

一种新的 WDM 光传送网保护设计算法

王 焱, 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: 在 WDM 网络中, 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。已有的分离备用路径 (Disjoint Alternate Path, DAP) 算法总是假设网络所有波长路由由节点都具有全波长转换能力。本文提出的 LG-VTMDP 保护设计算法利用分层图同时解决路由和波长分配两个子问题, 并考虑了负载均衡和物理链路的容量限制。实验结果表明 LG-VTMDP 算法优于 DAP 算法和已有波长分配算法组合后的性能。本文还在在此基础上提出了一种有效的波长转换器放置算法 WCP 算法。

关键词: WDM 网络; 生存性; 保护设计; 波长转换器放置

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1623-05

A New Algorithm of Design Protection for Optical Transport Networks

WANG Ye, LI Le-min, WANG Sheng

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

Abstract: In a WDM transport network, 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, ATM or IP) impossible. It is necessary to avoid the above cases while embedding virtual topology into physical topology. Existent Disjoint Alternate Path (DAP) algorithm always assumes that all network nodes have full-range wavelength conversion capability. A new heuristic algorithm, called Virtual Topology Mapping for Design Protection Based on Layered Graph (LG-VTMDP), used in design protection for WDM optical networks is proposed in this paper. The algorithm considers two problems of routing and wavelength assignment simultaneously. Load balancing and capacity constraints of physical links are also considered. The LG-VTMDP algorithm is shown to perform better than the combination of the DAP algorithm and existent wavelength assignment algorithms. Based on the result of the LG-VTMDP algorithm, an efficient Wavelength Converter Placement (WCP) algorithm is presented subsequently.

Key words: WDM network; survivability; design protection; wavelength converter placement

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、高速传输多种格式的信号。采用波长分配和路由选择的 WDM 光传送网被认为是下一代高速骨干网的最具竞争力的竞争者。在 WDM 光传送网中, 高层业务 (电路交换业务、分组交换业务或两者的混合) 用光路 (Lightpath) 构成虚拓扑 (Virtual Topology) 来支持。装有光分插复用器 (Optical Add/Drop Multiplexer, OADM) 和光交叉连接 (Optical Cross-Connect, OXC) 的波长路由由节点可以灵活地配置, 从而将任意形状的虚拓扑嵌入给定的物理光纤网络。在这种网络构架中, 使用光路的上层网络设备 (SDH 交叉连接设备、ATM 交换机或高速 IP 路由器) 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。

但是, 一根光纤中包含多路波长信道的做法使 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。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, 但是这些机制都是基于所有光路是彼此独立的这一假设而设计的。由于 WDM 网络中的物理链路 (由光纤构成) 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 (例如此时虚拓扑已变得不连通), 这种现象在文献 [1, 2] 中被称为失效扩散 (Failure Propagation)。虚拓扑的设计和优化问题已被证明是 NP-C 问题^[3], 也就是说对于尺寸较大的网络我们不得不使用启发

式算法来求得次优解. 研究这一问题的文献一般是将之划分为四个子问题^[3,4], 分别使用不同的启发式算法解决, 最后再用一些通用的非数值优化算法(如模拟退火算法^[3]和遗传算法^[4])进行结果优化. 不过文献[3,4]中处理虚拓扑和物理拓扑间映射问题的算法都没有考虑物理链路失效可能引发的失效扩散. 文献[1,2]针对虚拓扑嵌入物理拓扑时可能引发的失效扩散问题, 提出了一种基于禁忌搜索(Tabu Search)的 DAP (Disjoint Alternate Path) 算法, 旨在保证上层网络在物理网络发生单链路或单节点失效时总是有可能恢复受影响的业务, 即为给定虚拓扑中的光路寻找合适的路由, 使得物理网络出现单链路(或单节点)失效时, 虚拓扑仍能保持连通. 文献[1,2]将这种设计虚拓扑映射的做法称为设计保护(Design Protection), 本文则通称为保护设计.

但是, 已有的 DAP 算法忽视了以下三点: (1) DAP 算法在为虚拓扑中的光路寻找路由时用的是链路使用代价固定的最短路算法(包括寻找光路的初始路由和为避免失效扩散进行的重路由), 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. 这容易使网络业务在局部出现“拥塞”现象, 不利于节约网络建设成本和网络升级. (2) DAP 算法在确定光路路由的时候并不考虑光纤链路中可用波长数的限制, 也就是说即使物理链路的容量已经给定, 用 DAP 算法得到的虚拓扑映射(所有光路的路由集合)仍可能会在某些物理链路上超出可用的波长数, 使用文献[2]中改进后的 DAP 算法也是如此, 这可能会影响到 DAP 算法的实际应用. (3) DAP 算法在进行网络设计时总是假定所有波长路由由节点都有全波长转换能力. 因为具备全波长转换能力的波长路由节点仍然相当昂贵, 所以实际应用中为所有网络节点装配全波长转换器的作法尚不现实^[5,6]. 因此有必要研究网络节点无波长转换能力和只有部分节点具有波长转换能力情况下的保护设计问题. 后者通常被称为“稀疏波长转换”(Sparse Wavelength Conversion)网络^[6].

本文首先给出一种新的保护设计算法, 称为基于分层图的用于保护设计的虚拓扑映射(Virtual Topology Mapping for Design Protection Based on Layered Graph, LGMDP)算法. 此算法除了以保护设计为目标外, 将同时处理为光路寻找路由和为光路分配波长两个子问题, 并尽量均衡物理链路的负载和严格遵守链路的容量限制. 然后在 LGMDP 算法的基础上又提出了一种有效放置波长转换器的算法, 称为 WCP (Wavelength Converter Placement) 算法. 第 2 节给出了网络模型和待求解问题的描述. 第 3 节简要介绍分层图和禁忌搜索. 第 4 节给出 LGMDP 算法的细节. 第 5 节是 WCP 算法的描述. 第 6、7 节分别是实验结果和结论.

2 无波长转换的 WDM 网络保护设计问题的描述

不考虑波长分配问题的 WDM 网络保护设计模型已在文献[1,2]中给出. 在本节中给出考虑波长分配问题后的网络模型的简要描述. 此时的保护设计问题实质上就是以使给定虚拓扑中未受保护的光路数目最少为目标, 包括路由子问题和

波长分配子问题的静态光路建立(Static Lightpath Establishment, SLE)问题. “未受保护”的含义见后面的定义. 本文只考虑会给上层网络带来可见影响的 WDM 网络部件失效, 可以由 WDM 网络自愈机制修复的失效不在考虑范围之内(这些失效被修复的过程对上层网络是透明的而无需启动上层网络的保护/恢复机制). 保护设计背景的详细论述可参看文献[1,2].

SLE 问题已在文献[7]中被证明是 NP-C 问题, 因此本节下面要描述的问题也是 NP-C 问题. 启发式算法被用来得到问题的次最优解. 本文欲解决的问题描述如下:

已知: (1) 物理网络 $G_p(N, E_p)$. N 代表波长路由节点的集合, E_p 代表连接这些节点的物理链路的集合. 本文假定所有物理链路都只包含单根双向光纤, 且含有相同的波长通道数. (2) 虚拓扑(或者说虚网络) $G_v(N, E_v)$. E_v 代表波长路由节点间的光路集合. (3) N 中的节点均无波长转换能力.

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. 可以用下面的式子表示此目标:

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

这里 $d_{mn}^{sd} = 1$ 表示当光纤链路 l_{mn} 失效时光路 v_{sd} 无法找到替代路由, $\{v_{sd}, l_{mn}\}$ 被称为 broken pair^[1,2], 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^[1]. (2) 为光路分配波长并最小化使用的波长数目.

存在的限制: (1) 经过相同物理链路的光路不能分配相同的波长; (2) 一条光路在其经过的物理链路上只能使用相同的波长(波长连续性限制); (3) 经过任何一条链路的光路数不能超过当前可用波长集 W 中的波长数 $|W|$.

3 分层图和禁忌搜索

在 WDM 网络中, 一根光纤中承载了多路波长通道. 在物理网络 G_p 和光纤链路中的可用波长集 W 给定时, 可以得到一个辅助图 G_{LG} , 称为分层图(Layered Graph)^[8,9]. 假定可用波长集中的波长数为 $|W|$, G_p 中的每个节点 $i \in N$ 在 G_{LG} 中被“复制”了 $|W|$ 次, 对应 G_{LG} 中的顶点 $u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{|W|}$. 如果 G_p 中的节点 i 与 j 之间存在链路 $l_{ij} \in E_p$, 则对于所有的 $\{1, 2, \dots, |W|\}$, G_{LG} 中的顶点 u_i 和 u_j 被一条双向边连接. G_{LG} 的每一层对应可用波长集中的一个波长, 也称为一个波长平面. 波长平面数等于 $|W|$. 至此网络无波长转换能力时对应的 G_{LG} 构建完毕. 在这样构成的 G_{LG} 中, 为 G_v 中的光路请求 v_{sd} 寻找路由并分配波长的问题可以一次性得到解决. 在 G_{LG} 中找到一条路由的同时波长连续性限制也得到了满足. 为了便于和物理网络中的路由(Route)区别, 本文在此之后称 G_{LG} 中的通路为 LGR(Layered Graph Route).

使用分层图的算法在寻找 LGR 的时候, 为了方便可以为 G_p 的每个节点 i 定义一个源顶点 u_i^s 和目的顶点 u_i^d . 从 u_i^s 出发有 $|W|$ 条边分别连接 $u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{|W|}$; 相应的有 $|W|$ 条边分

别从 $u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{|W|}$ 与 u_i^d 相连. 这些人定义的边的代价始终设定为 0. 这样就可以在一个连通的分层图中寻找 LGR 并建立与物理拓扑中的光路的映射关系.

如果包含所有放置了波长转换器的网络节点的集合 N_{wc} , 分层图在构建时还要加入代表波长转换的边. 如果 G_p 中的节点 $i \in N_{wc}$ 并且可以完成从波长 m 到波长 n 的转换(假设转换能力是双向的), 则 G_{LG} 中的顶点 u_i^m 和 u_i^n 被一条双向边连接, 其代价称为转换代价 $C(m, n)$. 这时一条 LGR 可以穿越几个波长平面, 即对应的光路使用不止一个波长.

禁忌搜索是由 Glover 和 Hansen^[2]提出的一种通用的非数值优化算法, 用于求解一些难于直接求解的优化问题. 在我们的算法中, 使用重选 LGR 的方法来处理 broken pair 中的光路连接请求以减小 $F(R)$, 每次改变一条光路的原始 LGR. 禁忌搜索的主要思想是: 为了避免算法陷于局部最优解和扩大被访问的解空间, 创建一个禁忌列表 (Tabu List) 用于跟踪最近访问过的解, 即保存最近改动过 LGR 的光路请求. 算法在改变一个光路请求对应的 LGR 之前会先扫描禁忌列表, 如果确认此请求出现在禁忌列表中, 就不会改变它对应的 LGR. 这样有助于跳出局部最优解的陷阱.

4 LG. VIMDP 算法

LG. VIMDP 算法在为 G_p 中的光路请求寻找路由时采用了负载均衡策略, 物理链路的使用代价随着被使用次数的增加而增加, 因此算法在安排后面的光路时会自然避开负载较重的链路, 以达到平衡网络链路负载的目的. 这一方面可以减少出现 broken pair 的概率, 另一方面也可以使设计结果能更容易地遵守物理链路的容量限制. 我们定义物理链路的初始代价等于链路的长度. 算法执行过程中使用公式 $e_{mn} = p \times l_{mn}$ 的长度 + $q \times l_{mn}$ 的负载计算物理链路 $l_{mn} \in E_p$ 的当前使用代价, 物理链路的代价矩阵 $C_p = \{e_{mn}\}$. 其中 p 和 q 是两个加权因子. 在本文中, 所有物理链路的长度均设为 1. 当然, 链路的其它一些参数(如传输延时)也可定义为链路的长度. G_p 对应的 G_{LG} 中的弧 (i, j) 的代价 c_{ij} 可以用下面的式子定义. $C_{LG} (= \{c_{ij}\})$ 代表 G_{LG} 对应的代价矩阵.

$$c_{ij} = \begin{cases} e_{mn}, & \text{如果 } l_{mn} \text{ 可用 (即没有被删除)} \\ , & \text{其它情况} \end{cases} \quad (1)$$

上式中 $i = \alpha |N| + m, j = \alpha |N| + n, 0 \leq \alpha \leq |W| - 1$. 光路 $v_{sd} \in E_s$ 在 G_{LG} 中寻找一条 LGR 的代价定义为:

$$d_{sd} (d_{new}) = \begin{cases} c_{ij}, & \text{如果光路 } v_{sd} \text{ 的 LGR 使用了弧 } (i, j) \\ , & \text{如果 } v_{sd} \text{ 无法找到有限代价的 LGR} \end{cases} \quad (2)$$

LG. VIMDP 算法的步骤如下:

Step1: 初始化可用波长集 W 中的波长数, 令放置波长转换器的节点集合 $N_{wc} = \phi$. $|W|$ 的初始值可以设定为 DAP 算法得到的最大链路负载值.

Step2: 根据当前的 W 和 N_{wc} , 将给定的物理网络 G_p 转换为分层图 G_{LG} .

Step3: 调用 DESIGN. PROTECTION 子算法得到当前 W 和 N_{wc} 对应的 F_{min} 和 R_{min} .

Step4: 如果 $R_{min} = \phi$ 转至 Step5, 否则转至 Step6.

Step5: 可用波长集 W 中的波长数减 1; 执行 Step2 和 Step3; 转至 Step4.

Step6: 可用波长集 W 中的波长数加 1; 执行 Step2 和 Step3 得到最终可以达到的 F_{min} 和 R_{min} ; 同时返回 W .

DESIGN. PROTECTION 子算法的步骤如下:

Step1: 初始化 C_p, C_{LG} . 令 $R = \phi, S$ 代表尚未确定 LGR 的光路请求的集合. 初始时 $S \leftarrow G_s$ 即可.

Step2: 对于 $\forall v_j \in S$, 基于 C_p 执行最短路算法(如 Dijkstra 算法)得到 v_j 的初始最短路. 计算最短路经过的物理链路的 H_j .

Step3: 当集合 $S = \phi$ 时, 转至 Step4, 否则转至 Step8.

Step4: 对于每个光路请求 $v_j \in S$, 基于当前的 C_{LG} 在 G_{LG} 中寻找一条最短路作为 v_j 的初始 LGR, 记为 r_j .

(1) 如果不存在这样的 r_j 则算法停止并返回 $R = \phi$.

(2) 如果存在这样的 r_j

(a) $R_{temp} \leftarrow R, R \leftarrow R + \{r_j\}$;

(b) 计算当前 R 对应的目标函数 $F(R), F_j = F(R)$;

(c) 根据式(2)计算 r_j 对应的代价 d_j ;

(d) 恢复 R , 即 $R \leftarrow R_{temp}$.

Step5: 比较 S 中所有光路请求对应的 F 并选出 F 最小的光路请求, 记为 v^* , 对应的 LGR 记为 r^* .

(1) 如果出现平局则选择 LGR 代价 d 小的一个. 如果平局仍未打破再比较对应的 LGR 的 H 并选择小的一个.

(2) $R \leftarrow R + \{r^*\}, S \leftarrow S - \{v^*\}$; 更新资源占用记录;

(3) 计算当前 R 对应的 $F(R)$, 令 $F_{min} = F(R)$;

(4) 检查物理链路的资源状况, 从 G_p 中去掉波长资源用尽的链路, 然后更新 C_p, G_{LG} 和 C_{LG} ;

(5) 设定变量 $index = 0$, 禁忌列表 $tabu_list = \phi$, 以及 $I_{max} = \lceil 1.5 \times \text{已确定 LGR 的光路请求数} \rceil, TS = \lfloor 0.5 \times \text{已确定 LGR 的光路请求数} \rfloor$. $\lceil x \rceil$ 表示不大于 x 的最大整数.

Step6: 如果 $index < I_{max}$ 转至 Step7, 否则转至 Step3.

Step7: 根据当前 R 计算 broken pairs, 记为集合 B .

(1) 对于 B 中的 $\forall v_j \in tabu_list$:

(a) 为 v_j 重新选择 LGR 以避免引起问题的链路;

(b) 用此 LGR 代替 v_j 原来的 LGR 并计算 $F(R)$;

(c) 计算此 LGR 的代价 d_j 和经过的链路数;

(d) 将 C_p, G_{LG}, C_{LG} 和 R 恢复原状.

(2) 使用类似 Step6 的原则选出一个光路请求 v^+ ;

(3) $R \leftarrow R + \{v^+\}$, 当前 R 对应的 $F(R)$ 记为 F^+ ;

(4) 检查物理链路的资源状况并更新所有相关信息;

(5) 将 v^+ 加入 $tabu_list$ 并检查它的尺寸是否已达到 TS , 如果超过了 TS 则从列表中删除历史最长的光路请求;

(6) 如果 $F^+ < F_{min}$ 则 $F_{min} = F^+, index = 0, R_{min} = R$, 否则 $index++$.

(7) 转至 Step6.

Step8: $R \leftarrow R_{min}$, 返回 F_{min} 和 R .

5 波长转换器放置算法

正如前面提到的, 为 WDM 网络的所有节点配置全波长

转换器在时下仍是不现实的. 获得和全波长转换网络相同或相近性能(如以呼叫阻塞率为指标)的方法之一是在网络中合理放置有限数目的波长转换器^[5,6]. 目前绝大多数研究波长转换器放置问题的文献都是针对动态业务下如何放置波长转换器,以有效减小网络的呼叫阻塞率. 我们在此节中提出一种适用于网络设计阶段并能有效减少全网使用波长数的波长转换器放置算法,以下称为 WCP 算法. WCP 算法以 LG-VTMDP 算法为核心子算法.

首先,令 $N_{wc} = N$,即假设所有网络节点都有全波长转换能力,然后调用 LG-VTMDP 算法并根据结果得到当前可用波长集 W ,记为 W_B . $|W_B|$ 是我们可以得到网络使用波长数的下界. 之后我们令 $N_{wc} = \phi$ 并使用 WCP 算法在网络中逐一放置波长转换器直到全网使用的波长数达到下界 $|W_B|$. 波长转换器总是被放置在那些有较多 LGR(或光路)经过的网络节点中. 由于波长连续性的限制,与这些节点相连的链路更容易成为安排光路时的“资源瓶颈”.

目前常用的全光波长转换器,如采用四波混频(Four Wave Mixing, FWM)技术的波长转换器,还很难将输入波长信号无差别地转换成其它任何波长信号^[5]. 因此,为了减小光信号的畸变,光路在它经过的链路上应优先使用相同的波长,即尽量使波长转换的次数最少. 这一原则也称为邻近波长转换^[5]. 在此原则下,我们定义从波长 m 转换到波长 n 的转换代价 $C(m, n) = |N| + (m - n)^2$, m, n , 和 N 为常数. 不进行波长转换时的转换代价为 0.

因为 LG-VTMDP 算法在进行保护设计的时候会调整某些光路的 LGR,加上可用波长集中的波长数也是在放置波长转换器后逐渐减少的,所以某些已放置的波长转换器可能在最终得到的 R 中实际上并没有被使用. 因此 WCP 算法在 $|W|$ 达到 $|W_B|$ 之后会逐一检查光路的 LGR 并从 N_{wc} 中去掉已放置波长转换器但没有被使用的节点,以使 $|N_{wc}|$ 最小.

WCP 算法的正式描述如下:

Step1: 令 $N_{wc} = N$,使用 LG-VTMDP 算法计算 W_B .

Step2: 令 $N_{wc} = \phi$,调用 LG-VTMDP 算法得到 W 和 R .

Step3: 如果 $|W| > |W_B|$ 或 $R = \phi$,转至 Step4; 否则转至 Step5.

Step4: 检查当前得到的 R

(1) 如果 $R = \phi$

(a) $|W| = |W| + 1, W = \{0, 1, \dots, |W| - 1\}$;

(b) 根据 W 和 N_{wc} ,将 G_p 转换为分层图 G_{LG} ;

(c) 调用 DESIGN-PROTECTION 得到新的 R ;

(d) 转至 Step3.

(2) 如果 $R \neq \phi$

(a) $|W| = |W| - 1, W = \{0, 1, \dots, |W| + 1\}$;

(b) 根据 W 和 N_{wc} ,将 G_p 转换为分层图 G_{LG} ;

(c) 根据当前 R 统计经过无波长转换能力节点的 LGR 数目并选出经过 LGR 最多的一个节点,记为 n^+ ;

(d) $N_{wc} \leftarrow N_{wc} + \{n^+\}$,相当于在节点 n^+ 放置了波长转换器;

(e) 转至 Step3.

Step5: 根据最终得到的 R 检查所有已放置的波长转换器是否确实被 LGR 使用,没有用则从 N_{wc} 中去掉它所在的节点.

Step6: 返回最终得到的 R, N_{wc}, F_{min} .

6 数值结果与讨论

用于测试的物理网络是 ARPA-2 网(21 节点 26 链路),拓扑结构见图 1. 虚拓扑则是将给定数目的光路均匀、随机地分配到各对节点之间生成的网状网.

初始版本的 DAP

算法在文献[1]中给出,

算法没有考虑物理链路的容量限制.

改进版本的 DAP 算法

在文献[2]中给出,与

初始版本不同的地方

是在目标函数中加入了惩罚分量,违反链路容量限制的行为

会大大增加目标函数的值. 在本文中,链路的可用波长数一开始并不固定,我们的算法将尽量使用少的波长数. 从一般 WDM 网络设计的角度来说,DAP 算法只解决了其中的路由问题. 当网络节点没有波长转换能力时,在确定了光路的路由之后,还需要其它静态波长分配算法(如文献[4,10]和[7]中提出的启发式算法)为光路分配波长. 这些算法用于将 RWA 问题拆分为路由和波长分配两个子问题时处理波长分配子问题. 当网络节点没有波长转换能力时,使用 DAP 算法解决路由子问题后,可以使用这些波长分配算法为已确定路由的光路分配合适的波长. 这样一来,文献[1]和[2]中的算法实际上是等效的.

为方便起见,我们分别称文献[4,10]和[7]中的波长分配算法为 WA1 算法和 WA2 算法. DAP 算法和这两种波长分配算法组合后的性能与 LG-VTMDP 算法的性能对比在表 1、表 2 和表 3 中给出. 用于测试的虚拓扑为随机产生的 60 链路网状网,虚拓扑中的链路代表光路. 表格中列出了五次测试的实验结果.

表 1 不同 RWA 策略下网络使用的波长数

No.	LG-VTMDP	DAP+WA1	DAP+WA2
1	18	21	20
2	15	19	16
3	16	19	17
4	15	22	18
5	15	19	17

表 2 网络链路平均负载/负载方差

No.	LG-VTMDP	DAP
1	8.54/14.0	8.46/19.3
2	7.81/9.88	7.62/13.0
3	8.42/10.85	8.38/15.6
4	8.00/8.69	7.88/16.2
5	8.04/6.65	7.92/15.0

表 1 中给出的是在网络节点没有波长转换能力时,以保护设计为目标的各种算法(或算法组合)在不同测试虚拓扑下需要的波长数. 数据显示 LG-VTMDP 算法需要的波长数总是最少的,它平均比 DAP+WA1 需要的波长数少 21%,比 DAP+WA2 需要的波长数少 10%.

虚拓扑中的光路的路由在确定以后,物理链路的平均负载 L^* 和负载方差 L_{var} 在表 2 中给出. 链路负载定义为经过链路的光路的数目,换句话说就是链路中被占用的波长数. 此参数反映了物理链路被使用的情况. 链路的负载方差使用公式

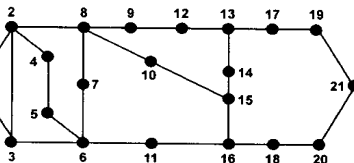


图 1 21 节点、26 链路的 ARPA-2 物理网络

$L_{var} = (L_{mn} - L^*)^2$ 计算,这里 L_{mn} 代表链路 l_{mn} 的负载, L^* 则是所有 L_{mn} 的平均值. 负载方差越小说明光路在物理网络中分配得越均匀. 好处是一方面有利于减少全网使用的波长数, 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 2 的数据显示: 与 DAP 算法相比, 使用 LG. VIMDP 算法进行保护设计可以将虚拓扑中的光路更均匀地分布在物理网络中. 而 LG. VIMDP 算法得到的链路平均负载和 DAP 算法得到的仍然差不多.

使用保护设计算法进行网络设计后得到的目标函数 $F(R)$ 在表 3 中给出. 五次测试中, LG. VIMDP 算法得到的 $F(R)$ 始终为 0, 即说明虚拓扑中的所有光路都得到了保护^[2]; DAP 算法在第 2 次测试中得到的 $F(R)$ 为 2, 说明有两条光路没有得到保护. 表 3 说明 LG. VIMDP 算法在保护设计方面的表现也要优于 DAP 算法.

表 3 保护设计算法得到的 $F(R)$

No.	LG. VIMDP	DAP
1	0	0
2	0	2
3	0	0
4	0	0
5	0	0

表 4 应放置波长转换器的节点

No.	$ W_B $	配置波长转换器节点
1	14	6, 8, 13, 15, 16
2	13	13, 16
3	13	8, 11, 13, 14, 15, 16
4	12	6, 8, 10, 12, 15, 16, 20
5	11	8, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18

在网络所有节点放置波长转换器后得到的可用波长数 $|W_B|$ 和采用“稀疏波长转换”策略时为达到 $|W_B|$ 而需要配置波长转换器的节点的编号在表 4 中给出. 这些由 WCP 算法得到的数据说明只要给一小部分节点配置波长转换器就可以使全网的波长数达到下界 $|W_B|$. 从降低网络建设成本的角度说, 采用 WCP 算法设计网络比简单地给所有节点都配置波长转换器能节省相当可观的成本.

7 结论

在网络设计阶段, 通过保护设计算法将虚拓扑小心地嵌入物理网络, 可以避免未来可能出现的“失效扩散”. 本文首先提出了一种同时考虑路由和波长分配问题的保护设计算法(LG. VIMDP 算法), 然后在此基础上提出了一种有效的波长转换器放置算法(WCP 算法). 实验结果证明 LG. VIMDP 算法的性能优于 DAP 算法和一些常用波长分配算法组合后的性能. WCP 算法得到的结果则说明: 就节约网络使用的波长数而言, 没有必要在所有节点都放置波长转换器, 只需要在一小部分“关键”节点放置波长转换器就可以了. 理论上讲, 在虚拓扑给定的情况下, 减少全网使用的波长数可以节约建设成本. 但从实际情况看, 网络完全不使用波长转换器时的建设成本不一定通过放置波长转换器以减少 $|W|$ 的作法就能降低, 因为引入波长转换器也会增加网络的投资. 当然, 波长转换器的引入不只有减少全网波长数的好处, 它对简化网络管理、子网互联都有好处. 这时可以根据实际情况为 WCP 算法设定合理的下界 $|W_B|$ (此下界介于网络无波长转换时需要的波长数和网络有全波长转换能力时需要的波长数之间), 以便得到成本

合适的网络设计解.

参考文献:

- [1] J Armitage, O Crochat, J L Boudec. Design of a survivable WDM photonic network [A]. Proc. IEEE INFOCOM 97 [C], 1997: 244 - 253.
- [2] O Crochat, J L Boudec. Design protection for WDM optical networks [J]. IEEE J-SAC, Sept. 1998, 16(7): 1158 - 1165.
- [3] B Mukherjee, D Banerjee, A Mukherjee. Some principles for designing a wide-area optical network [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, 1996, 4(5): 684 - 695.
- [4] 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.
- [5] K R Venugopal, M Shivakumar, P S Kumar. A heuristic for placement of limited range wavelength converters in all-optical networks [A]. Proc. IEEE INFOCOM 99 [C], 1999.
- [6] S Thiagarajan, A K Somani. An efficient algorithm for optimal wavelength converter placement on wavelength-routed networks with arbitrary topologies [A]. Proc. IEEE INFOCOM 99 [C], 1999.
- [7] Imrich Chlamtac, et al. Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WANs [J]. IEEE Trans. Communications, July 1992, 40(7): 1171 - 1182.
- [8] C Chen, S Banerjee. A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks [A]. Proc. IEEE INFOCOM 96 [C], 1996: 164 - 171.
- [9] K R Venugopal, E E Rajan, P S Kumar. Impact of wavelength converters in wavelength routed all-optical networks [J]. Computer Communications Jan. 1999: 244 - 257.
- [10] Z Zhang, A Acampora. A heuristic wavelength assignment algorithm for multi-hop WDM networks with wavelength routing and wavelength reuse [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, June 1995, 3(3): 281 - 288.

作者简介:



王 焯 男, 1974 年生于安徽巢湖. 1998 年获电子科技大学信号与信息处理硕士学位. 2001 年获电子科技大学通信与信息系博士学位. 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 年生于浙江吴兴. 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通信网.

王 晟 男, 1971 年生于四川成都. 博士, 副教授, 电子科技大学光纤通信国家重点实验室. 研究方向为流量控制和 WDM 光传送网.