

波分复用光网络中的波长路由分配策略

罗启彬, 邱 昆, 张宏斌

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室, 四川成都 610054)

摘 要: 路由选择和波长分配是 WDM 光传输网中非常重要的问题. 本文结合交叉连接节点, 提出了一种基于最短路径的动态路由选择方案; 然后利用这种动态的路由选择策略, 以网络的阻塞性能为优化目标分配波长, 达到充分利用网络资源的目的. 计算机仿真结果表明, 无论在单纤或者多纤 WDM 光传输网络中, 利用这种策略的 RWA 算法优于传统的固定路由和单纯动态路由算法

关键词: 波分复用; 光交叉连接; 路由选择; 波长分配; 重路由; 资源分配策略

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1628-04

Routing and Wavelength Assignment Strategies in WDM Networks

LUO Qi-bin, QIU Kun, ZHANG Hong-bin

(National Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Routing and Wavelength Assignment (RWA) in WDM optical transmission networks is a very important problem. A new RWA strategy is proposed for dynamic Routing and Wavelength Assignment problem in WDM optical transmission networks. Simulation shows these RWA algorithms perform better than some existing ones, which can make full use of networks resource with lower networks blocking.

Key words: WDM; OXC; routing; wavelength assignment; rerouting; resource assignment strategies

1 引言

波分复用 (WDM) 技术极大地提高了通信网络的传输带宽 (~ THz), 大大地降低了传输系统的成本. 同时, 光分插复用 (OADM) 和光交叉连接 (OXC) 技术的引入不但有效地克服了通信网络中的所谓“电子瓶颈”, 更使网络的灵活性增强, 能适应各种应用场合和各种突发业务的需求, 网络的生存性也大大提高了. 所以, 采用路由选择和波长分配的 WDM 全光通信网被认为是下一代高速广域骨干网最有力的竞争者之一^[1,2]. 由于波长资源有限, 因此如何在有限的波长资源条件下最大限度的提高网络的吞吐量, 或者说提高网络的资源利用率以改善网络的阻塞性能, 是路由选择和波长分配 (RWA: Routing and Wavelength Assignment) 光网络的核心问题. 在波长通道 (WP: Wavelength Path) 和虚波长通道 (VWP: Virtual Wavelength Path) 的情况下, 这个问题又有不同的解决方案, 如在波长通道网络中, 由于必须满足波长连续有限的原则, 即对任意一条全光路径, 在它经过的所有链路上必须占用同一个波长, 相邻通道分配不同的波长, 因此路由选择和波长分配问题可以分解成两个独立的子问题:

(1) 按照某种优化目标 1 寻找从源节点到目的节点的路由;

(2) 在满足一定优化性能的情况下为这些路由分配波长;

而在虚波长通道网络中, 采用波长转换技术可以在各路由上分配不同的波长, 故不存在波长分配的问题, 这样 RWA 问题就可简化为只考虑选择路由的问题了. 虚波长通道网络可以大大提高波长的重用率, 被认为是未来全光通信网的关键技术之一, 但由于涉及波长转换且成本高, 本文暂不考虑.

根据业务的具体特点, RWA 问题又可以分为静态 RWA 和动态 RWA 问题. 静态 RWA 问题是指对一组确定的、需要建立的光通道选择路由并分配一定的波长, 通常以波长数量为优化目标. 而动态 RWA 问题是指在实时业务条件下的光通道路由选择和波长分配优化问题, 此时光通道的建立请求随机的到达和离开网络, 即业务是动态的, 常用的优化指标是网络的阻塞概率.

本文给出一个动态 RWA 问题的解决方案, 由于 RWA 问题是一个 NP-C 问题^[3], 因此文献中大多数都将 RWA 问题强行拆分成路由子问题和波长子问题分别加以处理. 解决路由子问题的方法大致分为: 固定路由 (FR: Fixed Routing); 固定替换路由 (FAR: Fixed Alternate Routing) 和自适应路由 (AR: Adaptive Routing)^[4~8]. 在这三种方法中, 固定路由 (FR) 是最简单的, 自适应路由最复杂但执行性能最佳. 本文提出一种基于固定路由和自适应路由的混合式路由解决方案.

对波长分配子问题, 文献^[9~13]里提出了许多启发式算

收稿日期: 2000-07-17; 修回日期: 2001-01-03

基金项目: 高等学校优秀青年教师科研奖励计划; 四川省学术和技术带头人培养基金资助项目

法,如随机波长分配(Random Wavelength Assignment),First-Fit, Least-Loaded等.考虑到业务的随机性,本文给出一种有效利用波长资源以降低网络阻塞概率的波长分配方案.

2 OXC 节点结构

OXC的基本功能是为各输入端和输出端的波长信道建立全光的连接.当然也可以本地上下路波长信号.它一般是先把输入的WDM信号在波长域上分解成一组单波长信号,然后经过交叉连接或可调的本地上下业务完成信号的交换,最后再把各单波长信号重新进行复用以前向传输.

为了简化问题的复杂度,本文考虑图1所示的具体的光交叉连接,包含6根光纤,每两根组成一组,每条光纤能支持的波长数为4.其中1、2、3既可以作为业务通道,也可以为1、2、3提供保护,即当光纤1、2、3上的波长被占用或发生故障时,光纤1'、2'、3'可分别1、2、3作为备用.因此,对于同一链路

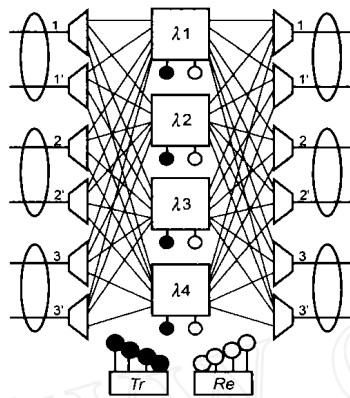


图1 六光纤、四波长的 OXC

网络,由于每条光纤上的波长完全一样,所以可通过调节控制节点的交叉转换状态来实现相应波长的重路由,这等效于节点具有部分波长变换能力^[14];另外,OXC节点还可根据业务的需求情况,动态地调整光发射器,以达到波长的重路由(Rerouting-Wavelength).这样可充分利用波长资源,降低网络的阻塞概率,同时省去了波长变换器,大大降低了节点的費用.

3 路由选择

给定网络的物理拓扑结构,可以用一个无向图 $G(V, E)$ 来表示,其中 V 代表网络的顶点集合, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$, 元素数目为 N ; E 代表网络 G 的边集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$. 每个顶点对应实际网络中的光交叉连接节点,而边对应连接两个节点间的一组光纤对.如果该网络为全连通的,则 $M = N(N-1)$,但实际情况下,一般 $M < N(N-1)$.假设每条光纤被波分复用成 W 个波长的集合 $\{ \lambda_i \}, 1 \leq i \leq W, S$ 表示网络中源-目的节点对间的总通道数.

分两步来考虑路由选择问题:

Step1:

首先定义:链路长度(或者链路时延)

$$d_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{节点 } v_i \text{ 和 } v_j \text{ 直接相连, } 1 \leq i, j \leq N \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

0 为链路权置,可以是链路的长度或者链路时延等.

优化目标可表示为

$$t_i = \min_{k=1}^N [d_{kj}], \quad 1 \leq i \leq N, 1 \leq k < j \leq N$$

即求解网络中任一源节点到其他所有节点的最短时延或

路径.以图2的网络为例来讨论,图中每条链路旁边标注的数值表示链路的长度,可用链路矩阵 $D = [d_{ij}]_{N \times N}$ 来表示.先假设任一源节点,然后一步一步地寻找,每次找一个节点到源节点的最短路径,直到把所有的节点都找到为止,这样可以为每一个节点建立一个路由信息表.节点1的路由信息表为表1,其中 h 表示从源节点到目的节点的跳数.

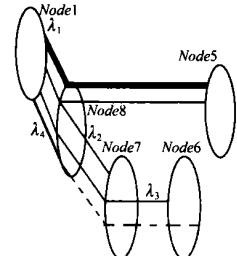
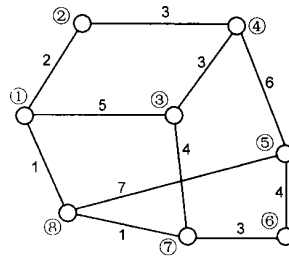


图2 求最短路径算法的网络举例 图3 波长重路由

表1 图2所示网络中节点1的路由信息表

源节点	目的节点	经过路径	最短距离	跳数(h)
1	2	1-2	2	1
1	3	1-3	5	1
1	4	1-2-4	5	2
1	5	1-8-5	8	2
1	6	1-8-7-6	5	3
1	7	1-8-7	2	2
1	8	1-8	1	1

其余节点也可建立类似的路由信息表,计算的复杂度 $O((N-1)^2)$.

Step2:

每隔一定的时间,动态地更新网络各节点的路由信息表.如果网络中某条链路失效或超负载,可以假设其链路权置为,重新计算各节点的最佳路由信息表.因此尽管网络中某些路径发生故障,网络仍可以自动地以最小时延恢复运行,具有自适应性或健壮性(Robustness),能适应通信量和网络拓扑结构的变化,增强了网络的生存能力.

4 波长分配策略

波长路由光网络的波长分配需满足以下条件:

- (1) 在给定的链路上的两个光通道不能被分配相同的波长;
- (2) 每个光通道在其所有的链路上必须占用同一个波长;

用数学语言可表示为:

设通道链路关联矩阵为 P ,通道波长关联矩阵为 B .

$$P = [p_{ij}] = \begin{cases} 1, & \text{链路 } e_j \text{ 是通道 } i \text{ 的一部分} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$B = [b_{ij}] = \begin{cases} 1, & \text{波长 } k \text{ 分配给通道 } i \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

优化目标是使网络的阻塞概率最小,即

$$\min = \min_{k=1}^W [U_i]$$

U_i 为光通道 i 的阻塞概率.波长分配需满足的限制条件可表述为:

$$P_{ij} * b_{ik} = 1, 1 \leq j \leq M, 1 \leq k \leq W$$

$$b_{ij} = 0 \text{ 且为整数}, 1 \leq i \leq S, 1 \leq j \leq W$$

波长分配的原则是依据节点路由信息表的跳数来进行的,例如从源节点到目的节点经历一跳($h=1$),则分配波长 λ_1 ,依次类推...但由于波长连续性限制容易导致波长资源的利用率低,仍以图2所示的网络为例,节点1-8之间分配波长 λ_1 ,1-8-7分配波长 λ_2 ,1-8-7-6分配波长 λ_3 .按照上述波长分配原则,1-8-5之间就不能再分配波长 λ_2 ,尽管此时仍有空闲的波长,但由于该光通道上没有空闲的同一波长,故1-8-5的连接请求被拒绝.

为解决上述问题,改善网络的阻塞性能.可通过调节光交叉连接节点的收发器以提供新的连接请求,这样就解决上述矛盾.如图3所示,Node1至Node8之间的波长 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 已

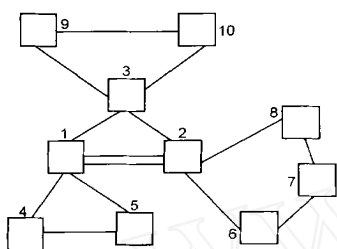


图4 仿真时用的网络模型:CAINONET网

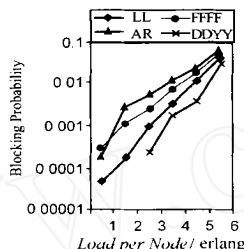


图5 单纤网中四种算法的阻塞性能比较

经分别被光通道1-8,1-8-7,1-8-7-6占用,波长 λ_4 空闲,显然如果此时要建立1-8-5之间波长为 λ_2 的连接必定被拒绝;但是,如在1-8-5间的连接请求之前,调整节点1和节点8的收发器使节点1和节点8之间的业务从波长 λ_1 转移到空闲波长 λ_4 ,那么1-8-5之间的业务就可建立在波长 λ_1 上(粗线所示),这样便可提高波长的利用率,相应的降低了网络的阻塞概率.通信完毕节点1和节点8的收发器仍恢复到原来的状态.

5 仿真结果

采用计算机模拟的方法,研究本文提出的RWA资源分配策略在具体网络结构下的性能.仿真时采用10个节点,13条双向链路的类似于中国高速信息示范网(CAINONET)的拓扑结构(最大和最小的节点度分别为2,4).如图4所示,仿真时假定连接请求按参数为 λ 的泊松过程独立的到达网络各

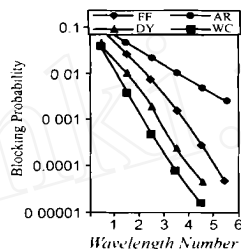


图6 单纤网中四种算法的阻塞概率与所需的波长数关系

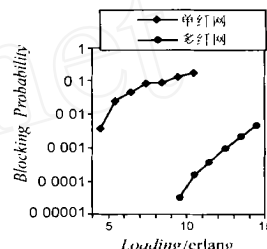


图7 DY算法在单纤网和多纤网中的阻塞性能比较

节点,光路建立后业务的持续时间服从均值为1的负指数分布.假定每个节点都有足够的收发器,连接请求仅在缺乏空闲波长或发生波长冲突时被阻塞.一旦连接建立请求被拒绝,则立即丢弃之.为了确保网络在平稳状态下运行,对每种网络的每个到达率都生成了 10^6 个连接建立请求.统计之前先预处理 10^5 个连接建立请求使系统达到稳态后才开始计数.用来比较的算法是固定路由(FF)加First-Fit波长分配算法、替换路由(AR)算法、Least-Loaded(LL)算法、全波长转换(WC)算法.用DY来代表本文提出的算法.

5.1 单纤情况下的阻塞概率

图5给出了FF、AR、LL和DY算法在各链路基本代价相同的单纤网中的仿真结果.从图中可以看出基于本文的算法要优于其他几种算法.例如当节点的平均负载为4(erlang)时,LL对应的阻塞概率为 3×10^{-3} ,FF和AR分别对应的阻塞概率则更大一些,而本文提出的DY算法略为 1.5×10^{-3} ,比LL算法小50%,因此DY比这几种传统算法更优越.

5.2 单纤网中、负载相同的情况下所需的波长数

图6给出了在相同的业务负载量的情况下,为了达到给定的阻塞概率,各种算法所需的波长数.例如在阻塞概率为 10^{-4} 时,WC所需的波长数最小,等于3.8,而DY算法等于4.5,但是FF和AR这两种算法所需的波长数则更多,FF为5.7,相对于DY多用了21.1%的波长.因此,DY算法能用相对较少的波长数来达到和FF与AR相同的阻塞性能,节约了网

络的资源.这在波长资源有限的波长通道光网络中非常有意义.

5.3 单纤网和多纤网时DY算法的阻塞性能

图7比较了在单纤网和多纤网的情况下DY算法的阻塞性能,从图中可以看出,在多纤($F/L=2$,每条链路包含两条光纤)情况下,给定相同的业务负载量,阻塞概率明显比单纤网低.例如在负载量为11(erlang)时,多纤网情况下阻塞概率为 1.55×10^{-4} ,而单纤网的阻塞概率则大得多,等于 1.61×10^{-1} ,比多纤网情况高三个数量级.因此,适当增加链路的光纤数是降低网络阻塞概率的有效手段,但也相应增加了网络成本.

6 结论

本文研究了WDM光网络的RWA问题,并从网络的阻塞性能出发,提出了一种动态的路由选择和波长分配策略.计算机仿真结果显示,无论从网络的阻塞性能,或是从所需的波长资源来看,本文给出的算法都优于传统的FF、AR等RAW算法.为充分利用有限的网络资源提供了新的思路.还应指出的是,这种算法能有效地处理链路故障,使网络具有部分'自愈'功能,增强了网络的生存能力.

参考文献:

- [1] Gerster O, Ramaswami R. Cost effective traffic-grooming in WDM rings

- [A]. INFOCOM 98 [C], 1998:69 - 77.
- [2] Gerster O, Katten S. Dynamic wavelength Allocation in WDM ring network [A]. Proc. IEEE ICC 97 [C], 1997:433 - 436.
- [3] Karasan E, et al. Performance of WDM transport networks [J]. IEEE JSAC, 1998, 16(7) :1081 - 1096.
- [4] D Banerjee, B Mukherjee. A practical approach for routing and wavelength assignment in large wavelength routed optical networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, June 1996, 14 (5) :903 - 908.
- [5] R Ramaswami, et al. Routing and wavelength assignment in all-optical networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, Oct. 1995, 3 (5) :489 - 500.
- [6] K Chan, T P Yum. Analysis of least congested path routing in WDM lightwave networks [A]. Proc. IEEE INFO-COM '94 [C], Toronto, Canada, April 1994, 2:962 - 965.
- [7] H Harai, M Murata, et al. Performance of alternate routing methods on all-optical switching networks [A]. Proc. IEEE INFOCOM 97 [C], Kobe, Japan, April 1997, 2:516 - 524.
- [8] L Li, A K Somani. Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, to appear, 1999.
- [9] S Subramaniam, R A Barry. Wavelength assignment in fixed routing WDM networks [A]. Proc. ICC 97 [C], Montreal, Canada, June 1997, 1:406 - 410.
- [10] X Zhang, C Qiao. Wavelength assignment for dynamic traffic in multi-fiber WDM networks [A]. Proc. 7th International Conference on Computer Communications and Networks [C], Lafayette, LA, Oct. 1998:479 - 485.
- [11] A Birman, A Kershenbaum. Routing and wavelength assignment methods in single-hop all-optical networks with blocking [A]. Proc. IEEE INFOCOM 95 [C], Boston, MA, April 1995, 2:431 - 438.
- [12] E Karasan, et al. Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, April 1998, 6(2) :186 - 196.
- [13] G Jeong, et al. Comparison of wavelength interchanging and wavelength selective cross-connects in multiwavelength all-optical networks [A]. Proc. IEEE INFOCOM 96 [C], San Francisco, CA, March 1996, 1:156 - 163.
- [14] Mokhtar A, et al. Adaptive wavelength routing in all-Optical networks [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, 1998, 6(2) :197 - 206.

作者简介:



罗启彬 男, 1975年6月生于四川成都。硕士研究生, 电子科技大学光纤通信国家重点实验室。主要从事 WDM 光传送网的资源分配和网络节点结构研究。

邱 昆 男, 1964年8月生于云南昆明。教授, 博士生导师, 电子科技大学光纤通信国家重点实验室主任。