

多粒度交换光网络路由和波长分配算法研究

张 宇, 李正斌, 徐安士, 吴德明

(北京大学电子学系区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 多粒度交换能减少交换节点中的交换矩阵规模及复用器和解复用器的数目, 从而降低其成本, 但是使得 RWA 问题变得较多纤光网更加复杂. 本文提出了一种称为多维空间图(MDS-G)的模型, 该模型能够全面准确地描述多粒度光网络中的资源状态, 基于该模型的算法能够将多粒度交换光网络的路由和波长分配两个通常分开解决的问题进一步解决, 从而得到较现有的方法更好的性能, 仿真也证实了这一点.

关键词: 光网络; 多粒度光交叉连接节点; 路由和波长分配算法; 多维空间图

中图分类号: TN929. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12A-093-05

The Routing and Wavelength Assignment Algorithm in Multi-Granularity Switch Optical Networks

ZHANG Yu, LI Zheng-bin, XU An-shi, WU De-ming

(Department of Electronic, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The use of multi granularity OXC in DWDM network results in reduction of the number of ports both for the switches and for the optical multiplexers and demultiplexers, which lead to cost saving. However, it introduces more difficulties for the routing and wavelength assignment problem. In this paper, a new model, called Multi Dimension Graph, is proposed to provide an exact description of the states of multi granularity WDM network. The algorithm based on the MDS-G can solve routing and wavelength assignment subproblems in multi granularity networks simultaneously. The simulation results prove that the algorithm based on the MDS-G performs better than existing algorithms that deal with routing and wavelength assignment separately.

Key words: optical networks; multi granularity optical (MG OXC); RWA; MDS-G

1 引言

随着通信业务量的快速增长和光网络技术的不断发展, 数百个波长可以复用进一根光纤, 而一根光缆中可以包含近千根光纤, WDM 网络的结构也正向格状网发展, 所有这些都会使 OXC 具有很大的规模. 因此, 我们有理由相信将来的 OXC 可能具有上百个光纤端口和上万个波长端口. 虽然光交换机的价格正在不断变低, 但其成本仍是 WDM 网络的重要组成部分. 多粒度光交叉连接节点(Multi Granularity OXC)扩展了传统的 OXC 的功能, 能支持多种粒度, 即光纤、波段和波长粒度的光交换. 其核心思想是通过光交叉连接节点的波长连接汇聚成大的波段或者光纤粒度的连接, 省去了解复用和复用的过程. 从硬件的角度看, 这意味着减少了多粒度交换节点中交换矩阵和光复用器、解复用器的端口数. 从而降低了生产和维护成本, 同时也降低了对再生的要求, 也使得光信号的传输时延减小. 通用多协议标签交换(GMPLS)对多粒度交换提供了协议上的支持, GMPLS 对 MPLS 的标签进行了更大的扩展, 将 TDM 时隙、光波长、光纤等也用标签进行统一标记, 具有了光层多粒度交换的接口能力.

在 WDM 网中采用多粒度交换可以简化节点结构、降低总成本, 但是路由和波长分配问题变得更复杂, 虽然自 2000 年就有有关多粒度交换的论文发表, 但集中于多粒度 RWA 问题的研究和仿真只有参考文献[2~5]. 在参考文献中的仿真

表明, 中间节点的业务融合比端到端的业务融合更吸引人, 在文献[3]中, 将已存在的波段作为对应于物理链路的虚拓扑, 当一个连接请求到达时, 首先在波段虚拓扑中采用固定可选路由和 First Fit 波长分配方法, 然后再在波长拓扑中应用该方法, 在文献[4]和[5]中提出了两种路由和波长分配方法, 一种叫做动态通道分配方法(DTA), 另一种叫做容量均衡静态通道分配方法(CBSA), 前者根据优先级对不同粒度的通道采用固定可选路由选择最优的通道组合, 然后使用 First Fit 进行波长分配, 后者在网络规划阶段把光纤和波段分配给网络, 然后采用自适应动态路由为每个连接请求得到最佳路由. 但是在文献[4]和[5]中都假定通道是非波长特定的, 这意味着在通道的入口和出口需要有足够的波长转换能力.

在传统的纯波长交换多纤光网中, 不同通道仅通过不同的波长来区别, 即只有波长连续性限制. 但是在多粒度网络中, 如果没有足够的波长变换器, 那么一个波段连接的各链路中分配的必须是不同光纤中的同一波段, 因为同一光纤中的不同波段由于使用的是不同的波长, 而不能构成一个光连接, 即具有了波段连续性限制. 因此, 在多粒度交换光网络中, 不同光纤必须给以不同的标记, 因为它们中的有些属于波长交换, 而有一些可能属于波段或光纤交换, 在进行路由和波长分配时必须考虑波长和光纤两个限制因素时, 从而使得 RWA 问题将变得更加复杂.

对一个有 M 条光纤、 W 个波长的网络, 其在功能等效于一个具有转换度为 M 的部分波长能力的 $M \times W$ 的波长网络^[6], 一个具有有限范围的波长转换能力的网络, 可达到与一个全波长转换网络非常接近的性能. 在本文中, 我们只考虑无波长转换的多纤 WDM 网络, 所有的光纤和波段都是波长特定的.

为了解决多粒度交换 WDM 格状网中多纤网络中的光层路由问题, 我们提出了一种新的路由和波长分配问题的虚拓扑模型, 称为多维空间图 MDS G. 本文研究采用 MG-OXC, 而且没有波长转换能力 WDM 网络. 该算法同时考虑了波长、波段和光纤的连续性限制, 可以将多粒度业务的路由和波长分配问题通过该算法可以同时解决. 也就是说该算法在为一个连接寻找路由的时候, 同时考虑了当前的波长被使用的信息, 所以, 可以得到比将路由和波长分配问题分开处理的那些算法更好的性能. 此外, 基于 MDS G 的算法不但可以实现端到端的业务融合, 而且可以实现中间节点的业务融合.

本文结构如下, 首先在第二部分给出了 MG-OXC 的一般结构, 在第三部分提出了 MDS G 模型, 在第四部分给出了基于 MDS G 模型的两种动态路由和波长分配算法, 在第五部分给出了这两种算法的数值仿真结果, 最后是结论.

2 MG-OXC 的结构

处理多粒度业务的 MG-OXC 的两种基本结构可见文献 [3, 4], 两种结构都可以实现波段和光纤交换, 其交换原理是一样的, 都是将进入的光纤中的一部分解复用成波段, 然后将波段的一部分解复用成波长, 输出时再逐级复用到波段和光纤. 它们之间的差别在于: 前者只包含光纤交换箱和波段交换矩阵, 进出节点的光纤共用同一个光纤交换矩阵, 波段交换也是如此; 而后者包含两个光纤交换和两个波段交换的矩阵, 进出节点的光路经过两个不同的交换矩阵.

如图 1 所示是我们给出的无波长变换器下的 MG-OXC 结构的原理图和相应的逻辑结构.

为了无阻塞地实现任意输入端口到任何输出端口的交换, 图 1 中左边的光纤交换和波段交换矩阵对于进来的光纤和波段起到了一个选择器的作用, 右边的波段交换和光纤交换矩阵对于离开节点的业务实现空间交换, 进来的业务可以根据交换矩阵的选择配置, 选择光层中光纤、波段和波长中的任一种粒度. 当然, 光纤交换矩阵也可以按照需要交换波段和波长业务, 波段交换矩阵也可以交换波长业务, 因此, 一个 MG-OXC 可以交换波长、波段或光纤, 或者是它们之间的任意组合.

因为两个相同的波长不能会汇聚进同一条光纤, 即当没有波长转换时只有合适的波长才可以复用进一条光纤, 对于波段的情况也是如此, 图 1 所示的波长交换矩阵只需要交换来自不同光纤的相同的波长, 波段交换矩阵只需要交换来自不同光纤的相同的波段. 可以看出, 水平端口之间永远不会发生交换, 交换只发生在垂直端口之间.

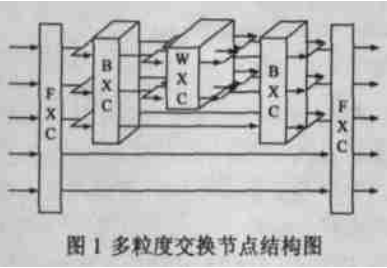


图 1 多粒度交换节点结构图

3 多维空间图

在 MDS G 中, 网络分成不同的虚拓扑空间, 每个虚拓扑空间代表一个波长空间, 在每个波长空间中, 原来网络的每个光节点分成不同层的虚节点, 同一层的虚节点表示原来在物理网络中的节点是相同的光纤端口. 根据原来物理节点之间的交叉连接结构, 使不同的虚节点相连, 虚节点之间的每一条边都由波长空间和光纤层唯一确定. 因此在 MDS G 中, 波长连续性限制很自然地通过将不同的波长分到不同的子空间表示出来, 从而每条可用的路径必须在同一个波长子空间中, 即给该路径分配相同的波长.

对于由 MG-OXC 构成的一个 WDM 网络, 我们定义一个网络模型 $G(N, L, F, B, W)$, 其中 N 是网络中物理节点的集合, L 是全部有向链路的集合, F 是一条物理链路包含的光纤集合, B 是一条光纤中波段的集合, W 是一条光纤的波长集合. 如果用 F^F 表示属于光纤交换的光纤的集合, F^B 表示属于波段交换的光纤集合, F^W 表示属于波长交换的光纤集合, 则集合 $F = F^F \cup F^B \cup F^W$.

假设每条链路有相同的光纤集合, 并且每条光纤有相同的波长集合和波段集合. 对于给定的网络模型 G , MDS G 可由下列步骤得到:

首先, 用下面的步骤得到一个波长空间 w 的子图.

1. 任意网络 G 中的每个节点 $a \in N$ 在 MDS G 中被复制 $|F|$ 次, 这些节点称为虚节点, 它们由 $V = \{v_a^{w,1}, v_a^{w,2}, \dots, v_a^{w,|F|}\}$ 表示. 集合 V 为虚节点的三个集合 V^F , V^B 和 V^W 的并集, V^F , V^B 和 V^W 分别表示对应 MG-OXC 的光纤交换端口、波段交换端口和波长交换端口的虚节点的集合. 对于网络中的任意节点 $v_a^{w,f}$, 当 $f \in F^F$ 时, $v_a^{w,f} \in V^F$; 同样当 $f \in F^B$ 时, $v_a^{w,f} \in V^B$; 而当 $f \in F^W$ 时, $v_a^{w,f} \in V^W$.

2. 如果在网络模型 G 中任意节点 a 和 b 之间有一条链路, 任何两个虚节点 $v_a^{w,j} \in \{v_a^{w,1}, v_a^{w,2}, \dots, v_a^{w,|F|}\}$ 和 $v_b^{w,j} \in \{v_b^{w,1}, v_b^{w,2}, \dots, v_b^{w,|F|}\}$ 之间由方向相反的两条边 $e_{a,b}^{w,j}$ 和 $e_{b,a}^{w,j}$ 相连, 其中 $v_a^{w,i} \in \{v_a^{w,1}, v_a^{w,2}, \dots, v_a^{w,|F|}\}$ 对应节点 a , $v_b^{w,j} \in \{v_b^{w,1}, v_b^{w,2}, \dots, v_b^{w,|F|}\}$ 对应节点 b , MDS G 中的边表示节点 a 和节点 b 之间的一条可能路径.

3. 为了表示上下路的连接请求, 在 MDS G 中, 需要为每个接入节点增加两个虚节点, 一个为源节点, 用 $v_a^{w,s}$ 表示, 它代表产生业务的节点 a 的实体. 另一个是目的节点, 用 $v_a^{w,d}$ 表示, 它代表吸收业务的节点 a 的实体. MG-OXC 中, 仅在波长端口有上/下路业务, 则在 $MDS G\{f^1, f^2, \dots, f^{|W|}\} = F^W$ 中, 增加从源节点到虚节点 $v_a^{w,f^1}, v_a^{w,f^2}, \dots, v_a^{w,f^{|W|}} \in V^W$ 和从虚节点 $v_a^{w,f^1}, v_a^{w,f^2}, \dots, v_a^{w,f^{|W|}} \in V^W$ 到目的节点的有向边. 否则, 在 $MDS G\{1, 2, \dots, |F|\} = F$ 中, 增加从源节点到虚节点 $v_a^{w,1}, v_a^{w,2}, \dots, v_a^{w,|F|} \in V$ 和从虚节点到目的节点的有向边.

然后, 将上面得到的子图复制 $|W|$ 次, 得到 $|W|$ 个代表不同波长空间的子图.

图 2 所示为一个多粒度网络拓扑的例子. 为了简单起见, 假定每条链路有三条光纤, 其中两条用于波长交换, 另一条用

于光纤交换. 每条光纤中有三个可用的波长, 按照上述步骤, 得到 MDS-G 如图 3 所示(为了看的更清楚, 在图中仅表示了节点 1 和节点 3 的源和目的节点.)

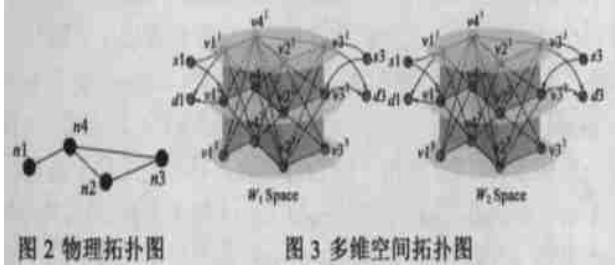


图 2 物理拓扑图

图 3 多维空间拓扑图

在图 2 中, 虽然节点 $n1$ 在不同的波长空间中对应的源节点(如图 3 中的 $s1$) 和目的节点(如图 3 中的 $d1$) 应该是同一个节点, 但是它们可以被分开, 因为从源节点到虚节点的边和从虚节点到目的节点的边是单向的.

在 MDS 图中, 波长连续性限制可以通过将不同的波长分成不同的子空间来表示, 由 MG-OXC 构成的网络的路由和波长分配问题就变成了在相应的 MDS-G 中寻找从源节点到目的节点的最小代价路径的问题. 最小代价路径所属的波长空间确定了分配哪个波长, 波长空间的路径将给出路由. 对于波长通道的边, 所有在 MDS-G 中不同的波长空间中的相应的边是独立的. 然而对于属于光纤通道和波段通道的边, 在不同波长空间中的相应的边是相关的. 当一个波段或者光纤通道被占用后, 不仅要将其光路所通过的边的代价设为无穷大, 而且要在其他的波长空间中相关的边的代价也设为无穷大.

4 基于 MDS-G 的动态 RWA 算法

利用多维空间图 MDS-G, 我们可以将在多粒度光网络中的路由和波长分配问题可以退化成在多维空间图 MDS-G 中寻找最小代价路径的问题. 而这个问题可以容易地使用 Dijkstra 算法或者 Bellman-Ford 算法解决.

4.1 边的代价函数的定义

多维空间图中每条边的代价定义是一个标量. 对于波长交换网络来说, 它可以表示物理距离, 时延或者是安全、服务质量或者性能. 对于多粒度交换光网络来说, 代价函数还要根据每条边所属的交换类型来定义. 在 MDS-G 中, 为每条边定义不同的代价函数会导致不同的资源分配策略. 下面我们给出基于 MDS-G 的边的代价函数定义如下:

对于边 $e_{a,b}^{m,i,j}$, 下标 a 和 b 表示在物理网络中的节点号, 其中 a 是起始节点号 b 是终止节点号, 上标 m 表示了该边在 MDS-G 中所属的波长空间, i 和 j 表示了该边在 MDS-G 中节点所在的光纤层号. 我们用 T^F 来表示光纤通道集合, F^B 代表波段通道集合, T^W 表示波长通道度集合, 其各自的定义和其代价函数如下:

$$C(e_{a,b}^{m,i,j}) = \begin{cases} \infty & \text{if flow is assigned to } e_{a,b}^{m,f1,f2}, f1= i \text{ or } f2= j \\ \infty & \text{or to } e_{a,b}^{w,i,f}, f \in F, f \neq j, j \in W, w \neq m \\ \infty & \text{or to } e_{a,b}^{w,i,f}, f \in F, f \neq i, j \in W, w \neq m \\ C_F + \delta_F \cdot \sum_{w \in W} O(e_{a,b}^{w,i,j}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$2. \text{ 当 } i \in F^B \text{ 且 } j \in F^B, \text{ 或者 } i \in F^F \text{ 且 } j \in F^B, \text{ 或者 } i \in F^B \text{ 且 } j \in F^F \text{ 时, } e_{a,b}^{m,i,j} \in T^B$$

$$C(e_{a,b}^{m,i,j}) = \begin{cases} \infty & \text{if flow is assigned to } e_{a,b}^{m,f1,f2}, f1= i \text{ or } f2= j \\ \infty & \text{or to } e_{a,b}^{w,i,f}, f \in F, f \neq j, w \in B(m), w \neq m \\ \infty & \text{or to } e_{a,b}^{w,i,f}, f \in F, f \neq i, w \in B(m), w \neq m \\ C_B + \delta_B \cdot \sum_{w \in W} O(e_{a,b}^{w,i,j}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$3. \text{ 当 } i \in F^W \text{ 或者 } j \in F^W \text{ 时, } e_{a,b}^{m,i,j} \in T^W$$

$$C(e_{a,b}^{m,i,j}) = \begin{cases} \infty & \text{if flow is assigned to } e_{a,b}^{m,f1,f2}, f1= i \text{ or } f2= j \\ \infty & \text{or to } e_{a,b}^{w,i,f}, i \in F^B, f \in F^B \cup F^F, w \in B(m), w \neq m \\ \infty & \text{or to } e_{a,b}^{w,i,f}, j \in F^B, f \in F^B \cup F^F, w \in B(m), w \neq m \\ \infty & \text{or to } e_{a,b}^{w,i,f}, i \in F^F, f \in F^F, w \in W, w \neq m \\ \infty & \text{or to } e_{a,b}^{w,i,f}, j \in F^F, f \in F^F, w \in W, w \neq m \\ C_W + \delta_W \cdot \sum_{w \in W} O(e_{a,b}^{w,i,j}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

约束条件为: $C(e_{a,b}^{m,i,j}) > 0 \quad \forall m \in W, \forall i \in F, \forall j \in F, \forall a \in N, \forall b \in N$

其中, C_F 表示光纤通道代价的初值, 为常数; C_B 表示波段通道代价的初值; C_W 表示波长通道代价的初值; δ_F 是一个用来调整光纤通道边的代价随着该边所属光纤中已占用波长数目的变化而变化的趋势系数. 与 δ_F 类似, δ_B 是一个用来调整波段通道边的代价随着该边所属光纤中已占用波长数目的变化而变化的趋势系数. 而 δ_W 则是一个用来调整波长通道边的代价随着该边所属光纤中已占用波长数目的变化而变化的趋势系数. $B(m)$ 表示波长 m 所在的波段的所有波长组成的集合. $O(e_{a,b}^{w,i,j})$ 表示边 $e_{a,b}^{w,i,j}$ 当前值是否为无穷, 其定义如下:

$$O(e_{a,b}^{w,i,j}) = \begin{cases} 1 & \text{if } c(e_{a,b}^{w,i,j}) = \infty \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

当光纤数目为 1, 并且网络是纯波长交换网络时, MDS-G 就蜕变成分层图^[7], 本文中的公式 (1), (2) 和 (3) 也变成简单一个公式:

$$C(e_{a,b}^{m,i,j}) = \begin{cases} \infty & \text{if flow is assigned to } e_{a,b}^{m,i,j} \\ C + \delta \cdot \sum_{w \in W} O(e_{a,b}^{w,i,j}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

采用分层图的算法同样可以将路由和波长分配问题同时解决, 但是分层图的算法不能适用于多粒度交换光网络.

4.2 基于 MDS-G 模型的多粒度 WDM 网络中的通道分配问题的数学描述

假设呼叫从节点 a 到 b 的请求到达, 令 $P_{a,b}$ 表示 MDS-G 中从 v_a^s 到 v_b^d 的所有可能路径的集合, 如果边 $e_{a,b}^{w,i,j}$ 在路径 p 上, 标志函数 $x(p, e_{a,b}^{w,i,j}) = 1$, 否则 $x(p, e_{a,b}^{w,i,j}) = 0$. 如果新的呼叫建立在路径 p 上, 则标志函数 $y(p) = 1$, 否则 $y(p) = 0$.

那么从节点 v_i^s 到 v_j^d 的最小代价函数 $Cost(p)$ 可以表示为

$$Cost(p) = \min \left\{ \sum_{w \in W} \sum_{p \in P_{i,j}} \sum_{e_{i,j}^{w,a,b}} C(e_{i,j}^{w,a,b}) \cdot x(p, e_{i,j}^{w,i,j}) \cdot y(p) \right\},$$

$$\text{约束条件为 } \sum_{p \in P_{a,b}} y(p) = 1$$

4.3 多粒度网络的动态 RWA 算法

采用任意最短路径算法,如 Dijkstra 算法,可以求解上面的问题。如果找到的最短路径代价 $Cost(p)$ 不是无穷大,则接受呼叫,按照找到的最短路径确定连接的路由和波长,否则呼叫阻塞。算法的具体方法如下:

步骤 1 将一个给定的网络拓扑 $G(N, L, F, B, W)$ 按照前面描述的方法映射成对应的 MDS G

根据公式(1)、(2)和(3),为 MDS G 中的所有的边定义初始代价。

步骤 2 等待光路请求当一个连接建立的请求到达时,则转向步骤 3;

当一个连接释放请求达到时,转到步骤 4。

步骤 3 使用 Dijkstra 算法找到在 MDS G 中的从源节点到目的节点的最短路径 p 。

(1) 如果路径代价 $Cost(p)$ 是无穷大,则阻塞该呼叫。

(2) 如果代价不是无穷大,则接受呼叫,并把 MDS G 中的最短路径映射成对应的光路和波长。

a. 把这条 MDS G 中的最短路径上的有向边和节点分别映射成 G 中的链路和节点,即把最短路径映射成 G 中的路由。

b. 如果最短路径在波长空间 w 中,则给该路由分配波长 w 。

c. 根据公式(1)、(2)和(3),更新路径 p 上的边的代价函数。注意:光路是双向的,所以需要同时更新代价函数 $e_{a,b}^{w,i,j}$ 和 $e_{b,a}^{w,j,i}$,转向步骤 2。

步骤 4 根据公式(1)、(2)和(3),按照连接的路由和波长更新对应光路上的边的代价函数。

步骤 5 释放光路,转向步骤 2。

注意边的代价不能直接根据公式(1)、(2)和(3)来刷新。但我们可以利用公式(1)、(2)和(3)得到连接建立和释放时边代价的修改方法。即当一个代价更新事件发生时,最短路经过的每条边根据其所属的交换类型,参照不同的代价函数定义进行代价修改。每条边的更新事件中都包含下面三个内容:1、更新最短路通过的边的代价;2、更改最短路所在波长空间中其他相关边的代价函数;3、更改在其他波长空间中相关边的代价函数。

此外,连接源节点和目的节点的边代价的修改要根据 MG-OXC 的结构而定。如果 MG-OXC 是不受波长交换矩阵端口数目的限制,那么这些边的代价不管是否被占用始终保持是一个常数,例如 1。否则,当被占用时,代价修改为无穷大,当被释放时设置为 1。

4.4 资源分配策略

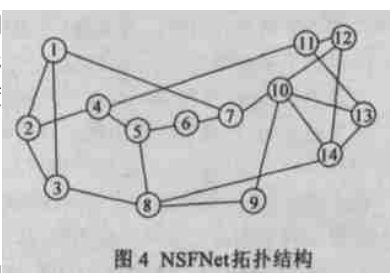
通道代价的初值不同对应着不同的通道分配策略。根据光纤、波段和波长三种通道的相对优先级,我们定义三种策略:光纤通道优先(Fiber Tunnel First, 简称为 FTF)、波段通道优先(Band Tunnel First, 简称为 BTF)、波长通道优先(Wave

length Tunnel First, 简称为 WTF)。对于波长通道,如果 $\delta_w < 0$,则代价函数的定义将导致波长通道尽可能集中在少数的光纤中,我们称之为集中策略(Wavelength Tunnel Pack, 简称为 WTP)。如果 $\delta_w > 0$,则代价函数的定义鼓励波长通道尽可能分散在不同的光纤中,我们称之为分散策略(Wavelength Tunnel Spread, 简称为 WTS)。与 δ_w 类似,对于波段和光纤通道,也有集中和分散策略,当 $\delta_b > 0$ 时,连接会被尽可能选择少数光纤上的波段通道,我们称之为 Band Tunnel Pack 策略,简称为 BTP。当 $\delta_b < 0$ 时,连接会尽可能地分散在不同的光纤上的波段通道中,我们称为 Fiber Tunnel Spread, 简称为 FFS。同样,当 $\delta_f < 0$ 时,连接会被尽可能地集中建立在少数的光纤通道上,我们称之为 Fiber Tunnel Pack 策略,简称为 FTP。当 $\delta_f > 0$ 时,连接会尽可能地选择建立在不同的光纤通道上,我们称为 Fiber Tunnel Spread, 简称为 FFS。

5 仿真

我们使用仿真来研究基于新模型的算法在多粒度光网络

中的性能。这里,我们只仿真只有波长和光纤两种粒度下各种策略的性能。仿真采用与 NSFNet 相同的拓扑,如图 4 所示。在该图中,每条边代表两条方向相反的物理链路。我们



假设每条有向链路的光纤数为 4, 每条光纤包含两个波段, 每个波段包含 4 个波长。在仿真中, 假定每个节点的交换结构是相同的。为了公平起见, 认为每个节点的上/下路容量没有额外的限制。假定连接请求按照泊松过程到达节点对 (s, d) , 且对于所有的节点对是均匀分布的, 每个连接请求一个双向波长信道。我们产生了 2×10^6 个呼叫, 以保证阻塞率达到稳态。并且将阻塞率随呼叫数变化曲线变得平坦之前的统计结果作为预热剔除。

首先, 我们来比较上面提到的不同的通道分配策略和它们的组合的性能, 实际上, 上面提到的策略只是 MDS G 的算法的基本分类, 不同的参数值会带来不同的阻塞性能。为了简单, 我们先考虑只有光纤和波长两个粒度时的情况, 然后考虑只有波段和波长两个粒度的情况。

表 1 仿真不同策略参数

(a)					(b)				
C_F	C_W	δ_F	δ_W	Schemes	C_B	C_W	δ_B	δ_W	Schemes
16	12	-1	-1	WTF, Pack	24	20	-1	-1	WTF, Pack
8	4	1	1	WTF, Spread	16	12	1	1	WTF, Spread
16	32	-1	-1	FTF, Pack	24	32	-1	-1	FTF, Pack
8	24	1	1	FTF, Spread	16	24	1	1	FTF, Spread

我们采用表 1(a) 所定义的值来代表在只有光纤和波长两个粒度下不同的资源分配策略及其组合, 在表中我们用 Pack 策略表示两种粒度都是集中策略, Spread 表示二种粒度都是分散策略。假定 4 根光纤中有 1 条光纤用于光纤交换, 其余 3 条

用于光纤交换. 表 1(b) 表示的是在只有波段和波长两个粒度下不同资源分配策略及其组合的参数定义. 同时, 我们假设 4 根光纤中有 2 根用于波段交换, 其余两根属于波长交换.

图 5 表示出了基于 MDS-G 的算法的不同策略的仿真结果. 图 5(a) 表示的是光纤和波长两个粒度情况下, 即表 1(a) 对应的仿真结果. 图 5(b) 表示的是表 1(b) 的参数对应的仿真结果. 由图 5(a) 可以看出: 光纤通道优先要优于波长通道优先的性能. 对于 Spread 和 Pack 策略的性能, 在光纤通道优先和波长通道优先的策略下表现并不一致. 在光纤通道优先的情况下, Spread 策略优于 Pack 策略. 其中性能最好的是 FF F, Spread 策略. 由图 5(b) 的结果可以看出: 在只有波段和波长两个粒度的情况下, 波段通道优先的阻塞率要低于波长通道优先. 其中性能最好的是 BF F, Spread 策略. 显然, 尽可能地将波长连接 Grooming 到光纤或者波段通道中, 这样会使得资源占用较少, 从而得到较低的阻塞率. 在此前提下, 通道采用分散策略的阻塞率要低于集中策略.

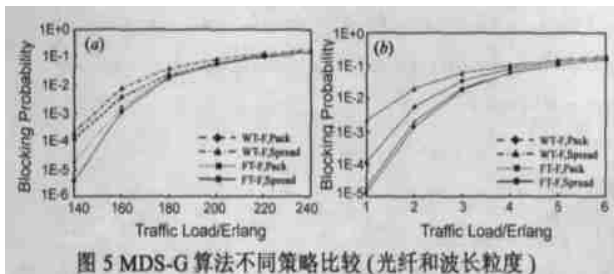


图 5 MDS-G 算法不同策略比较 (光纤和波长粒度)

然后, 我们取上面结果中性能最好的 FF F, Spread 策略, 来研究基于 MDS-G 的算法在不同的光纤通道比例下多粒度网络中阻塞率, 并将他们和纯波长交换网络的阻塞性能比较, 从而观察在相近的阻塞性能要求下, 基于我们提出的算法有多大比例的交换端口可以替换为光纤交换端口.

我们用于仿真比较的纯波长交换网络的 RWA 算法有: (1) 固定路由 First Fit 波长分配算法; (2) 固定可选路由随机波长分配算法; (3) 固定可选路由最小乘积波长分配算法. 基于 MDS-G 的算法分别研究了光纤通道端口占总端口比例为 25%, 50% 和 75% 情况下的阻塞率.

仿真结果如图 6 所示, 由仿真结果可看出, 在纯波长交换网中, 基于 MDS-G 的算法与传统算法, 如固定路由 First Fit 波长分配算法相比, 可以得到更好的性能, 也比固定可选路由最小乘积波长分配算法的性能好. 因为我们所提出的算法在选路过程中考虑了波长占用信息, 即把路由和波长分配问题同时处理, 所以可以得到更低的阻塞率. 同时可以看出, 随着网络链路中光纤通道比例的增加阻塞率增加. 当 4 根光纤中有 1 根和 2 根光纤是属于光纤交换时, 基于我们提出的算法得到的阻塞率, 仍然低于采用固定可选路由和 *Min-Product* 算法、在 4 根光纤都是波长交换的情况下的网络阻塞

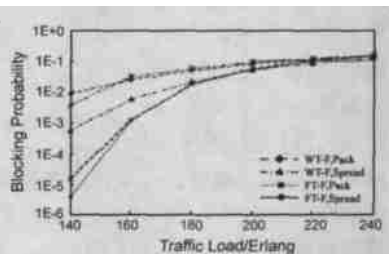


图 6 MDS-G 和现有算法的性能比较

率. 但是当 4 根光纤中有 3 根都是光纤交换时, 阻塞率恶化严重. 这是因为当只有一根光纤属于波长交换时, 网络中的独立波长交换数小于 *NSFNet* 所需的最少波长数 13.

6 结论

在本文中, 我们提出了一种处理多粒度业务 RWA 问题的新模型. 该模型能够准确地描述多粒度光网络的资源状况. 采用基于 MDS-G 的算法, 能够同时处理端到端业务汇聚和中间节点的业务汇聚, 并将这两种情况下的路由和波长分配问题同时解决. 通过对模型中代价函数的不同定义, 可以实现多粒度通道分配的不同策略, 本文也对不同的资源分配策略进行了仿真比较. 仿真结果表明: 在 *NSFNet* 中, 在每根光纤有 8 个波长的情况下, 即使网络中有 50% 的光纤被替换为光纤交换后, 采用 MDS-G 的 RWA 算法仍然能得到比全部光纤为普通波长交换时采用一些普通算法如: *FAR-FT* 算法更低的阻塞率. 这个结果也证明了在保证网络性能无明显恶化的情况, 可以用多粒度交换节点代替波长交换节点, 从而大大节省网络的成本.

参考文献:

- [1] E Mannie, et al. (2002). Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) architecture[DB]. Available: draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-02.txt
- [2] Ludovic Noirie, Martin Vigoureux, Emmanuel Dotaro. Impact of intermediate traffic grouping on the dimensioning of multi-granularity optical networks[A]. OFC2001[C]. TuG3.1.
- [3] Xiaojun Cao, Vishal Anand, Chunming Qiao. A Waveband Switching Architecture and Algorithm for Dynamic Traffic[J]. IEEE Communications Letters, Vol 7, No. 8, August 2003.
- [4] Pirhan Ho, Hussein T Moutfah. Routing and wavelength assignment with multigranularity traffic in optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, Vol. 20 No. 8, August 2002.
- [5] Pirhan ho, Hussein T Moutfah. Path selection with tunnel allocation in the optical internet based on generalized MPLS architecture[J]. in Proc. IEEE Int Communications Conf (ICC'02), 2002. 2697- 2701.
- [6] A Mokhtar, M Azizoglu. Adaptive wavelength routing in all optical networks[J]. IEEE/ACM Trans. Networking, Vol. 6, 197-206, April 1998.
- [7] Chien Chen and Subrata Banerjee. A New Model for Optimal Routing and Wavelength Assignment in Wavelength Division Multiplexed Optical Networks[J]. in Proc. IEEE ICC, 1997. 406- 410.

作者简介:



张 宇 男, 1972 年生于山西原平, 2001 年进入北京大学攻读博士学位, 主要研究方向为 WDM 网络规划设计, 光交换及协议. E-mail: zhangyu@ele.pku.edu.cn.

李正斌 男, 1965 生于四川夹江, 北京大学副教授, 主要研究方向为光网络理论、光通信系统与网络、光传感、光波导理论与器件、光子晶体与光信号处理;