

# 波长转换对抗毁多光纤网状 WDM 网络的性能影响<sup>1</sup>

王 焯 李乐民 王 晟

(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** 目前研究波长转换器对 WDM 网络性能影响的文献一般都是针对单光纤网络并且不考虑网络抗毁的要求,该文使用整数线性规划建模和动态系统仿真的方法,分别研究了静态业务和动态业务下,多光纤网状 WDM 网络在满足抗毁要求时,节点配置波长转换器对网络性能的影响,以此对使用波长转换器获得的好处给出较为全面的结论。

**关键词** 波分复用, 波长转换, 工作光路, 保护光路, 阻塞率  
**中图分类号** TN913.24

## 1 引 言

波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 网络中的路由节点将输入波长转换到不同的输出波长上,称为波长转换 (Wavelength Conversion or Wavelength Translation)。当 WDM 网络中的节点具有波长转换能力时,光路在它经过的不同的链路上可以使用不同的波长,波长在建立光路时可以逐段配置,从而克服 WDM 网络特有的波长连续性限制 (Wavelength Continuity Constraint)<sup>[1]</sup>。波长转换可分为全波长转换 (Full-Range Translation) 和有限波长转换 (Limited-Range Translation),前者可将任意输入波长转换到任意输出波长上,后者则只能将任意给定的输入波长转换到有限范围内的输出波长上<sup>[2]</sup>。此外,只在部分网络节点配置全波长转换器的情况,称为稀疏波长转换<sup>[3]</sup>(Sparse Wavelength Translation)。无波长转换能力的路由节点称为波长选择交叉连接器 (Wavelength Selective Cross-Connect, WSXC),有波长转换能力的路由节点叫波长转换交叉连接器<sup>[1]</sup>(Wavelength Interchanging Cross-Connect, WIXC)。

使用波长转换器获得的益处与很多因素(如网络拓扑、每根光纤的最多波长数、每条链路包含的光纤数、业务量负载、路由和波长分配算法等)有关<sup>[1]</sup>,另外还和网络是否采用保护机制有关(见本文第 4 节),因此分析和研究波长转换对网络性能的改善程度以及此种改善和上述各因素的关系,对合理设计 WDM 网络有重要意义。近年已有不少文献就动态业务下波长转换对降低光路建立阻塞率方面的作用作了研究<sup>[1-3]</sup>,并得到了一些理论或仿真结果,但是这些文献都仅仅考虑光路连接没有抗毁要求的情况,网络在动态业务下的保护问题最近已引起了一些学者的关注<sup>[4,5]</sup>。需要说明的是:动态业务下基于呼叫(WDM 网络中指光路连接请求)的保护和网络部件失效时的动态恢复<sup>[6]</sup>是不同的概念:前者是指连接请求随机到达和离开网络,网络在呼叫建立阶段寻找两条链路/节点分离的路由;一条作为工作路由并分配合适的资源;另一条作为保护路由并在其经过的链路上预留资源,当工作路由失效时启动保护路由承载原有的业务;在文献[5]中,这种有抗毁要求的连接被称为可靠的连接 (Dependable Connection);由于保护路由是在呼叫建立阶段确定并同时预留了冗余资源,因此仍属于保护的范畴(或称之为 proactive 方法<sup>[5]</sup>)。后者则是在网络部件失效之后实时寻找路由和可用资源建立新的通路来恢复受到影响的业务,称为恢复(或称之为 reactive 方法<sup>[5]</sup>)。

目前研究 WDM 网络生存性的文献多数都是在业务量矩阵 (Traffic Matrix) 给定的情况下优化网络的资源配置,但一般只考虑了网络链路使用单光纤的情况<sup>[7]</sup>,存在的局限性是当网络节点间的业务量需求较大时,必须允许每根光纤包含充分多的可用波长,以容纳所需的业务量,这在实际应用时可能会受到光器件技术的限制而无法实现。实际上,网络链路使用多光纤

<sup>1</sup> 2000-03-06 收到, 2000-08-17 定稿

国家科学自然科学基金重大项目(基金号 69990540)资助

代替单光纤, 就可以解决增加可用波长数的问题<sup>[8]</sup>。研究抗毁多光纤 WDM 网络的应用的文献尚不多见, 文献 [8] 只涉及了静态业务下波长转换的性能研究, 并且只给出了通道保护的整数线性规划 (Integer Linear Programming, ILP) 模型。

在本文的第 2 节中, 我们针对多光纤 WDM 网络, 使用 ILP 法建立全新的优化模型进行抗毁设计, 并以此来研究波长转换在静态业务下对网络容量分配的影响。接下来, 我们在第 3 节中用仿真的方法研究了动态业务并提供可靠连接的情况下, 波长转换对连接请求阻塞率性能的影响。本文只考虑单链路失效时网络能 100% 恢复业务的情况, 即一条工作光路对应一条保护光路, 并且两者不经过相同的链路。(虽然允许一条工作光路与一条保护光路或多条保护光路在若干条链路上共享波长通道的做法可以增加网络接纳的光路连接数<sup>[5]</sup>, 但这是以牺牲 100% 的恢复率为代价的, 因此未必适用于骨干网络。) 所有 ILP 问题的计算结果和动态业务下的仿真结果在第 4 节中给出, 最后的第 5 节总结全文。

## 2 静态业务下抗毁多光纤 WDM 网络容量分配的 ILP 表述

在用 ILP 方法对 WDM 网络使用的不同保护策略进行描述之前, 我们假定: (1) 业务量矩阵和网络拓扑  $G(N, E)$  给定, 其中  $N$  代表网络节点数,  $E$  代表网络链路数, 业务量矩阵中的元素代表网络节点对之间要求建立的光路数<sup>[7]</sup>。网络中的链路均由双向光纤构成 (即没有传输方向的限制), 因此物理拓扑可看作无方向图 (Undirected Graph)。网络的物理连接度  $\alpha = 2L/[N(N-1)]$ <sup>[8]</sup>。我们只考虑节点对之间的业务量是对称的情况, 此时需要考虑的节点对有  $N(N-1)/2$  个。(2) 工作光路、保护光路的路由、链路保护机制中的链路备用路由都预先确定 (使用  $k$ -shortest path 方法<sup>[8]</sup>)。(3) 存在链路直接相连的节点之间至少铺设一根双向光纤, 这一点符合工程实际。(4) 为了保证网络的可靠性和各种保护机制的实现, 网络任意两个节点子集 (Node subset) 之间至少有两条链路相连。

静态业务下使用的保护方式分为: (1) 通道保护。在网络设计阶段端到端 (end-to-end) 地为每条工作光路设置链路完全分离 (Link-disjoint) 的保护路由, 并在保护路由经过的链路上预留相应波长。节点无波长转换能力且工作光路与对应的保护光路可以使用不同波长的情况简称为 P-TT-WSXC, 节点有波长转换能力的情况简称为 P-WIXC。(2) 链路保护。在网络设计阶段, 在工作光路经过的链路附近设置备用路由并预留相应波长, 当一条链路失效时, 使用它的所有工作光路直接在此链路附近寻找备用路由和波长, 绕过失效部分而无需源-目的节点参与, 工作光路上未失效的部分则保持原状。节点无波长转换能力和有波长转换能力的情况分别简称为 L-FT-WSXC 和 L-WIXC。

### 2.1 WDM 网络节点有波长转换能力

2.1.1 节点有配置 WIXC 时描述网络模型的符号说明 除了业务量矩阵和网络拓扑给定, 已知的量还有: 节点对编号  $i$ ,  $1 \leq i \leq N(N-1)/2$ ; 每根光纤中的最多可用波长数  $W$ , 假定网络中的链路使用波长数相同的光纤, 链路可以包含数目不等的光纤; 节点对  $i$  的工作光路集合  $R^i$ , 集合中的光路数为  $M^i$ ,  $1 \leq i \leq N(N-1)/2$ ; 链路  $j$  发生失效时,  $1 \leq j \leq E$ , 节点对  $i$  的保护光路集合  $R_j^i$ ,  $1 \leq i \leq N(N-1)/2$ , 用  $b$  表示此集合中的光路数; 链路  $j$  邻接的备用路由  $\text{alternate-route}(j)$ , 用于描述共享链路保护,  $1 \leq j \leq E$ ; 节点对  $i$  之间的业务量需求  $d^i$ , 即节点对  $i$  之间要求建立的光路数,  $1 \leq i \leq N(N-1)/2$ 。

需要求解的未知量包括: 链路  $j$  包含的光纤数  $f_j$ ,  $1 \leq j \leq E$ ,  $f_j$  至少为 1;  $\pi_p^i$ : 如果节点对  $i$  之间的通路  $p$  作为工作路由, 则  $\pi_p^i = 1$ , 否则  $\pi_p^i = 0$ ,  $1 \leq i \leq N(N-1)/2$ ;  $\delta_{p,r}^{i,j}$ : 链路  $j$  失效时, 节点对  $i$  之间的工作光路  $p$  恢复到保护光路  $r$ , 则  $\delta_{p,r}^{i,j} = 1$ , 否则  $\delta_{p,r}^{i,j} = 0$ ,  $1 \leq j \leq E$ ,  $1 \leq i \leq N(N-1)/2$ ;  $l_r^j$ : 链路  $j$  失效时, 经过  $j$  的工作光路使用邻近  $j$  的通路  $r$  作为备用路由则  $l_r^j = 1$ , 否则  $l_r^j = 0$ ,  $1 \leq j \leq E$ ;  $m^j$ : 代表链路  $j$  上的空闲波长数,  $1 \leq j \leq E$ 。

### 2.1.2 不同保护策略的 ILP 描述 所有 ILP 问题的优化目标

$$F_T = \text{Minimize} \sum_{j=1}^E c_j f_j$$

$c_j$  是链路  $j$  的加权值, 本文假设链路的加权值都为 1, 因此所有 ILP 问题的优化目标均是使全网使用的光纤数  $F_T$  最少.

(1) 无保护情况 (Without any protection) 当网络节点具有全波长转换能力时, 波长的分配可以以链路为单位逐段进行, 光路在其经过的链路上可以使用不同的波长, 此时光路用它的路由  $p$  即可唯一标识, 因此对应 ILP 问题中的变量和约束与波长  $w$  无关. 无任何保护的约束条件为

$$f_j \geq 1, \quad \text{整数}, \quad 1 \leq j \leq E \quad (1)$$

$$\pi_p^i \geq 0, \quad \text{整数}, \quad 1 \leq i \leq N(N-1)/2 \quad (2)$$

节点对之间的业务量需求应满足:

$$d^i = \sum_{p=1}^M \pi_p^i, \quad 1 \leq i \leq N(N-1)/2 \quad (3)$$

路由节点有波长转换能力时, 链路  $j$  中的  $Wf_j$  条波长可以被任何工作光路使用

$$\sum_{i=1}^{N(N-1)/2} \sum_{p \in R^i: j \in p} \pi_p^i \leq Wf_j, \quad 1 \leq j \leq E \quad (4)$$

(2) 共享通道保护 (Shared-path protection) 约束条件 (1), (2), (3) 式及以下约束

$$\delta_{p,r}^{i,j} \geq 0, \quad \text{整数}, \quad 1 \leq i \leq N(N-1)/2 \quad (5)$$

$$m^j \geq 0, \quad \text{整数}, \quad 1 \leq j \leq E \quad (6)$$

链路  $k$  中的空闲波长加上链路  $j$  失效时释放的波长, 其数目应该多于或等于链路  $j$  失效时受影响且保护路由使用链路  $k$  的光路数:

$$m^k + \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} \sum_{p \in R^i: k \in p, j \in p} \pi_p^i \geq \sum_{r \in R_j^i: k \in r, k \notin p} \delta_{p,r}^{i,j}, \quad 1 \leq k \leq E, \quad 1 \leq j \leq E, \quad k \neq j \quad (7)$$

链路  $j$  中的  $Wf_j$  条波长可以被任何工作光路和保护光路使用, 所以存在约束:

$$\left( \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} \sum_{p \in R^i: j \in p} \pi_p^i \right) + m^j \leq Wf_j, \quad 1 \leq j \leq E \quad (8)$$

本文考虑 100% 的失效恢复, 因此有约束:

$$\sum_{p \in R^i} \pi_p^i = \sum_{r \in R_j^i} \delta_{p,r}^{i,j}, \quad 1 \leq i \leq N(N-1)/2, \quad 1 \leq j \leq E \quad (9)$$

(3) 共享链路保护 (Shared-link protection) 约束条件 (1), (2), (3) 式及以下约束:

$$m^j \geq 0, \quad \text{整数}, \quad 1 \leq j \leq E \quad (10)$$

$$l_r^j \geq 0, \quad \text{整数}, \quad 1 \leq j \leq E, \quad r \in \text{alternate}(j) \quad (11)$$

链路  $j$  上预留的空闲波长应足够恢复光路使用

$$m^j \geq \sum_{\text{alternate-route}(k), j \in r} l_r^k, \quad 1 \leq j \leq E, \quad 1 \leq k \leq E, \quad j \neq k \quad (12)$$

$$\left( \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} \sum_{p \in R^i: j \in p} \pi_p^i \right) + m^j \leq W f_j, \quad 1 \leq j \leq E \quad (13)$$

链路  $j$  失效以后, 链路保护应保证业务量需求仍能得到满足, 因此有约束:

$$\sum_{r \in \text{alternate-route}(j)} l_r^j = \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} \sum_{p \in R^i: j \in p} \pi_p^i, \quad 1 \leq j \leq E \quad (14)$$

## 2.2 WDM 网络节点无波长转换能力

当网络节点无波长转换能力时, 光路在其经过的链路上必须使用相同的波长, 波长的分配具有全局意义, 此时光路用它的路由  $p$  和被分配的波长  $w$  共同标识, 记为  $(p, w)$ . WI(Wavelength Interchanging) 网络模型中的变量  $\pi_p^i$ ,  $\delta_{p,r}^{i,j}$ ,  $l_r^j$ ,  $m^j$  分别由以下变量代替:

$\pi_{p,w}^i$ : 如果节点对  $i$  之间作为工作路由的通路  $p$  使用了波长  $w$ , 则  $\pi_{p,w}^i = 1$ , 否则  $\pi_{p,w}^i = 0$ ,  $1 \leq i \leq N(N-1)/2$ ;  $\delta_{p,w,r,\lambda}^{i,j}$ : 链路  $j$  失效时, 节点对  $i$  之间的工作光路  $(p, w)$  恢复到保护光路  $(r, \lambda)$ , 则  $\delta_{p,w,r,\lambda}^{i,j} = 1$ , 否则  $\delta_{p,w,r,\lambda}^{i,j} = 0$ ,  $1 \leq j \leq E$ ,  $1 \leq i \leq N(N-1)/2$ ,  $1 \leq \lambda, w \leq W$ ;  $l_{r,w}^j$ : 链路  $j$  失效时, 邻近  $j$  的备用路由  $r$  使用了波长  $w$ , 则  $l_{r,w}^j = 1$ , 否则  $l_{r,w}^j = 0$ ,  $1 \leq j \leq E$ ,  $1 \leq w \leq W$ ;  $m_{w,j}^j$ : 链路  $j$  上的波长  $w$  被某条保护路由使用, 则  $m_{w,j}^j = 1$ , 否则  $m_{w,j}^j = 0$ ,  $1 \leq j \leq E$ ,  $1 \leq w \leq W$ .

不同保护策略下 WS(Wavelength Selective) 网络 (节点配置 WSXC) 模型的描述类似于相应的 WI 网络 (节点配置 WIXC) 模型, 除了 (1)ILP 的约束数目已和波长  $w$  有关, 如上面的 (7) 式变为

$$m_w^k + \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} \sum_{p \in R^i: k \in p, j \in p} \pi_{p,w}^i \geq \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} \sum_{r \in R_j^i: k \in r, k \notin p} \delta_{p,\lambda,r,w}^{i,j}, \quad 1 \leq k \leq E, \quad 1 \leq j \leq E, \quad k \neq j, \quad 1 \leq w \leq W \quad (15)$$

(2) 与 WI 网络不同, WS 网络存在波长连续性限制, 故用以下约束代替 (8), (13) 式.

$$\left( \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} \sum_{p \in R^i: j \in p} \pi_{p,w}^i \right) + m_w^j \leq f_j, \quad 1 \leq j \leq E, \quad 1 \leq w \leq W \quad (16)$$

### 3 动态业务下提供可靠连接的方案

为了使 WDM 网络在动态业务下具有从失效中快速恢复的能力,或者说使网络建立的所有光路能在连接期间可靠传输数据,新的光路连接请求到达接入节点时,接入节点将在请求接纳阶段以并行方式检查网络是否有足够的波长资源,以便建立链路分离的工作光路和保护光路。(如果要求网络同时能防止节点失效则建立的工作光路和保护光路也不能经过相同的节点。)如果网络能够接纳此连接请求,就为它建立工作光路并且分配合适的波长,同时在保护光路经过的链路上预留波长,否则就拒绝此连接请求。此连接持续期间,工作光路如果发生失效,则由保护光路替代工作光路继续传输数据。由于毋需失效定位和实时寻路,失效后业务恢复的速度很快。

动态业务下,衡量 WDM 网络路由和波长分配算法性能的一个重要指标是光路建立的阻塞率 (Blocking Probability)。本文使用阻塞增益 (Blocking Gain) 来衡量抗毁 WDM 网络中引入波长转换的好处。阻塞增益的定义<sup>[1]</sup>:

$$G_p = P_{B,WS}/P_{B,WI} \quad (17)$$

其中  $P_{B,WS}$  表示 WS 网络中的路由和波长分配 (Routing and Wavelength Assignment, RWA) 算法获得的阻塞率,  $P_{B,WI}$  表示 WI 网络对应的阻塞率。阻塞增益越接近 1 说明使用 WIXC 获得的好处越小。

我们采用首次命中 (First-Fit, FF) 算法和  $M\Sigma$  算法<sup>[1]</sup> 作为仿真时使用的波长分配算法。FF 算法是一种很简单的波长分配 (Wavelength Assignment, WA) 算法,将波长从小到大编号之后,到达网络的连接请求选择找到的第一条可用波长作为建立光路的波长而不使用网络的其它状态信息;  $M\Sigma$  算法则作为使用全网状态信息的一类 WA 算法的代表。仿真时的路由算法使用固定路由算法<sup>[1]</sup>。

### 4 计算和仿真结果及讨论

我们采用类似于中国教育与科研计算机网 (CERNET, <http://www.edu.cn/>) 的网络作为示范网络,分别研究静态业务和动态业务下波长转换对网络容量分配以及连接请求阻塞率性能的影响。如图 1 所示, CERNET 中原本连接到清华大学的部分地区节点被改连到了北京大学和北京邮电大学。示范网络共 10 个节点, 16 条链路, 方框中为节点的编号。网络的物理连接度  $\alpha = 0.36$ , 属于比较典型的广域网 (广域网一般为弱连接网络)。

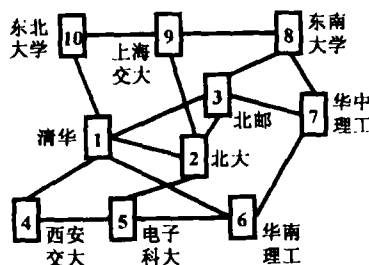


图 1 类 CERNET 网

#### 4.1 静态业务情况

我们使用 Lp-solve 3.0 工具包软件求解本文给出的所有 ILP 模型。无保护情况下网络需要的光纤总数用  $F_{T/n}$  表示,有保护机制时网络需要的总光纤长度用  $F_{T/r}$  表示,我们定义某种保护策略需要的光纤数冗余容量 (Redundant capacity of fiber number):

$$R_{C/FN} = (F_{T/r} - F_{T/n}) / F_{T/n} \tag{18}$$

当每根光纤的波长数  $W$  给定时, 不同保护策略在节点有无波长转换能力时需要的光纤总长度在图 2(a) 中给出. 对于每一  $W$ , 我们计算出  $b=1, 2, 4$  时的  $F_{T/r}$  并记录其中最小的值. 因为存在链路直接相连的节点之间至少铺设一根双向光纤, 所以  $F_{T/n}$  和  $F_{T/r}$  的下界等于网络链路中的光纤数之和, 即  $F_{T/B} = 16$ , 随着  $W$  的增大  $F_{T/n}$  和  $F_{T/r}$  会逐渐逼近  $F_{T/B}$ . 当网络物理拓扑给定时, 用 ILP 方法进行网络设计, 问题的复杂度随  $W$  和  $b$  的增大而迅速增加, 尤其是共享通道保护下节点无波长转换能力的情况更是如此. 图 2(b) 中的曲线是根据 (18) 式计算得出, 随着  $W$  的增大, 网络需要的冗余容量总的呈下降趋势, 但在个别点上会发生反弹, 如  $W = 6$ .

由图 2(a) 中的 WSXC, WIXC 曲线可知当网络不采用任何保护策略时, 路由由节点是否配置波长转换器, 得到的全网光纤数都相等. 这说明对于业务量矩阵给定的情况, 在多光纤 WDM 网络中引入波长转换器对减少全网光纤数没有任何好处.

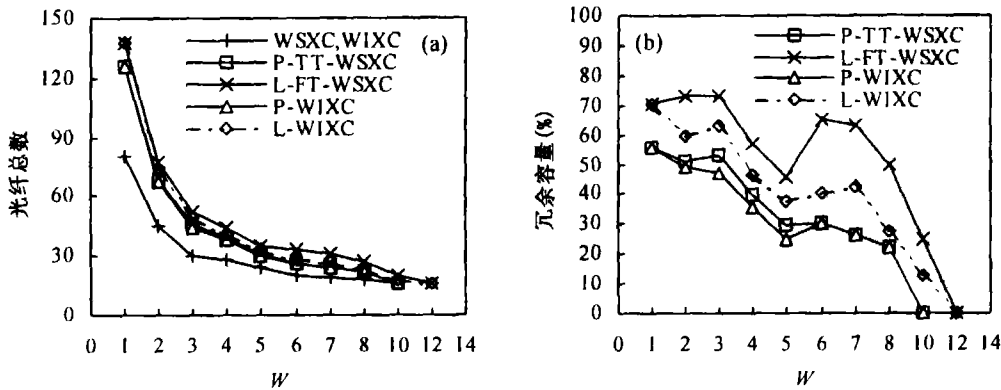


图 2 静态业务下类 CERNET 的计算结果

链路保护总是需要比通道保护更多的空闲容量: 节点使用 WSXC 时, L-FT-WSXC 需要的  $R_{C/FN}$  平均比 P-TT-WSXC 多 24%, 最多达到 36.9%( $W = 7$ ); 节点使用 WIXC 时, L-WIXC 需要的  $R_{C/FN}$  平均比 P-WIXC 多 12%, 最多达到 16.6%( $W = 3$ ). 无论是否使用波长转换器, 共享通道保护的  $F_{T/r}$  均在  $W = 10$  时达到下界  $F_{T/B}$ , 共享链路保护则在  $W = 12$  时才达到下界  $FT / B$ .

在不同保护策略下, 引入波长转换对减少冗余容量的作用也不同: 共享通道保护下, 除了当  $2 \leq W \leq 6$ , P-TT-WSXC 得到的  $F_{T/r}$  总是很接近 P-WIXC 时的  $F_{T/r}$ ,  $R_{C/FN}$  平均只多 2.1%, 最多达到 6.6%( $W = 3$ ); 共享链路保护下, L-FT-WSXC 和 L-WIXC 的  $F_{T/r}$  差别较大, L-FT-WSXC 需要的冗余容量平均比 L-WIXC 多 13.7%, 最多达到 25%( $W = 6$ ).

#### 4.2 动态业务情况

图 3 给出了以 CERNET 为目标网络时, 节点有全波长转换能力 (Full-WC), FF 算法在不同负载下得到的连接请求阻塞率, 数字  $20 \times 1$  表示链路只包含一根 20 波长光纤,  $5 \times 4$  则表示链路由 4 根 5 波长光纤组成. 连接请求的阻塞概率随着节点负载的增加而增大. 从图上曲线可以发现: 在波长通道数不变的前提下 (本文均为 20), 链路使用多光纤, 即使采用 FF 这样简单的 WA 算法, 获得的阻塞率也已很接近 Full-WC 时的阻塞率.

图 4 给出了 FF 算法和  $M\Sigma$  算法在每节点负载分别为 1.5, 3, 4.5 (作为轻负载、中度负载和重负载的代表) 时的阻塞增益  $G_p$  对链路光纤数的关系曲线, 图例中的数字代表每节点平均负载

值。观察图 4 曲线可以发现: (1) 随着链路光纤数的增加, WA 算法的  $G_p$  迅速下降, 尤其是阻塞率本来较高的 FF 算法, 下降得更为陡峭。链路光纤数  $F=10$  时, FF 算法在不同负载下的  $G_p \approx 1$ , 而对于性能较好的  $M\Sigma$  算法  $F=4$  时的所有  $G_p$  都在 1.3 以下。造成  $G_p$  下降的原因是链路使用多光纤等效于引入了部分波长转换。因此, 链路支持的波长通道数不变时, 只要使用多光纤代替单光纤并使用性能较好的 RWA 算法, 节点即便不配置波长转换器, 动态业务下也能获得与 WI 网络相近的阻塞率性能。(2) 随着网络负载的增加, 波长转换器在降低阻塞率方面的好处变得更加微不足道。

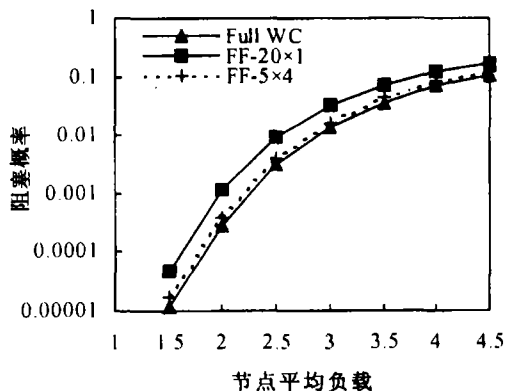


图 3 不同负载下的阻塞概率

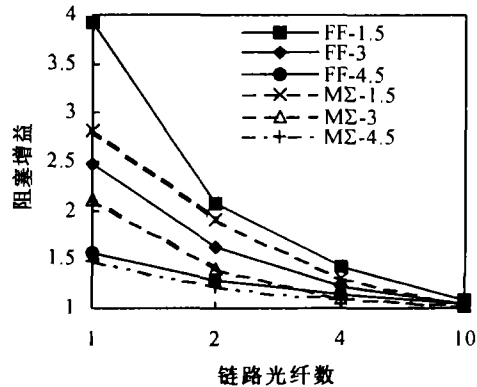


图 4 类 CERNET 在不同负载下的阻塞增益比较

## 5 结 论

我们通过 ILP 建模和仿真的方法, 分别研究了静态业务和动态业务下, 多光纤 WDM 网络在满足抗毁要求时, 节点使用 WIXC 对网络性能的改善程度。所有的数据表明: 在网络建设阶段(静态业务), 只有在使用链路保护机制时, 节点配置 WIXC 对减少全网光纤数才有较显著的好处, 而使用通道保护(特别是节点使用可调谐光收/发器)时好处不大; 而在网络运营阶段, 全网业务量在发生变化需要建/拆光路(从较长时间间隔看为动态业务)时, 多数情况下节点是否配置 WIXC 对连接请求的阻塞率影响不大, 即使节点使用 WSXC, 只要使用性能较好的 RWA 算法, 再辅以多光纤链路, 就可以获得与 WI 网络接近的阻塞率, 尤其是在网络负载较重时更是如此。不过, 网络节点配置 WIXC 仍然可以简化网络运营时的控制和管理<sup>[1]</sup>。由于 WIXC 还处在实验室研究阶段, 我们尚无法量化它的性能价格比<sup>[1]</sup>, 因此 WDM 网络在建设或升级时节点是否应使用 WIXC 我们认为要视具体情况而定, 即综合考虑成本、控制管理和关心的性能指标等各方面的因素。

## 参 考 文 献

- [1] E. Karasan, E. Ayanoglu, Performances of WDM transport networks, IEEE J. of Select. Areas, Commun., 1998, 16(7), 1081-1096.
- [2] J. Yates, J. Lacey, D. Everitt, M. Summerfield, Limited-range wavelength translation in all-optical networks, IEEE Proc. INFOCOM' 96, San Francisco, USA, 1996, 954-961.
- [3] S. Subramaniam, M. Azizoglu, A. K. Somani, All-optical networks with sparse wavelength conversion, IEEE/ACM Trans. on Networking, 1996, 4(4), 544-557.
- [4] A. Gersht, A. Shulman, Architecture for restorable call allocation and fast VP restoration in mesh ATM networks, IEEE Trans. on Communications, 1999, 47(3), 397-403.
- [5] G. Mohan, A. K. Somani, Routing dependable connections with specified failure restoration guarantees in WDM networks, IEEE Proc. INFOCOM' 2000, Tel Aviv, Israel, 2000.

- [6] S. Ramamurthy, B. Mukherjee, Survivable WDM mesh networks, Part II -Restoration, IEEE Proc. ICC' 99, Vancouver, Canada, 1999, 2023-2030.
- [7] S. Ramamurthy, B. Mukherjee, Survivable WDM mesh networks, Part I -Protection, IEEE Proc. INFOCOM' 99, New York City, USA, 1999, 744-751.
- [8] S. Baroni, P. Bayvel, R. J. Gibbens, S. K. Korotky, Analysis and design of resilient multi-fiber wavelength-routed optical transport networks, IEEE J. Lightwave Technology, 1999, 17(5), 743-757.

## PERFORMANCE INFLUENCE OF WAVELENGTH TRANSLATION ON RESILIENT MULTI-FIBER WDM MESH NETWORKS

Wang Ye    Li Lemin    Wang Sheng

(National Key Lab. of Broadband Optical Transmission and Communication Systems,  
UESTC of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** Currently, most papers that study the effect of wavelength translation on WDM network usually aim at single-fiber network and do not consider the requirement of network survivability. This paper studies network performance of multi-fiber WDM mesh networks while nodes install wavelength converter and satisfy the requirement against single-link failure under dynamic traffic demand and static traffic demand, respectively. Used methods include integer linear programming (ILP) and simulation. Benefits of wavelength translation to resilient multi-fiber WDM mesh networks will be more completely described.

**Key words** Wavelength division multiplexing, Wavelength translation, Primary lightpath, Backup lightpath, Blocking probability

王 焯: 男, 1974 年生, 博士生. 研究方向为 WDM 网络生存性、波长路由和分配算法、波长变换器对光传输网络性能的影响等方面.

李乐民: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士. 长期从事信息传输与宽带通信网方面的研究.

王 晨: 男, 1971 年生, 博士, 讲师. 研究方向是 ATM 网的流量与拥塞控制、WDM 网络设计、主动网等.