

基于时延容忍度及报警反馈评估的故障业务恢复算法

马凝芳¹,田照宇²,钱升起²,邓春雪²,孙雨潇²,赵星宇²,马嘉瞬³,包博文³

(1.中国信息通信研究院 泰尔实验室,北京 100191;2.国家电网有限公司 信息通信分公司,北京 100761;

3.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:为提高光网络的生存性,提出一种基于业务时延容忍度及报警反馈评估的故障业务恢复算法。首先,应用基于混合进化神经网络的链路多故障定位模型,从大量报警信息中准确定位故障位置;然后,对故障业务进行时延容忍度评估,并以此为依据为故障业务排列恢复顺序。此外,根据各链路上报警信息的种类和数量,对每条链路进行了可靠性评估,优先选择可靠性更高的链路进行路由。仿真结果表明:该算法的故障定位准确率高达91%,故障业务相对恢复时延度平均降低了48.83%,恢复路径可靠性平均提高了6.05%。

关键词:故障业务恢复;故障定位;报警反馈;时延容忍度;链路可靠性;混合进化神经网络

中图分类号:TN914 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2021)10-0058-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fault service recovery algorithm based on delay sensitivity and alarm feedback evaluation

MA Ningfang¹, TIAN Zhaoyu², QIAN Shengqi², DENG Chunxue², SUN Yuxiao²,

ZHAO Xingyu², MA Jiashun³, BAO Bowen³

(1.China Academy of Information and Communications Technology, Telecommunication Technology Labs, Beijing 100191, China;

2. Information and communication branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100761, China; 3. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to improve the survivability of optical networks, this paper proposes a fault service recovery algorithm based on service delay sensitivity and alarm feedback measurement. The algorithm first applies the link multi-fault location model based on hybrid evolutionary neural network to accurately locate the fault location from a large number of alarm information. Then, the time delay tolerance of the faulty business is evaluated, and the recovery sequence of the faulty business is arranged based on this. In addition, the algorithm also evaluates the reliability of each link according to the type and quantity of alarm information on each link, and gives priority to the link with higher reliability when choosing the recovery path for the fault service. The simulation results show that the fault location accuracy of this algorithm is as high as 91%, the relative recovery delay of fault service decreased by 48.83% and the reliability of recovery path increased by 6.05% on average.

Key words: fault service recovery; fault location; alarm feedback; delay tolerance; link reliability; hybrid evolutionary neural networks

收稿日期:2020-11-06。

基金项目:信息光子学与光通信国家重点实验室基金(批准号:IPOC2018A001、IPOC2019ZT01)资助;国家自然科学基金(批准号:61871056)资助。

作者简介:马凝芳(1975—),女,中国人民大学法律硕士,中国信息通信研究院泰尔系统实验室科技部主任、高级工程师。长期从事信息通信法规监管政策研究、通信设备进网管理技术研究以及通信安全生产技术标准研究等多个领域科研工作,并主持了多项省部级研究课题。



0 引言

随着光网络流量负载的持续增加,光网络一旦出现故障就可能导致数百个业务中断,严重危害光网络的生存性。当多个故障同时发生时,由于网络拓扑的连通性,一条链路的故障可能触发多条链路报警,从而导致业务的目标节点无法确定故障链路的具体位置。此外,不同的故障组合可能触发网络发出相同的报警信息组合,并且由于冗余报警数量众多,报警与故障之间的关系不是一一对应的,而是一种非线性映

射关系,这大大增加了故障定位的难度;同时,随着 5G 时代的到来,用户对网络服务质量(QoS)的要求也越来越高。当网络发生链路故障并导致部分业务被迫中断时,这些故障业务的 QoS 会急剧下降。由于故障业务恢复需要一定的时间,且不同业务的时延敏感性强弱也不同,为了尽量满足用户对业务基本 QoS 的需求,以时延容忍度区分的业务恢复模式成为了刚需。此外,若故障业务恢复后再次遭遇网络故障而被迫中断,这不仅会使第一次的恢复工作完全失效,还会造成时延的叠加,严重降低了业务 QoS。因此,如何选择一条可靠性更高的路径是故障业务恢复工作中至关重要的一环,亟需一种能够快速、准确地定位故障位置,又能进行高质量的故障业务恢复的算法。

目前,基于深度神经网络(DNN)的故障定位算法^[1]严重依赖于梯度,容易陷入局部最优解,难以进一步提高准确率。文献[2]提出了一种具有进化策略的混合进化人工神经网络(HEANN),该网络具备不受梯度约束的全局搜索能力,能够更精准地解决譬如光网络多故障定位的模式分类问题。但是,目前有关光网络故障的恢复算法大多是从网络角度出发的^[3-4],并未考虑业务的恢复质量(如恢复时延和可靠性等)。因此,本文提出基于时延容忍度及报警反馈评估的故障业务恢复算法。

1 算法描述

为实现光网络故障业务快速恢复,本文首先设计基于 HEANN 的多故障定位模型,然后在此基础上提出基于时延容忍度及报警反馈评估的故障业务恢复算法,致力于解决光网络链路多故障定位和故障业务恢复问题。

1.1 基于 HEANN 的多故障定位模型设计

设计基于 HEANN 的多故障定位模型的目的是为了根据 HEANN 的进化特点深度挖掘故障信息与报警信息之间的隐藏关系,提高光网络多故障定位的精度。神经网络在分析多故障定位问题时,会将报警信息与故障信息集之间看作一种复杂的映射关系,这时存在一个最精确的映射函数对应于全局最优解,搜索到全局最优解是它训练的终极目标。同理,神经网络学习出的映射函数越接近全局最优解,定位结果就越精确。传统的 DNN 采用梯度下降算法,通过调整网络参数对单一网络模型进行优化,以此不断搜寻最优解,但这类模型严重依赖于梯度,容易陷入局部最优解,影响故障定位的准确性。为了解决这一问题,本文

基于 DNN,在 HEANN 中引入了一种种群自适应变异技术,打破了以往局限于单一网络模型的壁垒,实现了全局搜索和局部搜索的平衡。

在 HEANN 中,首先生成大量的网络模型(即初始神经网络种群),然后同时进化每一个网络模型的网络拓扑和权值,最终在大量的网络模型中选出精度最高的模型。为实现网络的自适应变异,本文在 HEANN 中对每个初始神经网络进行基于该网络结构的基因编码。编码基因经过连续的交叉突变实现网络进化,最终从进化后的编码基因中得到满足需求的神经网络结构。在进行基因编码时,对 HEANN 采用直接编码的方法,将所有神经网络的拓扑结构和权值都编码在同一条染色体中,然后利用种群信息来引导进化过程,由全局搜索逐步向局部搜索转变。在种群自适应变异过程中,为了防止近似最优的神经网络被破坏或过早收敛,本文采取局部自适应变异策略,对种群中的每个个体赋予不同的局部变异概率(PI 值)。该策略为高适应度的神经网络分配较低的 PI 值,可以防止 HEANN 陷入局部最优;为低适应度的神经网络分配较高的 PI 值,可以帮助 HEANN 收敛。此外,HEANN 能够使用大规模种群比单个神经网络包含更多的信息。

综上所述,相比于传统 DNN,HEANN 能够通过自身算法优势找寻出最精确的故障-报警映射函数,实现更精确的多故障定位。本文将通过从光网络监控报警器中收集到的故障报警信息集训练 HEANN 模型,完成光网络多故障定位工作。

1.2 基于业务时延容忍度及报警反馈评估的故障业务恢复算法

1.2.1 故障业务时延容忍度评分及恢复顺序排序

《System architecture for the 5G System (5GS) (3GPP TS 23.501 version 16.6.0 Release 16)》公布了标准化 5QI 到 QoS 特征映射的标准,这项标准综合了业务的资源类型、默认优先级、包延迟预算和误包率等一系列指标,为业务划分 5G QoS 标量值(QI 值)^[5]。由于 QI 值中包含了业务延迟预算这项指标,因此可以根据业务的 5QI 值对业务的时延容忍度进行评分。在 5QI 划分标准中,5G 业务共有 10 种时延预算,将其依次映射为 1~10 的时延容忍度评分,评分表如表 1 所示。例如:当对一种故障业务的 5QI 值为 75 级时,本文根据文献 [5] 中的 5QI 到 QoS 特征映射表格(3GPP TS 23.501 version 16.6.0 Release 16 Table-5.7.4-1)可知,它的时延预算为 50 ms,对应的时延容忍度评分为 4 分。然后,对所有故障业务进行恢复优先级排序,时

表 1 业务时延容忍度评分表

5QI 值	时延预算/ms	时延容忍度评分
81	5	1
80、82、84、85	10	2
83	20	3
1、75、79	50	4
69	60	5
65	75	6
1、5、7、66、67	100	7
2	150	8
70	200	9
4、6、8、9	300	10

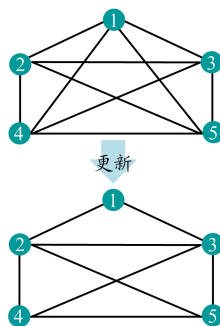
延容忍度评分越低的业务,其恢复优先级越高。当出现时延容忍度评分相同的业务时,QoS 默认优先级越高的业务恢复优先级越高。当出现时延容忍度评分和 QoS 默认优先级都相同的业务时,随机排列它们之间的恢复优先级。

1.2.2 基于报警信息评分的链路可靠性评估

本文首先根据故障定位结果更新光网络的拓扑结构,再按照报警信息的种类和数量对所有链路进行可靠性评估。根据报警信息的紧急程度对报警信息进行评分的具体规则为:紧急报警为 4 分、重要报警为 3 分、次要报警为 2 分、提示报警为 1 分。先计算每条链路上的报警信息总分值 L_{uv} ($u、v$ 表示链路两端节点的标号),再计算整个网络的报警信息总分值 N ,最后计算每条链路的可靠性评估结果 P_{uv} ,其计算式为:

$$P_{uv}=1-\frac{L_{uv}}{N} \quad (1)$$

图 1(a)为根据故障定位结果对光网络拓扑结构进行更新的过程,其中节点 1、4 之间与节点 1、5 之间链路由于被判定为故障而被更新删除。同时,依据前期故障分析假设节点 1、2 之间的链路存在 1 条紧急报警,节点 3、5 之间的链路存在 1 条提示报警,节点 2、5 之间的链路存在 1 条重要报警、1 条次要报警和 1 条提示报警,节点 3、4 之间的链路存在 1 条重要报警。那么, $L_{12}=4、L_{35}=1、L_{25}=6、L_{34}=3$,总报警分数 $N=14$,计算后得出 $P_{12}=0.714、P_{35}=0.929、P_{25}=0.571、P_{34}=0.786$,其余各链路的可靠性评估结果为 1。然后,根据计算结果生成一个链路可靠性邻接矩阵,如图 1(b)所示。其中,每一列代表业务的源节点,每一行代表业务的目的节点,矩阵中的每一个位置则为各节点之间的链路可靠性评估结果,本文将各链路的可靠性评估结果输入到对应的邻接矩阵中,矩阵中 2 个不相连节点间的连接可靠性和节点自身与自身的连接可靠性都判为 0。



(a) 根据故障定位结果更新光网络拓扑结构

	1	2	3	4	5
1	0	0.714	1	0	0
2	0.714	0	1	1	0.571
3	1	1	0	0.786	0.929
4	0	1	0.786	0	1
5	0	0.571	0.929	1	0

(b) 链路可靠性邻接矩阵

图 1 故障定位下的光网络拓扑结构更新过程

1.2.3 恢复路径计算与资源分配

根据得出的故障业务恢复优先级结果,依次为故障业务选择恢复路径。在选择路径时,本文采用变种 Dijkstra 算法从业务的源节点到目的节点搜索整个邻接矩阵得出所有可能路径并标记出每条路径的可靠性结果。变种 Dijkstra 算法是将原始 Dijkstra 算法中的链路距离替换成链路可靠性,将链路距离相加变成链路可靠性相乘,将搜索路径距离最小值变成搜索路径可靠性最大值。其中,各条路径的可靠性结果由路径中每条链路的可靠性评估结果相乘得到。那么,故障业务 f_i 的恢复路径可靠性 p_i 计算公式为:

$$p_i=\prod_{j=1}^n l_j \quad (2)$$

其中, $l_j(j=1,2,...n)$ 为恢复路径中包含的 n 条链路的可靠性。首先,按照恢复路径的可靠性结果由大到小地为路径进行优先级排序,可靠性结果越大的路径优先级越高。若 2 条路径可靠性结果相同,则判历经链路更少的路径优先级更高;若二者历经链路的条数也相同,则随机排列二者的优先级。然后,按照优先级由高到低的顺序为待选恢复路径分配频谱资源。例如:已为 1 条故障业务搜索出 5 条优先级排序 1~5 的待选恢复路径,那么首先对 1 号路径分配频谱资源,若成功则选定该路径为恢复路径;若失败,则测试 2 号路径,以此类推。分配频谱资源时采取首次命中算法。基于时延容忍度及报警反馈评估的故障业务恢复算法的整体流程图如图 2 所示。

2 算法性能评估与分析

在弹性光网络环境下,本文采用 14 节点 21 链路的 NSFNET 拓扑对所提出的算法的性能进行评估,如图 3 所示。其中,所有链路采用 C 波段进行资源分配,

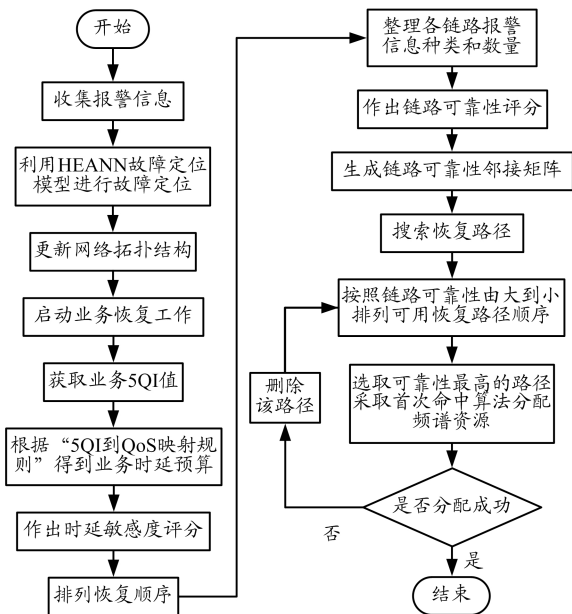


图2 算法流程图

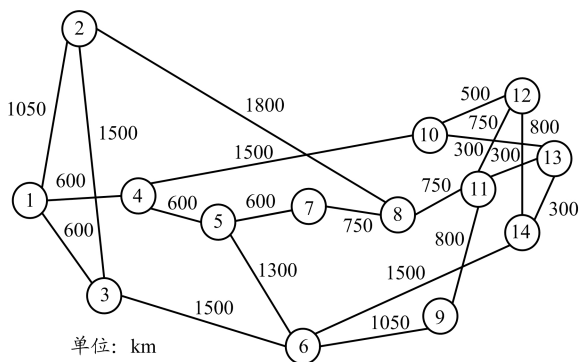


图3 NSFNET 拓扑图

所有光节点不具备波长转换能力,因此资源分配需遵循频谱连续性和频谱邻接性的限制条件。考虑到每条链路上光纤栅格粒度为 12.5 GHz,故链路频隙容量设置为 358 个,业务最大带宽需求为 200 Gb/s。业务的源节点与目的节点的选取服从随机分布,开始时间和持续时间分别服从泊松分布和负指数分布。本文为业务进行资源分配时可采用二相移键控(BPSK)、正交移键控(QPSK)以及八正交振幅调制(8QAM)方式,并分别具有 4000 km、2000 km 以及 1000 km 的最远传输距离^[6]。此外,为确保后续故障恢复的可行性,本文首先评估故障定位准确率,并选取光网络中最常用的 k-最短路径与首次命中的业务恢复算法作为对比算法,然后再综合评估算法的相对恢复时延度、恢复路径可靠性。

2.1 故障定位准确率

基于 HEANN 故障定位模型的结构参数如表 2 所示。其中, None 表示该层输出的种群批量大小可变。本文

表 2 HEANN 结构参数

神经网络层	输出种群	参数个数
dense_1 (Dense)	(None, 50)	1050
batch_normalization_1	(None, 50)	200
dropout_1 (Dropout)	(None, 50)	0
dense_2 (Dense)	(None, 10)	510
activation_1 (Activation)	(None, 10)	0
dense_3 (Dense)	(None, 1)	11

从 2017 年 11 月开始连续 90 天收集云数据中心 4510 个节点的报警信息,共 50 万级报警信息互联。每个故障都是独立发生的,故障之间没有相关性。报警信息格式一致,涵盖发生时间、报警地址、报警文本和数据。

在不同训练周期下,本文通过仿真将所提模型与传统 DNN 定位模型和基于支持向量机(SVM)模型进行了对比,仿真结果如图 4 所示。可以看出,在周期为 30 之后 HEANN 故障定位模型的定位准确率能够达到 91%,这为本文实现快速故障恢复提供基础保障。

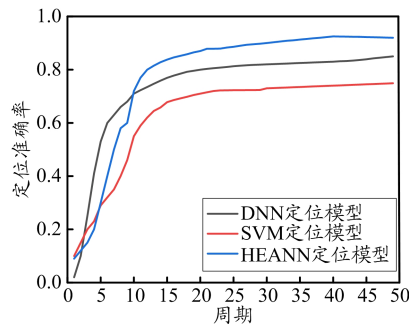


图4 故障定位准确率

2.2 相对恢复时延度

本文根据故障业务的时延敏感性强弱,对故障业务进行时延容忍度评分,并依据该评分为故障业务排列恢复顺序。为了验证本文所提算法的性能,定义了“相对恢复时延度”这项性能评估指标,该指标定义为故障业务的时延容忍度评分与恢复顺序的比值,即:假设故障业务 f_i 的时延容忍度评分为 X ,它在所有故障业务中的恢复顺序为 Y ,那么,这项故障业务的相对恢复时延度 t_i 和全部故障业务的相对恢复时延度 T 分别为:

$$t_i = \frac{X}{Y} \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4)$$

其中,由相对恢复时延度的数学意义可知,其值越小说明该算法的性能越好。

在不同负载量下,本文通过仿真将所提算法与随机排序恢复顺序算法和基于 QoS 默认优先级排序算法进行了对比,仿真结果如图 5 所示。可以看出,与其

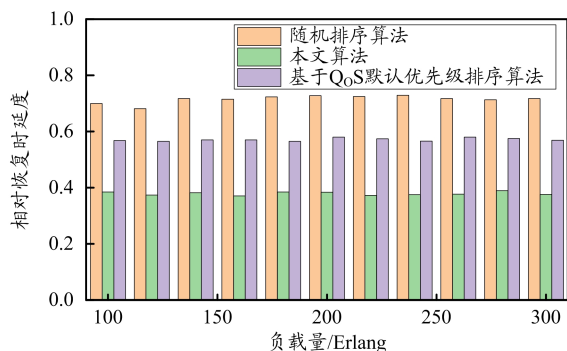


图5 相对恢复时延度

它2种算法相比,本文算法的相对恢复时延度显著降低,平均降低了48.83%,且在不同负载量下性能稳定。这是因为本文提出的恢复算法以故障业务的时延容忍度为排列恢复顺序的首要依据,以平衡全部故障业务的时延需求为目的,使对时延更敏感的业务得到优先恢复。因此,本文所提算法能显著降低整体故障业务的相对恢复时延。

2.3 恢复路径可靠性

本文基于各链路上报警信息的种类和数量,对链路可靠性进行评估,并在为故障业务选择恢复路径时优先选择可靠性更高的链路;同时,本文定义了“平均恢复路径可靠性”并将其作为一项算法性能评估指标,计算全部故障业务的平均恢复路径可靠性,其计算方法为:

$$P = \frac{1}{m} \prod_{i=1}^m p_i \quad (5)$$

其中, p_i 为故障业务 f_i 的恢复路径可靠性, P 为全部 m 项故障业务的平均恢复路径可靠性。

在不同负载量下,本文通过仿真将所提算法与 k -最短路径算法进行了对比,仿真结果如图6所示。可以看出,与 k -最短路径算法相比,本文算法显著提高了恢复路径可靠性,平均提高了6.05%,且该算法在不同

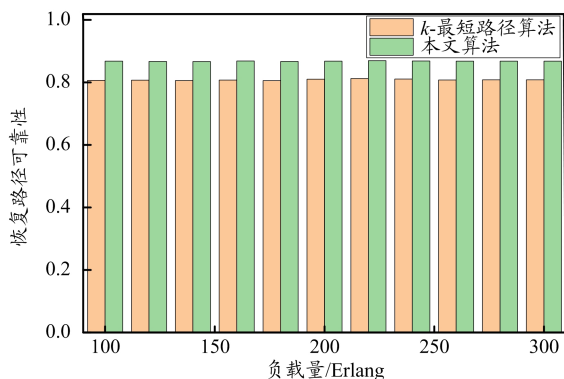


图6 恢复路径可靠性

负载量下性能稳定。原因是:首先,各链路上的报警信息能在一定程度上反映出其故障风险的大小,本文以报警信息的种类和数量为依据,细化出了一套基于报警信息的链路可靠性评估规则,这为链路可靠性评估工作提供了真实可靠的评估信息来源和评估标准;然后,根据上述评估结果,为业务选择一条最可靠的恢复路径,而首次命中算法并未将链路可靠性作为选择恢复路径的依据。因此,本文提出的算法在恢复路径可靠性方面能够取得更好的效果。

3 结束语

本文提出了一种基于业务时延容忍度及报警反馈评估的故障业务恢复算法,该算法首先应用基于混合进化神经网络的链路多故障定位模型进行故障定位,并将定位结果应用到业务恢复中,然后将故障业务的时延敏感性以及基于报警反馈的链路可靠性评估结果作为故障业务恢复工作中的2项重要依据,在业务恢复时优先恢复时延敏感性更强的业务并优先选择可靠性更高的链路,最后采取首次命中算法分配频谱资源。仿真结果表明:该算法的故障定位准确率高达91%,故障业务相对恢复时延度平均降低48.83%,恢复路径可靠性平均提高6.05%。该算法既降低了整体故障业务的恢复时延,又提高了恢复路径的可靠性,能够有效地平衡故障业务的整体时延并避免业务出现二次故障,在时延和可靠性两方面极大地提高了故障业务的恢复质量,对维护光网络的生存性具有重要意义。

参考文献:

- [1] RAFIQUE D, SZYRKOWIEC T, HELMUT G, et al. Cognitive assurance architecture for optical network fault management[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 36(7): 1443–1450.
- [2] ZHAO X, YANG H, GUO H, et al. Accurate fault location based on deep neural evolution network in optical networks for 5G and beyond [EB/OL]. [2020-11-06]. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2019-M3J.5>.
- [3] 刘焕淋,杜理想,陈勇,等. 基于灾难预测多区域故障的虚拟光网络生存性映射[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(7): 1710–1717.
- [4] 王伟. 弹性光网络中虚拟网络生存性映射算法研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- [5] ETSI. System architecture for the 5G System (5GS) (3GPP TS 23.501 version 16.6.0 Release 16)[S]. Nice: ETSI, 2020.
- [6] 包博文,李娜娜,胡劲华,等. 弹性光网络中距离自适应调制技术综述[J]. 光通信技术, 2018, 42(9): 18–21.