引用本文：李青山，盛龙，李磊. 一种面向双故障恢复的可编程网络增长规划方法[J]. 光通信技术，2022，46(4)：97-100.

一种面向双故障恢复的可编程网络增长规划方法

李青山[1]，盛 龙[1]，李 磊[2]

（1.信息系统工程重点实验室，南京 210023；2.中国人民解放军 31106 部队）

摘要：对于具有超高抗毁要求的网络，如何通过增量规划配置方式部署资源以提升其业务的动态可恢复性，提出了一种面向双链路故障的组合式网络增长规划算法（简称 CA-DF 策略），建立了整数线性规划（ILP）模型，并进行了仿真计算。仿真结果表明：CA-DF 策略能在添加尽量少的网络资源情况下有效提升业务双链路故障下的动态恢复率。

关键词：光网络；可编程网络；网络生存性；增长型网络设计

中图分类号：TN914　**文献标志码**：A　**文章编号**：1002-5561(2022)04-0097-04

DOI：10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.018　**开放科学（资源服务）标识码（OSID）**：

Programmable network growth planning method for dual fault recovery

LI Qingshan[1], SHENG Long[1], LI Lei[2]

(1. Key Laboratory of Information System Engineering, Nanjing 210023, China; 2. Troops 31106 of the PLA)

Abstract: With ultra-high invulnerability of the requirements of the network, how to use incremental deployment of resources in order to enhance their business planning configuration way dynamic recoverability, a combined network growth planning algorithm for dual link faults(CA-DF strategy) is proposed, integer linear programming(ILP) model is established, and a simulation calculation was carried out. The simulation results show that CA-DF strategy can effectively improve the dynamic recovery rate under dual-link failure while adding as few network resources as possible.

Key words: optical network, programmable network, network survivability, incremental network design

0 引言

光网络因具有超高的传输速率，成为当前城域网和骨干网的主要传输手段，在军事领域也被广泛应用。但是，其超高传输速率使得网络链路故障会导致大量的信息丢失。其中，易受到毁伤的军用网络对生存性和韧性的要求较高[1-2]，在推动新型信息基础设施规划建设中（特别是军事领域），需要重点考虑网络的抗毁生存性问题[3]。

基于软件定义网络（SDN）、网络功能虚拟化（NFV）等技术的可编程网络通过引入能够实现网络参数自动配置、资源状态动态同步的控制平面[4-5]，在网络发生故障时能够自动恢复，也为实现区域内网络节点或者链路在临时条件下的快速增长型规划部署提供了有利条件。当网络业务需求、应用情境等发生变化时，可以即插即用式增量部署新的资源，提升网络通信传输效率及生存性等性能。为保证发生故障时网络业务的服务质量（QoS），各种生存性策略被提出[6-7]。其中，在具有快速资源按需分配和释放能力的可编程网络中，资源使用效率较高的重路由策略（Restoration）受到普遍重视[6-8]。然而，当部分链路发生故障，使得网络难以保持 2-连通时，网络的生存性极大降低。在这种情况下，需要以提升网络的生存性能为重要优化目标对网络进一步的资源配置。因此，针对提升网络生存性能的增长型设计算法成为当前研究的重点[9]。

本文从提升具有自动恢复能力的可编程网络在双链路故障下的恢复率出发，研究对网络进行增长规划的方法，提出一种在网络中基于预计算重路由的故障无关（FID）重路由和故障相关（FD）重路由策略的组合式网络增长型设计算法（简称 CA-DF 策略），最大化地提升网络业务在双链路故障下的恢复率。

收稿日期：2022-03-08。

作者简介：李青山（1986—），男，河南许昌人，博士，高级工程师，中国电科 28 所信息系统工程重点实验室副主任。主要研究方向是指挥信息系统体系架构设计、智能信息网络规划管理和智能体系运行评估。负责完成和即将完成创新课题 10 余项；获省部级科技进步二等奖 2 项。



1 问题描述与 CA-DF 策略

在 SDN、NFV 等可编程网络中，由于引入了控制平面，可以通过分布式控制器对业务在网络中的传输路径及所需要经过的每一条链路上的信道资源（时隙或者波长等）进行软件定义式的动态组织分配。当网络发生故障后，可以通过链路保护、自动重路由等机制进行快速恢复，网络示例如图 1 所示。然而，当网络拓扑连通度不够高时，针对故障（特别是多个故障）的恢复率就会下降，这时需要对网络进行增长规划。

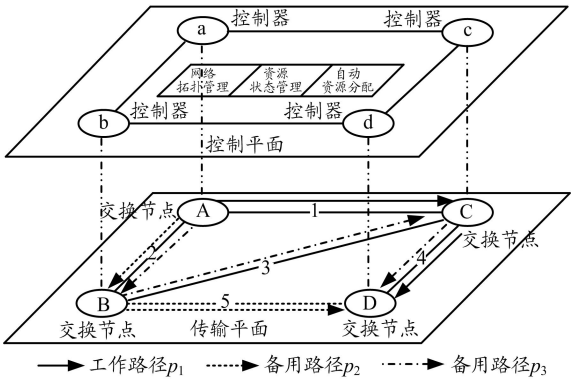


图 1 网络示例

CA-DF 策略是通过 FID 重路由与 FD 重路由相结合来抵御网络双链路故障。FID 重路由策略是通过备用路径与工作路径的不相关性来确定网络链路增长方案，并保证最大化网络业务双链路故障下的恢复率来规划网络链路上的带宽容量。具体描述如下：用 $G(N,L)$ 表示原网络拓扑，其中 N 为节点集合，L 为链路集合；D 表示网络中的业务；$m_r(r\in D)$ 表示业务 r 所需要的带宽容量。CA-DF 策略具体内容包括：①添加新的光纤链路；②扩大现有链路上的容量。

CA-DF 策略具体计算如下：首先，设置可以添加至网络的备选链路，用集合 ΔL 来表示（图 1 中虚线链路 5）。将 ΔL 中的链路加入网络，组成增广的网络拓扑。然后，在增广拓扑上执行 CA-DF 策略，针对 2 个故障分 2 步进行计算。计算过程如下：

CA-DF-Step1：在增广拓扑上为网络中的业务计算与工作路径链路不相关的 FID 重路由，提供备用路径，以使业务在发生第一个网络故障时能够恢复。在进行资源分配时，占用尽量少的备选链路和网络资源，为尽量多的业务提供备用路径。

CA-DF-Step2：在 CA-DF-Step1 的基础上，若网络故障再次发生时，如果业务被中断且无法恢复，则为其计算 FD 重路由路径来恢复业务。

图 1 中，若从节点 A 到节点 D 的业务 r，其工作路径为路径 p_1，即 A→C→D，需要占用的带宽容量为 m_r；链路 5 为备选链路。则在 CA-DF-Step1 中，在增广拓扑上为 r 分配 FID 重路由备用路径 p_2，即 A→B→D。当链路 1 或者链路 4 发生故障导致 r 中断时，可采用可编程网络的控制平面快速按照路径 p_2 建立通道进行恢复。然而，路径 p_2 的建立需要经过链路 5，因此为了提高 r 的生存性等级，链路 5 需要加入到网络中，且各链路上占用的带宽容量为 m_r。CA-DF-Step2 中，考虑网络中所有的双链路故障场景，并为路径 p_1 和路径 p_2 中断的故障场景提供 FD 重路由备用路径。如链路 1、链路 4 发生故障时，在 CA-DF-Step1 中分配的保护路径 p_2 仍能工作，此时不需要为业务分配额外的资源；如果链路 1、链路 5 发生故障，则需要为业务分配此故障场景下的恢复路径。计算发现路径 p_3，即 A→B→C→D 用来恢复业务，业务在此双链路故障情况下仍能进行传输。故通过此种方式，可大大改进网络发生双链路故障时的业务恢复率。

以上分析可知，CA-DF-Step2 中所计算的 FD 重路由恢复路径可以与业务工作路径和在 CA-DF-Step1 中计算的 FID 保护路径经过相同的链路，且发生故障链路的不同，分配的路径也不同。当该故障场景发生后，则可通过智能网络控制平面按照已计算好的路径快速建立连接，恢复业务。

2 数学模型建立

CA-DF 策略的整数线性规划（ILP）模型包括 CA-DF-Step1 数学模型、CA-DF-Step2 数学模型。

2.1 CA-DF-Step1 数学模型

输入变量除了 L、N、D、ΔL 及 $m_r(r\in D)$ 外，还需要以下输入值：

①$\alpha^r(r\in D)$：表示业务 r 现有工作路径的二进制行向量。向量中的元素 $\alpha_j^r(j\in L\cup\Delta L)$ 为二进制数。若业务 r 的工作路径经过链路 j，则 $\alpha_j^r=1$。

②$B^r(r\in D)$：为业务 r 预先计算好的备用路径集。B^r 中的路径采用 k 条最短路算法计算[12]，均与工作路径 α^r 链路不相关。

③A：常数，表示网络中可新添加的最多的链路数。

④$\beta_j^{r,b}(r\in D,b\in B^r,j\in L\cup\Delta L)$：二进制变量，表示集合 B^r 中的第 b 条备选路径是否经过链路 j。

输出变量如下：

①h_j：链路 $j(j\in L\cup\Delta L)$ 上所占用的带宽容量。

②$v_j(j\in\Delta L)$：二进制变量。v_j=1 表示第 j 条备选链路上承载有业务，故需加入网络；

③$x^{r,b}$：二进制变量。$x^{r,b}$=1 表示业务 $r(r\in D)$选取集合 B^r中的第 b 条备选路径作为其备用路径。

复合优化目标 G 为

$$G=\max\eta_2\sum_{r\in D}\sum_{b\in B^r}x^{r,b}-\eta_1\sum_{j\in\Delta L}v_j-\sum_{j\in L\cup\Delta L}h_j \tag{1}$$

其中，$\eta_2\gg\eta_1\gg1$，表示 3 个优化目标的优先级，η_2、η_1为优化目标的权值。

限制条件有

$$\sum_{b\in B^r}x^{r,b}\leqslant1,\ \forall r\in D \tag{2}$$

$$\sum_{r\in D}m_r\left(\sum_{b\in B^r}x^{r,b}\beta_j^{r,b}\alpha_i^r\right)+\sum_{r\in D}\alpha_i^r\leqslant h_j,\quad i\in L,j\in L\cup\Delta L \tag{3}$$

$$\sum_{r\in D}\sum_{b\in B^r}x^{r,b}\beta_j^{r,b}\leqslant|D|v_j,j\in\Delta L \tag{4}$$

$$\sum_{j\in\Delta L}v_j\leqslant A \tag{5}$$

式(1)中的优化目标有 3 个：①最大化网络中可提供 FID 重路由备用路径的业务数；②最小化需要添加的链路数；③最小化占用的资源数。式(2)表示为尽可能多的业务分配一条链路不相关的备用路径。式(3)为计算每条链路上所占用的容量。式(4)表示如果备选链路上承载了业务，那么该备选链路需要被加入网络当中。式(5)保证了新加入网络的链路条数不超过限制。

2.2 CA-DF-Step2 数学模型

CA-DF-Step2 中，需要根据网络双链路故障的各种故障场景，为各个被中断业务分配 FD 的恢复路径。在其 ILP 模型中，CA-DF-Step1 中的输出结果需要作为 CA-DF-Step2 的输入。

从 CA-DF-Step1 中拣选出的新链路加入网络组成新网络拓扑 $G'(N,L')$，其中 $L'=L\cup\{j|j\in\Delta L,v_j=1\}$。而每一条链路 $j(j\in L')$中已经被占用的容量 h_j 和以下数据作为输入变量：

①D_P：所有在 CA-DF-Step1 中能找到备用路径的业务所组成的集合。故 $D_P=\left\{r|r\in D,\sum_{b\in B^r}x^{r,b}=1\right\}$。同样地，定义 $D_U=\left\{r|r\in D,\sum_{b\in B^r}x^{r,b}=0\right\}$。

②$\hat{\beta}_j^r(r\in D_p,j\in L')$：二进制指示量。若为 1，表示业务 r 的备用路径经过了链路 j。

③$H^{r,l,m}(r\in D,l\in L',m\in L',m\neq l)$：业务 r 预先计算的当链路 l 和 m 发生故障时的备选路径集合；其中包含的路径能传输业务 r 且不经过链路 l 和 m。

④$\gamma^{r,l,m,b}(r\in D,l\in L',m\in L',m\neq l,b\in H^{r,l,m})$：二进制向量，表示 $H^{r,l,m}$中的第 b 条路径。

输出变量如下：

①$y^{r,l,m,b}(r\in D,l\in L',m\in L',m\neq l,b\in H^{r,l,m})$：二进制变量，表示当链路 l 和 m 发生故障时，业务 r 是否选择 $H^{r,l,m}$中的第 b 条路径作为其 FD 恢复路径。

②$g_j(j\in L')$：链路 $j(j\in L')$上被占用的容量。

复合优化目标 H 为

$$H=\min\eta_3\left\{\sum_{r\in D_p}\sum_{l\in L'}\sum_{m\in L'}(\alpha_l^r\hat{\beta}_m^r+\alpha_m^r\hat{\beta}_l^r)(1-\sum_{b\in H^{r,l,m}}y^{r,l,m,b})+\sum_{r\in D_u}\sum_{l\in L'}\sum_{m\in L'}(1-(1-\alpha_l^r)(1-\alpha_m^r)(1-\sum_{b\in H^{r,l,m}}y^{r,l,m,b}))\right\}+\sum_{j\in L'}g_j \tag{6}$$

限制条件有

$$\sum_{b\in H^{r,l,m}}y^{r,l,m,b}\leqslant\alpha_l^r\hat{\beta}_m^r+\alpha_m^r\hat{\beta}_l^r,r\in D_p,m\in L',m\neq l \tag{7}$$

$$\sum_{b\in H^{r,l,m}}y^{r,l,m,b}\leqslant1-(1-\alpha_l^r)(1-\alpha_m^r),r\in D_u,m\in L',m\neq l \tag{8}$$

$$\sum_{r\in D}m_r\left(\sum_{b\in H^{r,l,m}}y^{r,l,m,b}\gamma_j^{r,l,m,b}\right)+h_j\leqslant g_j,m\in L',m\neq l \tag{9}$$

式(6)中的优化目标有 2 个：①最小化网络中发生双链路故障时无法恢复的业务个数，包含：当 $r\in D_P$，如果链路 l 和 m 上的故障使得 2 条路径同时中断，且此时无法为其分配此故障场景下的 FD 重路由恢复路径，则业务彻底中断；当 $r\in D_U$，如果工作路径被某一个故障中断，且无法为其分配此故障场景下的 FD 重路由恢复路径，则业务无法恢复；②最小化网络中占用的容量。式(7)和式(8)表示业务在故障场景(链路 l 和 m 故障) 下被中断时为其选择此故障场景下的 FD 重路由恢复路径。式(9)表示提供 FD 备选路径时需要占用的网络资源。

以上模型适用于时隙交换光网络和波长交换光网络。若为时分网络(如 SDH)，则网络链路资源单位为VC-4；波分复用(WDM)网络的链路资源单位则为波长。

3 仿真结果

本文采用 CPLEX 软件在网络拓扑上验证 FID 重

路由策略和 CA-DF 策略的性能，网络拓扑如图 2 所示。拓扑共 23 节点 30 条链路，设置 8 条备选链路，并产生了 32 个业务及其工作路径，得到仿真结果如表 1 所示。事实上，仅采用 FID 重路由（即仅执行 CA-DF-Step1），即可确定网络新链路添加方案。

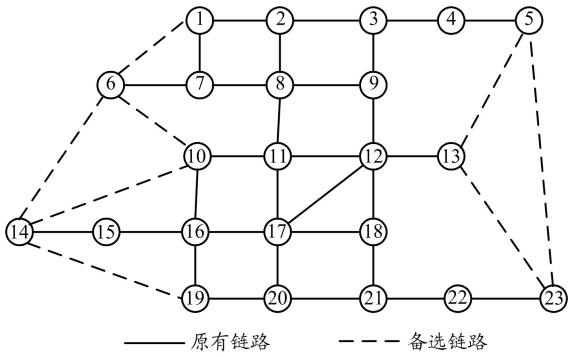


图 2 仿真网络拓扑

表 1 仿真结果

可添加链路数	业务工作路径所占用资源	采用 FID 重路策略由进行增长设计			采用 CA-DF 策略进行增长设计	
		单链路故障下的恢复率	双链路故障下的恢复率	所占用网络资源	双链路故障下的恢复率	所占用的网络资源
0	232	37.5%	23.8%	292	60.6%	624
1	232	65.6%	48.3%	347	70.4%	665
2	232	93.7%	68.3%	424	87.8%	673
3	232	96.8%	77.3%	400	87.2%	631
4	232	100.0%	79.6%	385	96.7%	582

从表 1 可以看出，随着可添加链路数的增多，网络中业务的可生存性（单链路故障恢复率及双链路故障恢复率）迅速提升。在 CA-DF-Step1 中，增广拓扑上采用可添加链路受限的 FID 重路由策略，便可以有效地确定最大化网络中可提供 FID 恢复路径的业务数（第 3 列）且占用资源非常少（第 5 列）的新链路添加方案。然而，仅采用 FID 重路由策略进行增长设计，业务在双链路故障下的恢复率比较低（第 4 列）。采用 CA-DF 策略可大大提升网络业务双链路故障下的恢复率（第 6 列），但占用资源较多（第 7 列）。这证明了 CA-DF 策略的有效性。同时，两步法的 CA-DF 策略也提供了灵活的可选择性：当网络中可用资源较少时，可选择仅采用 CA-DF-Step1 进行网络增长设计。

此外，第 6 列中添加 3 条链路时的恢复率（87.2%）还不如添加 2 条链路时的恢复率（87.8%），这是因为 ILP 模型有 2 个目标：最大化恢复率和最小化网络占用资源。当添加链路为 3 条时，为了节省网络资源，造成恢复率略有下降。

4 结束语

本文研究了可编程光网络中面向网络可生存性提升的增长型设计问题，提出了可使网络向着抵御双链路故障的结构演进的 CA-DF 增长型设计策略。通过建立数学模型和仿真计算可知，CA-DF 策略能有效地拣选和配置网络中需要添加的网络链路和资源，以提高网络双链路故障下的恢复率。

参考文献：

[1] YIN S, HUANG S, LIU H, et al. Survivable multipath virtual network embedding against multiple failures for SDN/NFV[J]. IEEE Access, 2018 (6): 76909-76923.

[2] 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，2021，2(12)：60-64.

[3] 张刚宁，赵宇，裴晔晔，等. 新型军事信息基础设施体系化发展[J]. 指挥信息系统与技术，2021，12(6)：1-6.

[4] XIA W, WEN Y, FOH C H. A survey on software-defined networking. Communications Surveys & Tutorials IEEE, 2015, 17(1): 27-51.

[5] 魏翼飞，李莉. 面向能效的可编程网络关键技术探讨[J]. 移动通信，2016，40(10)：18-23.

[6] 张引. 弹性光网络中的保护恢复技术研究[D]. 北京：北京邮电大学，2014.

[7] GIORGETTI A, PAOLUCCI F, CUGINI F, et al. Dynamic restoration with GMPLS and SDN control plane in elastic optical networks [Invited][J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7 (2): A174-A182.

[8] KANAI T, SENOO Y, ASAKA K, et al. Novel automatic service restoration technique by using self-reconfiguration of network resources for a disaster-struck metro-access network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(8): 1516-1523.

[9] MEUSBURGER C, SCHUPKE D. Rerouting of 1+1 optical channels: cost benefits for incrementally planned networks[EB/OL]. [2022-03-08]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=584d7acc64ef9c95c5de57dcc08dc7ed&site=xueshu_se.