

弹性光网络中面向业务精确迁移的频谱碎片整理算法

商盼盼^{1,2}, 任丹萍^{1,2}, 张娟^{1,2}, 王健^{1,2}, 赵继军^{1,2*}

(1. 河北工程大学 信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 河北省安防信息感知与处理重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要: 针对弹性光网络中现有碎片整理方法未能充分利用最大空闲频谱块且业务迁移数目较多的问题, 提出一种剩余持续时间触发的最大带宽业务精确迁移的碎片整理(BBSEM-DF)算法。首先, 构建碎片度量模型, 衡量链路中频谱碎片的分布状态; 然后, 根据碎片量和业务的剩余持续时间设置阈值, 触发碎片整理过程; 最后, 将最大连续业务组迁移至链路中与之所需频隙数相匹配的空闲频谱块处, 进行精确迁移。仿真结果表明: 与传统碎片整理算法相比, 该算法可以减少频谱碎片, 降低阻塞率, 提高网络性能。

关键词: 弹性光网络; 碎片整理; 持续时间; 业务迁移; 阻塞率

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2021)10-0051-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Service-oriented spectrum defragmentation algorithm with exact migration in elastic optical networks

SHANG Panpan^{1,2}, REN Danping^{1,2}, ZHANG Juan^{1,2}, WANG Jian^{1,2}, ZHAO Jijun^{1,2*}

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China; 2. Hebei Key Laboratory of Security and Protection Information Sensing and Processing, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing defragmentation methods in elastic optical networks can not make full use of the maximum free spectrum block and the number of service migrations is large, a defragmentation algorithm with maximum bandwidth service precise migration triggered by residual duration (BBSEM-DF) is proposed. Firstly, a fragment measurement model is constructed to measure the distribution of spectrum fragments in the link. Then, the threshold is set according to the amount of fragments and the remaining duration of business to trigger the defragmentation process. Finally, the maximum continuous service group is migrated to the free spectrum block in the link that matches the required number of frequency slots for accurate migration. The simulation results show that compared with the traditional defragmentation algorithm, this algorithm can reduce the spectrum fragments, reduce the blocking rate, and improve the network performance.

Key words: elastic optical networks; defragmentation; holding time; services migration; blocking rate

0 引言

弹性光网络(EONs)通过采用精细频谱粒度的组合能够实现可变带宽业务的承载, 打破了固定网格波分复用网络的技术局限性, 并凭借其特有的灵活性成

为未来光网络的主要组网方式^[1]。EONs 中的路由和频谱分配是为业务请求在给定的源-宿节点对之间找到合适的路径, 并尝试沿着该路径为其分配频谱资源的一种机制^[2]。然而, 即使在此过程中预先对频谱进行规划并做到高效利用, 经过一系列业务请求连接的动态建立和拆除操作后, 逐渐进入一种无序分布的状态, 出现一些不能用于即将到来业务请求的空闲频谱块, 即频谱碎片^[3]。频谱碎片的产生使可用频谱资源不再连续, 导致即将到来的业务请求难以接入网络, 严重劣化了网络性能^[4]。

针对此问题, 国内外众多研究工作者对频谱碎片整理方法进行了深入研究, 并将其分为两类: 主动式碎片整理和响应式碎片整理。主动式碎片整理指频谱

收稿日期: 2021-02-01。

基金项目: 河北省自然科学基金(F2019402240、F2018402198)资助。

作者简介: 商盼盼(1995—), 女, 硕士研究生, 现就读于河北工程大学信息与电气工程学院, 主要研究方向为下一代光网络与宽带接入, 主要从事弹性光网络中频谱碎片整理技术相关的研究与仿真验证, 参与了弹性光网络距离自适应调制频谱优化机制项目, 曾荣获研究生二等学业奖学金。

* 通信作者: 赵继军(1970—), 男, 教授, 研究方向为光通信与宽带网络。



状态达到固定阈值便周期性地定期进行频谱整理;响应式碎片整理指网络中业务请求受阻时对可用频谱资源的整合。然而,这两类碎片整理的迁移规则大多是采用首次命中方式^[5-7],虽然可以在一定程度上减少碎片,但限制了部分业务的迁移灵活性,且未考虑相邻业务间因剩余持续时间不同而产生的频谱碎片^[8]。文献[5]提出了持续时间感知的主动式碎片整理(Pro-HTA-DF)方案,将所有相同源-宿节点对间的业务根据剩余持续时间的长短依次排列,以减小因业务持续时间不同而产生的碎片,但该方法仅是将业务重新排序,并不能减少频谱资源的使用。文献[6]提出了最大带宽业务优先迁移的碎片整理(BBF-DF)算法,将剩余持续时间较长的业务按照首次命中的方式优先整理,不但未充分利用最大空闲频谱块,还会因其需要频繁地进行碎片整理,增加业务中断的概率,从而导致巨额成本的支出和网络性能的下降。因此,碎片整理方法在网络优化和业务中断之间存在权衡^[9]。

为合理利用频谱资源,本文提出一种剩余持续时间触发的最大带宽业务精确迁移的碎片整理(BB-SEM-DF)算法,减少需要迁移的业务数量,以达到减少碎片、降低网络阻塞率的目的。

1 EONs 模型与度量方法

本文提出的 BBSEM-DF 算法基本步骤是:首先,构建基于空闲频谱块位置的碎片度量模型,准确评估网络链路中的频谱资源占用情况;然后,考虑业务的剩余持续时间,设置碎片整理的触发阈值;最后,根据本文所提迁移规则尽量充分利用网络中的最大空闲频谱块,从而减少频谱碎片的产生。

1.1 网络模型

本文将 EONs 中的物理拓扑建模为一个有向辅助图 $G(V, E, S)$, 其中 V 代表物理拓扑中节点的集合, E 代表物理拓扑中光纤链路的集合, S 为每条光纤链路上提供的频隙数量集合, 并且每条链路上均具备有限数目的频谱资源。到达网络中的业务请求表示为 $R(s, d, b, t_n, t_h)$, s 为每个业务的源节点, d 为目的节点, b 为业务请求带宽, t_n 为业务进入网络的时间, t_h 表示业务的持续时间。

业务请求 R 所需频隙个数 f 的计算公式^[10]如式(1)所示。

$$f = \left\lceil \frac{b}{C_{\text{slot}} \times M} \right\rceil \quad (1)$$

其中, M 为业务请求 R 所需的调制等级, 本文采用二

进制移相键控(BPSK)调制格式, 即 $M=1$, 且频隙单元 C_{slot} 取值为 12.5 GHz。

业务请求 R 在时间 t 时的剩余持续时间 t_r 的计算公式如式(2)所示。

$$t_r = t_n + t_h - t \quad (2)$$

本文将矩阵 $[U_l^i]$ 反映为光纤链路上频隙的占用情况, 其中 $U_l^i=1$ 表示 l 链路上的第 i 个频隙被占用, 并将连续被占用的频隙数目记作 y , 存入集合 Y ; $U_l^i=0$ 表示该频隙未被占用, 并将连续未被占用的频隙数目记作 k , 存入集合 K ; 同时将 $\text{sum}(U_l^i)$ 记作 v_l , 则本文所提算法的优化目标是将网络中的碎片即 $\text{sum}(v_l)$, $l \in E$ 最小化, 记作 V , 其优化模型如式(3)所示。

$$\sum_{y \in Y} g_y^k(l) = 1, \forall k \in K \quad (3)$$

其中, $g_y^k(l)$ 为一个布尔变量, 若 l 链路上最大空闲频谱块被占用或将最小带宽业务最近迁移时, $g_y^k(l)$ 的值为 1, 否则为 0。

1.2 基于空闲频谱块位置的碎片度量方法

传统的外部碎片度量(EXTF)方法仅考虑光纤链路中占用频隙最多的空闲频谱块, 忽略了较小的频谱碎片, 其计算公式^[12]如式(4)所示。

$$\text{EXTF} = 1 - \frac{\text{BBN}}{\text{FSN}} \quad (4)$$

其中, BBN 和 FSN 分别是指链路中最大空闲频谱块所占用的频隙数量和每条链路中所有空闲频隙数量的总和。

由式(4)可以计算出每条链路的外部碎片度量值均为 0.67。对于具有相同空闲频隙和最大空闲频谱块数量的链路, 无法精确评估其频隙的占用情况。尤其在频隙资源较多的网络中, 这种差异性会更加明显。不同链路碎片状态图如图 1 所示。

本文算法对空闲频谱块占用的频隙数量及起始位置有严格要求, 因此提出了一种基于空闲频谱块位

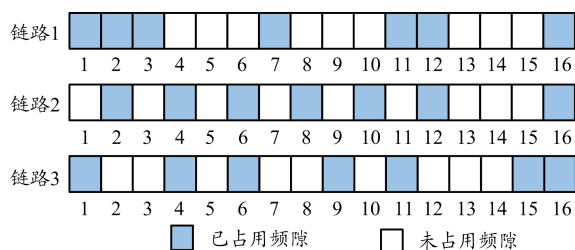


图 1 不同链路碎片状态图

置(ISBL)碎片度量方法,该方法可较为准确地评估链路中的碎片程度。其计算公式为:

$$ISBL = \left(\sum_{i \in S} \frac{IP_i}{IP_i + OC_i - 1} \times \frac{|NV_{\max} - NV_{\min}| + 1}{|V_{\max} - V_{\min}| + 1} \times \frac{NFB}{NV_{\min}} \right) / 100 \quad (5)$$

其中, OC_i 为链路上第*i*个空闲频谱块占用的频隙数量; IP_i 为第*i*个空闲频谱块所在的起始位置; $NV_{\max}$ 为最大空闲频谱块的个数; $NV_{\min}$ 为最小空闲频谱块的个数; $V_{\max}$ 为 OC_i 的最大值; $V_{\min}$ 为 OC_i 的最小值; NFB 为

链路中所有空闲频隙块的个数。 $\sum_{i \in S} \frac{IP_i}{IP_i + OC_i - 1}$ 为每个空闲频谱块所在位置始末索引的比例,是区分链路中不同空闲频谱块的重要因素; $\frac{|NV_{\max} - NV_{\min}| + 1}{|V_{\max} - V_{\min}| + 1} \times$

$\frac{NFB}{NV_{\min}}$ 则表示链路中频谱碎片的分布比例,是衡量链路中碎片占用状态的主要组成部分。

由式(5)可计算出图1中每条链路的碎片量值 $ISBL_j(j \in E)$ 分别为 $ISBL_1=2.3\%$ 、 $ISBL_2=16.0\%$ 、 $ISBL_3=7.3\%$,因此第一条链路拥有最少的碎片。与传统碎片度量方法相比,基于ISBL的碎片度量方法可精确地评估每条链路的碎片状态。考虑路径碎片会使网络中的碎片量由于重复或漏测链路碎片而不准确,从链路碎片角度出发的度量,则可以更加精确地计算网络中的碎片。本文在满足频谱限制性约束条件的同时,通过判断每条链路的碎片量是否达到碎片阈值以对网络中的业务进行不重复的碎片整理操作。

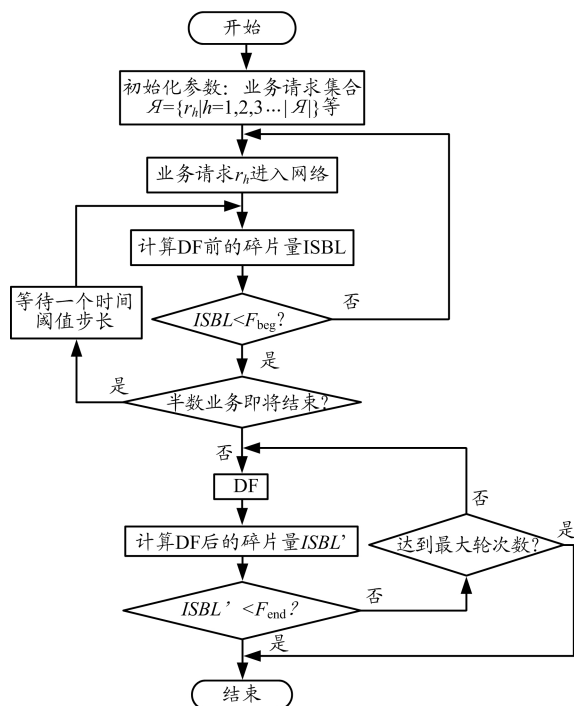
2 BBSEM-DF 算法

本文所提BBSEM-DF算法的流程图如图2所示。当业务的剩余持续时间大于碎片整理的时间阈值时,即剩余持续时间较短的业务,且业务的剩余持续时间不会受到路由和网络调度的影响。

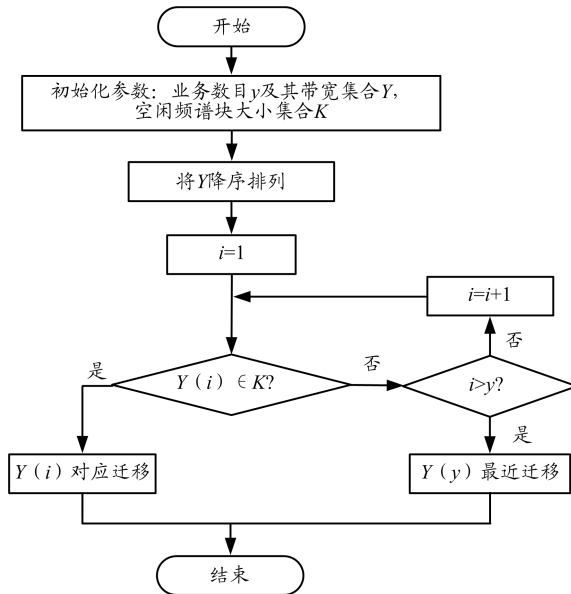
2.1 BBSEM-DF 算法触发条件

碎片整理触发机制中阈值的选取是优化网络性能的重要基础。若触发阈值太低、整理太频繁,会增加网络的负担;相反,则起不到优化网络性能的效果。

本文基于ISBL的碎片度量方法对碎片整理触发机制中碎片阈值的选取问题进行研究。当占用单个频隙的业务与单个频隙的空闲频谱块相间排列时,链路中碎片量最多,此时为网络性能最差情况。由基于ISBL的碎片度量方法计算得出此时的碎片度量值为 $|S|/200$,记作 ω ,其中 $|S|$ 为每条链路中的频隙数量。



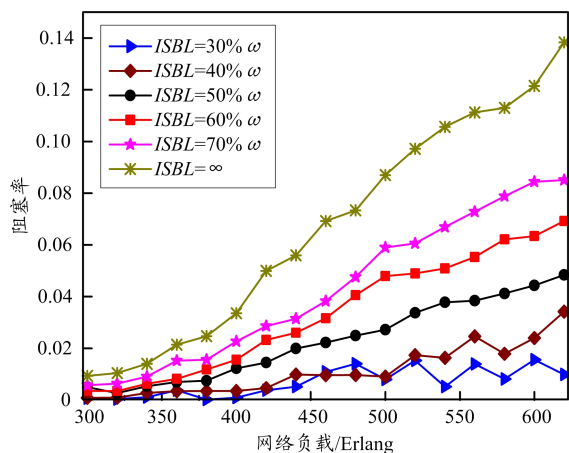
(a) 主程序



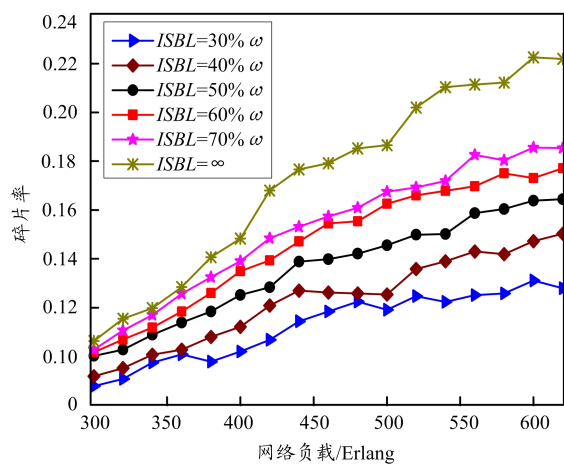
(b) 业务迁移子程序

图2 BBSEM-DF 算法流程图

本文选取网络性能最差情况时碎片量 ω 的百分比作为碎片阈值,而不同的碎片阈值均会影响网络性能,因此需综合评估不同的碎片阈值在NSFNET拓扑网络下对阻塞率、碎片率性能指标的影响,以确定碎片整理触发机制中的碎片阈值。本文所提算法在不同碎片阈值下的性能指标如图3所示。可以看出,网络中的碎片阈值较小时,如 $ISBL=30\%\omega$ 、 $ISBL=40\%\omega$,性能变化不稳定。这是由于组网陷入频繁的碎片整理,使



(a) 阻塞率



(b) 碎片率

图3 NSFNET 拓扑网络下碎片阈值对不同性能指标的影响

业务到达与离开网络频率变慢导致的;而随着碎片阈值的增加,进行碎片整理的次数逐渐变少,业务迁移的数量也逐渐减少,因此各项指标的增长速度逐渐趋于稳定。为此,通过综合评估不同碎片阈值对阻塞率、碎片率的影响,本文将碎片整理开始阈值 F_{beg} 取值为 $50\%\omega$ 。与碎片整理开始阈值实验相似,通过仿真实验得出在结束阈值 F_{end} 为 $50\%F_{\text{beg}}$ 时,各项指标有较好结果。

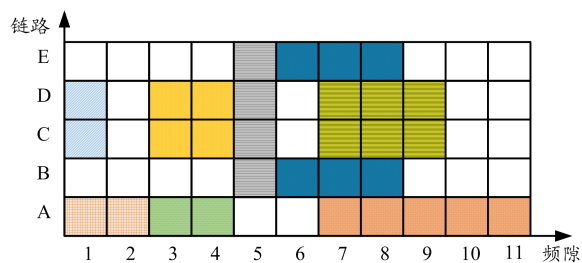
针对碎片整理触发机制中时间阈值的选取问题,文献[5]对所有连接请求的剩余持续时间与最长剩余持续时间之差求和,并与链路中连接数量作比值,将其定义为在时域中的碎片度量值,得到了较为理想的度量结果。文献[6]综合考虑业务在时域和频域中的分布状态,通过将时间阈值设置为业务剩余持续时间的平均值,较准确地反映了网络当前的运行状态。因此,为均衡时域和频域中的碎片问题,本文所提算法中的

时间阈值设置为业务剩余持续时间的均值。

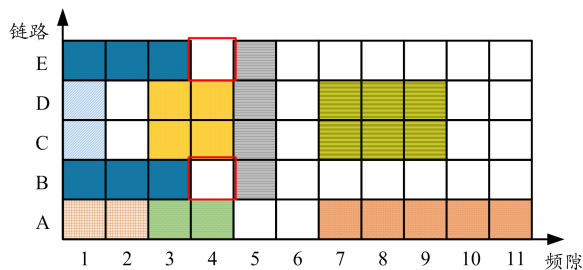
2.2 BBSEM-DF 算法迁移过程

为减少网络中的频谱碎片,在进行业务迁移操作时,可以根据不同的迁移规则进行整理,但得到的碎片整理效果也不尽相同。本文提出 BBSEM-DF 算法将以更加精确的方式利用较大空闲频谱块,减少频谱资源浪费。在业务迁移过程中,假设新到来的业务请求都会被阻塞,则进行 BBSEM-DF 算法迁移过程(见图 2(b))。

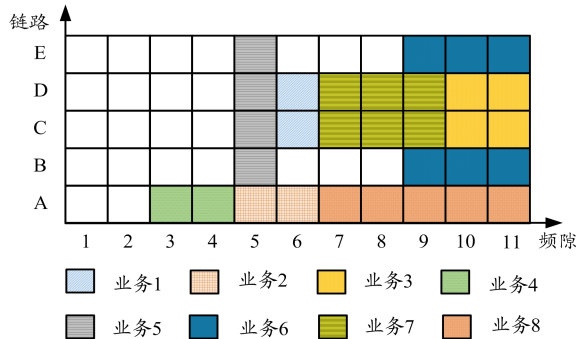
BBSEM-DF 算法与 BBF-DF 算法的碎片整理对比如图 4 所示。图 4(a)中,有 5 条链路,存在 8 个业务请求,且每个业务请求所需频隙个数在 $[1, 5]$ 间均匀分布。假设每条链路上有 11 个频隙,且当前链路上的频谱资源均为空闲频隙。该示例中的路由和频谱分配方法为最短路径算法和首次命中策略,且不考虑保护带宽。传统的 BBF-DF 算法首先选择链路中占用频隙



(a) 初始状态



(b) BBF-DF 算法



(c) BBSEM-DF 算法

图4 碎片整理对比图

数最多的业务,然后按照首次命中的方式对其进行迁移,如图4(b)所示。在整理后可知仅对业务6进行了频谱位置的迁移,并且间接地产生了2个不可用的频隙,即频谱碎片(图4(b)中的加粗红框)。因此,BBF-DF算法在频谱整理后,得到的资源优化效果并不明显。相反,BBSEM-DF算法在每一次碎片整理过程中,尽可能地利用最大空闲频谱块,仅选择与其所占频隙数相等的业务进行精确迁移,直至网络状态达到碎片整理结束条件,如图4(c)所示。可以看出,BBSEM-DF算法可将多个业务进行迁移,从而为即将到来的业务请求留出更多的空闲频谱资源。因此,相比于传统的BBF-DF算法,BBSEM-DF算法不仅能降低阻塞率、碎片率,而且能实现全网性能的提升。

BBSEM-DF算法的时间复杂度主要包括三部分:路径路由、频谱分配和频谱碎片整理。通过采用Dijkstra算法寻找 K 最短路径算法的时间复杂度为 $O(K \times |E| \times |V|^2)$,其中 $|E|$ 和 $|V|$ 分别是网络中链路和节点数量的集合。采用首次命中策略的时间复杂度为 $O(L \times |S| \times Z)$, L 是任意节点间最长固定路由的长度, Z 为网络中业务请求的总个数。而最大带宽业务精确迁移的频谱碎片整理算法的时间复杂度为 $O(|E| \times Z)$ 。因此,BBSEM-DF算法的时间复杂度为 $O(K \times |E| \times |V|^2 + L \times |S| \times Z + |E| \times Z)$ 。

3 仿真性能与分析

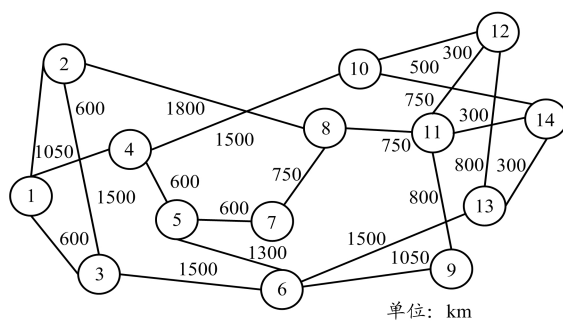
3.1 仿真环境

本文通过模拟具有14个节点、21条链路的NSFNET和24个节点、43条链路的USNET网络拓扑图对BBSEM-DF算法进行仿真验证。仿真拓扑图如图5所示,在仿真过程中,假设EONs部署在C波段,每条光纤链路上的可分配带宽为4.475 THz,每个频隙带宽为12.5 GHz,因此每条光纤链路上能够承载358个可用频隙^[10]。业务请求的到达服从参数为 λ 的泊松分布,持续时间服从参数为 μ 的负指数分布,即全网的总负载为 λ/μ 。

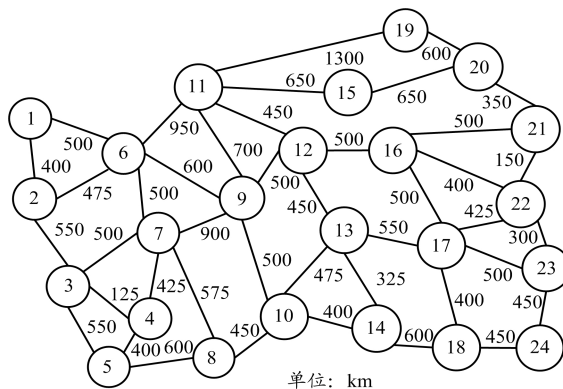
3.2 仿真结果分析

为验证BBSEM-DF算法的性能,本文采用数值仿真对该算法与传统FF+Dijkstra算法、Pro-HTA-DF算法和BBF-DF算法在阻塞率、碎片率和平均业务受损率等性能指标方面进行对比分析。

在NSFNET和USNET网络拓扑下,4种算法的阻塞率性能对比如图6所示。可以看出,4种算法的阻塞率都随着网络负载的增加而增加。这是由于随着业务



(a) NSFNET

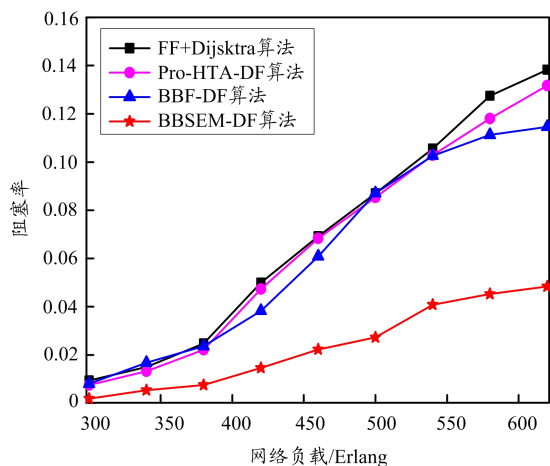


(b) USNET

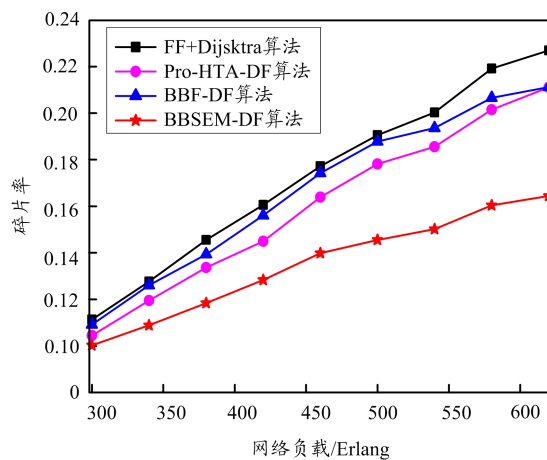
图5 仿真拓扑图

量增加,业务请求连接不断进行建、拆操作,使网络中频谱碎片不断增加,从而对网络阻塞性能的影响越来越大。此外,NSFNET中4种算法的阻塞率均比USNET略高。这是因为USNET中的节点数和光纤链路数明显多于NSFNET中的相关数量,从而使得USNET中有更多频谱资源为业务请求进行分配。在相同仿真条件下,BBSEM-DF算法的阻塞率总是低于其它3种算法。这是因为BBSEM-DF算法在进行碎片整理时,仅整理剩余持续时间较长的业务,其次会将链路中占用频隙最多的业务组进行精确迁移,由此得到更多连续频谱资源,使网络成功接收更多的业务请求,因而BBSEM-DF算法具有较低的阻塞率。不论是哪种算法,其实质都是以不同方式重构网络频谱碎片,降低阻塞率。

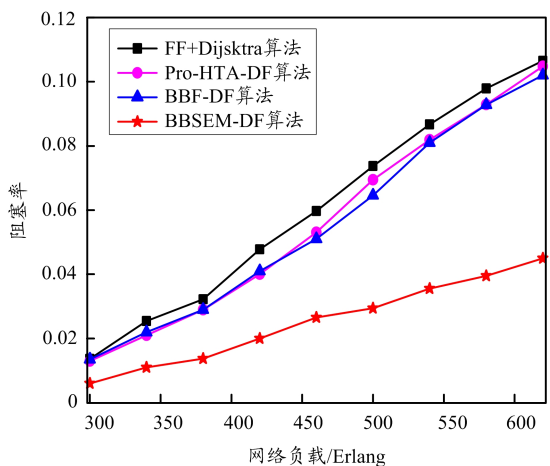
4种算法的碎片率对比如图7所示。可以看出,Pro-HTA-DF算法、BBF-DF算法和BBSEM-DF算法的碎片率均低于FF+Dijkstra算法,且BBSEM-DF算法具有较低的碎片率,这是因为该算法总是在剩余持续时间较短的业务自行离开网络后才判断是否进行碎片整理。此外,该算法在碎片整理时会尽量将所需频隙最多的业务精确迁移至与之相匹配的空闲频谱



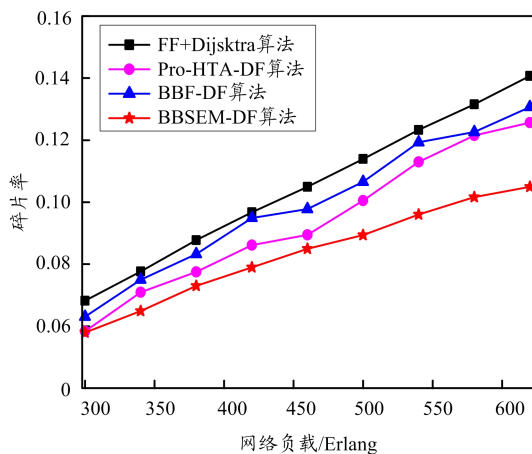
(a) NSFNET



(a) NSFNET



(b) USNET



(b) USNET

图6 不同算法阻塞率性能对比

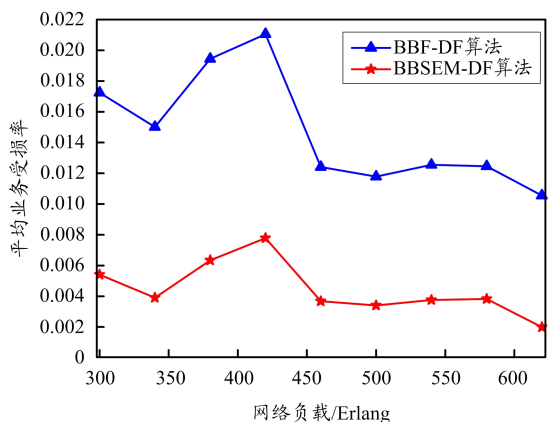
图7 不同算法碎片率性能对比

块处,从而为即将到来的业务请求预留出更多的频谱资源。Pro-HTA-DF算法仅是对具有相同源-宿节点的业务按照剩余持续时间降序整理,不同路由路径的业务仍然会产生较多碎片;而BBF-DF算法总是忽略剩余持续时间较短的业务,这样会使其在碎片整理结束后,产生新的空闲频谱块,并且低索引位置优先的迁移规则,又会在业务迁移后间接地产生小的不可用频隙,从而导致网络中碎片量的增加。此外,这4种算法在USNET拓扑中的碎片率都比在NSFNET拓扑中的稍低。这是因为NSFNET中的光纤链路数量少于USNET中的链路数量,因此在相同的网络负载下,每条光纤链路在进行碎片整理后为业务请求成功分配的频谱资源会更少。

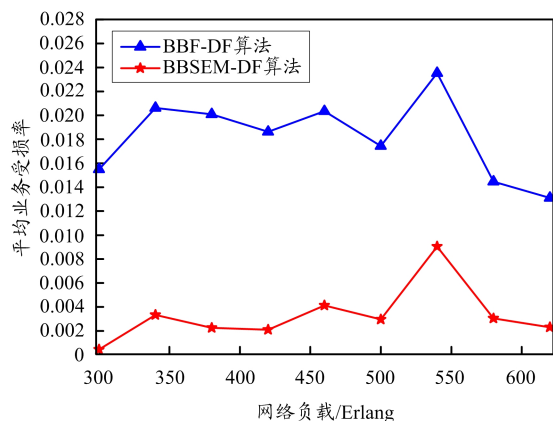
平均业务受损率是指DF过程中业务迁移个数与总业务数量比率的均值。由于FF+Dijkstra算法不存在

业务迁移,而Pro-HTA-DF算法属于无中断碎片整理方法,因此本文仅对BBSEM-DF算法和BBF-DF算法进行比较,如图8所示。在NSFNET和USNET网络拓扑下,2种算法的平均业务受损率均呈现先升高后降低的趋势。这是由于在网络负载量较少时,可进行迁移的连接请求数量较多,平均业务受损率也较高;随着网络负载的增加,可用频谱资源逐渐减少,同时新的频谱碎片又不断生成,因此可迁移业务请求的数量逐渐变少,平均业务受损率也逐渐降低。NSFNET拓扑下的网络负载在380~420 Erlang时,平均业务受损率会达到峰值,此时可用频谱资源逐渐饱和,部分业务因阻塞而无法进入网络。USNET拓扑下的网络负载在520~560 Erlang时,平均业务受损率才达到峰值,这是由于USNET网络相较于NSFNET具有更多的节点数和光纤链路数,从而使得USNET中有更多频谱资源

为业务请求进行分配。此外,BBF-DF算法的平均业务受损率明显高于BBSEM-DF算法,这是因为BBF-DF算法采用固定阈值周期性地地进行碎片整理,且会移动网络中所有符合迁移规则的连接请求,而采用固定阈值与动态阈值相结合的BBSEM-DF算法在精确迁移条件下,仅需移动部分连接请求。因此,本文所提BBSEM-DF算法具有更低的平均业务受损率。



(a) NSFNET



(b) USNET

图8 不同算法平均业务受损率性能对比

4 结束语

本文针对EONs中的空闲频谱资源应用不充分、业务迁移数量较多等问题,首先根据链路中空闲频谱块位置,构建碎片度量模型,然后提出一种剩余持续

时间触发的最大带宽业务精确迁移的碎片整理BBSEM-DF算法。该算法依据碎片度量值,设置频域触发阈值,然后根据业务的剩余持续时间,设置时域触发阈值,减少业务迁移的个数;此外,通过将链路中占用频隙数最多的连续业务组进行精确迁移,充分利用了网络中的空闲频谱资源。仿真结果表明:本文提出的BBSEM-DF算法在阻塞率、碎片率以及平均业务受损率性能方面均有显著提升。

参考文献:

- [1] UJJWAL Y, THANGARAJ J. Review and analysis of elastic optical network and sliceable bandwidth variable transponder architecture [J]. Optical Engineering, 2018, 57(11): 110802-1-110802-18.
- [2] CHATTERJEE B C, BA S, OKI E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 20(1): 183-210.
- [3] ALYATAMA A. Relative cost routing and spectrum allocation in elastic optical networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(3): 38-49.
- [4] ZHAO J, BAO B, YANG H, et al. Holding-time-and impairment-aware shared spectrum allocation in mixed-line-rate elastic optical networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11 (6): 322-332.
- [5] SINGH S K, JUKAN A. Efficient spectrum defragmentation with holding-time awareness in elastic optical networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(3): B78-B89.
- [6] COMELLAS J, VICARIO L, JUNYENT G. Proactive defragmentation in elastic optical networks under dynamic load conditions[J]. Photonic Network Communications, 2018, 36(1): 26-34.
- [7] PENG Y, WANG J, TAN A, et al. A novel resource allocation and spectrum defragmentation mechanism for IoT-based big data in smart cities[J]. Sensors, 2019, 19(15): 3443-1-3443-15.
- [8] 刘焕淋,胡浩,熊翠连,等. 基于时频联合碎片感知的资源均衡虚拟光网络映射算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(10): 2345-2351.
- [9] BEHERA S, DAS G. Dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with minimal disruption[C]//2020 National Conference on Communications(NCC). IEEE, February 21-23, 2020, Kharagpur, India. Kharagpur: IEEE, 2020: 1-5.
- [10] GUO H, ZHANG J, ZHAO Y, et al. Delay aware RSA algorithm based on scheduling of differentiated services with dynamic virtual topology construction[J]. IEEE Access, 2020(8): 44559-44575.