

# WDM 节能光网络中的抗毁保护算法研究

鲍宁海<sup>1</sup>, 刘翔<sup>2</sup>, 张治中<sup>1</sup>, 虞红芳<sup>3</sup>

(1. 重庆邮电大学 信号与信息处理重庆市重点实验室, 重庆 400065; 2. 重庆信科设计有限公司, 重庆 400065;

3. 电子科技大学 宽带光纤传输与通信网络重点实验室, 四川 成都 611731)

**摘要:**针对波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)光网络的节能需求, 研究绿色网络解决方案, 在光网络抗毁保护问题上提出绿色共享通路保护算法。该算法通过将工作通路和保护通路隔离在不同的光纤中, 并将网络中的空闲资源和备份资源切换到睡眠模式, 以实现光网络的节能。与传统共享通路保护算法的对比仿真表明, 绿色共享通路保护算法能够有效提高网络功耗效率, 并在低负载网络中取得网络总功耗和阻塞率性能的较好折中。

**关键词:**波分复用(WDM); 光网络; 节能; 抗毁保护

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1673-825X(2012)03-0278-05

## Survivable protection algorithm in WDM energy-efficient optical networks

BAO Ning-hai<sup>1</sup>, LIU Xiang<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-zhong<sup>1</sup>, YU Hong-fang<sup>3</sup>

(1. Chongqing Key Lab of Signal and Information Processing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, 400065, P. R. China;

2. Chongqing Information Technology Designing Co. Ltd., Chongqing, 401121, P. R. China; 3. Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731, P. R. China)

**Abstract:** Aiming at the requirement of energy saving in optical networks, this paper studies green network solutions and proposes a green shared path protection (GSPP) algorithm on survivable protection issue in optical networks. GSPP realizes energy saving in optical networks by isolating the working paths and the backup paths with different fibers and switching the idle and backup network resources into sleep mode. Simulation results show that GSPP can improve the network power efficiency with respect to the traditional shared path protection (SPP) algorithm, and achieve better tradeoff between total network power consumption and blocking probability performance.

**Key words:** wavelength division multiplexing(WDM); optical network; energy saving; survivable protection

## 0 引言

随着信息与通信技术(information and communication technologies, ICT)的飞速发展, 具有更大容量、更高传输速率、更快处理速度的各种通信设备不断地被研制并应用到通信网络中, 这使得 ICT 领域中的能源消耗量以惊人的速度逐年递增<sup>[1-3]</sup>。在一

些宽带网应用成熟的国家, 互联网消耗的电能已占到全国电能消耗总量的 4%, 并且还会随着接入速率的不断提高而进一步增长<sup>[4]</sup>。

波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)光网络因其巨大的带宽容量和超高的传输速率, 已成为当前和今后最重要的宽带网基础架构, 其能耗问题已受到越来越多的关注。目前, “绿色光网络”还是一个非常新的概念, 针对光网络节能的

收稿日期: 2012-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(60702008; 60872032); 新世纪优秀人才计划(06-0779); 重庆市自然科学基金(CSTC, 2011jjA40036); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ120523); 重庆邮电大学自然科学基金(A2011-06)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(60872032; 60702008); The Program for New Century Excellent Talents in University(06-0779); The Natural Science Foundation Project of CQ CSTC(CSTC, 2011jjA40036); The Science and Technology Research Projects of Chongqing Municipal Education Commission(KJ120523); CQUPT-NSF(A2011-06)

研究方案大致可以分为两大类:设备解决方案和网络解决方案。

设备解决方案主要通过开发和应用低功耗全光器件和设备来实现网络节能,如:全光信号再生器、全光交换结构、低损耗光纤等,一方面减少传统的电子器件带来的高能耗和热排放,另一方面也可减少为设备降温所消耗的电能<sup>[5-8]</sup>。

网络解决方案主要通过路由的优化管理以及资源的合理分配,尽量减少对网络中某些器件、端口或设备的使用,并有选择地将未使用的冗余设备置为停电/关闭模式(off mode),或者将预留的备份设备置为低功耗的睡眠模式(sleep mode),在必要时再打开关闭的设备或激活睡眠状态下的设备,从而降低网络的总体功耗<sup>[9-12]</sup>。

近年来,提高光网络功耗效率的绿色网络解决方案已受到越来越多的重视。文献[9]提出了一种功耗敏感的波长路由算法,通过提高当前正在使用的(powered on)设备的资源利用率,减少光网络中设备的总体使用数量,从而减少网络的总体功耗。文献[10]研究了静态业务环境下共享通路保护模式的网络节能问题,在预设网络负载条件下,通过有选择地关闭低负载光纤,并将受关闭影响的业务重新路由和切换到其他仍旧处于工作状态的光纤上,以实现全网功耗的最小化。文献[11]针对光网络节能问题,提出了一种专用通路保护(无共享通路保护)的 ILP(integer linear programming)模型方案,通过引入睡眠模式,将网络中的保护(备份)资源置为一种低功耗待机状态,当故障发生时,迅速唤醒相应的保护资源,实现业务的切换和恢复。

由于在关闭模式下,设备的重启时延较大,不适合动态业务环境。因此,本文主要研究睡眠模式下的绿色网络解决方案,并提出一种基于动态业务环境的绿色共享通路保护(green shared path protection, GSPP)算法。

## 1 绿色共享通路保护策略

随着 WDM 技术、光交换技术以及光网络控制管理技术的不断发展,光纤通信系统已由传统的点到点传输系统发展为结构复杂且分布广泛的 WDM 网状光网络。在这样的高速大容量网状网中,一旦出现光纤断裂/失效(由人为或自然灾害引起),将导致大量的业务中断和数据丢失,给用户和运营商造成巨大的经济损失。因此,光网络的抗毁保护问

题一直是 WDM 光网络研究和应用中的重要问题。

传统的针对单链路失效的抗毁保护策略通常是网络中的每一个业务连接配置两条链路分离的最短通路:一条工作通路(working path, WP)和一条保护/备份通路(backup path, BP)。当工作通路上的光纤链路失效时,该通路上的业务将被迅速切换到对应的保护通路上去,以避免业务的中断。由于保护通路需要占用大量的网络资源,因此常常采用保护资源共享的方法来提高网络的资源利用率,即:当两条工作通路链路分离时,其对应的保护通路可以安全地共享波长资源。这种保护方式称为共享通路保护(shared path protection, SPP)。

采用 SPP 算法的示例如图 1 所示, WDM 光网络由 8 个节点和 11 条链路组成,每条链路中包含 1 条光纤,且链路代价为 1(跳),每条光纤中承载 3 个双向波长通道。在该网络中,仅考虑光纤的功耗而不考虑节点的功耗,并且每条光纤在工作模式下的功耗设为 1 个功率单位,而在睡眠模式下的功耗忽略不计。假设有 4 个业务连接请求  $CR_{s,d}$  ( $s$  为源节点,  $d$  为目标节点)依次到达该网络,每个业务连接所需带宽为一个波长通道,在第一个业务连接请求到达网络前,所有的网络设备均处于睡眠模式。

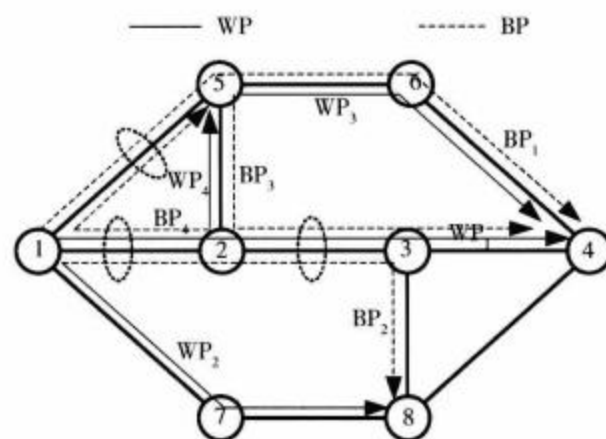


图1 共享通路保护示例

Fig. 1 Example of shared path protection

在图 1 中, 4 个业务连接请求  $CR_{1,4}$ ,  $CR_{1,8}$ ,  $CR_{5,4}$ ,  $CR_{2,5}$  依次到达网络, SPP 采用最短路算法(如: Dijkstra 算法)分别为每一个连接请求计算 2 条链路分离的通路, 并将较短的一条作为工作通路, 另一条作为保护通路:  $(WP_1, BP_1)$ ,  $(WP_2, BP_2)$ ,  $(WP_3, BP_3)$ ,  $(WP_4, BP_4)$ 。由于  $WP_1$  与  $WP_4$ ,  $WP_2$  与  $WP_3$ ,  $WP_2$  与  $WP_4$  链路分离, 因此  $BP_1$  与  $BP_4$ ,  $BP_2$  与  $BP_3$ ,  $BP_2$  与  $BP_4$  可以分别共享链路 1-5, 2-3, 1-2 上的备份波长资源。当 4 个业务连接配置完成后, 网络中工作通路占用的波长总数为 8 个, 保护通路占用的波长总数为 7 个。由于网络中处于工

作模式的光纤总数为8,则总的功耗为8个功率单位。

作为比较,采用 GSPP 算法的示例如图2所示,4个相同的业务连接请求依次到达相同的网络,GSPP 分别为其计算工作通路和保护通路。然而在为业务连接计算工作通路时,通路距离最短已不再是第一目标,取而代之的是网络功耗增量最小,第二目标才是通路的距离最短。在图2中可以看到,根据第一目标,GSPP 引导工作通路穿越处于工作模式的光纤链路,如  $WP_1$ ,  $WP_2$ ,  $WP_3$ ,  $WP_4$  被分别汇聚在链路1-2,2-3,3-4,2-5上。由于  $WP_1$  和  $WP_4$  链路分离,相应的  $BP_1$  和  $BP_4$  可以在其公共链路1-5上共享备份波长。当4个业务连接配置完成后,网络中工作通路占用的波长总数为10个,保护通路占用的波长总数为8个。由于网络中处于工作模式的光纤总数为5,则总的功耗为5个功率单位。

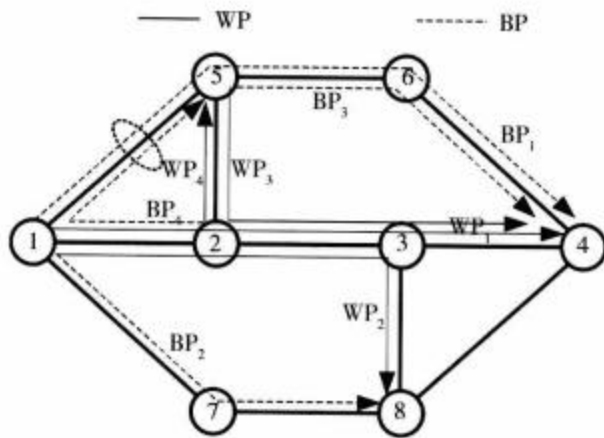


图2 绿色共享通路保护示例

Fig.2 Example of green shared path protection

通过 SPP 和 GSPP 的对比发现,在同样具有睡眠模式的光网络中,GSPP 的网络总体功耗明显低于 SPP,然而在波长资源的耗用上却高于 SPP。一方面,为了提高工作模式下光纤链路的利用率,降低网络总体功耗,GSPP 提供的通路长度可能会大于 SPP,另一方面,由于 GSPP 对工作通路的汇聚和集中,工作通路间链路分离的情况减少,使得相应的保护通路间的资源共享机会也随之减少。因此,GSPP 将以网络资源效率为代价换取网络功耗效率的提升。

## 2 算法设计

### 2.1 网络及功耗模型定义

假设一个具有睡眠模式的 WDM 网状光网络为  $G(N, L)$ ,  $N$  代表该网络中节点的集合,  $L$  代表该网络中双向链路的集合,每条链路中包含  $F$  条光纤,每条光纤支持  $W$  个双向波长通道。设  $c_l$  为链路  $l$  的基本代价,  $c_l^f$  为链路  $l$  上的光纤  $f$  的动态代价,  $f_l^f$  为

链路  $l$  上的光纤  $f$  中的空闲波长数,  $c_l'$  为链路  $l$  的动态代价,  $w_l^f$  为链路  $l$  上的光纤  $f$  中的工作波长数,  $b_l^f$  为链路  $l$  上的光纤  $f$  中的备份波长数,  $b_l$  为链路  $l$  上的总的备份波长数,  $U_l^f$  为工作通路穿越链路  $l'$  而相应的保护通路穿越链路  $l$  的业务连接数。每个业务连接的带宽需求为一个波长通道,每个节点都具有完全的波长转换能力。

假设网络  $G(N, L)$  的总功耗主要包括节点功耗和链路功耗两部分。网络中每个节点均由1个电子控制系统(electronic control system, ECS),1个基于微机电系统的光交换矩阵(micro electro machine system, MEMS),1组光波长转换器(wavelength converters, WCs),以及1组光信号收发器(tranceivers, TRANs)构成。其中, ECS 始终处于工作模式,其功耗为150 W,其他器件都具有睡眠模式功能,当一条工作通路穿越一个节点时,在 MEMS, WC, TRAN 上产生的功耗分别为107 mW, 1.65 W, 5.9 W。两个相邻节点之间的一条光纤由1个功率放大器、若干个线路放大器、若干个光纤段,以及1个前置放大器组成。每一个处于工作模式的放大器功耗为12 W,每一个光纤段长度小于等于80 km。只要有一条工作通路穿越一条光纤,则该光纤上的所有放大器均处于工作模式。

### 2.2 路由方案

针对单链路失效的 GSPP 算法需要为每个业务连接配置一条工作通路和一条链路分离的保护通路,本文将采用 Dijkstra 最短路算法计算工作通路和保护通路。为了减小网络总功耗,GSPP 将网络中的工作通路和保护通路分别隔离在不同的光纤中,并将空闲光纤和保护光纤置为睡眠模式。

在计算工作通路前,首先根据(1)式调整网络中的光纤代价,当链路  $l$  上的光纤  $f$  中有备份波长或没有空闲波长时,该光纤代价为无穷大;否则,其代价取决于其中的工作波长数,工作波长越多,则代价越小,反之则越大。将每一条链路中的最小光纤代价设为该链路的代价,如(2)式所示。然后在链路代价的基础上通过 Dijkstra 算法计算工作通路。

$$c_l^f = \begin{cases} +\infty, & b_l^f > 0 \text{ 或 } f_l^f = 0 \\ c_l \cdot [1 - \frac{w_l^f}{(W+1)}], & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$c_l' = \min \{c_l^f\} \quad (2)$$

在计算保护通路前,根据(3)式调整网络中的光纤代价。

$$c_l^f = \begin{cases} +\infty, & (w_l^f > 0) \text{ 或 } (f_l^f = 0 \text{ 和 } U_l^f > b_l) \\ c_l \cdot [1 - \frac{b_l^f}{(W+1)}], & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

当链路  $l$  上的光纤  $f$  中有工作波长,或没有空闲波长且链路  $l$  上需要的最小备份波长数大于该链路上已有的备份波长数时,该光纤代价为无穷大;否则,其代价取决于其中的备份波长数,备份波长越多,则代价越小,反之则越大。将每一条链路中的最小光纤代价设为该链路的代价,如(2)式所示。然后在链路代价的基础上通过 Dijkstra 算法计算保护通路。

### 2.3 算法步骤

GSPP 算法是针对节能光网络提出的一种动态在线保护算法,假设网络中的业务连接随机独立地到达和离去,网络中的空闲资源和备份资源可置为睡眠模式,并可根据需要迅速切换至工作模式。GSPP 将处理两种事件请求,一种为业务连接建立请求,另一种为业务连接释放请求。当出现一个新的事件请求时,GSPP 算法执行以下步骤。

**步骤 1** 发现一个新的事件请求。如果是业务连接建立请求,跳转至步骤 2,否则跳转至步骤 6。

**步骤 2** 根据(1)式调整网络中所有光纤的代价,再根据(2)式调整网络中所有链路的代价。用 Dijkstra 算法在链路代价的基础上计算一条最短通路作为工作通路。如果成功找到工作通路,跳转至步骤 3,否则,拒绝本次事件请求。

**步骤 3** 在网络拓扑中删除工作通路上的所有链路(包括其中的所有光纤),根据(3)式调整网络中所有光纤的代价,根据(2)式调整网络中所有链路的代价。用 Dijkstra 算法在链路代价的基础上计算一条最短通路作为保护通路。如果成功找到保护通路,跳转至步骤 4,否则,拒绝本次事件请求。

**步骤 4** 对工作通路上的每一条链路,选择链路上的最小代价光纤,如果该光纤处于睡眠模式,则将其激活并切换到工作模式,在该光纤上分配一个空闲波长作为工作波长。

**步骤 5** 对保护通路上的每一条链路,如果所需的最小备份容量小于等于预留的备份波长数,则不用预留新的备份波长,否则,选择该链路上的最小代价光纤,在该光纤上分配一个空闲波长作为备份波长,业务连接建立完成。

**步骤 6** 对工作通路上的每一条链路,释放链路上相应光纤中的相应工作波长,并将其置为空闲

波长,如果该光纤中不再包含其他的工作波长,则将该光纤切换至睡眠模式。

**步骤 7** 对保护通路上的每一条链路,重新计算链路所需的最小备份容量,如果大于等于该链路中预留的备份波长数,则不释放该链路上的备份波长,否则,根据(3)式重新计算该链路上所有光纤的代价并将其按降序排列。从排列中的第一条光纤开始,寻找一个预留的备份波长并释放该备份波长,将其置为空闲波长,业务连接释放完成。

## 3 仿真及分析

仿真测试网络采用美国国家网络,如图 3 所示,节点数为  $|N| = 24$ ,链路数为  $|L| = 43$ 。图 3 中链路旁的数字设为光纤链路的物理长度(单位: km)。假设测试网络中的每一个节点均具有完全的波长转换能力,每一条链路包含 4 条光纤,每一条光纤承载 6 个双向波长通道。

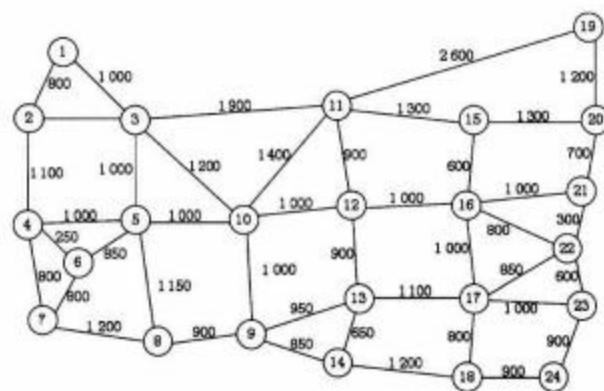


图 3 美国国家网络

Fig. 3 US national network

业务连接请求动态独立地到达网络,到达时间服从泊松分布,业务持续时间服从负指数分布。每个连接请求的源节点  $s$  和目标节点  $d$  在网络中随机选取(节点  $s$  与  $d$  不相同),服从均匀分布。每个业务连接所需带宽为一个波长通道。网络中所有的空闲冗余资源或预留备份资源均切换至睡眠模式,睡眠模式下的器件和设备功耗忽略不计。每次仿真注入网络的业务请求数量为  $10^5$ ,所得仿真结果取平均值。

在仿真测试中,主要考察两种性能指标:一种是归一化网络总功耗(normalized total power consumption, NTPC),NTPC 定义为网络中处于工作模式下的设备总功耗与整个网络的最大功耗之比。另一种是阻塞率(blocking probability, BLP),BLP 定义为被拒绝的业务连接请求总数与总的业务连接请求数之比。本文将通过仿真对比 SPP 和 GSPP 两种算法在 NTPC 和 BLP 上的性能表现。

NTPC 的仿真结果如图 4 所示,通过将空闲资

源和预留备份资源切换到睡眠模式, SPP 和 GSPP 都能有效地降低网络总功耗, 特别是在网络负载较低时, NTPC 的性能表现更好, 这是因为在低负载情况下, 网络中可以有更多的空闲资源可以直接被切换到睡眠模式, 从而使网络总功耗处于较低的水平。而与 SPP 相比, GSPP 则能够获得更好的功耗效率, 这是因为 GSPP 将工作通路和保护通路分别隔离在不同的光纤中, 使网络中有更多的光纤只承载备份波长, 从而可以切换到睡眠模式。

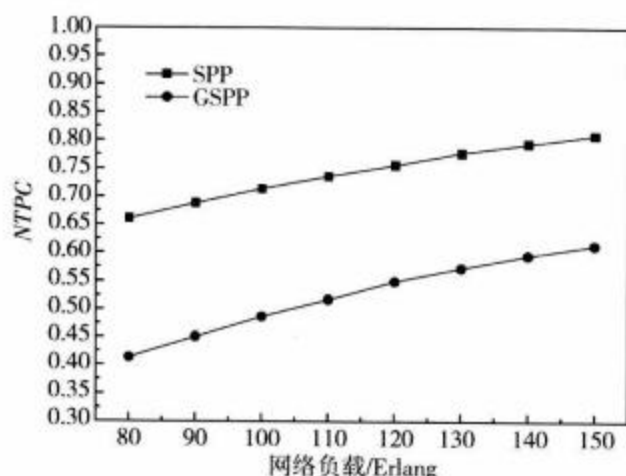


图4 归一化总功耗性能比较

Fig. 4 Comparison of NTPC performance

BLP 的仿真结果如图 5 所示, 在网络负载较低时, GSPP 与 SPP 的阻塞率性能较为接近, 当网络负载较高时, GSPP 的阻塞率明显高于 SPP。这是因为 GSPP 将工作通路和保护通路隔离在不同的光纤中, 可能会使通路的长度增加, 消耗更多的波长资源; 工作通路间链路分离的情况减少, 降低了保护通路间资源共享的机会; 工作通路不能使用保护光纤中的空闲波长, 保护通路也不能使用工作光纤中的空闲波长, 也可能会造成一部分的波长资源浪费。网络资源效率的下降最终表现为 BLP 性能的下降。

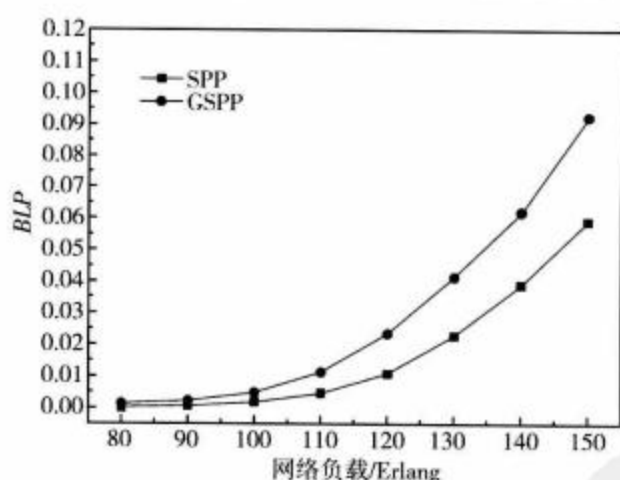


图5 阻塞率性能比较

Fig. 5 Comparison of BLP performance

以上仿真结果表明, GSPP 能够获得明显的功耗效率, 并且在网络负载较低时, 可以获得较好的 NT-

PC 和 BLP 性能折中。

## 4 结束语

提高光网络功耗效率的绿色网络解决方案可以有效地降低网络能耗。本文提出一种动态在线的 GSPP 算法, 通过对工作资源和备份资源的隔离, 将网络中的空闲资源和备份资源切换到睡眠模式, 降低网络的总功耗。仿真结果表明, GSPP 能够获得明显的网络功耗效率, 并在低负载网络中取得网络总功耗和阻塞率性能的较好折中。

## 参考文献:

- [1] KOUTITAS G, DEMESTICHAS P. A Review of Energy Efficiency in Telecommunication Networks [J]. Telfor Journal, 2010, 2(1): 2-7.
- [2] LANGE C, KOSIANKOWSKI D, WEIDMANN R, et al. Energy Consumption of Telecommunication Networks and Related Improvement Options [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(2): 285-295.
- [3] HINTON K, BALIGA J, FENG M Z, et al. Power Consumption and Energy Efficiency in the Internet [J]. IEEE Network, 2011, 25(2): 6-12.
- [4] BALIGA J, HINTON K, TUCKER R S. Energy consumption of the Internet [C]//IEEE. Joint International Conference on Optical Internet and the 32nd Australian Conference on Optical Fiber Technology (COIN-ACOFT). Melbourne: IEEE Press, 2007: 1-3.
- [5] TUCKER R S. Green Optical Communications - part I: Energy Limitations in Transport [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(2): 245-260.
- [6] ALEKSIC S. Analysis of Power Consumption in Future High-Capacity Network Nodes [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(3): 245-258.
- [7] CHABAREK J, SOMMERS J, BARFORD P, et al. Power Awareness in Network Design and Routing [C]//IEEE. The 27th International Conference on Computer Communications (INFOCOM). Phoenix: IEEE Press, 2008: 457-465.
- [8] TUCKER R S. Green Optical Communications - Part II: Energy Limitations in Networks [J]. Selected IEEE Journal of Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(2): 261-274.

(下转第 296 页)