

doi:10.13756/j.gtxyj.2016.06.003

光通信系统与网络技术

业务持续时间感知的绿色共享通路保护算法

曹荣超,何荣希

(大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026)

摘要: 针对 IP(互联网协议) over WDM(波分复用)网络的节能保护问题,综合考虑业务持续时间和利用混合能源供能等因素,提出了一种 HTAGSPP(业务持续时间感知的绿色共享通路保护)算法,鼓励选择业务持续时间内需要额外消耗传统能源最少的路径建立连接。仿真结果表明,与传统节能共享保护算法相比,HTAGSPP 算法消耗的传统能源更少且可使用更多的可再生能源,在保持较低阻塞率的同时,降低了业务平均传统能耗和二氧化碳排放量。

关键词: IP over WDM 网络;业务持续时间;可再生能源;共享通路保护;低碳排放

中图分类号: TN913.24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2016)06-0009-07

Holding-Time-Aware Green Shared Path Protection Algorithm

CAO Rong-chao, HE Rong-xi

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to solve the issue of energy-saving protection in IP over WDM networks, a Hold-Time-Aware Green Shared Path Protection (HTAGSPP) algorithm is proposed. The algorithm also considers the issues of holding-time of traffic and use of renewable energy. It encourages choosing the path with the least additional traditional energy consumption during the holding-time of traffic. The simulation results show that our proposed algorithm can not only maintain a low blocking probability and use renewable energy effectively, but also reduce traditional energy consumption and carbon emissions by using more renewable energy, when comparing with other traditional energy-saving shared path protection algorithms.

Key words: IP over WDM network; hold-time of traffic; renewable energy; shared path protection; low carbon emissions

0 引 言

IP(互联网协议) over WDM(波分复用)网络是承载 IP 业务的有效解决方案。随着 IP 业务量的爆炸式增长,网络规模持续增大,导致网络中能耗不断增加^[1],伴随着 CO₂(二氧化碳)等温室气体的大量排放,给生态平衡造成巨大压力。与此同时,单根光纤已能支持太比特每秒的业务速率,任何链路或者节点的故障将导致不可估量的损失^[1]。因此,如何在保障网络生存性的同时,减少网络能耗,降低 CO₂ 的排放已成为亟需解决的一个关键问题。近年来,业界越来越重视抗毁光网络的节能问题,提出了多种节能方案^[1-2],但其大多针对使用传统能源供能的光网络,通过业务疏导或休眠等机制来降低网络能耗,很少涉及到可再生能源^[3]的使用。为了进一步降低网络的碳排放量,文献[4-7]提出了混合使用可再生能源和传统能源为网络供能的路由算法,但并未涉及网络的生存性问题。

利用 GMPLS(通用多协议标签交换)协议和 PCE(路径计算单元)等可控制和管理光路的动态建

立,从而可以感知业务请求和业务连接的持续时间^[8-9]。文献[8-11]在研究光网络的路由机制时将业务持续时间作为一个重要考虑因素,可以提高网络资源利用率。

如何降低 CO₂ 排放已成为光网络研究中的热点问题,本文在 IP over WDM 网络已有节能保护策略的基础上,综合考虑业务持续时间和利用可再生能源与传统能源为网络供能两个因素,基于 LG(分层图)模型^[12],提出一种 HTAGSPP(业务持续时间感知的绿色共享通路保护)算法,仿真结果表明,该算法消耗的传统能源更少且能使用更多的可再生能源,在保持较低阻塞率的同时,能进一步降低业务平均传统能耗和 CO₂ 排放。

1 网络模型

IP over WDM 网络可以分为 IP 层和 WDM 光层,如图 1 所示^[5]。IP 层用来承载业务,节点的核心设备是路由器,路由器向下连接到对应的光交换节点。WDM 光层节点的主要设备为 OXC(光交叉连接器),节点之间用光纤链路连接。光收发器用来

收稿日期:2016-06-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371091);大连海事大学“十三五”重点科研资助项目(3132016318)

作者简介:曹荣超(1991—),男,山东临沂人。硕士研究生,主要研究方向为光网络。

通信作者:何荣希,教授。Email:hrx@dlmu.edu.cn

连接光层和 IP 层,实现业务的光/电转换。在长距离传输时,为了保证信号的可靠传输,需要利用放大器放大信号。网络中主要的耗能器件有 OXC、路由器端口、光收发器和光放大器。光放大器分为前置放大器、后置放大器和中继放大器。OXC、光收发器和放大器是激活器件,能耗是一个固定值,不随业务大小的变化而变化。如果器件已经处于开启状态,则后续业务经过此器件不再需要额外消耗能量。

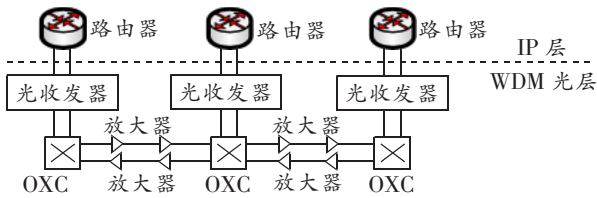


图 1 IP over WDM 网络模型

网络物理拓扑可表示为 $G(N, L, F, W)$, 其中, N 为节点集, L 为双向链路集, F 为每条物理链路上的光纤集, W 为每条光纤上的波长集。 $|N|$ 和 $|L|$ 分别表示网络拓扑中的节点数目和链路数目, $|F|$ 表示链路上的光纤数目, $|W|$ 表示每条光纤上的波长数目。假设: (1) 每条链路都由一对方向相反的单向光纤组成, 每条光纤的可用波长数为 $|W|$, 即支持的波长集为 $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|W|}\}$ 。 (2) 网络中所有节点都不具备波长变换能力, 但支持业务疏导。 (3) 业务连接请求 $r(s, d, t, t_h, b)$ 均为双向业务, 其中, s, d 代表源、宿节点; t 为业务请求到达时间; t_h 为业务持续时间; b 为业务的带宽需求。所有业务请求的源、宿节点在所有节点中随机选取, 而且一对节点之间可能同时存在多个业务请求。 (4) 对于每一个到达的业务请求, 都要为其建立连接(一对链路分离的工作路径和保护路径)。如果建立连接失败, 则拒绝该业务请求并丢弃该业务。 (5) 为了保持每个业务的独立性, 业务不允许分拆成几部分在不同路径中传输。 (6) 网络中节点采用混合能源(可再生能源和传统能源)供能, 如果可再生能源(本文仅考虑太阳能)的输出不足以满足其能量需求, 则需补充传统能源供能。 (7) 考虑到太阳能存储的效率 and 代价等因素, 本文采用即产即用策略, 也就是不考虑将可再生能源存储使用。

LG 模型将物理拓扑 G 转化为 $|W|$ 个互不相邻的子图, 每个子图分别对应一个特定的波长 λ_i ($i=1, 2, 3, \dots, |W|$), 称为 WP(波长平面)^[12]。 G 中节点 i 和节点 j 之间存在链路 $l_{ij} \in L$, 那么该链路的光纤上每一个波长就称为一个波长信道, 波长信道

是双向的。 G 中的每个节点 $n_j \in N(j=1, 2, 3, \dots, |N|)$, 在 LG 中都被复制 $|W|$ 次, 对应 $|W|$ 个 WP 的节点 $n_j^k(k=1, 2, 3, \dots, |W|)$, 即在第 k 个 WP 上的节点 j 。

利用 LG 模型来解决 IP over WDM 网络的 RWA(路由和波长分配)问题时, 将涉及波长链路和虚链路^[12]。 波长链路 $l_{ab}^i \in L$ 表示波长平面 λ_i 上节点 a 和节点 b 之间链路, 也就是物理拓扑 G 上节点 a 和节点 b 之间光纤对上的波长 λ_i 对应的波长信道。 虚链路 v_{ab}^i 表示 G 中在节点 a 和节点 b 之间建立了一条光路, 该光路使用波长 λ_i , 虚链路可以看作网络在 IP 层上的逻辑链路。 由于建立一条虚链路 v_{ab}^i 要占用 WDM 光层上节点间的波长信道, 因此应去掉 LG 中相应 WP 上该虚链路对应的波长链路。

2 网络能耗分析

在分析网络能耗之前, 引入以下变量和符号: i 表示物理拓扑 G 中的节点; l_{ij} 表示 G 中节点 i 和 j 之间的双向链路; l_{ij}^k 表示波长平面 λ_k 上节点 i 和 j 之间波长链路; p_w, p_b 表示为业务请求建立的工作和保护路径; P_i 表示节点 i 上的能耗; P_{router} 表示每个路由器端口(每建一个业务连接将占用一个端口)的能耗; P_{OXC}, P_{trans} 分别表示 OXC 和光收发机的能耗; $f_i(t)$ 表示节点 i 所在区域太阳能供给量曲线; d_{ij} 表示链路 l_{ij} 的物理距离; P_{path} 表示为业务请求建立连接时额外消耗的能量; P_{ES} 表示每次电交换所需的能量; P_b 表示电交换每 Gbit/s 业务所需的能耗; P_{amp} 表示链路上每个放大器的能耗; d_{span} 表示每两个放大器之间的物理距离, 设为 80 km; $P_{l_{ij}}$ 表示链路 l_{ij} 的能耗; $m_{l_{ij}}^k$ 表示链路 l_{ij} 在时间 $[t, t+t_h]$ 内额外消耗的传统能源; $C_{l_{ij}}^k$ 表示链路 l_{ij}^k 的代价值; $W_{l_{ij}}^k$ 表示链路 l_{ij}^k 的代价函数, 它取决于链路的资源利用情况、能耗情况以及业务连接请求的带宽需求 b 等因素; W, B, F 分别表示已建业务连接工作路径所经链路构成的集合、保护路径所经链路构成的集合和空闲链路构成的集合; $w_{l_{ij}}^k, r_{l_{ij}}^k, f_{l_{ij}}^k, c_{l_{ij}}^k$ 分别表示链路 l_{ij}^k 上工作路径占用带宽、保护路径占用带宽、剩余带宽和总带宽, 且满足 $c_{l_{ij}}^k = w_{l_{ij}}^k + r_{l_{ij}}^k + f_{l_{ij}}^k$; $P_i^c(t, t_h)$ 表示节点 i 需要额外消耗的传统能源。

在 LG 模型中, 业务连接的工作路径可以建立在虚链路上, 也可以建立在波长链路上, 还可以同时使用虚链路和波长链路来建立连接。 由于空闲资源和只被保护路径使用的资源可以休眠, 因此业务连接所需能耗取决于工作路径的能耗。 可以使用以下

4 种策略来建立工作路径：

(1) 在源、宿节点之间新建一条虚链路。此时需要新开启网络器件,因此虚链路上的器件需要耗能。该虚链路经节点 i 需要的能耗 P_i 为

$$P_i = \begin{cases} P_{\text{router}} + P_{\text{OXC}} + P_{\text{trans}} + P_{\text{ES}}, & i \text{ 为源或宿节点} \\ P_{\text{OXC}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

每一次电交换所需的能量和业务的大小有关,当业务较大时能耗也相应的增大,具体关系为

$$P_{\text{ES}} = P_b \times b \quad (2)$$

新建虚链路时,链路上的能耗来自放大器的能量消耗。每根光纤链路上包含一个前置放大器、一个后置放大器和一定数量的掺饵光纤放大器,假设它们消耗的能量相同,则链路 l_{ij} 上的能耗 $P_{l_{ij}}$ 为

$$P_{l_{ij}} = ([d_{ij}/d_{\text{span}}] + 2) \times P_{\text{amp}} \quad (3)$$

(2) 利用源、宿节点之间多个已建虚链路的级联。此方式无需额外开启新的网络器件,但是当业务从一个虚链路切换到另一个虚链路时,在中间节点要多进行一次电交换。此时建立一个从源到宿节点的连接额外所需的能耗来自节点的能耗,链路上放大器无需额外耗能。对于已建虚链路上的节点 i ,额外的能耗 P_i 为

$$P_i = \begin{cases} P_{\text{router}} + P_{\text{ES}}, & i \text{ 为源或宿节点} \\ P_{\text{ES}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

(3) 利用直接连接源、宿节点的已建虚链路。在此方式下,网络中光收发器、OXC、放大器无需额外耗能,仅在源、宿节点需要额外耗能 P_i , 表示为

$$P_i = P_{\text{router}} + P_{\text{ES}} \quad (5)$$

(4) 利用源、宿节点间已建的和新建的虚链路。此时,已建虚链路上光收发器、OXC、放大器无需额外耗能,新建虚链路上器件都需开启,此策略的能耗可依据具体情况由式(1)~(4)计算得出。

本文基于以上 4 种策略,在选路过程中综合考虑虚链路和波长链路,选择业务持续时间内额外消耗传统能源最少的路径来建立工作路径。考虑到可以休眠保护路径上的资源,因此建立业务连接所需能耗为

$$P_{\text{path}} = \sum_{i \in p_w} P_i + \sum_{l_{ij} \in p_w} P_{l_{ij}} \quad (6)$$

3 HTAGSPP 算法

HTAGSPP 算法主要目的是尽可能减少网络中传统能源的消耗,降低 CO_2 排放。主要思想是选择业务持续时间内额外消耗传统能源最少的路径建

立连接,在选路过程中尽可能将工作路径和保护路径汇集在不同光纤,也就是将工作路径尽可能汇集在处于激活的光纤上,而保护路径尽可能汇集在处于休眠的光纤上,从而使无工作路径经过的资源进入休眠状态以节能。当工作链路发生故障时,对应的保护路径迅速从休眠状态切换到激活状态。

网络中可以利用可再生能源(太阳能)为节点上的路由器端口、光收发器和 OXC 供能;光纤链路上的放大器只使用传统能源供能。经过统计,可以得出节点所在区域不同时间的太阳能输出情况(用供能曲线 $f_i(t)$ 表示),一天中从日出开始到日落之前都有太阳能输出,输出量开始逐渐增加,达到最大值后逐渐减少。当节点的能耗大于可再生能源供能量时,需要补充传统能源为其供能;当节点的能耗低于可再生能源供能量时,则只需用可再生能源供能,而无需额外消耗传统能源。

为业务连接请求 $r(s, d, t, t_h, b)$ 建立工作路径时,依据区间 $[t, t + t_h]$ 上节点 i 的能耗 P_i 和节点处太阳能供能曲线 $f_i(t)$,可求出节点上需要额外消耗的传统能源值。 P_i 与 $f_i(t)$ 的相交情况有不相交、一个交点和两个交点 3 种。假设 P_i 与 $f_i(t)$ 交点个数为 m , 则有:

(1) 当 $m = 0$ 时,结果如图 2 所示。

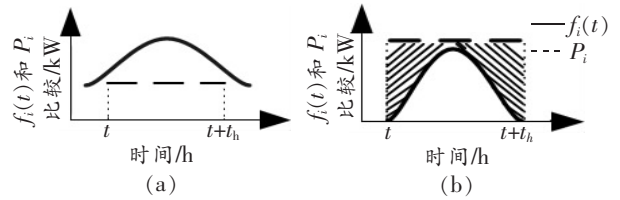


图 2 交点个数为 0

由图 2(a)可看出,在业务持续时间内太阳能能够满足节点的能耗需求,无需额外消耗传统能源。此时,节点 i 在业务持续时间内需要额外增加的传统能耗值 $P_i^c(t, t_h) = 0$ 。

由图 2(b)可看出,此时在业务持续时间内太阳能无法满足节点的能耗需求,需要消耗的传统能源为图中阴影部分面积。因此节点 i 上额外消耗的传统能源值为

$$P_i^c(t, t_h) = \int_t^{t+t_h} [P_i - f_i(t)] dt \quad (7)$$

(2) 当 $m = 1$ 时,结果如图 3 所示。

由图 3(a)可看出,节点 i 在业务持续时间内需要额外消耗的传统能源为图中阴影面积,即

$$P_i^c(t, t_h) = \int_t^{t_1} [P_i - f_i(t)] dt \quad (8)$$

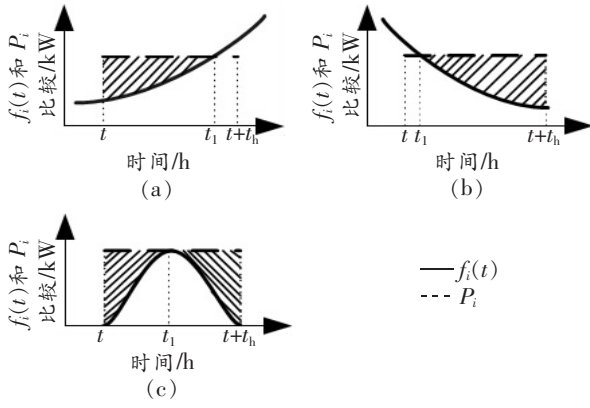


图 3 交点个数为 1

由图 3(b)可看出,节点 i 在业务持续时间内需要额外消耗的传统能源为图中阴影面积,即

$$P_i^c(t, t_h) = \int_t^{t+t_h} [P_i - f_i(t)] dt. \quad (9)$$

由图 3(c)可看出,节点 i 在业务持续时间内需要额外消耗的传统能源为图中阴影面积,即

$$P_i^c(t, t_h) = \int_t^{t+t_h} [P_i - f_i(t)] dt. \quad (10)$$

(3) 当 $m=2$ 时,结果如图 4 所示。

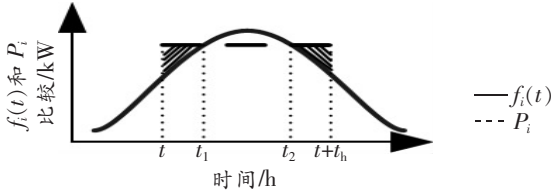


图 4 交点个数为 2

从图 4 可以看出,节点 i 在业务持续时间内需要额外消耗的传统能源为图中阴影部分的面积,即

$$P_i^c(t, t_h) = \int_t^{t_1} [P_i - f_i(t)] dt + \int_{t_2}^{t+t_h} [P_i - f_i(t)] dt. \quad (11)$$

对于业务连接请求 $r(s, d, t, t_h, b)$,需要为其寻找一条工作路径和一条保护路径,二者链路分离。寻找工作路径时,首先将物理拓扑 G 转化为 $|W|$ 个 WP,由于 WP 上并非所有的链路都满足带宽需求,因此将 WP 上剩余带宽不满足业务带宽需求的链路(虚链路和波长链路)删除。寻找工作路径时,链路权值设定为

$$W_{l_{ij}}^k = \begin{cases} C_{l_{ij}}^k, & \text{当 } f_{l_{ij}}^k \geq b \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases}. \quad (12)$$

HTAGSPP 算法在 WP 上进行选路时会尽量减少传统能源消耗量,因此 $C_{l_{ij}}^k$ 由链路状态和承载该业务时链路 l_{ij} 及其端节点上需要额外消耗的传统能源 $m_{l_{ij}}^k$ 决定。由于在 WP 中链路分为波长链路

和虚链路, $m_{l_{ij}}^k$ 可分两种情况求出:

(1) 当链路为波长链路时,链路上放大器及其端节点上额外需要消耗的传统能源 $m_{l_{ij}}^k$ 为

$$m_{l_{ij}}^k = P_i^c(t, t_h) + P_j^c(t, t_h) + t_h \times ([d_{ij}/d_{\text{span}}] + 2) \times P_{\text{amp}}. \quad (13)$$

(2) 当链路为虚链路时,链路端节点上额外需要消耗的传统能耗 $m_{l_{ij}}^k$ 为

$$m_{l_{ij}}^k = P_i^c(t, t_h) + P_j^c(t, t_h), \quad (14)$$

从而,可定义

$$C_{l_{ij}}^k = \begin{cases} \gamma_1 \times m_{l_{ij}}^k, & \text{当 } l_{ij} \in (W/B) \\ \gamma_2 \times m_{l_{ij}}^k, & \text{当 } l_{ij} \in (W \cap B) \\ m_{l_{ij}}^k, & \text{当 } l_{ij} \in F \\ |L| \times m_{l_{ij}}^k, & \text{当 } l_{ij} \in (B/W) \end{cases}, \quad (15)$$

式中, γ_1 和 γ_2 为常数因子,用来调节链路工作状态对链路权值的影响。为了鼓励将工作路径和保护路径分别集中在不同光纤上,使更多资源进入休眠状态,在建立工作路径时应优先选择只存在工作路径的链路,然后选择既有工作路径又有保护路径的链路,其次选择空闲链路,最后才选择只存在保护路径的链路。因此,设置 $0 < \gamma_1 < \gamma_2 < 1$ 。

为工作路径 p_w 寻找对应的保护路径时,链路权值设定为

$$W_{l_{ij}}^k = \begin{cases} +\infty, & \text{当 } l_{ij} \in p_w \\ C_{l_{ij}}^k, & \text{其他} \end{cases}, \quad (16)$$

其中,

$$C_{l_{ij}}^k = \begin{cases} \epsilon_1 + \beta\gamma(l_{ij}^k), & \text{当 } l_{ij} \in (B/W) \\ \epsilon_2 \times m_{l_{ij}}^k + \beta\gamma(l_{ij}^k), & \text{当 } l_{ij} \in F \\ m_{l_{ij}}^k + \beta\gamma(l_{ij}^k), & \text{当 } l_{ij} \in (W \cap B) \\ |L| \times m_{l_{ij}}^k + \beta\gamma(l_{ij}^k), & \text{当 } l_{ij} \in (W/B) \end{cases}, \quad (17)$$

式中, ϵ_1 为无限接近 0 的一个常数; ϵ_2 为常数,取值范围为 $0 < \epsilon_2 < 1$ 。与工作路径不同,保护路径在选路时优先选择只存在保护路径的链路,然后选择处于空闲的链路,其次选择既有工作路径又有保护路径的链路,最后才选择只存在工作路径的链路来建立连接。 $\beta(\beta > 0)$ 为共享因子,用于调节链路上保护带宽的使用情况对链路权值的影响, $\gamma(l_{ij}^k)$ 与链路中带宽资源有关,用来控制选路的优先顺序,可定义为^[12]

$$\gamma(l_{ij}^k) = \begin{cases} 0, & \text{当 } b_{l_{ij}}^k + b < r_{l_{ij}}^k \\ \min(b, b_{l_{ij}}^k + b - r_{l_{ij}}^k), & \text{当 } r_{l_{ij}}^k \leq b_{l_{ij}}^k + b \leq r_{l_{ij}}^k + f_{l_{ij}}^k \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases}, \quad (18)$$

式中, r_{ij}^k 为链路上预留的保护带宽资源; b_{ij}^k 为 r_{ij}^k 预留的带宽资源中不能与当前工作通路 p_w 共享的保护带宽资源。

HTAGSPP 算法的具体步骤如下:

步骤(1):初始化网络资源,将给定网络物理拓扑 $G(N, L, F, W)$ 转化成 LG 模型,并输入各节点处的太阳能曲线 $f_i(t), i \in N$ 。

步骤(2):等待业务请求 $r(s, d, t, t_h, b)$ 到达;如果是业务连接请求,则转至步骤(3);如果是业务释放请求,则转至步骤(6)。

步骤(3):为业务连接找寻工作路径。根据到达业务请求 b 和 LG 上链路状态情况,按照式(12)~(15)计算各个 WP 上的波长链路和虚链路的代价函数值,并利用 Dijkstra 算法在 $|W|$ 个 WP 上寻找各自的最短路径 p_i , 要求 $0 < C(p_i) < +\infty$;如果一条最短路径都没有找到,则拒绝该业务建立请求,并转至步骤(2);如果找到 $v(0 < v \leq |W|)$ 条工作路径 $p_i (i=1, 2, 3, \dots, v)$, 则从中选择代价最小的工作路径 p_w (假设该路径位于波长平面 λ_k), 暂时记录该工作路径的信息,转向步骤(4)。

步骤(4):为业务连接找寻保护路径。根据式(16)~(18)调整波长平面 λ_k 上链路权值,然后在该 WP 利用 Dijkstra 算法为 p_w 寻找相应保护路径 p_b , 要求 $0 < C(p_b) < +\infty$;如果没找到,则删除临时记录的工作路径 p_w 的信息,拒绝当前业务连接请求,转到步骤(2);如果找到符合要求的保护路径 p_b , 则详细记录其信息,转向步骤(5)。

步骤(5):在找到的工作路径 p_w 上建立连接,同时在保护路径上预留相应的保护带宽。对于工作路径和保护路径中新建的光路,相应地在 LG 中增加一条虚链路,并删除相应 WP 上该虚链路过节点对间的波长链路,修改波长平面 λ_k 上相应链路的剩余带宽;统计业务的到达总数和建立该连接额外消耗的能量,转到步骤(2)。

步骤(6):释放该业务连接,更新它所对应的工作路径和保护路径所经链路的剩余带宽值以及链路和节点的状态信息;如果某条虚链路上剩余带宽达到波长容量,则释放该条虚链路,将它还原为相应节点对间的波长链路,转到步骤(2)。

由于在 N 个节点的网络中运行 Dijkstra 算法的复杂度为 $O(|N|^2)$, 而光纤中可用的波长数为 $|W|$, 因此需要在 $|W|$ 个 WP 上找出各自的最短路径,执行 Dijkstra 算法的次数为 $|W|$ 次,然后在找到工作路径的 WP 上找到一条保护路径,此时执

行 1 次 Dijkstra 算法,上述过程中 Dijkstra 算法执行次数为 $|W|+1$ 次,因此,HTAGSPP 算法的复杂度近似为 $O((|W|+1)|N|^2)$ 。

4 仿真及结果分析

仿真拓扑采用 NSFNET(美国国家科学基金网络),按照地理位置的不同可将它分为 4 个时间区域,每个相邻时间区域相差一个小时,将东部时间区域作为标准时间^[5]。不同时间区域的日落时间不同,因此在同一时间,不同区域的节点得到的太阳能能量不同。一天中不同时刻、不同节点处太阳能供能曲线 $f_i(t)$ 采用文献[5]的统计数据。

算法性能评价指标包括阻塞率、业务连接平均传统能耗、业务连接平均可再生能耗和 CO₂ 排放量。阻塞率指被拒绝的业务连接请求数与总的业务请求数之比。阻塞率越小,说明成功建立连接的业务量越多,算法的性能就越好。业务连接平均传统能耗定义为所有成功建立业务的传统能耗值和成功建立连接的业务数 S 的比值,其值越小,说明算法的绿色节能效果越明显。业务连接平均可再生能耗定义为所有成功建立接业务的可再生能源的总消耗量和 S 的比值,其值越大,说明算法使用了更多的可再生能源。

第 k 个成功建立连接的业务在持续时间 $[t, t+t_h]$ 内网络中 CO₂ 排放量为^[6]

$$E_{k,c} = \int_0^{t_h} \left[\sum_i^N (P'_i \times \epsilon_i) + \sum_l^L (P'_l \times \epsilon_l) \right] dt, \quad (19)$$

式中, P'_i 为节点 i 上传统能源的能耗; P'_l 为链路 l 上传统能源的能耗; ϵ_i 和 ϵ_l 为节点和链路上 CO₂ 排放系数。仿真中 $\epsilon_i = \epsilon_l = 0.998 \text{ kg/kWh}$ ^[4]。从而可求出成功建立连接数为 S 时总的 CO₂ 排放量为

$$E_{\text{CO}_2} = \sum_{k=1}^S E_{k,c}。 \quad (20)$$

本文采用动态业务仿真模型,所有的业务请求按平均速率服从参数为 λ 的泊松分布到达网络,业务连接的持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布,即全网的总负载为 $\lambda/\mu \text{ Erl}$ 。每根光纤支持的波长数为 4,波长容量 OC(光载波)-192。业务的带宽需求从 OC-1、OC-2、OC-12、OC-48 和 OC-192 中随机选取。仿真中设置 $\gamma_1 = 0.25, \gamma_2 = 0.5, \epsilon_1 = 10^{-4}, \epsilon_2 = 0.25, \beta = 5, P_{\text{router}} = 1 \text{ kW}, P_{\text{OXC}} = 85 \text{ W}, P_{\text{trans}} = 73 \text{ W}, P_{\text{amp}} = 8 \text{ W}, P_b = 67.5 \text{ W}/10 \text{ Gbps}$ ^[5]。在对网络进行保护时,仅考虑应对单链路失效。业务的

仿真时间为 1 天,所得结果为模拟 10^5 次业务请求后经统计得出。

为了评估 HTAGSPP 算法的性能,将其与 EA-SPP(节能共享保护)算法^[9]和 Non-HTAGSPP(不考虑业务持续时间的 HTAGSPP)算法进行对比。EA-SPP 算法在选路过程中不考虑业务持续时间和使用可再生能源,选择能耗最低路径建立连接;Non-HTAGSPP 算法仅考虑利用可再生能源为网络供能,在业务到达时选择网络中可再生能源供能最大的路径建立连接。

图 5 所示为 3 种算法的阻塞率性能对比图。由图可以看出,3 种算法的阻塞率随网络负载的增加而逐渐增大,而且 EA-SPP 具有最小的阻塞率,HTAGSPP 的阻塞率介于 EA-SPP 和 Non-HTAGSPP 之间。这是由于在业务负载较小时,网络中可用带宽资源丰富,3 种算法能够成功建立的连接数较多,阻塞率较小。随着网络负载增大,单位时间内到达业务数增加,网络中可用的带宽资源逐渐减少,导致成功建立连接的业务数减少,阻塞率逐渐变大。由于 EA-SPP 选择网络中能耗最低的路径建立连接,有利于选择源、宿节点间的最短路径建立连接,占用带宽资源较少,因此阻塞率较低;而 Non-HTAGSPP 和 HTAGSPP 两种算法考虑可再生能源这个因素,为了多利用网络中的可再生能源,所选路径可能较长,占用带宽资源较多,因此阻塞率较高。另外,Non-HTAGSPP 算法当业务到达时选择可再生能源供能最大的路径建立连接,潜在地会导致业务集中在经过这些节点的路径上,使这些路径所经链路的带宽资源过快耗光,从而导致后续业务请求易发生阻塞,因此阻塞率要高于 HTAGSPP。

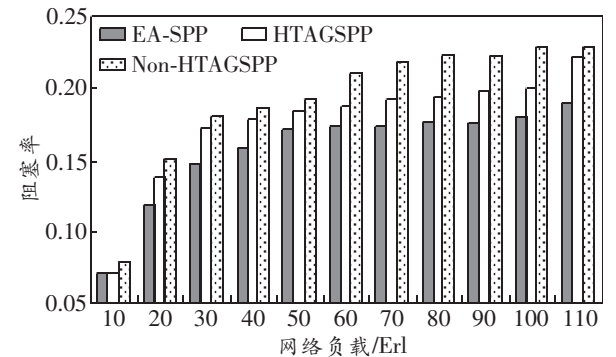


图 5 不同负载下的阻塞率性能

图 6 所示为 3 种算法的业务连接平均传统能耗对比图。由图可以看出,随着业务负载的增大,3 种算法的业务平均传统能耗逐渐降低,HTAGSPP 和

Non-HTAGSPP 算法业务连接平均传统能耗明显小于 EA-SPP 算法,HTAGSPP 的业务连接平均传统能耗最低。主要原因在于随着业务负载增大,网络中已激活器件增多,此时为业务建立连接时可使用更多已激活器件,而无需额外产生能耗,业务连接平均能耗降低,相应地业务连接平均传统能耗也随之降低。其次,HTAGSPP 和 Non-HTAGSPP 算法在选路时鼓励使用可再生能源为网络供能,因此两种算法的业务平均传统能耗低于 EA-SPP。另外,HTAGSPP 选择业务持续时间内额外消耗传统能源最少的路径建立连接,能够更加有效地利用可再生能源,减少对传统能源的消耗,因此其业务连接平均传统能耗最低。

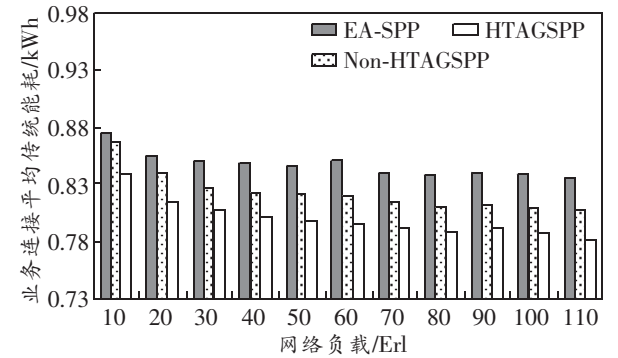


图 6 不同负载下的业务连接平均传统能耗

3 种算法的业务连接平均可再生能源仿真结果如图 7 所示。由图可知,随着网络负载增大,平均可再生能源逐渐降低,HTAGSPP 和 Non-HTAGSPP 算法业务平均可再生能源都大于 EA-SPP 算法,

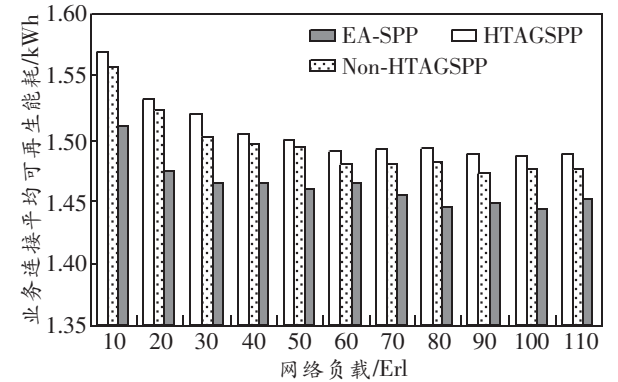


图 7 不同负载下的业务连接平均可再生能源

HTAGSPP 具有最大的业务平均可再生能源值。原因在于:随着业务负载增大,网络中处于激活的器件增多,可使用更多已激活器件为业务建立连接,减少额外耗能量,因此,3 种算法的业务连接平均能耗降低,可再生能源的能耗相应降低。在一定网络负

载下,HTAGSPP 和 Non-HTAGSPP 算法在选路过程中都考虑利用可再生能源供能,算法对可再生能源的利用高于 EA-SPP,业务连接的平均可再生能源高于 EA-SPP。其次,与 Non-HTAGSPP 算法相比,HTAGSPP 算法能够更充分地利用可再生能源,减少对传统能源的使用。因此,其业务平均可再生能源最高。

图 8 所示为 3 种算法的 CO₂ 排放量对比图。由图可知,随着网络负载增大,3 种算法的 CO₂ 排放量不断减少。EA-SPP 算法的 CO₂ 排放量高于 HTAGSPP 和 Non-HTAGSPP 算法,而且 HTAGSPP 的 CO₂ 排放量最低。正如上文所述,当网络负载逐渐增加时,业务连接的平均能耗以及平均传统能耗都逐渐降低,加之成功建立连接的业务数也不断减少,因此,总的 CO₂ 排放量不断减少。其次,EA-SPP 算法在选路时没有考虑利用可再生能源供能,导致业务传统能源消耗过多,算法的 CO₂ 排放量最高。另外,HTAGSPP 算法考虑了业务的持续时间,业务连接的平均传统能耗和平均可再生能源指标均优于 Non-HTAGSPP。因此 HTAGSPP 算法在 CO₂ 排放方面优于其他两种算法。

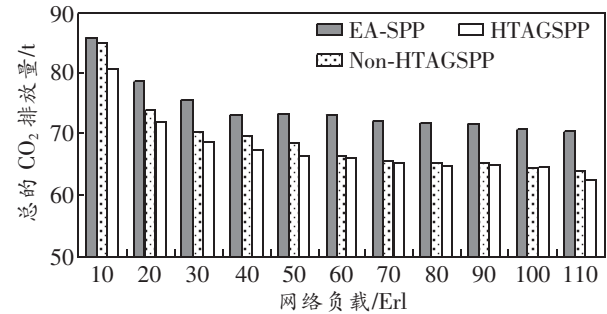


图 8 不同负载下的 CO₂ 排放量

5 结束语

研究了 IP over WDM 网络中考虑节能的生存性问题,基于 LG 模型,提出了一种 HTAGSPP 算法。该算法鼓励选择在业务持续时间内额外消耗传统能源最少的路径建立连接,在提高保护资源利用率的同时,尽量使用已激活器件建立工作路径,而选择保护路径时尽可能选择处于休眠状态的资源。所提算法有利于更多的使用可再生能源,以略高的阻

塞率为代价,有效地降低了业务平均传统能耗和 CO₂ 的排放,实现了网络绿色节能的目的。

参考文献:

[1] 王汝言,马礼东,张超,等. IP over WDM 网络中能耗自感知的混合疏导专有保护算法 [J]. 光电子·激光, 2014,9(25):1701-1708.

[2] He R, Lin B. Dynamic power-aware shared path protection algorithms in WDM mesh networks [J]. Journal of Communications,2013,8(1): 55-65.

[3] 国家发展和改革委员会. 可再生能源中长期发展规划 [J]. 可再生能源,2007,25(5):1-5.

[4] Ricciardi S,Wang J,Palmieri F,et al. Eco-sustainable routing in optical networks [J]. Photonic Network Communications,2013,26(2-3):140-149.

[5] Dong X, El Gorashi T, Elmirghani J M H. IP over WDM networks employing renewable energy sources [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(1): 3-14.

[6] Schondienst T,Vokkarane V M. Renewable energy-aware grooming in IP-over-WDM networks [C]//ICNC 2014. Honolulu,US;IEEE,2014: 163-167.

[7] Gattulli M,Tornatore M,Fiandra R,et al. Low-carbon routing algorithms for cloud computing services in IP over WDM networks [C]// ICC 2012. Ottawa, Canada;IEEE,2012: 2999-3003.

[8] Xu Z,Huang J,Zhou Z,et al. A novel grooming algorithm with the adaptive weight and load balancing for dynamic holding-time-aware traffic in optical networks [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 392-399.

[9] 熊余,马礼冬,王汝言. 带有业务持续时间感知的节能共享保护 [J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2014, 42(10):25-30.

[10] Tornatore M,Zhu H,Mukherjee B,et al. Holding-time-aware dynamic traffic grooming [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication,2008,26(3): 28-35.

[11] 刘焕淋,刘洋,陈勇,等. WDM 光网络中带宽预留型业务的时间感知绿色疏导算法 [J]. 北京邮电大学学报, 2014,55(05):71-74.

[12] 何荣希,张治中,王光兴,等. IP/MPLS over WDM 网中基于共享风险链路组限制的共享通路保护算法 [J]. 电子学报,2002,30(11):1638-1642.