

# 考虑链路负载均衡和容量限制的 WDM 光传送网保护设计

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, 四川成都 610054)

**摘 要:** 网络的生存性是 WDM 光传送网设计时必须考虑的问题. 在叠加(Overlay)模式的网络构架中, 由于光路之间存在的依赖性, 物理网络的单链路失效可能会造成虚拓扑不连通而使上层网络(SDH、ATM 或 IP)无法使用自身的恢复机制来恢复受影响的业务, 因此虚拓扑在嵌入物理拓扑时必须避免发生这种情况. 本文提出的 VTMPD 算法就是针对这一问题的保护设计算法. 此算法同时考虑了物理链路的负载均衡和容量限制. 我们还给出了 VTMPD 算法和已有的 DAP 算法的性能对比, 测试数据表明 VTMPD 算法优于已有的 DAP 算法.

**关键词:** WDM 网络; 设计保护; 禁忌搜索

**中图分类号:** TN913.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)10-1319-04

## Protection Design for WDM Transport Networks Considering Load Balance of Links and the Constraint of Link Capacity

WANG Ye, LI Le-min, WANG Sheng

(National Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** Network survivability is an important problem for WDM(Wavelength division multiplexing) transport network design. In network architecture using overlay mode, internal dependence of lightpaths could lead to the critical status that the failure of a physical fiber leaves the virtual topology unconnected. This may make the restoration of service by the higher level networks using the WDM network (such as SDH(Synchronous digital hierarchy), ATM(Asynchronous transfer mode) or IP) impossible. It is necessary to avoid the above cases while embedding virtual topology into physical topology. VTMPD(Virtual topology mapping for protection design) algorithm proposed in this paper aims at Design Protection, considering load balance and capacity constraint of physical links simultaneously. We also compare the performance of VTMPD with the existent DAP(Disjoint alternate path) algorithm. The numerical results show that VTMPD algorithm is better than DAP algorithm.

**Key words:** WDM networks; design protection; taboo search

### 1 引言

波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术可以充分利用光纤的低损耗带宽, 在一根光纤中的不同波长上异步、高速传输多种模式的信号. 基于 WDM 机制的光传送网已逐渐在各级骨干网中扮演着越来越重要的角色. 目前光分组交换技术离实用仍有相当距离, 现实的做法是使用电路交换模式的光路(Lightpath)构成虚拓扑支持上层业务(SDH 帧、ATM 信元流或 IP 分组), 虚拓扑可以根据它支持的上层业务的特性进行设计和优化<sup>[1,2]</sup>. 在 WDM 网络中, 装有光分插复用器(Optical Add/Drop Multiplexer, OADM)和光交叉连接(Optical Cross Connect, OXC)的波长路由节点(Wavelength Routing Switch, WRS<sup>[2]</sup>)可以灵活地配置, 从而将任意形状的虚拓

扑(Virtual Topology)嵌入给定的物理光纤网络. 在这种叠加网络构架中, 使用光路的上层网络设备只能意识到虚拓扑的存在, 即虚拓扑对上层设备屏蔽了物理网络的拓扑.

波分复用的做法使 WDM 网络在网络部件失效时可能遭受比传统网络更大的损失, 因此抗毁设计必不可少<sup>[3~6]</sup>. 使用光路传送信号的上层网络(SDH、ATM 或 IP)虽然拥有自己的保护或恢复机制, 但是在叠加构架中对物理拓扑不可见的特性, 使得上层网络的自愈机制一般都是为防止光路失效而设计的, 这就隐含假设了上层网络重路由业务流的通路和正常状态下传送业务流的通路是相互独立的. 由于 WDM 网络中的物理链路可以被很多光路使用, 一条物理链路失效(如光缆断裂)会使所有使用它的光路无法工作, 光路之间的这种内在

依赖性使得上层网络即使预留了冗余资源也可能无法恢复受到影响的业务流(例如此时虚拓扑已变得不连通),这种现象在文献[5]中称为失效扩散(Failure Propagation).文献[5,6]针对此问题提出了一种基于禁忌搜索(Taboo Search)的DAP(Disjoint Alternate Path)优化算法,旨在保证上层网络在物理网络发生单节点或单链路失效时仍有可能恢复受影响的业务流.这种设计虚拓扑映射的做法在文献[5,6]中称为设计保护(Design Protection),本文仍通称为保护设计.但是DAP算法忽略了两点:(1)虚拓扑中的逻辑链路在物理拓扑上寻路时使用的是简单的最短路算法,没有考虑全网的状态信息,这会导致物理网络的负载分配很不均匀,即某些物理链路被光路使用的次数很多,而其它物理链路的波长资源却没有得到有效利用,尤其是在早期版本的DAP算法<sup>[5]</sup>中更是如此,这不利于节约网络资源和升级网络.(2)对光纤链路可以容纳的波长通道的最大数目未作限制.就是说用DAP算法得到的虚拓扑映射可能会超出某些物理链路支持的最大波长数,即便使用文献[6]中的DAP改进算法也是如此,这会严重影响DAP算法的实际应用.

## 2 WDM光传送网的保护设计

### 2.1 保护设计的概念和原则

由于光路之间可能存在的内在依赖性,上层网络即使在虚网络中预留了冗余资源也可能无法绕过失效部件,恢复受影响的上层业务.保护设计的目的是把给定的虚拓扑小心地嵌入物理网络,尽量避免物理网络中的单链路失效造成虚拓扑不再连通的情况出现.当然上层网络仍需在光路中预留一定的冗余资源,以使恢复受影响的业务成为可能<sup>[6]</sup>.本文只考虑会给上层网络带来可见影响的光网部件失效,可以由光层自愈机制(参看文献[3,4])修复的失效不在考虑范围之内.保护设计背景的详细论述可参看文献[5,6].

保护设计算法中用到的物理拓扑和虚拓扑都已给定.物理拓扑可以是根据安装成本、节点距离或其它物理参数确定的新网络,也可以是已存在的光纤网络.虚拓扑可以根据文献[1,2]提供的方法,以优化分组延时等参数为目标进行设计.因为保护设计算法是处理虚拓扑和物理拓扑间映射的算法,所以在实际使用时可以包含在虚拓扑设计流程中.

### 2.2 保护设计问题的描述

已知:(1)物理网络  $G_p(N, E_p, W) = (p_{mn})_{|N| \times |N|} = (p_{mn})_{|N| \times |N|}$ ,其中  $N$  代表波长路由节点的集合( $|N|$  代表  $N$  中节点的数目),  $E_p = \{p_{mn}\}$  代表连接这些节点的物理链路的集合,  $W$  代表物理链路支持的波长通道集合( $|W|$  代表  $W$  中波长的数目).如果节点  $m$  和  $n$  之间有光纤链路相连则  $p_{mn} = p_{nm} = 1$ , 否则  $p_{mn} = p_{nm} = 0$ . 本文假定所有物理链路都只包含单根双向光纤,而且能够支持的波长通道数  $|W|$  相同.(2)物理网络的距离矩阵  $D = (d_{mn})_{|N| \times |N|}$ , 这里的距离是广义的,  $d_{mn}$  可以是节点间的地理距离,也可以是链路传送业务的时延值,当然也可以全部设为1(也是本文采用距离值).(3)虚拓扑  $G_v(N, E_v)$ ,  $E_v = \{v_{sd}\}$  代表波长路由节点间的光路集合.(4) $N$  中的节点都具有全波长转换能力.

目标:(1)为  $G_v$  中的光路寻找合适的路由,使得  $G_p$  中的任意单链路失效不会造成  $G_v$  不连通.可用下式表示此目标:

$$\text{Minimize } F(R) = \sum_{m,n} n(p_{mn}) = \sum_{m,n} \sum_{s,d} b_{mn}^{sd}$$

这里  $b_{mn}^{sd} = 1$  表示当光纤链路  $p_{mn}$  失效时光路  $v_{sd}$  无法找到替代路由,  $\{v_{sd}, p_{mn}\}$  被称为 broken pair<sup>[5,6]</sup>, 此时的光路  $v_{sd}$  称为未受保护.  $R$  代表虚拓扑中所有光路的路由波长配置.  $F(R)$  表示网络实际设计时 broken pair 的数目.  $F(R) = 0$  表示所有的光路都受到了保护<sup>[5]</sup>. (2)尽量均衡物理链路的负载.

存在的限制:经过任何一条链路的光路数不能超过链路可用波长集  $W$  中的波长数  $|W|$ .

## 3 VTMPD 算法

VTMPD 算法中,光路在寻路时采用了负载均衡策略,链路的代价随着被使用次数的增加而增加,因此在安排后面的光路时会自然避开负载较重的链路,这一方面可以减少出现 broken pair 的概率,另一方面也可以更容易地遵守物理链路的容量限制.保护设计则采用重路由的方式避开可能产生问题的链路.为了扩大访问空间和避免算法陷于某个局部最小点,使用禁忌搜索法(Taboo Search)<sup>[5,6]</sup>,创建一个光路的禁忌表,放置最近改变过路由的光路.算法在改变光路的路由前,先扫描禁忌表,只有不在禁忌表中的光路才采用新的路由,这样可以发现某个局部最优路由以外的路由.

VTMPD 算法描述如下:

### 步骤1 初始化

(1)初始化与物理网络有关的参数,包括:

① 计算链路  $p_{mn}$  的归一化长度.

$$\text{Normalized\_Length}(p_{mn}) = d_{mn} / \text{Max}(d_{ij}), \forall p_{mn} \in G_p$$

② 计算链路的初始使用代价

$$\text{COST}(p_{mn}) = \begin{cases} \text{Normalized\_Length}(p_{mn}), & \text{如果 } p_{mn} = 1 \\ \infty, & \text{如果 } p_{mn} = 0 \end{cases}, \forall p_{mn} \in G_p$$

(2)初始化尚未确定路由的虚链路的集合:  $\text{NotRouted\_VLink} = \{\text{All VLinks}\}$ .

(3)根据前面得到的链路的代价生成代价矩阵.

### 步骤2 当 $\text{NotRouted\_VLink}$ 集合不为空时

(1)对于  $\forall v_{sd} \in \text{NotRouted\_VLink}$ :

① 以  $\text{COST\_MATRIX}$  为代价矩阵,使用 Dijkstra 算法得到  $v_{sd}$  的暂时路由  $\text{Temp\_Route}$ 、路由代价  $\text{ROUTE\_COST}$ .

$$\text{ROUTE\_COST}(v_{sd}) = \sum_{m,n} \text{COST}(p_{mn}) \cdot r_{mn}^{sd}, \text{ 其中}$$

$$r_{mn}^{sd} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } v_{sd} \text{ 使用了 } p_{mn} \\ 0, & \text{其它情况} \end{cases}$$

② 把  $v_{sd}$  的  $\text{Temp\_Route}$  加入路由配置  $R$  并计算目标函数  $F$ .

③ 从路由配置  $R$  中去掉  $v_{sd}$  的  $\text{Temp\_Route}$ .

(2)如果不是所有的  $v_{sd} \in \text{NotRouted\_VLink}$  都能找到路由则转至步骤7.

(3)遍历所有  $v_{sd} \in \text{NotRouted\_VLink}$ , 找到  $F$  最小的  $v_{sd}$ , 如果有多条  $v_{sd}$  对应的  $F$  均为最小值,取其中  $\text{ROUTE\_COST}$

$(v_{sd})$ 最小的一个,表示为  $v_{sd}^+$ .

(4) 将  $V_{sd}^+$ 的暂时路由作为它的初始路由,并加入路由配置  $R$ .基于  $R$  计算出的  $F$  记为  $F_{min}$ ,此时的  $R$  记为  $R_{min}$ .

(5) 将  $V_{sd}^+$ 从  $NotRouted\_VLink$  集合中去掉,计数器  $Routed\_VLink$  加 1.

步骤 3 检查物理链路被使用的次数是否已达到容量极限

(1) 对于  $\forall p_{mn} \in G_p$ , 如果  $Load(p_{mn}) = |W|$ , 则将  $p_{mn}$  从  $G_p$  中删除.

(2) 刷新  $G_p$  中所有物理链路的代价  
 $COST(p_{mn}) = W_1 \times Normalized\_Length(p_{mn}) + W_2 \times Load(p_{mn})$   
 式中  $W_1$  和  $W_2$  是加权系数.

(3) 刷新代价矩阵  $COST\_MATRIX$   
 步骤 4 VTMPD 算法中和禁忌搜索(Tabu Search)有关的参数设定

- (1) 禁忌表的尺寸限制  
 $Taboo\_Size = 0.5 \times Routed\_VLink$
- (2) 禁忌搜索次数的确定  
 $Max\_Iteration = 1.5 \times Routed\_VLink$
- (3) 禁忌表  $Taboo\_List$  设为空,计数器  $Search\_Count$  设为 0.

步骤 5 路由优化

(1) 找到当前  $R$  对应的所有  $Broken\_Pair$  ( $b_{mn}^{sd} = 1$  的  $\{v_{sd}, p_{mn}\}$ )

(2) 对于  $\forall v_{sd} \in \{Broken\_Pair\}$ , 如果  $v_{sd} \notin Taboo\_List$   
 \* 重新路由  $v_{sd}$  以避免可能引发失效扩散的链路, 将新路由加入  $R$ .

\* 计算当前  $R$  对应的  $F$

\* 恢复  $v_{sd}$  以前的路由

(3) 如果  $\forall v_{sd} \in \{Broken\_Pair\}$  都无法找到新路由则转至步骤 6

(4) 遍历所有  $v_{sd} \in \{Broken\_Pair\}$ , 找出  $F$  最小的一个,  $F$  相等则比较路由代价, 选择路由由代价最小的, 记为  $v_{sd}^+$ . 将  $v_{sd}^+$  的新路由加入  $R$ .

(5) 将  $v_{sd}^+$  加入禁忌表  $Taboo\_List$ . 检查禁忌表尺寸是否已达上限, 如果达到上限则从  $Taboo\_List$  中去掉历史最长的元素.

(6) 如果  $F(R) < F_{min}$ ,  $F_{min} = F(R)$ ,  $Search\_Count$  置为 0,

$R_{min} = R$ ; 否则  $Search\_Count++$ .

(7) 如果  $Search\_Count < Max\_Iteration$  转到步骤 5

步骤 6 如果  $NotRouted\_VLink$  集合不为空转至步骤 2, 否则转至步骤 8

步骤 7 返回 FAILURE

步骤 8 返回 SUCCESS

### 4 数值结果和讨论

测试用的物理网络是 ARPA-2 网络(21 个节点、26 条链路), 虚拓扑是随机产生的拓扑(42 条光路), 物理拓扑和虚拓扑参看图 1 和图 2. 假设物理链路均由单根双向光纤构成, 支持的可用波长数为 9. 与文献[5, 6]一样, 本文假定所有 WRS 都具有全波长转换能力. 为了方便和 DAP 算法比较, 物理链路的归一化长度都设定为 1, 加权系数  $W_1 = 1$ ,  $W_2 = 2$ . SPR (Shortest Path Routing) 是最简单的虚拓扑映射算法, 所有光路都根据它的最短路嵌入物理拓扑, 不考虑其它因素的影响. DAP 1 是在文献[5]中给出的算法, 也没有考虑物理链路的容量限制; DAP 2 算法在文献[6]中给出, 是在 DAP 1 基础上的改进算法, 主要改进是在目标函数中加入了寻路时违反链路容量限制行为的惩罚分量, 以此来强迫算法在寻路时尽量遵守链路的容量限制.

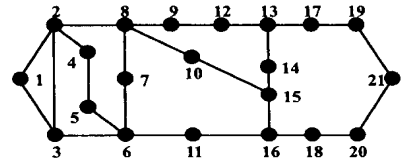


图 1 21 节点、26 链路的 ARPA-2 物理网络

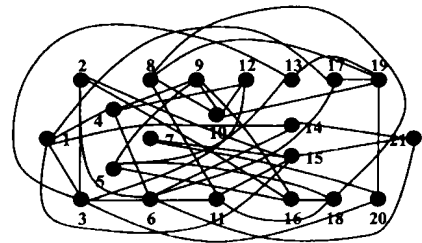


图 2 42 条光路的虚拓扑

应用这四种虚拓扑映射算法进行网络设计, 得到的光路路由也有所不同, 表 1 第一列列出了路由不尽相同的光路, 后

表 1 四种虚拓扑映射算法得到的路由不尽相同的光路及其路由

Lightpath	SPR	DAP-1	DAP-2	VTMPD
(1, 17)	(1, 2, 8, 9, 12, 13, 17)	(1, 2, 8, 9, 12, 13, 17)	(1, 2, 8, 9, 12, 13, 17)	(1, 2, 8, 10, 15, 14, 13, 17)
(2, 6)	(2, 3, 6)	(2, 3, 6)	(2, 3, 6)	(2, 8, 7, 6)
(3, 13)	(3, 2, 8, 9, 12, 13)	(3, 2, 8, 9, 12, 13)	(3, 2, 8, 9, 12, 13)	(3, 6, 7, 8, 9, 12, 13)
(5, 13)	(5, 4, 2, 8, 9, 12, 13)	(5, 4, 2, 8, 9, 12, 13)	(5, 4, 2, 8, 9, 12, 13)	(5, 6, 7, 8, 12, 13)
(8, 18)	(8, 10, 15, 16, 18)	(8, 9, 12, 13, 17, 19, 21, 20, 18)	(8, 10, 15, 16, 18)	(8, 10, 15, 16, 18)
(9, 10)	(9, 8, 10)	(9, 12, 13, 14, 15, 10)	(9, 12, 13, 14, 15, 10)	(9, 8, 10)
(9, 16)	(9, 8, 10, 15, 16)	(9, 8, 10, 15, 16)	(9, 8, 10, 15, 16)	(9, 12, 13, 14, 15, 16)
(10, 12)	(10, 8, 9, 12)	(10, 15, 14, 13, 12)	(10, 15, 14, 13, 12)	(10, 15, 14, 13, 12)
(16, 18)	(16, 18)	(16, 18)	(16, 15, 14, 13, 17, 19, 21, 20, 18)	(16, 15, 14, 13, 17, 19, 21, 20, 18)

面是不同算法得到的路由. 表 2 中分别列出了 DAP 算法和 VTMPD 算法进行保护设计所针对的 broken pairs. VTMPD 算法因为在寻路时使用了负载均衡的策略, 使得 broken pair 的数目一开始就远少于 DAP 算法, 保护设计流程中需要调整的路由数因此大为减少, 这有助于加快算法进程, 代价是没有使用最短路的光路数比 DAP 算法略有增加.

表 2 不同虚拓扑映射算法在进行保护设计前得到的 broken pairs

Link	DAP 1 & DAP 2	VTMPD
(8, 9)	(3, 12), (4, 9), (4, 12), (5, 9), (9, 10), (9, 16), (10, 12)	—
(9, 12)	(3, 12), (4, 12), (10, 12)	—
(16, 18)	(5, 18), (8, 18), (11, 18), (16, 18)	(5, 18), (8, 18), (11, 18), (16, 18)

表 3 中列出了几条链路在不同算法下的负载, 链路(2, 8)和(8, 9)是负载最重的两条链路, 可以称为“瓶颈链路”. SPR 算法和 DAP 1 算法没有考虑链路容量的限制, (2, 8)和(8, 9)被使用的次数多次超出容量上限, 而 DAP 2 算法由于在目标函数中加入了惩罚分量, 情况好一些, 但仍在(2, 8)和(8, 9)各有一次违反容量限制; VTMPD 算法则完全没有违反链路的容量限制, 只是增加了非瓶颈链路的使用, 如(6, 7)和(7, 8)等.

表 3 不同虚拓扑映射算法在进行保护设计前得到的链路负载

Link	链路负载			
	SPR	DAP 1	DAP 2	VTMPD
(2, 8)	10	10	10	9
(8, 9)	12	11	10	9
(6, 7)	3	3	3	6
(7, 8)	3	3	3	6

表 4 首先给出了四种虚拓扑映射算法得到的全网所有链路的负载之和  $L_{total}$ 、链路平均负载  $L^*$  和负载方差  $L_{var}$ . 本文将链路负载  $L_{mn}$  定义为链路  $p_{mn}$  被光路使用的次数, 负载方差则使用公式  $L_{var} = \sum_{m,n} (L_{mn} - L^*)^2$  计算.  $L^*$  则是所有  $L_{mn}$  的平均值. 负载方差  $L_{var}$  越小说明光路在物理网络中分配得越均匀. 好处是一方面能更有效地利用网络资源, 另一方面使得 broken pair 的数目一开始就较少, 保护设计流程中需要调整的路由数也就较少, 从而使所有光路都得到保护的目标 (即  $F(R) = 0$ ) 更容易达到. 表中数据显示 VTMPD 算法得到的路由比 DAP 算法得到的路由在网络中分布得更均匀, 代价是增加了非瓶颈链路的使用, 这会稍稍增加网络的链路平均负载  $L^*$ . 表 4 中还给出了四种算法得到的目标函数,  $F$  代表网络设计过程中 broken pair 的数目,  $F = 0$  表示当前的虚拓扑映射可以保证物理网络的任何单链路失效都不会造成虚拓扑不连通, 或者说所有光路都受到了保护<sup>[5,6]</sup>. DAP 2 算法使用的目标函数是  $F_{calc}$ , 定义如下

$$F_{calc} = F + \sum_{m,n} \max[0, L_{m,n} - |W|]^2$$

和式第二项是为了尽量遵守物理链路容量限制而加入的惩罚分量. 四种算法中 SPR 算法是最简单也是在负载均衡和防止

失效扩散方面性能最差的算法.

表 4 不同虚拓扑映射算法的性能比较

	SPR	DAP-1	DAP-2	VTMPD
$L_{total}$	138	146	149	150
$L^*$	5.31	5.62	5.73	5.77
$L_{var}$	7.38	5.88	5.31	4.50
$F$	14	0	$F_{calc} = 2$	0

## 5 结论

WDM 网络可以充分利用光纤链路的巨大带宽, 同时也使网络抗毁机制的设计变得更加重要. 使用虚拓扑支持上层业务的叠加方式仍是现在使用光纤网络最实用的方式之一, 但是由于光路之间存在的内在依赖性, 物理网络的单链路失效可能会造成虚拓扑不连通而使上层网络无法使用自身的恢复机制来恢复受影响的业务. 本文提出的 VTMPD 算法, 在进行保护设计的同时考虑了负载均衡和物理链路的容量限制, 测试数据表明 VTMPD 算法在实用性、链路负载均衡、有效利用波长资源等方面均优于已有的 DAP 算法.

## 参考文献:

- [1] B Mukherjee, D Banerjee, A Mukherjee. Some principles for designing a wide area optical network [J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1996, 4(5): 684-695.
- [2] D Saha, M D Purkayastha, A Mukherjee. An approach to wide area WDM optical network design using genetic algorithm [J]. Computer Communications, Jan. 1999: 156-172.
- [3] S Ramamurthy, Biswanath Mukherjee. Survivable WDM mesh networks, Part II Protection [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM'99 [C], 1999.
- [4] Stefano Baroni, Polina Bayvel, Richard J. Gibbens, Steven K Korotky. Analysis and design of resilient multi-fiber wavelength routed optical transport networks [J]. IEEE JLT, May 1999, 17(5): 743-757.
- [5] J Amitage, Oliver Crochat, Jear Yves Le Boudec. Design of a survivable WDM photonic network [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM'97 [C], 1997.
- [6] Oliver Crochat, Jear Yves Le Boudec. Design protection for WDM optical networks [J]. IEEE J-SAC, Sept. 1998, 16(7): 1158-1165.

## 作者简介:



王 焜 男. 1974 年 5 月生于安徽省巢湖市. 1998 年获电子科技大学信号与信息处理硕士学位. 现在电子科技大学光纤通信国家重点实验室攻读通信与信息系统博士学位. 目前主要研究方向为: WDM 光传送网体系结构、网络生存性、波长路由和分配算法、波长变换器对光传送网络性能的影响等.

李乐民 男. 1932 年 5 月生于浙江省吴兴市. 1952 年毕业于上海交通大学电机系, 1980~1982 年访问美国加州大学圣迭戈分校. 现为电子科技大学教授, 博士生导师, 中国工程院院士. 研究方向为信息传输与宽带通信网.