

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.220069.

光通信系统与网络技术

郭学让, 蒋一可, 李亚平, 等. 持续性灾害下风险感知的光网络业务恢复算法[J]. 光通信研究, 2024(2):220069.

Guo X R, Jiang Y K, Li Y P, et al. Risk-aware Optical Network Service Restoration Algorithm under Persistent Disasters [J]. Study on Optical Communications, 2024(2):220069.

持续性灾害下风险感知的光网络业务恢复算法

郭学让^{1a}, 蒋一可², 李亚平^{1b}, 张 强^{1a}, 连 盟², 赵永利²

(1. 国网新疆电力有限公司 a. 电力科学研究院; b. 电力调度控制中心, 乌鲁木齐 830000;

2. 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要:【目的】地震等自然灾害具有持续性和大范围的特性。灾害在发生过程中会持续性损伤光网络的链路资源, 造成其链路风险不断变化。面对持续变化的链路风险, 业务恢复规划不当可能导致恢复业务再次发生故障。从业务角度来看, 重复故障将导致数据传输的多次中断, 且随着灾害发生, 后续的链路状态损伤加剧可能导致无法恢复此业务。从网络管控方面来看, 重复恢复会造成算路资源浪费, 占用其他业务的恢复资源。同时, 由于业务传输的数据重要性不同, 不同业务对传输可靠性的需求存在差异, 在发生故障时, 高重要度业务应优先恢复。因此, 在大规模持续性灾害场景下, 综合考虑灾害对链路风险的持续性影响以及不同业务对路径可靠性需求的差异性进行业务恢复是一个值得研究的问题。文章针对此问题提出了一种持续性灾害下基于链路风险感知的业务恢复算法——动态链路风险重路由算法(DLRRA)。【方法】首先, 针对业务重要度和链路风险, 文章建立了业务重要度与链路风险评估模型, 并在此基础上提出了优化目标路由可靠度。DLRRA 结合优化目标充分考虑了灾害对链路持续性影响造成的链路风险度变化, 通过优先为高重要度的故障业务分配低风险的恢复资源, 避免了在灾害持续发生过程中同一高重要度业务发生 2 次故障的风险。【结果】仿真结果表明, DLRRA 恢复的首次业务较传统算法的 2 次故障概率降低了 11%, 且在高负载下的平均重要度提高了 10%。【结论】因此, 该算法有效避免了持续性故障造成的业务多次中断带来的损失, 保证了重要业务在灾害环境中的持续稳定运行。

关键词: 光网络; 光纤损伤; 链路风险; 故障恢复算法

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

Risk-aware Optical Network Service Restoration Algorithm under Persistent Disasters

GUO Xuerang^{1a}, JIANG Yike², LI Yaping^{1b}, ZHANG Qiang^{1a}, LIAN Meng², ZHAO Yongli²

(1. a. Electric Power Research Institute; b. Dispatching and Control Center of Electric Power Co., Ltd.,

State Grid Xinjiang Electric Co., Ltd., Wulumuqi 830000, China; 2. State Key Laboratory of Information Photonics

and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract:【Objective】Natural disasters such as earthquakes have the characteristics of persistence and wide range. During the occurrence of disasters, the link resources of the optical network will be continuously damaged, resulting in the constant change of the link risk. In the face of constantly changing link risks, improper service recovery planning may cause service failures. From a service perspective, repeated faults will interrupt data transmission many times, and the subsequent link status damage may be aggravated after a disaster occurs. From the perspective of network management and control, repeated recovery wastes route calculation resources and occupies the recovery resources of other services. At the same time, different services have different requirements for transmission reliability because of the importance of the data to be transmitted. When a fault occurs, the high-importance services should be recovered first. Therefore, in the scenario of a large-scale persistent disaster, it is a problem worth studying to comprehensively consider the sustained impact of the disaster on link risk and the difference in path reliability requirements of different services for service recovery. To solve this problem, this paper proposes a link risk-aware service recovery algorithm-Dynamic Link Risk Reroute Algorithm (DLRRA) under persistent disasters.【Methods】Firstly, according to the service importance and link risk, we establish the service importance evaluation model and link risk evaluation model. Then we propose the optimization target route reliability. The DLRRA, combined with the optimization objective, fully considers the change of link risk degree caused by the impact of disasters on the continuity of links. By preferentially allocating low-risk recovery resources to the fault services of high importance, the risk of secondary failure of the same high-importance services is avoided during the continuous occurrence of disasters.【Results】The simulation results show that the second failure probability of DLRRA recovery is reduced by 11% compared with the traditional algorithm, and the average importance of DLRRA recovery under the high load is increased by 10%.【Conclusion】Therefore, the algorithm effectively avoids the loss caused by multiple service interruptions caused, and ensures the continuous and stable operation of important services in the disaster environment.

收稿日期: 2023-01-10;

修回日期: 2023-01-22;

纸质出版日期: 2024-04-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1805602); 国家自然科学基金资助项目(6201005)

作者简介: 郭学让(1990—), 男, 山西运城人。工程师, 硕士, 主要研究方向为通信技术。

通信作者: 郭学让, 工程师。gxrgxr820@163.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Key words: optical networks; optical fiber damage; link risk; fault recovery algorithm

0 引言

光纤由于自身特性极易受到挤压、形变和温度等因素的影响导致损伤和风险性增加^[1],当这种损伤累积达到损坏临界值时,业务就会中断^[2]。

规模性灾难(地震、雪灾和火灾等)^[3]对传输网的影响具有大范围和持续性的特点^[4]。例如,地震发生 1 h 内数次余震会多次损伤光纤,产生随时间变化的链路损伤。灾害对链路损伤越大,链路的的中断风险也就越高^[5]。面对变化的链路风险,业务恢复规划不当可能导致业务重复性故障,需重复恢复。重复故障将导致数据传输的多次中断,且随着灾害发生,后续的链路状态损伤加剧可能无法恢复此业务。同时,重复恢复会造成算路资源的浪费,占用其他业务的恢复资源。因此业务故障恢复需要考虑链路风险的变化特点^[6]。其次,由于业务承载的数据不同,业务本身对链路的风险性要求存在差异性。传输网需要尽可能地保障高重要度业务在低风险路径中恢复,防止后续灾难再次中断已恢复业务。

故此,本文针对寒灾和地震等自然灾害的持续性特点,对链路持续损伤所导致的恢复后业务再次故障的问题,联合考虑了链路的风险度和业务重要度,提出了一种持续性灾害下基于链路风险感知的业务恢复算法——动态链路风险重路由算法(Dynamic Link Risk Reroute Algorithm,DLRRA),以降低灾害发生过程中业务重复故障带来的损失,保证业务的稳定传输。

1 相关工作

目前,针对通信节点之间的链路故障恢复有多种方式。出于对紧急需求响应业务时延和链路共享风险的双重考虑,祁兵等人^[7]提出了一种基于业务优先级和共享风险链路组的需求响应调度优化算法,通过考虑通信网的共享风险链路组,对不同优先级业务调度路径的选择进行优化,实现了所选路径的高可靠性;Nelakuditi 等人^[8]提出了一种基于链路故障的快速重路由算法,该算法利用故障点处的局部有效信息,使业务快速绕过故障链路,有效提高了业务传输效率;Elhourani 等人^[9]提出了一种多链路损伤多链路恢复的路由重构算法,该算法在业务路径中断时,在链路可恢复状态下,重新恢复业务路径。以上恢复算法仅考虑了业务的快速恢复与静态

的链路风险模型,并未考虑持续性故障造成链路风险变化的问题。针对以上问题,本文面向大规模持续性灾害场景,综合考虑了灾害对链路风险的持续性影响以及不同业务对路径可靠性需求的差异性,在灾害发生后,DLRRA 可以为高重要度业务提供低风险的恢复资源。在资源不足的情况下,高重要度业务可以抢占低重要度业务的传输资源。

2 问题描述

本节针对持续性灾害造成的链路风险变化和差异化业务需求分别建立了链路风险和业务重要度模型,并基于这两种模型提出了持续性灾害下业务可靠恢复问题的优化目标。

2.1 链路风险模型

灾害将导致大规模的光纤故障,当光纤故障程度达到一定阈值时会造成业务中断。链路损伤会导致链路故障的风险增加,链路故障会导致其所承载业务的中断。随着灾害的持续进行,链路损伤状态会发生改变。

针对上述链路特性,我们将链路受损状态分为 5 级,其中,0 级表明链路无损伤,光纤完好;1 级表示轻微损伤,为一些表皮受损和受到轻微应力的光纤;2 级表示链路严重损伤,为一些已经发生弯折的光纤;3 级表示链路损伤十分严重,为一些弯折过大的光纤;4 级表明链路光纤已经断纤,无法承载业务。根据链路状态 i 转移到 j 的概率 $P_{i \rightarrow j}$ 建立链路风险模型。由于链路中断是链路持续性损伤最终导致的结果,损伤程度越低,则链路直接中断的可能性越小,例如,无损链路直接中断概率 $P_{0 \rightarrow 4}$ 相较于损伤严重的链路中断概率 $P_{3 \rightarrow 4}$ 更低。同时,链路跨级损伤的概率较低,即 $P_{i \rightarrow i+1} > P_{i \rightarrow i+2}$ 。表 1 所示为详细的链路风险模型。

表 1 链路风险变化模型

Table 1 Link risk change model

i	链路损伤程度	损伤变化概率 P
0	链路无损伤	$P_{0 \rightarrow j}$
1	链路轻微损伤	$P_{1 \rightarrow j}$
2	链路严重损伤	$P_{2 \rightarrow j}$
3	链路损伤十分严重	$P_{3 \rightarrow j}$
4	链路中断	1

表中, $P_{i \rightarrow j}$ 表示链路状态 i 在下一次灾害后变为状态 j 的概率。当 $i=0$ 时,链路无损伤;当 $i=4$ 时,链路中断;当 $i=0 \sim 3$ 时,链路损伤程度处于无

损伤和链路中断的中间态。链路风险模型能够适配链路损伤程度,很好地评估链路风险值。在灾害发生后,不同程度的灾害对光纤的损伤影响是不同的。严重的灾害会导致较高的链路状态转移概率 $P_{i \rightarrow j}$,且造成的故障光纤数量更多。

2.2 业务重要度模型

在网络中,由于不同种类业务传输的数据重要性不同,其中断导致的负面影响也不同。本节针对业务重要性的不同,设置了4种业务恢复重要度级别 m ,如表2所示, m 值越大,业务越重要。根据业务重要度模型,在发生故障时,高重要度业务需要优先恢复,保证有限资源下业务恢复效益最大化。

表2 业务重要度模型

Table 2 Service importance model

m	含义
1	业务比较重要
2	业务非常重要
3	业务强烈重要
4	业务极端重要

2.3 优化目标

本节结合灾难的持续性和大范围特性,考虑了灾难对光网络链路持续性损伤直至光纤中断对业务的影响。在持续性灾害过程中,链路损伤状态随灾害的进行而变化,导致了业务在恢复后也会面临灾害的持续性影响。例如1条业务由于链路故障导致中断,在对这条业务进行重路由恢复后,由于灾害还在持续性发生,这条业务依然有再次中断的可能。本文在故障业务重路由恢复阶段便考虑了链路风险可变性造成的业务重复故障影响。

业务的恢复需要保证可靠度,因此本文设计算法时结合考虑上述业务重要度模型和链路风险模型,提出了优化目标路由可靠度(Reliability of Routing, RR):

$$\text{MAX}; RR_r = \prod_{x=0}^l (1 - P_{i \rightarrow 4}^x) \cdot m_r, \quad (1)$$

式中: RR_r 为业务 r 在灾难发生时的可靠度; l 为业务 r 下的链路数; $P_{i \rightarrow 4}^x$ 为链路 x 的损伤程度状态 i 到链路中断的概率; m_r 为业务 r 的重要度。在选择故障业务恢复路径时,本文尽可能使业务的可靠度 RR_r 最高,从而保证重要业务2次中断概率最低。

3 DLRRRA

DLRRRA 的主要目标是降低业务在不间断灾害过程中多次中断的概率。在灾害发生后,DLRRRA

根据链路风险模型对整网链路进行评估,确定各条链路的损伤值,并将灾害发生所在区域的光网络节点信息与链路风险信息收集到 $G(V, E_i)$ 中,其中, V 为光节点集合; E_i 为链路集合,满足第2节中提出的链路损伤模型。输入的参数 k 为使用 K 条最短路径(K-Shortest Path, KSP)算法的路由数; λ 为单位时间内业务发生的平均数; $Num_Service$ 为业务总数; 输出参数 $Service_reroute$ 为业务重路由路径。

DLRRRA 的伪代码如下:

输入: $G(V, E_i), k, \lambda, Num_Service, Service = \{links, src, dst, bandwidth, TTL, importance\}$

输出: $Service_reroute$

初始化: $G(V, E_i), k = 5, \lambda, Num_Service,$

$Service$

业务故障:

1 while (地震发生) do:

2 检测链路状态,更新链路状态

3 if 业务在中断链路上 do:

4 业务中断

5 if end

6 while end

业务恢复:

7 for 业务 in $Service_block$ do:

8 使用 KSP 算法寻找 k 条路径

$links_new[k]$

9 计算 $RR[k]$

10 while $links_new[k]$ 资源足够 do:

11 if $RR[k]$ 最大时资源足够 do:

12 $Service\{links_new,$

$new_TTL\} \rightarrow Service_reroute$

13 else: $i += 1$

14 if $i = k$ do:

15 $block += 1$

16 if end

17 if end

18 while end

19 for end

20 输出 $Service_reroute$

$Service_block$ 为待恢复的业务集; $links_new[k]$ 为第 k 条路径下更新的路由链路; $RR[k]$ 为 k 条最短路径的 RR; $block$ 为无法恢复的业务数; $Service = \{links, src, dst, bandwidth, TTL, importance\}$ 为业务,其中, $links$ 为业务的路由信息, $src, dst \in V$ 为业务的源宿节点位置, TTL

和 *bandwidth* 分别为业务的持续时间和所需带宽, *importance* 为业务重要度, 由 2.2 节所提的业务重要度模型决定。业务中断时, 被占用的链路资源将被释放, 同时, 业务的服务时间 *TTL* 将停止更新。

由伪代码可知, 在大规模故障发生时, 链路中断会导致多条业务发生中断。DLRRA 根据业务路由信息, 收集中断的业务信息构建待恢复业务集 $Service_block = \{links, src, dst, bandwidth, C_{rrent_TTL}, importance\}$ (第 1 ~ 6 行), 其中, C_{rrent_TTL} 为中断业务剩余持续时间。DLRRA 首先对故障业务重要性进行预处理, 在资源有限的情况下, 优先保证高重要度业务的恢复。其次, DLRRA 基于 KSP 算法寻找 k 条最短路径 (第 8 行)。在 KSP 算法后, 根据 k 条备选恢复路径, 遍历路径中每一条链路上是否有足够的资源来满足恢复业务的带宽, 并计算业务使用该恢复路径时的 RR。在资源分配过程中, 需要满足频谱一致性、频谱连续性和频谱不重叠性的约束条件, 且单链路的资源不能超过总体可分配的频隙, 在满足资源的路径中优先保证 RR 最大。若没有可用的频谱资源, 则业务恢复失败 (第 9 ~ 18 行)。DLRRA 时间复杂度为 $O(n^2)$, 与传统算法时间复杂度相同, 其中传统算法为基于 KSP 算法的最短重路由恢复算法。

4 仿真设置

图 1 所示为实验拓扑图, 其中包含 28 个光交换节点和 45 条光纤链路 (图中每一条链路表示一对双向光纤)。每条链路长度为 80 km, 频谱带宽为 1 250 Gbit/s, 频隙总数为 100, 一个频隙可提供 12.5 Gbit/s 带宽。拓扑中的链路符合链路风险模

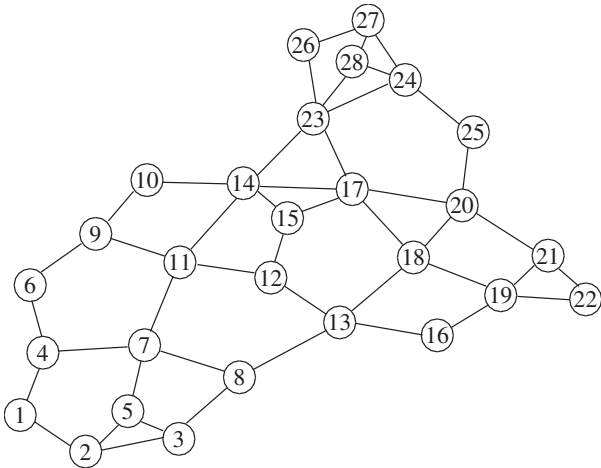


图 1 仿真拓扑图

Figure 1 The topology of the simulation

型, 随着灾害的持续发生, 链路状态会发生改变, 高损伤光纤相比于低损伤光纤更易中断。

调制格式随传输距离变化的关系如表 3 所示。同时, 每个业务的重要度根据均匀分布随机生成, 范围为 1~4, 重要度越大, 则业务越重要。业务模型服从泊松分布:

$$P(\alpha) = \frac{\lambda^\alpha}{\alpha!} e^{-\lambda}, \quad \alpha = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

式中: $P(\alpha)$ 为发生 α 次事件的概率; α 为业务实际发生的次数。其中, 业务带宽在 25~100 Gbit/s 之间随机产生, 服从均匀分布。KSP 算法中计算备选路径数量为 $k = 5$ 。

表 3 调制格式随传输距离变化的关系

Table 3 The modulation format varies with the transmission distance

传输距离/km	调制格式
<625	16QAM
625~1 250	8QAM
1 250~2 500	BPSK
>2 500	ASK

注: QAM 为正交幅度调制; BPSK 为二进制相移键控; ASK 为幅移键控。

5 仿真结果

本文基于上述仿真设计, 对 DLRRA 从 4 个方面展开仿真分析。两种对比算法分别为基于 KSP 算法的传统重路由算法 (简称 KSP 算法) 和考虑业务重要度的恢复算法 (Recovery algorithm based on KSP and Service Importance, KSP_SerImp)。其中 KSP 算法不考虑业务的重要性, 在业务故障的恢复过程中, 优先考虑最短路由。KSP_SerImp 考虑了业务重要度的影响, 在多个业务同时故障时, 优先恢复高重要度业务。

5.1 业务 2 次故障率

本节比较了 KSP 算法、KSP_SerImp 和 DLRRA 3 种算法的业务 2 次故障概率, 其中, 业务 2 次故障概率计算表达式为

$$2 \text{ 次故障概率} = \frac{\text{业务 2 次故障数}}{\text{故障业务恢复数}}. \quad (3)$$

图 2 所示为 3 种算法的比较结果, 显示了业务 2 次故障率随单位时间内业务数增加的变化关系, 其中负载为单位时间内业务随机产生的数量。

由图可知, DLRRA 相较于 KSP 算法的业务 2 次中断率平均下降了 11%, 而 KSP 算法和 KSP_SerImp 两者相接近。这是由于 DLRRA 考虑了链

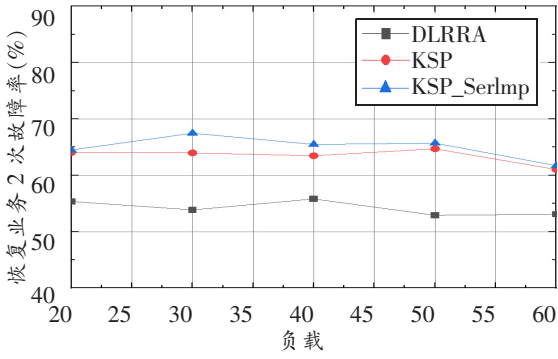


图2 业务2次故障率随负载变化的情况

Figure 2 The secondary failure rate varies with the load

路风险的动态性,在恢复过程中尽可能地将高重要度业务路由在高可靠资源上,而 KSP 算法和 KSP_SerImp 两种算法在选择恢复路径时仅考虑最短的可用路径,并没有考虑恢复路径的损伤程度。因此,DLRRR 相较于 KSP 算法和 KSP_SerImp 来说,业务恢复后的可靠性能得到很好保证。

5.2 业务初次恢复率

在持续性灾害中,业务初次中断后的恢复效果是反映业务路由算法性能优劣的一项重要指标,图3所示为 KSP 算法、KSP_SerImp 和 DLRRR 3 种算法的初次恢复率比较结果。

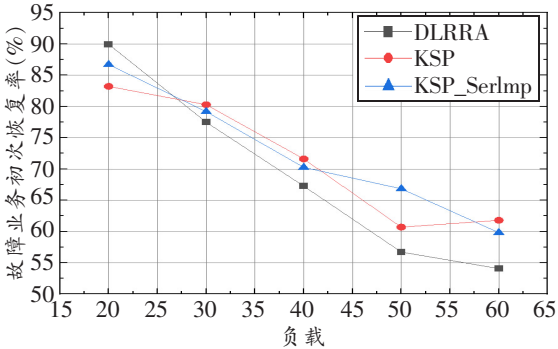


图3 业务初次恢复率随负载变化的情况

Figure 3 The initial service recovery rate varies with the load

由图可知,3 种算法的初次恢复率随负载的增加都呈下降趋势。DLRRR 在低负载时与两种 KSP 算法是相似的,甚至略高,而在高负载情况下低于两种 Baseline 算法。这是由于 DLRRR 恢复业务的策

$$\text{业务平均资源使用} = \frac{\sum_{i=1}^n (i \text{ 条业务占用的链路数} \times i \text{ 条业务的带宽})}{n} \quad (5)$$

由图可知,相较于两种对比算法,DLRRR 中业务会占用更多资源。这是由于两种 Baseline 算法的

略不是以最短路由为目标,这将导致业务恢复需要更多的链路资源,故在高负载情况下,造成恢复率低于两种对比算法。但在低负载情况下,DLRRR 可以在保证初次恢复效果与传统算法相当的同时避免业务重复故障。因此,DLRRR 更适用于低负载情况。

5.3 恢复业务平均重要度

图4所示为在不同负载下恢复业务的平均重要度,反映了恢复业务重要度情况,是评估恢复算法的重要指标,其计算方式为

$$\text{恢复业务平均重要度} = \frac{\sum_{i=1}^n i \text{ 条业务的重要度}}{n} \quad (4)$$

式中: n 为恢复业务的总数。

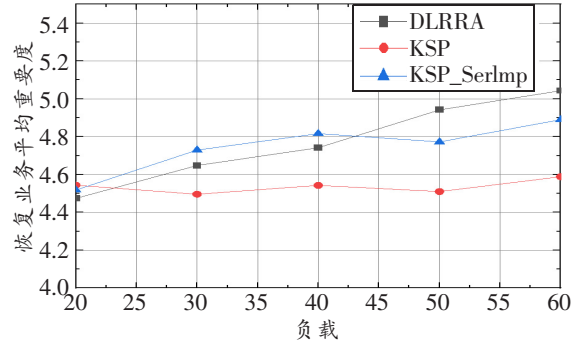


图4 恢复业务平均重要度随负载变化的情况

Figure 4 Restores the average importance of services with load

与 KSP 算法相比,本文所提 DLRRR 保障了高重要度业务的恢复,根据实验结果,在高负载情况下,DLRRR 恢复业务的平均重要度较传统重路由算法提高了 10%。KSP_SerImp 与 DLRRR 更倾向于恢复高重要度业务,恢复资源不足时,放弃部分低重要度业务,故可以看出随着负载增加,恢复业务平均重要度增加。而 KSP 算法并未考虑业务重要度的影响,恢复业务平均重要度在较低水平,高重要度业务无法得到有效恢复。

5.4 业务平均资源使用

图5所示为业务平均频谱资源使用情况,可由以下表达式计算:

路由选择上都采取了最短路由策略,使用链路资源最少,而 DLRRR 由于选择链路风险最低的路由会

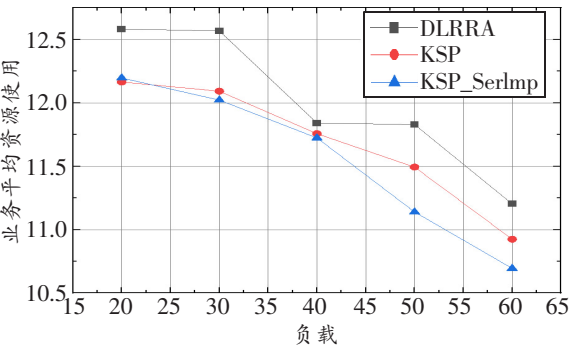


图 5 业务平均资源使用情况随负载变化的关系

Figure 5 Average service resource usage with load

多消耗一部分的链路资源,导致资源占用略高。随着负载的增加,恢复业务的业务平均资源使用呈下降趋势。这是因为随着负载的增加导致了链路资源不足,路由跳数越大的业务受到链路资源不足的影响越大,其中断概率越高。所以在高负载情况下,部分资源占用多的业务会无法恢复,故恢复业务的平均资源使用会有所下降。

6 结束语

本文针对寒灾和地震等持续性自然灾害中如何对故障业务进行可靠恢复这一问题,提出了一种持续性灾害下基于传输风险的业务恢复算法,避免持续性故障造成的业务多次中断,保证了重要业务在灾害环境中的持续稳定运行。仿真结果表明,本文所提算法相较于传统 KSP 算法,业务 2 次中断率下降 11%,同时,高负载下恢复业务的平均重要度提高了 10%,保证了业务的稳定运行。

参考文献:

[1] 赵继军,王丽荣,王苏建. 损伤感知的光网络连接指配的关键问题研究[J]. 光通信研究,2009(4):14-17.
Zhao J J, Wang L R, Wang S J. Study on Key Issues of Impairment-aware-based Optical Network Connection Provisioning[J]. Study on Optical Communications,2009(4):14-17.

[2] 高杨,赵兴海,赵翔,等. 石英光纤的传能效率、损伤阈值和损伤积累效应研究[J]. 探测与控制学报,2009,31(1):1-4.

Gao Y, Zhao X H, Zhao X, et al. A Study on Power-delivery Efficiency Laser, Laser-induced Damage Threshold and Damage Accumulation Effect of Silica Fiber[J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(1):1-4.

[3] 李文军,张引发,王鲸鱼. 光网络地理分布的安全风险评估研究[J]. 光通信研究,2012(3):30-32.
Li W J, Zhang Y F, Wang J Y. Research on Safety Risk Assessment of Optical Network Geographical Distribution[J]. Study on Optical Communications, 2012(3):30-32.

[4] Agrawal A, Bhatia V, Prakash S. Network and Risk Modeling for Disaster Survivability Analysis of Backbone Optical Communication Networks[J]. Journal of Lightwave Technology,2019,37(10):2352-2362.

[5] 袁园. 基于链路可靠性及生命期的光网络抗毁技术研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2019.
Yuan Y. Research on Link Reliability and Lifetime based Survivable Scheme for Optical Networks[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019.

[6] 刘焕淋,杜君丹,易鹏飞,等. 弹性光网络中面向可靠性的链路故障概率保护与保护资源重配置策略[J]. 电子与信息学报,2017,39(11):2579-2586.
Liu H L, Du J D, Yi P F, et al. Reliability-oriented Links Failure Probability Protection and Backup Reprovisioning Strategy for Elastic Optical Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017,39(11):2579-2586.

[7] 祁兵,刘思放,李彬,等. 基于业务优先级和 SRLG 的电力需求响应业务调度优化算法[J]. 电网技术,2019,43(7):2393-2402.
Qi B, Liu S F, Li B, et al. Optimized Scheduling Algorithm for Power Demand Response Service based on Multi-priority Services and SRLG[J]. Power System Technology,2019,43(7):2393-2402.

[8] Nelakuditi S, Lee S, Yu Y, et al. Fast Local Rerouting for Handling Transient Link Failures[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2007,15(2):359-372.

[9] Elhourani T, Gopalan A, Ramasubramanian S. IP Fast Rerouting for Multi-link Failures [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24 (5): 3014 - 3025.