

基于节能的绿色光网络路由算法的研究

郭爱煌^{1,2} 冯圣毅^{1*} 薛琳¹ 张剑¹

(¹ 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804
² 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 在传统的网络路由算法中,一般采用最短路径算法进行路由选路,最短路径算法以节点间的距离为权重,计算一条由源节点至目的节点的权重最小的路径以完成路由。最短路径算法虽然最小化了距离长度代价,却没有考虑能耗问题,所以使用最短路径算法所得出路径的能耗并不一定是最小的。针对这一问题,提出一种新型的综合性绿色路由算法,设定能耗作为节点间的权重,融合光旁路及业务量疏导,同时考虑路由和波长分配(RWA)问题,将完成每个业务所需要的能耗最小化,实现节能。仿真结果表明,与最短路径算法相比,绿色路由算法在较大规模网络中能够节省约 40% 的能耗,节能效果相当显著。

关键词 光通信;绿色路由算法;光因特网网络;光旁路;业务量疏导

中图分类号 TN915 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0406002

Research on Power Efficient Routing Algorithm in Green Optical Networks

Guo Aihuang^{1,2} Feng Shengyi¹ Xue Lin¹ Zhang Jian¹

(¹ College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China
² State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract In traditional routing algorithms, shortest-path algorithm (SPA) is often used. The distance between two nodes is defined as weight, and a path from the source node is selected to the destination node which has the minimum weight to finish routing. Although SPA minimizes the distance cost, it doesn't consider the issue of energy consumption. So the routing path generated by SPA may not have the minimum energy cost. To solve this problem, a new integrated green routing algorithm is proposed. This algorithm defines energy consumption as the weight of each link. It combines optical bypass and traffic grooming and also considers routing and wavelength assignment (RWA) problem in order to minimize the energy cost of every routing process, which leads to energy-saving. The result of simulation shows that compared with SPA, green routing algorithm can save about 40% energy consumption in large-scale networks. Its energy-saving effect is considerable.

Key words optical communications; green routing algorithm; IP over WDM network; optical bypass; traffic grooming

OCIS codes 060.4251; 060.4265; 060.4510

1 引 言

在目前的通信网络中,光因特网(IP over WDM)是一种简单、通用且高效的体系结构,这种结构直接在光网上运行的因特网,同时利用了网络协议(IP)技术和基于波分复用(WDM)的光网络技

术,路由器和交换机可通过光纤直接互连或连接至光层,使得 IP 分组数据包能够基于光层建立路由,非常适合超大型的 IP 骨干网。IP over WDM 充分利用光纤通信技术所带来的庞大带宽资源和高速交换机的强大交换能力,合理地在 IP 层与光层之间实

收稿日期: 2011-10-31; **收到修改稿日期**: 2011-12-06

基金项目: 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验开放课题。

作者简介: 郭爱煌(1964—),男,博士,教授,主要从事宽带无线通信、宽带光纤通信、信号与信息处理等方面的研究。

E-mail: tjgah@tongji.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: adamfsy@126.com

现服务质量(QoS)、流量工程和网络管理等优化配置,同时减少了网络各层间的冗余部分,从而提高了传输效率,且节省了设备管理、操作和维护的相关费用。因为 IP over WDM 技术具有系统传输容量大、传输距离长、业务接口丰富、组网方式及业务调度能力灵活、保护能力完善等许多优点,它已成为下一代网络(NGN)的主要支撑技术之一。

由于越来越多的网络运营商开始将 IP over WDM 作为承载 IP 业务的主要解决方案,国内外的许多研究人员及机构也开始了有关 IP over WDM 网络节能问题的研究与探讨。总的来说,已有关于绿色光网络的研究内容主要包括:能量感知(Energy aware)骨干网的设计^[1,2]、网络非高峰时段自动关闭多余链路和节点以降低能耗^[3]、基于最小能耗的动态路由设计^[4~6]等几个方面,整体上是围绕节能设计与设备更新这两个方面展开的。然而,对于同时考虑光层和电层,并将现有主要节能手段(如光旁路、业务量疏导和休眠等)有机结合的综合性节能方法的研究仍未广泛展开。

针对上述问题,提出并研究了一种新型的综合性绿色路由算法,将各节点间的权重设置为能耗,结合光旁路技术及业务量疏导,并同时考虑路由和波长分配问题,将完成每个业务所需要的能耗最小化,从而实现节能。最后对所提出的算法进行仿真,以验证其节能效果。

2 IP over WDM 网络节能方法

2.1 光旁路

光旁路的基本思想是:被转换成光信号的业务全部在光域中进行传输,旁路所有中间节点的电层路由器,从而减少对电层路由器的使用,以达到节能的效果^[7]。在传统的未使用光旁路的网络中,所有进入某一节点的光路都必须终结,换句话说,光路所携带的业务量都是通过途经节点的 IP 路由器进行处理和转发的。而使用光旁路就允许业务通过一条直连的光路直接穿过所有中间节点。虽然这种方法需要光节点能够智能完成对光旁路的判断,但是却能够极大地节省 IP 路由器的接口数量^[8]。

虽然光旁路能有效地降低 IP over WDM 网络的能耗,但每一条光路都需要一对光交叉连接(OXC)或可重构型光分复用设备(ROADM)接口,这就造成了接口数量的紧张。一旦业务量较多,很有可能导致 OXC/ROADM 的接口不够使用,从而造成业务连接请求的阻塞。

2.2 业务量疏导

业务量疏导的主要目的为:在一个给定各种配置内容的网络中,为多个低速业务的连接建立一条光路进行统一传输,以有效地传输这些业务量,同时优化网络整体的性能,其思想源于复用^[9~13]。业务量疏导问题可以看作是一个支持为多业务分配多个波长的路由和波长分配(RWA)问题,通常的做法是先为该连接请求进行路由选路,然后再分配波长^[14,15]。

业务量疏导可解决带宽碎片问题,同时节省了系统的开支和能耗,但它同样也存在着一些缺点。由于业务量疏导需要利用中间节点的电层路由器,所以势必会增加系统的电/光、光/电转换次数,而电层设备所消耗的能耗相比光层设备来说是十分可观的。同时,为了充分利用已有的光路,业务量疏导可能会选择距离相对较长的路由。这就造成了业务量疏导未必每次都能带来最优化的节能效果。

3 IP over WDM 能耗模型

3.1 能耗参数的决定

IP over WDM 网络中的能耗主要来自两大部分:1) IP 业务层设备,如路由器、交换机;2) WDM 光层设备,如光收发机、光放大器。为了制定网络能耗模型,需要将能耗化为节点间链路的权重,也因此需要各个设备实际的能耗数据。由于 IP over WDM 网络所使用的设备诸多,并没有一个统一的标准,所以决定采用文献^[10]中所使用的数据。该文献在研究时所采用的路由器为 Cisco 8-Slot CRS-1 路由器, WDM 光发射机、接收机为 Alcutel-Lucent WaveStar OLS 1.6T ultra-long-haul 系统,光放大器为 Cisco ONS 15501 EDFAs,各个设备的能耗数值如表 1 所示。

表 1 IP over WDM 网络设备能耗数据表
Table 1 Energy consumption data of IP over WDM network devices

Parameter	Value
Distance between two adjacent EDFA /km	80
Energy consumption of each IP router port /W	1000
Energy consumption of each optical transmitter /W	73
Energy consumption of each optical receiver /W	30
Energy consumption of each EDFA /W	8
Energy consumption of each OXC /W	5

从表中可以清楚地看出,单个 IP 路由器的能耗是单个光发射机能耗的 13 倍,更是单个光放大器能

耗的125倍。由此可见,IP over WDM中的主要能耗来源无疑是IP业务层中的IP路由器。

3.2 能耗模型的建立

在传统的最短路径算法中,拓扑中边的权重一般设为两节点间的物理距离。而在考虑能耗的模型中,为了使完成每个业务请求的所需要的能耗最小,需要将边的权重进行相应的转换。根据表1中所列出的数据,在网络初始化的阶段中对拓扑中边(由于初始状态下波长信道的容量并未被占用,所以此时的边均为波长链路)的权重 W 重新定义为

$$W = P_T + |D/d| \times P_A + P_R, \quad (1)$$

式中 P_T 、 P_A 、 P_R 分别表示光发射机、光放大器和光接收机的能耗, D 表示两个节点之间的距离, d 表示两个光放大器之间的距离。

在IP over WDM网络中,除了波长链路,还有表示IP路由器与IP路由器之间虚拟连通性的虚拟链路。由于虚拟链路表征的是在物理拓扑中已经建立好的路由路径,所以如果有新的业务连接请求在路由中需要用到这一段虚拟链路,只要该链路的容量允许,在链路上进行路由是无需任何能耗的,因此虚拟链路的权重 W_{vi} 可以表示为

$$W_{vi} = 0. \quad (2)$$

通过对各边权重的设置,考虑能耗的IP over WDM网络模型便可以简单的建立起来。

4 绿色路由算法

绿色路由算法是一个同时考虑IP业务层和WDM光网络层的综合路由算法。在这个路由算法中,当一个连接请求 $R(s,d)$ 到达源节点 s 时,既可以考虑在IP业务层虚拟拓扑中通过虚拟链路进行路由,也可以在WDM光网络层新建光路(占用物理拓扑中的波长链路)进行路由,还可以同时考虑整体资源,调度已有光路和新建光路共同用于路由业务连接请求。具体来说,在不中断已有连接的前提下,有5种路由业务连接请求的方法:

- 1) 在源节点 s 和目的节点 d 之间直连的虚拟链路上进行路由;
- 2) 在源节点 s 和目的节点 d 之间多条级联的虚拟链路上进行路由;
- 3) 在源节点 s 和目的节点 d 之间的波长链路上新建一条光路,然后在这条光路上进行路由;
- 4) 在源节点 s 和目的节点 d 之间的波长链路上建立多条级联的光路,并在这些级联光路上进行路由;

5) 在源节点 s 和目的节点 d 之间选择一条混合了虚拟拓扑中虚拟链路和物理拓扑中波长链路的路径,在这条混合路径上进行路由。

以上方案的选择前提是路由路径的总权重最小(即完成业务连接请求的能耗最小)。其中方案1、2是在虚拟拓扑上进行的,方案3、4是在WDM层物理拓扑上进行的,而方案5是综合考虑两层拓扑来进行的。方案5能充分提高资源利用率,但它的计算复杂度最高。

绿色路由算法的基本思想是:只要链路容量允许,后续业务均优先考虑利用前期路由过程中已经建立起来的虚拟链路进行路由(因为虚拟链路的权重为0,因此选路时会优先选择虚拟链路),避免了使用最短路径算法时每次路由都需要重新选路所可能产生的新的开销以及资源浪费的情况,从而达到节能的目的。

规定网络的基本参数为:网络拓扑 $G(V,E,L)$ 、光纤波长数 W 、波长信道容量 C ,业务请求矩阵 T (设任何业务量请求都必须小于单个波长信道容量 C)。

绿色路由算法的流程如下:

规定所有的业务量均不可拆分路由,且路由选路只能在同一个波长平面内进行。

- 1) 令 $P_{total}=0$;
- 2) 业务请求矩阵 T 降序排列;
- 3) 根据(1)式转换输入的邻接矩阵,并初始化辅助图 G_A ;
- 4) 对于每个业务连接请求 t :
- 5) 删除辅助图上剩余波长信道容量小于 t 的边;
- 6) 在所有波长平面辅助图上运行Dijkstra算法;
- 7) if 能找到一条路径;
- 8) if 该路径经过的链路全部是波长链路:
- 9) 拆除这些波长链路,建立一条直连源和目的节点的虚拟链路;
- 10) else if 该路径经过的链路全部是虚拟链路:
- 11) 跳至步骤15);
- 12) else if 该路径经过的链路既包含波长链路又包含虚拟链路:
- 13) 找出所有的波长链路集合;
- 14) 拆除波长链路,建立相应的虚拟

链路;

- 15) 从路由经过的链路容量中扣除业务容量;
- 16) 根据(2)式更新新建虚拟链路的权重;
- 17) 计算完成该业务连接请求的能耗 P_t ;
- 18) $P_{total} = P_{total} + P_t$;
- 19) else if 不能找到一条路径;
- 20) 阻塞该业务连接请求;
- 21) 处理下一个业务。

其中业务在波长链路集合上传输所需的能耗 P_w 为

$$P_w = \sum_{n=0}^N P_{ports} \times 2 + \sum W + P_{oxc} N_{new_oxc}, \quad (3)$$

式中 N 表示该路由路径中波长链路集合的个数, P_{ports} 表示路由器接口能耗, W 表示波长链路的权重, P_{oxc} 表示 OXC 能耗, N_{new_oxc} 表示该路由路径中首次使用的 OXC 数量。

因此,完成业务连接请求的能耗 P_t 的计算方法为:

1) 路由路径全部是波长链路:

$$P_t = P_{ports} \times 2 + \sum W + P_{oxc} N_{new_oxc}, \quad (4)$$

2) 路由路径全部是虚拟链路:

$$P_t = W_{vl} N_{vl} = 0, \quad (5)$$

3) 路由路径由波长链路和虚拟链路混合组成:

$$P_t = W_{vl} N_{vl} + P_w = P_w, \quad (6)$$

式中 W_{vl} 表示虚拟链路的权重,由(2)式可得 W_{vl} 的值为 0, N_{vl} 表示虚拟链路的数量。

总的来说,IP over WDM 网络绿色路由算法是一种以能耗为权重,综合考虑多层、多个可用波长平面,结合多种光网络节能方法,同时网络拓扑又在不断变化的路由算法,其目的便是为了提高资源利用率,节省能耗。

5 仿真验证及数据分析

为了验证绿色路由算法的有效性,使用两个不同规模的网络进行仿真,拓扑图如图 1 所示,拓扑图

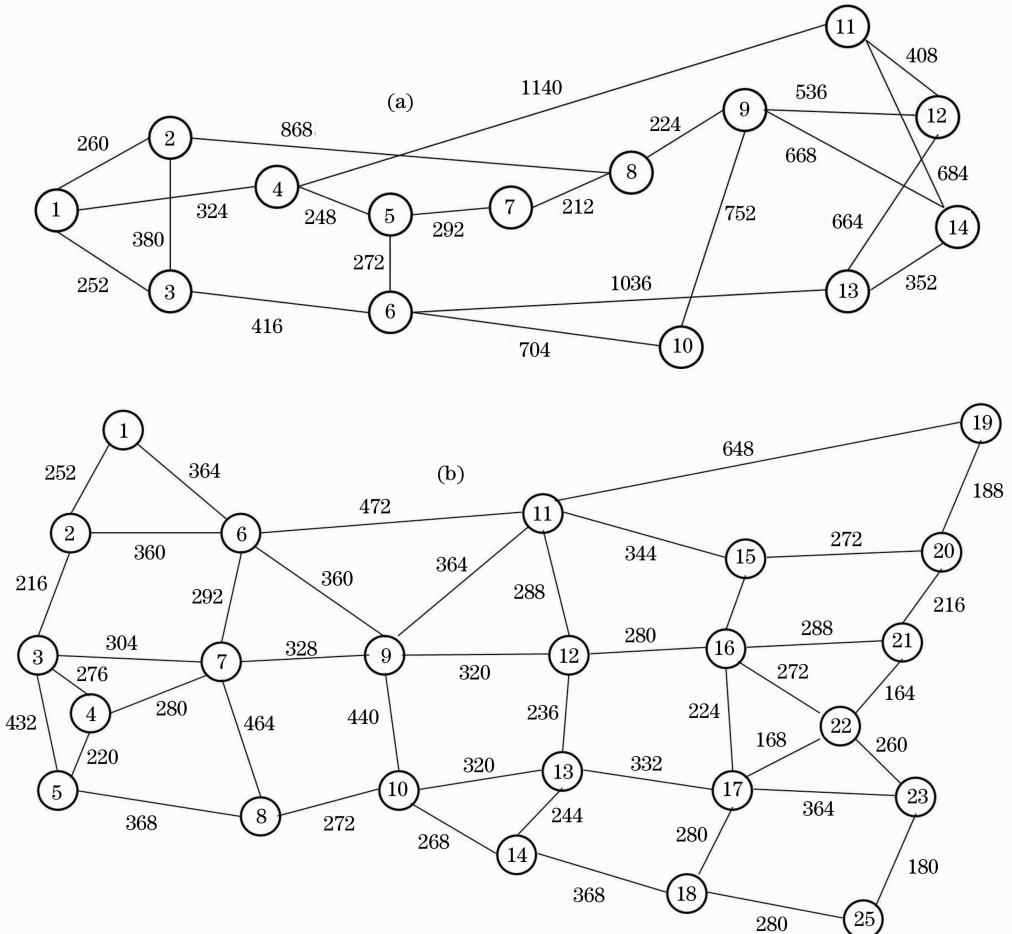


图 1 仿真用网络拓扑图。(a)美国科学基金骨干网络;(b)美国骨干网络

Fig. 1 Network topological graph for simulation. (a) NSFNET; (b) USNET

中每条边旁边的数字代表相邻节点间的物理距离。图 1(a)为 14 节点,21 链路的美国科学基金骨干网络(NSFNET),图 1(b)为 24 节点、43 链路的美国骨干网络(USNET)。网络参数方面,设定可用的波长平面为 8,每个波长信道的容量为 40 Gb/s。

5.1 最短路径算法和绿色路由算法能耗情况初步对比

首先分别比较两个网络使用最短路径算法和绿色路由算法时的能耗,任意两个节点间的单向业务量取 10~30 Gb/s 之间的一个随机数。结果如图 2 所示。

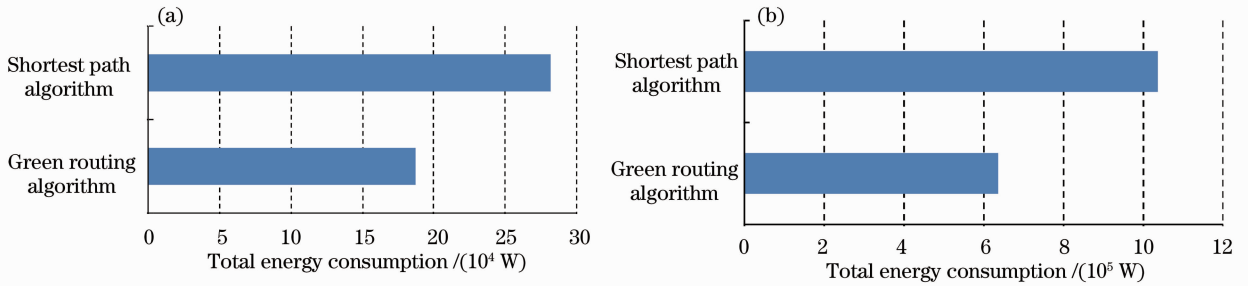


图 2 两种网络模型在两种不同算法下的能耗对比。(a)美国科学基金骨干网络;(b)美国骨干网络

Fig. 2 Energy-consumption comparison by using two different algorithms in two network models. (a) NSFNET; (b) USNET

5.2 最短路径算法和绿色路由算法设备使用情况对比

上述仿真结果已经充分证明了绿色路由算法在 IP over WDM 光网络中节能的有效性。当然,除了使用不同算法的能耗对比,仍有许多其他数据值得

仿真结果表明,NSFNET 和 USNET 分别能够节省约 33%和 39%的能耗,节能百分比呈上升的趋势。这是因为当网络为中小规模时,路由的路径并不非常复杂而且普遍较短,同时途经节点数并不多。而由于最短路径算法的耗能主要集中在途经节点的路由器接口能耗上,所以,此时绿色路由算法相对最短路径算法的优势并不明显。但当网络拓扑扩大至较大规模如 24 节点 43 链路的 USNET 时,绿色路由算法的作用就完全体现了出来,其相比于最短路径算法所能节省的能耗百分比达到近四成,节能效果十分可观。

关心,设备的使用情况就是其中之一。对此,统计了两种网络模型在使用两种不同的路由算法时所需要的路由器接口数、光收发器数(发射机+接收机)、光放大器数及 OXC 数,结果如图 3 所示。

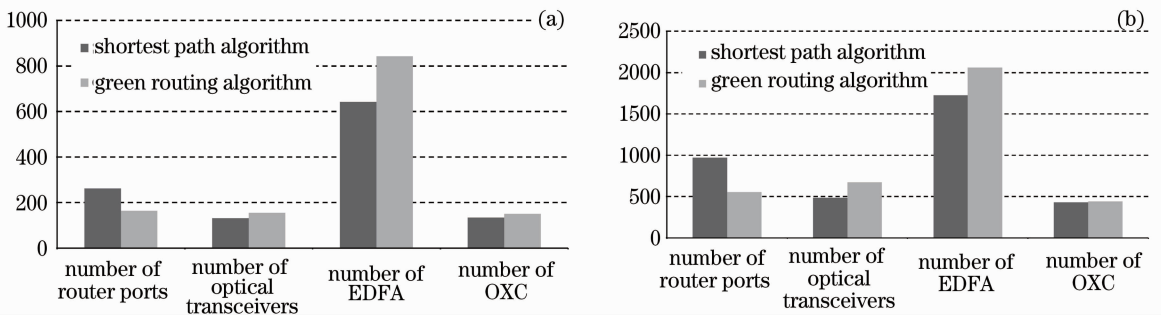


图 3 两种网络模型在两种不同算法下的网络设备使用情况对比。(a)美国科学基金骨干网络;(b)美国骨干网络

Fig. 3 Number of devices used comparison by using two different algorithms in two network models. (a) NSFNET; (b) USNET

在两种网络拓扑结构中,最短路径算法所使用的路由器接口数均大于绿色路由算法,分别要比绿色路由算法多需要约 37%和 43%的路由器接口。此百分比与绿色路由算法相较于最短路径算法所能节省的能耗百分比比较接近,这是因为在所有的 IP

over WDM 网络设备中,路由器接口的耗能最大,在实际计算中,其能耗平均要占总能耗的 90%~95%,几乎是总能耗的全部。但是在光收发器数、光放大器及 OXC 的使用数量方面,两种网络模型中均是绿色路由算法多于最短路径算法。这是因为绿

色路由算法趋向于使用已经建立好的虚拟链路进行路由以达到资源利用最大化及节能,而最短路径算法的路由原则是使选路的总路径长度最短,所以绿色路由算法在选路时所选的路由路径肯定要比最短路径算法长,也就意味着要使用更多的光收发器、光放大器及 OXC。然而,从表 1 的数据中可以看出,光收发器、光放大器及 OXC 的能耗与路由器接口巨大的能耗相比非常之小,使用 10 多个光收发器、100 多个光放大器或 200 个 OXC 才相当于使用 1 个路由器接口的能耗,所以增加一定光收发器、光放大器及 OXC 的使用数量来换取路由器接口使用数量的下降,从而降低网络的总能耗,还是非常值得的。

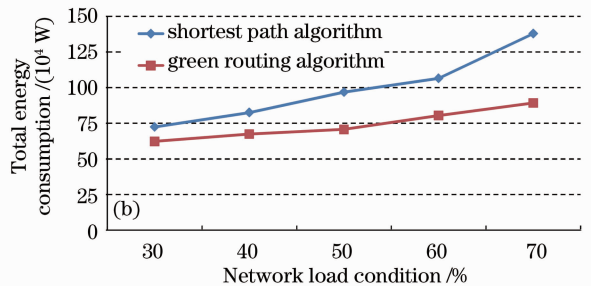
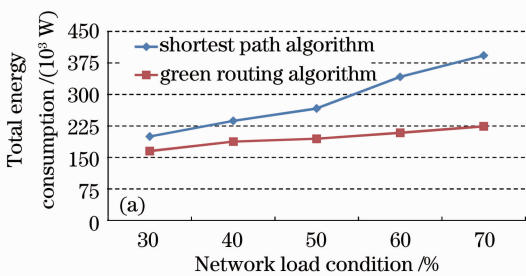


图 4 不同负载情况下两种网络模型使用不同算法的能耗对比。(a)美国科学基金骨干网络;(b)美国骨干网络
Fig. 4 Energy-consumption comparison by using two different algorithms under different network load condition in two network models. (a) NSFNET; (b) USNET

从图 4 可以清楚看到,当网络处于小负载情况下(30%)时,最短路径算法及绿色路由算法所需要的能耗差距较小,这是因为当网络负载较小时,一个波长容量中可以复用多个业务,使得不少业务可以不用重新选路而在已建的路径中直接传输,这就导致绿色路由算法相较于最短路径算法的优势并不怎么明显。但当负载情况开始逐步上升时,绿色路由算法与最短路径算法所需能耗的差距开始拉开。而当负载情况进一步上升至 60%甚至 70%时,两者所需能耗的差距则变得非常之大。说明当网络负载较大时,一个波长容量往往只能复用极少的业务,最短路径法不得不频繁的重新选路以完成路由,由此带来较高的能耗;而绿色路由算法则拥有大量已经建立的虚拟链路资源,节能方面自然更有优势。

6 结 论

提出并研究了一种新型的综合性绿色路由算法,结合了终端至终端业务量疏导和光旁路技术,同时考虑 IP 业务层和 WDM 光网络层进行路由,以达

5.3 不同负载情况下最短路径算法和绿色路由算法能耗情况对比

最后,仿真了不同网络业务量负载情况下,两种网络使用两种不同的路由算法所需要的能耗对比。在之前的仿真中,业务量均定为一个 10~30 Gb/s 的随机数,属于一个较中等的负载水平。然而在实际生活中,网络的负载情况不可能一直这么平均,总有高峰时间和低谷时间,所以研究不同网络业务量负载情况下网络的能耗是十分有意义的。仿真时设定的总负载分别是最大负载的 30%、40%、50%、60%和 70%(最大负载设为 40 Gb/s 乘以总业务数量)为了保证业务尽量不阻塞,波长平面数也上调至 16 个,结果如图 4 所示。

到节能的效果。仿真结果表明,绿色路由算法在网络规模中等(14 节点的 NSFNET)时相较于最短路径算法能够节省约 33%的能耗,当网络规模较大(24 节点的 USNET)时,更能够节省约 39%的能耗。同时,相比最短路径算法,绿色路由算法由于能够充分利用已建光路资源进行路由,所以有效地降低了路由器接口的使用次数,从而实现节能。最后,当网络业务量总负载上升至最大负载的 60%甚至 70%时,绿色路由算法的节能优势相比于低负载情况时变得更加明显。由此可见,在规模较大且网络业务量负载较重的网络中,绿色路由算法所能达到的节能效果更为显著。在网络业务需求越来越多,网络规模越来越大的今天,使用该绿色路由算法所能节省的能耗是十分可观的。

参 考 文 献

- 1 L. Chiaraviglio, M. Mellia, F. Neri. Energy-aware backbone networks: a case study[C]. IEEE International Conference on Communications Workshops (GreenComm'09), 2009: 1~5
- 2 M. Baldi, Y. Ofek. Dynamic optical switching for a greener internet[C]. 18th Annual Wireless and Optical Communications

- Conference (WOCC'09), 2009: 1~3
- 3 L. Chiaraviglio, M. Mellia, F. Neri. Energy-aware networks: reducing power consumption by switching off network elements [C]. Gruppo Telecomunicazioni e Tecnologie Dell'Informazione (GTTI'08), 2008: 1~2
 - 4 M. Xia, M. Tornatore, Y. Zhang *et al.*. Greening the optical backbone networks: a traffic engineering approach [C]. IEEE International Conference on Communications (ICC'10), 2010: 1~5
 - 5 W. G. Hou, L. Guo, X. W. Wang. Traffic grooming algorithms for power efficiency in IP over WDM networks [C]. Second International Conference on Communication Systems, Networks and Applications (ICCSNA'10), 2010: 10~13
 - 6 X. W. Wang, W. G. Hou, L. Guo *et al.*. Energy saving and cost reduction in multi-granularity green optical networks [J]. *Computer Networks*, 2011, **55**(3): 676~688
 - 7 R. S. Tucker, R. Parthiban, J. Baliga *et al.*. Evolution of WDM optical IP networks: a cost and energy perspective [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 243~252
 - 8 W. Van Heddeghem, M. De Groote, W. Vereecken *et al.*. Energy-efficiency in telecommunications networks: link-by-link versus end-to-end grooming [C]. 14th Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM'10), 2010: 1~3
 - 9 Zeng Ling, Xu Shizhong, Wang Sheng *et al.*. Traffic-grooming in WDM network under physical constraints [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 219~222
曾凌, 徐世中, 王晟等. 一种带物理约束的光网络业务量疏导方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 219~222
 - 10 Wang Ruyan, Liu Chengyao, Wu Dapeng *et al.*. A clustering-based static traffic grooming algorithm in WDM networks [J]. *Study On Optical Communications*, 2011, **37**(3): 1~4
王汝言, 刘成耀, 吴大鹏等. WDM网络中基于分簇的静态业务量疏导算法 [J]. *光通信研究*, 2011, **37**(3): 1~4
 - 11 Zhou Li, Xiong Huagang. All-optical grooming algorithm for real-time WDM network [J]. *Electronics Optics & Control.*, 2011, **18**(3): 39~42
周立, 熊华钢. 实时WDM网络的全光流量疏导算法 [J]. *光电与控制*, 2011, **18**(3): 39~42
 - 12 E. Yetginer, G. N. Rouskas. Power efficient traffic grooming in optical WDM networks [C]. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'09), 2009: 1~6
 - 13 M. Hasan, F. Farahmand, J. Jue. Energy-awareness in dynamic traffic grooming [C]. Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC'10), 2010: 1~3
 - 14 Tang Rui, Zhang Guoying, Zhang Haiyi. Dynamic traffic grooming in WDM optical networks [J]. *Study on Optical Communications*, 2008, **34**(6): 4~6
汤瑞, 张国颖, 张海懿. WDM光网络中的动态流量疏导 [J]. *光通信研究*, 2008, **34**(6): 4~6
 - 15 S. Huang, D. Seshadri, R. Dutta. Traffic grooming: a changing role in green optical networks [C]. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'09), 2009: 1~6
 - 16 G. X. Shen, R. S. Tucker. Energy-minimized design for IP over WDM networks [J]. *J. Opt. Commun. & Networking*, 2009, **1**(1): 176~186

栏目编辑：谢婧