

基于路径的整数线性规划方法在阻塞 IP over WDM 网络中能耗优化的应用

陈 彬 鲍东晖* 苏恭超 代明军 王 晖 林晓辉

(深圳大学信息工程学院 深圳 518060)

摘 要: 针对容量有限的透明 IP over WDM 网络模型, 该文提出一种基于路径的整数线性规划(ILP)方法来优化网络的能耗。相对基于连接的整数线性规划方法, 该方法可以在光层提供更多的路径选择组合。仿真结果显示, 基于路径的整数线性规划方法能够通过选择更优的光路组合进一步降低网络的能耗。

关键词: 光通信; IP over WDM; 能耗; 整数线性规划

中图分类号: TN915.63

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)03-0715-06

DOI: 10.11999/JEIT140704

The Application of the Path Based Integer Linear Programming Method for Optimizing Energy Consumption in Blocking IP over WDM Networks

Chen Bin Bao Dong-hui Su Gong-chao Dai Ming-jun Wang Hui Lin Xiao-hui

(College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: A path based Integer Linear Programming (ILP) method is proposed to optimize the network energy consumption under the bandwidth constrained transparent IP over WDM network model. Compared with the link based ILP method, this method can provide more lightpath combinations in the optical layer. The simulation results show that the path based ILP method can select the better lightpath combinations than the link based ILP method, and achieve lower network energy consumption.

Key words: Optical communication; IP over WDM; Energy consumption; Integer Linear Programming (ILP)

1 引言

据统计^[1], 信息和通信技术的碳排放占据全球所有碳排放的 2%, 这一比例到 2020 年将翻一番。其中, 通信网络能耗是信息和通信技术能耗的主要构成部分^[2]。通信网络的能耗研究已经引起了广泛的关注。IP over WDM 网络是核心网络的主要技术, 针对该网络能耗问题的研究对于节能降耗也具有重要的意义。

网络能耗与网络资源的使用密切相关, 绿色 IP over WDM 网络要求在给定的网络拓扑、链路容量、业务负载的条件下, 为业务请求寻找路由以及分配带宽资源(Router and Wavelength Assignment, RWA), 在保证规定网络通信性能的同时尽量减少设备的使用^[3]。业务流量疏导机制通过将多个低速 IP 业务流汇集到同一个大容量的 WDM 波长信道进

行传输, 重复利用已开启的设备, 是 IP over WDM 网络节约资源的有效方法^[4]。为实现网络配制的最优化, 该问题往往都被转化为一个整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)问题。目前对 IP over WDM 网络能耗的研究主要在无容量约束网络中, 假设所有业务都被接受的情况^[5-8], 但是我们认为在容量有限的网络中即阻塞网络中的能耗优化研究更贴近网络实际, 因此我们提出一种双目标方法, 该方法先计算出网络的最大通过率, 然后在此基础上优化网络的能耗, 解决了阻塞网络中的能耗最小化求解问题^[9]。文献[9]采用基于连接的 ILP 算法, 该方法在透明光网络模型下^[10], 限制了光路选择的自由度。为进一步降低网络能耗, 本文尝试采用基于路径的 ILP 方法^[11,12], 扩大光路选择的自由度, 希望能够进一步优化网络能耗。

2 IP over WDM 网络结构

本文采用透明 IP over WDM 网络^[10]能耗模型如图 1 所示。在 IP 层中, 核心路由器从低端路由器那里汇聚业务, 将其转发给光交换节点。光交换节点之间通过光纤相互连接。在每根光纤中包含多个波长。与每根光纤相连的复用器与解复用器, 能够实现波长复用和解复用, 以便在光交叉连接器

2014-05-27 收到, 2014-09-24 改回

国家自然科学基金(61301182), 广东省自然科学基金(S2013040016857), 教育部博士点基金(20134408120004), 广东省教育厅育苗工程基金(S2013LYM_0077), 深圳市基础研究项目(JCYJ20140418095735590)和深圳大学科研基金资助面上项目(00036107, 00002501)资助课题

*通信作者: 鲍东晖 dhbao@foxmail.com

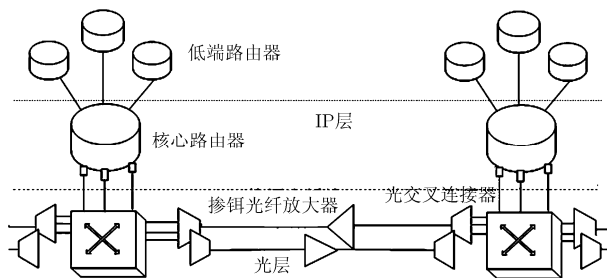


图 1 IP over WDM 网络结构

(Optical Cross-Connect, OXC) 中进行交换。在每根光纤链路每隔固定距离部署掺铒光纤放大器光 (Erbium Doped Fibre Amplifier, EDFA) 对光信号进行的放大。另外, 光信号的传输距离受到光纤以及光器件线性和非线性损伤的影响, 最大传输距离被限制^[13]。对于 10 Gbps 的光信号来说, 最大可传输距离只有 2000 km。由于 EDFA 在光网络中已经铺设完毕, 它们的能耗是固定的。对于任何一种业务量疏导的方法, 在业务给定的情况下, 业务终端节点路由器对信号的处理能耗也是固定的, 所以在本文中我们仅仅考虑 IP 连接中间节点的能耗, 它包括 IP 路由器、转换器、和光交叉连接器的能耗, 分别用 P_I , P_T 和 P_O 表示。下面以图 2 为例, 计算在透明光网络中进行流量疏导的网络能耗。图 2 中有两个 IP 连接请求, 分别为从端点 A 到 B 带宽为 r_1 的请求 1 和从端点 A 到 E 带宽为 r_2 的请求 2。假设波长带宽为 10 Gbps。为容纳请求 1 和请求 2, 网络通过建立光路为 IP 层提供从 A 到 B 和 E 的可达路径。首先, 网络为请求 1 建立了从 A 到 B 的光路 AB 。为容纳请求 2, 网络需要在使用已有光路 AB 的基础上再建立连接节点 B 和 E 的光路。由于从 B 到 D 距离为 2400 km 超过了 2000 km。所以网络需要建立从 B 到 C 和从 C 到 E 两条光路。请求 2 通过 3 条光路到达节点 E , 并分别需要在 B 和 C 节点处进行光-电-光转换和路由。网络为容纳两个连接请求, 共建立 3 条光路, 这其中, 光路 AB 使用了 2 个转换器和 2 次光交换; 光路 BC 使用了 2 个转换器和 2 次光交换; 光路 CE 跨越了 D 节点, 增加了一次光交换, 使用了 2 个转换器和 3 次光交换。所

以网络总共使用了 6 个转换器和 7 次光交换。 B 和 C 节点的路由器对请求 2 实施了两次 IP 路由。除去源节点和目的节点路由器对业务处理的能耗, 网络总能耗为 $6P_{\text{T}} + 7P_{\text{O}} + 2r_2 \cdot P_1$ 。

3 两种 ILP 算法

在阻塞 IP over WDM 网络的能耗问题中, 必须同时优化网络通过率和网络能耗这两个相互矛盾的目标。文献[9]假设通过率是更重要的目标, 采用主目标求解法先求解最大的网络通过率, 然后在网络最大通过率的约束下进行能耗优化。文献[9]在透明光网络模型下采用基于连接的 ILP 算法进行求解。但该方法在对光路长度约束的同时也限制了光路选择的自由度。本文尝试采用基于路径的 ILP 方法, 扩大光路选择的自由度, 进一步优化网络能耗。下面, 我们将列出两种算法并进行比较。

在 IP over WDM 网络中, 变量 m, n 表示每根光纤的两个端点, i, j 表示每条光路的两个端点, 而 s, d 表示在 IP 层连接请求的源端点和目的端点。

3.1 基于连接的 ILP 算法

参数如下： $G(V, E)$ 为物理拓扑， V 为节点的集合， E 为光纤连接的集合。 N 为每个光纤含有的波长的数量，假设每个光纤携带同样数量的波长。 B 为每个波长信道的容量。 x 为 IP 连接请求的基本带宽单位。 Λ 为业务量矩阵。 Λ_{sd} 表示从端点 s 到端点 d 带宽为 x 的连接请求的个数。 D_{mn} 为相邻节点 m 和 n 之间的距离。

决策变量如下： λ_{sd}^t 为从 s 到 d 的第 t 个连接请求，如果成功路由，则 $\lambda_{sd}^t = 1$ ；否则， $\lambda_{sd}^t = 0$ 。
 $U_{ij}^{sd,t}$ 为如果 λ_{sd}^t 使用了从 i 到 j 的光路， $U_{ij}^{sd,t} = 1$ ；否则， $U_{ij}^{sd,t} = 0$ 。
 v_{ij} 为从节点 i 到 j 的光路数量。 v_{ij}^w 为从节点 i 到 j 使用了波长 w 的光路数量。 F_{mn}^w 为如果在光纤连接 (m,n) 上使用了波长 w ，则 $F_{mn}^w = 1$ ；否则， $F_{mn}^w = 0$ 。
 $F_{mn}^{ij,w}$ 为如果有波长为 w 从 i 到 j 的光路通过了光纤链路 (m,n) ，则 $F_{mn}^{ij,w} = 1$ ；否则， $F_{mn}^{ij,w} = 0$ 。

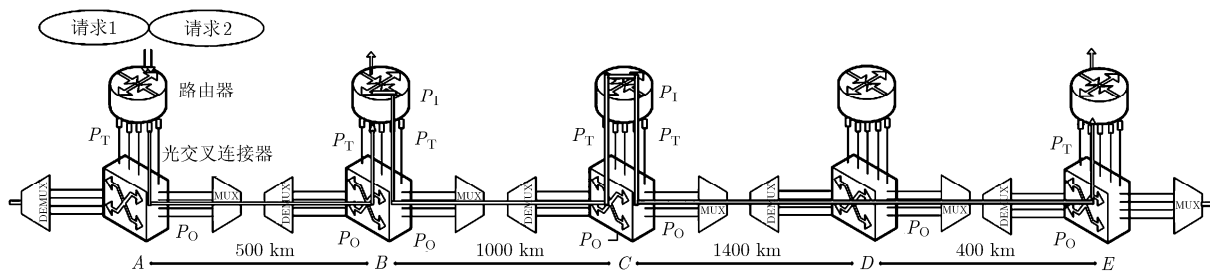


图 2 透明 IP over WDM 网络模型下的流量疏导

$$\sum_{j \in V: i \neq j} U_{ij}^{sd,t} - \sum_{j \in V: i \neq j} U_{ji}^{sd,t} = \begin{cases} \lambda_{sd}^t, & i = s \\ -\lambda_{sd}^t, & i = dt \in [1, A_{sd}], \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_t \sum_{s,d} U_{ij}^{sd,t} \times x \leq \sum_{w=1}^N v_{ij}^w \times B, \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_{n \in V: m \neq n} F_{mn}^{ij,w} - \sum_{n \in V: m \neq n} F_{nm}^{ij,w} = \begin{cases} v_{ij}^w, & m = i \\ -v_{ij}^w, & m = j, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad \forall i, j, m, w: i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V: i \neq j} F_{mn}^{ij,w} \leq F_{mn}^w, \quad \forall m, n, w: m \neq n \quad (4)$$

$$\sum_{m \in V} \sum_{n \in V: m \neq n} F_{mn}^{ij,w} \cdot D_{mn} \leq 2000, \quad \forall i, j, w: i \neq j \quad (5)$$

式(1)为 IP 流在虚拟拓扑的路由约束。式(2)保证网络中路由的业务不会超过所建立光路的容量。式(3)为光层路由的流约束。式(4)保证在链路 (m,n) 上任意波长 w 最多只能被一条光路使用。式(5)是光路最大可达距离约束。

最大化网络的通过率 f_1 :

$$f_1 = \sum_{t,s,d} x \times \lambda_{sd}^t \quad (6)$$

最小化网络的能耗 f_2 :

$$f_2 = 2P_T \cdot \sum_{i,j} v_{ij} + P_O \sum_{i,j} \left[v_{ij} + \sum_w \sum_{m,n} F_{mn}^{ij,w} \right] + P_1 \sum_{x,s,d,t} x \cdot \left[\sum_{i,j} U_{ij,x}^{sd,t} - \lambda_{sd}^t \right] \quad (7)$$

本文先以式(6)作为目标函数, 以式(1)~式(5)作为约束, 计算出网络的最大通过率, 用 T 表示。然后以式(7)作为目标函数, 将式(8)加入约束方程组来优化网络的能耗。

$$\sum_{s,d,t} x \cdot \lambda_{sd}^t \geq T \quad (8)$$

3.2 基于路径的 ILP 算法

在基于路径的 ILP 算法中, 首先使用 K 条最短路径 (K Shortest Path) 算法^[14] 计算给定的 WDM 光网络中任意两个节点之间的 K 条最短路径。

参数: D_{ijk} 为端点 i 到 j 的第 k 条路径的长度。

决策变量: C_{ijk}^w 为如果光路使用了从 i 到 j 的第 k 条路径并使用了波长 w , $C_{ijk}^w = 1$; 否则, $C_{ijk}^w = 0$ 。 P_{ijk}^l 为如果光路使用了从 i 到 j 的第 k 条路径并使用了链路 l , 则 $P_{ijk}^l = 1$; 否则 $P_{ijk}^l = 0$ 。

约束如下:

$$\sum_t \sum_{s,d} U_{ij}^{sd,t} \times x \leq \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^N C_{ijk}^w \times B, \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$\sum_{ij \in V} \sum_{k=1}^K C_{ijk}^w \cdot P_{ijk}^l \leq 1, \quad \forall l, w \quad (10)$$

$$C_{ijk}^w \cdot D_{ijk} \leq 2000, \quad \forall i, j, k, w \quad (11)$$

式(9)保证网络中路由的业务不会超过所建立光路的容量。式(10)确保没有两个光路在同一个链路上共享同一个波长。式(11)为距离的限制, 每个光路最大可达距离为 2000 km。

最小化网络能耗 f_3 :

$$f_3 = 2P_T \sum_{ij} \sum_{w,k} C_{ijk}^w + P_O \sum_{ij,k,w} \left[C_{ijk}^w + \sum_l C_{ijk}^w P_{ijk}^l \right] + P_1 \left[\sum_{ij} \sum_{sd,t} x \cdot U_{ij}^{sd,t} - T \right] \quad (12)$$

在基于路径的 ILP 算法中, 以式(6)为目标函数, 式(1)、式(9)、式(10)、式(11)作为约束条件计算出网络的最大通过率 T , 然后以式(12)为目标函数, 将式(8)加入约束条件来优化网络能耗。

3.3 基于路径 ILP 算法的优势

在基于连接的 ILP 算法中, 如果从节点 i 到 j 有多条不共享连接的光路都使用波长 w , 式(5)里的距离约束就变成了对多个光路路径长度之和的约束。所以 v_{ij}^w 只能是 0-1 变量, 也就是从节点 i 到 j 使用波长 w 的光路只能有一条, 才能保证式(5)的正确性, 即透明光路的最长距离不大于 2000 km。而基于路径的 ILP 算法中, 网络中每两个节点之间的路径预先被计算出来。算法可根据式(11)直接在路径集合里选择路径。从节点 i 到 j 的多条路径, 只要不共享连接, 就可以使用相同的波长 w 建立光路。网络中可选择的路径越多, 则基于路径的 ILP 算法就能比基于连接的 ILP 算法提供更多的路径组合, 从而为网络能耗的优化提供更多的可能。

4 仿真结果与分析

仿真采用了 11 个节点的两种不同稠密度的网络。COST239^[9] 网络如图 3(a) 所示, 有 26 个连接, 平均节点度为 4.73。随机网络如图 3(b) 所示, 有 17 个连接, 平均节点度为 3.09。节点之间连接的长度单位为 km。在网络中每个连接两端的节点被称为一对相邻节点, 每对相邻节点由两根光纤连接, 两根光纤的传输方向相反。每根光纤里有 N 个波长, 每个波长带宽为 10 Gbps。对于 COST239 网络业务量矩阵采用文献[15]中的业务量分布, 共有 1000 个业务。每个业务带宽为 2 Gbps, 所以总业务量为 2000 Gbps。对于随机网络我们在节点间随机分配了 300 个业务, 每个业务带宽为 2 Gbps, 总业务量为 600

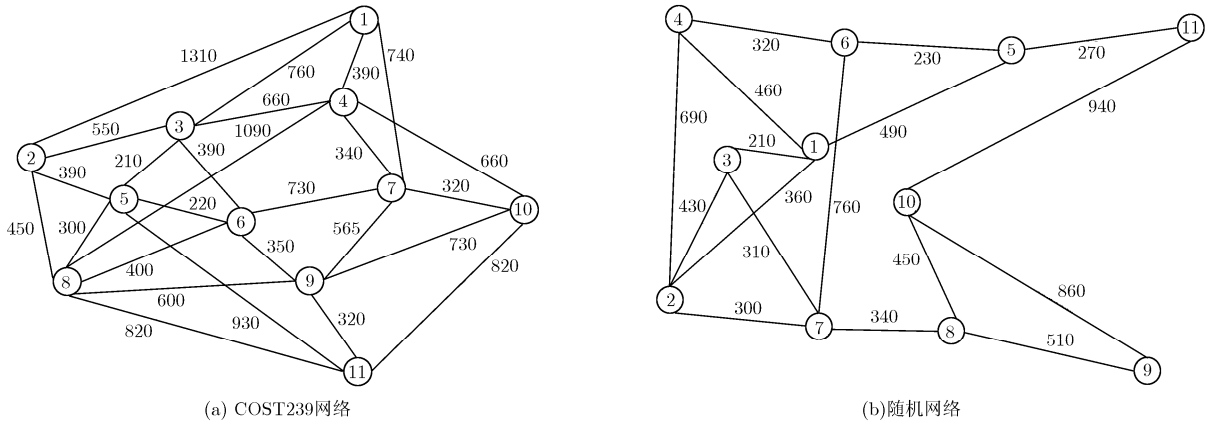


图 3 实验采用网络拓扑(长度单位: km)

Gbps。假定 IP 路由器的能耗为 14.5 W/Gbps; 每一个 WDM 转换器的能耗为 34.5 W; 每波长光交换的能耗为 1.5 W^[16]。预先采用 k 条最短路径算法在每个网络中为每个节点对计算出 $K = 10$ 条最短路径。仿真使用配备了主频为 2.80 GHz 的 Inter i5 CPU 和 4 GB RAM 的 HP Elite7100 MT 个人计算机, 在 VS2010 环境下用 IBM 公司的 CPLEX 线性规划软件对算法进行求解。

从仿真结果得出, 在不同波长数目下两种算法在同一网络里的通过率相同, 这是因为两种算法采用了同样的网络和业务模型。通过表 1 和表 2 可以看出网络通过率随着每根光纤所含波长数的增加而增大。在 COST239 网络中, 当波长数量达到 9 时, 2000 Gbps 的业务量全部通过。所以, N 大于 9 后, 该网络的容量大于业务量。对于随机网络拓扑, 当波长数量达到 10 时, 600 Gbps 的业务量全部通过。所以当 N 大于 10 以后, 该网络容量也大于业务量。

表 1 COST239 网络通过率

波长数量	1	2	3	4	5	6	7	8	9~16
$T(\text{Gbps})$	416	716	936	1116	1296	1476	1656	1836	2000

表 2 随机网络通过率

波长数量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10~16
$T(\text{Gbps})$	232	346	390	428	470	510	526	560	580	600

在最大通过率(见表 1 和表 2)的约束下, 分别对两个网络采用两种算法优化能耗。图 4 比较两种网络建立的光路数目。图 5 比较两种算法的电交换业务量比, 用 $\bar{E}$ 表示: $\bar{E} = x \sum_{sdt} \left[\sum_{ij} U_{ij}^{sd,t} - \lambda_{sd}^t \right] / T$ 。它是网络中路由器对经过业务的总交换量与网络接纳业务总量(通过率)之比。图 6 比较两种算法的网络平均能耗。网络平均能耗定义为网络总能耗除以相应的网络通过率: $P = f_2 / T$ 。

先看 COST239 网络的仿真结果。在图 4(a)中, $N = 1$ 时, 两种算法所建立的光路数相同。随着波长数 N 的增加, 两种算法所建立的光路数不断增加。 $N > 5$ 以后, 基于连接方法使用的光路数增加得更

快。在 $N = 9$ 时, 两种算法使用的光路数量差距达到最大。随着波长数目的继续增加, 两种算法下的光路数目开始减少。在基于路径的算法下, $N > 10$ 以后, 光路数目稳定在 216 左右。而在基于连接的方法下, 直到 $N = 15$ 光路的数目才停止减少。当 $N = 16$, 基于路径的算法所建立的光路仍然明显少于基于连接的算法。

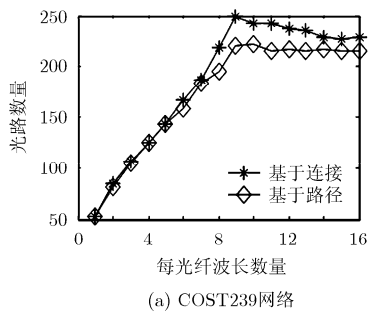
图 5(a)中, $N = 1$ 时, 两种算法的电交换业务比有同样的最大值。这是因为 $N = 1$ 时, 网络主要采用单跳光路, 业务的交换方式主要为电交换。随着每光纤波长数量的增加, 基于路径的 ILP 方法使得网络的电交换业务比下降, 在 $N > 5$ 之后开始缓慢地增加, 直到 $N = 9$ 。在 $N > 9$ 之后, 网络的电交换业务比又缓慢下降稳定在 5% 左右。而在基于连

接的方法下,随着 N 值的增长,网络电交换业务比先下降然后明显上升,在 $N=9$ 时达到最高峰,大约是基于路径方法的3倍。电交换业务比上升可以归结为两个原因:(1)我们在仿真中使用的通过率指标指的是接受了多少个连接请求,而不考虑连接请求的实际距离。优化算法为了达到最大的通过率自然会选择先接受占用资源少的连接请求。这里的资源和物理拓扑里的距离、跳数有关。(2)在该论文的主目标优化方法中,最大通过率为第1目标,最小能耗为第2目标。随着 N 值的增大,所有的短距离业务都被接受了以后,网络不得不开始接受长距离的业务以提高网络的通过率。基于连接的方法需要大量的使用电交换来弥补光路选择受限的不足,以提高网络通过率。所以在基于连接的方法下,电交换业务量比随着 N 增加显著的降低又显著的升高。比较图5(a)和图4(a),当 $N>1$ 以后,虽然两种算法的光路数目相近,但是基于路径的方法可以使用较少的电交换来达到相同的通过率。这说明基于路径的方法采用了更优的光路组合。 $N>5$ 以后,基于路径的方法相比基于连接的方法,甚至可以使用更少的光路,在相同的通过率下将电交换业务量比维持在5%附近。而在基于连接的方法下,电交换业务量比显著增加直到 $N=9$ 。随着波长数目的增加,网络容量大于业务需求后,基于连接的方法有更多的波长路径选择来应付容纳业务和降低网络能耗的双重需要,通过采用不同波长路径的选择来绕过 v_{ij}^w 为0-1变量的约束。所以在基于连接的ILP方法下,电交换业务量比在光路数 N 大于9后,逐渐降低。

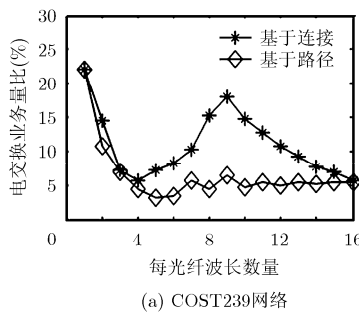
在 $N=16$ 时,基于连接的方法才具有和基于路径方法相近的电交换业务量比。

图6(a)和图5(a)的趋势类似,这是因为电交换在网络能耗中占据主要部分^[5]。在 $N=9$ 时,也就是网络容量和负载匹配的情况下,基于路径方法相比基于连接方法节约的能源最多,节约了大约25%的能耗。对比图4(a)、图5(a),这主要是由于节省电交换的贡献。当 $N>9$ 后,两种算法的能耗差距逐步减小,但直到 $N=16$,基于路径的ILP算法仍然有明显的优势。

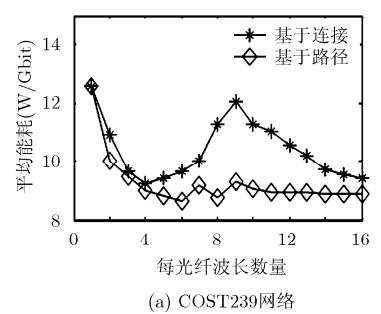
随机网络的仿真结果如图4(b)、图5(b)、图6(b)所示。从仿真结果看出,基于路径的方法相对基于连接的方法没有显著的优势。图4(b)中,随着波长数目 N 的增大,网络中建立的光路不断增多。当 $N=10$ 时,网络中的光路数达到最大值。随着波长数的继续增大,光路数开始降低直到 $N=13$ 。图5(b)中,网络的电交换业务量比在 $N=1$ 时具有最大值,随着 N 的增大网络能耗先降低再升高,直到 $N=10$,然后下降。在 $N>11$ 后,继续增加波长不能再改善网络的电交换业务量比。图6(b)和图5(b)的趋势相似,12 $>N>3$ 时,基于路径的方法的网络平均能耗有微弱的优势。比较图4(b)和图5(b),我们发现基于路径的方法和基于连接的方法建立的光路数接近,并且采用的电交换量也接近,以至于图6(b)中的网络平均能耗表现也接近。这是因为在稀疏网络中,虽然预先对网络中每个节点对之间计算了10条最短路径,但大部分的路径长度都大于2000 km。在长度小于2000 km的路径中,不共享同一光纤的



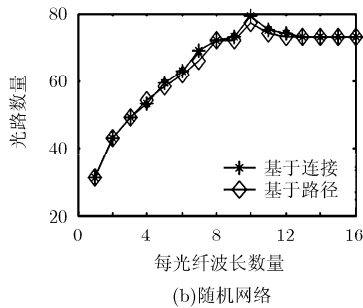
(a) COST239网络



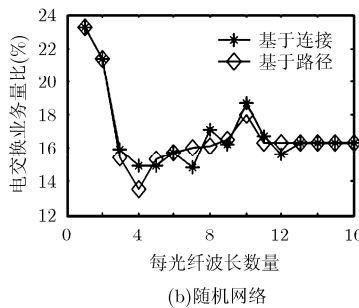
(a) COST239网络



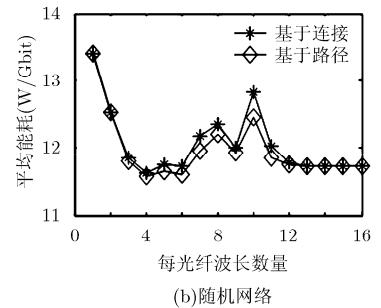
(a) COST239网络



(b)随机网络



(b)随机网络



(b)随机网络

图4 光路数量和每光纤波长数量的关系

图5 电交换业务量比和每光纤波长数量的关系

图6 平均能耗和每光纤波长数量的关系

路径数量少。所以基于路径的方法并没有很多的路径选择。而对基于连接的算法来说,稀疏网络导致 v_{ij}^w 的可能取值少, 0-1 变量的限制对算法的影响没有复杂网络里的大。所以在稀疏网络中, 基于路径的方法与基于连接的方法有相似的网络表现。

5 结论

本文运用了基于路径的 ILP 算法, 通过充分利用光层路径来优化阻塞 IP over WDM 网络的能耗, 并与基于连接的 ILP 算法做了仿真比较。仿真结果显示, 在稠密网络(COST239 网络)中, 由于有丰富的路径选择, 基于路径的 ILP 算法相对基于连接的 ILP 算法更能够充分调动光层资源, 降低网络能耗。

参 考 文 献

- [1] Neves L, Krajewski J, Jung P, *et al.* SMARTer2020[R]. Global e-Sustainability Initiative (GeSI), 2012.
- [2] Yun D and Lee J. Research in green network for future Internet[J]. *Journal of Computing Science and Engineering (KIISE)*, 2010, 28(1): 41–51.
- [3] 郭爱煌, 薛琳. 绿色 IP over WDM 网络研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 1–8.
Guo Ai-huang and Xue Lin. A review of green IP over WDM networks grooming[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 1–8.
- [4] Lee C and Rhee J K. Traffic grooming for IP-over-WDM Networks: energy and delay perspectives[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(2): 96–103.
- [5] Shen G and Tucker R S. Energy-minimized design for IP over WDM networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, 1(1): 176–186.
- [6] Zhang Y, Tornatore M, Chowdhury P, *et al.* Energy optimization in IP-over-WDM networks[J]. *Optical Switching and Networking*, 2011, 8(3): 171–180.
- [7] Schondienst T and Vokkarane V M. Renewable energy-aware grooming in IP-over-WDM networks[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, Hawaii, USA., 2014: 163–167.
- [8] Hasan M M, Farahmand F, Jue J P, *et al.* A study of energy-aware traffic grooming in optical networks: Static and dynamic cases[J]. *IEEE Systems Journal*, 2013, 7(1): 161–173.
- [9] Chen B, Jiang Z M, Teng R K F, *et al.* An energy efficiency optimization method in bandwidth constrained IP over WDM networks[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Communications and Signal Processing (ICICS), Tainan, 2013: 1–4.
- [10] Chowdhury P, Tornatore M, Nag A, *et al.* On the design of energy-efficient Mixed-Line-Rate (MLR) optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(1): 130–139.
- [11] Liu Z and Rouskas G N. A fast path-based ILP formulation for offline RWA in mesh optical networks[C]. Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Anaheim, California, USA, Dec. 2012: 2990–2995.
- [12] Yoon Y R, Lee T J, Chung M Y, *et al.* Traffic grooming based on shortest path in optical WDM mesh networks[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Science (ICCS'05), Heidelberg, Berlin, 2005: 1120–1124.
- [13] Rizzelli G, Musumeci F, Tornatore M, *et al.* Wavelength-aware translucent network design[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2011), Los Angeles, California, USA, 2011: OThAA2.
- [14] Yen J Y. Finding the K shortest loopless paths in a network[J]. *Management Science*, 1971, 17(11): 712–716.
- [15] Morea A, Perelló J, Spadaro S, *et al.* Protocol enhancements for “Greening” optical networks[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2013, 18(3): 211–230.
- [16] Francesco M, Tornatore M, and Pattavina A. A power consumption analysis for IP-over-WDM core network architectures[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2012, 4(2): 108–117.

陈 彬: 男, 1975 年生, 副教授, 研究领域为光网络优化。

鲍东晖: 男, 1988 年生, 硕士生, 研究领域为光网络优化。

苏恭超: 男, 1979 年生, 博士, 讲师, 研究领域为网络优化。