

WDM 网状网自适应动态流量疏导算法

孙素云,唐林燕

(广东轻工职业技术学院 计算机系,广州 510300)

(sunsy81@126.com)

摘要:针对 WDM 网状网络中的动态流量疏导问题,基于分层辅助图网络模型,提出了一个自适应动态流量疏导算法,根据不同的业务请求和网络疏导能力,启动相应的流量疏导策略,达到合理地分配网络资源,从而降低网络平均阻塞概率的目的。仿真结果表明,提出的算法可以有效地改善网络性能。

关键词:光纤网络;波分复用;流量疏导;网状网;动态流量

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Adaptive algorithm for dynamic traffic grooming in WDM mesh networks

SUN Su-yun, TANG Lin-yan

(Department of Computer, Guangdong Industry Technical College, Guangzhou Guangdong 510300, China)

Abstract: Aiming at the problem of dynamic traffic grooming in WDM mesh network, the paper presented an adaptive algorithm for dynamic traffic grooming based on layered auxiliary graph network model. According to different traffic requests and grooming capabilities in the current network state, the algorithm applied corresponding strategy of traffic grooming for allocating network resource exactly, in order to reduce average network block probability. The simulation results show that the network performance can be improved significantly by the proposed algorithm.

Key words: optical network; Wavelength Division Multiplexing (WDM); traffic grooming; mesh network; dynamic traffic

0 引言

随着波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)和光交叉连接(Optical Cross Connection, OXC)技术的发展,光通信网络具有更大的带宽和灵活性,目前每个波长信道的传输容量已经达到 40 Gbps(OC-768)^[1]。在 WDM 光网络中,由于大部分的业务流量请求带宽粒度为 155 Mbps(OC-3)到 622 Mbps(OC-12)之间的低速业务流量请求^[1],如果为每个低速业务请求分配一个独立的波长信道,势必会造成网络资源的极大浪费。为了有效利用网络资源,需要利用流量疏导^[2-9]技术将多个低速率的业务流汇聚到高容量的光路中进行传输,即通过有效的复用、解复用及交换等处理,提高网络资源(波长或收发器等)的利用率。在 WDM 网络中,光纤链路通过光交叉连接器连接构成了光网络的物理拓扑,而连接各节点的光路构成了光网络的虚拟拓扑,所有的连接请求在虚拟拓扑上进行转发,因此 WDM 网络流量疏导问题其实质就是一个基于物理拓扑和虚拟拓扑的两层路由问题^[2]。

1 研究基础

1.1 相关研究

根据连接请求预先给定或者随机到达,网络业务流量可以分为静态业务流量和动态业务流量。对于动态流量疏导问题,由于连接请求随机达到或离开,研究策略通常是给每次业务请求分配最小的网络资源,也暗示了随后的连接请求将有更多的资源可以利用,因而,网络中业务请求阻塞概率降到最

小^[4]。文献[3]将流量疏导问题转化为整数线性规划(Integer Linear Planning, ILP)问题,利用 CPLEX 软件进行优化求解,但由于 ILP 随着网络规模增大,其计算复杂度增加,因此,通过提出 MST 和 MRU 两个启发式算法,对静态流量疏导问题进行近似求解。文献[4-7]提出了一种新颖的辅助图模型来描述网络资源状态,通过使用不同的边来表示相应的资源约束,并通过给这些边设置不同的权值得到不同的疏导策略。为了降低计算复杂度,文献[2]对辅助图模型进行扩展,在考虑网络节点的波长转换能力的条件下,提出了一种链路捆绑的辅助图模型。文献[8]针对文献[2]中收发器浪费的问题,综合考虑复杂度和资源优化的问题,提出了一种节约收发器的 TSAG 模型。文献[9]基于疏导优于新建、单跳优于多跳的流量疏导策略,在考虑疏导业务均衡分配的基础上,提出了动态流量疏导算法解决动态业务环境下的流量疏导问题。

1.2 研究方法

文献[4-6]通过设置不同的边权值得到不同的疏导策略,但未考虑可用网络资源的动态变化。文献[7]通过考虑网络可用波长链数目与可用收发器的比率 δ ,在流量疏导中根据 δ 值自动启动不同的疏导策略。仿真结果表明,该算法的疏导性能比其他算法显著改善,但是我们通过研究发现,当网络规模很大的时候,计算 δ 时间复杂度太大,因此,在实际网络中可能难以应用。另外,我们通过研究发现,在网络疏导能力出现两种极端的情况下,即:当所有节点均无疏导能力(Non-grooming OXC)时,通常使用最小跳步算法(MinTH)进

收稿日期:2008-09-11;修回日期:2008-10-27。 基金项目:广东省自然科学基金资助项目(8151030007000002)。

作者简介:孙素云(1977-),女,湖南邵阳人,讲师,硕士,主要研究方向:光通信网络、分布式计算;唐林燕(1962-),女,湖南邵阳人,教授,硕士,主要研究方向:数据库技术。

行路由^[6];当所有节点全部有完全的疏导能力(Full-grooming OXC)时,通常使用最小波长链算法(MinWL)^[6]。通过对动态流量疏导问题的仔细研究,我们发现网络节点的疏导能力是一个制约疏导性能的关键因素,在实际的网络中,不同时刻网络中节点的疏导能力可能不尽相同,因此,为了提高网络资源的利用率,在不同的时刻需要使用不同的疏导策略,基于这个思想,我们提出了一个自适应动态流量疏导算法,达到合理的利用网络资源,提高网络性能的目的。

2 流量疏导结构

光交叉连接(OXC)节点中的收发器个数表示每个节点的疏导能力。一个收发器形成一个疏导端口,收发器由一个发射器和一个接收器组成,发射器负责将多个低速的流量聚合到同一条光路上,接收器负责解析出光路上的低速流量。对于一条有疏导能力的光路,在光路的源端有一个发射器,目的端有一个接收器,这样才能在一条光路上传送多个流量^[8]。

OXC 节点结构一般由于波长交换单元(W-Fabric)和疏导单元(G-Fabric)两部分组成,在 W-Fabric 中实现波长交换,在 G-Fabric 实现子波长粒度的低速流量交换。由于 G-Fabric 制作工艺较复杂且价格昂贵,所以目前网络中的 OXC 节点不可能都具有相同的疏导能力。根据 OXC 的疏导能力,可将 OXC 分为四种类型,即:无疏导节点、单跳疏导节点、多跳部分疏导节点和多跳完全疏导节点,其中无疏导节点和单跳疏导节点都无疏导能力,两者的唯一区别在于单跳疏导节点有低速流端口。图1描述了多跳部分疏导 OXC 的结构,当该图中无 G-Fabric 单元时即为无疏导能力节点结构,当无 W-Fabric 单元则成为多跳完全疏导节点结构。

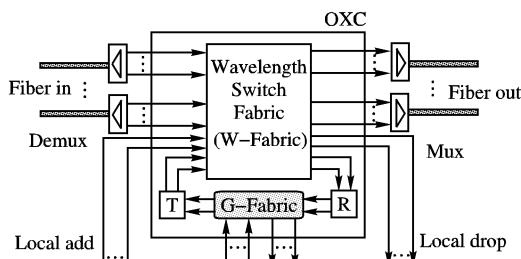


图1 流量疏导光交叉连接节点结构^[4]

进入 OXC 节点的流量可分为本地流量和旁路流量。本地流量一般是指从其他节点流向该节点终止的流量,或由本地产生的业务流量。旁路流量是指既不在该节点终止,也不由该节点生成的流量(仅经过该节点的流量)。本地产生的流量可以通过 G-Fabric 或 Local add 通道上载到该节点,本地终止的流量可以通过 G-Fabric 或 Local drop 通道从该节点下载到本地。从其他节点流向该节点的旁路流量在该节点进行处理时,则需要根据当时节点的疏导能力和网络的疏导策略决定:当该节点无疏导端口时,则它仅可以通过 W-Fabric 直接交换到相应的输出端口,此时即使该旁路流量大小为 OC-3,也需要独占一个波长信道;当该节点有疏导端口,则它可以进入 G-Fabric 进行交换,再和其他的旁路流量或本地流量聚合到同一个波长信道上,然后通过 W-Fabric 交换到相应的输出端口。采用第二种方式的好处在于可以让光路承载更多的流量,从而使网络能支持更多的业务连接。由于目

前节点的疏导端口价格昂贵,使网络中的疏导能力受到限制,因此如何利用网络中的疏导能力,将直接关系到网络的业务数据传输性能。

3 流量疏导辅助图模型

通过对图1流量疏导结构的分析可以知道,在流量疏导中主要涉及的网络资源为疏导端口、收发器和波长,因此,进行流量疏导的主要方法是控制这些网络资源的合理分配,以有效地利用网络资源,达到提高网络吞吐量或降低网络阻塞概率的目的。文献[4-8]利用分层图模型描述网络资源状态,通过使用不同的边来表示相应的资源约束,为控制这些网络资源的合理分配提供了很好的依据。本文引用文献[4]的分层图模型,阐述如何利用分层图中的边表示网络资源的状态。对于一个物理网络,分层图模型将它分成一个 $3 + W$ 层,每个节点将它分为输入(I)与输出(O)两部分。如图2(a)是一个3个节点的物理拓扑,其中,节点0是一个多跳部分疏导节点,节点1和2是一个单跳疏导节点,每一条边表示一个可用波长;图2(b)是一个已建立的虚拟拓扑,每一条边表示一条已建立的光路。按照分层图的思想,将当前的网络状态表示为如图3所示的分层图模型。

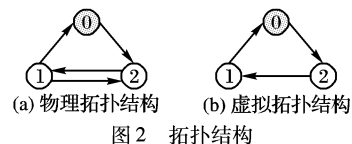


图2 拓扑结构

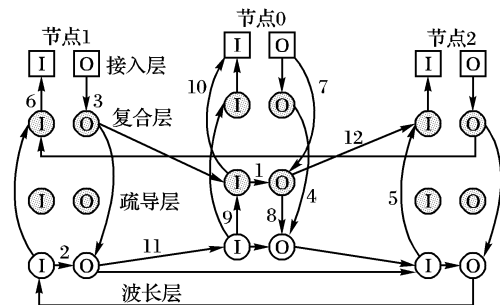


图3 分层辅助图网络模型

如图3所示,分层图从上至下依次为接入层、复合层、疏导层和波长层。接入层表示连接请求的起点和终点(连接IP路由器或ATM交换机等)。复合层表示本地低速流量请求不经过 G-Fabric 而通过如图3所示的 Local add 或 Local drop 直接进入 W-Fabric。疏导层表示节点的疏导能力,即 G-Fabric 疏导端口的数目。波长层表示节点的 W-Fabric 交换能力和网络链路上可用波长信道的数目。分层图模型通过边来描述网络资源状态,不同类型的边反映了网络当前的资源状态,限于篇幅,关于边的详细描述请参见文献[4]。

4 自适应动态流量疏导算法(ADTG)

动态连接请求都是随机到达和离开,由于资源事先已经配置在网络中,在网络运行的时候是不可改变的,因此,动态流量疏导问题的目标是使每个请求使用的网络资源最小,这暗示了未来的连接请求阻塞率最小。为了达到这个目标,疏导算法必须为连接请求提供有效的路由。例如:在图3的网络状态下,节点0有疏导能力,节点1和2无疏导能力,节点对(1-0)和节点对(0-2)已建立光路,这两条光路的剩余带宽

为 OC-6。此时,节点 0 产生 (0-2) 业务请求,其请求带宽为 OC-12,节点 1 产生 (1-0) 和 (1-2) 的业务请求,请求带宽分别为 OC-3 和 OC-12。当使用最小跳步数 (MinTH) 疏导算法时,由于 (1-2) 和 (1-0) 都有剩余波长,则直接建立 (1-2) 和 (1-0) 两条新的光路完成路由,节点 0 产生业务通过建立 (0-2) 的光路路由。当使用最小波长链 (MinWL) 疏导算法时,由于节点 0 有疏导能力,则只要建立 (1-0) 光路,即节点 1 产生 (1-0) 和 (1-2) 的业务,通过建立的 (1-0) 光路路由到节点 0,然后利用节点 0 的疏导端口将 (1-0) 的流量通过 G-Fabric 本地下载。由于 (1-2) 的流量对于节点 0 来说是旁路流量,可以和节点 0 产生的本地流量 (OC-12) 通过 G-Fabric 交换一个波长信道上,然后通过疏导层到波长层的发射边使用 (0-2) 波长链路上一个波长进行传输。在如图 3 的网络状态和当前的连接请求条件下,采用 MinTH 疏导算法消耗的网络资源为 (1-0)、(1-2) 和 (0-2) 链路上的一个波长和 3 个收发器;而采用 MinWL 疏导算法消耗的网络资源则为 (1-0) 和 (0-2) 链路上的一个波长和 2 个收发器以及节点 0 上的一个疏导端口。通过这个简单的实例分析可知,不同的疏导策略使用了不同的网络资源,采用 MinTH 算法虽然可以节省节点 0 的疏导端口,但是必须消耗更多的波长,而采用 MinWL 算法虽然可以节省波长,但是必须消耗更多的疏导端口。假如当前网络有足够的疏导能力,那么采用 MinWL 算法将是一个合理的资源分配策略,但是,如果当前网络疏导能力受限或无疏导能力,那么采用 MinTH 算法则成为合理的资源分配策略。因此,在动态流量疏导中,网络的疏导能力是一个制约疏导性能的关键因素,如果动态流量疏导算法能根据网络资源的分布状态,合理地利用网络资源,必将得到理想的流量疏导效果。

通过上述的动态流量疏导分析,基于如图 3 所示的分层图模型,我们提出了 ADTG 算法用于解决动态流量的疏导问题。在使用该算法之前首先对网络进行初始化配置,包括网络拓扑、节点和链路的配置,然后构建当前网络资源状态下的分层图网络模型 G 。业务连接请求例如: (s, d) 是从节点 s 的接入层输出端口出发到节点 d 的接入层输入端口输入,连接请求的路由路径经过分层图模型 G 中的边,并根据网络资源状态,自动选择代价 (边权值的总和) 最小的边作为路由路径。

ADTG 算法的输入:使用 $T(s, d, b)$ 来表示一个流量请求,其中, s 和 d 分别表示流量的源节点和目的节点, b 表示请求流量带宽;动态流量疏导端口阈值 α , 分层图 G 上边的权值 (见文献[6]);使用 T_i 表示节点 i 的发射器个数, R_j 表示节点 j 的接收器个数, W_{ij} 表示从节点 i 到节点 j 链路上的波长数,每条光纤上波长总数为 W , C 表示一个波长信道的容量,假设所有流量需要的带宽 b 不大于 C 。

输出: $T(s, d, b)$ 的路由以及更新后的分层图模型 G 的状态。

ADTG 算法的描述如下:

步骤 1 根据流量请求的带宽 b , 删除分层图模型 G 上小于带宽 b 的光路。

步骤 2 计算网络节点的平均疏导端口值 Ψ , 比较 Ψ 和 α 大小, 如果 Ψ 大于 α , 那么启动 MinTH 策略, 否则使用 MinWL 策略。

步骤 3 在分层图 G 上查找从源节点 s 接入层的输出端口到目的节点 d 接入层的输入端口最优路径, 即代价最小的路由路径 L , 如果查找路径失败, 则阻塞连接请求 T , 并恢复步骤 1 删除的光路。

步骤 4 如果最优路径 L 上含有发射边, 则就有一条或多条光路需要建立, 光路起始于节点 (例如: m) 的发射边, 然后经过随后的波长边, 终止于节点 (例如: n) 的接收边, 则在分层图模型 G 添加一条光路 (例如: $m-n$)。

步骤 5 将流量 T 转发到路径 L 上中的已有光路和新建的光路上。

步骤 6 根据下面规则更新分层图模型 G 的状态:

1) 对于每一条新建的光路, 在 G 中的光路层添加一条光路边, 并根据已分配的带宽更新其剩余容量 ($C-b$), 同时更新 G 上路径 L 上经过的其他光路上的容量, 即将相应的光路容量减少 b , 若光路的空闲带宽为 0, 则从 G 中删除对应的光路;

2) 路径 L 每经过一条发射边, 对应节点的发射器个数 T_i 减 1, 每经过一条接收边, 对应节点的接收器个数 R_j 减 1, 每经过一条波长边, 对应链路上的可用波长数 W 减 1, 若对应的值减少后为 0, 则删除相应的波长边。

步骤 7 返回路由路径 L 以及更新后的分层图模型 G 的状态。

当某一个连接请求 $T(s, d, b)$ 传输任务结束时, 则从网络中删除流量 T , 并按照步骤 6 相反的操作更新分层图模型 G 的状态。ADTG 算法可以根据当前的网络状态转发一个特定的流量请求, 并及时更新网络资源状态, 使分层图模型 G 始终反映当前的网络资源状态, 并且 ADTG 算法能根据疏导端口阈值 α 自动启动相应的疏导策略 (不同的疏导策略为 G 上的边赋予不同的权值), 达到合理利用网络资源, 提高网络疏导性能的目的。当网络节点无波长转换能力时, ADTG 算法时间复杂度为 $O(W^2 N^2)$, 当网络节点有波长转换能力时, ADTG 算法时间复杂度为 $O(N^2)$, 其中, W 为光纤上波长数, N 为网络节点数。因此 ADTG 算法不仅具有较好的疏导性能, 而且还具有较低的时间复杂度。

5 仿真实验与分析

5.1 实验说明

我们使用 OPNET 网络仿真器仿真一个动态流量网络环境, 对本文提出的 ADTG 算法进行了仿真实验。实验采用由 14 个节点、21 条链路构成的 NSFNet 网络拓扑结构 (如图 4 所示)。假设网络中的每个节点具有相同的疏导能力, 即每个多跳部分疏导 OXC 节点的疏导端口数 g 相同, 网络中的节点具有波长转换能力, 节点的发射器 T 和接收器 R 个数均相等, 每条光纤上的波长数为 W , 每个波长的容量为 OC-192 (10 Gbps)。实验中节点间的业务流量采用文献[5]的方法生成, 即一个连接请求的带宽粒度可以是 OC-1, OC-3, OC-12, OC-48 和 OC-192。各连接请求均匀的分布在所有节点对之间, 连接请求流量到达顺序服从泊松分布, 连接持续时间服从负指数分布。爱尔兰 (Erlang) 负载定义为连接到到达率乘以平均连接持续时间。由于各连接请求带宽不同, 所以使用平均带宽阻塞概率, 即平均阻塞的业务流量和总的网络业务流量比值

(%)作为网络性能评价指标。

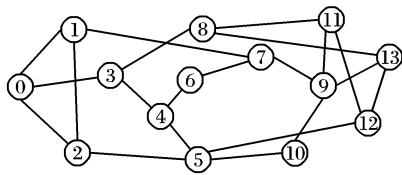


图4 NSFNet网络拓扑结构

5.2 实验结果分析

为了比较本文提出的 ADTG 算法疏导性能,分别对文献[6]提出的 MinTH 和 MinWL 算法以及文献[7]提出的 AGP 算法(δ 取值为 1.2),在三种不同的网络资源配置情况下,即:a) $W = 16, T = R = 16, g = 6, \alpha = 1.3$;b) $W = 16, T = R = 40, g = 12, \alpha = 2.3$;c) $W = 16, T = R = 32, g = 8, \alpha = 1.7$,其中 α 是在相应网络状态下的最优自适应疏导阈值,实验结果如图5所示。

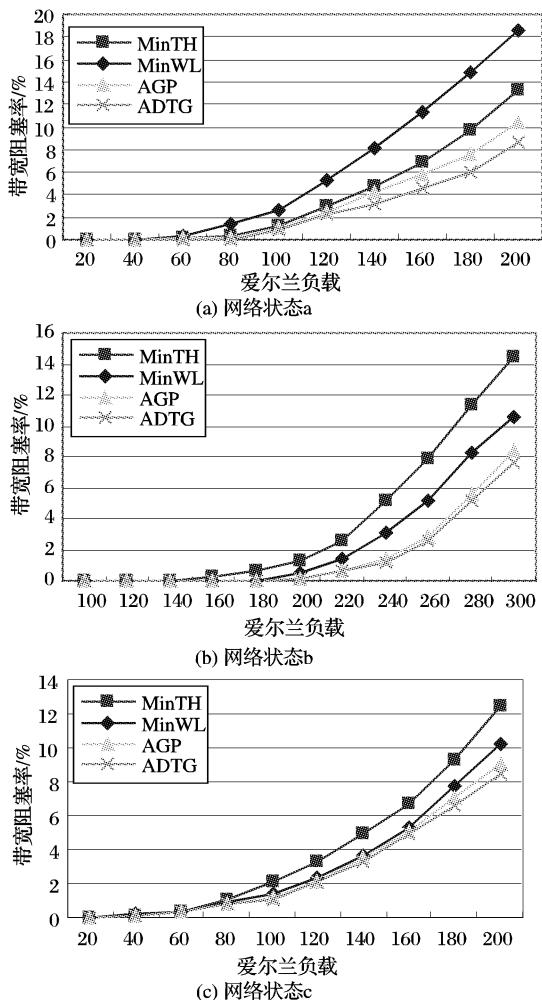


图5 负载与带宽阻塞率

如图5(a)所示,在网络资源配置a状态下,MinWL算法的带宽阻塞率最大,其原因主要是在a状态下,网络疏导端口较少但波长资源相对收发器较多,由于MinWL算法总是以使用最小波长链进行路由,因此,一些先到达的业务请求尽可能利用了网络的疏导能力,导致本来稀缺的疏导端口过早地被耗尽,使得后来到达的低速请求不得不通过建立新的光路进行路由,导致网络带宽阻塞率增大;而MinTH算法总是以最小跳步数路由,减少了疏导端口的使用,所以在a状态下使用MinWL算法疏导性能相对较差。如图5(b)所示,在网络资

源配置b状态下,MinTH算法的带宽阻塞率最大,其他三个算法带宽阻塞率相差较小。主要是在b状态下,网络疏导端口较多但波长资源相对较小,MinTH算法总是以最小跳步数路由,而不能利用网络的疏导能力尽量减少建立新的光路,而MinWL算法则充分利用了网络的疏导能力,因此,在b状态下使用MinTH算法网络性能相对较差。在网络资源配置比较合理的情况下,如图5(c)所示,四个算法的带宽阻塞率相差较小。从图5可以看出,ADTG和AGP自适应算法不管在什么网络状态下,都表现较好的网络疏导性能,说明自适应算法能根据网络资源状态合理利用网络资源。同时,随着网络负载增大,不管在什么状态下,ADTG算法的带宽阻塞率较低;另外,运行ADTG算法的时间比AGP算法大大减少,说明了本文提出的算法不仅能根据网络状态合理利用网络资源,降低网络带宽阻塞率,而且具有较低的时间复杂度。

6 结语

本文通过对动态流量问题进行研究,抓住影响网络疏导性能的关键因素,基于流量疏导的分层辅助图模型,提出了自适应动态流量疏导ADTG算法。针对实际网络中不同时刻节点疏导能力的差异,通过调整不同的网络状态下自适应疏导阈值,根据不同的业务连接请求,自动启动相应的流量疏导策略,达到合理地分配网络资源,降低网络带宽阻塞率的目的。仿真结果表明,在不同的网络资源状态下,ADTG算法既能充分考虑网络的疏导能力,降低网络带宽阻塞率,又能降低疏导算法的时间复杂度,达到了合理利用网络资源和改善光纤WDM网络疏导性能的目的。

参考文献:

- [1] RAMASUBRAMANIAN S, SOMANI A K. MICRON - A framework for connection establishment in optical networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(2): 473 - 485.
- [2] WANG YAO, RAMANURTHY B. A link bundled auxiliary graph model for constrained dynamic traffic grooming in WDM mesh networks[J]. IEEE Journal Selected Areas in Communications, 2005, 23(8): 1542 - 1555.
- [3] ZHU KEYAO, MUKHERJEE B. Traffic grooming in an optical WDM mesh network[J]. IEEE Journal Selected Areas in Communications, 2002, 20(1): 122 - 133.
- [4] ZHU KEYAO, ZHU HONGYUE, MUKHERJEE B. Traffic engineering in multi-granularity heterogeneous optical WDM mesh networks through dynamic traffic grooming[J]. IEEE Network, 2003, 17(2): 8 - 15.
- [5] ZHU KEYAO, ZHANG HUI, MUKHERJEE B. A comprehensive study on next generation optical grooming switches[J]. IEEE Journal Selected Areas in Communications, 2003, 21(7): 1173 - 1186.
- [6] ZHU HONGYUE, ZHANG HUI, ZHU KEYAO, et al. A novel generic graph model for traffic grooming in heterogeneous WDM mesh networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(2): 285 - 299.
- [7] ZHU HONGYUE, ZHANG HUI, ZHU KEYAO, et al. Dynamic traffic grooming in WDM mesh networks using a novel graph model[J]. SPIE Optical Networks Magazine, 2003, 4(3): 65 - 75.
- [8] 姚华雄, 杨宗凯, 欧亮, 等. WDM网状网络中静态流量疏导的收发器节约辅助图模型[J]. 计算机科学, 2007, 12(12): 2129 - 2134.
- [9] 黄善国, 罗沛, 薄明霞. WDM网状网中的动态流量疏导策略[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(2): 26 - 29.