

WDM-TDM 光网络中的动态波长路由与时隙分配算法研究

项 鹏 王 荣

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘 要: 在 WDM 光网络中, 为了进一步提高波长资源的利用率, 多个业务连接可以通过时分复用(TDM)技术共享一个波长的容量。在这种基于 WDM-TDM 技术的光网络中建立业务连接, 需要解决的核心问题之一是波长路由与时隙分配(RWTA)问题。该文研究了 WDM-TDM 光网络中的动态 RWTA 问题, 提出了一种基于最大使用率方法的 RWTA 算法(MUB)和一种改进的 MUB 算法(EMUB), 并对它们的性能进行了计算机仿真分析。结果表明: EMUB 算法的阻塞率性能优于 MUB 算法, 能有效地优化 WDM-TDM 光网络的资源利用率。

关键词: 光网络; 波分复用; 时分复用; 波长路由与时隙分配

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0679-05

Study on Dynamic Routing, Wavelength and Timeslot Assignment Algorithm in WDM-TDM Optical Networks

Xiang Peng Wang Rong

(Institute of Communication Engineering, PLAUST, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to improve the wavelength utilization in WDM networks, multiple traffic connections can be allowed to share the capacity of a wavelength via TDM technology. The resultant network is a WDM-TDM optical network, where the Routing, Wavelength and Timeslot Assignment (RWTA) problem is the key for setting up traffic connections. In this paper, the dynamic RWTA problem is studied, a Most-Used Based RWTA algorithm (MUB) and an Enhanced MUB algorithm (EMUB) are proposed, and their performances are evaluated through computer simulation. The results show that the EMUB algorithm outperforms the MUB algorithm, and improves the resource utilization of WDM-TDM optical network.

Key words: Optical network; Wavelength-Division Multiplexing (WDM); Time-Division Multiplexing (TDM); Routing wavelength and timeslot assignment

1 引言

基于波分复用(Wavelength-Division Multiplexing, WDM)的光网络技术已成为下一代宽带骨干网络的首选技术。在传统的 WDM 光网络中通过建立光通路(lightpath)来实现端到端的业务传输, 每条光通路都需要占用光纤中整个波长的容量, 这种资源分配方式限制了网络资源利用率的提高。因为一方面实际光网络中业务的带宽需求往往小于一个波长的容量, 比如对于高清晰电视(HDTV)业务, 分配 20Mbps 的容量已能满足业务的需求; 另一方面随着光纤传输技术的发展, 目前光纤通信系统中单波长可支持的容量已发展到 40Gbps, 远远大于实际业务的需求。因此为了进一步提高 WDM 光网络中波长资源的利用率, 可以利用时分复用(Time-Division Multiplexing, TDM)技术将 WDM 光网络中一个波长信道的容量细分为多个时隙子通道, 从而网络中的多个业务连接可以共享同一波长的容量, 这样的网络被称为 WDM-TDM 光网络^[1]。在这种光网络中, 每个波长的容

量被分解为若干个固定长度的时隙(time slot), 这些时隙紧密排列成帧(frame)。当网络需要为动态到达的业务请求建立连接时, 需要为其计算路由并分配波长, 还需要根据业务的带宽需求分配一定数目的时隙。这一问题被称为波长路由与时隙分配(Routing Wavelength and Timeslot Assignment, RWTA)问题^[2]。与传统 WDM 光网络中的 RWA(Routing and Wavelength Assignment)问题^[3]类似, 动态 RWTA 问题的优化目标是降低网络连接的阻塞率。

解决动态 RWTA 问题的关键是设计合理的动态 RWTA 算法, 目前研究 WDM-TDM 中动态 RWTA 算法的文献还不多见^[2,4-6]: 文献[4]提出了一种动态 RWTA 算法, 但它假设了网络节点具有完全的光时隙交换能力, 忽略了时隙分配子问题的研究。由于目前光时隙交换技术还不成熟, 相应器件(如基于光纤延迟线的时隙交换器)的性能也不够完善, 因此这种解决方案不能适应当前 WDM-TDM 光网络的现状; 文献[5]在环形拓扑的光网络模型下提出了一种动态 RWTA 算法, 但由于下一代骨干光网络已逐渐向网状拓扑结构的方向发展, 因此还有必要研究网状 WDM-TDM 光网络中的动

态 RWTA 问题;文献[2,6]研究了网状 WDM-TDM 光网络中的动态 RWTA 问题。其中,前者对路由问题进行了改进,并提出了两种波长与时隙分配算法;后者首先将网络中的波长与时隙资源统一定义为主干(trunk),然后分别在单路由和多路由策略下提出了两种动态 RWTA 算法。但这些 RWTA 算法的研究都是在多纤光网络模型(假设网络中的物理链路由多根光纤构成)中进行的,波长和时隙的分配都用到了多纤光网络中的最轻负载法(Least-Loaded, LL)^[3],这类算法无法直接运用于目前广泛研究和使用的单纤光网络模型中。为此,本文在假设网络节点没有波长变换和时隙交换能力的条件下研究了单纤光网络中的动态 RWTA 算法,通过对传统光网络中的最大使用率(Most-Used)波长分配算法^[3]进行拓展,得到了两种新的动态 RWTA 算法:基于最大使用率的 RWTA 算法(Most-used Based, MUB)和一种改进算法(Enhanced Most-used Based, EMUB),并使用计算仿真分析和比较了算法的性能,结果表明:EMBU 算法能更有效地优化网络资源的利用、降低网络连接的阻塞率。

2 问题的描述

2.1 网络模型

给定一个网状光网络拓扑 $G(V, L, W, T)$, 其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{|V|}\}$ 表示光网络的节点集合, $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{|L|}\}$ 表示双向链路的集合, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{|W|}\}$ 表示链路的波长集合, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{|T|}\}$ 表示构成每个波长容量的时隙集合。网络的节点数、链路数、波长数以及每个波长所包含的时隙数分别用 $|V|$ 、 $|L|$ 、 $|W|$ 和 $|T|$ 表示。假设网络各链路上的波长集合和时隙集合相同,每条链路都由一对方向相反的单向光纤组成,网络节点不具备波长变换与时隙交换能力。任何一个业务连接在从源节点到目的节点所经过的不同链路上,都要使用相同的波长和时隙,即业务连接受到波长连续性限制(wavelength continuity constraint)和时隙槽限制(slotting constraint)^[5]。其中波长连续性限制在传统的 WDM 光网络中已得到过广泛的关注^[3],图 1 举例说明了 WDM-TDM 光网络中的时隙槽限制。该图表示在一个 WDM-TDM 网络中建立了 A、B 两个连接,它们共享网络链路的同一个波长。波长的容量被分成 4 个时隙: t_1, t_2, t_3, t_4 , 排列成帧。连接 A 经过的路由为 1-3-4-5, 占用两个时隙的容量(t_1, t_2); 连接 B 经过的路由为 2-3-4-6, 占用一个时隙的容量(t_4)。可见,由于网络节点没有时隙交换能力,一个连接在其路由所经过的各链路上所占用的时隙槽(即时隙的序号)不能改变。

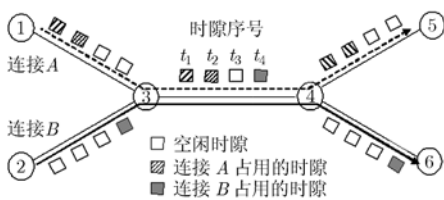


图 1 WDM-TDM 网络中的时隙槽限制

2.2 最大使用率法

最大使用率法(Most-Used)是单纤光网络中一种非常有效的波长分配算法。该算法根据网络中波长使用情况的统计,在可用波长集中优先选取被最多链路占用的波长进行波长分配,有助于将网络的业务量集中在少数波长上,从而可以留出更多的空闲波长来接纳后续的业务连接请求,降低网络连接的阻塞率。相关研究成果表明^[3],该算法的性能明显优于常用的首次命中法(First-Fit)。本文将这种 Most-Used 算法的思想进行推广,用它来解决 WDM-TDM 光网络中 RWTA 的问题,即尽量将网络业务量集中在少数的波长和时隙上,从而可以优化网络资源的利用率、降低网络连接的阻塞率。图 2 给出了一个例子来说明这种 Most-Used 思想。该图给出了一个 9 节点的网状光网络拓扑,假设网络链路的波长集为 $W = \{w_1, w_2\}$; 构成每个波长容量的时隙集为 $T = \{t_1, t_2, t_3\}$ 。在某一时刻网络中已存在两个业务连接 A 和连接 B: 连接 A 的路由为 1-2, 分配波长 w_1 , 时隙 t_1 和 t_2 ; 连接 B 的路由为 1-2-5-6, 分配波长 w_2 , 时隙 t_2 和 t_3 。现在网络中又陆续到达 C 和 D 两个连接请求: 连接 C 的源、宿节点分别为 9 和 4, 需要占用两个时隙的容量; 连接 D 的源、宿节点分别为 4 和 6, 需要占用 3 个时隙的容量,假设各连接请求的路由已经确定(如图中箭头所示)。在建立连接 C 时, Most-Used 算法首先为其分配当前被最多链路使用的波长 w_2 (在连接 B 中被 3 条链路占用), 然后再为其分配当前被最多链路使用的时隙 t_2 和 t_3 (在连接 B 中分别被 3 条链路占用)。这样,算法还可以分配波长 w_1 上的 3 个空闲时隙来建立连接 D。如果改用 First-Fit 算法,则根据首次命中中的原则,连接 C 被分配波长 w_1 和时隙 t_1, t_2 , 那么随后到达的连接 D 将无法得到足够的可用资源而被阻塞。

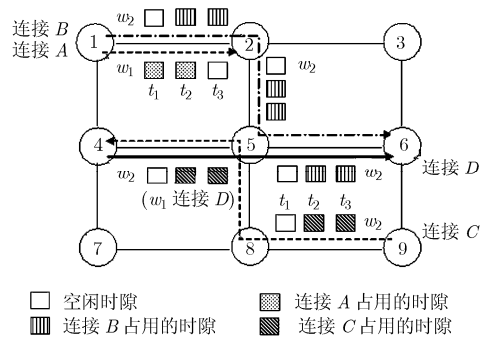


图 2 基于最大使用率的波长和时隙分配

这里对网络中所有的波长和时隙都分别、独立地编号,将网络中正在使用具有某编号的波长(或时隙)的链路数,定义为该波长(或时隙)的使用率(Utilization Ratio, UR)。Most-Used(MU)方法的核心思想就是在进行波长和时隙分配时,优先选取可用的波长和时隙中使用率最大者分配给业务连接,以优化网络资源的利用率。

3 算法描述

为了降低 RWTA 问题的复杂度, 可以将其拆分为路由、波长分配和时隙分配 3 个子问题来解决^[2]。对于动态 RWTA 问题, 相应的算法需要实时地为到达网络的连接请求解决这 3 个子问题。其中, 路由子问题可以使用离线预计算的方法来解决。这样不仅能降低动态 RWTA 算法的时间复杂度, 从而提高算法响应动态连接请求的速度, 还可以降低网络控制的开销^[7]。这里选用 K 最短路算法^[8]预先为网络中的每个节点对之间计算 K 条最短路, 并按照跳数(路由所经过的链路数)从小到大的顺序存储于网络节点的路由表中, 供动态到达的连接请求选择。待路由确定后, 再按照 Most-Used 的原则解决波长和时隙分配两个子问题, 这就是 MUB 算法的主要思想。为便于算法的描述, 假设: 动态到达网络的业务连接请求可以表示为 $r(s, d, n)$, 其中 s 和 d 分别表示连接请求的源、宿节点, n 表示连接的容量需求(即连接所需占用的时隙数); $P = \{p_1, p_2, \dots, p_K\}$ 表示该连接请求的候选路由集; 再引入如下一些描述网络当前状态的相关参量: $C(l)$ 为网络链路 l 的可用容量; $C(p)$ 为业务连接候选通路 p 的可用容量; $C_l(w)$ 为在网络链路 l 上, 波长 w 的可用容量(空闲的时隙数); $C_p(w)$ 为在业务候选通路 p 上, 波长 w 的可用容量; 并做如下定义^[2, 6]:

$$C(l) = \sum_{w \in W} C_l(w), \quad C(p) = \min_{l \in p} [C(l)], \quad C_p(w) = \min_{l \in p} [C_l(w)]$$

基于以上的描述和假设, 图 3(a)给出了 MUB 算法的伪代码, 其中 $\text{set } W$ 表示当前通路上的可用波长子集, $\text{set } T$ 表示当前波长通路(已分配波长的通路)上的可用时隙子集。算法的输入除了连接请求 $r(s, d, n)$ 外, 还需要相关的网络状态信息, 如波长集 W 中各波长的 UR 及时隙集 T 中各时隙的 UR 等。假设这些信息可由光网络中的路由协议(如 OSPF 协议)在路由域内进行可靠的收集和发布, 以确保动态 RWTA 算法的准确性。算法的输出为: 查找的路由 p^* , 分配的波长 w^* 和满足连接所需容量的时隙子集 T^* 。如果其中之一不满足业务需求(如可用路由或波长为空 NULL, 或当前波长通路上的可用时隙数小于 n), 则当前连接请求被阻塞。

从图 3(a)中可以看出: 对于路由选择子问题, MUB 算法选择候选路由集中第 1 条可用的($C(p) > n$)的路由作为 p^* 。这样可以确保尽量使用跳数较小的路由以减少网络资源的消耗。对于波长分配子问题, MUB 算法首先找出可用的($C_p(w) > n$)的波长子集 $\text{set } W$, 然后再根据网络状态信息找到 $\text{set } W$ 中 UR 最大的波长作为 w^* 。对于时隙分配问题, MUB 算法首先在由 p^* 和 w^* 所确定的波长通路上找出可用时隙子集 $\text{set } T$ (可用时隙是在波长通路所经过的各链路上都为空闲的时隙), 如果该子集中的时隙数不小于 n , 则根据网络状态信息对 $\text{set } T$ 中的时隙按照 UR 从大到小的顺序排列, 然后选择前 n 个 UR 最大的时隙组成 T^* 。需要说明的是, 如果在波长与时隙分配过程中不考虑它们的 UR, 总是

选择第一个可用波长和前 n 个可用时隙, MUB 算法就退化成 First-Fit 算法。

MUB 算法在解决波长和时隙分配子问题时, 是按照先波长分配, 再时隙分配的顺序进行的。这样做的缺点是: 没有顾及到解决前一个子问题的结果对解决后续子问题的影响, 往往会造成较高的连接阻塞率。比如, MUB 算法在分配波长时, 虽然可以确保所选波长具有足够的空闲时隙数量, 但无法确保这些时隙在整个路由所经过的各链路上都是可用的。EMUB 算法针对这一问题进行了改进, 将波长和时隙分配两个子问题的解决做了统筹考虑。EMUB 算法的伪代码如图 3(b)所示。

从图 3(b)中可以看出: EMUB 算法在查找到可用波长子集 $\text{set } W$ 后, 并没有立即确定 w^* , 而是将 $\text{set } W$ 中的波长按照 UR 从大到小的顺序排列, 然后从第 1 个波长开始查找可用的时隙子集。若在当前波长上找不到可用时隙子集, 则继续对下一个波长进行查找, 直到遍历波长集 $\text{set } W$ 。若对于某波长 $w_i \in \text{set } W$ 找到可用时隙子集 $\text{set } T(w_i)$, 则由它来确定 T^* , 而相应的波长 w_i 就被确定为 w^* 。EMUB 算法充分考虑了波长与时隙分配两个子问题的内在联系, 克服了 MUB 算法的不足, 提高了算法为业务进行波长和时隙分配的成功率, 从而降低了业务连接的阻塞率。

MUB 和 EMUB 算法的复杂度主要取决于可用路由、波长和时隙的搜索和排序过程。MUB 最多需要搜索约 $(K + |W| + |T|)$ 次, 而 EMUB 算法最多需要搜索约 $(K + |W| \cdot |T|)$ 次。对时隙和波长进行排序的时间复杂度上限分别为 $O(|T|^2)$ 和 $O(|W|^2)$ 。因此 MUB 算法的复杂度可近似为 $O(K + |W| + |T|^2)$, EMUB 算法的复杂度可近似为 $O(K + |W| \cdot |T| + |T|^2 + |W|^2)$ 。此外, 这两种算法都需要在建立或者拆除业务连接后更新网络的状态, 包括 W 和 T 集合中各元素的使用率记录。

4 仿真与数据分析

为了更好地说明所提算法的有效性, 本小节对 MUB 和 EMUB 算法的性能进行了仿真分析, 并将结果与 First-Fit 算法一并做了比较。仿真采用了文献[6]中的国家科学基金网(NSFNET)(如图 4 所示), 并假设: (1)网络中动态连接请求的到达服从参数为 λ 的 Poisson 过程, 连接的持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的负指数分布, 网络的负载定义为 λ/μ (Erlang); (2)网络所有节点间的业务强度相同, 网络节点不具备波长变换和时隙交换能力; (3)取 $|W|=16$ 、 $|T|=16$, $K=3$, 业务连接的带宽需求均匀分布于区间 $[0, |T|]$; (4)网络中不存在业务排队, 被阻塞的连接请求均被视为丢弃, 阻塞的连接请求数占连接请求总数的比率定义为连接阻塞率(Blocking Probability, BP)。

仿真首先在不同的网络负载条件下分析和比较了各算法的阻塞率性能, 所得结果是在模拟了 10^6 次业务请求后使

```

p* = NULL, set W = NULL, set T = NULL // 初始化
for k=1 to K // 路由选择
    if C(pk) ≥ n then p* = pk
    break;
end for
if p* ≠ NULL then
    for i=1 to |W| // 找出所有可用波长
        if Cp*(wi) ≥ n then set W = set W ∪ {wi}
    end for
    if set W ≠ NULL then // 波长分配(Most-Used 法)
        Choose wi ∈ set W with maximum UR as w*
        for j=1 to |T| // 找出所有可用时隙
            if tj is available on w* along all links of p*
                then set T = set T ∪ {tj}
        end for
        if |set T| ≥ n then // 时隙分配(Most-Used 法)
            {
                Arrange the timeslots of set T in order of UR
                Choose the first n timeslots in set T as T*
            };
        else
            Timeslots are not available, r(s,d,n) is blocked.
        else
            Wavelength is not available, r(s,d,n) is blocked.
        else
            Route is not available, r(s,d,n) is blocked.
    
```

(a) MUB 算法

```

// 初始化
p* = NULL, set W = NULL, set T = NULL, T* = NULL
Choose p* as MUB algorithm does // 路由选择
if p* ≠ NULL then // 找出所有可用波长
    Get set W on p* as MUB algorithm does
    if set W ≠ NULL then // 波长排序(Most-Used)
        Arrange the wavelengths of set W in order of UR
        for i=1 to |set W|
            // 对 wi ∈ set W 得到它的可用时隙集合 set T(wi)
            Get set T(wi) for wi as MUB algorithm gets set T
            if |set T(wi)| ≥ n then
                { // 时隙分配和波长的确定(Most-Used)
                    Arrange the timeslots of set T(wi) in order of UR
                    Choose the first n timeslots in set T(wi) as T*
                    Decide current wavelength wi in set W as w*
                    break;
                };
        end for
        if T* = NULL then r(s,d,n) is blocked.
    else
        Wavelength is not available, r(s,d,n) is blocked.
else
    Route is not available, r(s,d,n) is blocked.
    
```

(b) EMUB 算法

图3 所提算法的伪代码

用统计方法得到的(如图5所示)。从该图中可以看出：MUB算法的阻塞率性能优于 First-Fit 算法，而 EMUB 算法的阻塞率性能又明显优于这两种算法。这是因为 MUB 算法在进行波长和时隙分配时，尽量将网络业务量整合到少数的波长和时隙上，从而可以留出更多的网络资源来接纳后续的连接请求。与 First-Fit 算法相比，MUB 算法提高了网络资源的利用率，从而降低了动态业务的阻塞率。而 EMUB 算法又在 MUB 算法的基础上进行了改进，统筹考虑波长和时隙的分配，提高了算法为业务连接分配波长和时隙的成功率，从而进一步降低了网络连接的阻塞率。

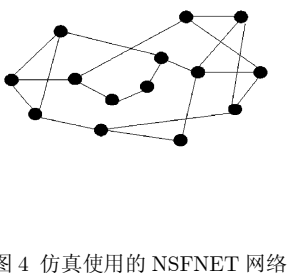


图4 仿真使用的 NSFNET 网络

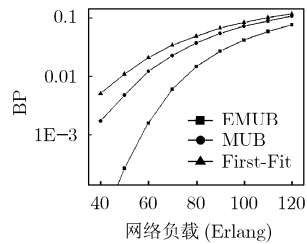


图5 算法的阻塞率性能分析

为了进一步全面地评估算法的性能，仿真还分别分析了波长数 $|W|$ 和时隙数 $|T|$ 的变化对算法性能的影响，结果分别如图6和图7所示。从这两张图中可以看出：当网络负载一定时(设定为 60Erlang)，各算法的连接阻塞率都随着网络波长数或时隙数的增加而降低；但无论网络的波长数、时隙数如何变化，EMUB 算法都具有最优的性能。这是因为网络中的可用资源(波长、时隙)越多，网络所能支持的业务连接数就越多。而在相同数量的网络资源条件下，EMUB 算法能更好地对网络资源进行优化分配，提高了网络资源的利用率，

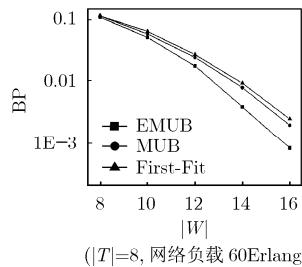


图6 网络波长数 $|W|$ 对算法性能的影响

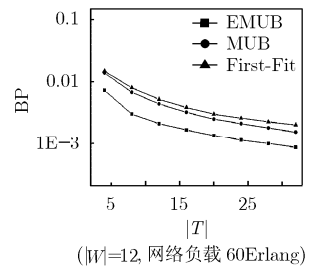


图7 网络时隙数 $|T|$ 对算法性能的影响

从而降低了连接的阻塞率。对这两幅图进行比较还可以发现:图7中的BP- $|T|$ 曲线比起图6中的BP- $|W|$ 曲线下降趋势更为平缓。其原因在于:仿真设定了业务连接的带宽需求在区间 $[0, |T|]$ 上均匀分布,所以当网络时隙数 $|T|$ 增大时,业务的平均带宽需求也会增大,这在一定程度上减缓了连接阻塞率的降低。

最后仿真还分析了候选路由数 K 的取值对算法性能的影响,结果如图8所示。从图中可以看出:无论 K 取何值,3种算法性能的相对优劣顺序与前面的结论一致,而且当网络负载、波长数和时隙数一定时,在一定范围内增大 K 值,有助于降低业务连接的阻塞率。这是因为当 K 增大时,连接请求可选的候选路由增多,增大了业务连接找到可用资源的机会。但是当 K 增加到一定程度($K=3$ 以后),继续增大 K 值各算法的性能没有明显改进。其原因在于:虽然候选路由集中的路由随着 K 的增大而增多,但排列在候选路由集中位置靠后的路由跳数较大,而使用大跳数的长路由会增加网络资源的消耗,导致更多的连接被阻塞。仿真还发现当 K 值超过 $K=7$ 时,算法的阻塞率性能反而有劣化的趋势,因此 K 值不宜取得过大。

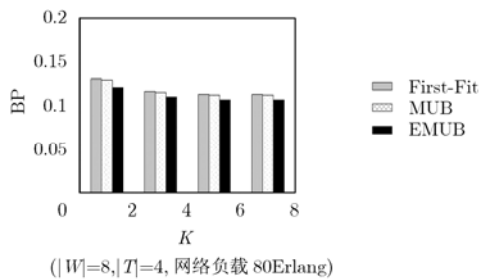


图8 候选路由数 K 对算法性能的影响

5 结束语

利用TDM技术将传统WDM光网络中的一个波长的容量拆分成若干个时隙子信道,使得网络中的多个业务连接可以共享同一个波长的容量,从而可以进一步提高网络资源的利用率。在这样一个基于WDM-TDM技术的光网络中,动态RWTA问题不仅是建立网络连接所需要解决的一个核心问题,同时也扮演着优化网络资源利用率的重要角色。文章通过将传统WDM中Most-Used波长分配算法的思想进行推广,并做了必要的改进,提出了一种可用于解决WDM-TDM光网络中动态RWTA问题的算法——EMUB算法。算法性能的仿真结果表明:该算法能够有效地优化网络资源的利用

率,降低网络连接的阻塞率,对WDM光网络的优化设计具有一定的参考价值。

由于EMUB算法的实现需要实时地获得网络波长、时隙的利用率信息,这会增加网络控制的开销。下一步将针对这一问题进一步研究动态RWTA算法。

参考文献

- [1] Srinivasan R and Somani A K. A generalized framework for analyzing time-space switched optical networks [C]. 2001 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'01). Anchorage, Alaska, USA. April 2001, Vol. 1: 179-188.
- [2] Wen B, Shenai R, and Sivalingam K. Routing, wavelength and time-slot-assignment algorithms for wavelength-routed optical WDM/TDM networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(9): 2598-2609.
- [3] Zang H, Jue J P, and Mukherjee B. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks [J]. *Optical Networks Magazine*, 2000, 1(1): 47-63.
- [4] Vishwanath A and Liang W. On-line routing in WDM-TDM switched optical mesh networks [J]. *Photon Network Communication*, 2006, 12(11): 287-299.
- [5] Yang W and Hall T J. Distributed dynamic routing, wavelength and timeslot assignment for bandwidth on demand in agile all-optical networks [C]. 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE '06), Ottawa, Canada. May 2006: 136-139.
- [6] Lee Peiyuan, Gong Yongtao, and Gu Wanyi. Adaptive routing and resource assignment in WDM-TDM networks with multi-rate sessions [C]. *Proceedings of SPIE Vol.5626*. Bellingham. February 2005: 593-601.
- [7] Sivakumar M and Sivalingam K M. A routing algorithm framework for survivable optical networks based on resource consumption minimization [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(7): 1684-1692.
- [8] Yen J. Finding the k shortest loopless paths in a network [J]. *Management Science*, 1971, 17(11): 712-716.

项 鹏: 男, 1980年生, 讲师, 博士, 研究方向为下一代光网络的优化设计和生存性技术。

王 荣: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光通信。