

# 波长转换对抗毁多光纤 WDM 网络设计的影响\*

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】** 对以全网铺设光纤的总长度最短为优化目标进行波分复用(WDM)网络的抗毁设计,研究了波长转换器对多光纤网状 WDM 网络设计的影响。研究表明:设计多光纤 WDM 网络时若不考虑网络抗毁,引入波长转换对减少全网建设成本没有作用;但使用波长转换器可以减少全网需要的光纤总长度,特别是针对网络使用链路保护的情况。

**关 键 词** 波分复用网络; 波长转换; 工作光路; 保护光路

**中图分类号** TN913.24

宽带网络技术的发展日新月异,波分复用(WDM)技术逐渐取代异步转移模式(ATM)技术,成为目前网络技术的研究热点<sup>[1,2]</sup>。WDM 网络中的波长路由节点将输入波长变换到不同的输出波长上,称为波长转换。有波长转换能力的路由节点称为波长转换交叉连接器(Wavelength Interchanging Cross-Connect——WIXC),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)<sup>[3]</sup>。当 WDM 网络中的所有节点都配置 WIXC 时,光路在经过的链路上可以使用不同的波长,即建立光路时波长可以逐段配置,从而克服了 WDM 网络特有的波长连续性限制<sup>[3]</sup>。近年来,不少文献就波长转换对 WDM 网络性能的影响展开了研究,但其性能指标大多是动态业务环境中光路建立的阻塞概率,而且没有考虑网络抗毁的需要。文献[4]虽然研究了抗毁多光纤 WDM 网络的设计,但所有整数线性规划(Integer Linear Programming——ILP)模型的优化目标均是使全网使用的光纤数最少,而没有考虑实际网络中节点间的实际距离对建设成本的影响。针对这种情况,本文以全网使用的光纤总长度最短为优化目标,建立全新的 ILP 模型对多光纤网状 WDM 网络进行抗毁设计,研究波长转换对多光纤 WDM 网络设计的影响。

## 1 多光纤 WDM 网络中保护策略的 ILP 描述

本文用 ILP 方法对 WDM 网络使用的不同保护策略进行描述,假设: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>[5]</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),物理拓扑可看作无方向图。本文只考虑节点对之间的业务量是对称的情况,此时的节点对为  $N(N-1)/2$ 。2) 所有工作光路、保护光路的路由、网络采用链路保护时目标链路的备用路由都预先确定(使用 k-Shortest path 方法<sup>[4]</sup>)。3) 在链路直接相连的节点之间至少铺设一根双向光纤,这是符合工程实际的。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之间至少要有两条链路相连。

本文考虑的失效情况为单链路切断(构成此链路的的多根双向光纤同时切断),WDM 网络使用的保护方式为:1) 通道保护。在网络设计阶段端到端地为每条工作光路设置链路完全分离的保护路由,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

2000年5月17日收稿

\* 国家自然科学基金资助项目,基金号:69990540

\*\* 男 25岁 博士生

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。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, 一条链路失效时, 使用其所有的工作光路直接在此链路附近寻找备用路由和波长, 绕过失效部分而无须源-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。

## 1.1 WDM 网络节点有波长转换能力

### 1.1.1 节点配置 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, 以下参数已知: 节点对编号, 从  $1 \sim N(N-1)/2$ 。  $W$  为每根光纤中的最大可用波长数。假定网络中的链路都使用波长数相同的光纤。  $R^i$  为节点对  $i$  的工作光路集合, 集合中的光路数为  $M^i$ 。  $R_j^i$  为链路  $j$  发生失效时, 节点对  $i$  的保护光路集合。  $b$  为此集合的尺寸。  $\text{alternate\_route}(j)$  为邻接链路  $j$  的备用路由, 用于描述共享链路保护。  $d^i$  为节点对  $i$  之间的业务量需求, 代表节点对  $i$  之间要求建立的光路数。需要求解的未知量包括:  $f_j$  为链路  $j$  包含的光纤数,  $f_j$  至少为 1, 此变量用于所有的 ILP 问题。  $\pi_p^i$  为如果节点对  $i$  之间的通路  $p$  作为工作路由, 则  $\pi_p^i = 1$ , 否则  $\pi_p^i = 0$ 。  $\delta_{p,r}^{i,j}$  为链路  $j$  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  $\delta_{p,r}^{i,j} = 0$ 。  $l_r^j$  为链路  $j$  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  $l_r^j = 0$ 。  $m^j$  为链路  $j$  上的空闲波长数。

### 1.1.2 不同保护策略的 ILP 描述

所有 ILP 问题的优化目标为

$$L_T = \text{Min} \sum_{j=1}^E c_j f_j$$

式中  $c_j$  是链路  $j$  的加权值, 本文采用节点间的实际距离作为链路的加权值, 确定工作路由和保护路由的最短路算法用此加权值作为寻找路由的代价, 所有 ILP 问题的优化目标均是使全网铺设的光纤总长度  $L_T$  最短。

#### 1) 无保护情况

当网络节点具有全波长转换能力时, 波长的分配以链路为单位逐段进行, 光路在其经过的链路上使用不同的波长, 此时光路用路由  $p$  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

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

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

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  $W \times f_j$  条波长可以被任何工作光路使用

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

#### 2) 共享通道保护

约束条件(1)~(3)加上以下约束

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

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

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

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

链路  $j$  中的  $W \times f_j$  条波长可以被任何工作光路和保护光路使用, 所以存在以下约束

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

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

约束条件(1)~(3)加上以下约束

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

$$l_r^j \geq 0 \quad \text{int} \quad 1 \leq j \leq E \quad (11)$$

链路  $j$  上预留的空闲波长应足够恢复光路使用

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

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

链路  $j$  失效以后, 链路保护机制应保证业务量需求仍能得到满足, 因此约束如下

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

## 1.2 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, 此时光路用路由  $p$  和被分配的波长  $w$  共同标识, 记为  $(p, w)$ 。1.1节中的变量  $\pi_p^i$ 、 $\delta_{p,r}^{i,j}$ 、 $l_r^j$  和  $m^j$  分别由以下变量代替:  $\pi_{p,w}^i$  为如果节点对  $i$  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  $\pi_{p,w}^i = 0$ 。 $\delta_{p,w,r,\lambda}^{i,j}$  为链路  $j$  失效时, 如果节点对  $i$  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  $\delta_{p,w,r,\lambda}^{i,j} = 0$ 。 $l_{r,w}^j$  为链路  $j$  失效时, 如果邻近  $j$  的备用路由  $r$  使用了波长  $w$ , 则  $l_{r,w}^j = 1$ , 否则为0。 $m_w^j$  为链路  $j$  上的波长  $w$  如果被某条保护路由使用, 则  $m_w^j = 1$ , 否则  $m_w^j = 0$ 。

不同保护策略下 WS 网络模型描述类似于相应的 WI 网络模型, 除了以下出现的情况:

1) ILP 的约束数目已和波长  $w$  有关, 式(7)变为

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

2) 与 WI 网络不同, WS 网络存在波长连续性限制, 用下面的约束代替式(8)和式(13)

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

### 2 数值结果和分析

我们采用类似于中国教育与科研计算机网的网络作为示范网络来求解不同的 ILP 问题。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, 链路旁边的数字表示它的物理长度(单位: km)。网络的业务量矩阵为均匀业务量矩阵, 即所有节点对之间的业务量需求完全相同, 本文假定节点对之间要求建立的光路数都为 1。我们使用 Lp\_solve 3.0 工具包软件求解所有的 ILP 问题。

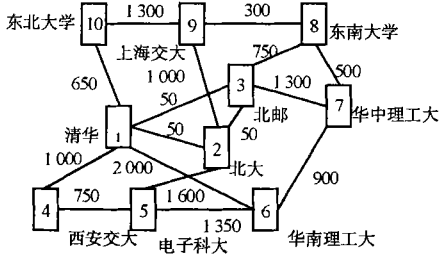


图1 类 CERNET 网(高校名称为缩写)

无保护机制时网络需要的总光纤长度为  $L_{T,n}$ , 有保护机制时网络需要的总光纤长度为  $L_{T,r}$ , 定义某种保护策略需要的冗余容量为

$$R_C = (L_{T,r} - L_{T,n}) / L_{T,n} \tag{17}$$

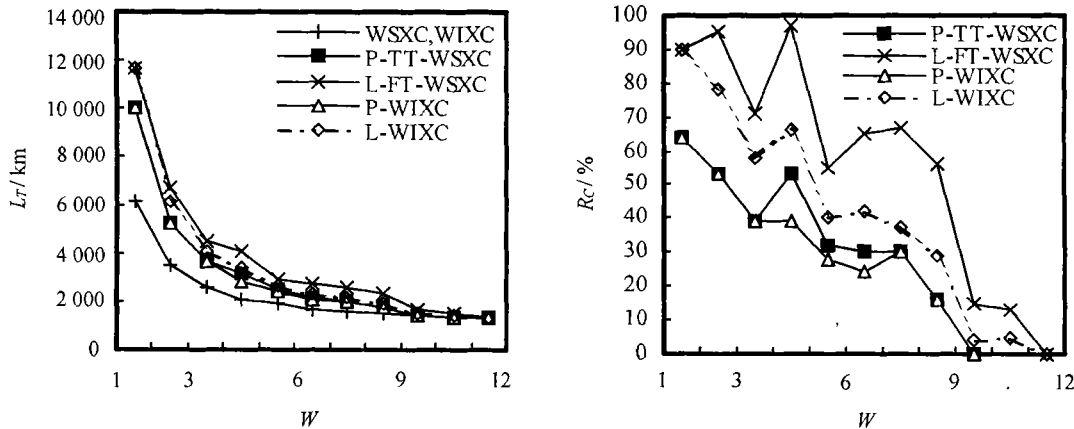
需要的冗余容量为

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如图 2a 所示。对于每一个  $W$ , 我们计算出  $b=1, 2, 4$  时的  $L_{T,r}$ , 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  $L_{T,n}$  和  $L_{T,r}$  的下界等于链路长度之和, 按照图 1 给出的节点间距离, 下界  $L_B = 13\ 550\text{ km}$ , 随着  $W$  增大  $L_{T,n}$  和  $L_{T,r}$  会逐渐逼近  $L_B$ 。

由图 2a 中的 WSXC 及 WIXC 曲线可知当网络不采用任何保护策略时, 路由节点是否使用波长转换器, 得到的光纤总长度都相等, 这说明在静态业务下, 多光纤 WDM 网络中引入波长转换器对减少全网光纤总长度没有任何好处。  $L_{T,n}$  在  $W=12$  时达到下界  $L_B$ 。

图 2a、2b 可看出: 链路保护总是比通道保护需要更多的空闲容量。节点使用 WSXC 时, L-FT-WSXC 需要的冗余容量  $R_C$  平均比 P-TT-WSXC 多 28% ( $R_C$  差值的平均值使用 11 个点计算), 最多达到 44% ( $W=4$ ); 节点使用 WIXC 时, L-WIXC 需要的冗余容量平均比 P-WIXC 多 14% ( $R_C$  差值的平均值使用 11 个点计算), 最多达到 27% ( $W=4$ )。无论是否使用波长转换器, 共享通道保护的  $L_{T,r}$  均在  $W=12$  时达到下界  $L_B$ , 共享链路保护则在  $W=14$  时才达到下界  $L_B$ 。

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: 在共享通道保护下, 除了当  $3 \leq W \leq 6$ , P-TT-WSXC 得到的  $L_{T,r}$  总是很接近 P-WIXC 时的  $L_{T,r}$ , 冗余容量平均只多 2.4% (通道保护的  $L_{T,r}$  在  $W=12$  达到下界, 所以  $R_C$  差值的平均值使用 10 个点计算), 最多达到 14% ( $W=4$ ); 在共享链路保护下, L-FT-WSXC 和 L-WIXC 的  $L_{T,r}$  差别较大, L-FT-WSXC 需要的冗余容量平均比 L-WIXC 多 16%, 最多达到 31% ( $W=4$ )。



(a) 全网铺设光纤总长度示意图

(b) 不同保护策略需要的冗余容量示意图

图2 类 CERNET 的计算结果

### 3 结 束 语

本文研究了静态业务下波长转换对多光纤抗毁 WDM 网络设计的影响。研究表明: 在多光纤 WDM 网络中引入波长转换对减少全网建设成本没有作用; 而当网络有抗毁需求时, 使用波长转换器可以减少全网需要的光纤总长度, 特别是针对网络使用链路保护时的情况。

#### 参 考 文 献

- 1 许 都, 李乐民. ATM 网络中长相关业务排队性能的分析. 电子科技大学学报, 1998, 27(4): 357~361
- 2 钱炜宏, 李乐民. 具有多优先级的 ATM 交换机的平均延时. 电子科技大学学报, 1997, 26(4): 341~346
- 3 Ezhan Karasan, Ender Ayanoglu. Performances of WDM transport networks. IEEE J Select Areas Commun, 1998, 16(7): 1 081~1 096
- 4 Stefano Baroni, Polina Bayvel, Gibbens Richard J, *et al.* Analysis and design of resilient multi-fiber wavelength-routed optical transport networks. IEEE J Lightwave Technol, 1999, 17(5): 743~757
- 5 Ramamurthy S, Biswanath Mukherjee. Survivable WDM mesh networks, Part I—Protection. IEEE Proc INFOCOM' 99, 1999

## Influence of Wavelength Conversion on Design of Resilient Multi-fiber WDM Networks

Wang Ye    Li Leimin    Wang Sheng

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

**Abstract** In this paper, a new resilient network model aimed at minimizing total fiber length is established and the influence of wavelength conversion on design of restorable multi-fiber WDM networks is studied simultaneously. The results show that introducing wavelength converters has no benefits to reduce the cost of multi-fiber networks without considering survivability, and using wavelength converters can reduce the total fiber length in evidence, especially with link protection especially.

**Key words** wavelength division multiplexing networks; wavelength conversion; working lightpath; protection lightpath