

WDM网络中基于相关链路故障概率的LP-PP算法

徐俊, 彭俊丰, 王记红, 蔡伟珊

(广东第二师范学院 计算机学院, 广州 510303)

摘要:为了应对波分复用(WDM)网络中双链路故障导致的业务中断问题,并满足差异化可靠性需求,提出了一种基于相关链路故障概率(CLFP)的链路路径保护(LP-PP)算法。该算法通过动态分析链路故障关联性,为用户提供三级区分可靠性(DiR)保护服务,包括仅提供单一工作路径、链路级备份路径和全局备份路径3种模式。仿真实验采用ARPANET拓扑结构,对比分析了LP-PP、链路保护故障无关路径(LP-FIP)和共享路径保护(SPP)算法的性能。实验结果表明:LP-PP算法在保持高生存性的同时,显著降低了资源消耗;与LP-FIP算法相比,其备份资源比率(BRR)更低,业务阻塞率(BR)更优;与SPP算法相比,虽资源消耗略高,但提供了更强的容错能力。

关键词:共享链路保护;双链路故障;相关链路故障概率;区分可靠性;带宽阻塞率

中图分类号:TN929.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0094-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.017

LP-PP algorithm based on correlated link failure probability in WDM network

XU Jun, PENG Junfeng, WANG Jihong, CAI Weishan

(College of Computer, Guangdong University of Education, Guangzhou 510303, China)

Abstract: To address service interruptions caused by dual-link failures in wavelength division multiplexing (WDM) network and meet differentiated reliability requirements, a link-path protection (LP-PP) algorithm based on correlated link failure probability (CLFP) is proposed. By dynamically analyzing link failure correlations, the algorithm provides users with three-level differentiated reliability (DiR) protection services, including three modes: single working path only, link-level backup path, and global backup path. Simulation experiments using the ARPANET topology are conducted to compare the performance of LP-PP, link protection failure-independent path (LP-FIP), and shared path protection (SPP) algorithms. The results demonstrate that the LP-PP algorithm significantly reduces resource consumption while maintaining high survivability. Compared to the LP-FIP algorithm, it achieves a lower backup resource ratio (BRR) and better blocking rate (BR). Although it consumes slightly more resources than the SPP algorithm, it offers stronger fault tolerance.

Key words: shared link protection, dual-link failure, correlated link failure probability, differentiated reliability, bandwidth blocking rate

收稿日期:2024-04-02。

基金项目:国家自然科学基金项目(62306079)资助;广东省教育厅普通高校科研平台和科研项目(2021ZDZX3016)资助;广东第二师范学院校级博士人才科研启动专项(905001900300200033)资助;广东第二师范学院校级教学质量与教学改革工程项目(2021cyxy02)资助;广东省教育厅高等教育专项(2022GXJK287)资助。

作者简介:徐俊(1982—),男,江西抚州人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为大数据、人工智能和区块链。近年来,作为主要科研骨干参与国家、省、市级科技攻关项目多项,在国际、国内核心学术期刊发表学术论文40余篇,被SCI/EI索引10多篇。



0 引言

随着波分复用(WDM)光网络规模的扩大和拓扑结构的复杂化,光纤链路故障导致的业务中断问题日益突出,网络生存性成为关键挑战。传统研究主要聚焦于单链路故障保护^[1-2],并广泛采用共享备份路径方法以提高资源利用率。然而,在网络高负载和多链路交互场景下,双链路故障的发生概率显著增加,仅依赖单链路故障保护机制难以满足高可靠性需求。因此,研究针对双链路故障的保护设计具有重要的现实意义^[3-4]。

近年来,部分学者对双链路故障保护问题展开了

探索。例如,基于链路保护-故障无关路径(LP-FIP)^[5]保护法通过为工作路径的每条链路分配2条链路不相交的备份路径,实现100%的双链路故障保护;共享链路保护(SLP)^[6-9]和共享路径保护(SPP)^[10-11]因资源利用率高而成为主流算法,其中SPP通过为每个连接请求配置2条链路不相交的备份路径,可完全覆盖双链路故障。然而,路径保护法的故障处理延迟较高,而链路保护法虽恢复速度快,但灵活性不足,难以适应差异化可靠性需求。

为兼顾路径保护与链路保护的优势,本文提出一种基于相关链路故障概率(CLFP)^[12]的链路路径保护(LP-PP)算法。该算法通过动态分析链路故障关联性,为用户提供三级区分可靠性(DiR)^[13]保护服务。

1 保护问题的分析建模

为了准确描述传统SLP问题的数学模型,本文定义网络拓扑结构 G 中的符号如表1所示。

在LP-PP算法中,通过为不同连接请求动态适配差异化的生存性保障策略,可针对其可靠性需求为工作路径的每条链路配置以下3种保护机制之一:1)仅提供单一工作路径,如图1(a)所示;2)链路级备份路径:设置一条工作路径及对应的各链路保护路径(图中虚线),如图1(b)所示;3)全局备份路径:配置一条工作路径,同时为各链路部署专用保护路径并附加全局备份路径(图中虚线),如图1(c)所示。

2 可靠性计算

为了评估LP-PP算法的可靠性,本文引入了相关链路失效概率(CLFP)的概念,其定义为:在链路 l 失效的条件下,链路 f 失效的概率。CLFP是一个统计量,可通过长期监测目标网络的链路故障数据获得。

2.1 保护机制一

工作路径的可靠性计算基于其组成链路的可靠性。例如,在图1(a)中,源节点A到目的节点H的工

表1 网络拓扑结构 G 中的符号定义

符号	定义
N	网络 G 中的一组节点
L	网络 G 中的一组链接
L_{ij}	节点对 $[i, j]$ 之间的双向光纤链路,其中 $i, j \in N, L_{ij} \in L$
w_{st}	节点对 $[s, t]$ 的工作路径 $[s, t], s, t \in N$
b_{st}^x	若保护机制基于路径保护,则该变量表示第 x 条备份路径的链路集合;若保护机制基于链路保护,则该变量表示工作路径上第 x 条链路的备用路径集合
$b_{st}^{x,ef}$	链路 L_{ef} 的第 x 个备份路径包括的 $L_{ef}(L_{ef} \in w_{st})$ 用于链路相关保护算法的链路集, $b_{st}^{x,ef} \in b_{st}^x$
$F(X)$	X 失效概率
$R(X)$	X 可靠性概率 $R(X) = 1 - F(X)$
R_i	用户 i 的可靠性要求

作路径 w_{AH} 的可靠性概率可通过式(1)计算,即对各链路(如 $L_{AE}, L_{EF}, L_{FG}, L_{GH}$)的可靠性概率进行联合评估。式(1)适用于1级保护的可靠性计算。

$$R(w_{AH}) = \prod_{L_{ij} \in w_{AH}} R(L_{ij}) = R(L_{AE}) \times R(L_{EF}) \times R(L_{FG}) \times R(L_{GH}) \quad (1)$$

2.2 保护机制二

在图1(b)中,需计算工作路径及其各链路的备份路径的联合可靠性概率 $R(b_{AH}^1 \cup L_{AH})$ 。2级保护的可靠性计算如式(2)所示。

$$R(b_{AH}^1 \cup L_{AH}) = 1 - F(b_{AH}^1 \cap L_{AH}) = 1 - \max_{L_{ij} \in w_{AH}} (F(b_{AH}^{1,ij} \cap L_{ij})) \quad (2)$$

2.3 保护机制三

在图1(c)中,由于3级保护的可靠性概率 $R(b_{AH}^1 \cup b_{AH}^2 \cup w_{AH}) = 1 - F(b_{AH}^1 \cap b_{AH}^2 \cap w_{AH})$,因此只需要计算出 $F(b_{AH}^1 \cap b_{AH}^2 \cap w_{AH})$ 就可以计算出保护机制三的可靠性。 $F(b_{AH}^1 \cap b_{AH}^2 \cap w_{AH})$ 可以通过式(3)计算。

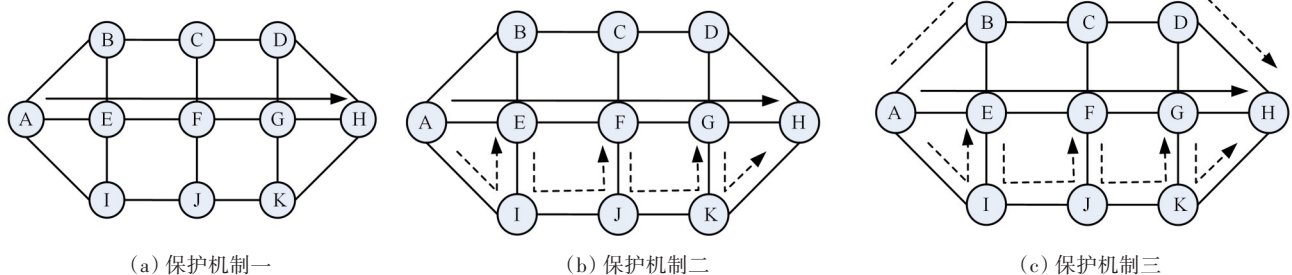


图1 LP-PP算法的3种保护机制

$$F(b_{AH}^1 \cap b_{AH}^2 \cap w_{AH}) = \max_{b_{AH}^{1,ik} \in b_{AH}^1, L_{ik} \in w_{AH}} (F(b_{AH}^{1,ik} \cap b_{AH}^2 \cap L_{ik})) \quad (3)$$

根据式(3),可以得到3级保护的可靠性概率如式(4)所示。

$$R(b_{AH}^1 \cap b_{AH}^2 \cap w_{AH}) = 1 - \max_{b_{AH}^{1,ik} \in b_{AH}^1, L_{ik} \in w_{AH}} (F(b_{AH}^{1,ik} \cap b_{AH}^2 \cap L_{ik})) \quad (4)$$

3 LP-PP 算法

对于源节点 A 和目的节点 H 的连接请求, LP-PP 算法按以下步骤分配工作和备份路径:

1) 工作路径分配: 使用 Dijkstra 算法在光网络 G (不支持波长变换) 中计算一条最短工作路径, 并采用 Random 算法分配波长资源。若成功为业务请求分配工作路径和波长, 则检查该路径的可靠性是否满足用户可靠性要求 R_i 。若 $R(w_{AH}) \geq R_i$, 则记录路由和波长分配信息; 否则, 执行步骤2)。若分配不成功, 则阻塞连接请求, 并返回分配失败。

2) 链路级备份路径分配: 使用 Dijkstra 算法为工作路径的每条链路计算备份路径集, 并采用 Random 算法分配波长资源。若成功为所有链路分配备份路径和相应波长资源, 则检查工作路径与备份路径集的联合可靠性。若 $R(b_{AH} \cap w_{AH}) \geq R_i$, 则记录路由和波长分配信息; 否则, 执行步骤3)。若备份路径分配失败, 则阻塞连接请求, 并返回分配失败。

3) 全局备份路径分配: 使用 Dijkstra 算法为工作路径计算一条完整备份路径, 并采用 Random 算法分配波长资源。若成功分配完整备份路径和相应波长资源, 则检查工作路径与备份路径的联合可靠性。若 $R(b_{AH}^1 \cap b_{AH}^2 \cap w_{AH}) \geq R_i$, 则记录路由和波长分配信息并返回成功; 否则, 返回失败。若备份路径分配失败, 则阻塞连接请求, 并返回分配失败。

4 仿真结果与分析

本文采用图2所示的 ARPANET 拓扑结构进行仿真验证。实验环境设置如下: 每根光纤支持16个波长且不支持波长转换; 所有算法处理的工作总量和任务完全一致; 参考文献[12-13], 设置各链路可靠性在 [0.94, 1] 区间均匀分布, 链路对的 CLFP 从预设集合 {0.95, 0.75, 0.55, 0.35} 中随机选取。为评估算法性能, 选取以下2个关键指标进行对比分析: 备份资源比率(BRR, 定义为总备份资源与总工作资源的比值)、业务阻塞率(BR, 定义为被拒绝业务请求数与总发起业

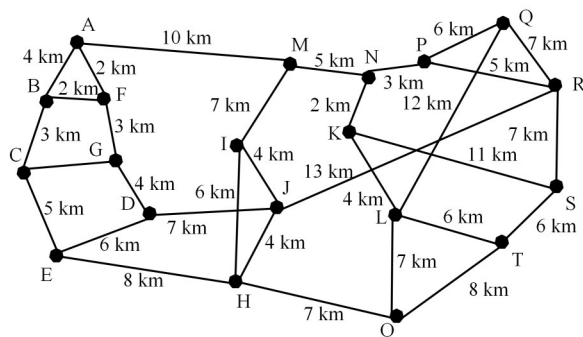


图2 ARPANET 拓扑结构

务请求数的比值)。

实验设置2种不同级别的连接用户可靠性要求 ($R_i=95\%$ 和 $R_i=100\%$), 采用静态递增的业务负载模式。通过仿真实验, 分别获取了 LP-PP、LP-FIP 和 SPP 这3种算法的 BRR、BR 性能曲线 (如图3、图4所示) 以及资源利用率(RUR)的性能表现 (如图5、图6所示)。

从图3可以看出, SPP 算法的 BRR 处于最低水平,

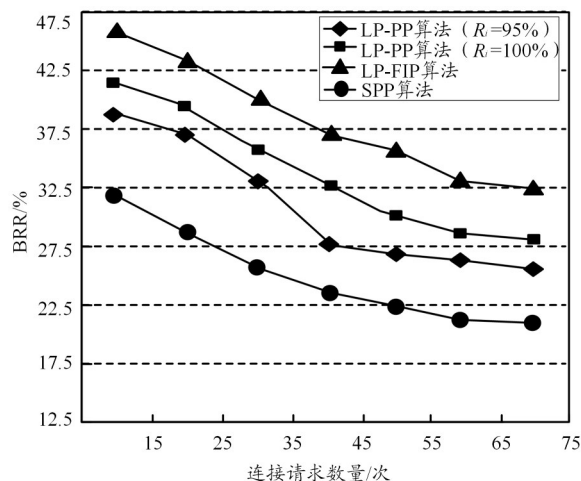


图3 LP-PP、LP-FIP 和 SPP 算法的 BRR 与连接请求负载关系图

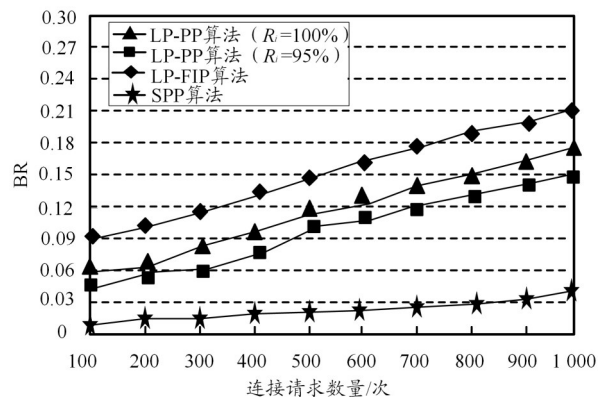


图4 LP-PP、LP-FIP 和 SPP 算法的 BR 与连接请求负载关系图

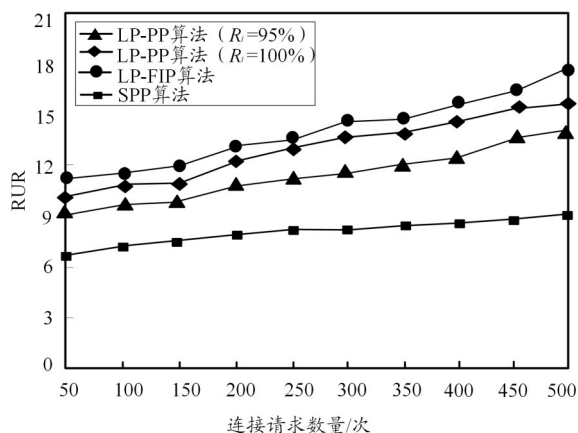


图5 业务负载为50~500次时,LP-PP、LP-FIP和SPP算法的RUR与连接请求负载关系图

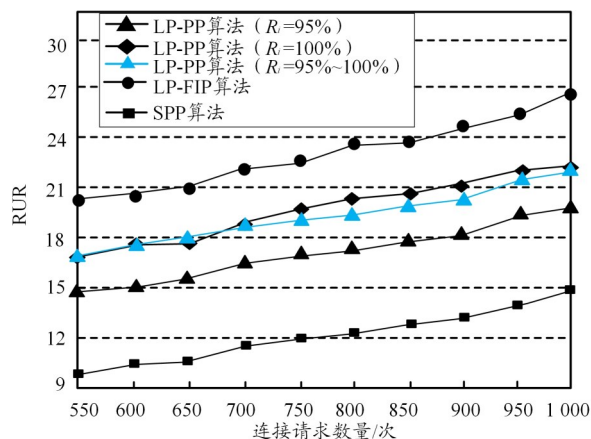


图6 业务负载为550~1000时,LP-PP、LP-FIP和SPP算法的RUR与连接请求负载关系图

这归因于其仅为工作路径提供2条链路不相交的备份路径,但相应地需要更长的恢复时间。相比之下,LP-FIP算法的BRR最高,这是由于该算法为工作路径上的每条链路均配置了2条链路不相交的备份路径。随着 R_i 的提升,LP-PP算法的BRR呈现上升趋势。这种现象源于更高的可靠性需求会促使连接需要配置更多的备份路径和备份资源,从而导致RHR降低。

从图4可以看出,SPP算法的BR最低。在 $R_i=95\%$ 的情况下,相较于 $R_i=100\%$ 时,由于提供的可靠性较低,LP-PP算法所需资源消耗较少,因而BR更低。这一现象表明,可靠性与BR之间存在相互制约的关系:算法对可靠性的要求越高,BR相应也会上升。此外,由于LP-PP算法结合了共享通道的优势,其资源开销相对较低,因此BR低于LP-FIP算法。BR的降低意味着成功建立的连接数量增加,但通常会伴随BRR的上升。

从图5可以看出,LP-PP($R_i=100\%$)算法作为路径

保护与链路保护的折中算法,其RUR值低于纯链路保护的LP-FIP算法,表明其资源消耗更少。而LP-PP($R_i=95\%$)算法由于可靠性要求较低,所需资源进一步减少,因此其RUR值低于LP-PP($R_i=100\%$)算法和LP-FIP算法。相比之下,SPP算法的RUR最低,因其仅需为工作路径提供2条不相交的链路备份路径,资源消耗最少。然而,该算法的容错能力有限——在多链路故障场景下,若2条备份路径同时失效,将导致服务中断。

为深入评估算法在重负载条件下的RUR,实验模拟了连接请求次数从550~1000的业务场景。从图6可以看出,SPP算法的RUR值随业务负载增长始终显著低于LP-PP($R_i=100\%$)、LP-PP($R_i=95\%$)和LP-FIP算法,这一结果验证了SPP算法在资源利用率方面的固有优势。相比之下,LP-FIP算法的RUR值在4种算法中最高,且随业务量增加呈现更显著的上升趋势。对比LP-PP算法的2种配置可发现:当可靠性要求提升至 $R_i=100\%$ 时,其RUR值明显高于 $R_i=95\%$ 的情况,表明更高的可靠性需求会导致更大的资源消耗。当LP-PP算法在业务连接请求可靠性要求在95%~100%随机分布时($R_i=95\%\sim 100\%$),LP-PP算法同样随着业务负载的增加RUR值增加,但始终维持在低于LP-FIP算法而高于SPP算法的区间。

5 结束语

本文针对光WDM网络中的双链路故障生存性问题展开研究,提出了一种LP-PP算法。该算法能够根据不同的双链路故障可靠性需求,提供差异化的DiR保护服务。理论分析与仿真实验结果表明:相较于LP-FIP算法,LP-PP算法在保持同等生存能力的前提下,可显著降低资源消耗;而与SPP算法相比,LP-PP算法虽需占用略多资源,但能提供优越的网络生存性保障。

参考文献:

- [1] WEI X T, LI L M, YU H F. An improved lightpath allocation for grade of services in survivable WDM mesh networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(10): 2391-2397.
- [2] DAO T H, THANH D. An optimal design framework for 1 + 1 routing and network coding assignment problem in WDM optical networks[J]. IEEE Access, 2017(5): 22291-22298.
- [3] AGRAWAL G, MEDHI D. Embedding IP unique shortest path topology on a wavelength-routed network: normal and survivable design[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking 2016, 24(2): 1109-1124.

徐俊, 彭俊丰, 王记红, 等: WDM网络中基于相关链路故障概率的LP-PP算法

- [4] SUE C C. Locally reconfigurable p-cycle networks for dual-failure restoration[J]. Photonic Network Communications, 2009, 17: 129–144.
- [5] RAMASUBRAMANIAN S, CHANDAK A. Dual-link failure resiliency through backup link mutual exclusion[J]. IEEE/ACM Network, 2008, 16(1): 157–169.
- [6] SUE C C. Locally reconfigurable p-cycle networks for dual-failure restoration[J]. Photonic Network Communications, 2009, 17: 129–144.
- [7] YIN S, HUANG S, GUO B, et al. Shared-protection survivable multipath scheme in flexible-grid optical networks against multiple failures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(2): 201–211.
- [8] HAN X Y, MING X R, KANG Q Y, et al. Survivable virtual network link shared protection method based on maximum spanning tree[J]. IEEE Access, 2019(7): 92137–92150.
- [9] ALGIN G B, TUNALI E T. A comparative study on the effect of strategy selection on shared backup in WDM MLR optical networks[J]. IEEE Access, 2020(8): 47161–47176.
- [10] KODAMA T, NAKAGAWA T, MATSUMOTO R. Any-double-link failure tolerant bypass/backup switchable WDM-PON employing path-pair shared protection and bidirectional wavelength pre-assignment[C]// IEEE. Proceedings of 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego: IEEE, 2022: 1–3.
- [11] TANG F, SHEN G, ROUSKAS G N. Crosstalk-aware shared backup path protection in multi-core fiber elastic optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(10): 3025–3036.
- [12] LUO H, LI L, YU H. Routing connections with differentiated reliability requirements in WDM mesh networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(1): 253–266.
- [13] CAO J, GUO L, YU H, et al. Dynamic segment shared protection algorithm for reliable wavelength division multiplexing mesh networks[J]. Optics Express, 2005, 13(8): 3087–3095.