

RWA 方法对 WDM 网络 P 圈优化性能的影响

葛晨晖 孙小菡 张明德

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

摘 要 研究不同的路由和波长分配(RWA)方法对无波长变换 WDM 网络 P 圈优化性能的影响. 提出了用负载均衡的方法对各波长层的工作容量进行均衡, 以降低网络总容量. 分别研究了动态分层通用 RWA(DL-GRWA)、最短路径 RWA(SP-RWA)、动态分层负载均衡(DL-LB)、最短路径负载均衡(SP-LB)、固定波长负载均衡(FW-LB)5 种方法对网络总容量的影响. 仿真发现, 无论何种 RWA 方法, 随着圈最大跳数限制的变大, 网络总容量都逐渐降低, 其中 SP-LB 方法所需要的网络总容量最小.

关键词 波分复用; P 圈; 路由和波长分配; 整数线性规划

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

生存性是波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)光网络设计至关重要的部分, 已经提出了多种保护和恢复机制^[1~6], 其中, P 圈(预置保护圈)保护方法能够同时兼顾环网的恢复速度和网状保护的资源利用效率, 成为了研究热点^[3~6]. 但是, 由于 WDM 网络存在波长连续性条件限制, 当 P 圈优化方法应用于 WDM 网络中时, 通常假设每个节点都具有完全波长变换能力^[3~6], 这意味着在每个节点必须配置大量的波长变换器, 这一方面增加了网络的配置成本, 另一方面又提高了节点设计的复杂度, 降低了节点的可靠度, 从而影响了 P 圈在 WDM 网络应用的经济性和可行性. 为此, 文献[6]提出了一种无波长变换 WDM 网络的 P 圈优化模型, 分析了圈最大允许长度对网络冗余度(备份容量与工作容量之比)的影响. 但是实际应用中, 除了网络冗余度, 网络总容量(工作容量与备份容量之和)也是重要的评估指标. 并且在面对相同的业务连接需求时, 不同的路由波长分配(Routing and Wavelength Assignment, RWA)方法得出的工作容量分配并不相同, 显然也会对 P 圈优化结果有较大的影响. 因此, 本文进一步研究无波长变换时各类 RWA 方法对 WDM 网络 P 圈优化性能的影响, 提出用负载均衡(Load Balanced, LB)的思想降低网络总容量, 并仿真不同的网络拓扑下各 RWA 方法对网络总容量的影响.

1 P 圈保护 WDM 网络优化方法

P 圈保护 WDM 网络的优化方法分为两个步

骤: 首先是利用启发式 RWA 方法为每个业务请求分配合适的工作路由和工作波长; 接着在每个波长层中, 利用整数线性规划(ILP)方法进行 P 圈优化.

1.1 WDM 网络 RWA 方法

设 WDM 光网络的拓扑为有向图 $G(V, E)$, 其中 V 代表网络节点集合, E 代表网络单向链路集合. 假定每条链路都包含 F 根波长数为 W 的单向光纤. 为了消除波长连续型限制条件, 采用文献[7]提出的分层图(Layered Graph, LG)模型, 将网络拓扑 G 复制成相同的 W 份, 每份称为一个波长层 $LG(V, E, \omega)$, $1 \leq \omega \leq W$, 层中每条链路都有 F 个完全等价的波长信道.

显然, 波长层中每条链路的工作和保护信道之和不能超过 F . 因此为了确保所有的工作信道都得到保护, 同时提高网络资源利用率, 在进行 RWA 前, 首先利用文献[8]提出的基于 P 圈的保护工作容量包封(Protected Working Capacity Envelope, PWCE)方法, 计算波长层中各链路 e 上的保护信道上限 $F_p(e)$ 和被保护的工作信道上限 $F_w(e)$, 目的是预留足够的保护资源, 确保所有业务都被保护, 同时使潜在的被保护工作总容量 $\sum_{e \in E} F_w(e)$ 最大.

经过 PWCE 优化后, 每个波长层中链路 e 的最大工作信道数为 $F_w(e)$, 并以此为限制条件进行 RWA. 文献[9]提出了 2 种启发式 RWA 策略: 1) 动态分层通用 RWA(Dynamic Layered Generalized RWA, DL-GRWA)方法, 目的是用最少的波长数完成 RWA; 2) 最短路径 RWA 方法(Shorted Path, SP-RWA)方法, 即每个连接请求按最短路径分配工作路由, 目的是使工作总容量最小. 由于 DL-GRWA 中工作路由往往不是最短路径, 故工作总容量要远高于 SP-RWA 方法; 而 SP-RWA 方法使用的波长较多. 同时由于两种方法的每个波长层中的

工作容量数分布不均匀;有些波长层中工作容量接近于极限值 $\sum_{e \in E} F_w(e)$, 而有些波长层中工作容量数很少. 由于在那些工作容量很小的波长层中, P 圈保护所需的保护容量要远大于工作容量, 从而增大了网络总容量. 为此, 本文提出用负载均衡的方法, 在各波长层中均衡工作容量, 以期降低网络总容量. 具体执行步骤如下.

将 DL-GRWA 或 SP-RWA 方法得到的波长数作为波长层总数. 当为每个业务请求 RWA 时, 先遍历所有波长层, 在每个波长层利用 Dijkstra 算法寻找最短工作路径. 各波长层中链路 e 的工作代价函数 $C_{\text{work}}(e)$ 为

$$C_{\text{work}}(e) = \begin{cases} C_{\text{weight}}(e) + \epsilon \cdot \lambda_{\text{used}}(e), & \lambda_{\text{used}}(e) < F_w(e) \\ +\infty, & \lambda_{\text{used}}(e) = F_w(e) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $C_{\text{weight}}(e)$ 为链路 e 的权重, $\epsilon > 0$ 为负载均衡系数, $\lambda_{\text{used}}(e)$ 为链路 e 的已用工作信道数. 将最短路径代价值最小的波长选为工作波长, 即工作波长选择采用最佳命中. 利用负载均衡方法, 可以在波长和链路集合中近似平均分配工作容量. 本文提出 3 种负载均衡策略, 即 DL-LB, SP-LB 和 FW-LB (Fixed Wavelength-LB), 其可用波长数分别为由 DL-GRWA 和 SP-RWA 方法得到的波长数以及比 SP-RWA 方法得到的波长数略大的值.

1.2 P 圈优化方法

P 圈优化的目的是提高网络的整体资源利用率, 需要对所有波长统一优化. 但是当完成 RWA 后, 每个波长层工作容量都已经分配, 并且相互独立, 所以可以分别在各波长层中完成对应波长的 P 圈优化, 从而得到整体优化. P 圈优化有两种方法, 分别是基于网络管理系统的集中式方法和分布式自组织方法^[3]. 集中式方法又分为 ILP (Integer Linear Programming) 方法^[3,6] 和启发式方法^[10,11]. 由于自组织方法和启发式方法只能找到次优解, 而 ILP 方法通用于各种网络和业务类型, 并且可以找到最优解^[11], 所以本文采用此方法.

首先利用 Johnson 算法^[12] 搜索网络中的单向简单圈(除首尾节点外其余节点只出现一次的闭合路径)集合 P, 然后利用 ILP 方法完成 P 圈优化. 对文献[6]中波长通道(WP)网络的 ILP 模型进行简化可得到波长 w 的 P 圈优化模型, 其目标函数为

$$\text{Minimize } \sum_{e \in E} C_{\text{weight}}(e) \text{spare}_{e,w}, \forall w \in W \quad (2)$$

约束条件为

$$\text{spare}_{e,w} = \sum_{p \in P} \alpha_{e,p} n_{p,w}, \forall e \in E \quad (3)$$

$$\text{work}_{e,w} \leq \sum_{p \in P} \beta_{e,p} n_{p,w}, \forall e \in E \quad (4)$$

$$\text{work}_{e,w} + \text{spare}_{e,w} \leq F, \forall e \in E \quad (5)$$

式中 $\text{work}_{e,w}$ 和 $\text{spare}_{e,w}$ 分别为波长层 w 中链路 e 的工作与空闲容量, $n_{p,w}$ 为工作波长为 w 的单位容量单向圈 p 的个数. 如果单向圈 p 经过链路 e , $\alpha_{e,p}$ 为 1, 否则为 0. 如果单向圈 p 能保护链路 e , $\beta_{e,p}$ 为 1, 否则为 0. F 为每条链路的光纤数. 式(2)是为了最小化网络空闲总容量, 式(3)统计每条链路上的空闲容量, 式(4)确保每条链路的工作容量都被完全保护, 式(5)为每条链路的波长容量限制.

本文利用 C++ 语言编程完成 RWA 算法、单向简单圈搜索算法和 ILP 建模, 并且通过调用 GLPK (GNU Linear Programming Kits) 的 C 语言函数库求解 ILP 模型.

2 仿真结果及分析

网络拓扑选用节点数为 10, 单向链路数为 44, 最大单向简单圈数为 1666 的 SmallNet^[8] 和节点数为 14, 单向链路数为 42, 最大单向简单圈数为 238 的 NSFNET^[8], 分别如图 1(a), (b). 仿真时假设网络中各链路单向光纤数 $F=4$, 网络中任意节点对之间都有 [1, 10] 个业务请求. 当 RWA 时, 负载均衡系数采用 $\epsilon=1$, 假定所有链路都有相同的权重 $C_{\text{weight}}(e)=1$, 即以链路信道数来统计容量.

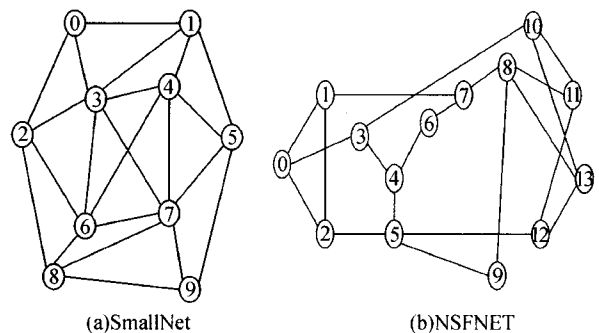


图 1 网络拓扑

Fig. 1 Network topology

图 2 和图 3 分别表示 SmallNet 和 NSFNET 拓扑中网络总容量随圈最大跳数限制的变化. 从两图可知, 随着圈最大跳数限制的变大, 无论何种 RWA 方法, 网络总容量都逐渐降低. 考虑负载均衡的 DL-LB 和 SP-LB 方法都比相应的 DL-GRWA 和 SP-RWA 方法减少网络总容量. 在三种负载均衡策略中, SP-LB 方法的网络总容量最少, 这表明用 SP-RWA 方法得到的波长数最适合负载均衡, 比它更少或更多的波长数并不适合. 在所有 5 种 RWA 方法中, SP-LB 方法在所有跳数限制中具有最小的网络总容量, 这表明利用 SP-LB 方法得到的 P 圈优化性能最优.

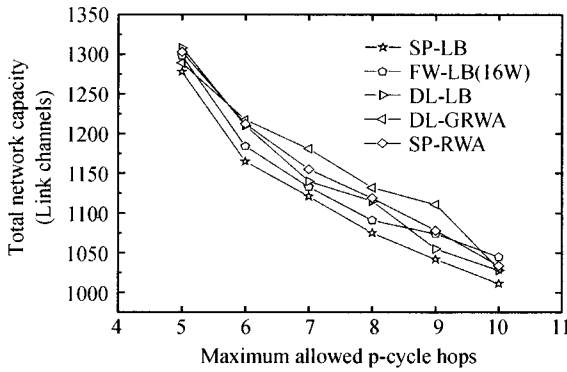


图 2 SmallNet 网络总容量
Fig. 2 The total network capacity of SmallNet

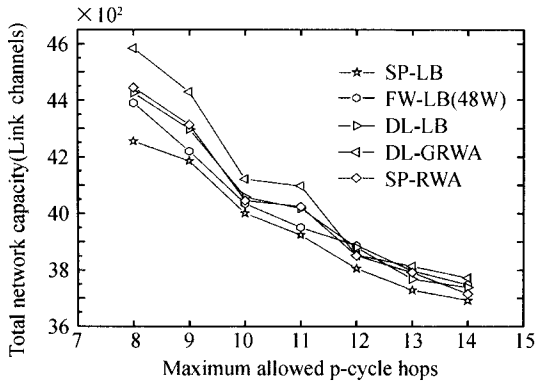


图 3 NSFNET 网络总容量
Fig. 3 The total network capacity of NSFNET

下面以 SmallNet 为例进一步研究各类 RWA 方法对网络总容量的影响。图 4 和图 5 分别表示圈最大允许跳数为 10 时 SmallNet 网络中各波长层的工作容量和网络冗余度。此时各 RWA 方法所需要的工作总容量和网络总冗余度如表 1。从图 4, 5 并对照表 1 可以看出 DL-GRWA 虽然使用的波长数最少, 并且总冗余度最小, 但是由于工作总容量最大, 故网络总容量较大。相对于 DL-GRWA 方法, DL-LB 方法可以减少网络工作总容量, 因而降低了网络总容量。SR-RWA 方法虽然工作总容量最小, 但由于最后若干个波长层中冗余度过大, 使得整体冗余度偏大; 使用 SR-LB 方法可以在不大幅增加工

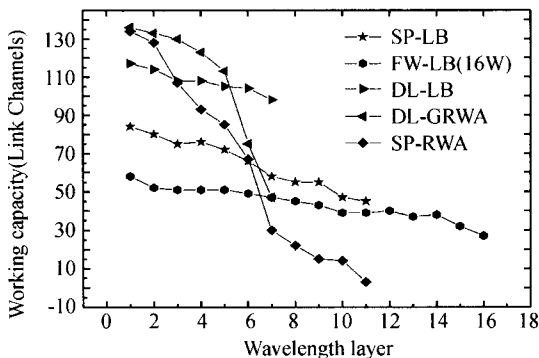


图 4 SmallNet 各波长层工作容量
Fig. 4 The working capacity of each wavelength layer in SmallNet

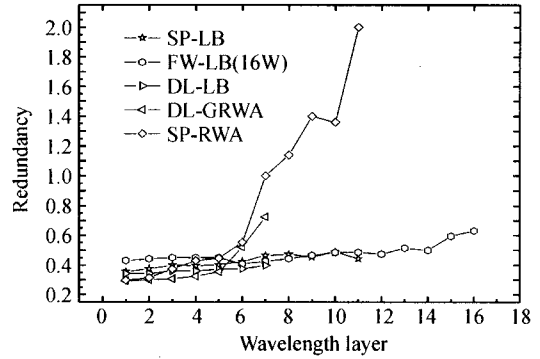


图 5 SmallNet 各波长层冗余度
Fig. 5 The redundancy of each wavelength layer in SmallNet

表 1 SmallNet 工作总容量和网络总冗余度(最大跳数 10)

	工作总容量	网络总冗余度
DL-GRWA	757	0.361
DL-LB	750	0.363
SP-RWA	698	0.481
SP-LB	713	0.418
FW-LB(16W)	698	0.488

作总容量的前提下, 降低网络冗余度, 因而可以最小化网络总容量。而使用负载均衡方法时, 如果网络波长数过大, 例如 16 波长的 FW-LB 方法, 则会使得每个波长层中的工作容量偏小, 引起各波长层网络冗余度增大, 反而会增加网络总容量。

3 结论

本文研究在无波长变换条件下 RWA 方法对 P 圈保护优化性能的影响。提出了用负载均衡的方法在各波长层均匀分配工作容量, 以降低网络总容量。分别研究了 DL-GRWA, SP-RWA, DL-LB, SP-LB 和 FW-LB 方法对网络总容量的影响。仿真结果表明无论何种 RWA 方法, 随着圈最大跳数限制的变大网络冗余度都逐渐降低。DL-GRWA 虽然使用的波长数最少, 但是其工作总容量最大。SR-RWA 方法虽然工作总容量最小, 但网络冗余度偏大。使用 SR-LB 方法可以在不大幅增加工作总容量的前提下, 降低网络冗余度, 因而可以最小化网络总容量。在不同的网络拓扑和最大允许跳数限制条件下, SR-LB 方法需要的网络总容量都是最少的。这可以为 WDM 网络 P 圈优化提供参考。

参考文献

- 雷蕾, 赵继军, 纪越峰. IP over WDM 网络中可恢复的路由选择策略与算法. 光子学报, 2004, **33**(2): 174~178
Lei L, Zhao J, Ji Y. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 174~178
- 贺辉, 范戈. WDM 光网络故障的快速共享恢复方案. 光子学报, 2005, **34**(2): 259~262
He H, Fan G. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 259~

- 262
- 3 Grover W D, Stamatelakis D. Cycle-oriented distributed preconfiguration; ring-like speed with mesh-like capacity for self-planning network restoration. 1998 *IEEE International Conference on Communications*, Atlanta, USA, 1998, **1**:537~543
 - 4 Zhu G, Zeng Q, Ye T, *et al.* Protection switching schemes of multi-granularity p-cycles in survivable WDM networks. *Chinese Optics Letters*, 2004, **2**(9):508~511
 - 5 宋鸿升, 徐云斌, 顾晓仪. 一种新的格状波分复用光网络保护方法. *光子学报*, 2004, **33**(9):1090~1094
Song H, Xu Y, Gu W. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1090~1094
 - 6 Schupke D A, Gruber C G, Autenrieth A. Optimal configuration of p-cycles in WDM networks. *IEEE 2002 International Conference on Communications*, New York, USA, 2002, **5**:2761~2765
 - 7 Chen C, Banerjee S. A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks. *15th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, San Francisco, USA, 1996, **1**:164~171
 - 8 Shen G, Grover W D. Design and performance of protected working capacity envelopes based on p-cycles for dynamic provisioning of survivable services. *OSA Journal of Optical Networking*, 2005, **4**(7):361~390
 - 9 Hyttiä E. Heuristic algorithms for the generalized routing and wavelength assignment problem. Seventeenth Nordic Teletraffic Seminar, Fornebu, Norway, 2004: 373~386
 - 10 Doucette J, He D, Grover W D, *et al.* Algorithmic approaches for efficient enumeration of candidate p-cycles and capacitated p-cycle network design. Fourth International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks, Banff, Canada, 2003: 212~220
 - 11 Zhang Z, Zhong W, Mukherjee B. A heuristic method for design of survivable WDM networks with p-cycles. *IEEE Communications Letters*, 2004, **8**(7):467~469
 - 12 Johnson D B. Finding all the elementary circuits of a directed graph. *SIAM Journal on Computing*, 1975, **4**(1):77~84

The Influence of RWA Approaches on the Optimal Performance of p-cycles in WDM Networks

Ge Chenhui, Sun Xiaohan, Zhang Mingde

Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

Received date: 2005-12-13

Abstract The influence of different RWA (Routing and Wavelength Assignment) approaches on the optimal performance of p-cycles in WDM networks without wavelength conversion was investigated. The method of load balanced was proposed to achieve nearly uniform distribution of working capacity over the wavelength layers in order to reduce total network capacity. Five RWA approaches were considered, including Dynamic Layered Generalized RWA (DL-GRWA), Shortest Path RWA (SP-RWA), Dynamic Layered with load balanced (DL-LB), Shortest Path with load balanced (SP-LB) and Fixed Wavelength with load balanced (FW-LB). Simulation results show that by means of every approach the total network capacity decreases with the increase of the maximum allowed cycle hops. Among them, SP-LB approach can minimize the total network capacity.

Keywords Wavelength Division Multiplexing (WDM); p-cycles; Routing and Wavelength Assignment (RWA); Integer Linear Programming (ILP)



Ge Chenhui received the B. S and M. S. Degrees in electronic engineering from Southeast University, in 2002 and 2004, respectively. He is currently working toward the Ph. D. Degree in optical communications at the same university. His research interests include optical network protection, restoration and optimization.