

基于频谱感知的业务分割-合并的弹性光网络资源分配策略

刘焕淋^{*①} 徐一帆^① 陈勇^②

^①(重庆邮电大学光纤通信技术与网络重点实验室 重庆 400065)

^②(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

摘要: 针对弹性光网络中业务分割的资源分配策略消耗更多保护带与设备端口,浪费频谱资源和增加网络能耗的问题,该文提出一种频谱感知的业务分割再合并的资源分配策略。为新业务分配频谱资源时,先计算路径上总链路剩余频谱连续度,选择使剩余频谱连续度最大频谱块传输业务;当路径上频隙数不满足业务传输需求空闲频谱块时,将该业务分割为多个子业务,尽可能选取使剩余频谱连续度最大的多个频谱块承载各子业务。当监视到子业务传输路径上有可用频隙数满足业务传输所需空闲频谱块时,计算剩余频谱连续度作为子业务合并触发的判决条件,将子业务再合并后继续传输。仿真结果表明该文提出的策略能有效降低网络的带宽阻塞率,并节约网络的能耗。

关键词: 弹性光网络;路由频谱分配;业务分割合并;带宽阻塞率;能耗

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)04-0892-07

DOI: 10.11999/JEIT150842

Spectrum-aware Traffic Split-Merge Resource Allocation Strategy for Elastic Optical Networks

LIU Huanlin^① XU Yifan^① CHEN Yong^②

^①(Key Laboratory of Optical Communications and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Traffic split provisioning scheme leads to extra guard band and equipment ports occupation, which decreases the spectrum utilization and increases the energy consumption for elastic optical networks. To address the problem, a spectrum-aware traffic split-merge spectrum resource allocation strategy is proposed. When a new request comes, the total link spectrum consecutiveness for each path is calculated. And the spectral block with the highest spectrum consecutiveness is selected to transmit the request. If the number of frequency slots required by the request exceeds the size of any available spectral block in all paths, the demand is split into multiple sub-demands and allocates them into multiple spectral blocks with relatively higher spectrum consecutiveness. When an available spectral block which meets the requested number of frequency slots is detected on the transmission path, the sub-demands are merged. And spectrum consecutiveness is introduced in the decision criterion for the traffic merge operation. Simulation results indicate that the proposed strategy can significantly reduce the bandwidth blocking probability and save the energy consumption for the elastic optical networks.

Key words: Elastic optical networks; Routing and spectrum allocation; Traffic split-merge; Bandwidth blocking probability; Energy consumption

1 引言

云计算与数据中心的大量应用,数据业务的快速增长,使网络的带宽需求与能耗不断增长。NTT

公司于2008年提出了一种基于OFDM技术的频谱高效弹性光网络^[1]。弹性光网络可根据业务速率大小与传输距离选择不同调制等级,动态分配频隙(Frequency Slot, FS)数传输业务^[2]。相比带宽粒度固定的WDM(Wavelength Division Multiplexing)网络^[3],弹性光网络的带宽资源利用率得到极大提高,被认为是下一代光网络发展的主要方向之一^[4]。但是,弹性光网络传输业务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,网络中的频谱碎片越来越多,增加了网络带宽阻塞率。另一

收稿日期: 2015-07-13; 改回日期: 2015-12-08; 网络出版: 2016-01-22

*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(61275077), 重庆市教委自然科学基金(KJ1140421)和重庆市科委自然科学基金(2015jcyjA40024)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61275077), The Scientific Research Fund of Chongqing Municipal Commission (KJ1140421), The Basic and Frontier Research Program of Chongqing (2015jcyjA40024)

方面，由于网络中业务流量的不断增加，弹性光网络能耗问题极其严峻。研究降低网络带宽阻塞率、提高网络容量的同时保证网络的能耗不增加太多，实现绿色高效的路由传输是非常有必要的。

在弹性光网络的动态路由频谱分配方面，国内外学者们集中研究提高频谱利用率使阻塞率降低，提出了碎片避免、碎片整理、业务疏导、业务分割等路由频谱分配(Route and Spectrum Assignment, RSA)策略。碎片避免策略^[5,6]相比常用首次命中的资源分配策略^[7]没有额外的能耗。但随着负载增加，网络中很难找到足够大的单个空闲频谱块满足业务传输带宽需求，因此高负载下网络带宽阻塞率降低并不大。碎片整理策略虽然能大幅降低网络的带宽阻塞率，但需要频繁中断并重路由业务^[8,9]。而电层业务疏导降低网络阻塞率^[10]，但需要业务频繁上下路，增加网络端口占用和能耗。光层业务疏导虽然能减少转发器与保护带使用，同时降低网络的带宽阻塞率与能耗^[11]，但是光疏导需满足原业务与疏导业务路径同源，传输时间窗口重叠，汇聚传输的链路上有足够大的频谱块，且在汇聚链路后续分离链路上，可用频谱块需满足频谱一致性约束条件。因此，光疏导更加适合能够在业务传输前将可疏导业务进行汇聚调度的静态业务网络环境。

文献[12]提出了一种业务分割的频谱分配策略。当路径上空闲频谱足够但不连续时，将高速率业务根据各空闲频谱块频隙数分割为多个低速率子业务进行传输，以克服频谱碎片化的不利影响。文献[13]在文献[12]的基础上，引入调制等级的选择，进一步提升了该算法性能。相比单条光路的碎片避免频谱分配策略，单路径业务分割策略降低阻塞率性能更好，且没有多路径分割带来时延差问题^[13]；相比碎片整理策略，单路径业务分割具有算法简单易实现优点。但是，将业务分割为多个子业务传输，将增加保护带的使用，不利于阻塞率的进一步降低。并且，由于可切片的多流转发器结构复杂与硬件成本的限制，实际网络中往往部署单流带宽可变转发器(Bandwidth Variable Optical Transponder, BV-OTP)^[13]，因此会在源端与接收端消耗更多的以太网端口和转发器，使网络的能耗增加^[14]。

针对动态业务的网络环境，本文以降低阻塞率为首要优化目标，同时尽可能避免网络能耗的激增，提出了一种频谱感知的业务分割再合并的资源分配策略。在为业务分配频谱资源前，计算各路径上空闲频谱块若被占用后总链路剩余频谱连续度，选择使剩余频谱连续度最大的频谱块传输业务；当路径上没有频隙数满足业务传输需求的空闲频谱块时，

将该业务分割为多个子业务，尽可能选取使剩余频谱连续度最大的多个频谱块承载业务，最大化为业务分配频谱资源后链路剩余频谱连续度。当原业务传输路径上出现空闲频隙数满足业务传输所需带宽的单个空闲频谱块时，以剩余频谱连续度作为业务合并触发的判决条件，将业务合并继续传输，以减少业务分割造成的频谱资源浪费与能耗增加。由于合并操作在业务传输的原路径上执行，还避免了业务重路由而增加的计算复杂度与时延差问题。

2 基于频谱感知的业务分割合并策略

业务请求 $R(s, d, TR)$ 中， s 和 d 分别为源和目的节点， TR 为业务传输速率，则业务所需连续频隙数为 $NFS^R = TR / (SE^m \times BW_{SC}) + GB$ ， SE^m 为调制等级为 m 时频谱效率， BW_{SC} 为单个子载波(即频隙)带宽， GB 为频谱块保护带宽。若路径 P 上各频谱块(Spectral Block, SB)连续频隙数都小于 NFS^R ，则根据 P 上各频谱块大小，自适应地将业务分割为多个子业务分别在不同频谱块上传输，避免业务阻塞，如图1所示。

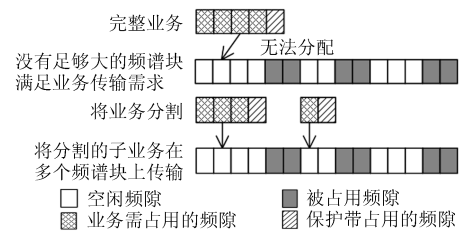


图1 业务分割传输的频谱分配方式示意图

现有业务分割的资源分配策略多采用贪婪的频谱块选择方式^[12,13,15]，即将路径 P 的全部频谱块从大到小排序，若前 n 个频谱块的频隙数 SBFS 满足：

$$\sum_{i=1}^n SBFS_i \geq NFS^R + (n-1) \times GB \quad (1)$$

业务按选定各频谱块大小，分割为 n 个子业务，分别在这 n 个频谱块上传输，式(1)中的 $SBFS_i$ 为排序后第 i 个频谱块的连续频隙数。

2.1.1 基于链路剩余频谱连续度的业务分割策略 贪婪型业务分割策略，可能会加剧链路剩余频谱碎片化，不利于后续业务的完整传输，从而导致后续业务更为频繁地被分割，消耗更多的保护带宽和设备端口，浪费频谱资源和增加网络能耗。本文提出一种基于链路剩余频谱连续度的业务分割机制。设 $FS_{m,d1}^{sri}$ 和 $FS_{m,d2}^{sri}$ 分别为业务 R 的第 i 个子业务 sri 需占用频谱块的首、尾频隙号， $FS_{i,ind1}^p$ 和 $FS_{i,ind2}^p$ 分别为路径 P 的第 i 个频谱块 SB_i 的首、尾频隙的标号，

满足约束

$$FS_{ind2}^{sri} > FS_{ind1}^{sri} + 1 \quad (2)$$

$$FS_{ind1}^{sri} \geq FS_{i,ind1}^P, FS_{ind2}^{sri} \leq FS_{i,ind2}^P \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n (FS_{ind2}^{sri} - FS_{ind1}^{sri} + 1) = NFS^R + (n-1) \times GB \quad (4)$$

式(4)中 $FS_{ind2}^{sri} - FS_{ind1}^{sri} + 1$ 为各子业务所需占用频隙数。

设 $FS_{j,ind1}^l$ 和 $FS_{j,ind2}^l$ 分别为路径 P 上链路 l 的第 j 个频谱块的首、尾频隙, 为业务分配资源前, 先计算备选路径 P 上各链路剩余频谱连续度总和 CL 。

$$CL = \sum_{l=1}^L \frac{\sum_{j=1}^J (FS_{j,ind2}^l - FS_{j,ind1}^l)}{J} \times \sum_{j=1}^J (FS_{j,ind2}^l - FS_{j,ind1}^l + 1) \quad (5)$$

式(5)中 L 为路径 P 上链路总数, J 为链路 l 的频谱块总数, $FS_{j,ind2}^l - FS_{j,ind1}^l$ 为链路 l 各空闲频谱块的频隙连接点数, $FS_{j,ind2}^l - FS_{j,ind1}^l + 1$ 为各空闲频谱块的频隙数。 CL 值越大, 则选择该频谱块会使链路的剩余频谱连续度越高, 传输性能越好。

若业务 R 分配到路径 P 上传输, 则路径 P 上此时的各链路剩余频谱连续度总和 CL_S 为

$$CL_S = \sum_{l=1}^L \frac{\sum_{j=1}^J (FS_{j,ind2}^l - FS_{j,ind1}^l) - \sum_{i=1}^n CL_i^{dec}}{J + \sum_{i=1}^n NB_i^{inc}} \times \left[\sum_{j=1}^J (FS_{j,ind2}^l - FS_{j,ind1}^l + 1) - \sum_{i=1}^n (FS_{ind2}^{sri} - FS_{ind1}^{sri} + 1) \right] \quad (6)$$

式(6)中 CL_i^{dec} 为路径 P 上第 i 个频谱块被子业务 sri 占用时链路 l 频隙连接点数的减少量, NB_i^{dec} 为链路 l 频谱块的增加数, CL_i^{dec} 和 NB_i^{dec} 计算方法分别为

$$CL_i^{dec} = \begin{cases} FS_{ind2}^{sri} - FS_{ind1}^{sri}, & FS^l(FS_{ind1}^{sri} - 1) = 0 \ \& \ FS^l(FS_{ind2}^{sri} + 1) = 0 \\ FS_{ind2}^{sri} - FS_{ind1}^{sri} + 1, & FS^l(FS_{ind1}^{sri} - 1) = 0 \ \& \ FS^l(FS_{ind2}^{sri} + 1) = 1 \\ \text{or} \ FS^l(FS_{ind1}^{sri} - 1) = 1 \ \& \ FS^l(FS_{ind2}^{sri} + 1) = 0 \\ FS_{ind2}^{sri} - FS_{ind1}^{sri} + 2, & FS^l(FS_{ind1}^{sri} - 1) = 1 \ \& \ FS^l(FS_{ind2}^{sri} + 1) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$NB_i^{inc} = \begin{cases} -1, & FS^l(FS_{ind1}^{sri} - 1) = 0 \ \& \ FS^l(FS_{ind2}^{sri} + 1) = 0 \\ 0, & FS^l(FS_{ind1}^{sri} - 1) = 0 \ \& \ FS^l(FS_{ind2}^{sri} + 1) = 1 \\ \text{or} \ FS^l(FS_{ind1}^{sri} - 1) = 1 \ \& \ FS^l(FS_{ind2}^{sri} + 1) = 0 \\ 1, & FS^l(FS_{ind1}^{sri} - 1) = 1 \ \& \ FS^l(FS_{ind2}^{sri} + 1) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, $FS^l(index)$ 表示链路 l 上标号为 $index$ 的频隙状态, 1 表示空闲, 0 表示被占用。

设业务 R 需要 n 个频谱块, 选择满足约束式(2), 式(3), 式(4)的 n 个使链路剩余频谱连续度总和最大的频谱块传输业务, 缓解业务分割造成的保护带与设备端口使用增加, 节约频谱资源并降低网络能耗。

2.2 基于频谱感知的业务合并传输策略

设网络中有旧业务 R' 离去, 网络频谱资源状态更新, 当分割传输的业务 R 所经路径上出现大小满足业务不分割传输所需连续频隙数的频谱块时, 将分割的各子业务合并到该频谱块上继续传输, 以减少保护带宽与设备端口的使用, 节约频谱资源并降低网络能耗, 如图2所示。

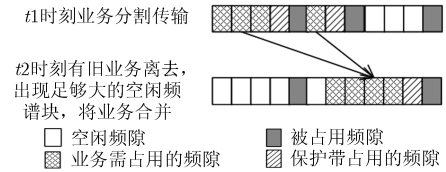


图2 业务合并传输策略示意图

2.2.1 贪婪型业务合并策略 本文首先提出了一种贪婪型业务合并机制, 若离去的业务 R' 的传输路径 P' 与分割传输的业务 R 的传输路径 P^R 有共同的链路, 则从频谱标号低的一端开始轮询 P^R 上的频谱块, 当 P^R 上第 h 个频谱块满足 $SBFS_h \geq NFS^R$ 时, 将分割的业务 R 合并到路径 P^R 的第 h 个频谱块 SB_h 上继续传输。

2.2.1.2 基于链路剩余频谱连续度的业务合并策略

将分割的业务再合并传输, 虽然能节约保护带使用, 但也会改变业务所经路径上各链路频谱状态, 可能使得合并后的链路传输性能更差。因此, 分割业务合并后路径 P 上各链路剩余频谱连续度总和 CL_M 为

$$CL_M = \left\{ \sum_{l=1}^L \left[\sum_{j=1}^J (FS_{j,ind2}^l - FS_{j,ind1}^l) + \sum_{i=1}^n CL_i^{dec} - CL_h^{dec} \right] \middle/ \left[J - \sum_{i=1}^n NB_i^{inc} + NB_h^{inc} \right] \right\} \times \left[\sum_{j=1}^J (FS_{j,ind2}^l - FS_{j,ind1}^l + 1) + \sum_{i=1}^n (FS_{ind2}^{sri} - FS_{ind1}^{sri} + 1) - NFS^R \right] \quad (9)$$

若合并后 CL_M 相比合并前 CL 不减少，则可将分割的业务合并传输。

3 基于频谱感知的业务分割合并资源分配算法

针对动态的网络环境，为了在降低阻塞率的同时避免网络能耗激增，在现有的贪婪型业务分割算法基础上，本文提出了贪婪型频谱感知业务分割再合并路由频谱分配算法(Greedy traffic Split-Merge enabled Routing, Spectrum and Modulation Level Assignment, G-SM-RSMLA)。由于贪婪型分割与合并业务传输策略，可能会导致链路剩余频谱更加碎片化，不利于后续业务传输，本文又提出了基于链路剩余频谱连续度的业务分割再合并路由频谱分配算法(spectrum Consecutiveness based traffic Split-Merge enabled Routing, Spectrum and Modulation Level Assignment, C-SM-RSMLA)。

3.1 G-SM-RSMLA 总算法

步骤 1 构造业务分割表 S ，如表 1 所示，记录分割传输的业务 R 的传输路径 P^R ，业务在该调制等级下未分割时传输所需频隙数 NFS^R 以及业务当前占用的所有频隙的标号 $FSinds^R$ ；

表 1 业务分割表 S

R1	R2	...	RY
P^{R1}	P^{R2}	...	P^{RY}
NFS^{R1}	NFS^{R2}	...	NFS^{RY}
$FSinds^{R1}$	$FSinds^{R2}$...	$FSinds^{RY}$

步骤 2 当网络中有新事件发生，若新事件为新业务 $R(s, d, TR)$ 到达，转步骤 3；若新事件为旧业务 $R'(s', d', TR')$ 离去，转步骤 5；

步骤 3 使用最短路径算法计算 K 条 s 到 d 的备选路径；

步骤 4 调用 3.1.1 节所述的贪婪型业务分割传输策略分配频谱资源；

步骤 5 若 R' 为表 S 中记录的分割传输的业务，将 R' 从表 S 中删除，转步骤 6；若 R' 不是分割传输的业务，直接转步骤 6；

步骤 6 调用 3.1.2 节所述的贪婪型业务合并传输策略分配频谱资源。

G-SM-RSMLA 总算法流程如图 3 所示。

3.1.1 贪婪型业务分割传输策略

步骤 1 选择第 q 条备选路径 $P^q (q = 1; q \leq K; q++)$ ，转步骤 2；当 $q > K$ ，阻塞该请求，返回总算法；

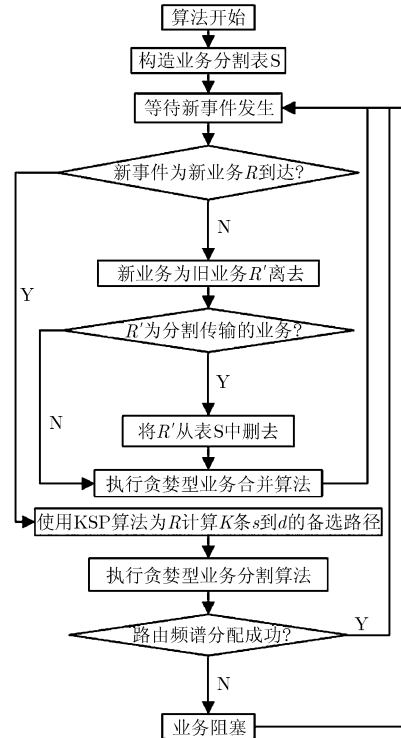


图 3 G-SM-RSMLA 总算法流程图

步骤 2 根据 P^q 长度使用满足距离约束的频谱效率最高的调制等级^[6]，计算出业务传输所需频隙数；

步骤 3 设定业务在本次循环的分割份数 $n (n = 1; n \leq N; n++)$ ，其中 N 为根据一个频隙带宽计算的业务可分割的最大份数，转步骤 4；当 $n > N$ ，转步骤 1；

步骤 4 按连续频隙数从大到小顺序选择路径 P^q 上前 n 个频谱块，若选中的这些频谱块满足式 (1)，则业务可在这些频谱块上传输，为该业务分配频谱资源，转步骤 5；若不满足式 (1)，转步骤 3；

步骤 5 若 $n > 1$ ，将该业务相关信息记录到表 S 中，返回总算法；若 $n = 1$ ，直接返回总算法。

3.1.2 贪婪型业务合并传输策略

步骤 1 轮询分割表 S 中的业务 $R_x (x = 1; x \leq Y; x++)$ ，表中的业务数目为 Y ，若 P^{R_x} 与离去业务所经路径 $P^{R'}$ 有共同的链路，转步骤 2；若无，且 $x > Y$ ，返回总算法；

步骤 2 从频谱标号低的一端开始轮询 P^{R_x} 上的频谱块，若能找到第 h 个频谱块 SB_h 满足 $SBFS_h \geq NFS^{R_x}$ 时，转步骤 3；若找不到满足该式的频谱块，业务暂无法合并， $x++$ ，转步骤 1；

步骤 3 将 R_x 合并到 SB_h 上继续传输，释放 R_x 合并前所占频谱资源，并从 S 中删去，转步骤 1。

3.2 C-SM-RSA 总算法流程

步骤 1-步骤 3 同 G-SM-RSMLA 算法;

步骤 4 调用 3.2.1 节所述的基于剩余频谱连续度的业务合并算法;

步骤 5 同 G-SM-RSMLA 算法;

步骤 6 调用 3.2.2 节所述的基于剩余频谱连续度的业务合并算法。

3.2.1 基于剩余频谱连续度的业务分割策略

步骤 1, 步骤 2 同贪婪型业务分割传输策略;

步骤 3 若 P^q 上有 H 个空闲频谱块, 根据式(6)分别计算各空闲频谱块 SB_i 被占用时 P^q 上总链路的剩余频谱连续度 $CL_S(SB_i)$;

步骤 4 分别对各备选路径上的空闲频谱块按 CL_S 从大到小排序;

步骤 5 设定业务在本次循环的分割份数 $n(n=1; n \leq N; n++)$, 转步骤 5; 当 $n > N$, 转步骤 1;

步骤 6 依次选择路径 P^q 上第 i 至第 $i+n-1$ 个频谱块 ($i=1; i \leq H-n+1; i++$), 若选中的这些频谱块满足式(1), 为业务分配频谱资源, 转步骤 8; 若 $i > H-n+1$, 转步骤 7;

步骤 7 按连续频隙数从大到小顺序依次选择 P^q 上前 1 至前 n 个频谱块, 若选中的这些频谱块满足式(1), 则业务可在这些频谱块上传输, 为业务分配频谱资源, 转步骤 8; 若不满足, 转步骤 4;

步骤 8 若 $n > 1$, 将该业务相关信息记录到表 S 中, 返回总算法; 若 $n = 1$, 直接返回总算法。

由于该算法在步骤 4 按 CL_S 值对频谱块排序, 排序后的频谱块的连续频隙数不满足递进关系, 因此步骤 5 从该频谱块序列中依次选取的 n 个连续频谱块可能都无法满足业务传输的带宽需求, 即使路径上所有频谱块中存在满足业务传输的 n 个频谱块。因此本算法在步骤 6 无法找到 n 个可用频谱块传输业务时, 通过步骤 7 确保当路径上所有频谱块中存在满足业务传输的 n 个频谱块时, 业务能够分割被传输。

3.2.2 基于链路剩余频谱连续度的业务合并传输策略

步骤 1 同贪婪型业务合并传输策略;

步骤 2 若 P^q 上有满足 $SBFS_n \geq NFS^{Rx}$ 的 G 个空闲频谱块, 将其放入集合 $B(SB_1, SB_2, \dots, SB_G)$, 转步骤 3; 若无满足要求的频谱块, 转步骤 1;

步骤 3 根据式(5)计算当前时刻链路剩余频谱连续度 CL^{cur} ;

步骤 4 根据式(9)分别计算业务合并到集合 B

中各空闲频谱块上时的剩余频谱连续度 CL_M , 并选取值最大的 $CL_M \max(SB_h)$;

步骤 5 若 $CL_M \max(SB_h) \geq CL^{cur}$, 转步骤 6; 若 $CL_M \max(SB_h) < CL^{cur}$, 该业务暂不合并, 转步骤 1;

步骤 6 将 R_x 合并到 SB_h 上继续传输, 释放 R_x 合并前所占频谱资源, 并从 S 中删去, 转步骤 1。

4 算法仿真结果分析

4.1 仿真参数设置

本文所提策略的性能在 14 个节点 21 条边的自然科学基金网(NFSNET)上验证, 设网络每条链路有 358 个频隙, 每个频隙大小为 12.5 Hz。业务速率分别为 25, 50, 100, 200 Gb/s, 按比例 1:1:1:1 产生, 到达率满足泊松分布, 业务间用一个保护带隔开, 每个保护带占用一个单位频隙, 调制等级选用 BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM 4 种, 网络的能耗模型可简化为以太网端口, 带宽可变光转发器与掺铒光纤放大器^[17]。以太网端口能耗为 $P_e = 560(W)$, 每个端口连接一个光转发器和 IP 路由器; 光转发器能耗为 $P^T = 1.683 \times TR (Gb/s) + 91.333(W)$, TR 为业务传输速率; 光放大器能耗为 $P_a = 30(W)$, 光纤链路上每 80 km 部署一个。对于每一个新业务 $R(s, d, TR)$, 其不分割传输所需端口能耗 E_R 为

$$E_R = (P_e + P_{dyn}^T \times TR + P_h^T) \times (t_d - t_s) \quad (10)$$

其中 P_{dyn}^T 为转发器与业务速率相关的能耗部分, P_h^T 为转发器的杂项能耗, 与业务速率无关。 t_d 与 t_s 分别表示业务的结束时刻与到达时刻。

将业务分割为 N 份后传输所需端口能耗 E_R 为

$$E_R = (P_e \times N + P_{dyn}^T \times TR + P_h^T \times N) \times (t_d - t_s) \quad (11)$$

将业务合并, 可节约的能耗 E_{sav} 为

$$E_{sav} = [P_e \times (N-1) + P_h^T \times (N-1)] \times (t_d - t_m) \quad (12)$$

其中 t_m 为业务合并时的时刻。

为了验证本文提出的 G-SM-RSMLA 算法与 C-SM-RSMLA 算法的性能, 将其与首次命中算法(First-Fit Routing, Spectrum and Modulation Level Assignment, FF-RSMLA)与现有业务分割传输策略(Spectrum Split enabled Routing, Spectrum and Modulation Level Assignment, SSRSMLA)^[13]进行对比, 带宽阻塞率与单位比特能耗作为性能评估标准。

4.2 仿真结果分析

图 4 表示不同负载下 4 种算法的带宽阻塞率性能对比。本文提出的 G-SM-RSMLA 算法相比传统 FF-RSMLA 算法, 在低负载(200 Erlang)与高负载(400 Erlang)时, 带宽阻塞率分别降低了 0.179%与

4.023%；相比 SSRSMLA 算；在低负载(200 Erlang)与高负载(400 Erlang)时，带宽阻塞率降低了 0.002%与 1.653%。随着负载增加，带宽阻塞率降低效果越大。这是因为 G-SM-RSMLA 算法不仅继承了业务分割传输策略大幅降低带宽阻塞率的优点，并能通过将分割的子业务伺机合并传输以节约保护带的消耗，减少频谱资源浪费，进一步提高了频谱利用率。当负载越大时，需要分割传输的业务更多，再合并传输的概率更大，因此，带宽阻塞率相比 SSRSMLA 下降得更多。

同时，本文提出的 C-SM-RSMLA 算法相比传统 FF-RSMLA 算法，在低负载(200 Erlang)与高负载(400 Erlang)时，阻塞率分别降低了 0.186%与 5.614%；相比 SSRSMLA 算法，在低负载(200 Erlang)与高负载(400 Erlang)时，阻塞率降低了 0.007%与 3.244%，阻塞率降低效果比 G-SM-RSMLA 算法更大。这是因为 C-SM-RSMLA 算法在为分割的多个子业务分配频谱资源时，尽可能选取使链路剩余频谱连续度最大的多个频谱块承载业务，在业务合并时，将链路剩余频谱连续度作为合并触发以及业务合并后频谱分配的判决条件。这两个策略都尽可能地最大化为业务分配频谱资源后的链路剩余频谱连续度，更有利于后续业务传输，并能降低后续业务需要分割才能传输的概率，减少频谱资源的浪费。图 5 表示了 SSRSMLA, G-SM-RSMLA, C-SM-RSMLA 3 种算法需要分割传输的业务占总业务量的比例。

图 6 表示不同负载下 4 种算法单位比特能耗对比。本文提出的 G-SM-RSMLA 算法与 C-SM-

RSMLA 算法相比 SSRSMLA 算法，在低负载(200 Erlang)与高负载(400 Erlang)时，节约了约 1%与 10%的能耗，能耗的节约程度随负载的上升而增加。相比 FF-RSMLA 算法，在低负载(200 Erlang)以及高负载(400 Erlang)时，能耗仅增加了约 1%至 1.6%。这是因为将分割的低速率子业务合并为一个完整的高速率业务后，减少了以太网端口及转发器使用，提高了资源利用率。随着负载的增加，分割传输的业务数量增加，使可合并的业务也越多，因此合并节约的能耗越多。

同时，本文提出的 C-SM-RSMLA 算法单位比特能耗性能略好于 G-SM-RSMLA 算法，因为 C-SM-RSMLA 算法中需要分割传输的业务比例更小，如图 5 所示，节约了设备端口的使用。但由于两算法节约端口的途径主要都源于分割业务的合并传输，因此所提两算法单位比特能耗性能相差不大。

5 结束语

本文提出的 G-SM-RSMLA 与 C-SM-RSMLA 算法，不仅继承了业务分割传输策略能显著降低带宽阻塞率的优点，并且通过将分割的低速业务在原路径带宽资源允许时，合并回完整业务传输，以减少保护带的使用，提高了频谱资源利用率；合并传输还减少了设备端口的使用，达到节能的目的。由于本文所提算法基于全网状态信息及时可知，可以通过软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)的集中控制策略掌握全网拓扑及链路信息^[18]。随着 SDN 技术的发展以及网络资源弹性分配的发展趋势，将本文算法的分割与合并机制与 SDN 集中控制策略相结合，是我们下一步的研究方向。

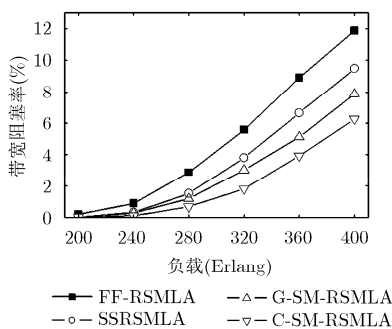


图 4 不同负载下 4 种策略带宽阻塞率性能对比

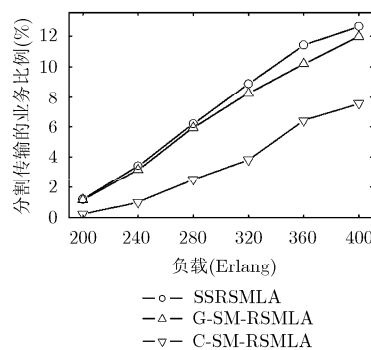


图 5 不同负载下 3 种具有业务分割机制的算法分割的业务比例

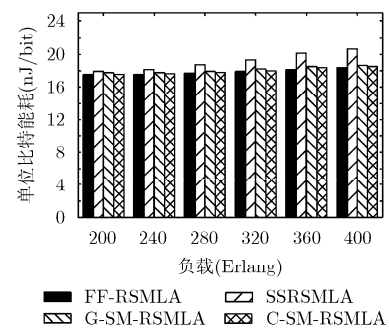


图 6 不同负载下 4 种算法的能耗性能对比

参考文献

[1] JINNO M, TAKARA H, KOZICKI B, *et al.* Demonstration of novel spectrum-efficient elastic optical path network with per-channel variable capacity of 40 Gb/s to over 400 Gb/s[C].

34th European Conference on Optical Communication, Brussels, 2008: 1-2. doi: 10.1109/ECOC.2008.4729581.

[2] JINNO M, KOZICKI B, TAKARA H, *et al.* Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum sliced

- elastic optical path network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(8): 138–145. doi: 10.1109/MCOM.2010.5534599.
- [3] 程希, 沈建华. 一种基于改进蚁群算法的光网络波长路由分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(3): 710–715. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01032.
- CHENG Xi and SHEN Jianhua. An improved ant colony algorithm for routing and wavelength assignment in optical networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 710–715. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01032.
- [4] 肖媚, 何动, 张振荣. 基于 OOFDM 的弹性光网络研究[J]. *光通信技术*, 2013, 37(4): 29–32.
- XIAO Mei, HE Dong, and ZHANG Zhenrong. Research on OOFDM-based elastic optical network[J]. *Optical Communication Technology*, 2013, 37(4): 29–32.
- [5] YIN Yawei, ZHANG Huan, ZHANG Mingyang, *et al.* Spectral and spatial 2D fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(10): A100–A106. doi: 10.1364/JOCN.5.00A100.
- [6] CHEN Xin, MA Songwei, GUO Bingli, *et al.* A novel fragmentation-aware spectrum allocation algorithm in flexible bandwidth optical networks[J]. *Optical Switching and Networking*, 2014, 12(4): 14–23. doi: 10.1016/j.osn.2013.11.003.
- [7] SHIRAZIPOURAZAD S, DERAKHSHANDEH Z, and SEN A. Analysis of on-line routing and spectrum allocation in spectrum-sliced optical networks[C]. *IEEE International Conference on Communications, Budapest*, 2013: 3899–3903. doi: 10.1109/ICC.2013.6655166.
- [8] YU Xiaosong, ZHANG Jie, ZHAO Yongli, *et al.* Spectrum compactness based defragmentation in flexible bandwidth optical networks[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition, Los Angeles*, 2012: 1–3.
- [9] FANG Wenjian, LU Minhua, LIU Xiahe, *et al.* Joint defragmentation of optical spectrum and IT resources in elastic optical datacenter interconnections[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(4): 314–324. doi: 10.1364/JOCN.7.000314.
- [10] MUSUMECI F, PULEIO F, and TORNATORE M. Dynamic grooming and spectrum allocation in optical metro ring networks with flexible grid[C]. *15th International Conference on Transparent Optical Networks, Cartagena*, 2013: 1–4. doi: 10.1109/ICTON.2013.6602911.
- [11] ZHANG Guoying, LEENHEER M D, and MUKHERJEE B. Optical traffic grooming in OFDM-based elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2012, 4(11): B17–B25. doi: 10.1364/JOCN.4.000B17.
- [12] PAGES A, PERELLO J, and SPADARO S. Lightpath fragmentation for efficient spectrum utilization in dynamic elastic optical networks[C]. *16th International Conference on Optical Network Design and Modeling, Colchester*, 2012: 1–6. doi: 10.1109/ONDM.2012.6210270.
- [13] PAGES A, PERELLO J, SPADARO S, *et al.* Optimal route, spectrum, and modulation level assignment in split-spectrum-enabled dynamic elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(2): 114–126. doi: 10.1364/JOCN.6.000114.
- [14] 刘焕淋, 岁蒙, 徐一帆, 等. 基于距离自适应和有效共享路径感知的光疏导方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(8): 1964–1970. doi: 10.11999/JEIT141442.
- LIU Huanlin, SUI Meng, XU Yifan, *et al.* A method of optical grooming for distance-adaptive and effective sharing path-aware[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1964–1970. doi: 10.11999/JEIT141442.
- [15] ZHANG Zhenrong, XIAO Mei, WU Minghou, *et al.* Adaptive subcarrier-distribution algorithm for routing and spectrum allocation in OFDM-based elastic optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2014, 28(3): 225–231. doi: 10.1007/s11107-014-0446-2.
- [16] AHMAD A, BIANCO A, and BONETTO E. Traffic grooming and energy-efficiency in flexible-grid networks[C]. *IEEE International Conference on Communications, Sydney*, 2014: 3264–3269. doi: 10.1109/ICC.2014.6883824.
- [17] ZHANG Jiawei, ZHAO Yongli, YU Xiaosong, *et al.* Energy-efficient traffic grooming in sliceable-transponder-equipped ip-over-elastic optical networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(1): A142–A152. doi: 10.1364/JOCN.7.00A142.
- [18] 曹宾, 刘颀, 孙奇. 软件定义网络架构下的动态自适应负载均衡策略研究[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2015, 27(4): 460–465. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2015.04.005.
- CAO Bin, LIU Xie, and SUN Qi. Dynamically adaptive load balancing strategy under the software defined network structure[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2015, 27(4): 460–465. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2015.04.005.
- 刘焕淋: 女, 1970年生, 教授, 研究方向为光通信技术与未来网络.
- 徐一帆: 男, 1990年生, 硕士, 研究方向为绿色光网络及路由算法.
- 陈勇: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为光通信技术、传感检测与自动化技术.