

网状 WDM 网中支持区分可靠性的共享通路保护算法

虞红芳 温海波 王 晟 李乐民

(电子科技大学光纤传输与宽带通信重点实验室 成都 610054)

摘 要: 光纤链路由于共享了某些物理资源(如光缆、管道、通路等), 因此存在一定的故障相关性, 术语“共享风险链路组(SRLG)”就是用于描述链路之间的这种风险共享关系的。SRLG 分离成为保护设计的重要约束。该文研究了支持区分可靠性的 SRLG 分离共享通路保护设计问题。结合 SRLG 条件故障概率的概念, 提出了部分 SRLG 分离的共享保护算法 PSD-SPP(Partial SRLG-Disjoint Shared-Path Protection), 有效地解决了 SRLG 分离约束下的区分可靠性设计问题。仿真结果表明该算法既满足了用户的区分可靠要求, 又能有效利用资源。

关键词: 网状网, 故障相关性, 共享风险链路组, 区分可靠性, 条件故障概率, 部分 SRLG 分离

中图分类号: TN915.02

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)08-1295-04

Shared-Path Protection Algorithm with Differentiated Reliability in Meshed WDM Networks

Yu Hong-fang Wen Hai-bo Wang Sheng Li Le-min

(Key Lab of Broadband Optical Fiber Transm. and Comm. Networks, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract Fiber links, because of sharing some common physical resources (such as fiber cable, conduit, right of way, etc.), have certain failure-dependent. The term “Shared Risk Link Groups (SRLG)” is introduced to describe the relationship between links with shared risk; SRLG diversity has become the important constraint of protection design problem. This paper addresses SRLG-constraint-based shared-path protection design problem with differentiated reliability. Via SRLG conditional failure probability concept, an efficient PSD-SPP (Partial SRLG-Disjoint Shared-Path Protection) algorithm is proposed to solve the protection design problem with differentiated reliability when considering links failure-dependence. Simulation result shows this algorithm not only efficiently satisfies the user-specific requirement, but also effectively decreases the network-blocking ratio.

Key words Meshed networks, Failure-dependent, Shared Risk Links Groups (SRLG), Differentiated reliability, Conditional failure probability, Partial SRLG-disjoint

1 引言

基于波分复用技术(WDM)的光网络以其扩展性好、速度高和容量大等优点得到了广泛的应用, 已成为传输网的基础。由于光网络的速率很高, 承载了大量业务, 一旦某个网络部件失效将会造成大量业务的中断, 从而带来巨大的损失, 因此光网络的可靠性引起人们极大的关注^[1]。

随着各种新型业务如视频点播、视频会议、IP 电话和带宽出租等不断涌现, 对网络的可靠质量要求也是多样化的; 同时不同用户对费用的承受力也不同。因此, 向用户提供区分可靠性服务是很有必要的。文献[2~5]对此问题进行了讨论, 认为可靠性是衡量网络服务质量(QoS)的一个重要指标, 提出了区分可靠性的概念。文献[3]给出了支持区分可靠性的

静态共享保护问题的整数线性规划(Integer Linear Programming: ILP)描述, 并利用两次模拟退火法解决了此问题。文献[4]提出了保护质量 (Quality of Protection, QoP)概念, 给出了环网中的解决方案。文献[5]采用的方法是为子工作光路(而不是整条工作光路)提供备份光路, 从而在满足用户不同可靠性要求的前提下, 提高了网络的资源利用率。

这些文献都假设了光纤链路发生故障是独立的: 只要保护光路与工作光路不经过同一光纤链路, 就不会同时发生失效。但在实际网络中, 光纤链路是存在一定的故障相关性的。下面我们举例子来说明。

图 1 所示为一光缆拓扑, 图 2 为对应的光纤拓扑。尽管 A-C 光纤与 C-B 光纤从图 2 看是完全独立的, 但实际他们共同经过了 C-X 光缆。因此, 如果 C-X 光缆出现故障, A-C

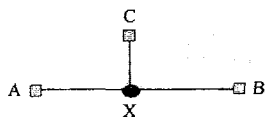


图1 光缆拓扑图

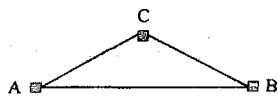


图2 光纤拓扑图

光纤和B-C光纤将同时失效。可见，A-C光纤链路与B-C光纤链路存在故障相关性。

除了上面常见的因素外，有时光纤链路还共享了更大范围的区域性灾难，如地震和洪水，以及军事应用可能需要考虑的核破坏半径。

为表示光纤链路的故障相关性，采用的方法^[6,7]就是给共同的资源或风险分配一个标识符。在路径计算时，禁止在工作通路和保护通路中都包含带有这个标识符的资源，这样就避免了在共享资源发生故障时引起工作通路和保护通路同时发生失效。这个公共的标识符被称为共享风险链路组(Shared Risk Link Groups, SRLG)。SRLG是所有共享某些物理资源的链路集。SRLG分离已成为保护设计问题的重要考虑因素。尽管现在已有较多文献研究了SRLG分离约束下的保护设计问题，但都只停留在100%的完全保护，没有支持区分可靠性。

因此，本文将克服这两个方面存在的不足，综合考虑SRLG分离与区分可靠性，结合SRLG条件故障概率的概念，提出部分SRLG分离的共享通路保护算法，从而较好地实现了考虑链路故障相关性下的区分可靠性服务。

第2节分析了SRLG分离约束下的区分可靠性问题，提出了部分SRLG分离的思想。第3节给出了PSD-SPP(Partial SRLG-Disjoint Shared-Path Protection, PSD-SPP)算法的具体描述。为验证算法的可行性，第4节进行了性能分析。第5节给出了结论。

2 问题描述

根据上一节的描述，SRLG是指光网络中共享某些物理资源的光纤链路，例如共享物理节点、光缆等，这种共享意味着一旦共享资源发生故障，这些链路将同时发生故障，因此在网络保护设计中，工作光路和保护光路应保证SRLG分离。SRLG对应的资源类别有多种^[6]，包括光缆、管道甚至某个区域。显然，两条链路 l_i 和 l_j 共享资源的类别不同，当一条链路发生故障时，另一条链路同时发生故障的概率 $P(l_j \text{ 失效} | l_i \text{ 失效})$ 是不同的。假设 l_i 和 l_j 共享光缆风险、 l_m 和 l_n 共享管道风险、 l_k 和 l_h 共享通路风险，一般情况下， $P(l_j \text{ 失效} | l_i \text{ 失效}) > P(l_m \text{ 失效} | l_n \text{ 失效}) > P(l_k \text{ 失效} | l_h \text{ 失效})$ 。为此，给每个SRLG指定条件故障概率 $CP(srlg) = P(l_j \text{ 失效} | l_i \text{ 失效})$ ，对 $\forall l_i, l_j \in srlg$ 。它的含义是属于同一个SRLG的两条链路，当这个SRLG出现故障时，一条链路失效

的同时另一条链路也失效的概率。

在100%保护设计时，要求工作光路和保护光路完全链路和SRLG分离。显然，完全SRLG分离的严格限制会导致所需的备份资源很多(为达到此目的，保护路可能会绕很远)，进而不能满足尽可能多用户对可靠性的要求。尤其当网络中有大量风险时，连接的成功率会很低。正如上面所说，在实际应用中，有些用户并不需要100%的风险保护。对可靠度要求较低的连接而言，其工作光路和保护光路完全SRLG分离是没有必要的，对某些条件故障概率很低的SRLG，工作光路和保护光路尽管同时经过他们，仍能满足用户的可靠度要求。下面，我们来推导如何根据用户的可靠度要求，计算哪些SRLG是需要分离的，哪些SRLG是不必分离的。

本文所要解决的是考虑链路故障相关性下支持区分可靠性的保护设计问题。已知网络拓扑、业务请求，找到满足业务可靠性要求RD的工作光路WP和保护光路BP，使得工作光路和保护光路同时失效的概率不大于 $1 - RD$ ：

$$P(WP \text{ 失效} \cap BP \text{ 失效}) \leq 1 - RD \quad (1)$$

由贝叶斯公式得

$$P(WP \text{ 失效} \cap BP \text{ 失效}) = P(WP \text{ 失效}) \times P(BP \text{ 失效} | WP \text{ 失效}) \quad (2)$$

其中 $P(WP \text{ 失效})$ 为工作光路WP失效的概率， $P(WP \text{ 失效}) = 1 - \prod_{l_i \in WP} P_r(l_i)$ 。 $P_r(l)$ 为链路 l 的可靠度，即此链路正常工作的概率。

光路LP经过了一系列链路，也包含了一组SRLG，称为光路的SRLG包含集(SRLG Inclusion Set, SIS)，显然 $SIS(LP) = \bigcup_{l_i \in LP} SRLG_List(l_i)$ 。用CSIS(Common SIS)表示两条光路共同包含的SRLG集，即 $CSIS(LP_1, LP_2) = SIS(LP_1) \cap SIS(LP_2)$ 。如果 $CSIS(LP_1, LP_2) = \emptyset$ ，表明光路 LP_1 和光路 LP_2 是完全SRLG分离的，此时 $P(LP_1 \text{ 失效} \cap LP_2 \text{ 失效}) = 0$ ，即 LP_1 和 LP_2 同时发生失效的概率为零。若 $CSIS(LP_1, LP_2) \neq \emptyset$ ，表明这两条光路经过了相同的风险，存在故障相关性。在单SRLG故障假设下， $P(LP_1 \text{ 失效} | LP_2 \text{ 失效}) = \max_{srlg_j \in CSIS} (CP(srlg_j))$ ，代入式(2)得

$$P(WP \text{ 失效} | BP \text{ 失效}) = P(WP \text{ 失效}) \times \max_{srlg_j \in CSIS} (CP(srlg_j)) \quad (3)$$

根据用户可靠度要求：

$$P(WP \text{ 失效}) \times \max_{srlg_j \in CSIS} (CP(srlg_j)) \leq (1 - RD) \quad (4)$$

因此，只要 $\max_{srlg_j \in CSIS} (CP(srlg_j)) \leq (1 - RD) / P(WP \text{ 失效})$ 就能满足用户要求。

依次判断工作光路 SIS 中的每个 SRLG。如果 $CP(srlg_j) < (1-RD)/P(WP \text{ 失效})$ ，即使工作光路和保护光路同时经过 $srlg_j$ ，仍旧能满足用户的可靠度要求，我们称此 $srlg_j$ 为不被保护的 SRLG(Unprotected-SRLG)；在计算保护光路时不要此类 SRLG 分离。如果 $CP(srlg_j) \geq \frac{1-RD}{P(WP \text{ 失效})}$ ，工作光路和保护光路同时经过 $srlg_j$ ，就不能满足用户的可靠性要求，我们称 $srlg_j$ 是需要被保护的 SRLG(Protected-SRLG)，在计算保护路时必须对此类 SRLG 分离，工作光路和保护光路不能同时经过这些 SRLG。

这样，工作光路的 SIS 分成了两个子集：需要分离的 SRLG 子集 SIS_d 和不需要分离的 SRLG 子集 SIS_{ud} 。由所有不被保护的 SRLG 组成； SIS_{ud} 由所有被保护的 SRLG 组成。在计算保护光路时，只需要对工作光路 SIS_d 集合中的 SRLG 保证分离就可以了。由于同时发生多个故障的概率非常小，因此本文仅考虑单故障的情况，采用共享通路保护机制：没有经过相同链路和 Protected-SRLG 的两条工作光路，他们的保护光路同时经过的链路可以共享资源。我们称此算法为部分 SRLG 分离的共享通路保护(PSD-SPP)算法。

3 部分 SRLG 分离的共享通路保护算法

由于采用光电光技术很容易实现波长转换，本文假设每个节点都具有波长转换能力。用图 $G(N, L, W)$ 表示 WDM 网状网，其中 N 为节点集； L 为双向链路集，每条链路由一对方向相反的单向光纤组成；每根光纤承载 W 个波长。 $|N|$ 和 $|L|$ 分别为网络节点数目和链路数目。每条链路 l 都带有 3 个参数：链路代价 $C(l)$ ，可靠概率 $P_r(l)$ 和链路所属的 SRLG 序列 $SRLG-List(l)$ 。链路可靠概率 $P_r(l)$ 的含义是此链路正常工作的概率，这个概率一般定义为链路正常工作时间与链路总的工作时间之比。SRLG 的条件故障概率可根据网络物理情况和历史统计信息来指定。本文考虑动态保护设计问题，业务连接请求动态到达网络节点。连接请求表示为 (S, T, B, RD) ， S, T 为源、宿节点， B 为该请求的带宽要求， RD 为业务连接的可靠度要求，它是用户最小可接受的可靠概率。显然，这个概率由应用/用户决定，与网络采用的技术、拓扑等都应是无关的。

为每个动态到达的业务寻找工作光路和保护光路。首先工作光路尽量经过可靠性高的链路，如果得到的工作光路的可靠度已经满足了用户的要求，就不需要建立保护光路。如果找不到满足用户可靠度要求的工作光路，就计算一条最短路作为工作光路；生成工作光路的风险包含集 SIS ，然后根据用户的可靠度要求得出 $SIS_{disjoint}$ (在计算保护路时只对这些 SRLG 有分离限制)，这样问题又转变为 SRLG 分离约束下的动态共享通路保护算法^[8]。删除工作路经过的链路和包含需

要分离的 SRLG 的链路，在剩余的图中计算最短路作为保护路，对不可以共享备份资源的链路分配备份资源。具体算法流程如下：

第 1 步 根据连接的带宽要求和网络的状态信息，删除资源不够的链路，在剩下的网络拓扑图中，利用 Dijkstra 算法，计算一条从源到目的的最短路作为工作光路 WP；

第 2 步 为工作光路分配资源，更新链路资源；计算工作光路 WP 的可靠度 $P_r(WP) = \prod_{l_i \in WP} P_r(l_i)$ 。

(1) 如果 $\prod_{l_i \in WP} P_r(l_i) > RD$ ，则此连接成功建立，结束。

(2) 否则，继续第三步。

第 3 步 生成工作路的 SIS，依次对 SIS 中的每个 $srlg_j$ 判断 $CP(srlg_j) \geq \frac{1-RD}{P(WP \text{ 失效})}$ ，如果成立，把 $srlg_j$ 加入到 SIS_d 子集中。

第 4 步 删除工作路所经过的链路和包含有 SIS_d 子集中的 $srlg$ 的链路，在余下的网络拓扑中，利用 Dijkstra 算法寻找最短路作为保护光路。

第 5 步 依次判断保护光路上的每条链路是否可以与其它保护光路共享备份资源，如果 SIS_d 与链路的 SRLG-List 有交集则不能共享备份资源，分配新的备份资源。

第 6 步 依次修改保护光路上的每条链路的 SRLG-List 信息，把保护光路所对应的工作光路的 SIS_d 加入到链路的 SRLG-List 列表中。

4 仿真及性能分析

仿真用的网络拓扑采用文献[4]所用的 NSFNET 骨干网，共 16 个节点，25 条链路，圆圈中为节点的编号，链路旁边的数字表示链路的 SRLG ID，如图 3 所示。每条链路由一对方向相反的单向光纤组成，每根光纤可支持 4 个波长。所有节点具备波长变换能力。每条链路的可靠概率随机分布于 1.0~0.95。为方便说明问题，本文假设所有与同一资源类别相关的 SRLG 的条件故障概率相同。参照文献[6]，所有与光缆资源相关的 SRLG 的 $CP(srlg) = 50\%$ ，与管道资源相关的 SRLG 的 $CP(srlg) = 20\%$ ，与道路相关的 SRLG 的 $CP(srlg) = 10\%$ 。本网络拓扑上的 20 个 SRLG 的条件故障概率随机为 50%，20%，10%。

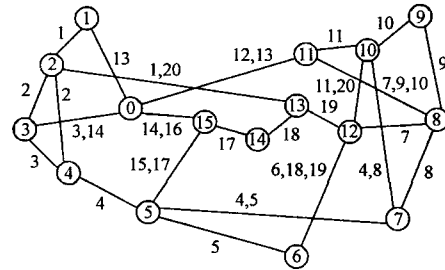


图3 仿真用的网络拓扑

假定所有连接请求按照平均速率服从参数 β 的泊松分布到达, 所建连接的持续时间服从均值 $1/\mu$ 的指数分布, 即全网总负载为 β/μ Erlang。到达请求的源、宿节点在所有节点对间随机选定, 允许一对节点间同时存在多条连接。对于到达的每个连接请求, 要求为它建立工作光路并找出相应的保护光路。只要有一个没有成功, 则拒绝该次请求。一旦被拒绝(阻塞), 就立即丢弃, 即无等待队列。仿真时假定有3种不同的可靠性级别, 分别为 $P_1 \sim P_3$ 。 P_1 对可靠性要求非常高, 为传统的100%保护; P_2 对可靠性要求要低些, 为98%; P_3 对可靠性的要求更低, 为95%。本文在不同负载的动态业务和不同用户可靠请求下, 对算法的阻塞率(阻塞率越小, 表示资源利用率越高)和业务连接的实际可靠度分布进行了仿真研究。

图4比较了3种不同可靠级别下的负载量与网络阻塞率的关系。从图中看出, 无论全网的业务量负载如何变化, 可靠度要求越低, 网络阻塞率也越低, 可以支持的网络负载越大。原因是当可靠度要求低时, 工作光路上需要保护的 SRLG 就少, 保护光路的路由选择机会就多, 同时与其它工作光路的保护光路共享资源的几率也要高, 占用的备份资源要少, 从而使得阻塞率降低。负载越大, 可靠度低比可靠度高所接纳的用户请求数比例越大。

图5给出了当业务的可靠度要求为0.98时, 800个成功建立连接请求所实际得到的可靠度。从图中可以看出所有成功建立连接实际得到的可靠度都在[0.98, 1.0]之间, 满足了用户的可靠度要求。

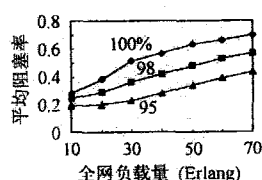


图4 可靠度与阻塞率的关系

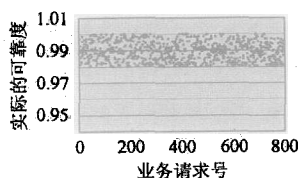


图5 可靠度要求为0.98

5 结论

在服务多样化的背景下, 可靠性作为衡量光网络服务质量(QoS)的一个重要指标, 也应该向用户提供区分服务, 满足用户对可靠性的不同要求和不同的经济承受力。另一方面, 光网络中光纤链路共享了某些物理资源, 例如共享物理节点、光缆等。这种共享意味着一旦共享资源发生故障, 这些链路将同时发生故障, 存在一定的故障相关性。因此在网络恢复和保护中, 工作光路和保护光路应保证 SRLG 分离。

如何在 SRLG 分离约束下实现区分可靠服务现有的文献都没有涉及到, 这也正是本文所要解决的问题。本文结合 SRLG 条件故障概率的概念, 提出了部分 SRLG 分离的共享通路保护 PSD-SPP 算法, 解决了考虑链路故障相关性下的多级别可靠设计问题。仿真结果表明该算法既满足了用户的区分可靠性, 又能有效降低网络的阻塞率。

参考文献

- [1] Ramamurthy S, Sahasrabudhe L, et al.. Survivable WDM mesh networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(4): 870 - 883.
- [2] Bolmie N, Ndousse T D, et al.. A differentiated optical service for WDM networks. *IEEE Communications Magazine*, 2000, 38(2): 68 - 73.
- [3] Tacca M, Fumagalli A, et al.. Differentiated reliability in optical networks: theoretical and practical results. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(11): 2576 - 2586.
- [4] Gerstel O, Sasaki G. Quality of Protection (QoP): A quantitative-unifying paradigm to protection service grades. *Optical Networks Magazine*, 2002, 3(3): 40 - 50.
- [5] Saradhi C V, Murthy C S R. Routing differentiated reliable connections in WDM optical networks. *Optical Networks Magazine*, 2002, 3(3): 50 - 67.
- [6] Papadimitriou D, et al.. Inference of shared risk link groups. Draft-many-inference-srlg-02.txt, Internet Draft, work in progress, Feb. 2002.
- [7] Grover W, Doucette J, et al.. New options and insights for survivable transport networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(1): 34 - 41.
- [8] Yuan Sheng-li, Jue J P. Shared protection routing algorithm for optical networks [J]. *Optical Networks Magazine*, 2002, 3(3): 20 - 27.

虞红芳: 女, 1975年生, 在职博士生, 研究方向为光网络的优化设计包括光网络生存性、虚拟自愈环以及流量工程。

温海波: 男, 1976年生, 博士, 研究方向为光网络相关技术, 包括 WDM 光网络 RWA、业务量疏导、网络生存性以及光突发交换等。

王 晟: 男, 1971年生, 博士, 副教授, 研究方向包括 WDM 光网络与 IP 网络技术、无线 IP 网络及无线接入等。

李乐民: 男, 1932年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为通信网与宽带通信技术。