

绿色 IP over WDM 网络研究进展

郭爱煌^{1,2} 薛琳^{1*}¹ 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804² 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 近年来光网络朝着高速率、大带宽的方向迅猛发展,设备数目快速增加导致网络能耗急剧增长。为了降低网络能耗,提高能量利用率,绿色 IP over WDM 网络的概念被提出,并成为光网络领域的最新研究热点之一。对现有光网络节能方法的研究状况进行综述,从网络设备入手,讨论业务负载和设备能耗的关系,建立了两种能耗模型。基于 IP over WDM 网络结构,利用数学表达式描述了网络能耗最小化问题。对当前网络级的节能方法进行分类,分析了其基本原理和节能效果,并选取代表性的节能方法进行比较,得出了现有方法存在的局限性和不足,对进一步的研究方向提出了建议。

关键词 光通信;节能方法;绿色 IP over WDM 网络;能耗模型

中图分类号 TN915 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.070001

Recent Research Progress in Green IP over WDM Network

Guo Aihuang^{1,2} Xue Lin¹¹ College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China² State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract In recent years, optical network is developing towards high rate and wide bandwidth. As the number of network equipments in optical network increases, the network power consumption has a sharp rising. In order to decrease the energy consumption and improve the energy efficiency, the concept of green IP over WDM network has been proposed and it has become a hotspot for research in the area of optical network. The existing research status for energy-saving approaches in optical network is reviewed. Specifically, starting with network equipment, the relationship between traffic load and energy consumption of network equipments is discussed and two power consumption models are established. Then a mathematical expression of minimized energy consumption for IP over WDM network is introduced based on the network structure. Subsequently, the methods to reduce the energy consumption at network level are divided into different categories, whose fundamental principles and energy saving effects are summarized, and several typical energy-saving approaches are compared as well. Finally, the limitations of existing approaches are analyzed and some suggestions are provided for the further research directions.

Key words optical communications; energy-saving approach; green IP over WDM network; power consumption model

OCIS codes 060.1810; 060.4251; 060.4256; 060.4510

1 引言

面对资源减少和全球气候变化的压力,节能减排成为全世界的关注焦点。在联合国气候变化峰会的不断推进下,各国政府相继采取措施降低重点行业的碳排放量,提高能源利用率。信息通信技术(ICT)行业是全球第五大耗能行业,在未来几年 ICT 能耗将以每年 5% 的幅度递增^[1]。倡导高效、节能、环保的通信服务,

收稿日期: 2012-01-12; **收到修改稿日期**: 2012-02-10; **网络出版日期**: 2012-05-21

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室开放基金资助课题。

作者简介: 郭爱煌(1964—),男,博士,教授,主要从事光通信器件、码型变换、绿色光网络等方面的研究。

E-mail: tjgah@tongji.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: lin.xue0812@gmail.com

推动 ICT 产业可持续发展已刻不容缓。

作为 ICT 的重要组成部分,通信网络的能耗问题日益凸显。对于骨干网而言,网络规模的快速扩张和设备数目的不断增加导致了巨大的能耗增量。数据显示,骨干网能耗约占总网络能耗的 12%,预计至 2020 年将达到 20%^[2,3]。IP over WDM 网络是一个通用的构架,具有覆盖范围广、数据量大、传输速率高的特点,适合超大型 IP 骨干网。因此,研究 IP over WDM 网络的节能问题具有重要意义。

“绿色网络”是一个较新的理念,最早由 Gupta 等^[4]提出。目前国内外关于绿色 IP over WDM 网络的研究工作刚刚开始,主要从设备、传输、网络三个不同的角度实现节能。在设备层面^[5],改进硬件技术,设计低能耗芯片,生产高集成度的光处理设备,如光缓冲、光交换结构设备,贝尔、华为等通信设备生产商正在致力于研发新型绿色光网络产品;在传输层面^[6],采用低衰减光纤传输并进行色度色散管理来有效降低光层的传输能耗;从网络全局来看,优化网络架构,在现有的网络协议和路由调度中加入能耗因素是当前一个主要研究方向,得到了较多关注。

本文主要探讨网络全局的节能方法,对当前存在的光网络代表性节能方案和算法进行综述和分析。分析 IP over WDM 网络的网络结构和能耗模型,给出网络能耗最小化问题的数学描述。概括性地分析每种节能方法的基本思想,对现有的研究成果及节能效果进行总结。从多个角度对典型的节能方法进行纵向比较,分析已有研究成果的特点,并展望下一步的研究方向。

2 IP over WDM 网络能耗模型与问题描述

2.1 能耗模型

IP over WDM 网络同时利用了 IP 技术和基于 WDM 的光网络技术,使得 IP 分组数据包能够基于光层建立路由,其物理结构如图 1 所示。

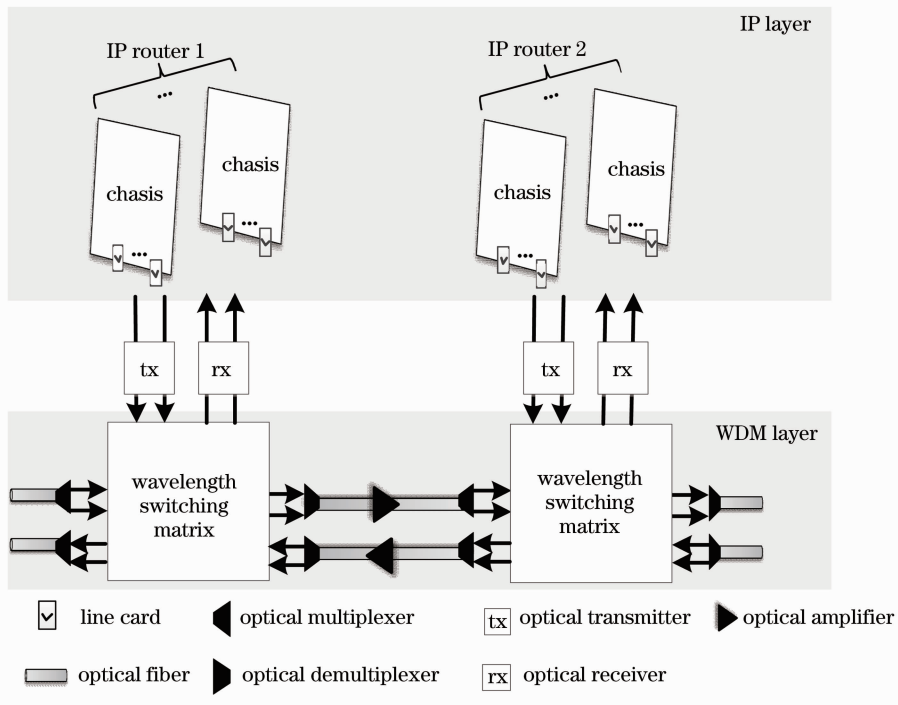


图 1 网络物理结构

Fig. 1 Network physical structure

光网络的能耗主要来自 IP 电层设备(路由器)以及 WDM 光层设备[光纤收发器、光交叉连接器(OXC)、光放大器和波分复用/解复用器]。这些设备的能耗与业务负载、温度、服务质量(QoS)等多种因素有关,找出影响网络能耗的主要因素对于构建绿色网络有重要作用。已有的能耗模型多从业务负载的角度建立,对设备 x 而言,其实际能耗 P^x 有如下两种定义计算方式。

定义 1: On-Off 模型^[7,8],

$$P^x = P_f^x, \quad (1)$$

式中 P_f^x 表示设备 x 的满载能耗。在该模型中,设备一旦开启就消耗固定数目的能量,以最大功率计算整个网络的能耗。

定义 2: Linear 模型^[9,10],

$$P^x = P_0^x + \frac{P_f^x}{T} \times t, \quad (2)$$

$$P_0^x = R \times P_f^x, \quad R \in [0,1], \quad (3)$$

$$P_f^x = P_f^x - P_0^x, \quad (4)$$

式中 P_0^x 为设备 x 空载能耗,也称静态能耗,由(3)式中比例系数 R 和 P_f^x 确定。 $\frac{P_f^x}{T} \times t$ 表示业务负载为 t 时设备 x 的动态能耗, $\frac{P_f^x}{T}$ 为单位容量下设备 x 满载时的动态能耗, P_f^x 是设备满载时的动态能耗, T 为设备 x 的容量。文献[9,10]的实验表明设备空载时也会有一定能耗,并且随着业务负载的增加呈线性增长,与 Linear 模型相吻合,所以 Linear 模型较符合实际应用。

2.2 问题描述

网络能耗与网络资源密切相关,通过对资源的优化和合理配置可以实现节能^[11]。绿色 IP over WDM 网络要求在给定网络拓扑、业务负载、链路容量的条件下,为业务请求寻找路由和分配带宽资源,在保证一定网络通信性能的同时找出必须开启的设备。网络能耗最小化问题可以通过能耗模型建立目标函数和约束条件进行形式化描述^[7,10,12],所用符号的含义如表 1 所示。

表 1 符号定义

Table 1 Symbol definition

Symbol	Definition
i, j	Index the nodes in the virtual light path topology (IP layer). A light path virtual link connects two such end nodes
s, d	Index source and destination nodes of an end-to-end traffic demand
P_i^f	Energy consumption of an IP router in node i , which obeys the on-off or linear power consumption model
P_i^t	Energy consumption of an optical transmitter or receiver in node i , which obeys the on-off or linear power consumption model
P_λ^o	Energy consumption of an OXC in a single wavelength channel, which obeys the on-off or linear power consumption model
P_λ^w	Energy consumption of an optical multiplexer or demultiplexer in a single wavelength channel, which obeys the on-off or linear power consumption model
P_λ^e	Energy consumption of an optical amplifier in a single wavelength channel, which obeys the on-off or linear power consumption model
α	Link utilization ratio range from 0 to 1
C_{ij}	Number of wavelength channels on the virtual link between node pair (i, j)
B	Capacity of each wavelength
t^{sd}	Amount of traffic demand between node pair (s, d)
t_{ij}^{sd}	Amount of traffic demand between node pair (s, d) that traverses virtual link (i, j)

目标函数为最小化能耗,即

$$\min(P_{\text{total}}) = \sum_{i=1}^N (P_i^f + P_i^t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} (P_\lambda^o + P_\lambda^w + P_\lambda^e), \quad (5)$$

约束条件

$$\sum_{j=1}^N t_{ij}^{sd} - \sum_{j=1}^N t_{ji}^{sd} = \begin{cases} t^{sd}, & i = s \\ -t^{sd}, & i = d, \quad \forall s, d, i \in N, \quad s \neq d, \\ 0, & i \neq s, d \end{cases} \quad (6)$$

$$t_{ij} = \sum_{s=1}^N \sum_{d=1}^N t_{ij}^{sd} \leq \alpha C_{ij} B, \quad \forall i, j \in N, i \neq j. \quad (7)$$

(5)式表示 IP over WDM 网络的总能耗,从左至右的乘积项依次为所有节点能耗和链路能耗;(6)式为 IP 层流量约束条件,即一个 IP 层节点引入的业务量等于从该节点流出的业务量与流入该节点的业务量之差;(7)式中 $\sum_{s=1}^N \sum_{d=1}^N t_{ij}^{sd}$ 代表节点对 (i, j) 间的所有业务量,它不能超过链路容量上限值 $\alpha C_{ij} B$ 。

3 IP over WDM 网络的节能方法

通信网络节能的重要性得到了世界电信与网络标准化组织的高度重视,IEEE GLOBECOM, OFC/NFOEC, ONDM 等国际学术会议近年来专门列出此专题探讨有效的节能技术与方法。下面对已有的 IP over WDM 网络节能方法进行分类,讨论不同解决方案的基本原理并总结相关成果。

3.1 基于节能的 IP 数据包转发

在 IP 数据包转发的过程中,以路由器接口子卡作为服务对象,不同的数据包转发方式会影响路由器的吞吐量、包延迟以及能耗^[13]。为了降低 IP over WDM 网络 IP 层的能耗,提出了能量感知 IP 数据包转发机制。

Chabarek 等^[9]选取了两种常用的路由器,比较了不同业务负载下的设备能耗,实验表明路由器空载时的能耗约为设备满载能耗的 0.8 倍,数据传输速率不变时,IP 数据包越小则路由器的能耗越大;Baldi 等^[14]提出了一种基于时间的数据包交换方法——流水转发,要求所有的路由器在统一的时钟标准下同步工作,使得 IP 数据包无需进行缓冲和包头处理,加快转发速度,降低了路由器等网络基础设施的能耗;此外,流水转发机制还可应用于 WDM 层,利用时间参考系统使光交换设备同步工作,提高 WDM 链路利用率^[15],但具体节能效果有待进一步分析。

3.2 休眠

休眠是基于骨干网的负载特点提出的节能方案。通常骨干网的业务负载在一天中不同时刻大小不同^[16],初始时刻针对高峰业务配置网络,当负载较小时,存在可暂停使用或利用率低的节点和链路,造成了能源的浪费。如何实现能耗最小化,在服务质量许可的条件下使节点和链路进入休眠模式,并设计灵活的管理与控制机制成为关键所在。

Gupta 等^[4]首先提出采用间歇休眠机制解决网络的能耗问题,通过更改网络协议,使得网络接口、路由器、转换开关等设备休眠达到节能的目的,但他们只讨论了研究方向,没有给出具体方法及其节能效果。Chiaraviglio 等^[17]指出关闭节点可以节省更多的能量,它采用启发式算法先试图关闭空闲节点,再关闭闲置链路,仿真结果显示在保证正常连接和服务质量的限制条件下,低峰时段节点和链路的关闭比例可达 30%~50%。Cianfrani 等^[18]对 OSPF 协议下的最短路径算法进行改进,提出了质量感知(EAR)路由算法,实现步骤是:1)根据节点维度,选定输出路由器(ER),定义 ER 所有邻节点为输入路由器(IR),计算 ER 节点的最短路径树;2) IR 节点生成参考路径树,与 ER 节点的最短路径树进行比较,不存在的链路即可被关闭。文献[4,17,18]完全针对 IP 层设计不同的休眠机制,但没有定义节点和链路能耗的计算公式,只考虑了最终可关闭的节点、链路的比例。Mellia 等^[19]针对阶梯式网络拓扑,采用迭代思想尝试逐个关闭节点和链路,计算得到网络的总能耗降低 23%,但没有涉及 WDM 层设备的休眠问题。

事实上,同时考虑 IP 层和 WDM 层的设备使用情况可以最大程度地降低网络能耗。Idzikowski 等^[20]针对网络中不同层次采取不同路由算法,建立混合整数线性规划(MILP)模型,设计了一个峰值业务下的静态基础网络,所有设备均开启,当业务需求变化时,重构该网络,关闭闲置的接口子卡。Zhang 等^[21]基于实际网络一天的流量特性,以每 2 h 为一个时隙,分别建立 MILP 模型计算接口子卡和业务底板所需的最小能耗,仿真表明在低峰时段通过关闭空闲设备可以节省 30%网络总能耗。文献[20,21]的不足之处在于没有分析其他设备,如转发器、放大器如何休眠。

值得注意的是,现有文献均假设网络设备只有在没有业务经过和业务上下时才能被关闭,对于低负载设备的休眠问题尚无描述,如何利用负载转移的方式把这些业务腾空,使得当前设备具备休眠条件是下一步的

研究重点。

3.3 光旁路

在传统的 IP over WDM 网络中,所有光路携带的业务量都是通过 IP 路由器处理和转发的。光旁路要求被转换为光信号的 IP 业务全部在光域中传输,旁路所有中间节点的 IP 层路由器,极大地节省了接口子卡的数目。由于 IP 路由器是光网络的主要耗能设备^[7],因此光旁路机制可以有效地实现节能。

Vismara 等^[22]建立整数线性规划(ILP)模型,将光旁路机制下的节能问题简化为一个 WDM 层的路由和波长分配问题,网络能耗明显减小。Caria 等^[23]比较高、低峰业务情况下分别采用光旁路和休眠机制的网络总能耗,仿真结果表明在低峰时段,休眠机制的节能效果优于光旁路,而在高峰时段,光旁路机制下的能耗略小于休眠的情况,这是因为业务负载较大时休眠难度大,而光旁路能够减少路由跳数从而降低电层的能耗,此外由于光旁路不需要路由收敛,网络传输时更加稳定。

3.4 业务疏导

业务疏导是仅多协议标签交换(GMPLS)中一项关键机制,旨在实现网络业务的最优化处理。已有的业务疏导方案以提高带宽利用率、最小化网络拥塞、最小化网络成本等为优化目标,但是事实上,流量疏导机制还能够解决网络能耗最小化的问题,通过将多个低速 IP 业务流汇集到同一个大容量的 WDM 波长信道进行传输,重复利用已建光路和设备,节省网络能耗。目前针对光网络能耗优化问题的业务疏导机制有两种:单跳业务疏导和多跳业务疏导^[5,24]。前者要求低速业务流以单跳光路的方式到达目的节点,本质上建立一种端到端的直达光路;后者允许业务流利用多跳光路到达目的节点。与光旁路相比,业务疏导提高了带宽利用率,但光-电-光转换次数增加,因此不少文献将光旁路和业务疏导两种机制结合起来进行研究。

Yetginer 等^[25]尝试在 WDM 光网络中采用业务疏导机制,分别构建了以最少路由器端口数、最少电交换流量及最小功耗为目标函数的 ILP 模型,结果表明使用最小功耗函数模型来节能更为有效。为了评估核心网的能耗,Heddeghem 等^[8]以泛欧教育网为例,分别采取链路-链路疏导和端-端疏导机制,前者利用时分复用方式在电域进行数据包交换,此时 WDM 层业务流必须经过 IP 层处理,后者类似光旁路机制,仅在光域疏导本地地上、下路业务,假定每年的业务负载以 50% 的速度递增,端-端疏导机制节能优势更显著。Vismara 等^[22]比较了三种节能机制,即光旁路、业务疏导及光旁路联合业务疏导的网络功耗,仿真发现采用光旁路和业务疏导相结合的混合疏导机制得到的功耗最小。Tucker 等^[5]深入研究了静态流量下 IP over WDM 骨干网中的节能问题,采用 MILP 模型,基于光旁路和业务疏导设计了两种启发式算法:单跳光旁路(LDB)算法和多跳光旁路(LMB)算法,通过 MILP 模型总能得到最小网络能耗,启发式算法次之,并且启发式算法可以使节点能耗均衡分布。Hou 等^[24]计算了单条光路能耗,借助波长综合辅助图将光网络的物理拓扑和虚拟拓扑信息整合起来,在动态流量下,多跳光旁路的节能效果依然优于直接光旁路。文献^[5,22,24]中提出的混合疏导机制均假设网络节点对之间的业务量是已知或可预测的,然而实际情况下 IP 业务频繁变化,网络的业务量矩阵难以精确估计。针对该研究场景,Hou 等^[26]又采用稳健综合疏导(RIG)算法,利用最小功率比值优先(MPRF)方法得到负载分配向量(TDV),由此获得节点间业务量和光纤链路的资源分配信息,建立一个绿色光虚拓扑,通过混合疏导机制将连接请求疏导至已建光路实现节能;为了解决混合疏导机制导致的网络成本上升的问题,还提出在光层使用波段交换机制,结果与文献^[27]相比,RIG 算法平均节省 15% 的网络功耗和 32% 的接口数目。

上述文献采用不同业务疏导方法降低功耗,但减少网络功耗不一定减少网络能耗,因为网络能量消耗是由功耗和时间共同决定的。Zhang 等^[28]指出在进行业务疏导时必须考虑时间因素的影响。针对静态业务,参照文献^[29]建立 ILP 模型求解最小网络能耗,所有连接请求的建立以及拆除时间均作为已知量,对于动态业务,考虑到连接请求的随机性,提出时间感知业务疏导算法(TATG)将连接请求尽量疏导到维持时间较长的已建光路中传输,仿真结果与文献^[30]中的最小光路数算法和最小跳数算法相比,低负载下选择 TATG 算法得到的网络能耗最小,阻塞率最低,而高负载时最小跳数算法的节能效果更好,负载阈值取决于具体的网络拓扑和业务量特点。

3.5 能量感知路由

能量路由是最早提出的传感器路由机制之一,它根据传输路径上的能量需求选择数据的转发路径。借

鉴能量路由策略的基本思想,在 IP over WDM 网络中引入能量感知路由,从源节点到目的节点的所有路径中选取节点能耗之和最少的路径。

Restrepo 等^[31]为每种网络设备建立一个能量感知文件,然后基于该文件和实际的负载信息进行路由,与最短路径算法相比,节能比例在 10%~35%。Masan 等^[32,33]研究了动态流量下基于业务疏导的能量感知机制,根据设备能耗设置路由权重,采用基于业务量大小(RSB)的启发式算法和基于最优链路(LUB)的启发式算法最小化网络能耗,与传统路由方式相比网络能耗降低 30%。Xia 等^[3,34]分析了设备层和传输层中几种可行的节能途径,讨论了网络层的节能方法,提出能量感知供给机制,它借鉴了混合疏导的思想,但重新定义辅助图的边权为设备能耗的函数,通过在所有波长平面辅助图上运行 Dijkstra 算法得到网络的最小运行能耗,仿真比较了能量感知供给机制、业务疏导及光旁路三种方法的节能效果,发现前者的网络能耗较小,并且带宽阻塞率(BBR)最低,在设备能耗与业务负载呈线性关系和只有源、宿节点处可进行业务疏导这两种特殊情况下网络的节能效率更高。另外,由于节能的最终目标是降低碳排放量,Arnaud^[35]从一个全新角度出发,指出可以利用新能源如太阳能、风能、风光互补等方式为设备供电,在控制平面作用下,优先考虑经过这些设备的路径。

4 几种节能方法的比较

一种理想的 IP over WDM 网络节能方案应当是支持动态业务负载请求且无需控制信号的跨层优化策略。表 2 根据上述特性要求对本文提到的一些节能方案做进一步分析^[36],以算法涉及的网络层次为评判标准比较了不同方案的节能效果,即跨层优化策略能够最大程度地降低功耗,其次与光层设备相比,电层设备的能耗较多,因此电层优化策略的节能潜力更大。不难发现,已有研究成果很多是在静态业务负载的场景下提出的;对小型网络常采用 ILP, MILP 等数学优化算法,而大型网络则选取启发式算法;与其他节能策略相比,休眠能够彻底关闭闲置设备,节能效果较好,但需要控制信号;将光旁路、业务疏导和能量感知路由由三种机制整合使用,节能优势也很显著,特别是在峰值业务下,它相对休眠可以降低更多网络能耗。

表 2 IP over WDM 网络节能方法的比较

Table 2 Energy-saving approaches in IP over WDM network

Reference	Approach	Load type	Extra signaling and control	Network layer	Algorithm	Degree of energy-savings
[14]	Packet forwarding	Static	✓	IP	Packet forwarding	Medium
[18]	Sleeping mechanism	Dynamic	✓	IP	EAR	Medium
[17]	Sleeping mechanism	Static	✓	IP	Heuristic	Medium
[20]	Sleeping mechanism	Dynamic	✓	IP, WDM	MILP, Heuristic	High
[21]	Sleeping mechanism	Static	✓	IP, WDM	MILP	High
[22]	Optical bypass	Static	×	WDM	ILP	Low
[23]	Optical bypass	Static	×	IP, WDM	ILP	High
[25]	Traffic grooming	Static	×	WDM	ILP	Low
[8]	Traffic grooming	Static	×	IP, WDM	Heuristic	High
[5,22]	Optical bypass, traffic grooming	Static	×	IP, WDM	MILP, Heuristic	High
[24]	Optical bypass, traffic grooming	Dynamic	×	IP, WDM	Heuristic	High
[26]	Optical bypass, traffic grooming	Unknown	×	IP, WDM	Heuristic	High
[28]	Traffic grooming	Static, dynamic	×	IP, WDM	ILP, Heuristic	High
[31]	Energy-aware routing	Static	×	IP	Heuristic	Medium
[32,33]	Traffic grooming, energy-aware routing	Dynamic	×	WDM	Heuristic	Low
[3,34]	Optical bypass, traffic grooming, energy-aware routing	Static, dynamic	×	IP, WDM	Heuristic	High

5 结束语

本文较全面地综述了绿色 IP over WDM 网络的最新研究,以设备的能耗模型为基础,利用目标函数和约束条件描述了网络能耗最小化问题,对已有的节能方法进行了分类、比较。可以看到在目前的研究中,所有节能方案是在业务负载已知的条件下,基于不同节能思想设计相应的启发式算法和数学优化方法;就节能效果而言,采用休眠或者把能量感知路由、光旁路及业务疏导相结合都是较优的方案。

IP over WDM 网络节能问题是一个重大的研究课题,需要从基础理论、工程设计和工程应用等多方面进一步研究,具体包括:

1) 拓展研究场景。目前多数节能方案均假设网络节点对之间的业务负载是已知或可预测的,但在实际情况下,IP 业务具有突发性,因此有必要探讨在业务负载未知时 IP over WDM 网络的节能问题。另外,多优先级业务场景下的节能方案也有待研究。

2) 进一步提高节能算法的性能。目前研究的主流是依据不同的节能思想设计启发式算法,如何使算法获得最优解是以后的研究方向。

3) 制定多评价指标。已有的方案以网络总能耗作为唯一的评价指标,没有考虑节能方案对网络性能(如吞吐量、延时)的影响,所以应当建立多节能评价指标,给出更为全面准确的评估。

4) 基础理论研究与应用相结合。基础理论研究注重节能模型、策略、算法与机制,而工程设计和应用要考虑成本、地理信息、网络规模、业务应用量和业务重要等级等,如何在节能和工程应用中达到平衡,是重要的研究课题。

参 考 文 献

- 1 黄 舒,王 兵,邬贺铨. ICT 步入转型换代关键期[EB/OL]. <http://www.cnii.com.cn/wlkb/rmydb/content/2011-03-03>
- 2 彭甜甜,杨 辉,赵永利等. 推进绿色节能:新一代光网络体系架构瞄准五大方向[EB/OL]. <http://www.cww.net.cn/tech/html/2011/7/4/2011741011144993.htm>, 2011-07-04
- 3 M. Xia, M. Tornatore, Y. Zhang *et al.*. Greening the optical backbone networks: a traffic engineering approach[C]. IEEE ICC 2010, 2010
- 4 M. Gupta, S. Singh. Greening of the Internet[C]. SIGCOMM, 2003, 19~26
- 5 R. S. Tucker. Green optical communications-part II: energy limitations in networks [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, **17**(2): 261~274
- 6 A. Silvestri, A. Valenti, S. Pompei *et al.*. Wavelength path optimization in optical transport networks for energy saving [C]. ICTON 2009, 2009
- 7 G. Shen, R. S. Tucker. Energy-minimized design for IP over WDM networks[J]. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2009, **1**(1): 176~186
- 8 W. Heddeghem, M. Groote, W. Vereecken. Energy-efficiency in telecommunications networks: link-by-link versus end-to-end grooming[C]. ONDM 2010, 2010
- 9 J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford *et al.*. Power awareness in network design and routing[C]. IEEE INFOCOM 2008, 2008
- 10 M. Priya, S. Puneet, B. A. Sujata. Power benchmarking framework for network devices[C]. Networking 2009, 2009
- 11 Lin Chuang, Tian Yuan, Yao Min. Green network and green evaluation: mechanism, modeling and evaluation[J]. *Chinese J. Computers*, 2011, **34**(4): 593~612
林 闯,田 源,姚 敏. 绿色网络和绿色评价:节能机制、模型和评价[J]. *计算机学报*, 2011, **34**(4): 593~612
- 12 L. Chiaraviglio, M. Mellia, F. Neri. Energy-Aware Networks: Reducing Power Consumption by Switching Off Network Elements[EB/OL]. <http://www.ist-phosphorous.org/files/tnc2008workshop/mmelia-workshop-tnc2008.pdf>, 2008-05
- 13 Li Jinfang, Zhang Jun, Rao Desheng *et al.*. Packet forwarding method for self-adap-ted changeable time piece of router[J]. *Computer Engineering*, 2009, **35**(16): 84~86
李金方,张 军,饶德胜等. 路由器自适应可变时间片数据包转发方法[J]. *计算机工程*, 2009, **35**(16): 84~86
- 14 M. Baldi, Y. Ofek. Time for a "greener" Internet[C]. IEEE ICC 2009, 2009
- 15 D. Grieco, A. Pattavina, Y. Ofek. Fractional lambda switching for flexible bandwidth provisioning in WDM networks: principles and performance[J]. *Photon. Netw. Commun.*, 2005, **9**(3): 281~296

- 16 D. Yun, J. Lee. Research in green network for future network[J]. *J. KIISE*, 2010, **28**(1): 31~40
- 17 L. Chiaraviglio, M. Mellia, F. Neri. Reducing power consumption in backbone networks[C]. IEEE ICC 2009, 2009
- 18 A. Cianfrani, V. Eramo, M. Listanti. An energy saving routing algorithm for a green OSPF protocol [C]. IEEE INFOCOM WKSHPS 2010, 2010
- 19 M. Mellia, L. Chiaraviglio, F. Neri. Energy-aware backbone networks: a case study [C]. IEEE ICC 2009, 2009
- 20 F. Idzikowski, S. Orłowski, C. Raack *et al.*. Saving energy in IP-over-WDM networks by switching off line cards in low-demand scenarios[C]. ONDM 2010, 2010
- 21 Y. Zhang, M. Tornatore, P. Chowdhury *et al.*. Time-aware energy conservation in IP over WDM networks[C]. PS 2010, 2010
- 22 F. Vismara, V. Grkovic, F. Musumeci *et al.*. On the energy efficiency of IP over WDM networks[C]. IEEE LATINCOM 2010, 2010
- 23 M. Caria, M. Chamania, A. Jukan. Trading IP routing stability for energy efficiency: a case for traffic offloading with optical bypass[C]. ONDM 2011, 2011
- 24 W. Hou, L. Guo, X. Wang. Traffic grooming algorithms for power efficiency in IP over WDM networks[C]. ICCSNA 2011, 2010
- 25 E. Yetginer, G. Rouskas. Power efficient traffic grooming in optical WDM networks[C]. IEEE GLOBECOM 2009, 2009
- 26 W. Hou, L. Guo, X. Wang. Robust and integrated grooming for power and port cost-efficient design in IP over WDM network[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(20): 3035~3049
- 27 X. Zhang, L. Li. Robust routing algorithms based on valiant load balancing for wavelength-division-multiplexing mesh networks[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(8): 365~374
- 28 S. Zhang, D. Shen, C. Chan. Energy-efficient traffic grooming in WDM networks with scheduled time traffic[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(17): 2577~2584
- 29 S. Huang, D. Seshadri, R. Dutta. Traffic grooming: a changing role in green optical networks[C]. IEEE GLOBECOM 2009, 2009
- 30 H. Zhu, H. Zhang, K. Zhu *et al.*. Dynamic traffic grooming in WDM mesh networks using a novel graph model[C]. IEEE GLOBECOM 2002, 2002
- 31 J. C. C. Restrepo, C. M. Machuca. Profile aware routing[C]. IEEE ICC 2009, 2009
- 32 M. Masan, F. Farahmand, J. Jue. Energy-awareness in dynamic traffic grooming[C]. OFC 2010, 2010
- 33 M. Masan, F. Farahmand, A. Patel *et al.*. Traffic grooming in green optical networks[C]. IEEE ICC 2010, 2010
- 34 M. Xia, M. Tornatore, Y. Zhang *et al.*. Green provisioning for optical WDM networks[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, **17**(2): 437~445
- 35 B. St. Arnaud. CANARIE: research networks to help reduce global warming[C]. OFC 2009, 2009
- 36 Y. Zhang, P. Chowdhury, M. Tornatore *et al.*. Energy efficiency in telecom optical networks[J]. *Commun. Surv. Tutor.*, 2010, **12**(4): 441~458