

光纤通信传送网抗毁韧性问题分析

袁海博¹,周正^{1*},陈毓锴²,林克凌²,姚道保²,李云龙²,廖行锋²

(1.国防科技大学 信息通信学院,武汉 430010;2.中国人民解放军 61623 部队,北京 100840)

摘要:为提升光纤通信传送网在复杂对抗环境下的抗毁韧性,系统构建了物理网络-逻辑网络依存模型,首次提出包含脆弱因子、恢复因子、反应时间和恢复时间的四维抗毁韧性指标体系。通过数据归一化加权求和方法建立量化评估模型,结合某区域光纤通信传送网实例,实证分析主备路由规划、反应时间及恢复时间对抗毁韧性指标的影响。研究表明:采用主备路径负荷分担策略可使抗毁韧性评分提升16分;反应时间缩短至2 min可提升评分5.5分;恢复时间延长至60 min则导致评分下降5分。

关键词:光纤通信传送网;抗毁韧性;影响因素;抗毁过程;加权求和

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)02-0069-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis on the survivability resilience of optical fiber communication transmission network

YUAN Haibo¹, ZHOU Zheng^{1*}, CHEN Yukai², LIN Keling², YAO Daobao², LI Yunlong², LIAO Xingfeng²

(1. College of Information Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430010, China;

2. Troop 61623 of PLA, Beijing 100840, China)

Abstract: To enhance the survivability resilience of optical fiber communication transmission network in complex adversarial environments, this paper systematically establishes a physical-logical network interdependence model and, for the first time, proposes a four-dimensional survivability resilience evaluation framework incorporating vulnerability factors, recovery factors, response time, and restoration time. A quantitative evaluation model is established using data normalization and weighted summation methods. Through empirical analysis of a regional optical fiber communication transmission network, the impacts of primary-backup route planning, response time, and recovery time on survivability resilience metrics are investigated. The results indicate that adopting a load-sharing strategy for primary-backup paths increases the survivability resilience score by 16 points, reducing the response time to 2 minutes improves the score by 5.5 points, while extending the recovery time to 60 minutes decreases the score by 5 points.

Key words: optical fiber communication transmission network, anti-destruction resilience, influencing factors, anti-destruction process, weighted summation

0 引言

光纤通信传送网作为国家信息基础设施的核心承载平台,凭借其超大容量、超长距离及超高可靠性

收稿日期:2024-07-22。

作者简介:袁海博(1987—),男,硕士研究生,就读于国防科技大学信息通信学院,主要研究方向为光缆网运维与优化。

* **通信作者:**周正(1980—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为通信网络智能化运维管理。



特征,承担着全国90%以上的信息传输任务,为各类业务网络提供基础传输通道与关键支撑平台,已成为我国战略级信息通信基础设施。该网络一旦遭受攻击或出现故障,将直接导致业务网络传输效率骤降甚至系统瘫痪,进而引发重大社会经济损失^[1-3]。面对日益复杂的光纤通信传送网络架构,如何基于业务承载特性开展针对性抗毁性分析以提升网络生存能力,始终是网络运维保障领域亟待突破的技术难题。

当前抗毁性研究主要集中于评估方法与优化策略层面。文献[4-5]通过模拟区域电力及军用光传输网

袁海博,周正,陈毓锴,等: 光纤通信传送网抗毁韧性问题探析

节点失效场景,计算网络连通率以识别脆弱组件并提出加固方案。文献[6]基于节点介数理论构建关键节点识别模型,提出拓扑优化建议。文献[7-9]综合运用度数中心性、介数中心性等指标,对华中 500 kV 电网进行节点抗毁性分析。然而,现有研究多聚焦于关键节点识别,缺乏对网络整体性能的考量。网络韧性作为衡量系统抵御故障与恢复能力的重要指标,为光纤通信传送网抗毁研究提供了全新视角^[10-11]。

本文系统探究光纤通信传送网抗毁韧性机理,首先构建物理网络-逻辑网络依存模型,明确定义抗毁韧性内涵及其影响因素,继而建立包含脆弱因子、恢复因子等关键参数的韧性测度体系,提出量化评估模型。

1 光纤通信传送网抗毁韧性基本定义

1.1 光纤通信传送网与业务网的结构关系

光纤通信传送网由一系列部署于通信台站的传输设备和连接这些设备的光纤链路构建而成。这些物理要素共同组成了一个可抽象理解的物理网络,其中通信台站充当网络节点,光纤链路则作为连接节点的边。业务网是依据业务需求构建的逻辑连接网络,亦称为逻辑网络。在逻辑网络中,业务信道的调度依托底层的物理网络,各个业务需求单位可视作逻辑网络的节点,业务链路相当于逻辑网络中的边。

逻辑网络的通信依赖于物理网络实体,这表明逻辑网络边与物理网络边存在紧密的耦合关系。具体表现为:逻辑链路失效时,相应的物理链路不会随之失效;而当物理链路失效时,逻辑链路将失效。此外,逻辑网络的节点集与物理网络的节点集存在明确的映射关系,这种关系可抽象为虚拟的映射边,这些映射边不会出现失效状况。具体而言,每个逻辑网络节点均能在物理网络上找到对应的节点实体,但物理网络拓扑结构与逻辑网络拓扑结构不一定完全一致。

综上所述,光纤通信传送网及其承载的业务网属于相依网络,且二者之间的依赖关系为单向。“物理网络-逻辑网络”耦合、映射关系示意图如图 1 所示。

1.2 光纤通信传送网抗毁韧性的定义及影响因素

光纤通信传送网抗毁韧性的定义为:光纤通信传送网在复杂对抗环境(如设备故障、任务变化、敌特攻击等)下,其物理网络通过静态防御、动态恢复等策略,持续保障逻辑网络负载需求完成度的能力。由该定义可知,影响光纤通信传送网抗毁韧性的因素主要包括两方面内容:①物理网络满足逻辑网络任务需求的持续性。从时间线角度考虑,当光纤通信传送网遭

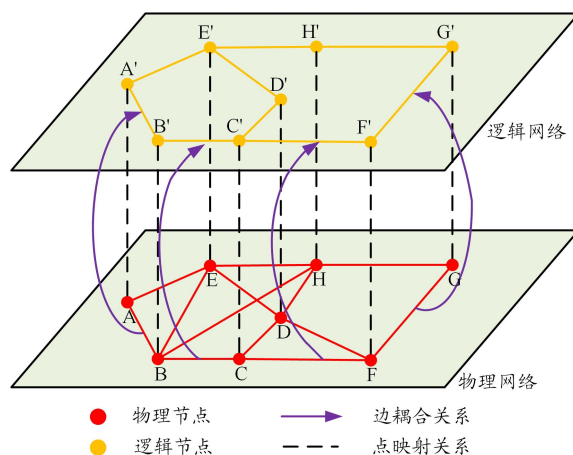


图 1 “物理网络-逻辑网络”耦合、映射关系示意图

遇故障或攻击时,会进行适应性的抵抗与恢复,以保障网络的连续性和稳定性。在此过程中消耗的时间越短,其满足逻辑网络任务需求的持续性越好,抗毁韧性越高。②逻辑网络负载需求完成度的变化程度。从任务线角度考虑,当物理网络受到干扰后,若逻辑网络负载需求完成度下降至无法满足任务需求,则系统中断,需要借助防御、恢复等措施提升负载需求完成度以满足任务需求。所以,物理网络受干扰前后逻辑网络负载需求完成度的变化程度越小,越能更好地满足任务需求,抗毁韧性越高。

2 光纤通信传送网抗毁过程分析

2.1 抗毁过程的属性参数及含义

光纤通信传送网的抗毁过程可细分为 4 个阶段:初始阶段、静态防御阶段、动态恢复阶段以及修复完成阶段,如图 2 所示。此抗毁过程的输入条件为故障发生前初始阶段的逻辑网络负载需求完成度,输出结

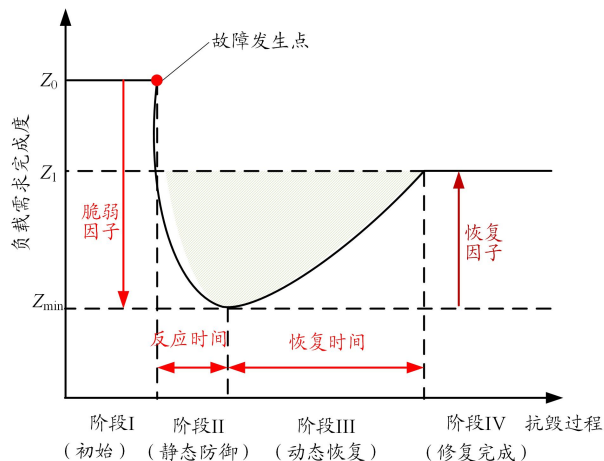


图 2 光纤通信传送网的抗毁过程

果为修复完成后的逻辑网络负载需求完成度。各阶段及其属性参数含义具体如下:

1)脆弱因子表示故障发生致使逻辑网络负载需求完成度下降的程度。图2中的 Z_0 表示光纤通信传送网初始阶段的负载完成度, $Z_{\min}$ 表示故障发生后负载完成度降至的最小值。此时,脆弱因子定义为: $\delta_m = Z_0 - Z_{\min}$,该指标是衡量抗毁韧性性能的重要指标。脆弱因子越小,表明系统的健壮性越强,抗毁韧性越好。

2)静态防御阶段是从故障发生点到逻辑网络负载需求完成度降至最低点所经历的阶段。在此阶段,光纤通信传送网通过启动预置备用资源等手段抵抗故障,但性能仍会逐步下降至最小值。该阶段所经历的时间为反应时间 t_r ,这也是衡量抗毁韧性性能的重要指标。反应时间越短,说明系统对故障的反应处置更为迅速,抗毁韧性越好。通常情况下,在实际任务中会对主备倒换所消耗的时间设定最大容忍度,记为最长反应时间 T_a 。

3)动态恢复阶段是从逻辑网络负载需求完成度降至最低点到修复完成达到暂时不变的“稳态”所经历的阶段。在此阶段,光纤通信传送网为达成逻辑网络任务所需的负载需求,采取部署机动通信车等措施进行网络重构,恢复瘫痪业务,性能会逐步上升。该阶段所经历的时间为恢复时间 t_r ,这同样是衡量抗毁韧性性能的重要指标。恢复时间越短,可有效减少逻辑网络链路闭环时间,抗毁韧性越好。通常情况下,在实际任务中会对部署机动通信车及其它措施所消耗的时间设定最大容忍度,记为最长恢复时间 T_r 。

4)恢复因子表示逻辑网络负载需求完成度从最低点恢复至修复完成达到暂时不变的“稳态”程度。图2中, Z_1 为光纤通信传送网修复完成达到暂时不变的逻辑网络负载完成度。此时,恢复因子定义为: $\delta_n = Z_1 - Z_{\min}$,该指标同样是衡量抗毁韧性性能的重要指标。恢复因子越大,表明系统从故障中恢复的能力越强,抗毁韧性越好。

2.2 抗毁韧性测度问题与指标构建

为解决抗毁韧性测度问题,可基于脆弱因子、恢复因子、反应时间和恢复时间这些关键属性参数构建光纤通信传送网的韧性度量体系。其中,脆弱因子和恢复因子可用逻辑网络负载需求完成度的下降或恢复程度来量化表示,反应时间和恢复时间则以时间为计量单位对指标进行量化。由上述分析可知,恢复因子与抗毁韧性指标呈正相关,而脆弱因子、反应时间、恢复时间与抗毁韧性指标呈负相关。通过对指标进行

数据归一化处理以消除量纲差异,然后进行加权求和,可实现光纤通信传送网抗毁韧性性能的聚合。综上所述,本文定义光纤通信传送网的抗毁韧性指标 R 为

$$R = k_1(1 - \delta_m) + k_2 \frac{\delta_n}{\delta_m} + k_3 \left(1 - \frac{t_a}{T_a}\right) + k_4 \left(1 - \frac{t_r}{T_r}\right) \quad (1)$$

其中, $(1 - \delta_m)$ 、 $\frac{\delta_n}{\delta_m}$ 、 $\left(1 - \frac{t_a}{T_a}\right)$ 、 $\left(1 - \frac{t_r}{T_r}\right)$ 分别表示故障防御程度、故障恢复程度、故障响应敏感度和故障恢复敏捷度; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 则对应上述4个维度的抗毁韧性评分权重。

3 光纤通信传送网抗毁韧性实例验证

以某区域光纤通信传送网和逻辑网络为研究对象。该逻辑网络包含A、B、C、D、E共5种业务需求,这5种业务的重要性相同;物理网络由8个节点、13条边构成。针对每一种逻辑业务,均配置一条主用物理网络路径和一条备用物理网络路径。其中,B业务的备用路径可选择备用1(节点1-节点4-节点3-节点2)或备用2(节点1-节点7-节点2),这2种备用方式均为冷备,具体情况如表1所示。

表1 业务路径表

业务号	物理网络 主备状态	物理网络业务路径
A 业务	主用	节点1-节点3
	备用	节点1-节点4-节点3
B 业务	主用	节点1-节点2
	备用1	节点1-节点4-节点3-节点2
	备用2	节点1-节点7-节点2
C 业务	主用	节点2-节点3
	备用	节点2-节点8-节点3
D 业务	主用	节点1-节点4
	备用	节点1-节点5-节点4
E 业务	主用	节点4-节点3
	备用	节点4-节点6-节点3

系统故障状态为:物理网络中“节点1-节点2”、“节点3-节点4”这2条边发生阻断,同时节点6被毁瘫痪,不过节点6处部署有节点接替车,具体场景如图3所示。

当上述故障发生时,A业务能够借助备用路径实现迂回通信;E业务的主用和备用链路均被阻断,此时可采用机动通信车对E业务进行抢通接替。若B业务的备用路径选择备用1,则在发生上述故障时,B业务

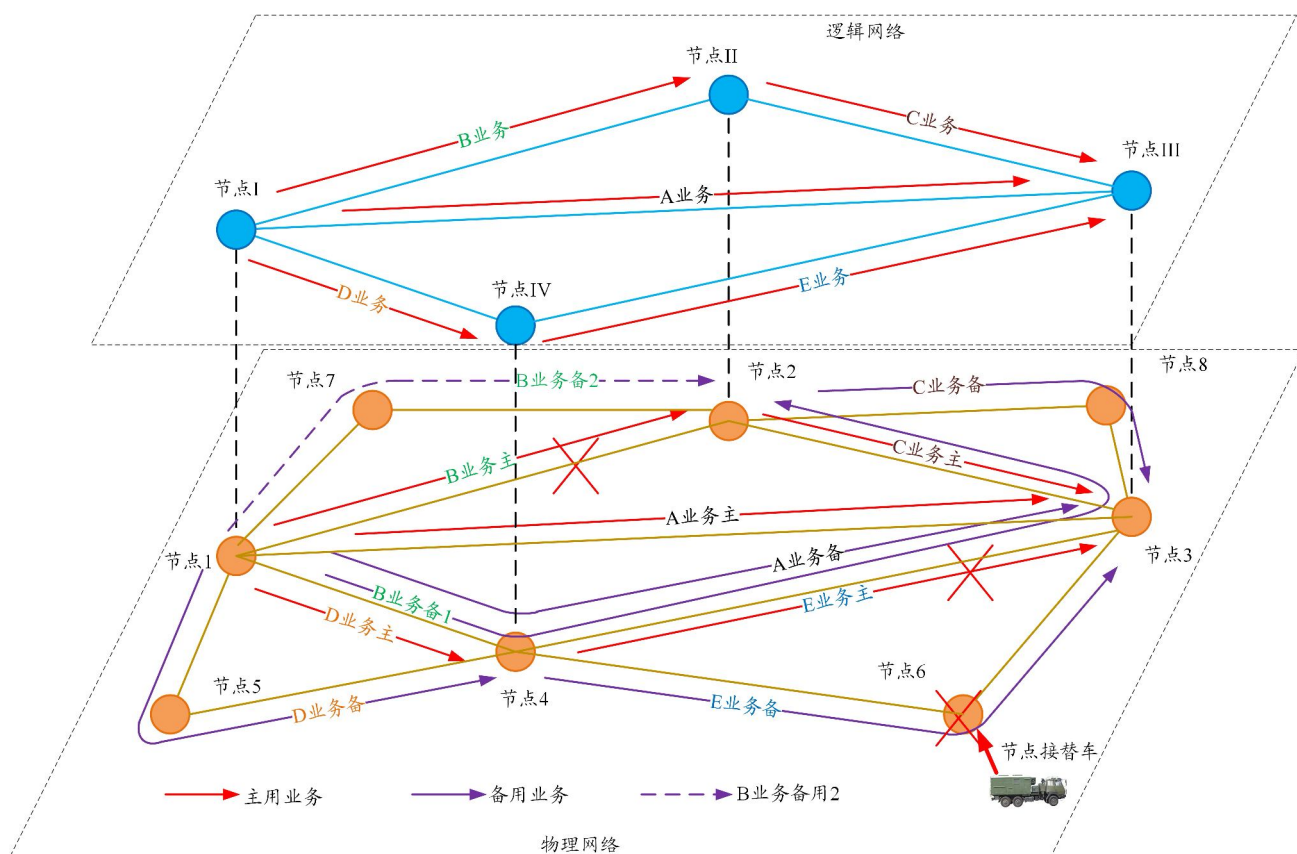


图3 光纤通信传送网抗毁韧性实验验证场景

的主用和备用链路均会被阻断；若B业务备用路径选择备用2,则B业务可通过备用路径进行迂回通信。

下面分别分析主备路由规划、系统反应时间、系统恢复时间对抗毁韧性性能产生的影响。在抗毁韧性指标公式中,依据指挥员的关注重点,设定 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 在百分制打分中的分值分别为30、20、30、20分。同时按照指挥员的要求,系统的最长反应时间为20 min,最长恢复时间为120 min。

3.1 主备路由规划

相较于B业务备用路径选择备用2的情况,若B业务备用路径选择备用1,则其与E业务的主用路径、A业务的备用路径存在重复边“节点3-节点4”。当这条边被阻断后,会造成更为严重的破坏,即B业务和E业务均会被阻断。在节点接替车对E业务进行恢复之后,此时脆弱因子 δ_m 为0.4,恢复因子 δ_n 为0.2。由此计算出故障防御程度为0.6,故障恢复程度为0.5。若B业务备用路径选择备用2,则此时脆弱因子 δ_m 为0.2,恢复因子 δ_n 为0.2,进而计算出故障防御程度为0.8,故障恢复程度为1。

假设系统反应时间为5 min,开通节点接替车的时间(系统恢复时间)为30 min。由此计算出故障反应

敏感度为0.75,故障恢复敏捷度为0.75。

综合以上分析,若B业务选择备用路径1,根据式(1)进行百分制打分,抗毁韧性分数计算结果为 $30 \times 0.6 + 20 \times 0.5 + 30 \times 0.75 + 20 \times 0.75 = 64.5$ 分。若B业务选择备用路径2,则根据式(1)计算得出抗毁韧性分数为80.5分。与备用路径1相比,备用路径2可减少主备传输路径的公共边数量,实现负荷分担,抗毁韧性评分提升16分。

3.2 系统反应时间

在评估系统反应时间对抗毁韧性性能的影响时,假设B业务选择备用路径2,且节点接替车开通时延为30 min。A、B、E业务需在故障发生后启用冷备措施。根据现网实际部署,可提前预置资源,以便故障时快速启动并实现业务迂回通信。根据3.1节分析,当平均系统反应时间为5 min时,其抗毁韧性评分为80.5分;若将平均系统反应时间缩短至2 min,依据式(1)计算可得抗毁韧性分数提升至86分,增幅为5.5分。

3.3 系统恢复时间

在评估系统恢复时间对抗毁韧性性能的影响时,假设B业务选择备用路径2,且平均系统反应时间为2 min。当节点6失效后,可通过节点接替车接替该节

点,实现其承载业务的应急开设与快速抢通。根据 3.2 节分析,当系统恢复时间为 30 min 时,抗毁韧性分数为 86 分;若因机动接替车快速开通能力不足导致系统恢复时间延长至 60 min,依据式(1)计算,抗毁韧性分数下降至 81 分,降幅为 5 分。

4 抗毁韧性提升策略

基于 3.1–3.3 节对主备路由规划、主备倒换时间及机动接入时间对抗毁韧性影响程度的定量分析,本文提出以下优化方向:

4.1 优化主备路径规划,实现负载均衡

1)动态业务分流:将资源利用率过高干线上的部分业务迁移至低负载链路,缓解关键节点压力。

2)路径独立性强化:减少重要业务主备路径的公共边数量,降低级联故障风险,提升负荷分担效率。

3)网络负载均衡目标:通过物理层资源调度,使全网链路利用率方差最小化。

4.2 缩短系统反应时间,增强应急响应能力

1)资源预置机制:基于历史故障数据,对高可靠性业务预配置冷备资源。

2)常态化演练:定期模拟故障场景,优化资源启用流程,将平均倒换时间压缩至 2 min 以内。

3)迂回通信保障:确保预置资源可快速接管主用业务,降低关键业务中断时长。

4.3 提升机动接入效率,加速故障恢复

1)接替设备升级:优化节点接替车的业务配置协议与接口兼容性,支持多制式链路一键开通。

2)敏捷性指标:通过自动化部署技术,将系统恢复时间缩短至 30 min 以内。

3)应急抢通优先级:针对毁瘫节点承载的核心业务,制定分级恢复策略,确保战时通信韧性。

5 结束语

光纤通信传送网的抗毁韧性直接关系国防、民生等领域的关键业务连续性。本文通过明确定义抗毁韧性内涵,系统性解析其影响因素,并设计量化评估模型,为网络规划提供理论支撑。基于主备路由、倒换效率及机动能力的实证分析,提出针对性优化建议,相关结论可为高可靠通信网络建设与战时应急保障体系完善提供参考。

参考文献:

- [1] YUAN G, GAO Y, YE B. Optimal dispatching strategy and real-time pricing for multi-regional integrated energy systems based on demand response[J]. Renewable Energy, 2021, 179(7): 1424–1446.
- [2] LU Z M, GAO Y, XU C. Evaluation of energy management system for regional integrated energy system under interval type 2 hesitant fuzzy environment[J]. Energy, 2021, 222: 119860-1–119860-11.
- [3] 吴斌,谢书鸿. OPGW 光缆典型事故案例分析及反事故措施[J]. 电力系统通信, 2008, 29(1): 69–72.
- [4] 施继红,宗容,刘宇明,等. 电力通信网的抗毁性和拓扑优化研究[J]. 电力系统通信, 2009, 30(9): 11–13.
- [5] 张伽闻,高化猛,黄鹤至. 军用光纤传输系统抗毁性研究[J]. 信息工程大学学报, 2023, 24(6): 649–654.
- [6] ESTRADA E, HATANON, BCNZI M. The physics of communicability in complex networks[J]. Physics Reports, 2012, 514(3): 89–119.
- [7] 冀星沛,王波,董朝阳,等. 电力信息 - 物理相互依存网络脆弱性评估及加边保护策略[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1867–1873.
- [8] JI X, WANG B, LIU D, et al. Improving interdependent networks robustness by adding connectivity links [J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2016, 444: 9–19.
- [9] 孙娜,夏正云,施建强,等. 智能电网中基于复杂网络的电力光传输网抗毁性分析[J]. 应用科学学报, 2018, 36(6): 914–924.
- [10] 李凡,张杰勇. 指挥信息系统网络结构的韧性问题研究[J]. 电光与控制, 2020, 27(4): 49–54.
- [11] 李鸿旭,任科州,陶明恺,等. 韧性网络信息体系的研究现状及展望[J]. 指挥信息系统与技术, 2021, 12(2): 60–64.