业务持续时间感知的弹性光网络能效路由算法

刘焕淋^{1*}, 陈德润¹, 陈勇², 吴兰¹

1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

2. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065

* 通信作者. E-mail: liuhl2@sina.com

收稿日期: 2017-06-09; 接受日期: 2017-12-27; 网络出版日期: 2018-02-12

国家自然科学基金 (批准号: 61275077, 61571072) 和重庆市科委自然科学基金 (批准号: 2015jcyjA40024) 资助项目

摘要 针对弹性光网络的频谱碎片和能耗问题, 提出了持续时间感知的能效路由算法. 在路由阶段, 考虑业务持续时间对光路能耗的影响, 选择路径代价最小的路径提高网络能效. 在分配频谱阶段, 根据业务持续时间和业务离开时间, 从业务可用频谱块中找出与已分配频谱块离开时间差值较小的频谱块预分配业务, 计算各预分配频谱块的频谱连贯度值, 选择频谱连贯度值最大的频谱块分配. 仿真结果表明, 论文提出的算法在动态网络环境下可以有效地降低业务的阻塞率, 提高网络能效.

关键词 光通信, 能效路由算法, 持续时间感知, 频谱连贯度, 带宽利用率

1 引言

随着云计算、视频会议、高清电视等一些带宽密集型应用的不断兴起, 互联网流量迅速增长, 光网络正面临着业务流量爆炸式增长带来的巨大挑战^[1]. 传统的 WDM (wavelength division multiplexing) 光网络采用固定波长带宽的频谱分配方式, 当业务的传输速率较小时, 仍为其分配一个波长的频谱资源, 势必导致频谱资源的浪费^[2]. 为提高频谱利用率, 基于相干光正交频分复用的弹性光网络因其栅格粒度小 (12.5 GHz), 频谱分配灵活等优势成为极具潜力的下一代光网络^[3,4]. 但是, 弹性光网络在频谱分配时需满足频谱连续性与一致性约束, 随着光路动态的建立与拆除, 网络频谱碎片不断增加, 导致网络的带宽阻塞率较高^[5]. 面临着高带宽业务增长所带来的巨大挑战和压力, 电信网络中的设备能量消耗影响着网络总能耗^[6]. 因此, 研究减少网络频谱碎片以提高频谱利用率, 降低网络能耗是十分必要的.

针对优化弹性光网络资源优化问题, 文献 [7] 定义了剩余频谱连续度描述频谱碎片化程度. 文献 [8] 提出最小化路径频谱消耗以提高频谱利用率和降低业务阻塞率. 但该算法没有考虑预分配频谱对链路的频谱连续性影响, 导致算法阻塞率性能改善不大. 文献 [9] 提出面向频谱融合的频谱分配算法, 在

引用格式: 刘焕淋, 陈德润, 陈勇, 等. 业务持续时间感知的弹性光网络能效路由算法. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1065–1075, doi: 10.1360/N112017-00129
Liu H L, Chen D R, Chen Y, et al. Holding-time-aware energy-efficient routing algorithm in elastic optical networks (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1065–1075, doi: 10.1360/N112017-00129

分配频谱时考虑业务所在链路和相邻链路上的频谱使用情况, 避免因频谱不一致而形成频谱碎片. 文献 [10] 提出距离自适应和频谱碎片感知的光疏导算法减少网络转发器与频谱资源使用, 以提高频谱利用率和降低网络能耗. 文献 [11] 提出基于保护光路距离自适应选择信号调制格式和基于频谱平面的无缝频谱碎片整理, 进一步提高频谱利用率. 但在动态场景下, 不仅要满足疏导业务与原业务同源且有共同链路, 还需两个业务传输频谱重叠, 因此, 实际中能疏导业务有限, 导致算法性能提高不明显.

随着控制协议被应用于动态光路的管理和控制, 用户根据服务请求的持续时间, 更好地优化网络路由能耗和资源分配 [12, 13]. 文献 [14~16] 提出了业务持续时间自适应的路由频谱分配策略, 同时考虑了邻接链路频谱的使用情况, 通过选择时间域和频谱域连续度最大的频谱块为业务进行频谱分配, 可以有效地提高频谱利用率, 降低业务阻塞率, 但并未考虑相邻业务间持续时间大小的差异对频谱碎片的影响. 文献 [17] 提出了一种基于能量感知的路由频谱分配策略, 在分配频谱时联合考虑网络能耗和可用频谱资源情况, 但在频谱分配过程中并未考虑频谱碎片对网络频谱连续性的影响.

为进一步优化弹性光网络资源分配, 本文提出了基于业务持续时间感知的能效路由算法 (holding-time-aware energy-efficient routing algorithm, HTA-EER). 考虑业务持续时间对光路能耗的影响, 选择代价最小的路径, 提高网络能效. 并根据业务的持续时间长短, 采用避免频谱碎片和选择频谱连贯度值最大的频谱分配方式, 以提高频谱利用率和优化网络阻塞率性能.

2 基于持续时间的频谱分配

弹性光网络的网络拓扑抽象为 $G(V, E)$, V 为网络节点集合, E 网络链路集合, 每个频隙大小为 B_W . 业务请求 $R(s, d, T_R)$, s 和 d 分别为业务的源和目的节点, T_R 为业务的传输速率. 业务 R 所需频隙数为

$$N_R = \frac{T_R}{P_m \times B_W} + G, \quad (1)$$

式 (1) 中, P_m 为调制等级为 m 时频谱效率, G 为频谱块保护带宽.

2.1 持续时间感知的频谱分配

为减小频谱碎片, 本文根据网络中频谱使用情况, 考虑业务的持续时间, 使离开时间相近的业务分配在一起传输, 既可以减小碎片对网络资源的影响时间, 当业务离开时又能够获得更多连续的空闲频谱块. 但是路由的动态建立和离开可能会破坏原有频谱的连续性, 导致新的频谱碎片产生.

如图 1 所示, 网络中有 4 个业务 R_1, R_2, R_3, R_4 , 业务 R_1, R_3 的持续时间小于平均持续时间, 而 R_2, R_4 持续时间大于平均持续时间. 若按业务到达顺序分别为 R_1, R_2, R_3, R_4 进行路由和频谱分配, 其在频谱域和时间域的分配如图 1(a) 所示. 由于 R_1 和 R_3 的持续时间较短, 当 R_1, R_3 离开后, 将在相应频隙处产生不连续的空闲频谱块. 若将持续时间小于平均持续时间的业务尽量选择频隙索引值较小的频谱块, 而将持续时间大于平均持续时间的业务尽量选用频隙索引值较大的频谱块, 如图 1(b) 所示, 则在业务离开时使空闲频谱相对连续, 减少频谱碎片的产生.

假定新业务 R 的达到时间为 t_a , 持续时间为 t_h , 则业务的离开时间 $t_d = t_a + t_h$. 若与碎片两端邻接的业务分别为 R_1 和 R_2 , 它们对应的离开时间分别为 t_1 和 t_2 , 则业务 R 第 n 个备选频谱块与其两端邻接的业务平均离开时间的差值为

$$D_n^l = \left| t_d - \frac{1}{2}(t_1 + t_2) \right|. \quad (2)$$

图 1 频谱分配示意图

Figure 1 Examples of spectrum utilization, (a) without holding times information; (b) with holding times information

将所有备选频谱块按照 D_n^l 从小到大排序, 找出 D_n^l 最小的备选频谱块. 若有多个备选频谱块的 D_n^l 值最小, 计算各备选频谱块的频谱连贯度值, 选择频谱连贯度值最大的频谱块为业务分配频谱, 频谱连贯度计算模型见 2.2 小节定义.

2.2 频谱连贯度

频谱连贯度 V_n 表示预分配第 n 个备选频谱后链路剩余空闲频谱的连续性, 该值不仅考虑了预分配频谱块对所经链路频谱连续性的影响, 同时考虑了其相邻链路的频谱使用情况. 为新到达业务请求建立光路后, 路径上所有链路剩余空闲频谱资源连贯度之和越高, 说明预分配后产生碎片越少, 后续到达的业务成功传输的概率就越高.

$$V_n = \sum_{l \in p_j} \left(\frac{F_{\max}^l}{F_{\text{free}}^{l, \text{total}}} \times C_n^l + \frac{A_{n,l}^{l_i}}{S_{n,l}^{\text{ind}2} - S_{n,l}^{\text{ind}1}} \right), \quad l_i \in L, \quad (3)$$

式 (3) 中, p_j 为业务第 j 条路径的链路集合, $F_{\max}^l$ 为预分配第 n 个备选频谱块后链路 l 上最大空闲的频谱块, $F_{\text{free}}^{l, \text{total}}$ 为预分配第 n 个备选频谱块后链路 l 上总的空闲频谱块, C_n^l 为预分配第 n 个备选频谱块后链路 l 上频谱连接点数; L 为与链路 l 相邻所有链路的集合, l_i 为与链路 l 相邻的链路, $A_{n,l}^{l_i}$ 为第 n 个备选频谱块相应索引值内相邻链路 l_i 上占用的频隙数; $S_{n,l}^{\text{ind}1}$ 为链路 l 上第 n 个备选频谱块的起始频隙索引值, $S_{n,l}^{\text{ind}2}$ 为链路 l 上第 n 个备选频谱块的结束频隙索引值.

设网络如图 2(a) 所示, 已有 4 个业务如表 1 所示, 网络频谱使用情况如图 2(b). 新业务 $R5$ 到达, 由图 2(b) 可知, $R5$ 有 4 种备选频谱块 S3, S8, S9, S10. 频谱块 S3 频谱连贯度为 $V_3 = (1 \times 4 + 0) + (1 \times 2 + 0) = 6$; 频谱块 S8 的频谱连贯度为 $V_8 = ((\frac{2}{5} \times 2) + 0) + ((\frac{2}{3} \times 1) + 0) = 1.5$; 频谱块 S9 的频谱连贯度为 $V_9 = ((\frac{3}{5} \times 2) + 1) + ((\frac{1}{3} \times 0) + 1) = 3.2$; 频谱块 S10 的频谱连贯度为 $V_{10} = ((\frac{4}{5} \times 3) + 1) + ((\frac{2}{3} \times 1) + 1) = 5.1$. 可知, 分配备选频谱块 S3, 频谱连贯度最大, 网络的碎片化程度最小.

弹性光网络路由频谱分配问题已被证明是 NP 难问题, 其复杂度主要来自大型网络中大量的优化变量 [18]. 因此, 本文设计了启发式 RSA (routing and spectrum allocation) 算法来解决现实动态业务场景中的能效路由频谱分配问题.

3 持续时间感知的能效路由算法

基于业务持续时间及链路频谱连贯度, 本文提出了基于业务持续时间感知的能效路由算法策略.

图 2 (网络版彩图) 频谱连贯度计算

Figure 2 (Color online) Spectrum coherence degree calculation. (a) Physical topology; (b) spectrum allocation

表 1 业务路由信息

Table 1 Services routing information

Serve	Request FSs	Route paths
<i>R1</i>	2 FSs	L1, L2
<i>R2</i>	2 FSs	L1, L2, L3
<i>R3</i>	1 FSs	L2, L3
<i>R4</i>	2 FSs	L3
<i>R5</i>	1 FSs	L1, L2

HTA-EER 策略在为业务选路时, 考虑业务持续时间对网络能耗的影响, 选取路径代价最小的路由路径, 并通过最小化不同业务的持续时间差异对网络频谱碎片的影响, 最大程度上保持可用频谱的链路性. 通过设计的频谱连贯度值进一步确定最终的备选频谱块.

3.1 网络能耗计算

网络中的元器件分为休眠和工作两种模式. 在休眠模式情况下, 网络器件的能耗可以忽略不计. 在工作模式情况下, 网络器件处于完全工作状态, 业务传输能耗主要来自于路由器端口、带宽可变光收发器 (bandwidth variable optical transponder, BVT)、带宽可变光交叉连接设备 (bandwidth variable optical cross-connect, BV-OXC) 和掺铒光纤放大器 (erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA). 各器件能耗模型参考文献 [19], 其中, 路由器能耗主要来自于数据电层处理时产生的能耗, 与处理的业务量有关, 计算公式为 [19]

$$P_{IP} = PC_{IP}^o + PC_{IP}^t \times \text{Traf}, \tag{4}$$

其中, PC_{IP}^o 为流量独立开销, 这部分功率为 1329.33 W [20], PC_{IP}^t 为业务经过 IP 路由器所消耗的功率, 其大小为 0.465 W/Gb [20], Traf 为处理业务量 [19].

BVT 能耗与传输信号调制格式及业务速率有关, 较高的调制等级需要更复杂的处理过程, 其能耗也相对较高, 表 2 为收发器使用不同调制方式时单个子载波传输业务的能耗功率 [21]. BVT 的能耗也

表2 不同调制方式下光收发器使用一个子载波的传输速率与能耗功率

Table 2 Transmission rate and power consumption of a transponder for different modulation formats

Modulation format	Modulation level	Transmission rate (Gb/s)	Power consumption (W)
BPSK	1	12.5	112.374
QPSK	2	25	133.416
8QAM	3	37.5	154.457
16QAM	4	50	175.498

包括两部分: 固定能耗和业务量相关能耗, 通过下式计算^[19]:

$$P_{\text{BVT}} = \text{PC}_{\text{BVT}}^o + \text{PC}_{\text{BVT}}^m \times \text{Traf} = \text{PC}_{\text{BVT}}^o + \text{PC}_{\text{sub}}^m \times \text{BFS}_R, \quad (5)$$

其中, PC_{BVT}^o 为业务经过收发器消耗的基础功率, m 为收发器使用的调制等级, PC_{sub}^m 为调制等级 m 的单个子载波消耗功率, BFS_R 为业务所需的子载波数.

BV-OXC 与光放大器只要网络开启就有耗能, 与业务量无关. 网络中 BV-OXC 能耗主要与节点度数和节点上下业务的光纤端口数有关, BV-OXC 能耗计算公式为^[19]

$$P_{\text{OXC}} = 85 \times d + 50 \times a + 150, \quad (6)$$

其中, d 为节点的度数, a 为节点上下业务的光纤端口数.

光放大器一般在光纤线路上每 80 km 放置一个放大器, 放大器能耗主要取决于业务所经的路径长度, 每个放大器能耗为 110 W^[20].

$$P_E = \text{PC}_E \times N_p, \quad (7)$$

其中, PC_E 为一个 EDFA 放大器能耗, N_p 为路径 k 上配置的 EDFA 放大器个数.

若新业务持续时间为 t_h , 链路 l 上已有业务的持续时间为 t_l , 假定新业务的路由路径经过链路 l , 若 t_l 不小于 t_h , 则新到达业务不改变链路的持续时间; 否则, 新到达业务将会增加链路的持续时间, 而造成该链路额外的能耗. 因此, 在为业务选择光路时, 应选用额外消耗能耗较小的路径.

当为业务计算 k 条最短路径后, 分别计算新业务经过各光路径中的所有链路的路径能耗代价为需要额外增加的链路持续工作时间的总和, 定义第 j ($1 \leq j \leq k$) 条路径能耗代价 C_j 为

$$C_j = \sum_{i=1}^n |t_i - t_h|, \quad (8)$$

其中, i 表示第 j 条路径中的第 i 条链路, n 为第 j 条路径所包含链路数, t_i 为第 i 条链路的持续时间. 考虑业务的持续时间, 尽量选择消耗额外能耗小的路径, 使更多链路处于休眠状态以节省能耗.

根据弹性光网络构架, 能耗包括节点能耗和链路能耗. 节点能耗主要包括路由器端口能耗和带宽可变光收发器能耗, 路由器能耗主要来自于数据电层处理时产生的能耗, 与处理的业务量有关. 链路能耗主要包括带宽可变光交叉连接设备和掺铒光纤放大器能耗. 当业务请求建立光路后, 业务将沿着所建光路传输, 光路上的路由器、收发器和光放大器等器件处于工作状态. 当业务传输完毕, 若无新业务在该条光路上传输, 光路被拆除, 光路上的放大器等器件可处于休眠状态减小能耗. 若新到达业务也经过该光路, 则新到达的业务请求可能增加该光路的工作时间, 增加能耗. 文献 [18, 21] 证明了弹性光网的路由频谱分配和能耗路由问题是一个 NP 难问题. 本文基于此提出了一种启发式算法有效地解决基于业务持续时间感知的能效路由频谱分配问题.

3.2 HTA-EER 频谱分配算法

HTA-EER 算法的具体步骤如下:

- Step 1. 网络中有新事件发生, 若为新业务 R 到达, 转 Step 3; 若为旧业务离去, 转 Step 2;
- Step 2. 释放该业务, 更新网络频谱资源, 转 Step 1;
- Step 3. 用 KSP 算法为业务计算 K 条最短路径, 定义为 $P(R)=p_1, p_2, \dots, p_k$;
- Step 4. 若 $P(R)$ 为空, 转 Step 5; 若 $P(R)$ 不为空, 根据式 (8) 计算 K 条路径的路径代价 C_j , 选出代价最小的路径 p_j ($j \in [1, k]$) 作为业务的预路由路径, 转 Step 6;
- Step 5. 阻塞业务 R , 转 Step 1;
- Step 6. 统计路径 p_j 上满足业务需求的频谱块, 存入备选频谱块集合 $H_R(P)$ 中;
- Step 7. 若备选频谱块集合 $H_R(P)$ 为空, 则该路径没有满足业务需求的备选频谱块, 从路径集合 $P(R)$ 中删除路径 p_j , 转 Step 4; 若集合 $H_R(P)$ 不为空, 转 Step 8;
- Step 8. 业务 R 的持续时间是否小于业务平均持续时间, 若小于, 转 Step 9; 否则, 转 Step 10;
- Step 9. 将集合 $H_R(P)$ 中的备选频谱块按照频隙索引值大小升序排列. 分别计算每个备选频谱块与其两端邻接的业务平均离开时间的差值 D_n^l , 找出 D_n^l 值最小的备选频谱块, 转 Step 11;
- Step 10. 将集合 $H_R(P)$ 中的备选频谱块按照频隙索引值大小降序排列. 分别计算每个备选频谱块与其两端邻接的业务平均离开时间的差值 D_n^l , 找出 D_n^l 值最小的备选频谱块;
- Step 11. 若有多个备选频谱块对应的 D_n^l 值均最小, 则通过式 (3) 计算该备选频谱块的频谱连贯度值, 选择频谱连贯度值最大的频谱块为业务进行路由频谱分配, 转 Step 1.

HTA-EER 算法复杂度包含两部分: K 条最短路径的计算, 工作路径频谱分配和持续时间资源分配过程. 基于 Dijkstra 算法的 K 条路径的时间复杂度为 $O(K \times |V|^2)$, 其中 $|V|$ 为网络节点数. 频谱分配过程主要是查询路径上的空闲频谱资源和已分配各频谱块的持续时间, 然后根据业务持续时间进行资源分配, 则时间复杂度为 $O(|S|^3)$, 其中 $|S|$ 为光纤链路的频谱块数目. 因此 HTA-EER 算法的时间复杂度为 $O(K \times |S|^3 \times |V|^2)$.

4 仿真与结果分析

本文采用两种网络拓扑验证所提算法性能, 分别为 NSFNET (14 节点, 21 条链路) 和 USNET 网络 (24 节点, 43 条链路), 如图 3 所示. 每条链路有 358 频隙, 每频隙大小为 12.5 GHz, 业务间保护带宽 1 频隙. 业务到达率服从 Poisson 分布, 业务持续时间服从负指数分布, 业务数目为 10^6 个, 业务请求速率分别为 25, 50, 100, 200 Gb/s 4 种, 比例为 1:1:1:1. 可选调制方式 BPSK, QPSK, 8QAM 和 16QAM, 备选路径条数 $k=3$. 为验证所提 HTA-EER 算法性能, 对比算法为 RA+EA-RSA (an energy aware routing and spectrum assignment algorithm)^[17], SETA-RSA (spectrum efficient time-aware routing and spectrum assignment algorithm)^[8] 和 MNC (max network connectivity algorithm)^[14]. 仿真统计不同负载下频谱带宽利用率、带宽阻塞率和能效性能指标, 其中, 能效指网络中传输的业务总量与网络总的消耗能量比值^[6].

图 4(a) 和 (b) 验证了不同算法分别在两种网络拓扑中的带宽阻塞率性能. 本文所提 HTA-EER 算法阻塞率最低, 由于 HTA-EER 算法在频谱分配中, 根据业务持续时间差异采用不同频谱分配策略, 最大可能保证空闲频谱的连续性. 同时考虑业务所在链路及其邻接链路的频谱使用情况, 选择频谱连贯度值最大的频谱块为业务进行频谱分配, 故在重负载下, HTA-EER 算法相比对比算法仍能获得较好

图 3 验证算法性能的网络拓扑图

Figure 3 Network topologies for verifying algorithms' performance. (a) NSFNET; (b) USNET

图 4 (网络版彩图) 不同网络拓扑下带宽阻塞率性能

Figure 4 (Color online) Comparison of bandwidth blocking rates in different network topologies. (a) NSFNET; (b) USNET

的阻塞率性能. RA+EA-RSA 算法在选路和频谱分配时, 优先考虑业务传输能耗, 其次考虑频谱可用性, 故其阻塞率最高. SETA-RSA 算法考虑了分配频谱代价及产生的碎片频谱代价, 选择频谱代价最小的频谱块, 能够在一定程度上避免频谱碎片的产生, 阻塞率低于 RA+EA-RSA 算法. MNC 算法也考虑业务持续, 通过选择时间域和频谱域连续度最大的频谱块为业务进行频谱分配, 从而降低业务阻塞率, 但算法并未考虑业务持续时间对频谱碎片的影响, 其阻塞率略高于本文所提算法. 图 4(b) 相比图 4(a) 阻塞率有所降低, 是由于 USNET 网络平均节点度数较高, 更容易找到满足业务需求的路径.

图 5 反映了两种网络拓扑下 4 种算法的带宽利用率情况. 本文所提 HTA-EER 算法的带宽利用率最高, 由于 HTA-EER 在分配频谱时, 根据业务持续时间差异采用不同的频谱分配策略, 同时考虑与分配频谱在业务所在链路及其邻接链路的频谱使用情况, 减小频谱碎片的产生. RA+EA-RSA 算法优先选择业务传输能耗最低的路径传输, 故其带宽利用率最低. SETA-RSA 算法选择频谱消耗最低的频谱块以优化分配频谱及碎片频谱消耗, 避免频谱碎片的产生, 因此带宽利用率比 RA+EA-RSA 算法高. MNC 算法没有考虑业务持续时间大小的差异对频谱碎片的影响, 故其带宽利用率低于 HTA-EER 算法. 两种拓扑下的带宽利用率趋势大致相同, 由于图 5(b) 网络较大, 业务的平均路由跳数较多, 因此消耗的频隙数也较多, 故其频谱利用率相比图 5(a) 有所降低.

图 5 (网络版彩图) 不同网络下带宽利用率对比

Figure 5 (Color online) Comparison of bandwidth utilization rates in different network topologies. (a) NSFNET; (b) USNET

图 6 (网络版彩图) 不同网络拓扑下能效性能

Figure 6 (Color online) Comparison of energy efficiency in different network topologies. (a) NSFNET; (b) USNET

图 6 对比了两种拓扑下 4 种算法在不同负载下的能效情况. 随着负载增加, 在 NSFNET 和 USNET 网络中传输的业务量增加, 虽然传输更多业务所需的光路、带宽和端口数目有所增加, 但各工作交换节点的 IP、BV-OCX 和 BVT 端口的固有基础能耗不会增加, 因此各算法在两种网络中都显示为随着负载增加, 网络的能效也不断增加. RA+EA-RSA 算法虽然在选路及频谱分配时考虑节省网络能耗, 但由于 RA+EA-RSA 算法无频谱碎片避免机制, 使一些业务由于频谱资源导致阻塞或不能路由到更低能耗的光路传输, 因此, 该算法的能效最小. SETA-RSA 算法能在一定程度上避免频谱碎片的产生, 故其能效高于 RA+EA-RSA 算法. HTA-EER 与 MNC 算法同时考虑了时域及频域二维的频谱碎片避免策略, 因此它们的能效比 RA+EA-RSA 和 SETA-RSA 算法高. 同时, HTA-EER 算法在路由时考虑了业务持续时间对光路能耗的影响, 能够根据不同业务持续时间差异选取连续光路和相应的距离自适应调制格式和频谱分配策略, 使网络的光路能耗比 MNC 算法更低, 故 HTA-EER 算法获得的能效最高. 随着负载的持续增加, 网络中最短光路越来越少, 节能路由和频谱策略越来越困难, 因此增加的业务消耗的能耗增量增加, 不同算法能节约的能耗越来越少. 两种拓扑下的带宽利用率趋势大致相同,

由于图 6(b) 网络较大, 业务的平均路由跳数较多, 因此消耗的能耗也较多, 故其能效比图 6(a) 有所增加.

5 结论

本文分析了业务持续时间差异对网络频谱碎片和光路选择的影响, 从频谱域与时间域联合优化网络频谱资源, 设计了基于业务持续时间感知的能效路由频谱分配策略. 在光路选择中, 根据业务持续时间对光路能耗的影响, 选取代价最小的路径提高网络能效. 在分配频谱中, 根据业务的持续时间与光路持续时间关系, 选择时间差较小且频谱连贯度最高的光路分配频谱, 提高网络频谱利用率和降低网络能耗. 研究成果对提高未来光网络能效和优化网络频谱资源分配有重要意义.

参考文献

- 1 Bao N H, Su G J, Chen J B. Recovery-time aware hybrid path protection algorithm in optical networks. *J Chongqing Univ Posts Telecommun*, 2017, 29: 313–319 [鲍宁海, 苏国庆, 陈静波. 恢复时间敏感的光网络混合通路保护算法. *重庆邮电大学学报*, 2017, 29: 313–319]
- 2 Zhou H, Mao S W, Agrawal P. Optical power allocation for adaptive transmissions in wavelength-division multiplexing free space optical networks. *Digit Commun Netw*, 2015, 1: 171–180
- 3 Zhang Z R, Xiao M, Wu M H, et al. Adaptive subcarrier-distribution algorithm for routing and spectrum allocation in OFDM-based elastic optical networks. *Photonic Netw Commun*, 2014, 28: 225–231
- 4 He Z L, Liu W T, Shen B L, et al. Flexible multidimensional modulation formats based on PM-QPSK constellations for elastic optical networks. *Chinese Opt Lett*, 2016, 14: 20–23
- 5 Zhang M Y, You C S, Zhu Z Q. On the parallelization of spectrum defragmentation reconfigurations in elastic optical networks. *IEEE/ACM Trans Netw*, 2015, 24: 1–15
- 6 Wei C Y, Zhou B T, Liu H L, et al. A bandwidth-variable scheduling method of saving energy for the holding time of traffic requests. *J Beijing Univ Posts Telecommun*, 2016, 39: 83–86 [蔚承英, 周邦陶, 刘焕淋, 等. 基于业务持续时间的带宽可变节能调度方法研究. *北京邮电大学学报*, 2016, 39: 83–86]
- 7 Yin W, Zhang J, Zhao Y L, et al. Spectrum consecutiveness based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks. *Chinese Opt Lett*, 2012, 25: 35–38
- 8 Qiu Y, Fan Z Y, Chan C K. Efficient routing and spectrum assignment in elastic optical networks with time scheduled traffic. *Opt Fiber Technol*, 2016, 30: 116–124
- 9 Ju W G, Huang S G, Xu Z Z, et al. Spectrum fusion oriented routing and spectrum allocation algorithm and spectrum defragmentation algorithm. *Acta Photon Sin*, 2013, 42: 929–935 [鞠卫国, 黄善国, 徐珍珍, 等. 面向频谱融合的路由频谱分配和碎片整理算法. *光子学报*, 2013, 42: 929–935]
- 10 Ye Z, Patel A N, Ji P N, et al. Distance-adaptive and fragmentation-aware optical traffic grooming in flexible grid optical networks. In: *Proceedings of OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology*, Melbourne, 2014. 355–356
- 11 Wang C, Shen G X, Peng L M. Protection lightpath-based hitless spectrum defragmentation for distance adaptive elastic optical networks. *Opt Expr*, 2016, 24: 4497–4511
- 12 Liu H L, Lv L, Chen Y, et al. Fragmentation-avoiding spectrum assignment strategy based on spectrum partition for elastic opt network. *IEEE Photon J*, 2017, 9: 7906413
- 13 Nogbou G A, Michel B, Ahmed D K, et al. An efficient hybrid protection scheme with shared/dedicated backup paths on elastic optical networks. *Digit Commun Netw*, 2017, 3: 11–18
- 14 Wang N, Jue J P. Holding-time-aware routing, modulation, and spectrum assignment for elastic optical networks. In: *Proceedings of Global Communications Conference*, Austin, 2014. 2180–2185
- 15 Liu H L, Yin Y R, Chen Y. Energy-efficient multicast traffic grooming strategy based on light-tree splitting for elastic optical networks. *Opt Fiber Technol*, 2017, 36: 374–381

- 16 Wang B, Ho P. Energy-efficient routing and bandwidth allocation in OFDM-based optical networks. *J Opt Commun Netw*, 2016, 8: 71–84
- 17 Sun Y, Shen J H. An energy aware routing and spectrum assignment algorithm for elastic optical networks. *Study Opt Commun*, 2015, 41: 11–13 [孙晔, 沈建华. 一种基于能量感知的弹性光网络 RSA 算法. *光通信研究*, 2015, 41: 11–13]
- 18 Chatterjee B C, Sarma N, Oki E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: a tutorial. *Commun Surv Tut*, 2015, 17: 1776–1800
- 19 Fallahpour A, Beyranvand H, Nezamalhoseini S A, et al. Energy efficient routing and spectrum assignment with regenerator placement in elastic optical networks. *J Light Technol*, 2014, 32: 2019–2027
- 20 Fallahpour A, Beyranvand H, Salehi J A. Energy-efficient manycast routing and spectrum assignment in elastic optical networks for cloud computing environment. *J Light Technol*, 2015, 33: 4008–4018
- 21 Zhang J, Zhao Y, Yu X, et al. Energy-efficient traffic grooming in sliceable-transponder-equipped IP-over-elastic optical networks. *J Opt Commun Netw*, 2015, 7: 142–152

Holding-time-aware energy-efficient routing algorithm in elastic optical networks

Huanlin LIU^{1*}, Derun CHEN¹, Yong CHEN² & Lan WU¹

1. *School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

2. *School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*

* Corresponding author. E-mail: liuhl2@sina.com

Abstract To address spectrum fragmentation and energy consumption in elastic optical networks, a holding-time-aware energy-efficient routing algorithm is proposed herein. In the routing phase, by considering the effect of holding-time on energy consumption, we select the path with minimal cost to improve the energy efficiency. In the phase of spectrum allocation, according to the departure time of requests, the available spectrum blocks with a minor average departure time difference between a request and its adjacent requests are selected to pre-allocate to the request. Subsequently, for minimizing spectrum fragmentation, we calculate the coherence degree of pre-allocation spectrum blocks, and select the spectral block with maximal spectrum coherence degree to transmit the request. Our simulation results show that the proposed algorithm can effectively reduce the blocking probability and improve the energy efficiency under a dynamic network scene in elastic optical networks.

Keywords optical communications, energy efficient routing algorithms, holding-time-aware, spectrum coherence degree, bandwidth utilization

Huanlin LIU was born in 1970. She received her Ph.D. degree in 2008 from the Chongqing University, and her M.S. degree in 2000 from the Chongqing University of Posts and Telecommunications, China. Her research interests include all optical network research, all-optical switch structures, scheduling algorithm research, and information acquiring and processing.

Derun CHEN was born in 1994. He is currently pursuing his Master's degree in the Chongqing University of Posts and Telecommunications, China. His interests include optical network routing algorithms and spectrum allocation.

Yong CHEN was born in 1963. He received his M.S. degree in 1995 from Chongqing University, Chongqing, China, and his Ph.D. degrees in machine and electronic engineering from the Chongqing University, China, in 2003. His research interests include automation control, laser communication, sensor detection, signal processing, and logistics distribution technology.

Lan WU was born in 1994. She is currently pursuing her master's degree in the Chongqing University of Posts and Telecommunications, China. Her interests include optical network optimization and signal processing.