

WDM 网中基于服务等级约定限制的动态共享通路保护算法

何荣希¹, 温海波²

(1. 大连海事大学信息工程学院, 辽宁大连 116026; 2. 上海贝尔阿尔卡特股份有限公司研究与创新中心, 上海 201206)

摘 要: 服务等级约定(SLA)是用户与服务提供者之间达成的有关服务内容、服务质量等方面的合约,它规定了服务提供者必须为用户提供的具体服务参数.连接可靠性和恢复时间是涉及生存性问题的两个重要SLA参数,如何保证用户请求的连接可靠性和恢复时间要求以避免违约而受到惩罚,同时又最大限度地降低成本是服务提供者最关心的问题之一.针对上述问题,本文提出一种动态约束共享通路保护算法(DCSP)加以解决.DCSP同时考虑用户提出的上述两个SLA参数要求,利用K路由和部分链路分离保护思想为它们动态提供区分服务.DCSP既能保证用户的服务要求,同时又有利于全网负载均衡和提高资源利用率.最后对所提算法进行了仿真研究,给出了仿真结果.

关键词: 服务等级约定; 连接可靠性; 恢复时间; 共享通路保护; 动态选路

中图分类号: TN913.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)04-0613-07

Dynamic Shared Path Protection Algorithm in WDM Networks Under Service Level Agreement Constraints

HE Rong-xi¹, WEN Hai-bo²

(1. College of Information Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

2. Research and Innovation Center, Alcatel Shanghai Bell Corporation, Shanghai 201206, China)

Abstract: The notion of service level agreement (SLA) has been proposed to capture qualitatively and quantitatively defined performance contract between the service provider and the customers. Connection reliability and restoration time are two important SLA parameters of the customers' main concerns and should be carefully considered in survivable WDM networks. A sound scheme should carefully guarantee the two SLA requirements simultaneously and benefit a network operator in resource efficiency and service scalability. Under the two SLA parameter constraints, a novel dynamic constraint shared path protection algorithm (DCSP) in WDM mesh networks is proposed. Based on the basic ideas of the K-shortest path and partial link-disjoint protection, DCSP can provide differentiated services for customers according to their SLA parameters. Simulation results show that DCSP not only can efficiently guarantee the specific SLA requirements of customers, but also can achieve significant performance gain and lead to remarkable reduction in blocking probability.

Key words: service level agreement (SLA); connection reliability; restoration time; shared path protection; dynamic routing

1 引言

服务等级约定(service level agreement, SLA)是服务提供者(service provider)与用户(customer)之间达成的有关服务内容、服务质量等方面的合约,它规定了服务提供者必须为用户提供的具体服务参数^[1].如何按照SLA要求为用户提供满意的服务以避免违约而受到惩罚,同时又有利于降低服务成本是服务提供者最关心的问题之一.由于波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)光网络的特殊性,适用传统IP网络的SLA参数不能直接照搬到WDM网络.文献[1]给出了光网络

中可能的SLA参数,其中连接可靠性(connection reliability)和恢复时间(restoration time)是涉及生存性问题的两个重要参数.连接可靠性是指为用户请求所建连接在将来某个随机时间仍处于正常工作状态的概率^[2,3],而恢复时间是指从网络发现故障到中断连接重新恢复的时间^[4,5].由于光路上聚合了大量的业务流,光路的失效将引起它承载的所有业务流中断,从而造成巨大的损失.因此,WDM网络的一个关键问题就在于如何保证它具有强壮的生存性^[4-6].一种解决生存性问题的有效方案是在光层引入共享通路保护(shared path protection, SPP)机制.传统的SPP方案需要为每个连接请求找

到两条链路分离的通路, 分别作为工作通路和保护通路. 一旦工作通路失效, 可以立刻将业务流切换到保护通路传输. SPP 允许不会同时失效的工作通路共享保护资源, 因此, 有利于提高全网资源利用率.

近年来, 不少文献^[4~9]都对单链路失效情况下的 SPP 方案进行研究. 但是, 已有文献很少考虑到不同用户可能具有不同的连接可靠性要求, 所有请求都对两条链路分离的通路, 这无疑需要预留大量的保护资源. 事实上, 不同业务对连接的可靠性要求可能不同, 如电子商务等业务需要非常可靠的传输, 并且愿意为所受到的高质量服务支付更多的费用. 而诸如 WWW 等应用对连接的可靠性要求就低得多. 对于可靠性要求较低的业务并不一定要为它预留链路分离的保护通路. 根据其可靠性要求的高低, 可以为它预留部分链路分离的保护通路, 甚至不需要预留保护通路. 除了连接可靠性外, 网络出现故障时中断连接的恢复时间也是用户关心的另一个重要 SLA 参数. 不同业务对于恢复时间也有不同的要求, 比如话音业务要求恢复时间不超过 50ms, 而数据业务对恢复时间的要求就相对宽松得多. 文献中大多数 SPP 算法往往将如何提高保护资源共享程度, 从而提高全网资源利用率作为优化目标, 而很少考虑如何保证用户的恢复时间要求. 因此, 所提算法总是鼓励保护通路选择那些需要额外预留保护资源较少的链路, 从而会增加保护通路的跳数(经过链路个数)^[6]. 由于正常工作时, 业务流在工作通路传输, 保护通路并未工作(仅预留保护资源). 网络出现故障时才启动保护通路, 并将业务流切换到保护通路传输. 因此, 恢复时间的长短在很大程度上取决于保护通路跳数的大小^[6]. 如果保护通路所经链路数太多, 很可能会导致恢复时间过长而不能满足用户的恢复时间要求. 连接可靠性和恢复时间两个参数, 除了与用户本身的业务特点有关外, 同时还与用户为了获得相应服务愿意付费多少有关. 用户所要求连接的可靠性越高, 发生故障时恢复越快, 服务提供者为其建立连接所需网络资源就越多, 相应地用户需要支付的费用就越高. 由于不同用户可能具有不同的 SLA 参数, 因此, 服务提供者应该按照其要求为它们提供区分服务, 以节约网络资源, 降低运营成本.

目前, 已有部分文献^[2, 3, 7~11]对考虑 SLA 参数限制的 SPP 算法进行研究. 文献[2, 3]定性分析了利用不同保护方案所建连接的可靠性, 对静态业务下考虑连接可靠性要求的保护方案进行了 ILP 描述, 同时还提出几种启发式算法, 并通过仿真研究对 ILP 描述的正确性和所提启发式算法的有效性进行验证. 文献[7]综述了目前研究 WDM 网络区分可靠性问题的最新进展; 文献[8]研究了 IP/WDM 网络中考虑连接可靠性参数限制的 SPP. 它假设网络虚拓扑已建立, 解决了如何根据用户的连接可靠性参数在虚拓扑上建立可靠连接. 文献[9, 10]提出一种链路资源可用性模型来反映网络元件的可靠性参数和网络当前资源状态, 并利用该模型对考虑用户连接可靠性参数的通路保护方案进行研究. 文献[11]利用子通路(分段)保护^[5]思想解决为用户提供不同恢复时间的 SPP 方案, 并通过仿真研究验证了所提算法的有效性. 上述研究在讨论 SPP 时都仅涉及一个 SLA 参数(连接可靠性参数或恢复时间参数).

事实上, 考虑网络的生存性问题往往会同时涉及上述两个 SLA 参数, 因此, 研究同时考虑上述两个参数的 SPP 算法更具普遍意义, 目前还是一个较新的问题, 未见文献涉及. 而且它比只考虑单个 SLA 参数时要复杂得多.

本文研究了单链路失效情况下同时考虑连接可靠性和恢复时间两个 SLA 参数限制的 SPP 问题, 对利用部分链路分离保护思想的 SPP 方案连接可靠性和恢复时间进行了分析, 在此基础上提出一种有效的动态约束共享通路保护算法(dynamic constraint shared path protection, DCSP). DCSP 根据用户提出的上述两个 SLA 参数要求, 利用 K 路由和部分分离链路保护思想为它们动态建立可靠连接. 与文献中已有算法相比, DCSP 除了能同时保证用户的两个 SLA 参数要求外, 还有利于节约带宽资源和全网负载均衡, 从而可以提高全网资源利用率, 降低全网平均阻塞率. 本文第 2 节描述了网络模型, 并分析了 DCSP 方案的连接可靠性和恢复时间; 第 3 节对所提算法进行具体阐述; 第 4 节给出了仿真研究结果; 第 5 节是全文的总结.

2 问题描述

给定网络物理拓扑 $G(N, L, W)$, 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. W 为每根光纤上的可用波长集 $W = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|W|}\}$. 节点数、链路数和波长数分别用 $|N|$ 、 $|L|$ 和 $|W|$ 表示. 节点都具有波长变换能力. 考虑的光路为双向光路. 所有到达业务连接请求的源、宿节点在节点集 N 中随机选择, 而且每次只到达一个请求. 连接请求可表示为 $r(s, d, a_r, h_r)$, 其中 $s, d \in N$, 表示该请求的源、宿节点; a_r 和 h_r 分别表示该请求对应的连接可靠性参数和恢复时间参数. 对于到达的每个请求, 应该根据它的 SLA 参数要求为它建立可靠连接. 如果没有成功建立, 则拒绝该次请求.

2.1 连接可靠性分析

连接可靠性可用连接的可用概率表示^[2, 3], 在具体分析之前, 引入如下定义:

(i, j) : 物理拓扑 G 中节点 i, j 间的光纤链路, 代表连接节点 i 和节点 j 的两条单向光纤链路.

a_{ij} : 链路 (i, j) 的可用概率, 表示该链路在将来某个随机时间仍处于正常工作状态的概率.

c_{ij} : 链路 (i, j) 的代价函数(权值), 根据网络物理拓扑和当前状态信息动态决定.

S_P : 构成路径 P 的所有链路的集合.

a_P : 路径 P 的可用概率, 表示该路径在将来某个随机时间仍处于正常工作状态的概率. 只有当构成路径 P 的所用链路都可用时, 路径 P 才可用. 可求出

$$a_P = \prod_{(i, j) \in S_P} a_{ij} \quad (1)$$

传统 SPP 中, 每个连接 r 都对一对链路分离的工作通路(P)和保护通路(B), 而且允许不同时失效的工作通路对应的保护通路共享备用资源. 此时, 只有当路径对 P 和 B 同时不可用时, 连接 r 才不可用. 因此, 传统 SPP 承载连接 r 时的

可用概率 a_{sd} 为^[9]:

$$a_{sd} = 1 - (1 - a_P)(1 - \theta \cdot a_B) \quad (2)$$

其中, a_P 和 a_B 分别表示工作通路和保护通路的可用概率; θ 表示通路 B 上预留的备用资源还未被其他连接对应的保护通路占用的概率。在多链路失效情况下, 网络中某一时刻可能会存在多个工作通路中断。在连接 r 对应的工作通路 P 失效之前, 如果其他共享保护通路 B 上备用资源的某条连接对应的工作通路已经失效, 那么它在连接 r 失效之前已经利用 B 上的保护资源进行恢复。此时连接 r 将无保护资源可用, 因而不能恢复。SPP 允许共享保护资源的工作通路集越大, 通路 B 上备用资源被该集合中其他失效工作通路对应的保护通路占用的概率就越大, θ 取值就越小, 连接 r 可使用通路 B 进行恢复的概率就越低。在单链路失效情况下, 由于网络中同一时间只存在一条链路失效, 因此, 不会出现上述情况, 此时可认为 $\theta = 1$ 。

与传统 SPP 不同, DCSP 根据用户请求的连接可靠性参数为它们建立连接。对于每一个连接请求并不一定都要建立两条链路分离的通路, 分为如下两种情况: (1) 如果工作通路的可用概率已经满足用户的连接可靠性参数要求, 则不需要建立保护通路; (2) 如果工作通路的可用概率低于业务连接的可靠性参数要求, 此时应该为该连接寻找一条保护通路。但是, 保护通路并不是必须与工作通路完全链路分离。二者可以部分链路分离, 只要用它们承载连接的可用概率不低于用户请求的可靠性参数就行。

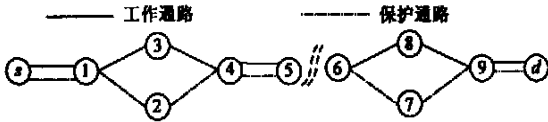


图1 部分链路分离保护

假设 DCSP 为某个可靠性要求为 a_r 的请求 r 找到工作通路 ($P_1 = s-1-3-4-5-\dots-6-8-9-d$) 和保护通路 ($P_2 = s-1-2-4-5-\dots-6-7-9-d$)，二者并未完全分离，如图1所示。 P_1 和 P_2 上共同链路构成集合 S_1 ，剩下链路构成集合 S_2 。去掉 S_1 中的链路后， P_1 和 P_2 将被分割成不同的子通路段，如 $1-3-4$ 、 $6-8-9$ 、 $1-2-4$ 和 $6-7-9$ 等。 P_1 和 P_2 中具有相同端节点的一对子通路段构成可靠子通路对，如 $1-3-4$ 和 $1-2-4$ 构成可靠子通路对。下面计算利用部分链路分离通路对 P_1 和 P_2 承载连接时的可用概率 a_{sd} ，其值为

$$a_{sd} = a_{s_1} \cdot a_{s_2} \quad (3)$$

其中, a_{s_1} 和 a_{s_2} 分别表示集合 S_1 和 S_2 的可用概率; 由于 P_1 和 P_2 不能完全重合, 故 S_2 不会为空集合。如果集合 S_1 为空, 则 P_1 和 P_2 完全链路分离, 此时令 $a_{s_1} = 1$; 否则, $a_{s_1} = \prod_{(i,j) \in S_1} a_{ij}$ 。

可求出 $a_{s_2} = \prod_{SP_l \in S_2} a_{SP_l}$, 其中, SP_l 表示第 l 个可靠子通路对; a_{SP_l} 表示该可靠子通路对的可用概率, 可求

$$\begin{aligned} a_{SP_l} &= 1 - (1 - \prod_{(i,j) \in P_{1l}} a_{ij}) \cdot (1 - \prod_{(i,j) \in P_{2l}} a_{ij}) \\ &= \prod_{(i,j) \in P_{1l}} a_{ij} + \prod_{(i,j) \in P_{2l}} a_{ij} - \prod_{(i,j) \in P_{1l} \cup P_{2l}} a_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, P_{1l} 和 P_{2l} 分别表示第 l 个可靠子通路对在 P_1 和 P_2 上对应的子通路段。根据式 (3) 和 (4) 计算 a_{sd} , 只要 $a_{sd} \geq a_r$, 就可以用这两条路径为该请求建立连接。

2.2 恢复时间分析

传统 SPP 中, 连接对应一对工作通路和保护通路。在网络正常工作状态下, 连接由工作通路承载, 而保护通路并没有激活。当出现故障时需要一套信令机制来激活保护通路。图2所示为传统 SPP 中连接 r 对应的工作通路 $s-1-2-3-d$ 上链路 (2, 3) 发生故障 (如断裂等) 时的恢复过程。当节点 2 和 (或) 3 探测到链路 (2, 3) 出现故障时, 节点 2 向源节点 (节点 3 向宿节点) 发出告警信令。源节点收到该信令后立即沿相应的保护通路 $s-4-5-6-d$ 向宿节点 d 发送配置信令对保护通路上的节点进行配置。宿节点收到配置信令后立即反向沿保护通路向源节点发出确认信令。源节点收到该确认信令后将连接切换到保护通路^[4,5]。恢复时间就是从发现故障到完成连接切换的总时间。在具体分析恢复时间之前, 引入如下定义:

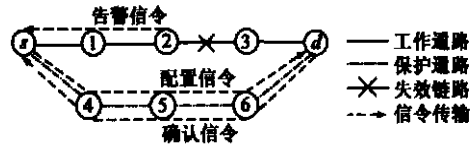


图2 传统 SPP 方案故障恢复

l_{ij} : 链路 (i, j) 的物理长度, 不妨设所有链路的长度为 80km ^[4]。

δ : 失效链路端节点探测到故障的时间, 假设 $\delta = 10\mu\text{s}$ ^[4,5]。

v : 节点对信令的处理时间 (包括排队等待等), 假设 $v = 20\mu\text{s}$ ^[4,5];

m : 信令在每条链路上的传输时延, 假设 $m = 400\mu\text{s}$ (相当于在 80km 光纤上的传输时延)^[4]。

l_a 和 l_c : 分别表示告警信令经过的链路数和构成保护通路的链路数 (跳数)。

d : 信令的传播时延, 包括告警信令从发现故障的节点传到源节点, 然后配置信令从源节点沿保护通路传到宿节点, 以及确认信令从宿节点沿保护通路反向传到源节点的时间, $d = m \times (l_a + 2 \times l_c)$ 。

ε : OXC 的配置时间, 假设 $\varepsilon = 10\mu\text{s}$ ^[4]。

τ_{ij} : 链路 (i, j) 发生故障时连接 r 的恢复时间, 则

$$\tau_{ij} = \delta + d + \varepsilon \times (l_c + 1) + v \times [(l_a + 1) + 2 \times (l_c + 1)] \quad (5)$$

将各个参数的假设值代入上式, 可得

$$\tau_{ij} = 60 + 420 \times l_a + 850 \times l_c (\mu\text{s}) \quad (6)$$

从而可求出工作通路 P_r 上链路出现故障时的平均恢复时间 $\tau_r = \sum_{(i,j) \in P_r} \tau_{ij} / |P_r|$ 。其中, $|P_r|$ 表示工作通路 P_r 包含的链路数。进而可求出全网所有业务连接的平均恢复时间 $\tau = \sum_{r \in R} \tau_r / |R|$, 其中, R 表示所有成功建立连接构成的集合, $|R|$ 表示该集合所包含业务连接的数目。

从图2可看出, 工作通路上的失效链路越靠近宿节点, 出现故障时告警信令需要传输的链路数越多, 恢复时间越长。当

工作通路上紧邻宿节点的链路失效时, 即链路(3, d)失效, 则所需恢复时间最长. 假设构成工作通路的链路数为 l_w , 那么可求出传统 SPP 中最长恢复时间 τ_{\max} 为

$$\tau_{\max} = 60 + 420 \times l_w + 850 \times l_c \quad (7)$$

从上式可以看出, τ_{\max} 主要取决于工作通路和保护通路经过的链路数(跳数). 由于 l_w 往往小于 l_c ^[6], 因此, 影响恢复时间的主要因素是保护通路的跳数. 通过控制保护通路的跳数就能较好地保证用户的恢复时间要求^[11]. 类似文献[11], 本文用保护通路跳数(l_c)来近似表征用户的恢复时间参数大小.

3 算法描述

DCSP 主要包括工作通路模块、保护通路模块和资源优化模块三部分, 分别叙述如下:

工作通路模块:

DCSP 首先为连接请求 $r(s, d, a_r, h_r)$ 建立一条工作通路. 在建立工作通路之前, 先按下式决定 G 中各条链路的代价函数 c_{ij} :

$$c_{ij} = \begin{cases} +\infty, & SW_{ij} = \phi \\ -\ln a_{ij}, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, SW_{ij} 表示链路(i, j)上的空闲波长集.

修改完链路代价函数后, 利用 K 路由算法^[12]找出源、宿节点间 K 条最短路, 找到的所有路径构成集合 S_K . 实际上, 此时找到的 K 条最短路就是当前网络中可靠性最高的 K 条路径^[2]. 根据式(1)计算 S_K 中路径的可用概率, 从中选出可用概率不低于 a_r 的所有路径, 构成集合 S_a . 如果 S_a 为空, 表示找到的所有路径都不能满足用户请求的可靠性要求, 因此需要调用保护通路模块为该请求计算保护通路; 如果 S_a 不为空, 则表示建立一条工作通路就能满足用户的可靠性要求, 不需要为它建立保护通路. 由于连接的可用概率已达到用户可靠性要求, 当网络出现故障使工作通路失效时, 并不需要进行恢复, 直接中断该连接. 此时, 可以认为其恢复时间为 0, 满足用户的恢复时间参数要求. 对于这种情况, 不需要检查恢复时间参数, 直接从 S_a 中选择一条有利于全网负载均衡和少占用网络资源的路径来建立连接. 为此, 按下式重新定义 S_a 中各条路径经过链路的代价函数:

$$c_{ij} = 1 + \alpha/w_{ij} \quad (9)$$

其中, w_{ij} 表示 SW_{ij} 中的空闲波长数. 由于 S_a 包含路径的链路上至少存在一个空闲波长, 因此, $w_{ij} \geq 1$. α 是一个大于 1 的常数, 调整 α 值可以在节约资源和负载均衡间进行取舍. α 越大, w_{ij} 对 c_{ij} 的影响权重越大, 算法越有利于全网负载均衡, 相反, 算法更有利于节约网络资源. 调整完链路权值后, 从 S_a 中找出具有 $\min \left\{ \sum_{(i,j) \in P, P \in S_a} c_{ij} \right\}$ 的路径 P 作为工作通路, 并在该通路上建立连接.

保护通路模块:

依次选择 S_K 中的不同路径, 分别为它们寻找保护通路:

在 DCSP 中, 工作通路和保护通路可以部分重叠, 只要它们的可用概率能够满足用户请求的可靠性要求就可用来建立

连接. 另外, DCSP 允许不会同时失效的连接共享保护资源. 从 S_K 中选择一条路径 P_l , 在为 P_l 计算保护通路之前, 按下式修改 G 中链路的代价函数:

$$c_{ij} = \begin{cases} -\ln(\zeta \cdot a_{ij}), & (i, j) \in P_l \\ f_{ij}, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

ζ 是一个常数, $0 \leq \zeta \leq 1$. 通过调整 ζ 值的大小可以控制找到的保护通路和工作通路链路的分离程度. ζ 取值越小, 越有利于找到两条完全分离的通路. 当 $\zeta = 0$ 时, $c_{ij} = +\infty$, 此时就是要求找出与工作通路完全分离的保护通路. 式(10)中 f_{ij} 按下式确定:

$$f_{ij} = \begin{cases} -\ln(\zeta \cdot a_{ij}), & q_{ij} + 1 \leq m_{ij} \\ -\ln(\zeta \cdot a_{ij}) + \min\{1, q_{ij} + 1 - m_{ij}\}, & m_{ij} < q_{ij} + 1 \leq w_{ij} + m_{ij} \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中, q_{ij} 表示通路 P_l 上任意一条链路出现故障时, 为了保证它所承载业务能够正常恢复, 在链路(i, j)上需要占用的最大保护资源(波长数). m_{ij} 表示链路(i, j)上已经预留的保护资源. 式(11)保证了在建立保护通路时总是鼓励使用需要额外预留保护带宽越少的链路, 从而有利于提高全网资源利用率.

修改完链路的代价函数, 利用 Dijkstra 算法找出一条最短路径 P_c (与 P_l 不能完全重合, 重合则取 S_K 集合中下一条路径重新计算), 并按照式(3)和(4)计算 P_l 和 P_c 能够为连接请求提供的可用概率 a_k . 如果 $a_r \leq a_k$, 则将路径对 P_l 和 P_c 放入集合 X 中. 然后从 S_K 集合中取下一路径, 重复上述过程, 直到取完 S_K 中的所有路径.

集合 X 是所有满足用户可靠性要求的路径对构成的集合, 如果 X 集合为空, 则拒绝该次请求; 否则, 进行下一步为用户选择满足恢复时间参数的路径对: 分别计算集合 X 中每对路径的恢复时间, 将恢复时间符合用户要求的通路对放入备选集合 Y 中. 如果 Y 集合为空, 则拒绝该次请求; 否则, 调

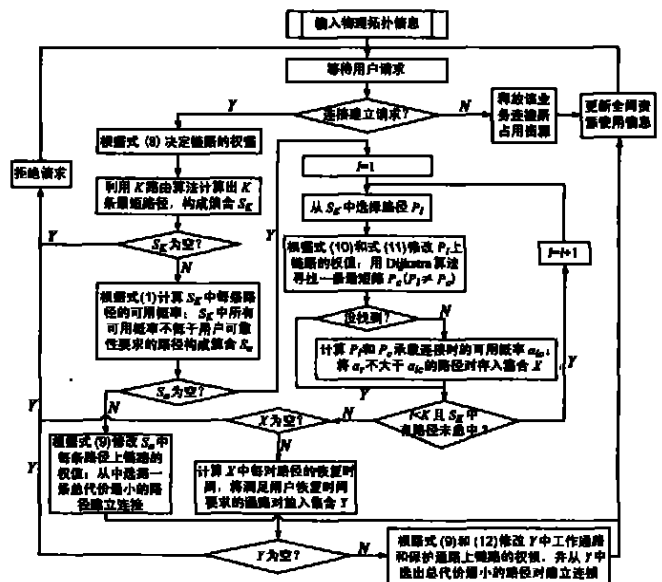


图3 所提算法的流程图

用资源优化模块。

资源优化模块:

按照式(9)修改 Y 集合中工作通路上链路的代价函数, 然后按照下式修改 Y 集合中保护通路上链路的代价函数:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 + \alpha/w_{ij}, & b_{ij} = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中, b_{ij} 表示在链路 (i, j) 上需要额外预留的保护资源(波长数)。修改完 Y 集合中链路代价函数后, 从中选出总代价最小的路径对为该请求建立连接。

所提算法的流程图如图 3 所示。算法的复杂性主要取决于所用的 K 路由算法^[12]、Dijkstra 算法、调整链路权值和比较操作, 近似为 $O(K|N|^3 + K|L|)$ 。如果取 $K=1$, 那么 K 路由算法的复杂性将由 $O(K|N|^3)$ 降低到 $O(|N|^2)$, 相应地所提算法的复杂性降为 $O(|N|^2 + |L|)$ 。

4 计算机仿真及数据分析

为了更好地说明所提算法(DCSP)的有效性, 本节将对 DCSP 进行仿真研究, 并与文献[9, 10]提出的 DYNAMIC_LRA 算法进行对比。

4.1 假设条件

采用 NSFNet 骨干网, 共 14 个节点, 21 条链路, 如图 4 所示。假设节点都具备波长变换能力, 节点间的链路由一对方向相反的单向光纤组成, 每根光纤的物理距离为 80km, 其可用概率在 99.95%~99.97% 之间随机选择。

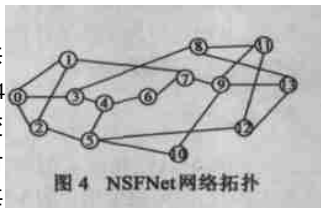


图 4 NSFNet 网络拓扑

仿真时采用两种不同的业务类型:(1) 递增业务: 连接一旦建立就一直持续下去;(2) 动态业务: 所建连接的持续时间服从均值 $1/\mu$ 的指数分布。在上述两种业务中, 所有连接请求按照平均速率服从参数 β 的泊松分布到达。到达请求的源、宿节点在所有节点间随机选定, 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, 要求为它建立符合 SLA 参数要求的可靠连接。如果建立不成功, 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。在递增业务中, 假设链路容量足够大(即每根光纤支持足够多波长), 因此到达的所有连接请求都能成功建立; 而在动态业务下, 假设每根光纤可支持 6 或 7 个波长。保护通路所经链路跳数多少可大致反映连接恢复时间的大小^[11], 仿真时用保护通路跳数(l_c)表示连接请求的恢复时间参数。仿真时取 $\alpha=6.0$ 和 $\zeta=0.01$ 。

4.2 性能指标

(1) 阻塞率(BP): 成功建立的连接请求数与到达的连接请求总数之比。阻塞率越小, 说明被拒绝的业务连接请求越少, 算法性能越好。在动态业务下, 阻塞率可以大致反映出算法的资源利用率的高低, 阻塞率越小, 相应地, 资源利用率就越高。

(2) 平均恢复时间(ART): 网络中某条链路出现故障的平均恢复时间。显然 ART 就是前文的 T 。

(3) 保护通路平均跳数(H_b): 表示算法为需要计算保护通路的所有请求最终选择保护通路跳数的平均值。 H_b 的大小可以大致反映出所需恢复时间的多少。

(4) 负载均衡度(LBD): 反映算法是否有利于全网负载均衡。在递增业务下, 当到达一定数量的连接请求后, 统计链路 (i, j) 上总负载 B_{ij} , 可表示为:

$$B_{ij} = |W| - w_{ij} \quad (13)$$

从而可推出如下不等式

$$\sum_{(i,j) \in L} B_{ij} \leq |L| \cdot \max_{(i,j) \in L} \{B_{ij}\} \quad (14)$$

那么, 可定义负载均衡度(用 LBD 表示)为

$$LBD = \frac{|L| \cdot \max_{(i,j) \in L} \{B_{ij}\}}{\sum_{(i,j) \in L} B_{ij}} - 1 \quad (15)$$

显然, $LBD \geq 0$, 而且其值越小, 表示全网负载分布越均衡。当 $LBD=0$ 时, 达到理想状态, 即所有链路具有同样的负载。因此, LBD 可以大体衡量全网负载分布的均衡性。

(5) 通路带宽比(BPR): 衡量算法中保护资源的共享程度。在递增业务下, 当到达一定数量的业务连接请求后, 分别统计此时工作通路和保护通路各自占用的总带宽值, 从而可按下式计算通路带宽比, 用 BPR 表示

$$BPR = \frac{\sum_{(i,j) \in L} m_{ij}}{|L| \cdot |W| - \sum_{(i,j) \in L} (w_{ij} + m_{ij})} \quad (16)$$

在递增业务下, 由于所有连接请求都能成功建立, 因此在到达相同数量请求后, 全网所有工作通路占用的总带宽都一样, BPR 越小说明保护通路占用带宽越小, 也就说明算法中保护资源的共享程度越高。

4.3 仿真结果

首先在不同负载的动态业务下, 对算法的阻塞率和平均恢复时间进行了仿真研究, 所得结果是在模拟 10^5 次业务请求后经统计得出的。图中 LRA 表示文献[9-10]中 DYNAMIC_LRA 算法, DCSP-K 表示 K 取不同值的 DCSP 算法, ELRA 表示将 DYNAMIC_LRA 扩展到同时考虑两个 SLA 参数所得算法。

DYNAMIC_LRA 算法只考虑了连接可靠性参数限制, 并没有考虑恢复时间参数。因此, 首先在仅考虑连接可靠性限制情况下(用户请求的可靠性参数在 96%~100% 之间随机选择)对上述两种算法进行对比, 如图 5-6 所示。此时假设用户请求的恢复时间参数足够大(如 $l_c = |L|$)。由于全网总链路数为 $|L|$, $l_c = |L|$ 意味着在建立连接时不需要考虑恢复时间参数限制。

图 5-6 对比了 $|W|=6$ 时算法在不同负载时的阻塞率和

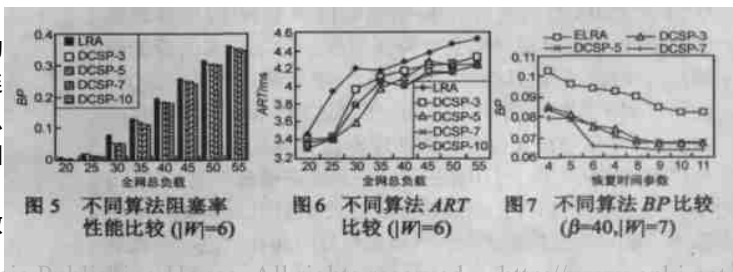


图 5 不同算法阻塞率性能比较 ($|W|=6$)

图 6 不同算法 ART 比较 ($|W|=6$)

图 7 不同算法 BP 比较 ($\beta=40, |W|=7$)

平均恢复时间曲线。可以看出:仅考虑可靠性参数限制时,DCSP 的阻塞率和平均恢复时间都优于 DYNAMIC-LRA;而且随着 K 值增加,DCSP 的性能更优。原因在于:DCSP 除了按照用户的 SLA 参数为它们提供区分服务外,同时还考虑负载均衡和资源优化,更有利于节约网络资源,因而可以降低阻塞率。另外,DCSP 总是从找到的可用路径中选择占用资源最小的建立连接,从而潜在地有利于选择跳数较小的路径,因此可以降低平均恢复时间。当 K 值越大时,DCSP 计算出的符合可靠性要求的路径越多,从而越有利于从中选择最佳路径来建立连接。因此, K 取较大值有利于改善 DCSP 的性能。但是,当 K 值增加到一定程度($K=7$)后,继续增大 K 值算法性能再无太大改进。因为网络规模一定时,源、宿节点间潜在的可用路径是一定的,当 K 增大到一定程度时,DCSP 已经能够找出源、宿节点间的所有路径放入备选集合。继续增大 K 值也不能找到新的可用路径,因此对算法性能并无改进。从图中可看出:当 $K=3$ 时,DCSP 的性能较 DYNAMIC-LRA 已有较大改善。此时 K 取值较小,不会引入太大的时间开销。

为了研究算法在同时考虑可靠性和恢复时间参数情况下的性能,我们将 DYNAMIC-LRA 算法扩展到同时考虑上述两个 SLA 参数限制,用 ELRA 表示。在 $|W|=7$, $\beta=40$ 和用户的可靠性参数在 96%~100% 之间随机选择条件下,研究了 ELRA 和 DCSP 在不同恢复时间参数(l_c)下的阻塞率和保护通路平均跳数(H_b)性能,如图 7~8 所示。

从图 7~8 可以看出:无论恢复时间参数如何变化,DCSP 的阻塞率都低于 ELRA;其保护通路的平均跳数也低于 ELRA;随着 K 值增加 DCSP 性能改善越明显。当 K 增大到 7 以后,继续增加 K 值对算法性能并无太大改善。可见,DCSP 既有利于提高资源利用率,同时又有利于选择跳数较短的路径作保护通路,因而,当出现故障时具有较快的恢复时间。

为了进一步说明算法的有效性,在递增业务下研究了算法在不同恢复时间参数(l_c)下的 BPR 和 LBD 指标,如图 9~10 所示。仿真时取 $|W|=7$,用户请求的可靠性参数在 96%~100% 之间随机选择, l_c 从 2 递增到 11。对于每一个 l_c 值都进行 10 次不同的试验(每次试验随机产生 5000 次请求),然后对 10 次试验的结果取平均就得到当前 l_c 对应的 BPR 和 LBD 值。

从图 9 可以看出:与 ELRA 相比,DCSP 更有利于负载均衡。原因在于:DCSP 根据式(9)和(12)调整链路权值,从而鼓励选择有利于负载均衡的链路建立连接。另外,从图中看出 K 值的改变对算法 LBD 的影响不是很明显。从图 10 可看出:DCSP 比 ELRA 具有更低的 BPR。这是因为 DCSP 除了考虑负载均衡外,还鼓励选择需要额外预留较少带宽资源的保护通路建立连接。另外,从图 7~10 可看出:增加恢复时间参数(l_c)的值有利于算法成功建立更多连接,但当 l_c 增加到一定程度($l_c > 7$),继续增加其值对算法性能再无明显改善。原因在于:当网络规模一定时,可用保护通路的最大跳数是一定的。当 l_c 增大到接近该值时,已经能够保证连接不会因为恢复时间参数不合要求而被拒绝。因此,再增加恢复时间参数也不能找到

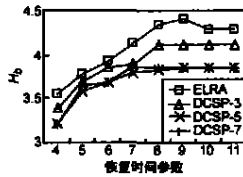


图 8 不同算法保护通路平均跳数(H_b)比较 ($\beta=40, |W|=7$)

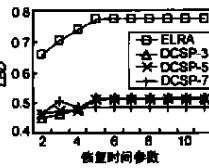


图 9 不同算法的 LBD 比较 ($|W|=7$)

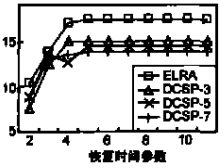


图 10 不同算法的 BPR 比较 ($|W|=7$)

可用路径建立连接。

另外,我们还仿真研究了不同的 α 和 ζ 值对算法的影响。由于篇幅限制,这里不给出具体仿真数据,仅列出主要结论:增大 α 值有利于改善算法的 LBD 性能,但是当 α 值超过 6 时再继续增大,效果不明显。增大 ζ 值有利于节约网络资源,降低阻塞率。当 ζ 增大到一定程度时,算法阻塞率性能反而下降。因为 ζ 值越大,工作通路上的链路被保护通路选中的概率越大,建立连接时可选用的链路集合越大,因此连接被成功建立的概率增加。但是,当 ζ 值较大时,算法计算出的保护通路的链路与工作通路完全重合的概率增加,因此不能成功建立连接,增加了全网阻塞率。在实际应用时, ζ 可取一个较小的值,从而很好地实现工作通路和保护通路部分链路分离,同时又有利于降低阻塞率。

5 结束语

连接可靠性和恢复时间是有关生存性问题的两个重要 SLA 参数,如何根据用户的不同要求为它们建立满意连接,从而避免违约带来的惩罚,同时又要有利于提高全网资源利用率是服务提供者最关心的一个问题。本文研究了 WDM 网络中同时考虑上述两个 SLA 参数限制的 SPP 问题,利用部分链路分离保护和 K 路由思想提出一种动态约束共享通路保护算法(DCSP),分析了 DCSP 算法的连接可靠性和恢复时间指标,并通过计算机仿真与文献中已有算法进行对比。结果表明:DCSP 既能保证用户不同的 SLA 参数要求,同时又有利于全网负载均衡和资源优化,从而可以有效地降低全网的平均阻塞率。另外,即使在 K 取较小值($K=3$)时,DCSP 的性能已大大优于已有算法。

参考文献:

- [1] W Fawaz, et al. Service level agreement and provisioning in optical networks[J]. IEEE Commun Mag, 2004, 42(1): 36~43.
- [2] J Zhang, et al. A new provisioning framework to provide availability-guaranteed service in WDM mesh networks[A]. IEEE ICC[C]. New York, 2003. 1484~1488.
- [3] J Zhang, K Zhu, B Mukherjee. Service provisioning to provide per connection based availability guarantee in WDM mesh networks[A]. Optical Fiber Communication Conference[C]. Washington, DC. 2003. 622~624.
- [4] S Ramamurthy, L Sahasrabudde, B Mukherjee. Survivable WDM mesh networks[J]. J. Lightwave Technol., 2003, 21(4): 870~883.
- [5] R He, H Wen, L Li, et al. Shared sub path protection algorithm in traffic grooming WDM mesh networks[J]. Photonic Network Commun.,

- 2004, 8(3): 239–249.
- [6] Y Xiong, D Xu, C Qiao. Achieving fast and bandwidth efficient shared path protection[J]. IEEE J. Lightwave Techn., 2003, 21(2): 365–371.
- [7] C V Saradhi, M Gurusamy, L Zhou. Differentiated QoS for survivable WDM optical networks[J]. IEEE Opt. Commun., 2004, 42(5): 42–48.
- [8] P Pongpailool, H Kim. Novel algorithms for dynamic connection provisioning with guaranteed service level agreements in IP² over optical networks[A]. IEEE Global Telecommunications[C]. New York, 2003. 2643–2648.
- [9] Y Huang, et al. Availability guaranteed service provisioning with shared path protection in optical WDM networks[A]. OFC 2004[C]. 2004. MF95.
- [10] Y Huang, et al. A new link-state availability model for reliable protection in optical WDM networks[A]. IEEE ICC 2004[C]. 2004. 1649–1653.
- [11] C Ou, B Mukherjee. Differentiated quality of protection provisioning in optical/MPLS networks[A]. Proceedings of the third IFIP TC6 Networking Conference[C]. 3042, 2004. 650–661.

- [12] J Yen. Finding the K shortest loopless paths in a network[J]. Management Science, 1971, 17(11): 712–716.

作者简介:



何荣希 男, 1971 年 6 月出生于四川南充, 博士, 博士后, 教授. 目前主要研究方向为: 光网络的路由算法、生存性问题以及 QoS 路由等. E-mail: hrx@newmail.dlmu.edu.cn



温海波 男, 1976 年 1 月出生于四川达州, 博士. 目前主要研究方向为: 光互联网的约束路由算法和 IP v6 等.