

带有负载均衡机制的网状 WDM 网络抗毁策略研究

王汝言, 吴大鹏, 黄胜

(重庆邮电大学 重庆市高校光纤通信技术重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 研究了带有负载均衡机制的抗毁网状 WDM 网络, 旨在保证网络具有抗毁能力的同时尽量减少全网光域所使用的资源, 即在选择工作路径和保护路径时尽量保证全网的负载均衡。以波长数量最小化为优化目标, 建立规划模型分别对多纤网状 WDM 网络中的共享路径保护和共享链路保护策略进行了研究, 同时辅以负载均衡机制对网络资源利用率进一步优化。仿真结果表明, 该结构在保证网络抗毁性的同时, 能够有效地减少全网总体所需的波长数, 降低网络成本。

关键词: 通信网络技术; 波分复用光网络; 整数线性规划; 抗毁策略; 负载均衡

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)03-0001-09

Research on survivable mesh WDM optical networks using load-balancing mechanism

WANG Ru-yan, WU Da-peng, HUANG Sheng

(The Key Lab of Optical Fiber Communication, Chongqing Univ. of Post and Telecom., Chongqing 400065, China)

Abstract: To meet the constraint on the survivability, the cost efficient survivable mechanism was proposed. Based on the load-balancing scheme, the wavelength contention could be mitigated for the selection on working path and backup path. The ILP model was established to achieve the object of minimizing the total needed wavelength number, and two types of protection strategies, shared-path protection and shared-link protection, were discussed; moreover, the sub object of minimizing the load imbalance was used to keep the network resources utilized reasonably. The results show that the survivability can be guaranteed; at the same time, overall wavelength number requirement can be reduced.

Key words: communications network; WDM optical network; integer linear programming; survivable mechanism; load balance

1 引言

近年来, 随着数据业务需求的不断增加, 波分复用(WDM, wavelength division multiplexing)技术已经被广泛应用于光网络中。目前单纤可以支持太比特每秒业务速率, 任何链路或者节点的失效将导致巨大损失。据美国 FCC 报告显示, 每两天就有一次影响 30 000 名客户的网络故障发生, 而故障修复

的平均时间是 5~10h。此外, 若传输容量达太比特每秒的单根光纤失效, 将影响 1 200 万对以上的电话业务^[1,2]。因此, WDM 网络的抗毁性问题已成为光网络研究的热点。

目前, 国内外研究人员所提出的各种抗毁机制可以分成保护和恢复 2 种机制^[3~7]。保护机制为每条工作路径准备一条备用路径, 且要求 2 条路径不会在一根光纤断裂时同时失效; 恢复机制则在网络

收稿日期: 2009-12-03; 修回日期: 2010-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60972069)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (60972069)

中某条路径失效时, 根据网络状态实时地重新构造一条路径, 这种方法实现较为复杂, 同时也需要网络有一定的冗余容量。

更进一步地, 保护机制可以划分为基于路径的保护方案以及基于链路的保护方案。对于基于路径的保护方案来说, 每条路径在建立时就已经预先找到了一条端到端的备用路径, 并且在备用路径上预留了相应的波长资源。对于基于链路的保护方案来说, 在网络设计阶段, 针对工作路径上的每条链路准备一条避开该链路的备用路径, 并且预留相应的波长。当工作链路失效时, 所有经过它的工作路径直接在此链路附近寻找备用路径和备用波长, 从而可以绕过失效部分且无需源节点和目的节点参与, 同时工作路径上未失效的部分保持原状。

从保护机制的实现过程来看, 链路保护的主要优点是链路失效时的重路由只限于局部范围内, 而无须通知路径的源、目的节点。在网络规模较大时, 业务恢复的速度比路径保护更快。但是, 在多数情况下, 采用链路保护要求网络预留更多的资源。路径保护机制采用端到端方式来预留备用路径和波长, 能够达到资源的全局优化配置, 从而减少了冗余资源的预留, 提高网络资源的利用率, 此外, 保护路径和工作路径是完全链路分离的, 因此, 当工作路径失效时, 路径保护机制无需对失效位置精确定位。

近年来, 国内外研究人员针对 WDM 网络生存性展开了相关研究, 并取得了一定成果。文献[8]中采用跨层设计的思想解决波长和路由分配问题, 改善了网络中链路失效情况下的生存性; 基于 P 圈的思想, 文献[9]中采用协同的方式, 动态地建立保护路径, 使得当前故障链路下游的预留资源能够得到充分利用; 对于波带层, 文献[10]中提出了一种层次性 WDM 网络的专有保护方法, 其使用多个波带路径组成环链, 实现了工作路径和保护路径上节点以及链路的分离, 提高了保护效率。

在文献[11]基础上, 本文针对网状 WDM 网络的抗毁性进行了深入研究。首先, 以全网使用的波长总数最少为优化目标, 建立整数线性规划模型对多纤网状 WDM 网络进行抗毁设计, 并分别提出了基于共享路径保护和共享链路保护的 2 种保护策略。然后, 以提高网络资源利用率为目标, 将负载均衡作为次优化目标对网络性能进行联合优化。最后, 以典型的 NSFNET 网络拓扑为例, 比较了 2 种保护策略的性能, 并对不同保护策略的特点和波长

变换对目标函数值的影响进行了深入分析。

2 带有负载均衡的抗毁策略设计

本文使用预设保护路径的方式为网状 WDM 网络提供抗毁能力, 即工作路径一旦失效, 它所承载的业务全部切换到保护路径上, 此外, 本文采用完全恢复的共享保护机制, 即工作路径与对应的保护路径之间并不经过相同的链路。

全光交换网络中, 需要保证端到端路径上所有链路使用的波长相同, 即波长一致性约束, 虽然波长变换器可以解决上述问题, 但是其价格昂贵, 极大地增加了网络建设成本^[12], 因此, 在本文设计抗毁策略的过程中, 充分地考虑了波长一致性约束对网络的影响程度, 分别设计了全波长变换和无波长变换 2 种情况下的抗毁策略。此外, 在基于链路保护机制设计抗毁网络时, 节点采用迂回路由的方式对故障链路 ij 进行保护, 因此 ij' 所描述的并非是一条链路, 而是一条连接故障链路邻居节点 i 和 j 的、且独立于链路 ij 的最短路径。

本文中所使用的定义如表 1 所示。

符号	意义
ij	表示节点 i 和节点 j 之间的链路
ij'	表示链路 ij 的保护路径
s', d'	表示数据流的源节点和目的节点
sd	表示源节点和目的节点之间的工作路径
$s'd'$	表示源节点和目的节点之间的保护路径, 与工作路径相互独立
$\{sd\}$	表示同时受路径 $s'd'$ 保护的工作路径集合
F_{ij}^{sd}	若从源节点到目的节点的路径经过链路 ij , 则 F_{ij}^{sd} 为 1, 否则为 0
$F_{ij}^{sd, \lambda}$	若从源节点到目的节点的路径使用波长 λ 且经过链路 ij , 则 $F_{ij}^{sd, \lambda}$ 为 1, 否则为 0
$ L $	表示网络中的链路数
F	表示网络中波长分配的不均衡程度
$ W $	表示每条链路所包含的波长数
$R_{sd}^{ij, n}$	若路径 sd 使用链路 ij 中第 n 号光纤, 则 $R_{sd}^{ij, n}$ 为 1, 否则为 0
$R_{sd}^{ij, n, \lambda}$	若路径 sd 使用链路 ij 中第 n 号光纤的波长 λ , 则 $R_{sd}^{ij, n, \lambda}$ 为 1, 否则为 0
$P_{s'd'}^{ij, n}$	若保护路径 $s'd'$ 使用链路 ij' 中第 n 号光纤, 则 $P_{s'd'}^{ij, n}$ 为 1, 否则为 0
$P_{s'd'}^{ij, n, \lambda}$	若保护路径 $s'd'$ 使用链路 ij' 中第 n 号光纤的 λ 波长, 则 $P_{s'd'}^{ij, n, \lambda}$ 为 1, 否则为 0
$\lambda_{ij', n}$	若链路 ij' 中第 n 号光纤中的波长 λ 已被用于保护路径, 则 $\lambda_{ij', n}$ 为 1, 否则为 0
$\lambda_{s'd'}$	若保护路径 $s'd'$ 使用波长 λ , 则 $\lambda_{s'd'}$ 为 1, 否则为 0

2.1 共享路径保护

本部分对基于共享路径保护的 WDM 网络抗毁策略进行了研究，其中包含节点具有全波长变换和节点无波长变换 2 种情况。对于这 2 种情况，抗毁策略设计的目标均是 minimized 波长使用数量，以降低网络成本。

在基于共享路径保护的抗毁策略中，工作路径与保护路径相互独立，因此无论节点是否具有波长变换能力，都不需要考虑工作路径和保护路径之间的波长约束问题。

此外，对于路径保护来说，当链路出现故障之后，源节点将在收到故障消息之后立即采用保护路径发送数据，这就表明当前的工作路径已经失效，因此，除故障链路之外，原工作路径上的其他链路资源都需要释放。

2.1.1 节点全波长变换的情况下(PI)

优化目标：

$$\text{Minimize: } \sum_n \sum_{i'j'} \sum_{s'd'} P_{s'd'}^{i'j',n}$$

约束条件：

$$|sd| = |s'd'| = 0,1 \quad (1)$$

$$\left(\sum_n R_{sd}^{ij,n} \right) \left(\sum_n P_{s'd'}^{i'j',n} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{sd_u, sd_v \in \{sd\} \\ 1 \leq u, v \leq M}} \left[\left(\sum_n R_{sd_u}^{ij,n} \right) \left(\sum_n R_{sd_v}^{ij,n} \right) \right] = 0 \quad (3)$$

$$\sum_n \sum_{sd} R_{sd}^{ij,n} + \sum_n \sum_{s'd'} P_{s'd'}^{ij,n} \leq |W| \times |N| \quad (4)$$

说明：

式(1)限定了所设计的保护策略为完全保护。

式(2)限定了保护路径与工作路径的独立性。

式(3)限定了受同一条路径保护的工作路径之间相互独立。

式(4)限定了一条链路中最多通过 $|W| \times |N|$ 条工作路径和保护路径，体现出了节点具有全波长变换能力。

2.1.2 节点无波长变换的情况下(PS)

与节点具有全波长变换能力的情况类似，当节点没有波长变换装置的时候，其优化目标依然为 minimized 波长使用数量，但是需要考虑波长一致性约束。

优化目标：

$$\text{Minimize: } \sum_n \sum_{\lambda} \sum_{i'j'} \sum_{s'd'} P_{s'd'}^{i'j',n,\lambda}$$

约束条件：

$$|sd| = |s'd'| = 0,1 \quad (5)$$

$$\left(\sum_n \sum_{\lambda} R_{sd}^{ij,n,\lambda} \right) \left(\sum_n \sum_{\lambda} P_{s'd'}^{i'j',n,\lambda} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{sd_u, sd_v \in \{sd\} \\ 1 \leq u, v \leq M}} \left[\left(\sum_n \sum_{\lambda} R_{sd_u}^{ij,n,\lambda} \right) \left(\sum_n \sum_{\lambda} R_{sd_v}^{ij,n,\lambda} \right) \right] = 0 \quad (7)$$

$$\sum_n \sum_{sd} R_{sd}^{ij,n,\lambda} + \sum_n \sum_{s'd'} P_{s'd'}^{ij,n,\lambda} \leq |W| \quad (1)$$

说明：

式(5)~式(7)与式(1)~式(3)的意义相同，在此不再重复，式(8)限定了一个请求在中间链路可供选择的波长数量为 $|W|$ ，体现出节点无全波长变换能力。

2.1.3 负载均衡优化

采用负载均衡策略能够有效地改善 WDM 网络中节点处的资源竞争情况^[13~17]，因此在抗毁策略的设计过程中将其作为次优化目标，可以按照式(9)表示：

优化目标：

$$\text{Minimize: } \{F\} \quad (9)$$

约束条件：

$$F = \sum_{i,j} \left\{ \left(\sum_{\lambda} \sum_{s,d} F_{ij}^{sd,\lambda} - \frac{1}{|L|} \sum_{i,j} \sum_{\lambda} \sum_{s,d} F_{ij}^{sd,\lambda} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

$$\sum_i F_{ij}^{sd,\lambda} - \sum_k F_{jk}^{sd,\lambda} = \begin{cases} -\lambda_{sd} & , s = j \text{ 时} \\ \lambda_{sd} & , d = j \text{ 时} \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$\sum_i R_{sd}^{ij,n} - \sum_k R_{sd}^{jk,n} = \begin{cases} -1 & , j = s \\ 1 & , j = d \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

$$\lambda_{sd} = 0,1 \quad (13)$$

$$\lambda_{ij} = 0,1 \quad (14)$$

$$F_{ij}^{sd} = 0,1 \quad (15)$$

$$F_{ij}^{sd,\lambda} = \lambda_{sd} F_{ij}^{sd} \quad (16)$$

$$\sum_{\lambda} F_{ij}^{sd,\lambda} = F_{ij}^{sd} \quad (17)$$

$$\sum_{s,d} F_{ij}^{sd,\lambda} = \lambda_{ij}, \quad \forall \lambda \quad (18)$$

$$\sum_{ij} F_{ij}^{sd,\lambda} \leq |L| \quad (19)$$

$$\sum_{\lambda} \sum_{s,d} F_{ij}^{sd,\lambda} \leq |W| \quad (20)$$

$$\sum_{\lambda} \sum_{j,d} F_{sj}^{sd,\lambda} \leq |W| \quad (21)$$

$$\sum_{\lambda} \sum_{l,s} F_{id}^{sd,\lambda} \leq |W| \quad (22)$$

$$\sum_{ij} F_{ij}^{sd} \leq |L| \quad (23)$$

$$\sum_{i,s} F_{sj}^{sd}, \sum_{s,d} F_{ij}^{sd}, \sum_{j,d} F_{sj}^{sd} \leq |W| \quad (24)$$

说明:

式(11)限定了一次请求时路由经过的中间节点不进行波长变换,有波长一致性要求,此限定条件适用于无波长变换情况。

式(17)限定了一条链路中分配给一个路由请求的波长最多只能有一个。

式(18)限定了一条链路中一个波长最多只能分配给一个路由请求。

式(19)限定了一次路由请求所经过的链路数最多为 $|L|$ 。

式(20)限定了一条中间链路中可用波长数最多为 $|W|$ 。

式(21)限定了节点入口处理波长数最多为 $|W|$ 。

式(22)限定了节点出口处理波长数最多为 $|W|$ 。

在节点具有波长变换能力的时候,负载均衡机制的约束条件也需要进行相应的改变,其约束条件如式(12)、式(23)和式(24)所示。

上述模型是一个非确定型多项式—完全(NP-C, nondeterministic polynomial-complete)的问题,可见,必须采用一定的方式简化上述模型的计算过程。

令 ω_{ij} 、 ω_{pq} 为链路 ij 、 pq 的已分配波长数,分别表示为 $\sum_{\lambda} \lambda_{ij}$ 和 $\sum_{\lambda} \lambda_{pq}$, 则约束条件式(10)可变为

$$F = \sum_{ij} \left(\omega_{ij} - \frac{1}{|L|} \sum_{i,j} \omega_{ij} \right)^2 \quad (25)$$

记 $|L|$ 为 n , ω_{ij} 为 $x_i (i=1,2,\dots,n)$, $\frac{1}{|L|} \sum_{i,j} \omega_{ij} = \bar{x}$,

则:

$$F' = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2 \sum_{i \neq j} x_i x_j}{n} = \frac{\sum_{i \neq j} (x_i - x_j)^2}{n} \quad (26)$$

n 是常数,舍去,所以可得:

$$F' = \sum_{i \neq j} (x_i - x_j)^2 \leq \left(\sum_{i \neq j} |x_i - x_j| \right)^2$$

即

$$F \leq \left(\sum_{ij \neq pq} |\omega_{ij} - \omega_{pq}| \right)^2$$

若令 $F_{\max} = \sum_{ij \neq pq} |\omega_{ij} - \omega_{pq}|$, 则次优化目标可以简

化为 $\text{Minimize}\{F_{\max}\}$ 。

对于带有负载均衡的抗毁 WDM 网络来说,节点收到连接请求之后,首先采用 K 路由算法计算备选路径集合,然后按照所提出的抗毁性策略计算工作路径和保护路径,负载均衡优化算法的执行频率将影响网络性能,因此本文采用基于定时器的方法对其进行限定,在链路调整过程中,节点在备选路径集合中选择负载相对均衡的路径来承载当前业务。具体操作流程如图 1 所示。

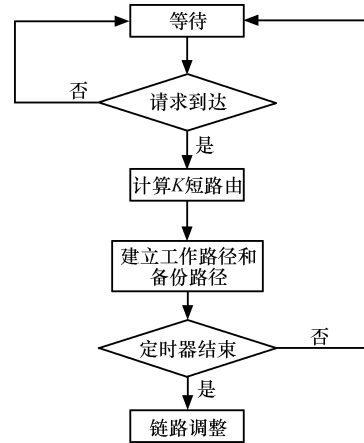


图 1 节点处理流程

2.2 共享链路保护

单链路故障情况下,在所设计的共享链路保护策略设计中,同一条保护路径所保护的工作链路间必然相互独立。

此外,对于共享路径保护方案中的资源释放问题来说,由于链路失效时,上游节点在接收到故障

信息之后只是简单地使用备用路径替代已经失效的工作链路部分，原路径中未发生故障的链路并没有受到影响，因此，链路保护方案设计过程中不存在前面提到的资源释放问题。

共享链路保护策略中的次优化目标与共享路径保护策略相同，因此，在基于共享链路保护方法中，负载均衡的解决方法与文中 2.1.3 节中的所使用方法相同，在此不再重复。

2.2.1 节点全波长变换的情况下(LI)

优化目标：

$$\text{Minimize: } \sum_n \sum_{mh} \sum_{i'j'} P_{i'j'}^{mh,n}$$

约束条件：

$$\sum_n \sum_{sd} R_{sd}^{ij,n} = |i'j'| \leq |W| \times |N| \quad (27)$$

$$\left(\sum_n R_{sd}^{ij,n} \right) \left(\sum_n P_{i'j'}^{mh,n} \right) = 0, \quad \forall ij, mh \quad (28)$$

$$\sum_{sd} \left(\sum_n R_{sd}^{mh,n} + \sum_n \sum_{ij} \sum_{i'j'} P_{i'j'}^{mh,n} \right) \leq |W| \times |N| \quad (29)$$

说明：

式(27)限定了所设计的保护策略为完全保护，也体现了与工作路径对应的保护路径为一条。

式(28)限定了保护路径与工作链路的独立性。

式(29)限定了一条链路中最多通过 $|W| \times |N|$ 条工作路径和保护路径，体现了节点具有全波长变换能力。

2.2.2 节点无波长变换的情况下(LS)

优化目标：

$$\text{Minimize: } \sum_n \sum_{\lambda} \sum_{mh} \sum_{i'j'} P_{i'j'}^{mh,n,\lambda}$$

约束条件：

$$\sum_n \sum_{sd} R_{sd}^{ij,n,\lambda} = |i'j'|_{\lambda} \leq |N| \quad (30)$$

$$\left(\sum_n \sum_{\lambda} R_{sd}^{ij,n,\lambda} \right) \left(\sum_n \sum_{\lambda} P_{i'j'}^{mh,n,\lambda} \right) = 0 \quad (31)$$

$$\sum_{sd} \left(\sum_n R_{sd}^{mh,n,\lambda} + \sum_n \sum_{ij} \sum_{i'j'} P_{i'j'}^{mh,n,\lambda} \right) \leq |N|, \quad \forall \lambda \quad (32)$$

说明：

式(30)与式(31)的意义相同，在此不再重复，式(32)限定了一条链路中最多通过 $|N|$ 条工作路径和保护路径，体现了波长一致性约束。

3 不同保护策略性能的仿真

上述机制所采用的启发式算法如图 2 所示，其中输入：网络拓扑 $G(V,E)$ ，节点个数 $|V|$ ，链路条数 $|E|$ ，源节点 S ，目的节点 D ，源节点到目的节点的离散路径条数及备份路径数： $n=3$ ；输出：具有平衡度值最小的路由路径 T 。

```

1 Create an initially empty 1*|V|matrix T /*|V|为网络拓扑节点个数*/
2 Create an initially empty 1*n matrix Temp
3 Set flag=1
4 Set Min=0
5 Create an initially empty n*|V| matrix P such that Ps,di (1<i<n) will store the
  ith edge disjoint path from S to D
6 for j from 1 to n do
7 Find the shortest S-D path in G(V,E)
8 Calculate the all wavelengths used in and expressed by All_wave
9 Calculate the mean wavelengths used in and expressed by Mean_wave
10 for j from 1 to 2 do /*2为正反向链路*/
11 for k from 1 to |E| do /*|E|为网络拓扑链路条数*/
12 Temp(i)=Temp(i)+(All_wave(j,k)-Mean_wave)^2;/*求负载均衡度值*/
13 end for;
14 end for;
15 end for;
16 Min = Temp(1)
17 for i from 1 to n do
18 if Temp(i)<Min then
19 Min=Temp(i)
20 flag=i;
21 end if;
22 end for
23 T= Ps,dflag
24 Return T
    
```

图 2 抗毁策略启发式算法

在这节中，对上述所提出的抗毁策略进行计算机仿真，所使用的网络拓扑为 NSFNET，其中包含 14 节点，21 链路，如图 3 所示。

此节包含 2 个方面内容，首先，为了验证所提出抗毁策略的低成本特性，3.1 节采用静态业务模型描述了纤内波长数量变化与保护开销之间的关系，假设网络具有完全业务恢复能力，源节点随机选择目的地址发送数据，且每条光纤内的波长分配采用 First-Fit 算法。所考察的指标包括波长总数、波长冗余度、光纤总数、光纤冗余度以及剩余容量 5 个方面，其中参数定义在后续相关部分给出。

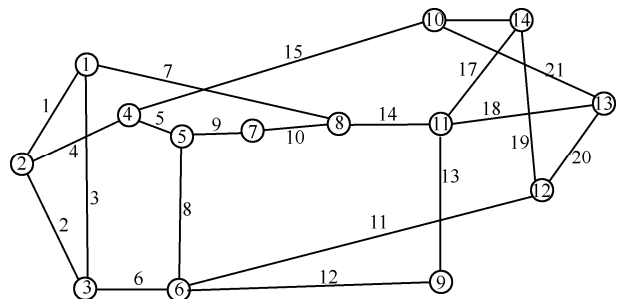


图 3 NSFNET 网络拓扑结构图

3.1 静态业务模型

3.1.1 波长总数

本文提出的抗毁策略采用了共享保护方式，即保护路径/链路选取与工作路径/链路相独立的一条最短路由；如果新加入的工作路径与先前的某条工作路径的源节点和目的节点相同且相互独立，则这 2 个工作路径共享一个保护路径。同时，对于需要完全恢复的情况，若保护路径发生阻塞，则在阻塞处加入一条新的光纤，且将其中的空闲波长分配给工作路径。

所需波长数量与纤内波长数量之间的关系如图 4 所示，其中 NPI 表示无保护、节点具有全波长变换能力情况；NPS 表示无保护、节点无全波长变换能力情况；PI 表示共享路径保护策略、节点具有全波长变换能力情况；PS 表示共享路径保护策略、节点无全波长变换能力情况；LI 表示共享链路保护策略、节点具有全波长变换能力情况；LS 表示共享链路保护策略、节点无全波长变换能力情况。

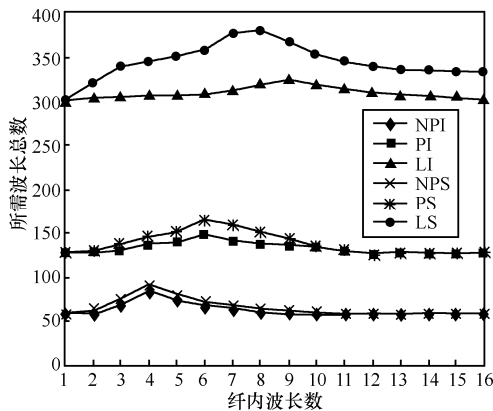


图 4 需要的波长总数与单光纤波长数

从结果中可得到下面结论：1) 基于链路保护的抗毁策略耗费光纤资源最多，以保证其更快的恢复速度；2) 各种抗毁策略在不同情况下出现极值，主要原因由于在链路内波长资源不能满足业务需求的情况下，则在此链路处增加一条光纤（W 个波长），而这又势必影响到其后均衡路径的选择；3) 无保护、路径保护、链路保护 3 种抗毁策略分别在 W=4、6、8 时所需的波长数最多，之后缓慢下降；随着纤内波长数不断增加，最终不需要增加新光纤就可完全满足工作路径和保护路径的需求，此时 6 条曲线趋于各自的最小值。

抗毁策略所需要预留的波长数量与工作波长数量之间的关系可以使用波长冗余度来描述，若令

W_{np} 为无保护情况下所需的总波长数， W_{yp} 为有保护情况下所需的总波长数，则 $R_w = (W_{yp} - W_{np}) / W_{np}$ 可以为波长冗余度。

从图 5 中可知，在单纤波长数为 4 的时候，基于路径保护和链路保护的抗毁策略的波长冗余度最低，表明对于当前网络所配置的数据流参数以及网络拓扑情况，采用波长数量为 4 的光纤对工作路径进行完全保护所需要预留的波长数量占工作波长数量的比值最小。

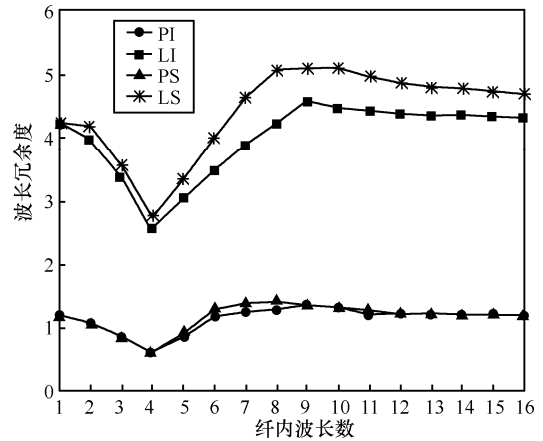


图 5 波长冗余度与单光纤波长数

3.1.2 光纤总数

4 种抗毁策略所需要的光纤总数与纤内波长数之间的关系如图 6 所示。

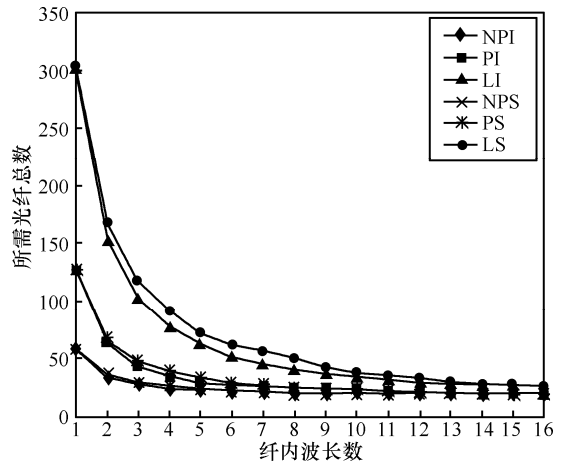


图 6 需要的光纤总数与单光纤波长数

从结果中可以得到下面结论：1) 基于链路保护的抗毁策略耗费光纤资源最多，以保证其更快的恢复速度；2) 当所需光纤数比较多时，则纤内波长数与总共所需光纤数的乘积约等于纤内波长数为 1 时的总共所需光纤数；3) 当纤内波长数为 1 时，无波

长变换和全波长变换网络所需光纤总数相等；4) 无论是否使用波长变换装置，基于共享通道保护的抗毁策略所需光纤总数均在纤内波长数量为 12 的时候达到下界 21，基于共享链路保护的抗毁策略则在纤内波长数量大于 16 的时候才达到下界 21。

类似地，可以定义光纤冗余度如下，若令 N_{np} 为无保护情况下所需的总光纤数， N_{yp} 为有保护情况下所需的总光纤数，则 $R_N = (N_{yp} - N_{np}) / N_{np}$ 为光纤冗余度。

从图 7 的结果可见：1) 基于链路保护的抗毁策略总是需要比基于通道保护的抗毁策略占用更多的空闲资源，节点无波长变换功能时，基于链路保护的抗毁策略需要的冗余容量 R_N 平均比基于路径保护的抗毁策略多 105.3%，最多达到 153% ($W=2$)；节点具有全波长变换功能时，基于共享链路保护的抗毁策略需要的冗余容量平均比基于共享路径保护的抗毁策略多 95.1%，最多达到 137.5% ($W=4$)。2) 在相同的保护策略下，引入波长变换装置对减少冗余容量的作用也不同：基于共享路径保护的抗毁策略下，除了当 $3 \leq W \leq 7$ 外，无波长变换情况所需的光纤总数与具有波长变换情况所需光纤总数基本相同；平均冗余容量相差 2.91%，最多达到 14.3% ($W=4$)；基于共享链路保护的抗毁策略下，是否具有波长变换设备将会产生较大影响，无波长变换情况下需要的冗余容量平均比带有波长变换装置情况多 8.29%，最多达到 18.2% ($W=4$)。

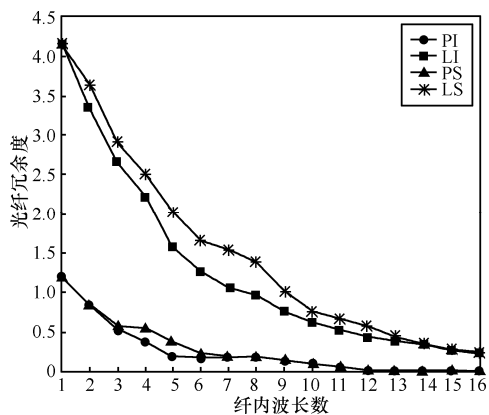


图7 光纤冗余度与单光纤波长数

3.1.3 剩余容量

显然，多波长光纤中有些波长未被分配或预留给保护信道，即剩余容量，可表示为 $R = (NW - W_0) / NW$ ，其中 N 为所需的总光纤数； W 为纤内波长数； W_0 为已使用的波长总数。

从图 8 可以得到结论：1) 无保护、路径保护、

链路保护 3 种抗毁策略，分别在纤内波长数量为 4、6、8 时，全波长变换与无波长变换的曲线相交，在此之前无波长变换剩余容量大于全波长变换剩余容量；在此之后无波长变换剩余容量小于全波长变换剩余容量。主要由于当无波长变换装置的时候，若波长资源无法满足当前应用，则需要增加更多的光纤，从而导致新增光纤中的剩余波长较多；2) 随着 W 的不断增大，最终构成网络拓扑的 21 条链路中将剩余大量波长，成为剩余容量的主要组成部分。

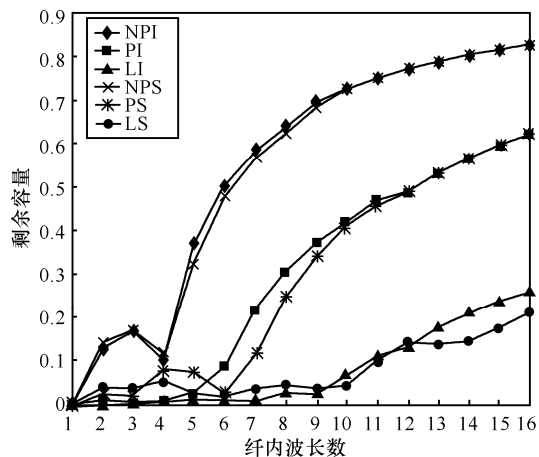


图8 剩余容量与单光纤波长数

3.2 动态业务模型

动态业务仿真场景设计如下：1) 每个核心节点外接一个边缘路由器，每条链路都是一对双向光纤，每条光纤内有 16 个波长；2) 全网所有节点对间的业务强度都相同，即支持的业务为均匀业务；3) 仿真中考虑全网各个节点的平均业务密度，即各节点的光路连接请求以参数为 λ 的 Poisson 过程到达， λ 依次取 1~13，每个请求的持续时间均服从均值为 $1/\mu=1$ (时间单位) 的负指数分布，所有请求的源、目的节点均按均匀分布的方式在所有节点中产生，每次请求的带宽为 1 个波长粒度，对每次请求仿真 200 次，求得统计平均值。

3.2.1 阻塞概率

图 9 描述了 4 种机制对网络阻塞概率的影响，其中 Dijkstra-P 表示采用 Dijkstra 经典路由算法寻找到的保护路径，Dijkstra-L 表示采用 Dijkstra 经典路由算法为给定链路寻找到的保护路径，显然，这 2 种策略并没有考虑到当前节点负载状态，从图中可以看出，这 2 种方法的阻塞率较高，可以得出结论，在共享保护的条件下，使用带有负载均衡的保护策略能够直接降低阻塞概率，体现了所提机制的优越性。

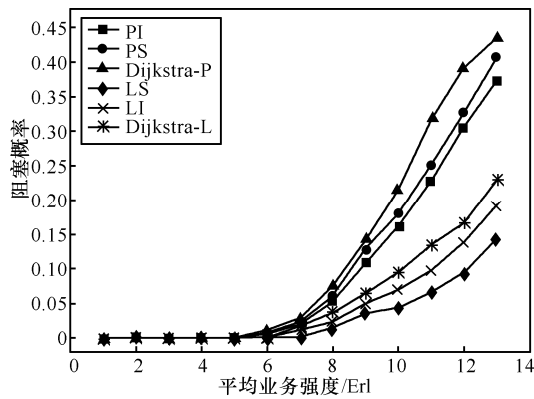


图 9 阻塞率

3.2.2 保护开销

作为反映资源共享性重要指标, 保护开销定义为网络稳态时保护资源占总的资源开销的比值, 该数值越小, 表明为满足业务保护请求所预留的波长资源越少, 成本越低。图 10 描述了共享路径保护、共享链路保护与负载的关系, 可见, 2 种机制的保护开销都随负载的增加呈下降趋势, 主要由于共享的保护资源方式能大大减少为保护网元额外预留的波长数, 而相比于 Dijkstra 算法, 采用基于负载平衡的机制能够实时地将网络中的业务流分担到多个通路中, 有效地避免了链路负载过重, 节省了波长资源的消耗, 同时有效地保证了网络的生存性, 这种优势随着业务流的增加而越发明显。

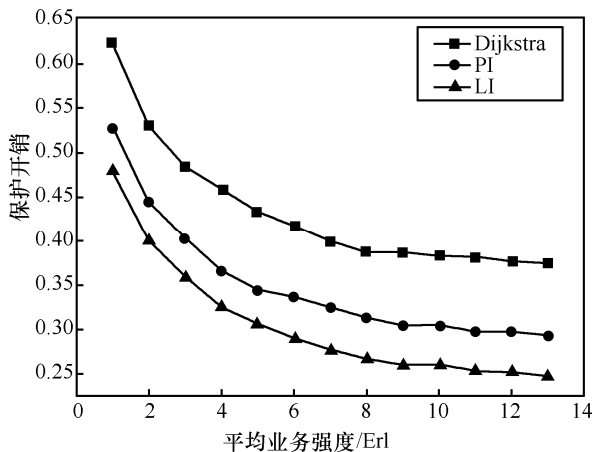


图 10 保护开销

4 结束语

本文对带有负载均衡的网状 WDM 抗毁网络设计进行了研究, 其目的是在保障网络健壮性的基础上提高资源利用率, 改善网络性能。以最小化全网

使用波长数为优化目标, 建立整数线性规划模型对多纤网状 WDM 网络进行抗毁设计, 分别提出了基于共享路径保护的抗毁策略和基于共享链路的抗毁策略。用 NSFNET 网作为范例给出光纤总数的优化结果, 并研究了不同保护策略对目标函数值的影响。仿真结果表明, 该算法可有效地降低网络成本。在核心节点处实现部分波长变换情况下的优化方案将是下一步研究的主要内容。

参考文献:

- [1] 宋鸿升, 吴耀辉, 顾碗仪. 多层网络中的生存性策略[J]. 光通信技术, 2004, 28(4): 33-36.
SONG H S, WU Y H, GU W Y. Survivability policies in multi-layer network[J]. Optical Communication Technology, 2004, 28(4): 33-36.
- [2] 章小宁, 李乐民, 王晟等. WDM 光网络中单链路失效的混合生存性算法研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(5): 603-606.
ZHANG X N, LI L M, WANG S, et al. A novel hybrid survivable algorithm for single-link failure in WDM optical networks[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2008, 19(5): 603-606.
- [3] 高建超, 熊安萍, 胡嵩. 光网络中一种基于生存性的资源预留机制[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2009, 21(1): 105-109.
GAO J C, XIONG A P, HU S. A Survivability-aware resource reservation mechanisms for optical networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2009, 21(1): 105-109.
- [4] AMIR A, ZHAI Y X, SURESH S. Protection and restoration from link failures in DWDM networks: a cross-layer study[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Beijing, China, 2008.5448-5452.
- [5] RAMAMURTHY S, MUKHERJEE B. Survivable WDM mesh networks, part I: protection[A]. IEEE Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies[C]. New York, USA 1999.744 -751.
- [6] RAMAMURTHY S, MUKHERJEE B. Survivable WDM mesh networks, part II: restoration[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Vancouver, Canada, 1999.2023-2030.
- [7] LEE K, MUN S G, LEE C H, et al. Reliable wavelength-division-multiplexed passive optical network using novel protection scheme[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(9): 679-681.
- [8] ASKARIAN A, ZHAI Y X, SUBRAMANIAM S, et al. Cross-layer approach to survivable DWDM network design[J]. Journal Optical Communication Network, 2010, 2(6): 319-331.

- [9] WU B, HO P H, YEUNG K L. CFP: cooperative fast protection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(7): 1102-1113.
- [10] YAMADA Y, HASEGAWA H, SATO K. Hierarchical optical path network design algorithm considering waveband protection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(24): 5736-5748.
- [11] 王汝言, 赵成仕, 隆克平. 光突发交换网络中一种基于负载均衡的路由机制[J]. *电子学报*, 2006, 34(11): 2085-2089.
- WANG R Y, ZHAO C S, LONG K P. Load-balancing routing mechanism in optical burst switching networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(11): 2085-2089.
- [12] RAMAMIRTHAM J, TURNER J, FRIEDMAN J. Design of wavelength converting switches for optical burst switching[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(7): 1122-1132.
- [13] RAJALAKSHMI P, JHUNJHUNWALA A. Load balanced routing to enhance the performance of optical backbone networks[A]. *5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*[C]. Surabaya, Indonesia, 2008. 1-5.
- [14] GUO L, WANG X W, LI Y, *et al.* A new load balanced survivable routing algorithm in multi-domain WDM optical networks[A]. *Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology*[C]. Busan, Republic of Korea, 2008. 204-208.
- [15] DU Y, ZHU C L, ZHENG X P, *et al.* A novel load balancing deflection routing strategy in optical burst switching networks[A]. *Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers*[C]. San Diego, CA, 2007. 1-3.
- [16] AGUSTI-TORRA A, CERVELLO-PASTOR C, FIOL M A. Load-balanced wavelength assignment strategies for optical burst/packet

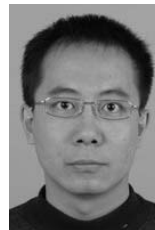
switching networks[J]. *IET Communications*, 2009, 3(3): 381-390.

- [17] BIKRAM R R C, VOKKARANE V M. Dynamic load-balanced multicasting over optical burst-switched (OBS) networks[A]. *Conference on Optical Fiber Communication*[C]. San Diego, CA, 2009. 1-3.

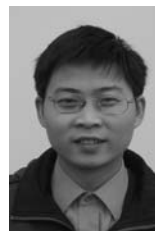
作者简介:



王汝言 (1968-), 男, 湖北浠水人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为下一代互联网体系结构。



吴大鹏 (1979-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为互联网服务质量控制、网络可靠性。



黄胜 (1976-), 男, 湖北英山人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为全光网络理论、智能交换技术。