Ramaswami R, Sivarajan K N. Routing and wavelength assignment in all-optical networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1995, 3(5): 489- 500.
- [3] Jia X H, Du D Z, Hu X D, et al. Optimization of wavelength assignment for QoS multicast in WDM networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(2): 341- 350.
- [4] Chen B, Wang J P. Efficient routing and wavelength assignment for multicast in WDM networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(1): 97- 109.
- [5] Znati T F, Alrabiah T, Melhem R. Low-cost, delay-bounded point-to-multipoint communication to support multicasting over WDM networks [J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 423- 445.
- [6] 黄传河,陈莘萌,贾小华. WDM 网络中实时组播的分布式路由与波长分配算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(3): 172- 176.
(Huang C H, Chen X M, Jia X H. A distributed routing and wavelength assignment algorithm for real-time multicast in WDM networks [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(3): 172- 176.)
- [7] Dean H L, Ariel O. QoS routing in networks with uncertain parameters [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1998, 6(6): 768- 778.
- [8] Chlamtac I, Farago A, Zhang T. Lightpath (Wavelength) routing in large WDM networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(5): 909- 913.
- [9] Ding A J, Poo G S. A survey of optical multicast over WDM networks [J]. *Computer Communications*, 2003, 26(2): 193- 200.
- [10] Saha D, Purkayastha M D. An approach to wide area WDM optical network design using genetic algorithm [J]. *Computer Communications*, 1999, 22(2): 156- 172.

A Multicast Routing Algorithm in IP/ DWDM Optical Internet

WANG Xing-wei¹, CHENG Hui¹, LI Jia², HUANG Min²

(1. Computing Center, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: WANG Xing-wei, professor, E-mail: wangxw@mail.neu.edu.cn)

Abstract: An integrated QoS multicast routing algorithm in IP/DWDM optical Internet was discussed. Given multicast request and users' QoS requirements, an algorithm was proposed on GA basis to address the issue routing and wavelength assignment in an integrated manner, construct a flexible QoS multicast tree and assign wavelengths to the tree, based on the wavelength graph method. Thus, both the cost of QoS multicast tree and users' satisfaction of QoS approach to optimum. The proposed algorithm also considered load balancing in IP/DWDM optical Internet. Simulation results showed that the proposed algorithm is feasible and effective.

Key words: IP/DWDM optical Internet; integrated QoS multicast routing; genetic algorithm; load balancing

(Received July 24, 2003)