

引用本文: 陈铭毓, 沈建华. 一种提高弹性光网络性能的 PDT-TFDBT 策略[J]. 光通信技术, 2023, 47(5): 16-21.

一种提高弹性光网络性能的 PDT-TFDBT 策略

陈铭毓, 沈建华*

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 为了提高弹性光网络的性能, 提出一种时频域及阻塞门限联合触发的周期碎片整理(PDT-TFDBT)策略, 该策略在触发条件方面采用改进碎片化指数的阻塞延迟触发机制, 减少未阻塞时进行无效整理的负载量; 在整理顺序方面综合考虑业务的时域和频域特征, 合理分配业务的重构顺序, 同时引入启发式深度学习辅助的路由及频谱分配(DKA-RSA)算法。仿真结果表明, PDT-TFDBT 策略不仅可以减少重构业务数量和频谱碎片, 而且进一步降低了业务阻塞率, 提高了频谱利用率。

关键词: 弹性光网络; 路由选择; 频谱分配; 碎片整理; 触发门限

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)05-0016-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



PDT-TFDBT strategy for improving the performance of elastic optical networks

CHEN Mingyu, SHEN Jianhua*

(School of communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to improve the performance of elastic optical networks, a combined time-frequency domain and blocking threshold triggered periodic defragmentation (PDT-TFDBT) strategy is proposed. In this strategy, the blocking delay triggering mechanism with improved fragmentation index is adopted to reduce the load of ineffective defragmentation in non-blocking conditions. In terms of sorting order, the time domain and frequency domain characteristics of services are comprehensively considered, and the reconfiguration order of services is reasonably allocated. At the same time, the heuristic deep learning-assisted routing and spectrum allocation(DKA-RSA) algorithm is introduced. The simulation results show that PDT-TFDBT strategy can not only reduce the number of reconstructed traffic and spectrum fragmentation, but also further reduce the traffic blocking rate and improve the spectrum utilization rate.

Key words: elastic optical network, routing, spectrum assignments, defragmentation, trigger threshold

0 引言

传统基于波分复用(WDM)技术的光传送网(OTN)由于存在频谱固定栅格分割的固有缺陷,无法适应当前复杂且巨量的动态业务需求^[1]。弹性光网络(EON)因其能灵活分配频谱和频谱高利用率而被认为是下一

代光网络的重要发展方向之一^[2]。路由及频谱分配(RSA)是 EON 的核心技术之一,由于需要满足频谱连续性和一致性等约束条件,已被证明是一个 NP-hard 问题^[3]。国内外许多学者对此开展了大量研究并提出了一些改进和解决的措施。邱伟^[4]提出对蚁群系统算法进行改进,将链路使用程度作为蚂蚁选路依据,继而寻找全局最优解,这种启发式算法虽有可能找到 RSA 问题的全局最优解,但因其较高的算法复杂度并不适用于实际的动态网络环境。YU J^[5]结合深度神经网络模型提出了一种基于深度学习的 RSA(D-RSA)算法,以期灵活和智能地解决到达服务的动态变化问题,但其仍以传统的 K 最短选路(KSP)算法作为路由选择算法,因此无法为业务提供最优路由策略,在网

收稿日期:2023-03-04。

基金项目:南京邮电大学研发基金类项目(2022 外 072)资助。

作者简介: 陈铭毓(1998—),男,江苏南通人,硕士研究生,现就读于南京邮电大学电子信息专业,主要研究方向是弹性光网络网络规划层,包括将人工智能、元启发式策略等技术运用于弹性光网络。

* **通信作者:** 沈建华(1972—),男,工学博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为高速大容量光纤通信系统、智能光网络等。



络阻塞率方面仍有改善的空间。本文作者在文献[6]中提出了一种深度神经网络辅助的 RSA (DKA-RSA) 算法, 使 D-RSA 算法在阻塞率、频谱利用率以及频谱碎片化程度上有更好的性能。虽然该算法能够减少频谱碎片的产生, 但未整合业务释放产生的空闲频谱资源。因此, 若能采用适宜的频谱碎片整理策略, 则可以进一步提升频谱资源利用率和优化网络性能。文献[7-13]分别提出了不同的频谱碎片整理策略, 但其中一些策略过于频繁地整理, 加大了网络运行负担, 并且碎片整理或重构的效果不明显。

基于此, 本文提出一种时频域和阻塞门限联合触发的周期碎片整理(PDT-TFDBT)策略。该策略通过简化碎片化指数的计算方法和改变门限触发条件, 并采用 DKA-RSA 算法进一步优化了 EON 的性能。

1 PDT-TFDBT 策略

1.1 基于改进碎片化指数的阻塞延迟触发机制

网络环境中的业务动态特性可能导致频谱分布的动态变化, 所以合理评估网络碎片化程度并以此决定触发标准极为重要。学术界对碎片度量的研究主要集中在频域, 即只考虑链路资源利用率或网络业务阻塞率等因素。在时域上, 由于业务随时间到达和离去是频谱碎片产生的原因之一, 因此业务持续时间不能被忽视, 例如在大量持续时间较长的业务组成的网络中, 短时业务释放后会产生频谱碎片。因此, 网络碎片度量除了考虑频域的资源利用率外, 还应当考虑时域的业务持续时间。

PDT-TFDBT 策略中引入的网络碎片度量主要包括两部分, 分别是时域碎片化指数和频域碎片化指数。其中, 时域碎片化指数 T_F 衡量网络中现有业务量及其持续时间之间的关系, 如式(1)所示。

$$T_F = \frac{\sum_{i=1}^Y |t_i - t_{\max}|}{Y \cdot t_{\max}} \quad (1)$$

其中, Y 表示网络中现有的业务总量, $t_{\max}$ 表示现有业务持续时间的最大值, t_i 表示网络中现有的第 i 种业务的持续时间。

本文引入频域碎片化指数 $F_{f,j}$ ^[13] 衡量链路 j 碎片的离散度和权重值。由于触发整理存在滞后性, 在计算频域碎片化指数时无需十分精确, 因此本文将 $F_{f,j}$ 简化为该链路的频域碎片化程度, 如式(2)所示。

$$F_{f,j} = 1 - \frac{F_{\max}}{N_{\text{free}}} \quad (2)$$

其中, $F_{\max}$ 表示链路中最大空闲频隙数, N_{free} 表示链路中的可用频隙数。根据式(1)和式(2), 链路 j 的碎片化指数 $F_{f,j}$ 可以由式(3)得出。

$$F_{f,j} = T_F F_{f,j} \quad (3)$$

网络碎片化指数 F_f 等于各条链路碎片化指数 $F_{f,j}$ 的平均值。

由于业务离开时可能产生大量频谱碎片, PDT-TFDBT 策略采取了周期触发的模式, 将固定时隙设定为时钟周期。每个时钟周期内都会进行业务的到达和离开, 即总体上遵循周期触发。在网络运行初期和业务负载较低时, 无需进行定期的碎片整理。因此, 本文设置了阻塞门限触发。当网络碎片化指数达到开始有业务阻塞时的链路碎片化指数时, 将从下一个时钟周期开始进行周期性地碎片整理。此外, 本文改变了计算网络碎片化指数的方式, 从业务到达触发改为时钟触发。这样虽然设置有一定的滞后性, 但是可以减少频繁感知网络整体情况的计算复杂度并降低网络时延。PDT-TFDBT 策略在每一个时钟周期结束时计算网络碎片化指数。如果网络碎片化指数大于有业务阻塞时的链路碎片化指数, 或者网络中的某些链路碎片化指数偏高, 说明分配的业务在某些链路上拥塞, 因而需要开始对网络进行频谱碎片整理。

1.2 基于时频域优先级指数的整理顺序

在串行机制中, 业务不同的整理顺序会影响整理效果, 应优先整理那些能够大幅提升网络性能的业务。传统频谱碎片整理顺序多是基于业务大小或初始频谱位置, 整理时优先考虑大带宽和高频隙位置的业务, 这样能显著提高网络性能。与碎片度量类似, 整理顺序除了应当考虑频域外, 还需要考虑时域因素, 因为时域的业务剩余服务时间会对网络未来的性能造成影响。因此, 本文采用文献[12]提出的优先级指数的概念, 即综合考虑时域和频域这 2 个因素。优先级指数 P_i 的计算公式如式(4)所示。

$$\begin{cases} P_i = \alpha P_{i,f} + \beta P_{i,s}, \alpha + \beta = 1 \\ P_{i,f} = \frac{F+B}{N} \\ P_{i,s} = \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_{i,f}$ 表示频域优先级, $P_{i,s}$ 表示时域优先级, α 、 β 分别是二者的权重值, 本文参考文献[13]取 $\alpha=0.5$ 。 F 表示业务在链路中的起始频隙, B 表示业务所占用的频隙数, Δt 表示业务剩余时间, $\Delta t_{\max}$ 表示现有业务中业务剩余时间的最大值。

PDT-TFDBT 策略在进行碎片整理时, 先将网络现有业务按优先级指数降序排序, 再采用 DKA-RSA 算法对业务的 RSA 重构进行直接判决, 从而降低业务碎片整理的时延和复杂度。在上述过程中, 如果业务搬移前后的路由和分配位置保持不变, 说明该业务无需进行频谱整理。由于 DKA-RSA 算法在进行路由选择和频谱分配时已考虑到链路碎片化程度, 因此是否进行优先级排序对 DKA-RSA 算法的网络性能优化影响并不明显。

1.3 PDT-TFDBT 策略实施步骤

PDT-TFDBT 策略实施流程如图 1 所示, PDT-TFDBT 策略实施步骤如下:

1) 网络按 DKA-RSA 算法分配到达业务, 在某一时钟周期内, 如阻塞信号 $Z_s=0$, 即代表网络从未发生阻塞, 网络不进行碎片整理, 直到开始出现阻塞 ($Z_s=1$), 计算阻塞业务所在链路的碎片化指数, 记为阻塞门限 $F_{l,b}$, 此时仍不进行碎片整理;

2) 从下一个时钟周期开始, 判断整理信号 Z_L 是否为 1, 计算网络碎片化指数 F_l , 并比较 F_l 和 $F_{l,b}$ 的大小, 只有当 $F_l \geq F_{l,b}$ 、 $Z_s=1$ 且 $Z_L=1$ 时, 开始碎片整理, 记录整理时的时钟周期 T ;

3) 将网络现有业务重新路由, 按优先级指数 P_l 降序排序, 再采用 DKA-RSA 算法依次对业务直接判决,

直到现有业务整理完毕;

4) 从时钟周期 $T+1$ 开始, 重复步骤 3)。

2 仿真与性能分析

为验证 PDT-TFDBT 策略的性能(业务阻塞率、频谱利用率、频谱碎片化程度、业务损伤率), 本文在 NSFNET(14 个节点、21 条链路)和 USNET(23 个节点、43 条链路)的网络拓扑中进行了仿真实验, 将该算法与 DKA-RSA 算法(不整理), PADAD 策略^[2]、LPF-DAD 策略、优先级指数 DAD(PI-DAD)策略进行仿真对比。

实验中每条链路总频谱带宽为 4 000 GHz, 链路频隙为 12.5 GHz, 即每条链路上有 320 个频隙。业务的源、目的节点和请求速率均随机生成, 请求速率范围为 10~100 Gb/s, 保护带宽为 2 个频隙, 业务到达率服从参数为 λ 的泊松分布, 持续时间服从参数为 μ 的负指数分布。

各种策略在 NSFNET 网络中的仿真结果分别如图 2 所示。图 2(a)中, 当网络业务负载在 200 Erlang 以下时, PDT-TFDBT 策略与 DKA-RSA 算法(不整理)性能接近, 这时业务阻塞率为 0 并未触发整理; 其它 3 种策略的业务阻塞率均大于 0。图 2(b)中, 当业务负载低于 300 Erlang 时, PDT-TFDBT 策略的频谱碎片化程度最低, 且频谱碎片化率随着负载量的增大而升高; 当业务负载超过 300 Erlang 时, 这 5 种策略的频谱碎

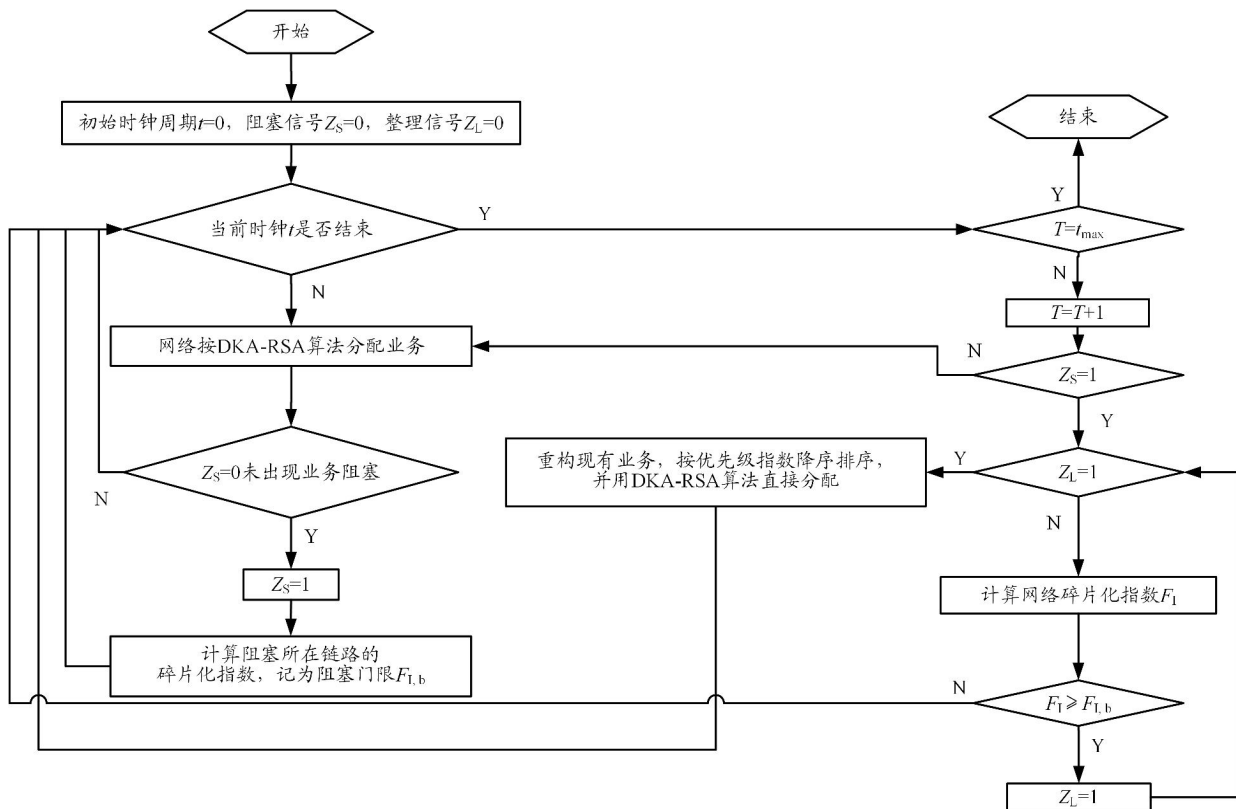
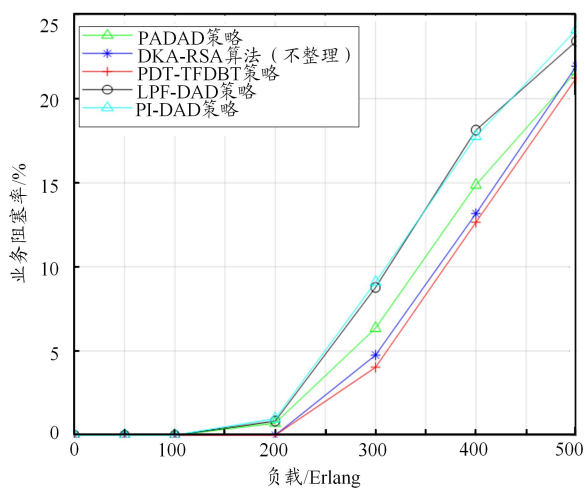
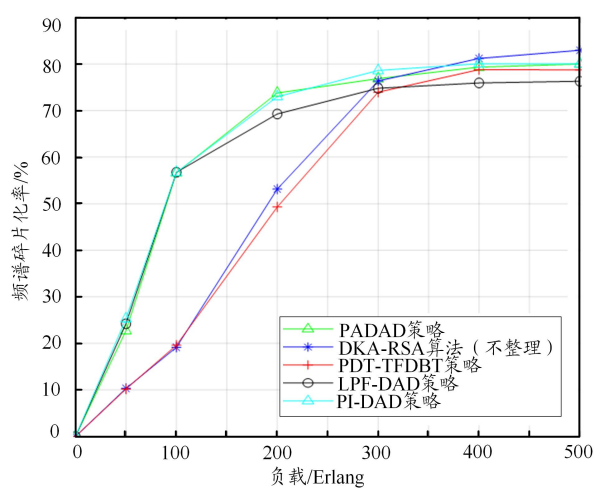


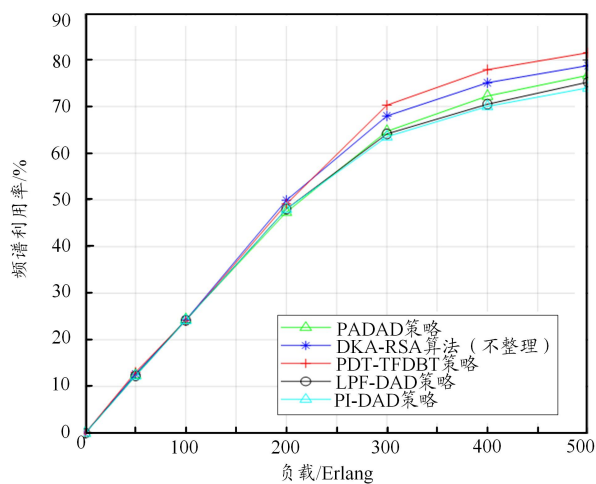
图 1 PDT-TFDBT 策略流程图



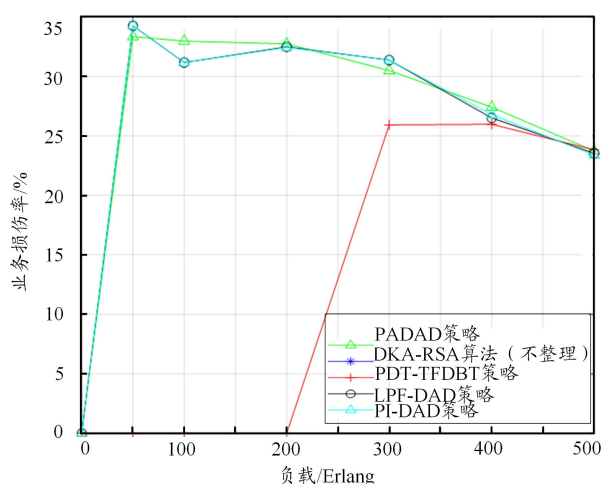
(a) 业务阻塞率



(b) 频谱碎片化程度



(c) 频谱利用率



(d) 频谱损伤率

图 2 NSFNET 网络性能

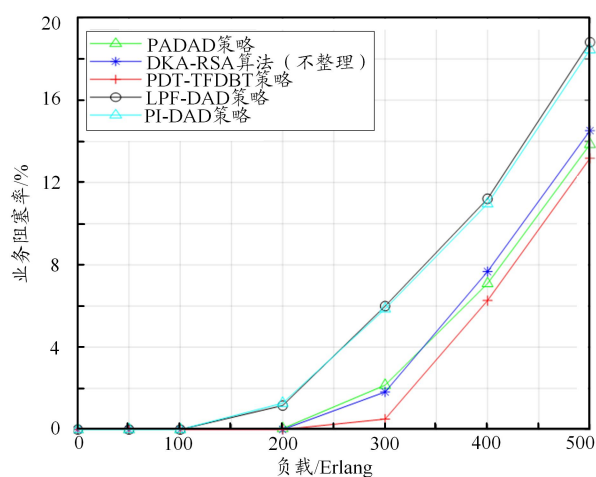
片化率基本维持在 75%~82%。图 2(c)中,当业务负载低于 200 Erlang 时,5 种策略的频谱利用率相近;当业务负载超过 200 Erlang 时,PDT-TFDBT 策略的频谱利用率最高,其次是 DKA-RSA 算法(不整理)、PADAD 策略、LPF-DAD 策略、PI-DAD 策略。图 2(d)中,当业务负载低于 400 Erlang 时,PDT-TFDBT 策略的业务损伤率最低;当业务负载超过 400 Erlang 时,5 种策略的业务损伤率几近相同。

综合图 2 可知,当业务负载超过 200 Erlang 时,网络开始出现阻塞并触发了碎片整理。这种阻塞触发的周期碎片整理方式通过对现有业务进行频谱资源重构,将原本因业务频繁到达和离去导致的散列分布资源重新整合成大块空闲频隙,使到达业务不容易阻塞,从而提升了频谱利用率。当业务阻塞率达到 10% 时,PDT-TFDBT 策略比 PADAD 策略、DKA-RSA 算法(不整理)、LPF-DAD 策略、PI-DAD 策略分别提高了

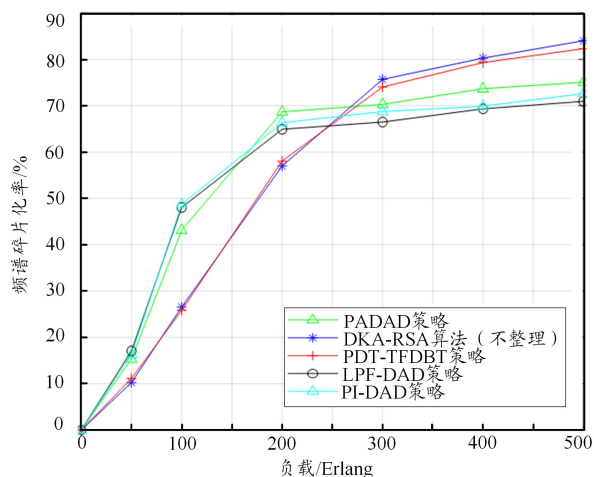
约 30、10、60、60 Erlang 的负载量。这是因为 PDT-TFDBT 策略通过阻塞触发碎片整理,并采用改进的蚁群系统算法进行频谱感知,以寻找全局最优 RSA。这使得网络中的空闲频隙更加完整,能够分配的业务也就更多。因此,与其它 4 种算法相比,PDT-TFDBT 策略在 NSFNET 网络的性能最好。

5 种策略在 USNET 网络中的性能如图 3 所示。可以看出,5 种策略在 USNET 网络中的性能与 NSFNET 网络类似。图 3(a)中,当网络业务负载在 200 Erlang 以下时,PDT-TFDBT 策略与 DKA-RSA 算法(不整理)、PADAD 策略性能接近,这时业务阻塞率为 0 并未触发整理;其它 2 种策略的业务阻塞率均大于 0。图 3(b)中,当业务负载低于 250 Erlang 时,PDT-TFDBT 策略、DKA-RSA 算法(不整理)的频谱碎片化率最低,且频谱碎片化率随着负载量的增大而升高;当业务负载超过 300 Erlang 时,5 种策略的频谱碎片化率基

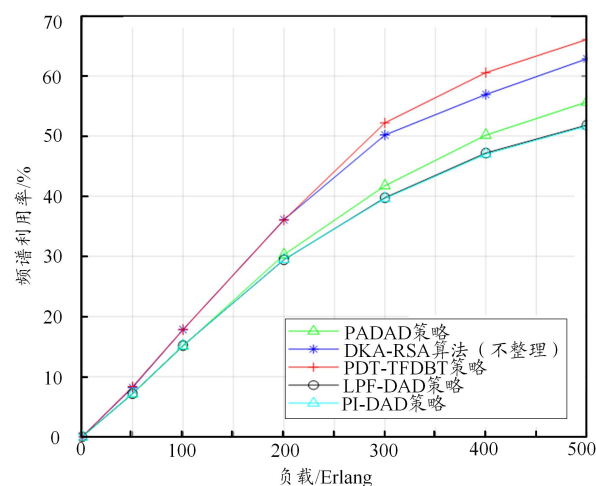
陈铭毓, 沈建华. 一种提高弹性光网络性能的 PDT-TFDBT 策略



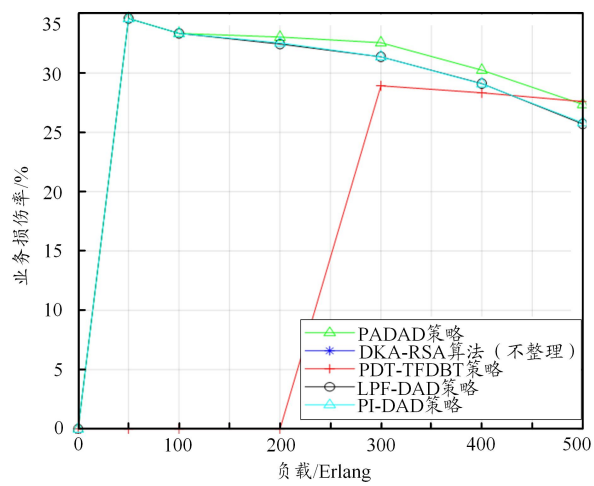
(a) 业务阻塞率



(b) 频谱碎片化程度



(c) 频谱利用率



(d) 频谱损伤率

图 3 USNET 网络性能

本维持在 65%~82%。图 3(c) 中, 当业务负载低于 50 Erlang 时, 5 种策略的频谱利用率相近; 当业务负载超过 200 Erlang 时, PDT-TFDBT 策略的频谱利用率最高, 其次是 DKA-RSA 算法 (不整理)、PADAD 策略, LPF-DAD 策略、PI-DAD 策略的频谱利用率始终相同。图 3(d) 中, 当业务负载低于 425 Erlang 时, PDT-TFDBT 策略的业务损伤率最低; 当业务负载为 500 Erlang 时, PDT-TFDBT 策略的业务损伤率最高。

综合图 3 可知, 当网络负载在 200 Erlang 以下时, PDT-TFDBT 策略同样因为未触发整理所以性能与 DKA-RSA 算法 (不整理) 类似; 当网络负载为 300 Erlang 时, PDT-TFDBT 策略开始整理频谱碎片, 与 DKA-RSA 策略相比, 业务阻塞率、频谱利用率和频谱碎片程度均有所改善; 当负载为 400 Erlang 时, PDT-TFDBT 策略比 PADAD 策略的业务阻塞率低约 1%, 而频谱利用率

高约 10%。因此, PDT-TFDBT 策略在 USNET 网络中的性能也较好。

3 结束语

本文提出了一种 PDT-TFDBT 策略, 并对其性能进行了仿真。仿真结果表明, 该策略在 NSFNET 和 USNET 网络拓扑中相较于 DKA-RSA 算法 (不整理)、PADAD 策略、LPF-DAD 策略以及 PI-DAD 策略, 在业务阻塞率、频谱利用率和频谱碎片化程度等方面均表现出明显的优势。

参考文献:

- [1] IOANNIS S, ELENI P, DIMITR K. Dynamic cooperative spectrum sharing and defragmentation for elastic optical network[J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2014, 6(3): 259-269.
- [2] CHATTERJEE B C, BA S, OKI E. Fragmentation problems and man-

agement approaches in elastic optical networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 20(1): 183–210.

[3] 张佳唯, 钱凤臣, 杨俊强, 等. 弹性光网络中路由与频谱分配算法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(6): 2001–2010.

[4] 邱伟. 弹性光网络中路由选择和频谱分配问题的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.

[5] YU J. A deep learning based RSA strategy for elastic optical networks [C]. International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 5–8, 2019, Huangshan, China. Huangshan: IEEE, 2019: 1–3.

[6] CHEN M Y, JIANG L, GE R L, et al. A heuristic deep learning assisted RSA Algorithm for elastic optical networks [C]. 14th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT2022), July 7–9, 2022, Chongqing, China. Chongqing: IEEE, 2022: 111–115.

[7] 商盼盼, 任丹萍, 张娟, 等. 弹性光网络中面向业务精确迁移的频谱碎片整理算法[J]. 光通信技术, 2021, 45(10): 51–57.

[8] LUO L, LIU X, ZHANG J, et al. Blocking-triggered defragmentation

mechanism based on the selected path for elastic optical network [C]. The 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC 2019), May 9–10, 2019, Beijing, China. Beijing: IEEE, 2019: 1–4.

[9] LUO L, LIU X, ZHANG J, et al. Policy-based comparison-triggered defragmentation mechanism for elastic optical networks[C]. 2018 International Conference on Optoelectronics and Measurement, October 18–20, 2018, Hangzhou, China. New York: Springer Singapore, 2020: 37–44.

[10] YADAV D S. RDRSA: a reactive defragmentation based on rerouting and spectrum assignment (RDRSA) for spectrum convertible elastic optical network[J]. Optics Communications, 2021(11): 127–144.

[11] ESTHER GANDHIMATHI. Spectrum resource optimization in elastic optical networks using dynamic RMSA [J]. Optical and Quantum Electronics, 2022(54): 260–260

[12] 曹明君. 弹性光网络中频隙碎片整理技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

[13] 张盛峰, 王鹏. 弹性光网络中基于持续时间的奇偶分区频谱分配算法[J]. 光通信技术, 2020, 44(7): 47–51.