

基于单节点故障的 IP Over WDM 网络生存性映射算法^①

赵广超, 孙晓东, 陈登伟, 耿琳莹

(中国洛阳电子装备试验中心, 洛阳 471003)

摘要: 在 IP Over WDM 网络中, WDM 层的一条物理链路往往对应多条 IP 层逻辑链路, 无论采用何种机制, 都不允许 WDM 层的故障导致上层逻辑拓扑变的不连通, 因此, 解决 IP Over WDM 的生存性映射问题便显得尤为重要. 本文在现有 IP Over WDM 静态拓扑映射算法的基础上提出一种基于单节点故障的映射算法, 目的是在 WDM 层出现单节点故障后, IP 层逻辑拓扑不被分割为多个不连通的部分, 以保证 IP 拓扑的连通性.

关键词: IP Over WDM; 网络生存性; 单节点故障; 生存性映射

Survivable Mapping Algorithm Based on Single-Node Failure in IP Over WDM Networks

ZHAO Guang-Chao, SUN Xiao-Dong, CHEN Deng-Wei, GENG Lin-Ying

(LEETC, Luoyang 471003, China)

Abstract: In IP Over WDM networks, a physical link layer always has multiple logical links, regardless of the mechanism, the logical topology is not allowed to become unconnected as the fault of WDM layer. Therefore, solving the survival of IP Over WDM mapping is particularly important. This paper presents a mapping algorithm based on single-node failure based on the existing IP Over WDM static topological mapping algorithm. The objective is to guarantee the connectivity of IP topology when WDM layer's single-node failure.

Key words: IP Over WDM; network survivability; single-node failure; survivable mapping problem

随着光网络规模的不断扩大以及网络体系结构的扁平化进程加速, 网络传输的可靠性和实时性面临新的挑战, 基于光网络的生存性问题和路面算法也日益受到人们的重视.

IP Over WDM 网络中, 光层保护和 IP 层恢复是光网络生存性的主要保障手段. 存在的问题是: 光层的保护机制对 IP 层故障透明, 即对 IP 层面的故障只能在光层分配资源不相关的路径来完成保护倒换^[1], 保护粒度相对单一; IP 层的恢复机制虽然能够灵活地处理光层和 IP 层故障, 但 IP 层的恢复却依赖于 IP 层拓扑的连通. 因此, IP Over WDM 网络中, 在光层链路故障导致的故障蔓延^[2]效应下, 如何保证 IP 层拓扑的连通性成为网络生存性研究的关键问题. 本文主要研究 IP Over WDM 网络中, 单节点故障情况下, IP 层拓扑的连通性问题.

1 网络生存性

网络的生存性(Survivability)是指当网络经受各种故障甚至灾难性大故障后仍能维持可接受的业务质量的能力, 也就是网络抵御失效的能力^[3].

1.1 IP 层的恢复机制

IP 层恢复机制能以很小粒度对业务进行操作, 适合恢复多种故障类型的业务, 通常在接近业务源的地方实施, 恢复需要重路, 恢复时间较长. MPLS (Multiprotocol Label Switching, 多协议标记交换)技术的出现, 使得 IP 网络能提供面向连接且有 QoS(Quality of Service)保证的业务. 业务层也可利用 CoS(Class of Service, 业务等级)针对特定业务启动灵活高效的恢复机制. 如果只在高层进行单层恢复, 虽然无法联合底层的恢复策略, 但仍然可以通过较强的生存能力兼顾到底层的故障. IP/MPLS 网络的生存性方法有基于

^① 收稿时间:2013-12-22;收到修改稿时间:2014-03-18

MPLS 的保护倒换方案和路由的动态恢复方案两种。前者花费时间短,且能在一定程度上保障业务的生存性;后者所需时间长,但有较高的资源利用率^[4]。

1.2 光层的恢复机制

从点对点网络采用的保护切换,到环形网采用的自愈环技术,再到网状网采用的快速重构恢复技术,尽管光网络的生存性技术多样,但都是以最基本的网络保护和恢复为基础^[5]。两者的基本方法是相同的,都是采用替换失效或者性能劣化的传送实体的方法。根据监测到的缺陷、性能劣化或外部网管要求均可启动保护或恢复动作,用正常的传送实体代替出问题的传送实体。现代电信网中,保护是更重要更基本的防护措施,恢复机制常作为第二道防线来预防网络范围的故障和失效^[3]。

网络保护机制通常以物理层的缺陷作触发,可以快速监测到故障,利用节点间预先分配好的容量,用硬件冗余来保证故障恢复;保护机制一般处于本地网元或者远端网元的控制之下,无需网管系统的介入,倒换时间很短,但备用资源无法在网络范围内共享,且不能应对节点失效和网络范围内多点失效故障。

网络恢复机制主要靠网元产生的告警消息触发,系统在全网范围内找到替代路由,恢复传送的业务;恢复机制需要准确知道故障点的位置,能够迅速在网络中寻找替代路由,因而算法与网络路由算法相同^[6];恢复机制可以利用节点之间可用的任何容量,包括备用容量甚至低优先级的额外容量;恢复机制往往需要网管系统介入,时间较长。

2 IP over WDM生存性映射问题

WDM 层的一条物理链路往往对应多条逻辑链路,因此无论采用何种机制,都不允许 WDM 层的故障导致上层逻辑拓扑变的不连通。IP Over WDM 的生存性映射问题(SMP, Survivable Mapping Problem)可定义为:为逻辑(IP 层)拓扑映射到物理拓扑(WDM 层)寻找一个能够保证在物理拓扑链路故障导致的故障蔓延的情况下,依然保持逻辑拓扑连通性的方法^[2]。

对于给定连通度不小于 2 的物理拓扑和逻辑拓扑,在满足一定约束的情况下,通过提出一种逻辑拓扑映射方法,使得 WDM 层发生的单链路故障或单节点故障,不会将 IP 层逻辑拓扑分割成两个或多个部分,去除失效链路后该逻辑拓扑依旧保持连通,该映射方法

称为 IP Over WDM 可生存性映射。

映射方法的选择是 SMP 的一个重要方向,主要研究的是路由和波长分配(RWA, Routing and Wavelength Assignment)问题。如图 1 所示,给定逻辑拓扑(a)和物理拓扑(b),在映射方法(c)的情况下,满足 SMP 规定的任意两条逻辑链路都没有共享一段物理链路,任何一条物理链路故障,不会对逻辑拓扑的完整性有影响,该映射方法就是可生存的。

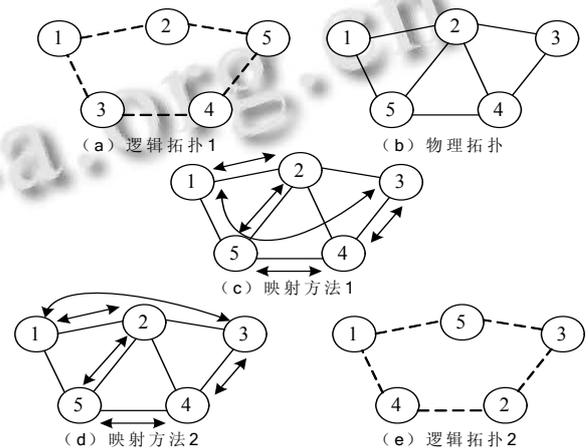


图 1 生存性映射示意图

在映射方法(d)的情况下,逻辑链路[1,3]映射到了物理链路[1,2]-[2,3]上,这样,逻辑链路[1,2]、[1,3]都经过了物理链路[1,2],一旦物理链路[1,2]发生故障,该逻辑拓扑就被分割成两部分,该映射方法就不满足生存性要求;如果将逻辑拓扑按照(e)的顺利排列,则不管如何映射,任何一条物理故障一定会将整个拓扑分割开。因此,对于给定的逻辑拓扑与物理拓扑,并不能保证一定能找到一种可生存的映射机制实现故障恢复,RWA 问题是一个需要仔细考虑的难点问题。

上述的分析过程,并没有考虑资源和容量的问题。故障条件下,在逻辑拓扑要保持连通性的同时,也需要有足够的资源来恢复受损业务,两者的共同协作才能对 IP 层的业务恢复起到完整的保障作用,这涉及到 SMP 另一个重要方向:资源和容量的分配问题。该问题具有很大的复杂性,因为不同的业务映射方法会影响到业务恢复需要预留的冗余资源,彼此有一定的依赖关系,本文对此不做深入探讨。

当前,对于 SMP 问题的研究主要采用静态规划的方法,即给定静态业务矩阵和物理拓扑,找到实现可生存的拓扑映射方法。文献[7]为光路径的生存性提出

了新的度量,使用这些度量提出联合的路由和容量分配算法,来降低对备用容量的需求,但并没有考虑节点故障的问题和对应的容量分配;文献8指出 SMART 算法将整个逻辑拓扑到物理拓扑的映射分解为逻辑拓扑的子图到物理拓扑的映射,简化了生存性映射的求解,适用于大规模网络.但该算法忽略了两点:(1)在为光路寻找路由时,不考虑负载均衡,导致某些物理链路被使用很多次,其他物理链路却未能有效利用;(2)假设物理链路的容量是无限的,不符合实际情况;文献[9]提出了一个基于最优化的在两层流量的低层执行恢复机制的构想,分别在两层流量的备份路径之间实行容量共享和不实行容量共享两种情况下考虑.数值结果显示,基于波长的光网络中,在低层实现流量的生存性是一个可行的解决办法.

3 基于单节点故障的IP Over WDM网络生存性映射算法

本文在现有 IP Over WDM 静态拓扑映射算法的基础上提出一种基于单节点故障的映射算法,目的是在 WDM 层出现单节点故障后,除了它所对应的 IP 层节点失效外,IP 拓扑不被分割为多个不连通的部分,以保证 IP 拓扑的连通性.

假设:IP 层通过 WDM 层已建立光路实现;一个 WMD 节点失效后,经过对应失效 IP 节点的流量请求仍然能保持连通;物理拓扑和逻辑物理拓扑中没有自环和多重边.

单节点故障算法的步骤和证明如下:

(1)选定 WDM 层失效节点,找出该节点不相关路径(该路径除了选定的第一个节点外没有公共节点);选定对应的 IP 层节点,标记该节点每条 IP 链对应的光路,将逻辑拓扑映射到 WDM 物理拓扑;

(2)删除选定节点,在经过被删除节点的节点对之间建立新的 IP 链,形成新的逻辑拓扑结构;

(3)在新逻辑拓扑中选择一个节点,为连接到该节点的每个 IP 链建立相应的光路,所有的光路不能有共同节点,如果逻辑拓扑只剩 2 个节点,继续第 4 步,否则转到第 2 步;

(4)如果对应的物理节点通过光缆直连,最后两个节点之间的 IP 链就直接映射到物理链路上.

网络模型可描述为: $G(V, E)$: IP 层(逻辑)拓扑结构, V : IP 层节点集, E : IP 层边集;

$G(V_p, E_p)$: WDM 层(物理)拓扑结构, V_p : WDM 层节点集, E_p : WDM 层边集;

S : 节点集, 其中的节点失效, 不影响网络生存性;

$P(V)$: 连接到被删除的节点 V 的节点集;

$E(V)$: 连接到节点 V 的边集;

$En(V)$: 新建的连接到被删除节点 V 的边集;

数学表达可描述为:

首先: 选择节点 $A \in V, S \leftarrow \{\Phi\}, P(V) \leftarrow \{\Phi\}$;

然后: $V \leftarrow V \setminus \{A\}, E \leftarrow E \setminus \{E(A)\} \cup E_n(A), S \leftarrow \{A\},$

$P(V) \leftarrow \{P(A)\}$;

接着: $V \leftarrow V \setminus \{B\}, E \leftarrow E \setminus \{E(B)\} \cup E_n(B), S \leftarrow \{A, B\},$

$P(V) \leftarrow \{P(A), P(B)\}$;

.....

最后, $V \leftarrow \Phi, E \leftarrow \{\Phi\}, S = \Omega, P(V) \leftarrow \{P(A), P(B), \dots\}.$

在证明该算法之前给出两个定理^[4]:

定理 1. 如果光路节点不相关, 则光路是链路不相关的, 反之则不正确.

定理 2. 删除一个节点, 假设与被删除节点相邻的节点间没有边相连, 使用一条新边直接连接该节点对, 那么拓扑的割边不会丢失.

定理 1 说明单节点的生存性映射可以保证单链路的生存性. 定理 2 是单节点故障算法的基础, 算法的目的是为每条割边选择不同时经过相同节点的路径, 否则如果节点出现故障, 割边的所有的边将失效, 逻辑拓扑将被分成两部分.

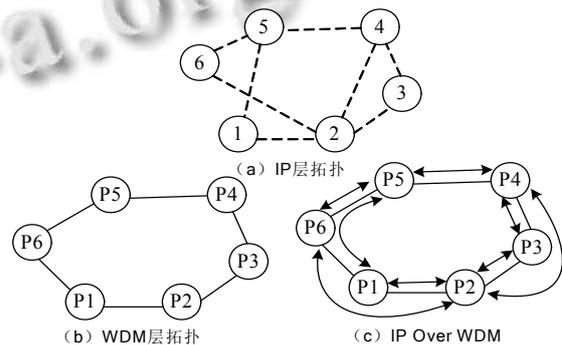


图 2 IP 层拓扑、WDM 层拓扑和映射拓扑

在上述两个定理的前提下,单节点故障算法可证明如下:从 V 中随机选择一个节点 A , 为连接到节点 A 的每条 IP 链路建立相应的光路, 所有的光路不能有除共节点以外的节点, 这样保证了单节点故障不会使选定的节点 A 孤立, 之后在经过节点 A 的节点对之间

建立新的 IP 链路, 形成由新边构成的新的逻辑拓扑。随着算法的推移, 所有的节点将逐步被证明是单节点故障可生存性的。

下面举例来证明该算法。图 2 给出了 6 节点的 (a)IP 层(逻辑)拓扑、(b)WDM 层(物理)拓扑和(c)逻辑拓扑的单节点映射图, 其中, 1-6 分别代表 6 个逻辑节点, P1-P6 分别代表 6 个物理节点。图 2(c)中的双向箭头代表了映射关系。

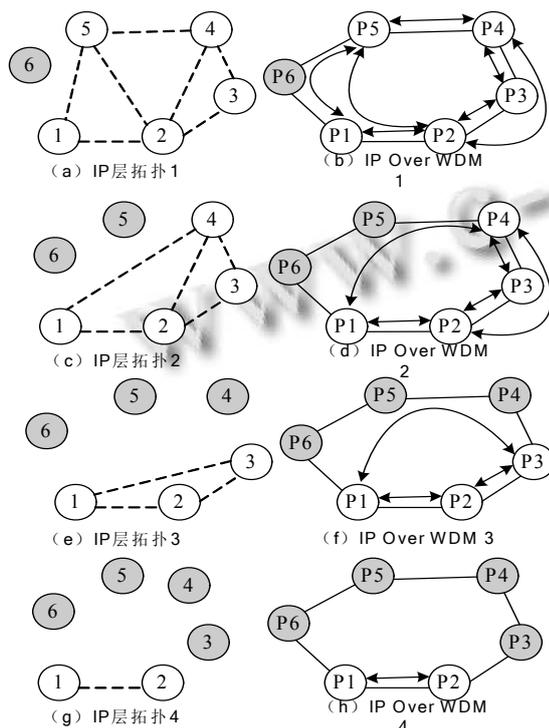


图 3 基于单节点故障的生存性映射过程

图 3 显示了保持网络连通性的虚拓扑映射方法映射过程, 说明如下:

首先, 选择失效节点 P6, 相邻的边[5, 6]和[2, 6]也失效了, 删除边[5, 6]和边[2, 6], 连接 IP 拓扑中的边[2, 5], 如图 3(a); 这样映射的 WDM 拓扑还是连通的(图 3(b)), 得到[6, 2]↔[P6, P1, P2], [6, 5]↔[P6, P5]的映射关系。

其次, 选择 P5 作为第二失效节点, 边[5, 1]、[5, 2]和[5, 4]将分别被映射到 WDM 拓扑中的[P5, P6, P1]、[P5, P4, P3, P2]和[P5, P4], 以保持网络连通性, 如图 3(c)和(d)。

接下来, P4、P3 失效, 得到相应的映射关系为[4, 1]↔[P4, P5, P6, P1], [4, 2]↔[P4, P3, P2], [4, 3]↔[P4,

P3], [3, 2]↔[P3, P2], [3, 1]↔[P3, P4, P5, P6, P1]。

最后, 失效, 只剩下节点 P2、P1, 得到[1, 2]↔[P1, P2], 如图 3(g)和(h)。

4 结语

本文提出的单节点故障映射算法所做的研究主要集中在静态的映射问题上, 随着智能光网络、波分交换光网络、光传送网^[10-12]等新兴光网络结构的出现, 通过路由协议和信令技术给光网络带来的动态特性, 以及网络资源的重配置能力对动态业务的有效支持, 使得光网络能够高效地适配以数据业务为主的动态业务, 业务的动态拆建会导致逻辑拓扑的重构, 使得网络生存性的问题更加复杂化。如何找到一种适应性强、灵活可靠的算法来解决动态的生存性映射问题, 也是需要进一步关注的问题。

参考文献

- 1 蔡庭, 黄善国, 李新, 等. 基于蚁群优化的 IP Over WDM 光网络动态生存性映射算法. 光子学报, 2012, 41(12): 1400-1404.
- 2 Modiano E, Narula-Tam A. Survivable light path routing: a new approach to the design of WDM-based networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(4): 800-809.
- 3 谢桂月, 陈雄, 曾颖. 有线传输通信工程设计. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- 4 袁芬. IP Over WDM 智能光网络生存性技术研究[硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- 5 张学梅. 光网络生存性技术及其进展. 山西电子技术, 2011, (5): 64-65.
- 6 张恒. 基于可达性的光网络生存性机制研究[硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2011.
- 7 Daniel DJ, Kan ANT, Eytan M. Light path routing and capacity assignment for survivable IP-over-WDM networks. IEEE, 7th International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks. 2009.
- 8 张丽, 张宁, 李智楠. IP over WDM 网络中可生存的路由选择策略. 计算机工程与应用, 2012, 48(18): 81-83.
- 9 Pacharintanakul P, Tipper D. The effects of multi-layer traffic on the survivability of IP-over-WDM networks. IEEE Communications Society Subject Matter Experts for Publication in the IEEE INFOCOM 2009 Proc. 2009.
- 10 Wei LP. Generic architecture and standards frame for automatic switched optical network. Telecommunications Science, 2001, 17(5): 3-7.
- 11 Jinno M, Takara H, Koziacki B, et al. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(11): 66-73.
- 12 Lam CF. Optical network technologies for datacenter network. Optical Fiber Communication (OFC), Collocated National Fiber Optic Engineers Conference. 2012. 1-3.