

IP over WDM 网络中可恢复的路由选择策略与算法*

雷 蕾 赵继军 纪越峰

(北京邮电大学光通信中心, 128 信箱, 北京 100876)

摘 要 研究了 IP over WDM 网络中各层备用资源的分配问题, 提出了一种新的 IP over WDM 网络中可恢复的路由选择策略以及应用于其中的备用路由选择算法. 该策略通过层间备用资源共享, 能够完全利用网络中为恢复光层故障所预留的资源来进行 IP 层故障恢复, 从而大大提高了网络的资源利用率. 对所提出的策略进行了性能分析, 并给出了相应的性能指标.

关键词 IP over WDM 网络; 可恢复的路由选择; 生存性

中图分类号 TN915 **文献标识码** A

0 引言

随着网络传输业务量的迅速增长, 网络的生存性问题显得尤为重要. 在 IP over WDM 网络中, 一根光纤断裂可能会导致每秒有太比特业务被中断^[1]. 在此情况下, 与 IP 层恢复相比, 光层恢复能够提供更快速的“批量恢复”. 但是, 只依靠光层无法对 IP 层的故障(例如路由器故障等)进行恢复. 因此, 需要由光层和 IP 层共同为网络提供故障恢复功能: 若故障发生在光层, 则由光层进行“批量恢复”; 若故障发生在 IP 层, 则由 IP 层进行恢复.

采用这种方案一般需要解决两个问题: 一是各层网络生存性机制的协调问题; 二是各层备用资源的分配问题. 由于光层和 IP 层都要为网络提供故障恢复功能, 因此, 每一层都需要一定的网络资源作为备用资源. 这时, 采用合理的各层备用资源分配方案就非常重要. 否则, 很可能会造成不必要的资源浪费. 目前对各层备用资源分配问题的讨论大多数都较为笼统^[2,3], 很少形成具体的算法或策略. 本文将提出一种新颖的 IP over WDM 网络中可恢复的路由选择策略, 即层间备用资源共享策略. 层间备用资源共享策略有效的解决了各层备用资源分配问题, 是一种非常节约网络资源的路由选择策略.

1 层间备用资源共享策略

层间备用资源共享策略能够在光纤链路故障和 IP 路由器故障不同时发生的情况下, 对其中任何一种故障进行恢复. 它结合运用了两种可恢复的路由选择算法, 一种是用于光层故障恢复的 KSPR (K

Service Path Restoration) 算法^[4], 另一种是本文新提出的用于 IP 层故障恢复的 ILS (Inter-layer Sharing) 算法. KSPR 算法面向动态业务请求, 可以利用 GMPLS 相关协议及扩展来实现. 该算法在网络中为每一个被接受的业务请求建立一条工作路径, 并预留一条备用路径. 其中, 工作路径和备用路径的选择充分考虑了光层备用资源共享, 可以使为恢复光层故障所需的网络资源非常小. ILS 算法考虑了 KSPR 算法的特点, 通过层间备用资源共享, 把为恢复 IP 层故障所需的网络资源降为零. 下面将对层间备用资源共享策略及 ILS 算法进行详细描述.

1.1 策略描述

在 IP over WDM 网络中, 两个路由器之间可以建立一条虚链路. 在层间备用资源共享策略中, 虚链路通过在两个路由器之间建立一条工作光路径并预留一条备用光路径来实现. 工作光路径和备用光路径的选择由与源 IP 路由器相连的 OXC 根据当前的物理拓扑, 运用 KSPR 算法得到. 若两个路由器之间存在一条虚链路, 则在 IP 层认为它们邻接. 由 IP 路由器和虚链路构成的 IP 层虚拓扑, 覆盖在由 OXC 和物理(光纤)链路构成的物理拓扑之上, 如图 1.

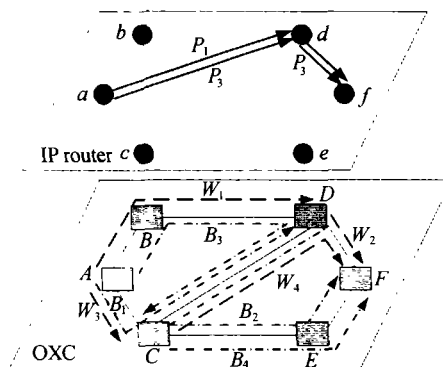


图1 IP over WDM 网络

Fig. 1 IP over WDM networks

为满足某一个业务请求, 需要在两个 IP 路由器之间建立一条端到端的连接. 此连接可以是单跳或

*国家自然科学基金项目 (No. 90104017)、国家 863 计划项目 (No. 2001AA122062)、教育部重大项目 (No. 0215) 和跨世纪优秀人才培养计划基金资助
Tel: 010-62282153 Email: leil@buptnet.edu.cn
收稿日期: 2003-04-09

多跳的. 单跳连接只包含一条虚链路, 不需要经过任何中间路由器; 而多跳连接则包含多条由中间路由器相连的虚链路. 如图 1, P_1 为单跳连接, 源路由器 a 和目的路由器 d 之间只包含一条虚链路: $a \rightarrow d$. P_3 为多跳连接, 源路由器 a 和目的路由器 f 之间包含两条虚链路: $a \rightarrow d, d \rightarrow f$, 这两条虚链路通过路由器 d 相连.

在 IP over WDM 网络中出现多跳连接最常见的原因是由于业务请求的带宽小于波长粒度. 为充分利用已经建立的光路径上的资源, 路由器会直接在当前虚拓扑上计算出一条端到端的连接. 这条连接可能包含多条虚链路, 每条虚链路上都必须保证有足够的空闲资源来满足当前的业务请求.

在故障恢复策略中应该区别对待单跳连接和多跳连接. 单跳连接只可能受到光层故障的影响, 从而导致虚链路对应的工作光路径被切断. 多跳连接不仅可能受到光层故障的影响, 并且还受到该多跳连接的中间路由器故障的影响. 因此, 当发生光层故障时, 单跳连接和多跳连接都需要其虚链路所对应的备用光路径对其进行故障恢复. 但是, 当发生 IP 层故障时, 多跳连接还需要一条与它不经过相同中间路由器的端到端的备用路径对其进行故障恢复. 在层间备用资源共享策略中, 由本文新提出的 ILS 算法可以得到为多跳连接提供 IP 层故障恢复的备用路径.

图 2 为层间备用资源共享策略流程图. 假设初始时网络中不存在虚链路, 即虚拓扑为空. 业务请求首先到达边缘路由器, 业务请求的带宽通常小于波长粒度. 只有当网络中存在的资源不仅足以能够为业务请求建立工作路径, 而且还能为备用路径的

各个链路预留足够资源时, 业务请求才被接受. 否则, 业务请求将被阻塞. 首先, 源 IP/MPLS 路由器根据网络当前的虚拓扑, 用 Dijkstra 算法计算一条具有足够可用资源的路径. 如果网络中不存在这样的路径, 则源路由器请求与它相连的 OXC 在源路由器和目的路由器之间提供一条工作光路径和一条备用光路径. 与源路由器相连的 OXC 将使用 KSPR 算法计算出所需的工作和备用光路径. 如果存在这样的光路径, 则在网络中建立工作光路径. 在故障发生前, 不建立备用光路径, 但需要在备用光路径所经过每条光纤链路上预留相应的备用资源. 这样, 在源路由器和目的路由器之间就建立了一条虚链路, 于是业务请求被接受. 如果不存在这样的光路径, 则业务请求被阻塞. 如果在第一步中源 IP/MPLS 路由器根据网络当前的虚拓扑能够计算出一条具有足够可用资源的路径, 则需要判断其为单跳或多跳路径. 若为单跳路径, 则无需进行任何其它操作; 若为多跳路径, 则源 IP 路由器请求与它相连的 OXC 计算一条从源路由器到目的路由器的直通光路径, 作为在发生 IP 路由器故障时该多跳路径的备用路径. 此直通光路径可以通过 ILS 算法得到. 在 1.2 节中将证明, 网络中一定存在一条直通光路径, 在不需要占用网络中任何新资源的情况下, 能够保证对多跳路径中间路由器的故障进行 100% 恢复. 因此, 在源 OXC 计算出这条直通光路径后, 只需要记录下该光路径的路由, 而不必在该光路径的各条光纤链路上预留任何备用资源. 应该注意到, 若源 IP/MPLS 路由器根据网络当前的虚拓扑能够得到一条具有足够可用资源的路径, 则不论此工作路径是单跳或多跳, 业务请求都一定被接受.

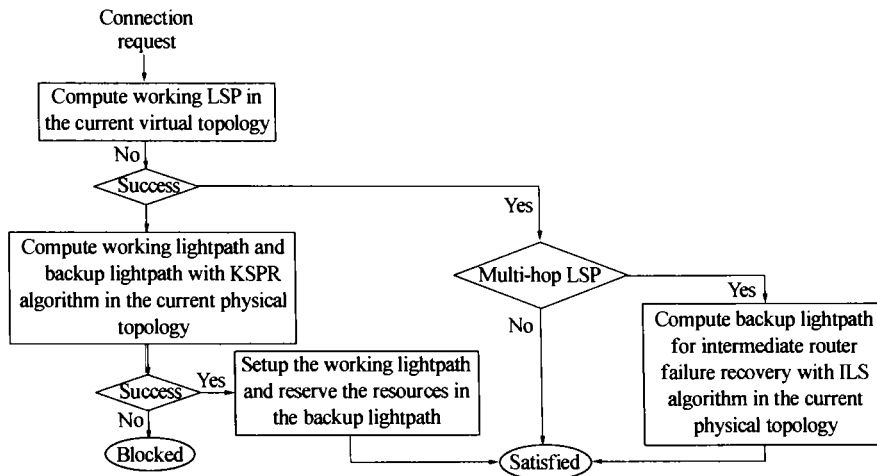


图 2 层间备用资源共享策略流程图

Fig. 2 Flow chart of inter-layer backup resource sharing strategy

下面以图 1 中的网络为例来说明层间备用资源共享策略. 在实际网络中, 每个 IP 路由器都与对应

的 OXC 相连, 例如 IP 路由器 a 与 OXC A 相连等; 各个 OXC 之间由两根单向光纤相连. 假设共有 5 个

业务请求依次到达网络,且只有当上一个业务请求被处理完毕后,下一个业务请求才会到达.下面给出了采用层间备用资源共享策略时的路径建立步骤:

1) 业务请求 1 从路由器 a 到路由器 d , 容量为一条波长容量的一半.

2) 路由器 a 无法从虚拓扑上计算得到一条端到端的路径, 因此向 OXC A 发起请求.

3) OXC A 利用 KSPR 算法得到工作光路径 $A \rightarrow B \rightarrow D$ 和备用光路径 $A \rightarrow C \rightarrow D$.

4) 建立工作光路径 $A \rightarrow B \rightarrow D$, 并在光纤链路 $A \rightarrow C$ 和 $C \rightarrow D$ 上分别预留一个波长的备用资源. 于是, 在路由器 a 和路由器 d 之间建立了单跳路径 P_1 , 并且在虚拓扑上增加了一条具有半个波长可用资源的虚链路 $a \rightarrow d$.

5) 业务请求 2 从路由器 d 到路由器 f , 容量为一条波长容量的一半.

6) 路由器 d 无法从虚拓扑上计算得到一条端到端的路径, 因此路由器 d 向 OXC D 发起请求.

7) OXC D 利用 KSPR 算法得到工作光路径 $D \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$ 和备用光路径 $D \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$.

8) 建立工作光路径 $D \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$, 并在光纤链路 $D \rightarrow C$, $C \rightarrow E$, $E \rightarrow F$ 上分别预留一个波长的备用资源. 于是, 在路由器 d 和路由器 f 之间建立了单跳路径 P_2 . 并且在虚拓扑上增加了一条具有半个波长可用资源的虚链路 $d \rightarrow f$.

9) 业务请求 3 从路由器 a 到路由器 f , 容量为一条波长容量的一半.

10) 路由器 a 根据现有的虚拓扑计算得到一条端到端的路径 $P_3: a \rightarrow d \rightarrow f$. 由于虚链路 $a \rightarrow d$ 和 $d \rightarrow f$ 上不再具有可用资源, 于是将它们从虚拓扑上删除.

11) 路由器 a 判断 P_3 为多跳路径, 因此请求 OXC A 计算一条直通光路径作为路由器 d 故障时 P_3 的备用路径.

12) OXC A 根据当前物理拓扑用 ILS 算法计算出直通光路径为 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$.

1.2 ILS 算法描述

在上节策略描述中提到, 当两个路由器之间建立了多跳连接后, 需要由与源路由器相连的 OXC 用 ILS 算法计算一条由源路由器到目的路由器的直通光路径, 作为多跳路径的中间路由器发生故障后的备用路径. 在对 ILS 算法进行描述以前, 需要首先证明如下命题:

命题 1: 对于任意一条多跳路径, 在其源路由器和目的路由器之间一定存在一条直通光路径, 能够

利用网络中现有的备用资源, 保证在该多跳路径的中间路由器发生故障时, 对其进行 100% 恢复.

要证明命题 1 成立, 需要在多跳路径的源路由器和目的路由器之间找到一条直通光路径, 满足条件: 1) 当多跳路径上任何一个中间路由器发生故障时, 此光路径都不会失效; 2) 当多跳路径上任何一个中间路由器发生故障后, 此光路径上都具有足够的备用容量来传送多跳路径上被中断的业务.

寻找满足条件 1) 的光路径非常容易. 由于网络中任何一条光路径都不会经过任何中间路由器, 所以在多跳路径的源路由器和目的路由器之间的任何一条光路径都满足条件 1).

下面寻找满足条件 2) 的光路径. 由上面的策略描述可知, 对于任何一条多跳路径, 它经过的每一条虚链路在光层都是受到保护的. 如图 3(a), 路由器 a 和路由器 f 之间的多跳连接 P_3 经过虚链路 $a \rightarrow d$ 和 $d \rightarrow f$. 在光层, 虚链路 $a \rightarrow d$ 通过工作光路径 $A \rightarrow B \rightarrow D$ 和备用光路径 $A \rightarrow C \rightarrow D$ 共同实现. 虚链路

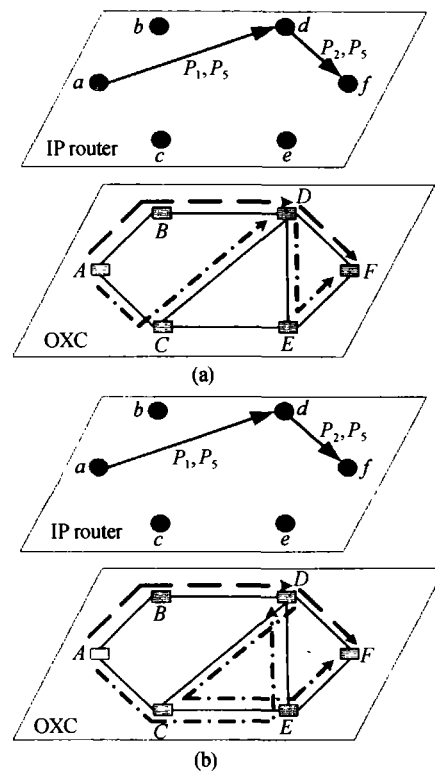


图 3 (a) 各条备用光路径不经过任何相同光纤链路;

(b) 各条备用光路径经过一条相同的光纤链路

Fig. 3 (a) Backup paths do not contain common links;

(b) Backup paths contain one common link

$d \rightarrow f$ 通过工作光路径 $D \rightarrow F$ 和备用光路径 $D \rightarrow E \rightarrow F$ 共同实现. 假设 P_3 的带宽为 $1/2$ 波长容量, 则在光纤链路 $A \rightarrow C$, $C \rightarrow D$, 以及 $D \rightarrow E$, $E \rightarrow F$ 上预留的备用资源中有一半容量是为在虚链路 $a \rightarrow d$ 或虚链路 $d \rightarrow f$ 发生故障时传送多跳路径 P_3 上的业务. 这样, 当多跳路径 P_3 的中间路由器, 即路由器 d 发生故障

后,如果建立光路径 $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$,则一定存在半个波长的备用资源可以传送被中断的 P_5 上的业务. 但如果由此例推断,所求的直通光路径一定由多跳连接上每条虚链路在光层对应的备用光路径通过首尾相连所得,则不够准确. 如图 3(b)所示,虚链路 $a \rightarrow d$ 对应的备用光路径 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D$ 和虚链路 $d \rightarrow f$ 对应的备用光路径 $D \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$ 经过相同的光纤链路 $C \rightarrow E$. 当路由器 d 发生故障后,如果按照上面的推断,备用光路径为虚链路 $a \rightarrow d$ 和虚链路 $d \rightarrow f$ 分别对应的两条备用光路径之和,即 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$. 这条光路径在链路 $C \rightarrow E$ 上需要占用两个波长的资源. 然而,由于工作光路径 $A \rightarrow B \rightarrow D$ 和 $D \rightarrow F$ 不经过相同的光纤链路,根据 KSPR 算法,它们的备用光路径在链路 $C \rightarrow E$ 上可以共享备用资源,因此,虽然两条备用光路径都经过了链路 $C \rightarrow E$,但只需在其上预留一个波长的备用资源. 这样,就导致了链路 $C \rightarrow E$ 上没有足够的备用资源来建立光路径 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$. 由于所有两次以上经过同一条链路的路径必然包含环路,如上述的光路径就包含环路 $C \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow C$. 若将路径中的环路删除,则光路径仍然连续,且经过的链路各不相同. 例如上述光路径删除环路,则变为 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$. 这条新的光路径只经过光纤链路 $C \rightarrow E$ 一次,从而链路 $C \rightarrow E$ 能够提供足够的备用资源. 因此,图 3(b)中 P_5 的备用路径为 $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F$. 由此推断,所求的直通光路径应该为多跳连接上每条虚链路在光层对应的备用光路径通过首尾相连所得的光路径删除环路后的部分.

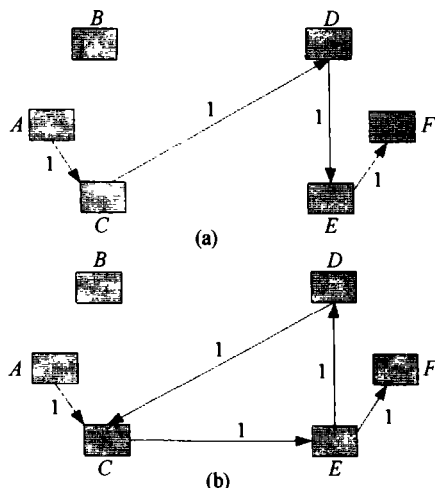


图 4 (a) 图 3(a) 网络中采用 ILS 算法时所用的拓扑
 (b) 图 3(b) 网络中采用 ILS 算法时所用的拓扑
 Fig. 4 (a) The topology used by ILS in Fig. 3(a)
 (b) The topology used by ILS in Fig. 3(b)

下面描述 ILS 算法的步骤如下:

1) 源 OXC 构建一个拓扑. 该拓扑的顶点由网络中所有的 OXC 组成. 该拓扑的边只包含那些为

要保护的多跳路径预留了备用资源的光纤链路.

2) 源 OXC 在此拓扑上用 Dijkstra 算法计算一条由源路由器到目的路由器的光路径. 该光路径即为所求.

用 Dijkstra 算法计算的路径不但不会包含环路,而且为两点之间的最短路径. 图 4(a) 和 4(b) 所示为图 3(a) 和图 3(b) 中计算 P_5 的备用路径所用的拓扑. 链路旁标注的 1 表示链路上预留的备用波长数.

2 性能分析

恢复余量是考察可恢复的路由选择算法优劣的重要性能指标之一. 可以把恢复余量表示为 O , 则 $O = S/W$

其中, S 表示网络中总备用资源, W 表示网络中总工作资源. 可见, 恢复余量越小, 表示网络中备用资源越少, 则网络的资源利用率越高.

IP over WDM 网络中的备用资源可以细分为恢复 IP 层故障的备用资源和恢复光层故障的备用资源. 将两者分别表示为 S_1 和 S_0 , 则

$$S = S_1 + S_0$$

在层间备用资源共享策略中, 对光层故障恢复采用 KSPR 算法, 而对 IP 层故障恢复采用本文提出的 ILS 算法. 采用 KSPR 算法时, 由文献[4]可知:

$$O_0 = S_0/W \approx 50\%$$

即网络中恢复光层故障的备用资源与工作资源之比只有 50% 左右. 采用 ILS 算法, 通过层间备用资源共享, 可以完全利用为恢复光层故障预留的备用资源来恢复 IP 层故障, 即

$$O_1 = S_1/W = 0\%$$

因此, 采用层间备用资源共享策略后, 网络中的恢复余量为:

$$O = O_0 + O_1 \approx 50\%$$

由文献[4]可知, 如果某种只考虑对光层故障进行恢复的路由选择算法的恢复余量能够接近 50%, 则此算法具有高资源利用率. 层间备用资源共享策略不仅能够对光层故障进行恢复, 而且还能对 IP 层故障进行恢复. 在此情况下其恢复余量仍能够保持在 50% 左右, 因此它是一种非常节约网络资源的选路策略.

层间备用资源共享策略不但具有很高的资源利用率, 而且非常易于通过基于 IP 的信令协议来实现. 另外, IP 层无需了解光层的拓扑信息, 各层选路独立, 因此, 该策略在重叠模型和对等模型中同样适用.

3 结论

本文提出了一种新颖的 IP over WDM 网络可恢

复的路由选择策略,即层间备用资源共享策略.它能够在光纤链路故障和IP路由器故障不同同时发生的情况下,对其中任意一种故障进行恢复.该策略提出了一种具体有效的层间备用资源分配算法,即ILS算法.通过运用ILS算法,层间备用资源共享策略可以完全利用为恢复光层故障预留的备用资源恢复IP层故障,从而大大节约了网络资源.

参考文献

- 1 Maeschalck S D. Intelligent optical networking for multilayer survivability. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(1): 42 ~ 49
- 2 Achim A. Differentiated Multilayer Resilience in IP over Optical Networks. Scuola Superiore G. Reiss Romoli (SSGRR) 2002
- 3 Zhang H, Durresi A. Differentiated Multi-layer Survivability in IP/WDM Networks. *IEEE/IFIP Network Operations & Management Symposium(NOMS)* 2002
- 4 雷蕾,等.基于GMPLS的分布式WDM网状网恢复路由选择算法研究. *通信学报*, 2003, 24(8): 128 ~ 134
Lei Lei, et al. *Chinese Journal of Communications*, 2003, 24(8): 128 ~ 134

Restorable Routing Strategy and Algorithm in IP over WDM Networks

Lei Lei, Zhao Jijun, Ji Yuefeng

Optical Communication Center of Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

Received date: 2003-04-09

Abstract The resource allocation problem in IP over WDM networks is studied. A restorable routing strategy in IP over WDM networks is proposed, and a restorable routing algorithm is also presented as part of this new strategy. Through inter-layer backup resource sharing, the strategy can fully utilize the resources reserved for optical layer failure recovery for the recovery of IP layer failure, and thus improve the network utilization greatly. Performance analysis of this new strategy is carried out and the corresponding result is given.

Keywords IP over WDM networks; Restorable routing; Survivability

Lei Lei was born on September 26, 1980, in Tangshan, Hebei Province, China. She received Bachelor degree in telecommunication from Beijing University of Posts and Telecommunication in 2001. She currently is working towards the Ph. D. degree in Beijing University of Posts and Telecommunications. Her main research is focused on ASON and network survivability.

