

# 基于两级业务交叉连接节点的光网络的生存性问题

林绵峰, 张 杰, 方来付, 何建吾, 顾晓仪  
(北京邮电大学光通信中心 128 信箱, 北京 100876)

摘 要: 本文研究了由两级业务交叉连接节点构成的光网络的保护设计问题, 并创建了保护容量规划模型. 模型的仿真结果表明, 模型的优化目标和网络容量的分配策略对网络的保护性能有重要影响.

关键词: 光网络; 多级交叉连接节点; 保护规划模型; 保护性能

中图分类号: TP915. 65 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2002) 11-1697-04

## The Survivability of the Optical Networks Consisting of the Two-Level Cross-Connect Node

LIN Mian feng, ZHANG Jie, FANG Lai-fu, HE Jian-wu, GU Xiao-yi  
(Beijing University of Posts and Telecommunications, P. O. Box. 128 Beijing 100876, China)

Abstract: The protection designing issue for the optical network consisting of the two level optical cross connect node is investigated in this paper. The protection capacities programming model is built and simulated. The simulation result shows that the protection performance severely depends on the optimization function of the model and the assignment policy of network capacities.

Key words: optical network; multiple granularities cross connect; protection programming model; protection performance

### 1 引言

随着光网络节点和组网技术的逐步成熟, 光传送网络的实用性引起了众多的关注. 光网络的保护性能(生存性)是网络实用性的一个重要方面. 使用相同波长预先创建光通道方式的电路交换式光网络将有可能率先实用<sup>[1]</sup>. 为了降低成本, 网络建设中大量使用多芯光缆. 相比之下, 并非所有光纤都会在一个光节点上下路, 也就是说, 节点可能具备两级甚至多级业务交换能力. 这种光节点构成的网络更具有灵活性, 其网络保护性能也值得研究.

已经有很多文献对电路交换式 WDM 网络中的保护和业务恢复问题进行了研究<sup>[2-4]</sup>, 这些文章要么在确保业务生存能力的前提下优化网络的资源利用率, 要么在给定网络资源时, 优化网络业务的保护能力; 而且一般仅仅针对单级业务处理光节点构成的网络. 本文针对两级业务处理光节点构成的网络, 建立具有良好节点和网络适用性的生存性模型, 仿真结果揭示了光网络保护设计的一些重要策略.

### 2 网络生存性模型

#### 2.1 节点结构

具有两级业务处理能力的光网络节点如图 1 所示, 其中图 1(a), 1(b)分别是节点的框架结构和业务上下模块的框架结构.

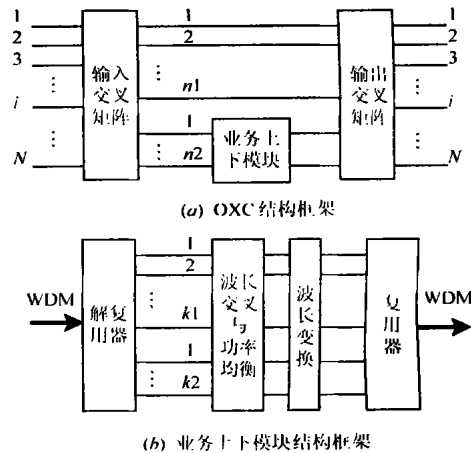


图 1 网络节点功能框图

如图 1(a)所示, 节点在输入和输出侧分别提供光纤级别的交叉连接能力, 而由业务上下模块对部分光纤执行波长级别的交叉连接处理. 在图 1(a)中,  $N = n1 + n2$ , 只有  $n2 (\leq N)$  条光纤携带的业务可以在本地上下, 其余  $n1 (\geq 0)$  条光纤只作光纤级交叉连接. 但本地上路业务可以交叉连接到任何一条输出光纤上.  $N = 2$  时光节点就是通常的 OADM. 如图 1(b)所示, 网络节点可选配置波长变换设备, 但本文模型不考虑这种情况.

## 2.2 生存性模型

生存性模型以网络造价为优化目标, 主要考虑具有如下特性的网络:

- (1) 节点间光纤数量可以配置.
- (2) 一个节点对之间的业务可以用多条通道(称子通道)传送, 且子通道数量可以配置.
- (3) 网络业务的保护模式可配置.

设网络用  $G(V, E)$  表示, 网络节点与链路集合分别用  $V(G)$  与  $E(G)$  表示, 节点和链路数量分别用  $N_V$  和  $N_E$  表示, 节点和链路顺序编号. 网络拓扑使用标准定义的关联矩阵  $M_{N_V \times N_E}$  表示. 另设链路  $i$  由  $g_i$  对光纤组成, 网络链路的最大光纤数量为  $N_L$ . 光纤上复用的最大波长数量为  $K$ , 波长集合用  $\Gamma = \{\lambda_k, k = 1, 2, \dots, K\}$  表示. 节点  $j$  的节点度用  $\delta_j$  表示. 链路上光纤携带的业务上下能力与节点相关, 设与节点  $j$  相邻的链路  $i$  上可以上下业务的光纤数量用  $\alpha_j^i$  ( $\alpha_j^i \leq g_i \leq N_L$ ) 表示. 其它与网络生存性模型相关的符号包括:  $E_j$  为与节点  $j$  相关的链路集合;  $E_S$  为受网络故障  $f_S$  影响的链路集合<sup>\*</sup>,  $N_E^S$  是受影响的链路数量;  $V_{S,r}$  为  $f_S$  条件下, 用于恢复节点对  $r$  之间业务的倒换节点集合<sup>\*\*</sup>,  $N_V^S$  是节点数量;  $\alpha_j^{i,l}$  为表示链路  $i$  上光纤  $l$  在节点  $j$  的上下业务能力, 如果  $\alpha_j^{i,l} = 1$ , 表示有上下能力;  $\alpha_{j,j'}$  为表示节点  $j, j'$  之间的业务量, 用波长通道的数量表示;  $R$  为所有网络业务顺序排列得到的集合, 设业务  $k$  为  $r_k = (u_r, v_r)$ ,  $u_r, v_r$  为节点标识符;  $P_r$  为节点对  $r$  间业务使用的子通道集合;  $P_r^s$  为受  $f_S$  影响的节点对  $r$  间子通道集合, 如果不受故障影响, 则  $P_r^s = \phi$ ;  $C_u^i$  为链路  $i$  上一个波长通道的基本运行成本, 设该代价与光纤上下业务能力无关;  $a_{r,p}^{i,l,k}$ ,  $b_{r,p}^{i,l,k}$  分别表示节点对  $r$  之间业务的第  $p$  条子通道是否使用链路  $i$  中光纤  $l$  上波长  $\lambda_k$  建立工作和保护光通道, 变量等于 1 时, 表明资源被使用;  $\delta_{r,p}^{i,k}$ ,  $\beta_{r,p}^{i,k}$  分别表示节点对  $r$  业务的第  $p$  条子通道在网络正常与故障条件下是否使用链路  $i$  上波长  $\lambda_k$  建立光通道, 如果使用, 则值为 1, 否则为 0.

在下面的公式中, 除非特别声明, 各变量的定义域为:  $i, i' \in E(G), j, j' \in V(G), l \in [1, g_j], k \in \Gamma, r \in R, p \in P_r$ . 以最小化网络总体成本为模型的优化目标, 即

$$\min \sum_{i \in E(G)} \left( C_u^i \cdot \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} \sum_{k \in \Gamma} \sum_{l=1}^{g_j} (a_{r,p}^{i,l,k} + b_{r,p}^{i,l,k}) \right) \quad (1)$$

约束条件包括:

(1) 链路容量约束. 一条光纤上的一个波长只能用于一个节点对业务的工作通道或保护通道. 即

$$\sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} (a_{r,p}^{i,l,k} + b_{r,p}^{i,l,k}) \leq 1 \quad \forall i, l, k \quad (2)$$

(2) 需求约束. 与一个节点相邻的所有链路上携带的上下光通道的数量要满足该节点的业务需求. 即对于任意节点  $j$ , 都有

$$\sum_{p \in P_r} \sum_{k \in \Gamma} \sum_{i \in E_j} \sum_{l=1}^{g_j} [\alpha_j^{i,l} \cdot (a_{r,p}^{i,l,k} + b_{r,p}^{i,l,k})] = \alpha_{j,j'} \quad \forall r = (j, j'), r \in R \quad (3a)$$

$$\sum_{l=1}^{g_j} \alpha_j^{i,l} \leq \alpha_j^i \quad \forall i \in E_j, \forall j \in V(G) \quad (3b)$$

(3) 保护容量约束. 对于任何一个节点对  $r$  之间的网络业务, 如果受网络故障  $f_S$  的影响, 则恢复节点集合  $V_{S,r}$  中所有节点提供的可用保护通道总容量应该不小于受影响的工作业务总容量. 设使用相同波长进行保护, 则有

$$\sum_{j \in V_{S,r}} \sum_{i \in E_j} \sum_{l=1}^{g_j} (a_j^{i,l} + b_{r,p}^{i,l,k}) \geq \sum_{i \in E_S} \sum_{l=1}^{g_i} a_{r,p}^{i,l,k} \quad \forall r, p, k \quad (4)$$

(4) 选路约束. 节点应该直通不在本地节点终结的业务通道, 即

$$\left( \sum_{i \in E_j} \delta_{r,p}^{i,k} \right) \bmod 2 = 0 \quad \forall j \in V(G), \forall k, r, p (u_r, v_r \neq j) \quad (5a)$$

$$\left( \sum_{i \in E_j} \beta_{r,p}^{i,k} \right) \bmod 2 = 0 \quad \forall j \in V(G), \forall k, r, p (u_r, v_r \neq j) \quad (5b)$$

(5) 整数约束. 根据定义, 模型变量取整数 0 或 1, 即

$$a_{r,p}^{i,l,k} \in (0, 1) \quad \forall r, i, l, k, \forall p \in P_r \quad (6)$$

$$b_{r,p}^{i,l,k} \in (0, 1) \quad \forall i, l, k, \forall r \in R, \forall p \in P_r^s \quad (7a)$$

$$b_{r,p}^{i,l,k} = 0 \quad \forall i, l, k, \forall r \in R \text{ 且 } \forall p \in P_r \cap \overline{P_r^s} \quad (7b)$$

式(1)–(7)给出的模型是一个限制条件下的整数规划模型, 一般要使用线性规划软件, 如 CPLEX<sup>[4]</sup> 或 IBM OSL 软件包<sup>[7]</sup> 等求解. 经分析可以发现, 模型的复杂度与网络的规模、链路光纤数量、单纤复用波长数量、网络的业务分布情况和路由策略、网络故障规模等因素直接相关. 这与文献[2, 3, 4]的结论是一致的.

## 3 模型仿真

为了简化仿真过程, 本论文对模型进行了简化: 设任何节点  $j$  和链路  $i$ , 都有  $g_i = 1$ , 且  $l = 1$ , 所以  $\alpha_j^{i,l} = \alpha_j^i = 1$ . 光纤复用波长数量设为  $K$ , 且业务可以接入任意波长. 波长运行代价由链路权重表示, 且基本代价为  $C$ . 另约定一个业务由唯一光通道传送, 且使用通道保护方式保护. 此时模型求解变量变成:  $a_{r,p}^{i,l,k} \rightarrow a_r^{i,k}, b_{r,p}^{i,l,k} \rightarrow b_r^{i,k}$ . 即

$$\min C \cdot \sum_{i \in E(G)} \left[ W_i \sum_{r \in R} \sum_{k=1}^K (a_r^{i,k} + b_r^{i,k}) \right] \quad (8)$$

约束条件为(其中  $E_S$  为故障边):

$$\sum_{r \in R} (a_r^{i,k} + b_r^{i,k}) \leq 1 \quad \forall i \in E(G), \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in E_j} (a_r^{i,k} + b_r^{i,k}) = \alpha_{j,j'}$$

$$\forall j \in V(G), \forall r \in R, u_r = j, v_r = j' \quad (10)$$

$$\sum_{i \in E_j} b_r^{i,k} \geq \sum_{i \in E_S} a_r^{i,k} \quad j \text{ 为倒换节点}, \forall r \in R, \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

\* 节点故障可以等效为与该节点相关的链路全部失效. 该链路集合应该为有效链路集合.

\*\* 恢复业务重新选路或切换的节点的集合, 一般要求这些节点位于节点对  $r$  工作业务通道之上.

$$\left( \sum_{i \in E_j} \delta_r^{i,k} \right) \bmod 2 = 0 \quad \forall j, k; \forall r (\in R, u_r, v_r \neq j) \quad (12a)$$

$$\left( \sum_{i \in E_j} \rho_r^{i,k} \right) \bmod 2 = 0 \quad \forall j, k; \forall r (\in R, u_r, v_r \neq j) \quad (12b)$$

$$\sum_{i \in E_j} (\delta_r^{i,k} + \rho_r^{i,k}) \leq 2 \quad \forall j, r, k \quad (12c)$$

$$a_r^{i,k}, b_r^{i,k} \in (0, 1) \quad \forall r \in R, \forall i \in E(G), \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (13)$$

式(8) - (13) 表示的模型虽然只使用了一对光纤, 仍可以用来验证本文提出的模型. 它与使用多条光纤, 但每条光纤只复用少量波长的情况对等. 而且假设所有波长都能够用于本地业务的上下, 相当于图 1 中所有光纤都经过业务上下模块处理.

本文使用如图 2(a)、(b) 所示的环形和格形网络验证算法, 链路边的数字分别是链路的编号和权重. 对环形和格形网络, 光纤复用波长数量分别为 8 个和 6 个.

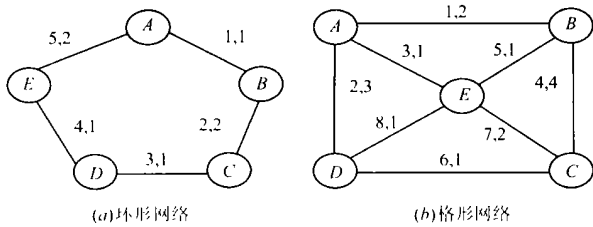


图 2 算法验证用网络

通过修改模型的工作容量约束与保护容量约束条件(即式(10)和(11)), 我们对两种典型的保护方式进行了仿真: 专用通道保护、共享链路保护. 仿真过程中, 通过简单修改优化目标函数, 还分别以最小化链路代价和最小化保护波长为优化目标, 对各种路由和波长分配(RWA)策略计算了工作链路代价、保护链路代价、波长使用情况以及链路占用情况等模型指标. 仿真时, 我们创建了一个随机的业务矩阵如表 1 所示.

表 1 业务矩阵

	A	B	C	D	E
A	0	1	1	1	1
B	1	0	1	1	0
C	1	1	0	1	1
D	1	1	1	0	0
E	1	0	1	0	0

表 2 仿真用 RWA 方案属性描述

属性	环形网络					格形网络		
	1	2	3	4	5	6	7	8
最小化工作通道代价	X	X	X	X	X	X	X	
最小化保护波长								X
波长随机分配	X	X				X	X	
波长利用率最大化			X		X			X
波长利用率最小化				X				
先创建工作通道	X		X	X				
同时创建工作和保护通道		X			X	X	X	X
端节点波长可调谐性	X	X	X	X	X	X		X

### 3.1 专用通道保护模式

我们设计了如表 2 所示的仿真方案, 对环形和格形网络

使用专用通道保护模式下的保护性能进行了仿真, 仿真的结果如表 3 所示.

表 3 RWA 算法对保护特性的影响仿真结果

评估指标	环形网络				格形网络			
	1	2	3	4	5	6	7	8
创建的工作通道数量	8	7	8	8	8	8	8	8
可保护的工作通道数量	6	6	5	7	8	8	8	8
保护容量使用的链路数量	21	21	19	23	21	14	13	15
工作通道使用波长数量	4	5	3	7	8	5	6	4
保护通道使用波长数量	6	6	5	7	8	5	6	4
网络使用的总波长数量	8	8	8	8	8	5	6	4
工作通道代价(单位: C)	17	15	17	17	17	16	16	21
保护通道代价(单位: C)	29	28	26	34	39	31	32	28
总代价(单位: C)	46	43	43	51	56	47	48	49

从表 2、表 3 中, 可以得出以下结论:

(1) 关于波长的分配策略. 使用随机波长分配时, 对环形网络, 宜首先创建工作通道, 否则可能失败(见方案 2); 而在格形网络中, 该策略可能增加对波长的需求量(比较方案 6, 7 与 8). 如果使用最大化波长利用率策略, 对环形网络, 宜使用同时创建方式, 否则将影响保护通道的创建(比较方案 3, 5); 如果先后创建, 则应该使用最小化波长利用率策略(比较方案 1, 3, 4). 对于格形网络, 最大化波长的利用率有助于降低网络对波长的需求.

(2) 倒换节点的可调谐能力. 在格形网络中, 如果端节点没有波长调谐能力, 则对波长的需求量可能增加(比较方案 6, 7 与 8). 仿真过程还发现, 在环形网络中, 如果使用最大化波长利用率策略, 则除非使用共享保护方式, 否则网络的保护性能将严重恶化.

(3) 容量的预留策略. 为了创建具有良好业务生存性的网络, 应该同时分配工作容量和预留保护容量, 先分配所有工作容量的策略可能降低网络的保护能力(对比方案 1, 3 与 2, 5). 唯一的例外是, 如果在环形网络中使用最小波长利用率策略分配波长, 则可以先创建工作通道(见方案 4).

表 4 链路共享和动态恢复策略的仿真结果

评估指标	环形网络		格形网络
	链路共享保护	链路无关恢复	通道无关恢复
创建的工作通道数量	8	8	8
保护容量使用的链路数量	20	6	6
保护能力	全部	全部	全部
工作通道使用波长数量	3/4	3	3
保护容量使用波长数量	4/3	1	1
网络使用的总波长数量	7	4	4
工作通道代价(单位: C)	17	18	18
保护通道代价(单位: C)	28	12	12
总代价(单位: C)	45	30	30

### 3.2 链路保护与恢复

此外, 我们还对环形网络在链路共享保护策略下的保护性能, 以及格形网络在采用动态恢复策略下的保护性能进行了仿真. 仿真时, 以最小化网络的保护容量为目标, 并同时分配工作和保护通道. 另外, 在仿真中, 设环形网络的工作和保

护通道在各自路由的相反方向可以使用不同的波长. 表 4 是我们的仿真结果.

对比表 2、表 3 与表 4, 可以发现, 共享保护方案的生存性能(保护能力与需要的网络资源等)要比专用保护方案好, 这与文献[3, 4]的结果是类似的. 以保护容量为优化目标时, 保护性能要比用网络代价为优化目标的性能好. 另外, 对于相同数量的业务, 由于格形网络的连通性要比环形网络好, 而且恢复配置中容量的重用性高, 因此在格形网络中, 预留少得多的保护容量即可以实现网络业务的有效保护, 但节点必须有波长变换能力<sup>[5, 6]</sup>.

#### 4 结论

本文为使用分级交叉连接节点构成的波长通道光网络的生存性问题建立了模型, 并使用简化模型进行了仿真验证. 仿真结果发现为了获得良好的网络保护性能, 建议使用最小保护容量, 而不是最小网络总体代价为模型的优化目标. 而在分配网络容量时, 建议使用工作和保护通道容量同时分配, 而不是先后分配的策略.

#### 参考文献:

- [ 1 ] S Okamoto, K I Sato. Optical path cross connect systems for photonic transport networks [A]. Proc. of ICC [C]. Geneva, Switzerland: 1993. 474- 480.
- [ 2 ] S Kuroyanagi, T Nishi. Optical path restoration schemes and cross connect architectures [A]. Proc. of GLOBECOM [C]. Sydney, Australia: 1998. 2282- 2288.
- [ 3 ] B Doshi, et al. Optical network design and restoration [J]. Bell Labs Tech. J., 1999, 4(1): 58- 84.
- [ 4 ] S Ramanurthy, B Mukherjee. Survivable WDM mesh networks, part I: protection [A]. Proc. of INFOCOM [C]. New York, America: 1999. 741- 751.

- [ 5 ] K Chan, T P Yum. Analysis of least congested path routing WDM light wave networks [A]. Proc. of INFOCOM [C]. Toronto, Canada: 1994. 962- 969.
- [ 6 ] S Subramaniam, M Azizoglu, A K Somani. All optical networks with sparse wavelength conversion [J]. IEEE/ACM Trans Networking, 1996, 4(4): 544- 557.
- [ 7 ] F Tong, T S Yum, C C Hui. Supervisory Management and lightpath restoration for wavelength routing networks [J]. J of lightwave technology, 2000, 8(9): 1181- 1186.

#### 作者简介:



林绵峰 男, 1972 年 11 月生于江西省会昌县, 北京邮电大学工学博士, 主要研究方向为光网络与光组网, 以及光网络的路由算法和流量工程问题, 并对通信网络的规划和管理有浓厚兴趣. Email: limmfwh@ yahoo. com

张 杰 男, 1972 年 6 月出生于河南省开封市, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为光网络及光组网, 包括智能光网络节点结构、网络规划与性能评估等.

方来付 男, 河南南阳人, 北京邮电大学工学博士, 主要研究为光网络节点设备和组网.

何建吾 男, 安徽巢湖人, 博士研究生, 主要研究方向为智能光网络, 包括智能光网络的控制, 网络恢复与保护算法以及网络性能模拟等.

顾晚仪 女, 北京邮电大学博士生导师, 主要研究方向为智能光网络, 超长超大容量光网络研究等.