

光通信网络中路由与波长分配的算法研究

王天哲 延凤平 简水生

(北京交通大学 光波技术研究所 北京 100044)

摘要：光通信网络作为下一代网络的主要网络之一，在整个通信网中起着至关重要的作用。目前光通信中主要是采用基于 DWDM（密集波分复用）技术组成的光网络，随着波分数量的增加，DWDM 网络中的路由与波长分配问题显得十分重要，需要有一种有效的算法来使有限的波长资源得到充分地利用。本文根据原有的数学分析模型，提出了一种分层图模型，并根据此模型提出了一种用来解决 DWDM 网络中出现的波长分配问题的一种算法，并通过计算机仿真来表明此算法提高了波长资源的利用率，降低了网络的阻塞率。

关键字：密集波分复用，路由与波长分配算法，光网络，波长转换技术

中图分类号：TN913.7 **文献标识码：**A

Research of RWA in All-Optical Net

WANG Tian-Zhe YAN Feng-Ping JIAN Shui-Sheng

(Optical-wave Technology Institute Beijing Jiao-tong University Beijing 100044 China)

Abstract: Optical communication network is the main network of NGN, and play a very important role in communication network. Recently it is mainly based on DWDM (Dense Wavelength Divide Muxplexing) technology. As the number of wavelength increasing, the assigning problem of route and wavelength become more important in DWDM network, so it is necessary to provide a algorithm in order to improve the efficiency of using wavelength resource. According to original mathematic analytical model, we put forward a new model, and advance a algorithms based on this model, in order to solve the RWA problem in DWDM Networks, then we simulate this algorithms on computer and prove the superiority of this algorithms.

Key words: DWDM, RWA, Optical network, wavelength conversion

一、引言：

复用技术是增加通信容量的好方法。在模拟通信领域中利用过频分复用技术 FDM；无线通信领域中利用了码分复用技术 CDM，提高了无线信道的利用率；在数字通信中利用时分复用技术 TDM 来增加通信容量，但在光纤通信中，实践证明 TDM 数字信号的传输速率存在上限，因此提高光通信的容量就受到了电子瓶颈的严重制约。人们开始设想利用一根光纤同时传输多路光波，每一路光波分别受到数字信号的调制，这样就出现了波分复用技术 WDM。

由于光纤性能按照 WDM 系统的要求不断改进、提高，各种光器件在结构和性能上都有发展创新，使得光纤中传输的光波数不断增加，这就提出了密集波分复用 DWDM 的概念，DWDM 技术至今还在继续发展，进步，完全有可能不断地提高光纤地传输容量，适应未来通信网络对传输容量地要求。

当然使用 DWDM 技术的光网络还存在许多问题有待深入研究，其中包括：透明传输

问题，光网络的生存性问题，网络优化设计问题，网络虚拟拓扑问题，路由选择和波长分配（RWA）问题，，DWDM 与其他技术融合的问题等等。本文主要针对其中的路由选择和波长分配问题提出解决方案。

在波长复用全光网中波长资源总是有限的，因此需要合理、高效地利用波长资源，为呼叫建立请求寻找路由、分配波长，这就是波长路由全光网中地波长分配和路由选择（RWA）问题。RWA 问题是指在一组呼叫建立请求的条件下，寻找从源节点到目的节点的路由，并给这些路由分配适当的波长。根据初始条件不同，可以分为动态 RWA 和静态 RWA 问题。动态 RWA 问题是指呼叫建立请求随机地到达光网络，在节点之间为呼叫建立请求实时地、按需地寻找路由分配波长，处理时常假设呼叫建立请求到达率服从柏松分布，光通路的持续时间服从负指数分布；静态 RWA 问题是指待处理的呼叫建立请求预先给定，它以最大化通信量为目标的。RWA 问题解决方案的优劣评判标准有两种：一种

国家自然科学基金：60337010

是在波长数目一定的前提下，网络阻塞率低的解决方案为优；另一种是在满足网络阻塞率一定的前提下，网络使用的波长数目少的解决方案为优，这两种评判标准是等价的。本文研究的是单光纤全光网络中的动态 RWA 问题，评价 RWA 算法优劣的标准为波长数目一定的前提下，网络阻塞率的高低。

二、理论分析：

本文采用并行的解决模式来解决动态 RWA 问题，所谓并行模式，是指借助分层图模型把 RWA 问题转化为在分层图中寻找两接入点之间的最短路径问题。下面先引入分层图模型的概念：

我们把 WDM 光网络的物理拓扑结构记为无向图 $G(N, L, W, N_{WC})$ ，其中 N 表示物理节点集合； L 表示由一对方向相反的单向光纤构成的双向链路集合； W 表示光纤上的可用波长集合，其中包含 w 个波长，可用波长集合记为 $W = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w\}$ ； N_{WC} 表示物理节点中具有波长转换能力的节点集合。为了进行以后的算法，需要把物理拓扑 $G(N, L, W, N_{WC})$ 转化为有向的分层图 $LG(V, E)$ ，其中 V 是分层图中的节点集合， E 是有向边集合。从物理拓扑得到分层图的步骤如下：

首先把物理拓扑复制 w 份，步骤为：对于 G 中的每一个节点 $i \in N$ ，复制得到 w 个节点 $v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^w$ ，一共有 $|N| \times w$ 个，它们是 $LG(V, E)$ 中 V 的一部分；对于 G 中连接节点 i 和节点 j 的链路 $lij \in L$ ，也复制成 w 份，并分裂成方向相反的边 $e_{ij}^1, e_{ij}^2, \dots, e_{ij}^w$ ，一共有 $2 \times w \times |L|$ ，它们是 $LG(V, E)$ 中 E 的一部分，经过这两步之后就得到了分离的 w 个波长平面，每一个波长平面都是复制物理拓扑，并改为有向图的结果。

接下来需要添加一些虚拟节点和虚拟边把 w 个分离的波长平面连接在一起。为 $G(N, L, W, N_{WC})$ 中的每一个节点 i 添加两个虚拟节点： v_i^S 和 v_i^D ，前者表示源节点，只发出信息，后者表示目的节点，只接收信息，一共添加了 $2 \times |N|$ 个虚拟节点。相应地还应该添加从节点 v_i^S 和 v_i^D 到 $v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^w$ 的边，添加规则为：从节点 v_i^S 发出 w 个边分别连接到节点 $v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^w$ ，记为

$$e_i^{S1}, e_i^{S2}, \dots, e_i^{Sw};$$

从每一个节点 $v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^w$ 发出一个边连接到节点 v_i^D ，记为 $e_i^{1D}, e_i^{2D}, \dots, e_i^{wD}$ ，这一步添加的虚拟边数为 $2 \times w \times |N|$ 。

因为是构造用于波长可变全光网络的分层图，所以最后还需要为具有波长转换功能的节点添加一些对应于波长转换功能的转换边，对于物理拓扑 $G(N, L, W, N_{WC})$ 中的转换节点 $i \in N_{WC}$ ，在分层图中用一对方向相反的转换边 e_i^{lm} 和 e_i^{ml} 将节点 v_i^l 和节点 v_i^m 都连接在一起，这一步添加的转换边的数目为 $w \times (w-1) \times |N_{WC}|$ ，这些转换边使得光通路可以在波长平面之间转换。

分层图中的边都有特定的含义。 e_{ij}^k 有向边表示物理拓扑中从节点 i 到节点 j 的链路，并且在该链路上使用波长 λ_k ，这种边有两个数字下标，一个数字上标； e_i^{Sj} 有向边表示从虚拟节点 v_i^S 到节点 v_i^j 的虚拟发射边， e_i^{jD} 有向边表示从虚拟节点 v_i^j 到节点 v_i^D 的虚拟接收边，这种边有一个数字下标，一个数字上标和一个字母上标； e_i^{lm} 有向边表示在节点 i 中的转换边，它将波长从 λ_l 转换到 λ_m ，这种边有一个数字下标和两个数字上标。根据分层图中边的含义，很容易将分层图中的一条路径映射为物理全光网络中的特定路由。

图 1 显示了从包含 3 个节点的物理拓扑图到分层图的转化，为简单起见，该光网络仅为 2 波分波长可变全光网络，其中节点 1 具有波长转换能力。为作图简洁，在转化后的分层图中，除了虚拟边之外的其它有向边对都用一条无向边代替。在图 1 中，用有向虚线表示出了一条由节点 2 连接到节点 3 的光通道。该光通道包含的边为 e_2^{S1} 、 e_{21}^1 、 e_1^{12} 、 e_{13}^2 和 e_2^{2D} ，实际光网络中的路由和使用的波长、波长转换器映射为：先将光信号由节点 2 转发到节点 1，在该链路上使用波长 λ_1 ；在节点 1 处执行波长转换，将光信号从波长 λ_1 转换到 λ_2 ；最后将光信号由节点 1 转发到节点 3，在该段链路上使用波长 λ_2 。

国家自然科学基金：60337010

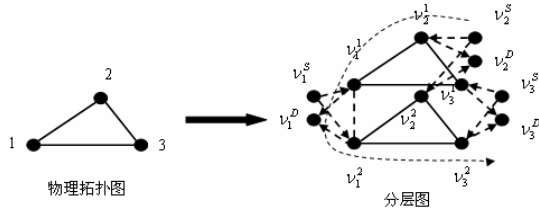


图1 物理拓扑图到分层图的转化

三、波长可变光网络中的动态 RWA 算法

把物理拓扑映射为分层图之后，就可以在分层图的基础上利用动态 RWA 算法为呼叫建立请求寻找路由和分配波长了。为呼叫建立请求寻找适当的路由、分配波长就是在分层图中计算一条最短路径，该路径的代价是其所经过边的代价的总和。在分层图中，每一条非虚拟边的初始代价是根据实际需要确定的，如果要求光通路经过的物理距离尽可能的短，相应的就设定边的代价与物理距离有关，如果希望光通路经过的转接次数尽可能的少，相应的设定边的代价为 1，而虚拟边的代价都设定为 0，转换边的代价统一设定为一个较大的值 C，因为本文算法鼓励建立不使用波长转换器的光通路，执行 RWA 算法，找到有效的路由之后，建立光通路所经过的边的代价改变为 ∞ ，表示目前该边对应的资源被占用。

为节点 A、B 间的呼叫建立请求寻找路由、分配波长问题可以用数学模型表示为：

$$\text{Weight}_{\text{opt}} = \min \left\{ \sum_{p \in P} \sum_{e \in E} c(e) X_{ep} X_p \right\} \quad (1)$$

$$\text{约束条件为: } \sum_{p \in P} X_p = 1 \quad (2)$$

其中 P 表示从节点 A 到节点 B 的所有路由的集合，E 是分层图中的边集，c(e) 表示边 e 的代价， X_{ep} 和 X_p 是两个示性函数，其含义为：

$$X_{ep} = \begin{cases} 0 & \text{光通路 } p \text{ 不包含边 } e \\ 1 & \text{光通路 } p \text{ 包含边 } e \end{cases} \quad (3)$$

$$X_p = \begin{cases} 0 & \text{路由未选择光通路 } p \\ 1 & \text{路由选择了光通路 } p \end{cases} \quad (4)$$

该数学问题可以在分层图中，利用图论中的最短路由算法解决，在分层图中找到了最短路径就可以接纳呼叫建立请求，为其指定路由、分配波长。

在以上准备工作基础上，基于分层图模型的动态 RWA 算法描述如下：

1. 依据前面的方法把物理拓扑无向图 $G(N, L, W, N_{wc})$ 转化为有向的分层图 $LG(V, E)$ ，并初始化各条边的代价。
2. 等待触发事件
3. 假设呼叫建立请求是在物理节点 A、节点 B 之间。在分层图中，利用最短路径算法寻找从节点 v_A^s 到节点 v_B^d 的最短路径。

如果找到的最短路径代价值为无穷大，表明光网络目前没有空闲资源接纳该呼叫建立请求，因此阻塞该呼叫，跳转 2，等待触发事件。

如果找到的最短路径代价值为有限值，表明可以接纳该呼叫建立请求，并已为该请求找到了合适的路由和波长。最短路径包含边 e_{ij}^k 表明光通路经过节点 i 和节点 j 之间的链路，并且使用波长 λ_k ；最短路径包含边 e_i^m 表明光通路经过节点 i，并且在节点 i 处进行了波长转换，由波长 λ_l 转换到波长 λ_m 。接纳呼叫之后需要修改光通路所对应的分层图中边的代价。跳转到 2，等待触发事件。

4. 释放光通路占用的资源，将分层图中相应边的代价复原为初始代价值。跳转到 2，等待触发事件。

由于虚拟节点 v_i^s 只能发出有向边， v_i^d 只能接收有向边，因此在执行算法的时候，只牵扯到分层图中的虚拟节点 v_A^s 和虚拟节点 v_B^d ，其它的虚拟节点不参与算法运算。本文光通信是双向的，因此当利用了分层图中的边 e_{ij}^k 时，同时也就利用了边 e_{ji}^k 。本文算法的时间复杂度分析如下：

第一步是在执行动态 RWA 算法之前所做的准备工作，其复杂度对本算法的影响很小。第二步仅仅做出判断，指出下一步执行何种处理，对算法的影响也不大。第三步才是本算法的核心，它直接影响到算法的时间复杂度，这一步可以分为两个部分，第一部分是利用最短路径算法，在分层图中寻找最短路径，第二部分是根据所找出的最短路径，刷新分层图中光通路所占用边的代价，

国家自然科学基金：60337010

本文使用的最短路径算法是 Floyd 算法，其时间复杂度为 $O(|V|^2) = O((|N| \times w)^2)$ ，刷新分层图中占用边的时间复杂度正比于物理拓扑图的直径，因此第三步的时间复杂度主要取决于最短路径算法的复杂度。第四步主要是释放光通路所占用的资源，复原分层图中相应边的代价值，这一步的时间复杂度也是正比于物理拓扑图的直径。从以上分析可以得出本动态 RWA 算法的时间复杂度主要取决于最短路径算法的时间复杂度，为 $O((|N| \times w)^2)$ 。利用时间复杂度低的最短路径算法可以降低本算法的时间复杂度。

四、 动态 RWA 算法的数值模拟

针对本文所提出的动态 RWA 算法，本文进行了计算机数值模拟。模拟中假设网络处理呼叫建立请求不存在排队机制，即光网络为即时拒绝系统；各个节点对之间的呼叫建立请求是相互独立的、参数为 λ 的泊松流，光通路持续时间服从参数为 $1/\mu$ 的负指数分布，全网的呼叫强度为 $|N| \times (|N|-1) \times \lambda / \mu$ (Erlang)；光网络允许一个节点对之间同时存在多个光通路。本文所用的光网络物理拓扑结构如图 2 所示，它包含 10 个节点和 16 条双向链路，其中节点 4、5、7 具有波长转换功能。对该物理拓扑的 4、8、16 波分三种全光网情况分别实时地生成 10^7 个呼叫建立请求，进行了数值模拟。

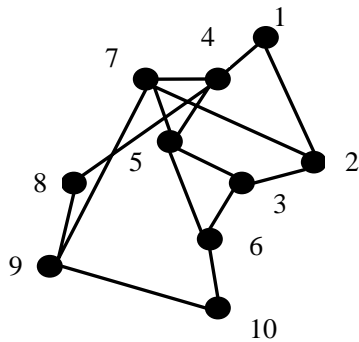


图 2 光网络物理拓扑结构

图 3 给出了三种波长可变光网络中本算法模拟得出的网络阻塞率与网络平均单波长呼叫强度的关系。从图中可以明显看出来，在单波长呼叫强度相同的条件下，16 波分的全光网对应的阻塞率比 8 波分和 4 波分的全光网对应的低。例如，当单波长呼叫强度为 20Erlang/波长时，16 波分、8 波分

和 4 波分对应的网络阻塞率分别为 1.8×10^{-4} 、 3.5×10^{-3} 和 9.9×10^{-2} ；当单波长呼叫强度为 25Erlang/波长时，16、8、4 波分对应的网络阻塞率分别为 2.5×10^{-3} 、 1.56×10^{-2} 和 1.7×10^{-1} 。这是由于利用波长转换技术、部分地消除了波长一致性限制、提高了波长资源的利用率而带来的网络阻塞率性能改善。随着单波长呼叫强度增加，3 种波分全光网的阻塞率都明显增高，图 3 中，三条曲线在同一单波长呼叫强度值处的阻塞率之比随着单波长呼叫强度的增加而下降。这是因为在呼叫强度较低时，波长一致性限制是产生阻塞现象的主要原因，因此引入波长转换技术可以明显地提高波长资源的利用率；当呼叫强度增加后，在波长资源有限的情况下，波长资源相对不足是产生阻塞现象的主要原因，引入波长转换技术也只能有限的提高波长资源的利用率。

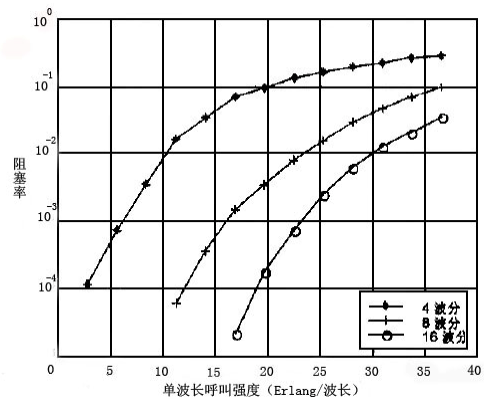


图 3 阻塞率与单波长强度的关系

五、 结论

波长可变光网络中的 RWA 问题是现在 DWDM 系统中的热门研究问题，本文就该问题结合分层图模型，提出了一种用于波长可变光网络的动态 RWA 算法，它一次性地完成了寻找路由和分配波长两个任务。通过计算机模拟，证明本算法高效地使用了波长资源，降低了网络的阻塞率，优于固定路由的串行算法。在路由分配算法上还可以改进，有待以后进一步研究。

参考文献

1. Chien Chen & Subrata banerjee, "A New Model for Optimal Routing and Wavelength Assignment in Wavelength Division Multiplexed Optical Networks", INFOCOM'96 page:164-171

国家自然科学基金：60337010

2. Rajiv Ramaswami & Kumar N. Sivarajan , “Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks”, IEEE/ACM Transaction on Networking , VOL 3, NO.5, page489-500, October 1995
3. Dhritiman Banerjee & Biswanath Mukherjee, “A practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in communications, VOL 14, NO.5, page903-908, June 1996
4. Dirk Beckmann & Ulrich Killat, “Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks Using Genetic Algorithms”, Optical communications, VOL 10, NO.5, page:537-544, September-October 1999
5. 顾畹仪等, 全光通信网, 北京邮电出版社, 2000.6
6. 刘轩, 光通信网络的相关技术, 微计算机信息, 2005, (23)
7. 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”, 电子学报, VOL 28, NO.7 page23-27 2000.7
8. Ezhan Karasan & Ender Ayanoglu, “Effects of Wavelength Routing and Selection Algorithms on Wavelength Conversion Gain in WDM Optical Networks”, IEEE/ACM Transaction on Networking, VOL 6, NO.2, April 1998, p186-195

创新观点:

本文针对光通信网络中的路由和波长分配算法问题提出了一种有效的算法, 借助分层图模型把 RWA 问题转化为在分层图中寻找两接入点之间的最短路径问题, 简化了波长分配算法的复杂度, 并设计了一种路由和波长分配的算法, 由于在求最短路径问题的算法比较完善, 使得此算法有着良好的性能, 这一点从仿真结果中可以看出。

作者简介:

王天哲,男,汉, 籍贯北京, 1980 年 11 月出生, 现为北京交通大学光波技术研究所的硕士研究生.主要从事光通信网络规划方面的研究。作者在攻读研究生期间, 认真学习理论知识, 积极参加实验室的项目工作, 曾参与了实验室“全光网环路补偿”的国家自然科学基金项目, 并在路由与波长算法方面取得了一定的成绩。

Author Introduction:

Wang tianzhe, male, was born in Beijing November 1980. Now is studying in Optical-wave Technology Institute Beijing Jiao-tong University for master degree, majored in optical communication network. During studying time in school, author studied very carefully and work hard in the optical lab, have taken part in the item of National Natural Science Foundation of China, and maken a lot of efforts in the field of route and wavelength assigning algorithm.

导师简介:

延凤平, 教授, 北京交通大学光波技术研究所副所长兼党支部书记, 研究员, 博士生导师。在北京交通大学“光波科学技术与信息网及其应用”国家重点实验室的建设过程中承担了大量工作。主持和参加了多项国家“863”、国家自然科学基金等国家级重点项目。