

一种波长转换受限 WDM 网络的动态路由和波长分配算法

肖诗源, 刘贤德, 金 鑫
(华中科技大学光电子工程系, 湖北武汉 430074)

摘 要: 本文基于分层图模型, 提出了在节点波长转换范围受限和波长转换器数目受限情况下, 解决 WDM 网络的动态路由和波长分配问题的一种算法. 通过计算机仿真, 研究了本算法的性能以及这两种波长转换受限情况对网络阻塞率的影响.

关键词: 波分复用网; 波长转换; 动态路由和波长分配; 分层图
中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 06-1140-03

An Algorithm for Dynamic Routing and Wavelength Assignment in WDM Network with Limited Wavelength Conversion

XIAO Shi-yuan, LIU Xiann de, JIN Xin
(Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Based on the layered graph model, an algorithm is proposed for dynamic routing and wavelength assignment in WDM network with limited range wavelength conversion and limited count wavelength converters. The computer simulation shows the algorithm performance and the blocking probabilities of the networks on the two limited wavelength conversion conditions.

Key words: WDM network; wavelength conversion; dynamic RWA; layered graph

1 引言

路由和波长分配(RWA)定义为在给定 WDM 网络中, 为一组光路连接请求寻找从源节点到目的节点的路由并且为这些路由分配相应的波长. 光路连接请求动态随机到达情况下的 RWA 问题称为动态 RWA 问题. 动态 RWA 问题中研究的性能指标主要是网络阻塞率.

由于 RWA 问题是一个 NP 完全问题^[1], 许多文献中将 RWA 问题分成路由和波长分配两个子问题分别研究. 文献[2]提出了分层图模型, 将 RWA 问题转化为分层图中的最短路问题从而一次性解决路由和波长分配. 文献[3]针对无波长转换 WDM 网络分层图的特殊结构, 提出了一种改进的最短路算法. 本文提出了节点波长转换范围和波长转换器数目受限的 WDM 网络的分层图模型, 以及相应的动态 RWA 算法.

目前实用波长转换器的波长转换范围是受限的, 只能将输入波长转换到有限的几个输出波长上. 为了降低成本, 节点在设计时都尽量减少波长转换器数目. 本文研究节点波长转换器数目受限情况时, 使用图 1 中的链路共享波长转换器节点交换结构^[4]. 节点的每条输出光纤链路都配置了专用的波长转换器池(WC POOL), 波长转换器池拥有的波长转换器数目称为转换数.

2 波长转换受限 WDM 网络的分层图模型

给定网络物理拓扑 $G(N, C, L, W)$, 其中 N 代表节点集,

$C(C \subseteq N)$ 代表波长转换节点集, L 代表链路集, $W = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|W|}\}$ 代表光纤的可用波长集. 节点数、链路数和可用波长数分别用 $|N|$ 、 $|L|$ 和 $|W|$ 表示. 本文假定每条链路都由一对方向相反的单向光纤组成, 每条光纤的可用

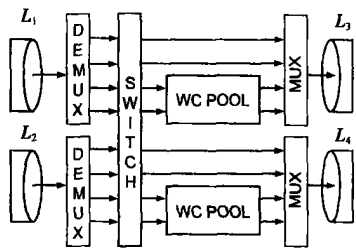


图 1 链路共享波长转换器的节点交换结构

波长集相同; 节点的转换数用 ω 表示; 节点波长转换器的转换范围称为转换度, 用 Δ 表示, 即输入波长 λ_i 转换后的输出波长 λ_j 的范围是 $[\lambda_{\max}(1, i - \Delta), \lambda_{\min}(|W|, i + \Delta)]$; 同时假定所有节点的 ω 和 Δ 都相等.

根据网络物理拓扑构造分层图的步骤如下: 首先将物理拓扑 G 复制 $|W|$ 次, 生成 $|W|$ 个分别对应波长 λ_i 的子图 LG^i , $i = 1, 2, \dots, |W|$, 这些子图称为波长平面. G 中的节点 $N_k(k = 1, 2, \dots, |N|)$ 在波长 λ_i 的波长平面中映射为节点 N_k^i ; G 中起点为 N_j 、终点为 N_k 的链路 $L_{jk} \in L(j, k = 1, 2, \dots, |N|)$ 在波长 λ_i 的波长平面中映射为起点为 N_j^i 、终点为 N_k^i 的弧 L_{jk}^i ; 其次, 为了方便给连接请求 $R(N_s, N_d)$ (N_s 为源节点, N_d 为目的节点) 计算路由和分配波长, 在分层图中添加虚拟节点 S, D , 并且用弧将 S 和 N_s 在每个波长平面中的映射节点 N_s^i 连接起来, 将 D 和 N_d 在每个波长平面中的映射节点 N_d^i 连接起来;

最后,对于波长转换节点 N_r ,用弧将 N_r 在每个波长平面中的映射节点 N_r^i 与其他波长平面中的映射节点 $N_j^i (j \in [\max(1, i - \Delta), \min(|W|, i + \Delta)] \text{ 且 } j \neq i)$ 连接起来,这些弧称为节点 N_r 的波长转换弧。图 2(a) 中网络波长数为 3,只有 N_2 是波长转换节点,转换度为 1;

(b) 是连接请求为 $R(N_1, N_4)$ 时的分层图。

由分层图的构造方法可知,虽然本文预先假定所有节点的 ω 和 Δ 都相等,但是该分层图模型同样适用于 ω 和 Δ 为任意值的网络。

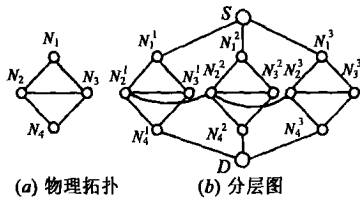


图 2 WDM 网络的分层图

3 算法描述

在图 2 中,动态 RWA 问题等效为在分层图中求解从 S 点到 D 点的最短路。一般根据关注的网络性能指标来确定分层图中弧的长度,不同的长度策略意味着不同的资源分配算法。例如如果关注网络传输时延,可以将物理链路的长度作为其在分层图中映射弧的长度。对于任何长度策略,分层图中虚拟节点 S 、 D 与其他节点间的弧的长度应该始终设为 0,这样它们不会对求最短路产生影响。对于分层图中的波长转换弧,使用波长转换代价作为长度,我们必须选取适当的代价值才能获取最好的算法性能。

波长转换受限 WDM 网络的分层图有两个特殊性。首先,光路在每个节点中最多只能进行一次波长变换,所以对于波长转换节点 N_r ,光路在分层图中对应的路径最多只能包含一条 N_r 的波长转换弧。例如图 2 中的路径 $N_1^1 \rightarrow N_2^2 \rightarrow N_3^3$ 意味着在节点 N_2 中进行了两次波长变换,这是不允许的。其次,由于节点 N_r 的波长转换器数目受限,必须对该节点的输出链路 $L_{ri} \in L(r, i = 1, 2, \dots, |N|, i \neq r)$ 统计波长转换路径数 P_r^i , P_r^i 等于经过节点 N_r 波长转换后从链路 L_{ri} 输出的光路数目。当 P_r^i 等于节点的转换度 ω 时,不再允许建立这样的光路。

为了方便描述算法,给分层图中的节点编号,虚拟节点 S 、 D 的编号分别为 $0, |N| + 1$, 波长平面 LG^i 中节点 N_k^i 的编号为 $(i - 1)|N| + k (k = 1, 2, \dots, |N|, i = 1, 2, \dots, |W|)$ 。用编号表示分层图的节点集 $V = \{0, 1, \dots, |N| + 1\}$, 波长转换节点集 C 在分层图中的映射节点集为 LC 。用 d_{ij} 表示分层图中弧 (i, j) 的长度。对于 V 中的节点 j , u_j 表示从节点 0 到该点的最短路长度。标号 $\text{pred}(j)$ 表示从节点 j 到节点 0 的一条路径长度等于 u_j 时,该路径中节点 j 前面的那个节点。 $\text{pn}(j)$ 表示分层图中节点 j 在物理拓扑中对应的节点。 $\text{link}(i, j)$ 表示分层图中弧 (i, j) 对应的物理链路, $p(i, j)$ 表示节点 $\text{pn}(i)$ 的输出物理链路 $\text{link}(i, j)$ 的波长转换路径数。

由于分层图的特殊性,不能使用通常的最短路算法求解。本文基于经典的 Dijkstra 算法,提出在这种分层图中求解最短路的 LGWG Dijkstra 算法,其步骤如下:

Step1: 令 $T = \Phi, \bar{T} = V, u_0 = 0, \text{pred}(0) = 0$ 。初始化 $u_j = \infty, j \neq 0$ 。

Step2: 如果 $T = V$, 算法结束。

Step3: 找出节点 i , 满足 $u_i = \min(u_j), j \in \bar{T}$ 。令 $i_1 = \text{pred}(i)$ 。

(1) 如果 i 满足条件: $i \in LC \cup \text{pn}(i) = \text{pn}(i_1) \in C$ (说明光路在物理节点 $\text{pn}(i)$ 已经进行了一次波长转换),那么逐条检查从节点 i 出发的弧 $(i, j), j \in \bar{T}$: 如果 $j \in LC \cup \text{pn}(j) = \text{pn}(i) \in C$, 检查下一条弧(由于光路在一个节点中最多只能进行一次波长变换的限制); 如果 $\text{link}(i, j)$ 存在 $\cup_p(i, j) = \omega$, 检查下一条弧(由于节点转换数限制); 否则, 如果 $u_j > u_i + d_{ij}$, 则令 $u_j = u_i + d_{ij}, \text{pred}(j) = i$, 检查下一条弧。转到 Step2。

(2) 如果 i 不满足条件: $i \in LC \cup \text{pn}(i) = \text{pn}(i_1) \in C$, 那么对于所有从节点 i 出发的弧 $(i, j), j \in \bar{T}$, 如果 $u_j > u_i + d_{ij}$, 则令 $u_j = u_i + d_{ij}, \text{pred}(j) = i$ 。转到 Step2。

LGWG Dijkstra 算法的复杂度和 Dijkstra 算法的相同,即为 $O(|V|^2) = O(|N|^2|W|^2)$ 。由算法可知,波长转换代价有高低两个临界值。高临界值为分层图中所有弧长度之和,低临界值为分层图中弧的单位长度。在波长转换代价大于高临界值时,算法只有在如果不使用波长转换器就会产生阻塞的情况下使用波长转换器。如果波长转换代价小于低临界值,算法会为了找到更短的路径使用所有可用波长转换器。

基于分层图的波长转换受限 WDM 网络动态 RWA 算法具体步骤如下:

Step1: 根据网络物理拓扑 $G(N, C, L, W)$ 生成分层图, 根据关注的网络性能来确定分层图中每条弧的长度和波长转换策略。

Step2: 等待业务请求。如果是连接请求, 根据请求的源节点和目的节点修改分层图中虚拟节点 S 、 D 与波长平面节点间的弧, 转到 Step3; 如果是释放请求, 转到 Step5。

Step3: 使用 LGWG Dijkstra 算法在分层图中为连接请求计算最短路。

Step4: 如果最短路不存在(路径长度为无穷大), 拒绝请求, 转到 Step2; 如果最短路存在, 该路径包含的节点和弧在物理拓扑中对应的物理节点和物理链路就是连接请求的路由, 弧所在的波长平面对应相应物理链路分配的波长。在分层图中将经过的物理链路的映射弧长度改为无穷大, 波长转换后的输出物理链路的波长转换路径数加 1。转到 Step2。

Step5: 释放的光路中经过波长转换输出的物理链路的波长转换路径数减 1, 光路经过的物理链路在分层图中的映射弧长度恢复原值。转到 Step2。

4 仿真结果及分析

通过仿真,对本算法与固定路由算法^[5](采用固定路由,按顺序检查已排序波长集选择空闲波长,并且可以进行波长变换)进行性能比较,并且研究了两种波长转换受限情况对网络阻塞率的影响。仿真时网络采用 14 个节点、21 条链路的 NSFNET 网络^[6],所有物理链路都由一对方向相反的单向光纤组成,所有节点都是波长转换节点并且采用图 1 的交换结构。每个节点的连接请求以相互独立、参数为 λ 的泊松过程到

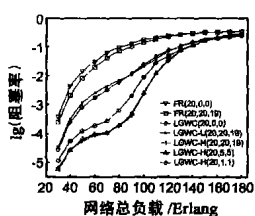


图3 NSFNET网络中不同算法的性能曲线

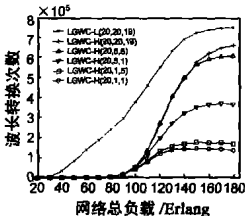


图4 不同情况的波长转换次数

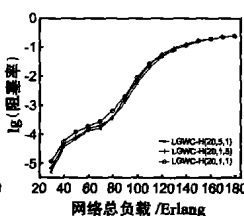


图5 转换数和转换度对阻塞率的影响

5 结论

本文提出的基于分层图模型的动态 RAW 算法,可以一次性地解决波长转换受限 WDM 网络的路由和波长分配两个子问题,算法复杂度为 $O(|N||V|^2)$ 。计算机仿真表明本算法性能明显优于固定路由算法,而且在设定较高的波长转换代价时性能最好。不过算法对于每个连接请求需要重新构造分层图,当网络节点较多时,计算量比较大。仿真还表明波长转换在一定范围内受限的节点可以达到或逼近全功能波长转换节点的波长转换增益,网络节点增加转换数可以比相同程度的增加转换度获得更好的性能。

参考文献:

- [1] Ezhan Karasan, Ender Ayanoglu. Performance of WDM transport networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(7): 1081-1096.
- [2] Chien Chen, Subrata Banerjee. A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks[A]. IEEE INFOCOM[C]. USA: IEEE, 1996. 164-171.
- [3] 徐世中, 李乐民, 王晟. 多光纤波分复用网动态路由和波长分配算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 23-27.
- [4] Byrav Ramamurthy, Biswanath Mukherjee. Wavelength conversion in WDM networking[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(7): 1061-1073.
- [5] Ahmed Mokhtar, Murat Azizoglu. Adaptive wavelength routing in all optical networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(2): 197-206.
- [6] Ling Li, Arun K Somani. Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 9(5): 779-786.

作者简介:



肖诗源 男, 1976 年 9 月出生于江西省赣州市, 现为华中科技大学光电子工程系博士研究生, 主要研究方向是 WDM 网络路由与波长分配、BACnet 网络等。E-mail: xsy1976@163.com.



刘贤德 男, 1938 年 7 月出生于湖北省汉川市, 现为华中科技大学光电子工程系教授、博士生导师, 主要研究方向是宽带网络技术、智能建筑、BACnet 网络等。

达, 连接请求目的节点在网络中除源节点以外的其他节点中以相同概率选取, 光路建立后的持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布。系统没有排队机制, 如果连接请求阻塞则立即丢弃。所有仿真数据都是在网络预先处理 10^3 个连接请求后, 再对 10^6 个连接请求进行的统计平均。

将固定路由算法记作 FR, 本算法记作 LGWC, 采用波长转换代价低临界值时记作 LGWC-L, 采用波长转换代价高临界值时记作 LGWC-H。FR(λ, ω, Δ) 表示采用 FR 算法, 波长数为 λ , 转换数为 ω , 转换度为 Δ 。

比较图 3 所示的阻塞率曲线 LGWC(20, 0, 0) (此时节点没有波长转换能力)、LGWC-L(20, 20, 19) (此时节点具备全功能波长转换能力)、LGWC-H(20, 20, 19)、FR(20, 0, 0)、FR(20, 20, 19), 可以看出 LGWC 算法的阻塞率在有波长转换和没有波长转换的情况下都明显优于 FR 算法, 而且在有波长转换情况下, LGWC-H 算法可以产生比 FR 算法高得多的波长转换增益(相对没有波长转换功能时的阻塞率增益)。但是 LGWC-L 算法几乎不能产生波长转换增益, 在低负载时阻塞率甚至高于没有波长转换功能时的阻塞率, 同时从图 4 可以看到 LGWC-L 的波长转换次数远高于 LGWC-H。这是因为采用低转换代价时, 算法为了尽量找到最短路径, 过多的使用波长转换器, 造成在处理后来的连接请求时没有可用的波长转换器。所以本算法必须使用波长转换代价高临界值才能获得最好的性能。

在图 3 中比较 LGWC-H(20, 5, 5) 和 LGWC-H(20, 20, 19) 可以看出, 网络使用波长转换受限节点时的阻塞率和使用全功能波长转换节点时的相差不多, 尤其是在低负载和高负载的情况下。图 4 中这两种情况的波长转换次数在低负载和中等负载时几乎一样, 在高负载时 LGWC-H(20, 5, 5) 的还低一些。但是, LGWC-H(20, 1, 1) 和 LGWC-H(20, 20, 19) 相比, 阻塞率提高了很多。因此波长转换在一定范围内受限的节点可以达到或逼近全功能波长转换节点的波长转换增益。

在图 5 中与 LGWC-H(20, 1, 1) 相比, LGWC-H(20, 5, 1) 的转换数增加了 4 倍, LGWC-H(20, 1, 5) 的转换度增加了 4 倍, LGWC-H(20, 5, 1) 的阻塞率比 LGWC-H(20, 1, 5) 的低一些。不过在图 4 中可以看到, 高负载时 LGWC-H(20, 5, 1) 的波长转换次数是 LGWC-H(20, 1, 5) 的 2 倍左右, 低负载时两者基本一样。因此节点增加转换数可以比相同程度的增加转换度获得更好的性能, 但是波长转换次数也相应增加了。