

## WDM 网络中稀疏多纤及波长配置算法<sup>1</sup>

向 兵 王 晟 李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

**摘 要:** 由于成本及技术的原因, WDM 光网络中的波长变换设备资源和单纤波长数有限, 但在网络建设时, 会预留富裕的光纤, 如何依据动态业务有效利用这些光纤降低网络阻塞率, 并优化单纤波长配置以满足网络性能, 具有现实意义. 该文提出了一种 WDM 网络的稀疏多纤及波长配置算法, 该算法基于动态业务. 仿真结果表明, 利用稀疏多纤的网络配置, 只需要较少的单纤波长即可满足网络阻塞性能要求.

**关键词:** 稀疏多纤, 动态业务, SPA, 分层图

**中图分类号:** TN919.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)01-0001-06

## A Sparse Multifiber and Wavelength Assignment Algorithm in WDM-Networks

Xiang Bing Wang Sheng Li Le-min

(*Nat. Key Lab of Broadband Opt. Transm. and Comm. Networks,  
UEST of China, Chengdu 610054, China*)

**Abstract** Constrained by the price and technology, not only the wavelength converters laid in WDM network but also the Wavelength Per Fiber (WPF) is limited. But there are usually some spare fibers in links, so it is important to make full use of these fibers to lower the blocking probability in WDM networks. This paper proposes a sparse multifiber and wavelength assignment algorithm based on dynamic traffic service WDM-networks. The simulation results show that by assigning sparse multifiber, the blocking performance can be obtained with fewer number of WPF.

**Key words** Sparse multifiber, Dynamic traffic, Shortest Path Algorithm (SPA), Layered-Graph (LG)

### 1 引言

随着 IP 业务的指数型快速增长, 利用波分复用 (WDM) 技术构建业务主干网已成为必然趋势, 对波分复用技术的研究, 开发和运用都取得了快速发展. WDM 的最大优势在于通过适当的波长路由技术, 提供端对端的光路. 现代光通信网络的物理拓扑通常由具有 WDM 接口的边缘路由器接入节点和由光交叉连接设备 (OXC) 的节点组成的波长路由核心网络通过光纤互连而成<sup>[1,2]</sup>, 因此在 WDM 网络中存在着可用波长数量、收发器数量、带宽粒度等限制, 为了优化网络性能就必须使用路由和波长分配 (RWA) 算法. 在研究 WDM 网络的波长路由时, 主要从光域的角度来研究在静态业务网络和动态业务网络中有 / 无波长变换时波长分配和路由选择方案对网络阻塞的影响. 目前, 较多注意力集中在对单纤 (本文中指用于双向传输的一对光纤, 相应的多纤即用于双向传输的多对光纤) 网络中有限波长路由分配问题的研究<sup>[3]</sup>. 一些文献研究了多纤网络中有限波长路由分配问题<sup>[4,5]</sup>, 文中推出相应的整数线性规划 ILP 公式, 并由此提出了各自的启发式算法. 但这些算法都基于静态业务, 也没考虑多纤的稀疏配置问题,

<sup>1</sup> 2002-08-26 收到, 2002-12-09 改回

国家自然科学基金项目 (60002004) 及教育部科学技术研究重点项目 (02064) 资助课题

即在网络中根据不同链路的负载情况配置不同数目的光纤。特别是当网络光纤资源有限或因造价的限制,只在某些特定链路上配置多纤,而对于负载较轻的链路则只配置单纤。另外,基于静态业务的多纤配置对波长的优化效果不十分明显<sup>[5]</sup>。

通过多种 RWA 算法的结果分析,一条路由的阻塞率主要受该路由的最大无波长变换器(Wavelength Converter, WC)的分段长度(跳数)影响;同时,路由所经过的链路的波长数也对其阻塞率有极大的影响<sup>[6,7]</sup>。在多纤的链路中即使没有波长变换器,但由于增加了可用的波长,也会改善网络的性能,降低阻塞率。如图 1 所示,链路(2,3)的负荷较重,因此配备双纤。图中标出了各链路可以使用的波长,若需建立  $1 \leftrightarrow 4$  及  $2 \leftrightarrow 5$  两条光路,选用  $\lambda_1$  即可。若链路(2,3)为单纤,则不能同时建立这两条光路,网络会发生阻塞。

由于单根光纤的价格相对于整条光缆来讲十分低廉,考虑到今后发展的需要和建设成本,通常敷设光缆时,光纤数有一定富裕。另外,相对于波长变换器,光纤的价格也较低。因此,在无波长变换器的 WDM 网络中利用多光纤链路来降低网络阻塞,具有现实意义。

针对以上需要,本文提出了一种在动态业务 WDM 网络中配置稀疏(Sparse)多纤的方法,并在此基础上优化波长配置。以下内容是这样安排的:首先在第 2 节问题描述部分列出多纤路由问题的优化目标,接着在第 3 节介绍了多纤的配置方案,在此基础上在第 4 节中提出了基于波长分层图的启发式动态波长优化配置算法,最后是仿真结果分析及总结。

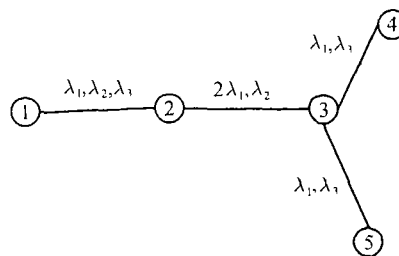


图 1 波长分配示例

## 2 问题描述

假设网络物理拓扑已经给定如下:

核心网络中,每条链路至少由一对用于双向传输的单光纤互连而成,每段光纤的长度一样,每个节点均由终端设备直接连接在 OXC 上, OXC 的发送机及接收机的端口数不受限制,每根光纤(含链路内的光放大器及 WDM 复接器等)的波长数记为  $W$ , 接入节点到核心网络的带宽及处理能力足够大,不存在瓶颈;用  $P_{mn}$  表示物理拓扑中连接 OXC 节点对  $m$  和  $n$  的光纤数量,对于双向的链路,  $P_{mn} = P_{nm} = k$  表示节点对  $m$  和  $n$  间存在  $k$  对光纤,当  $k = 0$  时表示节点对间不存在光纤连接。

为降低成本,网络内光缆可以提供的富裕光纤数量有限(设为  $F_c$ ),优化的目标是如何安排链路光纤的数量,在 WDM 网络中部分链路上配置多纤,从而使光纤中所需波长数最少,即 Minimize  $W(F_T)$ , 其中  $F_T$  为光缆中可以使用的的光纤数,即  $F_T = \sum_{m,n} P_{mn}$ 。

由于光缆的布局与单纤波长数量都与网络的阻塞性能密切相关,而且无波长变换器 WDM 网络的 RWA 需要满足波长连续性的条件,同时动态业务的网络资源不断在变化,要列出相应的整数线性规划(ILP)方程对目标函数求解几乎不可能。因此必须找出相应的启发式算法,本文提出的方法是先在 WDM 网络中配置稀疏多纤,然后根据动态业务优化单纤波长数。

### 3 稀疏多纤配置方案

稀疏多纤配置的目标是: 根据网络结构和光纤资源以及业务分配, 在某些特定链路上配置多纤, 而对于负载较轻的链路则只配置单纤。

在文献 [4] 中提出了在基于 MNH (Minimum Number of Hop) 的多纤配置启发式算法: 最长的 MNH 对应的光路优先安排直至所有光路安排完毕, 在安排光路的过程中添加光纤, 若遇到具有相同 MNH 节点对, 则分别调整光路安排的顺序微调光纤数直至最优。该方案计算量大, 同时也没有考虑到光纤数量限制的条件。为弥补该算法的不足, 考虑如下改进的启发式算法:

考虑光缆中可使用纤的数量为  $F_T$ , 网络中链路数为  $L$ , 则富裕光纤数为  $F_e = F_T - L$ , 由于通常情况下, 一条路由的阻塞率主要受该路由的最大无波长转换器的分段长度 (跳数) 影响, 本文考虑无波长变换器的情况, 因此可以选择最短路算法 (Shortest Path Algorithm, SPA) 作为启发式算法的主要依据, 以降低网络阻塞率。

本文考虑的多纤配置方案依据这样一个基本概念: 在 WDM 网络中, 各节点对间的业务量相同 (假定为一个波长单位) 且连接请求等概率到达, 节点对间的光路为寻求最低阻塞应遵循 SPA 选路原则; 若单纤中波长数无限制, 则网络中各链路的使用频率不一样, 在使用频率高的链路, 其需要的波长数较多, 因此在单纤波长数固定的情况下应增加光纤数量。

配置方案描述如下:

- (1) 根据网络物理拓扑, 用 SPA 算法找出各节点对间的最短路由, 统计各链路的使用频率, 并按降序排列。
- (2) 在使用率最高的链路上加纤, 并将其使用率降低为  $1/\alpha$ , 重新降序排列各链路的使用率。
- (3)  $F_e \leftarrow F_e - 1$ , 若  $F_e$  不等于 0, 则转 (2), 否则停止。

由于网络结构的限制, 增加光纤不能使链路中的各光纤业务负荷平均分担, 因此应取  $1 < \alpha < 2$ 。关于  $\alpha$  的具体值, 应根据网络的物理拓扑, 链路的负荷情况以及网络的光纤资源等条件决定, 不属于本文的研究范围, 将作为今后的研究工作。

通过以上方法, 可以方便简捷地根据网络光纤资源配置多纤, 在本文后面的仿真中可以看到, 该方法对降低网络阻塞率也十分有效。

### 4 波长优化配置

在这一节先介绍波长优化算法基于的波长分层图模型, 然后具体描述算法步骤。

#### 4.1 基于网络物理拓扑的分层图模型

文献 [8] 提出了利用分层图 (Layered Graph, LG) 一次性解决 WDM 网络路由选择和波长分配问题, 其基本思路是:

以  $G(\mathcal{N}, \mathcal{L}, \mathcal{W})$  表示网络的物理拓扑, 其中  $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$  为节点集, 节点由不具备波长变换能力的 OXC 组成, 其数量为  $N$ ;  $\mathcal{L} = \{l_{ij} | i, j \in \mathcal{N}\}$  代表双向链路集, 这样链路一旦使用, 则可建立双向通道;  $\mathcal{W}$  代表波长集, 假设各光纤的波长数相等, 每条光纤的波长集都为  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|\mathcal{W}|}\}$ 。光连接为动态的, 每时刻只有一个连接请求出现在相同的节点, 为分析方便, 连接请求的带宽规定为一个波长单位。

按照如下步骤可产生分层图  $LG(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ :  $G$  中的每个顶点  $n \in \mathcal{N}$  在  $LG$  中被复制了  $|\mathcal{W}|$  次, 对应顶点  $v_n^1, v_n^2, \dots, v_n^{|\mathcal{W}|}$ 。  $LG$  中各顶点之间的连接方式与  $G$  相同, 即若  $G$  中节点  $n$  与  $m$  之间存在链路  $l_{mn} \in \mathcal{L}$ , 则对于任意  $w \in \{1, 2, \dots, |\mathcal{W}|\}$ ,  $LG$  中的所有顶点  $v_n^w$  和  $v_m^w$  之间也存在弧  $e_{mn}^w$ 。这样,  $LG$  中的每个层代表了一个波长, 称为波长平面, 由于各顶点的 OXC 无波长转换的能力, 因此各波长平面相互独立。对于多纤的链路, 在  $G$  中表现为链路两端点间有多条重边, 映射到  $LG$  每个层上在相应的端点间也存在相应的多条弧。

至此, 可以建立物理拓扑中的连接与分层图中的通路映射关系。这样 RWA 问题就可以通过在每个波长平面计算路由, 如果在该波长平面找到一条从源节点到宿节点的光路, 则可分配该波长。

#### 4.2 启发式算法描述

按照第 3 节所述方法配置完多纤 WDM 网络后, 优化的目的即是使单纤波长数最少。根据文献 [6] 所述, 网络阻塞率与所使用的 RWA 算法相关性极高, 鉴于多纤配置方案采用基于 SPA 的启发式算法, 本文对波长的优化也是基于 SPA 的。下面给出该算法的详细步骤:

(1) 将给定的网络物理拓扑  $G(N, \mathcal{L}, \mathcal{W})$  转换为分层图  $LG(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ ,  $\mathcal{V}$  中节点标号如上所述。初始化  $LG$  中每条弧的成本为 1。

(2) 产生连接请求, 分别在各波长平面中使用 SPA, 若找到最短路, 则选择其中成本代价最小的波长分配给该请求, 删除对应波长平面占用的光路 (反映在波长平面上即为相应的弧, 当该连接请求释放时, 则应重新连接对应光路), 等待下一次连接请求; 否则丢弃该请求, 记为网络阻塞。

(3) 产生新的连接请求, 重复步骤 (2) 直至连接请求足够多时, 计算网络阻塞率, 并与前一次计算的阻塞率比较 (初始化时, 网络阻塞率设为  $\infty$ ), 当阻塞率变化足够小时, 则停止; 否则增加单纤波长数, 转 (1)。

重复以上步骤即可得到为满足网络阻塞性能所需的单纤波长数。下一节将针对 NSFNET, CERNET 进行仿真, 并对其结果做出分析。

### 5 仿真及结果分析

本文仿真采用的物理网络拓扑为: 14 节点 21 链路的 NSFNET 及 10 节点 16 链路的 CERNET, 如图 2 和图 3 所示。

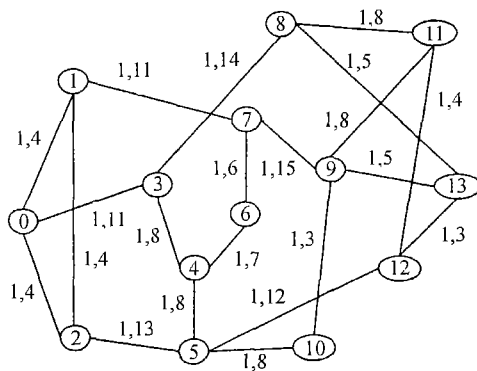


图 2 NSFNET:  $G(14, 21)$

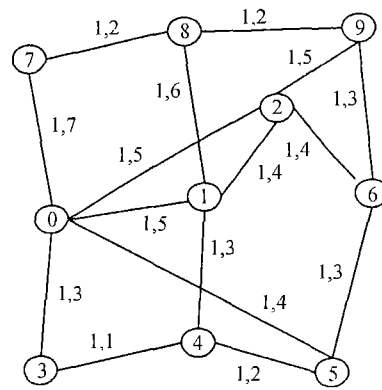


图 3 CERNET:  $G(10, 16)$

按第 3 节所述方法计算的各链路使用率标于图中相应链路上, 每条链路标记的第 1 个数字为链路的成本, 第 2 个数字为链路使用率。仿真过程如下:

假设连接请求的到达相互独立且服从参数为  $\lambda$  的泊松分布, 光路建立后的服务时间服从均值为  $\mu$  的负指数分布, 则全网的总负载为  $\beta = \lambda/\mu$  (Erlang)。光路建立请求的源宿节点对在节点中随机选定, 所有节点对间的业务量分布相同设为单位波长容量。当光路建立请求被拒绝时, 则立即丢弃, 即假设网络节点不设等待队列。对网络的每个到达率, 都统计了  $10^6$  个连接建立请求。仿真中只考虑链路最多可设置为双纤, 所以设置双纤的链路依照其使用率由高至低顺序选取, 例如, 在 NSFNET 中, 6 链路双纤分别设置在使用率最高的前 6 条链路 (7, 9), (3,

8), (2, 5), (5, 12), (0, 3), (3, 4) 上, 余类推。仿真结果分别绘于图 4 及图 5 中, 图例中 N 表示 NSFNET 网, C 表示 CERNET 网。

图 4 反映的是在不同网络负载下网络阻塞率的变化, 仿真结果表明: (1) 单链路设置双纤对网络阻塞性能有不同程度的改善, 设置在使用率较高的链路其改善较大, 在网络负载较低时性能改善较大; (2) 设置双纤的链路越多对网络性能的改善越大, 但并不是光纤数越多越好, 因为网络中可用的光纤数有限而且光纤数的增加并不与网络性能的改善成比例, 即当光纤数增加到一定数目后, 网络性能改善有限。为便于比较, 图 4 中只绘出了单纤波长数 ( $W/F$ ) 为 4 的情况, 网络阻塞率较高。

图 5 反映了单纤波长数与网络阻塞率的关系, 仿真结果表明: 在网络中部分链路设置双纤后启发式算法可较快收敛于一个确定的波长, 例如对于 CERNET 网, 当网络负载为 50 时, 采用 8 链路双纤, 单纤波长为 4 即可使网络无阻塞, 即优化目标  $W(F_T) = 4$ 。

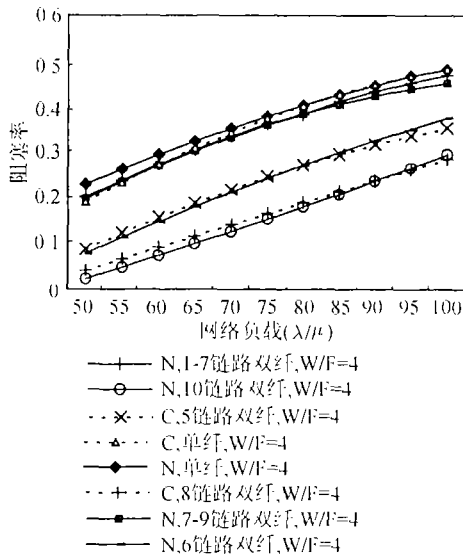


图 4 网络负载与阻塞率关系图

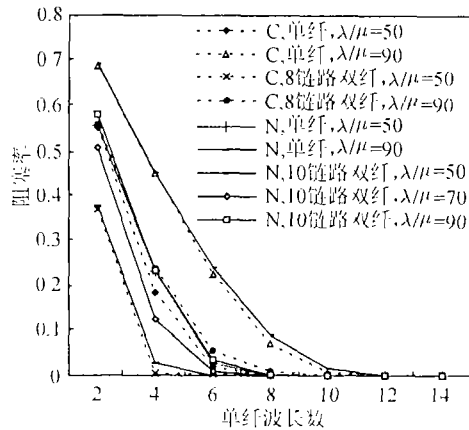


图 5 单纤波长数与阻塞率关系图

## 6 结束语

由于成本的限制因素, 使得 WDM 光网络在目前建设中不可能配置较多的波长变换设备而且现有的光技术也限制了可得到的单纤波长数; 但同时由于光纤价格低的原因, 为满足网络发展的需要, 往往在网络建设时, 会预留富裕的光纤, 如何依据动态业务有效利用这些光纤降低网络阻塞率, 以及如何优化单纤的波长配置以满足网络性能, 具有现实的意义。本文提出了一种基于动态业务 WDM 网络的稀疏多纤及波长配置方法, 仿真结果表明, 利用稀疏多纤的网络配置, 只需要较少的单纤波长即可满足网络阻塞性能要求。

## 参 考 文 献

[1] Biswanath Mukherjee. WDM optical communication networks: Progress and challenges. *IEEE J. on Select. Areas in Comm.*, 2000, 18(10): 1810-1823.  
 [2] Yufeng Xin, et al. On the design of MPAS networks. Technical Report, North Carolina State University, 2001, <http://www.csc.ncsu.edu/faculty/GRouskas/Publications/index.html>.

- [3] Jin Seek Choi, Nada Golmic, *et al.*. A functional classification of routing and wavelength assignment schemes in DWDM networks. Proc. of the 7th International Conf. on Optical Communication and Networks, OPNET 2000, Paris, France, January 2000: 1109–1115.
- [4] Stefano Baroni, *et al.*. Analysis and design of resilient multifiber wavelength-routed optical transport networks. *J. Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 743–758.
- [5] Esa Hyytia, Jorma Virtamo. Wavelength assignment in multifiber in WDM-networks. COST257 TD(99)04, January 1999, <http://keskus.hut.fi/tutkimns/cost257>.
- [6] Xiaowen Chu, Bo Li, *et al.*. Wavelength converter placement under a dynamic RWA algorithm in wavelength-routed all-optical networks. IEEE ICCAS & WeSino Expo 2002, Chengdu, China, 2002: 865–870.
- [7] 张雷, 李乐民. XGM 波长变换器网络的路由波长分配算法. 电子与信息学报, 2002, 24(1): 145–150.
- [8] Chien Chen, Sabrata Banerjee. A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks. *IEEE INFOCOM, San Francisco*, April 1996: 164–171.

向 兵: 男, 1970 年生, 博士生, 目前主要研究方向为: WDM 光网络技术.

王 晟: 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 目前主要研究方向为: ATM 技术、WDM 光网络技术.

李乐民: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师、中国工程院院士. 目前主要研究方向为: 宽带通信网和数字信息传输.