

文章编号: 0258-7025(2007)12-1648-07

# 多域光网络中一种支持区分可靠性的 通路保护算法

项鹏, 王荣

(解放军理工大学通信工程学院电信工程系, 江苏 南京 210007)

**摘要** 区分可靠性的通路保护方案既能为光网络中具有不同可靠性需求的业务提供有效的故障保护, 又能优化网络资源的利用, 是一种高效的生存性机制。但目前此类问题的研究主要是集中于传统的单域光网络中, 所得的研究成果无法直接运用于具有多域特点的下一代光网络中。针对这一问题, 在对以往通路保护算法进行改进的基础上提出了一种适用于多域光网络中的支持区分可靠性的通路保护算法, 并对其性能进行了计算机仿真研究。仿真结果表明, 该算法不仅能满足多域光网络中不同业务的可靠性需求, 而且能提高网络资源的利用率、降低业务连接的阻塞率。

**关键词** 光通信; 多域光网络; 区分可靠性; 通路保护算法

**中图分类号** TN 929.11      **文献标识码** A

## A Path Protection Algorithm with Differentiated Reliability in Multi-Domain Optical Networks

XIANG Peng, WANG Rong

(Department of Telecommunications Engineering, Institute of Communications Engineering,  
PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract** Path protection with differentiated reliability is a very promising survivable scheme in optical networks. It can meet the requirement of network traffics with different reliability demand in a resource efficient manner. This issue has been researched mainly in single-domain optical networks, however, its achievement can not be applied to next generation optical network directly, which is accepted to be a multi-domain optical network. Therefore a path protection algorithm with differentiated reliability in multi-domain optical networks is proposed in this paper. And its performance is evaluated through simulation, which verifies that the algorithm can not only meet the reliability demand of different traffics in multi-domain optical networks, but also improve the network resource efficiency and reduce the traffic blocking probability.

**Key words** optical communication; multi-domain optical networks; differentiated reliability; path protection algorithm

### 1 引言

随着光网络规模的不断扩大和网络管理复杂度的增加<sup>[1]</sup>, 以自动交换光网络(ASON)为代表的下一代光网络将被划分为多个路由域(子网)采取分布式网络管理<sup>[2]</sup>。在这样一个多域的光网络中, 如何为业务提供可靠的光路连接是网络运营中的一个关

键问题。通路保护机制<sup>[3]</sup>是确保连接可靠性的一个有效方案, 它通过为网络的每一个业务连接请求同时建立两条链路分离的光通路, 分别作为工作通路和备用通路, 从而可以在网络单链路故障条件下对业务进行有效的故障恢复。同时, 随着用户需求的不断变化, 实际光网络中不同类型的业务对于光路连接的可靠性需求出现明显差异(比如电子商务业

收稿日期: 2007-04-02; 收到修改稿日期: 2007-07-09

作者简介: 项鹏(1980—), 男, 陕西人, 助教, 博士研究生, 主要从事下一代光网络的生存性技术方面的研究。

E-mail: sunshinetim@126.com

导师简介: 王荣(1962—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: wr-njice@vip.sina.com

务就比普通的互联网业务有更高的可靠性需求),而且为获得不同可靠性的服务,用户所需支付的费用也不尽相同。因此,为业务提供可靠性光路连接的一种更为合理的方案是引入区分可靠性的通路保护<sup>[4]</sup>。

合理的通路保护算法是实现区分可靠性通路保护方案的一个核心问题,它主要负责为光路的建立计算路由和分配波长,同时尽量优化网络资源的利用率。目前这种支持区分可靠性的通路保护算法在传统的单域光网络中已得到了广泛的研究,但在多域光网络中相关的文献还很少见。文献[5,6]虽然研究了多域光网络中的通路保护算法,但都没有考虑多域光网络中区分可靠性的问题。为此,本文依据不同的可靠性需求对网络业务进行了区分,并结合多域光网络的分布式特点和使用不同通路保护策略来满足不同业务可靠性需求的思想,提出了一种适用于多域光网络中的支持区分可靠性的通路保护算法。

## 2 相关问题的分析

### 2.1 多域光网络中的动态路由计算

在分布式的多域光网络中,由于每个路由域(子网)内的节点只掌握了本子网内部的拓扑和资源信息,无法为路由的计算做出全局优化的决策,因此需要对子网内部的相关信息信息进行抽象并在各路由域之间交换。多域光网络可以认为是由多个子网通过子网边界节点互连构成的<sup>[6]</sup>,这些子网边界节点不仅掌握着它所在子网的资源和拓扑信息,还掌握着各子网的抽象信息<sup>[7]</sup>。当一个连接需要跨越多个子网时,路由的计算可分为两个阶段进行:首先连接的源点向它所在的路由域(称为源域)内距它最近的一个边界节点发送请求,由该边界节点依据它所掌握的子网抽象信息计算一条到达目的节点所在路由域(称为目的域)的松路由(Loose Route)。该路由指明了这条跨域路由需要经过的各子网的边界节点。然后在松路由所经过的每个路由域内,由该区域的入口边界节点(Ingress Border)完成本区域内的明晰路由(Explicit Route)计算,明晰路由指明了这条跨域路由在子网内所需经过的所有节点。文献[7]详细地描述了这种两阶段分层路由(Two-layer Hierarchical Routing)模型,并介绍了用于子网信息抽象的全网格拓扑抽象的方法(Full-Mesh Abstraction)。经过子网信息抽象的光网络拓扑可

以分为高、低两层:高层拓扑包含了各子网边界节点和连接各子网边界节点的域间链路的信息,这些信息存放在网络边界节点中用于松路由的计算;低层拓扑包含着子网内部的信息,一个子网的低层拓扑信息仅由该子网中的节点维护。当需要为连接请求计算路由时,首先依据高层拓扑进行松路由的计算,然后再依据各子网的低层拓扑完成明晰路由的计算。

### 2.2 通路保护算法

光网络中的通路保护机制可以分为两大类:专用通路保护(DPP)和共享通路保护(SPP)。一般而言,专用通路保护具有较强的故障保护能力,且故障恢复速度快,不足之处是网络资源利用率较低;而共享通路保护具有较高的网络资源利用率,但其故障保护能力和故障恢复速度都不及专用通路保护<sup>[8]</sup>。由于实际光网络中不同的业务往往具有不同的可靠性需求,因此可以综合运用这两种保护机制为不同可靠性需求的业务提供不同等级的保护。文献[9]详细介绍了当假设网络节点具有完全波长变换能力时,专用通路保护算法和共享通路保护算法的具体实现步骤。由于网络不受波长连续性条件的限制,共享通路保护算法可以在计算备用通路的过程中极大地共享预留资源。但在实际的光网络中,无法确保所有节点都具有波长转换能力(波长转换器的成本太高),因此仍有必要考虑波长连续性限制。这里在文献[9]的基础上进行修正,得到波长连续性限制下的专用通路保护和共享通路保护算法。这时的通路算法在完成主、备路由计算后,还需要为其查找和分配连续可用的波长。对于不同的通路保护机制,备用通路波长的查找、分配以及在连接拆除过程中波长的释放都有所不同,分别描述如下(假设工作通路和备用通路的路由计算已完成):

#### 1) 对于专用通路保护机制中的备用通路

**波长查找:**将所有波长编号,然后按顺序依次查看是否有一个波长在选定通路所经过的所有链路上都是空闲的。如果是,则将该波长作为备用通路的可用波长(First-Fit);否则如果遍历了整个波长集都没有找到可用波长,则该备用通路没有可用波长。

**波长资源的分配:**沿通路在其所经的各条链路上,将选定波长状态设为占用。

**波长资源的释放:**沿通路将其所经各条链路上相应的波长状态改为空闲。

#### 2) 对于共享通路保护策略的备用通路

**波长查找:**将所有波长编号,然后按顺序依次查

看是否有一个波长在选定通路所经过的所有链路上都是空闲的或是预留的。如果满足两者之一,则将该波长作为备用通路的可用波长;否则如果遍历了链路波长集都没有找到可用波长,则该备用通路没有可用波长。

波长资源分配:沿通路在其所经的各条链路上,将选定的波长状态设为预留。如果该波长在通路所经的某条链路上已被预留过,则预留次数加一。

波长资源的释放:沿通路将其所经各条链路上相应波长的预留次数记录减一,如果预留次数已达零,将其状态改为空闲。

此外,对于连接的工作通路无论采用专用通路保护还是共享通路保护算法,其波长资源的查找、分配与释放都与 1) 的描述相同(网络的波长资源共有空闲、占用和预留三种状态)。

以上两种通路保护机制都要求为业务请求建立两条链路分离的工作通路和备用通路,这相当于在网络单链路故障条件下为业务提供 100% 的保护。而在实际光网络中,某些级别较低的业务并不需要 100% 的故障保护,而且不同类型的业务对于故障恢复时间的要求也不同(比如,电子邮件业务对于故障保护的要求在可靠性和恢复速度两方面都不如语音业务严格)。因此网络并不一定要为每个连接请求建立备用通路,这样可以释放出部分网络资源来接纳新的连接请求,从而降低业务阻塞率。而且不同级别的业务也可以选用专用通路保护和共享通路保护两种保护方式来满足各自的需求。

### 2.3 网络模型

取文献[10]中的多域光网络模型如图 1(a)所示。该网络由四个 10 节点的网状子网组成,各子网通过子网边界节点(图中黑色点)和网间链路相连。图 1(b)是根据文献[7]中全网络拓扑抽象方法得到的高层网络拓扑。该拓扑包含子网边界节点和网间链路的信息,同一子网内的多个边界节点由虚拟链路(Virtual Link)相连,表示其可达性。参照文献[5]的假设,在网络规划阶段已经充分考虑了网间链路的可靠性(已提供 1+1 的保护),算法仅需要为业务连接在各子网内的部分提供保护。同时跨域连接的工作通路和备用通路需满足这样两个条件:一是两通路在进入(离开)一个子网时通过相同的子网边界节点;二是工作通路和备用通路在某个网内的部分只占用该子网的资源。此外,假设子网边界节点具有完全波长转换功能,各子网的链路波长数都为  $W$ 。

在路由计算的第一阶段中,为了确保连接经过

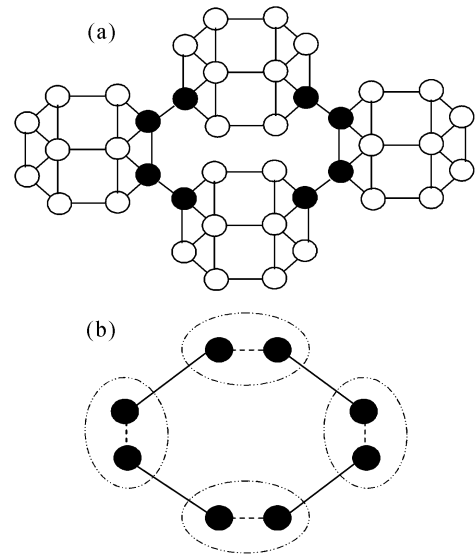


图 1 多域光网络拓扑

Fig. 1 A multi-domain network

最少的路由域(以减少光路建立的延时和提高网络资源利用率)可假设域间链路和子网内虚拟链路的代价为 1,并使用 Dijkstra 算法计算松路由。松路由的起点选择源域内距离源点最近的一个边界节点,终点选择高层拓扑中距离起点最近的一个目的域边界节点。在第二阶段各子网内的路由计算中,使用的链路代价函数为

$$C_l = \begin{cases} +\infty & f_l = 0 \\ -\log(\delta l) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\delta l$  表示链路  $l$  的可靠性概率,  $f_l$  表示链路  $l$  上的空闲波长数 ( $0 \leq f_l \leq W$ )。假设各链路的可靠性相互独立,则一条工作通路的可靠性概率为

$$\delta WP = \prod_{l \in WP} \delta l. \quad (2)$$

当使用 Dijkstra 算法按照(1)式所定义的链路代价进行最短通路计算时,实际得到的就是当前网络中具有最大可靠性概率的通路<sup>[11]</sup>。

算法得到工作通路之后,需要用(2)式来评估该工作通路的可靠性概率  $\delta WP$ ,并将其与业务要求的可靠性概率  $\delta R$  做比较:如果  $\delta WP \geq \delta R$ ,则无需为业务连接请求计算备用通路,否则还需为其计算备用通路。在备用通路计算之前,要根据所使用的是专用通路保护算法或是共享通路保护算法,分别按照(3)式或(4)式调整链路代价

$$C_l = \begin{cases} +\infty & (f_l = 0) \cup (l \in WP) \\ -\log(\delta l) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_l = \begin{cases} +\infty & (l \in WP) \cup (f_l + S_l = 0) \\ -\log(\delta l) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

(4) 式中的  $S_l$  表示链路  $l$  上已经预留的波长数 ( $0 \leq S_l \leq W$ ), 显然  $f_l + S_l = 0$  等价于  $f_l$  和  $S_l$  同时为零。文章假设各网间链路具有足够的可靠性, 因此在评估  $\delta WP$  时这些链路的代价视为 1, 并假设这些域间链路具有足够的波长资源。

### 3 区分可靠性的通路保护算法

多域光网络中的任一节点可用一个二维坐标表示: (Subnet\_id, Node\_id), 其中 Subnet\_id 和 Node\_id 分别表示节点所在子网的子网标号和子网内的标号。假设光网络中的业务按照可靠性需求的不同分为两类: 一类是高级业务, 该类业务要求连接的可靠性概率至少达到  $\delta R = 99\%$ , 并要求使用专用通路保护机制; 另一类是普通业务, 它对于连接可靠性的要求低于高级业务, 假设其可靠性需求下限为  $\delta R = 96\%$ , 并使用共享通路保护机制。动态到达的连接建立请求可表示为:  $R(s, d, C)$ , 其中  $s$  和  $d$  分别表示连接请求的源、宿节点,  $C$  表示业务的可靠性等级。  $C$  有 0 和 1 两种取值, 分别表示高级业务和普通业务。结合相关问题的分析和给出的网络模型, 所提算法的具体步骤可描述如下:

Step 1: 等待业务请求。如果到达的是连接建立请求, 转 Step 2; 如果到达的是连接拆除请求, 转 Step 9。

Step 2: 读取连接请求源、宿节点的子网编号, 并判断: 如果  $s, d$  在同一个网内, 转 Step 3; 否则转 Step 6。

Step 3: 为连接请求计算工作通路。在对应的子网内先按(1)式修改链路代价, 然后调用 Dijkstra 算法计算工作通路。再按照 1) 为其查找可用波长。若找到可用波长, 则继续执行 Step 4; 否则阻塞连接请求, 返回 Step 1。

Step 4: 判断是否需要为连接请求建立备用通路。如果  $\delta WP \geq \delta R$  (不需备用通路), 按照 1) 为工作通路分配可用波长、刷新网络资源状态记录, 然后转 Step 1; 否则继续执行 Step 5。

Step 5: 根据  $C$  的取值, 为不同可靠性等级的连接建立备用通路。若  $C = 0$  (高级业务) 执行 A1, 否则 ( $C = 1$ , 普通业务) 执行 B1。

A1: 使用专用通路保护算法建立备用通路。在对应的子网内先按(3)式修改链路代价, 然后调用 Dijkstra 算法计算备用通路。再按照 1) 为其查找可用波长。若找到可用波长, 按照 1) 为两通路分配可

用波长, 刷新网络资源状态记录, 转 Step 1; 否则阻塞连接请求, 返回 Step 1。

B1: 使用共享通路保护算法建立备用通路。在对应的子网内先按(4)式修改链路代价, 然后调用 Dijkstra 算法计算备用通路。再按照 2) 为其查找可用的波长资源。若找到可用波长, 分别按照 1) 和 2) 为工作通路和备用通路分配可用波长, 刷新网络资源状态记录, 转 Step 1; 否则阻塞连接请求, 返回 Step 1。

Step 6: 根据  $s, d$  的子网编号, 先在高层网络拓扑上确定松路由 (即连接所需要经过的所有子网边界节点), 然后从  $s$  点开始依次在路由所经过的各子网内分别先按(1)式修改链路代价再调用 Dijkstra 算法计算各段明晰路由。如果成功得到各段路由, 分别在相应的各子网内按照 1) 为各段路由查找可用波长。若各段路由都有可用波长 (波长可以不同), 将其作为连接的工作通路继续执行 Step 7, 否则阻塞连接请求, 返回 Step 1。

Step 7: 判断是否需要为连接建立备用通路。如果  $\delta WP \geq \delta R$  (不需备用通路), 分别在相应各子网内按照 1) 逐段为工作通路分配可用波长, 刷新相应各子网的网络资源状态记录, 转 Step 1; 否则继续执行 Step 8。

Step 8: 根据  $C$  的取值, 为不同可靠性等级的连接请求建立备用通路。若  $C = 0$  (高级业务) 执行 A2, 否则 ( $C = 1$ , 普通业务) 执行 B2。

A2: 使用专用通路保护算法建立备用通路。采用 Step 6 中得到的松路由, 从  $s$  点开始依次在路由所经过的各子网内分别先按(3)式修改相应各子网的链路代价, 再调用 Dijkstra 算法计算备用通路。然后分别在相应的各子网内按照 1) 为各段路由查找可用的波长。若各段路由都有可用波长 (可以不同), 分别在相应各子网内按照 1) 为两通路分配可用波长, 刷新相应各子网的网络资源状态记录, 转 Step 1; 否则阻塞连接请求, 返回 Step 1。

B2: 使用共享通路保护算法建立备用通路。采用 Step 6 中得到的松路由, 从  $s$  点开始依次在路由所经过的各子网内分别先按(4)式修改相应各子网的链路代价, 再调用 Dijkstra 算法计算备用通路。然后分别在相应的各子网内按照 2) 为各段路由查找可用波长。若各段路由都有可用波长 (可以不同), 在相应各子网内分别按照 1) 和 2) 为工作通路和备用通路分配可用波长, 刷新网络资源状态记录, 转 Step 1; 否则阻塞连接请求, 返回 Step 1。

Step 9: 释放连接所占资源。根据连接的级别  $C$  及其所占资源的记录, 分情况释放网络资源:

i) 如果  $C = 0$ , 在连接所经的子网(一个或多个)内按照 1) 释放连接工作通路所占资源, 再查看连接是否建立了备用通路: 若有备用通路, 按照 1) 释放备用通路所占资源然后转 Step 1; 否则直接转 Step 1;

ii) 如果  $C = 1$ , 在连接所经的子网(一个或多个)内按照 1) 释放连接工作通路所占资源, 再查看连接是否建立了备用通路: 若有备用通路, 按照 2) 释放备用通路所占资源然后转 Step 1; 否则直接转 Step 1。

#### 4 算法的仿真分析

仿真采用了图 1 中的多域光网络拓扑, 并假设: 网络链路的波长数为  $W = 16$ , 各链路的可靠性概率在  $0.96 \sim 0.99$  之间随机分布。仿真考虑了两种不同的业务模型: 递增业务和动态业务。对于递增业务, 连接一旦建立就一直持续下去; 对于动态业务, 所建连接持续一段时间后被拆除, 设连接持续时间服从均值为  $1/\mu$  的负指数分布。对于以上两种业务, 所有连接建立请求都按照参数为  $\lambda$  的泊松 (Poisson) 分布独立地到达网络各节点, 连接请求源、宿节点的子网标号及网内标号都在各自的取值范围内随机选取。算法按照每个连接请求  $R(s, d, C)$  的可靠性需求建立连接, 如果连接没有建立成功则连接阻塞, 不存在排队。

仿真首先在动态业务下分析了算法的阻塞率性能 (Blocking probability), 并将其与未区分可靠性、仅使用单一的共享通路保护或专用通路保护保护算法时的业务阻塞率进行了比较, 结果如图 2 所示 (三种算法在图中分别表示为 Dif-PP, SPP 和 DPP, 下同)。其中, 所提算法的业务阻塞率包含了两种级别的业务, 而专用通路保护 (或共享通路保护) 保护算法同等地对待所有连接请求, 都提供 100% 的保护。

由图 2 可以看出, 所有算法的阻塞率都随着网络负载 (定义为  $\lambda/\mu$  Erlang) 的增大而增大, 但在同等条件下所提算法的阻塞率明显低于未区分可靠性的专用通路保护和共享通路保护算法。这是因为所提算法按照业务的可靠性需求为其建立光通路连接, 对于只建一条工作通路就可以满足业务可靠性需求的情况没有分配备用通路, 从而节省了网络资源的消耗、降低了业务阻塞率。从图中还可以看到,

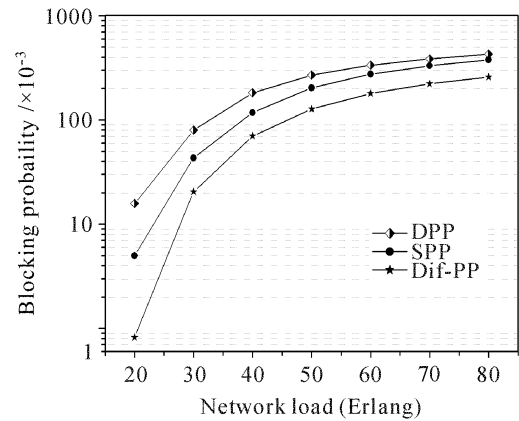


图 2 连接阻塞率分析

Fig. 2 Blocking probability analysis

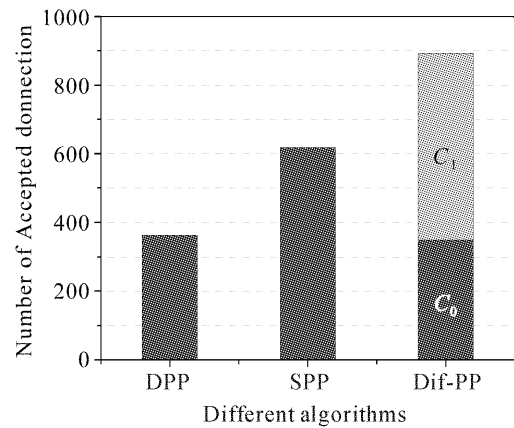


图 3 网络接纳的连接请求数

Fig. 3 Number of accepted connections

在未区分业务可靠性需求的条件下共享通路保护算法比专用通路保护算法的业务阻塞率低, 这是因为共享通路保护算法比专用通路保护算法更节省网络资源<sup>[9]</sup>。

仿真又在递增业务下研究了当业务连接请求总数一定时, 所提算法能够成功接纳的连接请求总数 (Number of Accepted Connection), 并将其与同等条件下未区分业务可靠性的专用通路保护算法和共享通路保护算法进行了比较。仿真对于这三种情况分别产生了 1000 次的连接请求 (随机选取连接的源、宿点), 所得结果如图 3 所示 ( $C_0$  和  $C_1$  分别表示高级业务和普通业务)。从图 3 可以看出, 所提算法成功接纳的连接请求总数 (包括两种业务) 明显多于专用通路保护和共享通路保护两种算法。这说明所提算法具有更高的网络资源利用率。从图中还可以看到, 使用所提算法时, 网络对于普通业务接纳的次数 ( $C_1 = 544$  次) 略多于高级业务的次数 ( $C_0 = 345$  次)。这是因为算法为高级业务提供专用通路保护

所需消耗的网络资源较多;而普通业务使用共享通路保护,允许共享备用通路上的预留资源,因此在网络资源一定时成功建立连接的可能性更大。

最后仿真还从平均保护切换时间(MPST)和连接的可靠性概率(CRP)两方面分析了所提算法的性能,结果分别如图 4 和图 5 所示。其中平均保护切换时间是根据文献[3]中估算专用通路保护和共享通路保护切换时间的公式,分别计算出每次算法为高级业务和普通业务建立连接的保护切换时间,然后再分别按照各种业务的总数取平均值得到的。而连接的可靠性概率是算法为每个业务请求所建连接的实际可靠性概率。当算法仅为连接请求建立了一条工作通路时,连接的可靠性概率由(2)式计算;当算法同时为业务请求建立了工作通路和备用通路时,相当于为业务提供了 100%的保护(单链路故障下),故认为连接的可靠性概率为 100%。

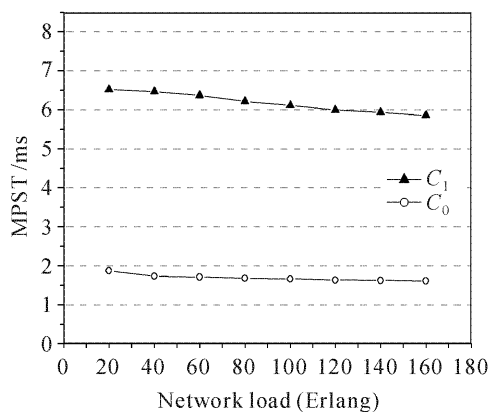


图 4 不同业务的平均保护切换时间分析  
Fig. 4 Mean protection switch time (MPST) of different traffics

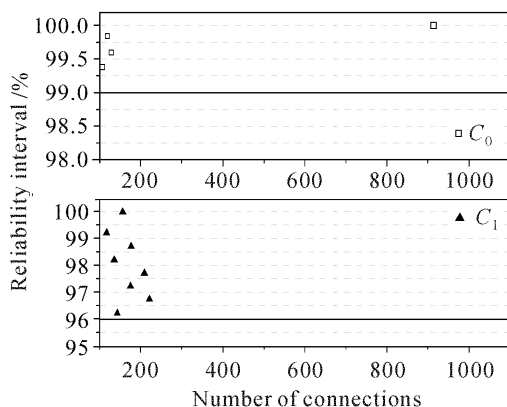


图 5 不同业务连接的可靠性分析  
Fig. 5 Reliability of different connections

由图 4 可以看出,无论网络负载怎样变化,高级业务的平均保护切换时间总小于普通业务。这是因为在业务连接具有相同工作通路和备用通路跳数的

情况下,高级业务所使用的专用通路保护比起普通业务使用的共享通路保护有更短的保护切换时间<sup>[3]</sup>。由于在保护切换过程中不可避免地会丢失正在传输的业务,所以切换时间越短就意味着在网络发生故障时业务的损失越小,相应地,业务得到服务的可靠性水平越高。从图 4 中还可以看到,随着网络负载的加重,各业务的平均保护切换时间略有降低,这一点对于高级业务(C<sub>1</sub>)表现得更为明显。这是因为随着负载的加重,光网络的资源相对不足,这时较长的光路连接被拒绝的可能性更大(因为较长的光路要占用更多的网络资源),因此网络连接工作通路和备用通路的平均跳数会减小。根据文献[3]中的公式可知,保护切换时间随着工作通路和备用通路跳数的减小而减少。同时,由于共享通路保护机制允许资源共享,所以在网络负载不断增加的情况下算法为普通业务请求所建光路的平均跳数减小得没有高级业务那样明显,因此平均保护切换时间的减少也就不那么明显。

图 5 将连接的可靠性概率划分为不同的可靠性区间(Reliability interval),分别统计了算法为两种业务建立的连接落入不同可靠性区间的次数。所得结果是在动态业务产生的 10<sup>6</sup> 次连接请求中,从第 10<sup>4</sup> 个连接请求开始分别提取了算法为高级业务和普通业务成功建立的连接各 1000 个(前 10<sup>4</sup> 次连接请求视为对系统的预热,确保其到达稳态),然后经过连接的可靠性概率计算和统计得到的。从图 5 可以看到,算法为不同级别业务所建的连接都满足业务各自的可靠性需求(C<sub>0</sub> 为 99%, C<sub>1</sub> 为 96%)。其中对于高级业务,绝大多数的连接(921 次)可靠性都到达了 100%(即为业务建立了备用通路);而对于普通业务,连接请求分布于 96% 以上的各个可靠区间。这是因为普通业务的可靠性要求较低,所以往往只需为其建立一条工作通路便可满足要求,而高级业务的可靠性要求很高,所以往往需要同时为连接请求建立工作通路和备用通路才能满足其可靠性需求,这相当于为业务提供了 100% 的保护。

## 5 结 论

充分考虑了多域光网络分布式的特点,并结合了区分业务可靠性和综合运用两种通路保护机制的思想,提出了一种可用于多域光网络中的支持区分可靠性的通路保护算法。仿真研究的结果表明,该算法能在满足不同业务可靠性需求的前提下,进一

步优化网络资源的利用率、降低业务的阻塞率,对于下一代光网络的优化设计具有一定的参考价值。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Chunyong, Liu Deming, Li Wei *et al.*. Blocking probability analysis of wavelength division multiplexing wavelength routing nodes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):544~548  
杨春勇,刘德明,李蔚等. 波分复用波长路由节点的阻塞特性分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):544~548
- 2 Zhang Jie, Xu Yunbin, Gu Wanyi *et al.*. Automatic Switched Optical Network [M]. Beijing: Post and Telecommunications Press, 2004. 258~263  
张杰,徐云斌,顾晔仪等. 自动交换光网络 ASON[M]. 北京:人民邮电出版社, 2004. 258~263
- 3 S. Ramamurthy, L. Sahasrabudde, B. Mukherjee. Survivable WDM mesh networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(4):870~883
- 4 A. Fumagalli, M. Tacca. Differentiated reliability (DiR) in wavelength division multiplexing rings [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, **14**(1):159~168
- 5 C. Ou, H. Zang, N. K. Singhal *et al.*. Subpath protection for scalability and fast recovery in optical WDM mesh networks [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2004, **22**(9):1859~1874
- 6 D. L. Truong, B. Thiongane. Dynamic routing for shared path protection in multinomial optical mesh networks [J]. *J. Optical Networking*, 2006, **5**(1):58~74
- 7 Q. Liu, M. A. Kok, N. Ghani. Hierarchical interdomain routing and light-path provisioning in optical networks [J]. *J. Optical Networking*, 2006, **5**(10):764~774
- 8 Zhu Guolong, Zeng Qingji, Xu Tian *et al.*. Dynamic protected lightpath provisioning in mesh WDM networks [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(3):143~145
- 9 Deng Qihong, Yu Hongfang, Wang Sheng. Survivability of WDM optical network and performance of different protection algorithms [J]. *Journal of UEST of China*, 2004, **33**(6):746~750  
邓秋红,虞红芳,王晟. WDM光网络生存性策略及仿真[J]. *电子科技大学学报*, 2004, **33**(6):746~750
- 10 T. Saad, H. T. Mouftah. End-to-end interdomain routing and signaling for wavelength routed WDM optical networks [C]. Proceedings of NFOEC(05), Anaheim, California, 2005. 37~42
- 11 J. Zhang, K. Zhu, H. Zang *et al.*. A new provisioning framework to provide availability-guaranteed service in WDM mesh networks [C]. Proceedings of IEEE ICC (03), Washington, DC, 2003. 1484~1488