

基于广义网络温度的链路备份方法研究

傅鲁奇, 王昌达

(江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 链路故障是指由软硬件故障等因素引起的网络故障问题, 使得节点之间无法通信, 影响网络服务质量。为实现链路故障的快速恢复, 避免链路拥塞, 均衡网络负载, 提出一种基于广义网络温度的链路备份方法 LBM-GNT。该方法主要有3个步骤: ①利用 GNT 和介数中心度计算节点重要度, 根据节点重要度划分节点类型; ②基于已划分的节点类型对链路进行分类; ③构建备份路径的多目标优化模型, 并设计 BPS 算法求解备份路径。实验结果表明, LBM-GNT 方法平均带宽利用率的均值相较于已知的 IML、FLR 方法分别降低了 2.58% 和 2.67%, 且 LBM-GNT 方法的链路备份路径长度之和更低, 优于 IML 和 FLR 方法。

关键词: 故障链路恢复; 广义网络温度; 节点重要度; 链路分类; 多目标优化

DOI: 10.11907/rjdk.241293

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2025)005-0146-08



Research on Link Backup Method Based on Generalized Network Temperature

FU Luqi, WANG Changda

(School of Computer Science and Communication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Link failure is a network failure problem caused by factors such as hardware and software failures, which makes the nodes unable to communicate with each other and affects the network service quality. To achieve rapid recovery of fault links, avoid link congestion, and balance network loads, this paper proposes a link backup method based on Generalized Network Temperature (GNT), termed LBM-GNT (Link backup method based on generalized network temperature). The method comprises three main steps. Firstly, it calculates node importance using GNT and betweenness centrality, and categorizes nodes based on their importance. Secondly, it classifies links based on the categorized node types. Lastly, it constructs backup paths using a multi-objective optimization model and a Backup Path Selection (BPS) algorithm. Experimental results demonstrate that the LBM-GNT method reduces the mean bandwidth utilization by 2.58% and 2.67% compared to the known IML and FLR methods, respectively. Additionally, the sum of link backup path lengths of the LBM-GNT method is lower, which is better than that of the IML and FLR methods.

Key Words: failed link recovery; generalized network temperature; node importance; link classification; multi-objective optimization

0 引言

当前, 人们对于高质量的网络服务需求日渐高涨, 而网络故障会对网络的可靠性与服务质量造成巨大影响。链路故障作为网络故障的一种, 是由硬件故障、软件错误、网络拥塞等因素引起, 当链路故障发生时, 受影响的节点之间将无法正常通信, 导致网络服务中断或性能下降^[1]。在传统网络中, 故障链路检测与恢复的过程复杂, 效率较

低。而软件定义网络(Software Defined Network, SDN)的出现, 提高了故障链路检测与恢复效率。

SDN作为一种新型的网络架构, 通过将网络的控制平面与数据平面分离, 并通过集中式控制器对网络进行统一管理^[2]。在SDN网络中, 网络管理员可以通过网络管理中心, 实现对整个网络的集中管理和动态控制, 网络能够根据实际需求动态调整网络拓扑、路由策略等, 从而适应不断变化的业务需求^[3]。虽然SDN提高了网络管理效率, 但是由于在SDN网络中控制平面和数

收稿日期: 2024-03-25

扫描二维码阅读全文:

基金项目: 国家自然科学基金项目(62072217)

作者简介: 傅鲁奇(1998-), 男, 江苏大学计算机科学与通信工程学院硕士研究生, 研究方向为网络安全与网络可靠性; 王昌达(1971-), 男, 博士, 江苏大学计算机科学与通信工程学院教授、博士生导师, 研究方向为网络安全。本文通讯作者: 王昌达。



据平面分离,链路故障不仅会影响数据平面内转发节点之间的通信,而且会影响到控制器与数据平面之间的通信,导致网络无法正常运行。此外,SDN网络中的动态路由和流量调度也可能受到链路故障的影响,进而影响到整个网络的性能。

因此,针对SDN网络中的故障链路问题,研究人员开展了大量相关研究,包括故障链路检测、故障链路恢复等,这些研究可以最大程度地减少链路故障对网络的负面影响,保证网络的可靠性和稳定性^[4]。目前,故障链路恢复方法可分为两种:被动式链路重路由方法和主动式链路备份方法。前者要求SDN网络中的集中控制器在监测到链路故障后,重新为经过故障链路的数据流计算新的转发路由,并将新的转发规则下发至SDN交换机。虽然该方法灵活,无需浪费额外的交换机存储资源,但相关研究发现,被动式方法难以在最高不超过50 ms传输延迟的电信标准下完成链路故障恢复工作^[5],因而该方法只适用于对时延不敏感的应用场景^[6]。而主动式链路备份方法则要求SDN控制器预先为网络中的链路计算备份路径,并将备份链路的转发规则提前安装到SDN交换机中。因此,当链路出现故障时,无需控制器重新计算路由,直接启用备份路径即可迅速恢复网络功能,因而该类型方法适用场景广泛,目前已经成为主流研究方向。

1 相关工作

主动式链路备份方法需要预先在交换机的流表中存储转发规则,这将消耗成本昂贵的TCAM(Ternary Content Addressable Memory)存储资源,且添加新的转发规则时,可能出现流表溢出的情况,影响网络可靠性。此外,由于链路备份方法应用于故障链路恢复场景,因而需将故障链路中的流量迁移至备份路径,可能导致备份路径出现带宽溢出的情况^[4]。因此,目前科研人员对于主动式故障链路备份方法的研究大多从节约备份资源、避免链路拥塞这两个方面展开。

目前,针对主动式链路备份方法,国内外学者已经有了很多研究成果。一些学者从节约存储资源的角度出发,提出了一系列链路备份方法,如文献[7]提出为流量的工作转发路径中的所有链路配置备份路径,该方法在计算备份路径的过程中,将存储资源消耗最少作为目标。文献[8]提出一种基于链路等级的链路备份方法,利用数据包数量与数据包长度这两个流量指标,对链路进行等级划分,然后根据链路等级部署不同的备份方案,在实现故障链路恢复的同时减少TCAM资源的消耗。而文献[6]提出一种基于分段路由的备份方法,该方法对数据流进行聚合,然后为流经相同链路的流量计算备份路径,将备份路径信息写入标签封装到数据包头部,以减少对流表项的使用。

另一些学者从避免链路拥塞角度出发,提出了相关的链路备份方法。如文献[9]介绍了一种基于KSP算法的备份方法,该方法通过避免转发路径与备份路径共用相同的链路或者节点,预防在故障链路恢复场景下出现链路拥塞。文献[10]提出一种CASA方法,通过在SDN交换机上自定义功能,利用弧不相交生成树构造备份路径,再借助于BIBD故障转移矩阵对备份路径长度和拥塞程度进行权衡。文献[11]提出一种基于链路带宽需求的备份方法,该方法将最小化备份路径的链路带宽需求作为目标,通过计算备份路径中的链路带宽需求的概率分布函数,来确定备份路径。文献[12]提出一种基于网络状态的链路备份方法,该方法利用网络状态信息,为链路选择一条可动态自适应的备份路径,来避免链路拥塞。

上述方法的共性问题忽略了不同链路对网络或者转发路径可靠性的影响程度不同,因此不同链路对于备份路径的质量与数量的要求不同,用单一的备份方案为所有链路提供备份路径,难以平衡备份资源消耗与网络负载均衡之间的关系。

本文在上述研究基础上,提出一种基于广义网络温度的链路备份方法。主要贡献如下:①利用节点重要性设计了一种链路分类方法,该方法通过使用GNT和介数中心度来评估链路两端节点的重要度并划分节点类型,根据节点类型对链路实现分类;并且,该方法将链路两端节点对于网络的重要性转化为链路对于网络可靠性的影响力,使得备份方案可以根据链路对于网络可靠性的影响力进行制定,有效减少了备份路径存储资源的消耗,优化了链路备份资源配置问题;②通过将最小化备份路径的长度与链路权重累计和作为多目标优化模型的目标函数,来引导BPS算法选择含有低带宽利用率链路的最短路径,将其作为链路的备份路径,这不仅解决了流量迁移过程中出现带宽溢出的问题,还平衡了节约存储资源与优化网络负载之间的关系;③基于经典拓扑数据集Germany50,开展对比实验,验证了本文提出的链路备份方法在优化网络负载和节约流表项资源方面的优势。

2 背景知识

2.1 广义网络温度

广义网络温度(Generalized Network Temperature, GNT)是一种新的网络特征统计指标,它可用于量化网络负载对于网络拓扑和网络流量变化的敏感程度^[13]。GNT是基于热力学温度公式定义的,即在热力学温度的定义式中使用网络熵代替热力学熵得到的一个新的统计指标^[14]。GNT的计算公式如式(1)所示。

$$GNT = \frac{\Delta P}{\Delta H} \quad (1)$$

其中, ΔP 表示数据流变化量, ΔH 表示网络熵变化量。GNT反映了流量在网络中与时间相关的分布情况,具

有典型的时空融合特性,在评估网络鲁棒性和可靠性方面具有广泛的应用前景。因此,GNT可以应用于识别可能发生链路故障的高发区域。

2.2 介数中心度

介数中心度(Betweenness Centrality, BC)是指在一个网络中通过该节点的最短路径条数。介数中心度作为评价节点重要性的网络拓扑指标,体现了节点对于其他节点的影响力,因而节点的介数中心度值可以作为节点影响力的量化值^[15,16]。节点的介数中心度值越高,该节点在网络中的中心性和影响力就越大。介数中心度计算公式如式(2)所示。

$$BC_i = \sum_{j \neq i \neq k \in V} \frac{d_{jk}(i)}{d_{jk}} \quad (2)$$

其中, d_{jk} 表示节点 j 到节点 k 之间的最短路径数量, $d_{jk}(i)$ 表示节点 j 到节点 k 之间的最短路径经过节点 i 的数量。

在为数据流选择转发路径时,需要平衡最短路径和链路负载之间的关系。而具有更高介数中心度的节点,通过该节点的最短路径更多,这将导致与该节点相连的链路,其出现拥塞状况的可能性增大。因此,本文将介数中心度作为辅助链路分类的评价指标,用以提高分类方法的准确性^[17]。

3 基于广义网络温度的链路备份方法

3.1 节点重要性评价

本文不再仅仅考虑单一属性的节点重要性衡量指标,而是将不同属性的评价指标进行融合^[18]。具体而言,是将节点网络流量与节点的网络拓扑结构相结合,使用GNT和节点中心度两个指标衡量节点的重要性^[19]。

在图 $G = (V, E)$ 中,其中 V 表示网络节点的集合, E 表示链路集合。计算各节点的介数中心度的分布概率公式如式(3)所示。

$$BC_i = \frac{B_i}{\sum_{i=1}^n B_i} \quad (3)$$

其中, B_i 为节点 i 的介数中心度, $\sum_{i=1}^n B_i$ 为各节点介数中心度之和。

在上述两个指标的基础上,定义了一个计算节点重要度 GNT_{BC} 的加权公式如式(4)所示。

$$GNT_{BCi} = \varepsilon \cdot GNT_i + (1 - \varepsilon) \cdot BC_i \quad (4)$$

其中, GNT_i 表示节点邻近区域的广义网络温度, BC_i 表示介数中心度的分布概率, ε 表示变量系数, $0 < \varepsilon < 1$ 。

节点重要度 GNT_{BC} 计算主要步骤如下:

Step1: 利用网络拓扑结构和网络流量分布,分别构建网络邻接矩阵 $\{a_{ij}\}_{N \times N}$ 与网络流量矩阵 $\{e_{ij}\}_{N \times N}$ 。

Step2: 根据邻接矩阵 $\{a_{ij}\}_{N \times N}$, 利用式(3)计算各节点的介数中心度的分布概率 BC_i 。

Step3: 根据不同时刻的流量矩阵 $\{e_{ij}\}_{N \times N}$, 利用式(1)计算各节点的 GNT_i 。

Step4: 将两个指标的数值进行标准化后,将数值代入式(4),计算各节点的重要度 GNT_{BCi} 。

3.2 链路分类

首先,本文根据各节点的 GNT_{BC} 值对节点进行排序,然后按照分配比例 $a:b:c$,对节点进行分类,根据文献[20]的节点分类方法,将节点分为3类,即重载节点、轻载节点、空闲节点。其次,根据链路两端的节点类型,本文将链路分为3种类型^[21]。链路类型定义如下:①重载链路,链路两端的节点均为重载节点;②轻载链路,链路两端的节点其中一端是重载节点或者链路两端均由轻载节点构成;③空闲链路,链路两端的节点均为空闲节点或者链路两端分别由空闲节点和轻载节点构成。最后,在对网络中的链路进行分类后,根据链路类型为每条链路赋予权重,即重载链路权重设为3,轻载链路权重设为2,空闲链路权重设为1。

3.3 备份路径多目标优化模型

本文将备份路径选择问题转化为多目标规划问题,为网络中的链路选择备份路径。在选取最优备份路径时,需要实现两个优化目标:一是减少备份资源的使用,二是负载均衡程度尽可能高。构建的目标函数如式(5)所示,约束条件如式(6)一式(8)所示。

目标函数:

$$\text{Min} \sum_{p \in E} \alpha f(x^p) + \beta g(y_l^p) \quad (5)$$

约束条件:

$$\text{S.t.} bw_l + \sum_{p \in C} y_l^p \cdot bw_l^p \leq b \cdot bw_p \quad (6)$$

$$bw_p > 0 \quad (7)$$

$$y_l^p \in \{0, 1\} \quad (8)$$

其中, x^p 表示链路 p 的备份路径长度, bw_l 表示通过链路 l 的原有数据流占用的带宽, y_l^p 表示链路 p 的备份路径通过链路 l , bw_l^p 表示备份路径将会占用链路的带宽。集合 C 表示通过链路 l 的备份路径的集合, bw_p 表示链路最大带宽, b 表示链路利用率。 α 和 β 作为两个目标的权重系数, $\alpha + \beta = 1$ 。

对于减少备份资源使用的目标,本方法主要考虑减少流表项资源的消耗。由于备份路径的长度与流表项数量成正相关,因此用备份路径长度替代流表项数量,在此基础上定义转发代价函数,如式(9)所示。

$$f(x^p) = \sum_{p \in E} x^p \quad (9)$$

对于实现网络负载均衡的目标,本方法采取避免选择链路权重高的链路作为备份路径,使模型尽可能选取链路权重较小的链路作为备份路径。因为根据上文对链路分类的方法,当链路权重越大,链路负载过大的可能性越高。若选择高负载链路作为备份路径的组成部分,当故障链路的数据流迁移至该链路时,会造成链路过载。如果超过链路

带宽限制,甚至将造成链路瘫痪,影响数据传输质量。因此,本文定义备份路径链路权重累加函数如式(10)所示。

$$g(y_l^p) = \sum_{p \in B} \sum_{l \in B} k_l \cdot y_l^p \quad (10)$$

其中, k_l 表示链路 l 权重,集合 B 表示链路 p 的备份路径的集合。

本文设计式(6)作为链路带宽约束条件,该式表示原有数据流与因链路故障被转移的数据流所占用的带宽之和,不能超过备份路径中的链路带宽限制。式(7)表示备份路径中的链路需要满足的状态约束条件,即链路处于正常状态时,链路最大带宽大于0。式(8)表示该模型同时也是一个0-1整数规划模型,若链路 p 的备份路径通过链路 l , y_l^p 为1,反之为0。

3.4 备份路径搜索算法

由于该方法的链路类型由两端节点的类型决定,若链路两端由重载节点构成,则意味着该链路发生故障将对网络可靠性产生较大负面影响;反之,若该链路发生故障,则对于网络的负面影响不大。因此,对于重载链路,需要提供高质量的备份路径,保证网络可靠性。对于轻载链路,在保证可靠性的前提下,提供基础的备份路径,以节约备份资源消耗。而空闲链路通过的流量极少,即使发生链路故障,也不会对网络可靠性产生较大影响,因此不为空闲链路配置备份路径。该方法为不同类型链路设计的备份方案如下:①对于重载链路,提供两条备份路径,但是至少需要一条备份路径确保转移到备份路径的数据流占用带宽不超过链路带宽的70%,且两条备份路径互不相交;②对于轻载链路,所有轻载链路只匹配一条备份路径;③对于空闲链路,不提前提供备份路径,当链路发生故障时,利用控制器对受影响的流量进行重路由,实现故障链路的恢复,同时将新的转发路径作为备份路径存储在SDN交换机中。

本文提出一种基于前 K 条最短路径路由算法(K-shortest Path, KSP)的备份路径搜索算法(Backup Path Selection, BPS),该算法是将备份路径多目标优化模型,从计算全网所有链路的最优备份路径转化为计算每条链路的最优备份路径。模型可根据链路对于备份路径的偏好,以调整权重系数 α 和 β ,灵活引导BPS算法计算最优备份路径的方向。并且,前期通过分类方法对链路进行分类并赋予权重,然后将网络转化为加权图,使得BPS算法在搜索最短路径过程中,可将先获取的链路累计和最小路径,加入候选最短路径集合,后续可直接引入最短路径长度,进行目标函数的计算并排序,便可获取每条链路的全局最优备份路径,简化了最优备份路径的筛选流程。同时,同类链路的备份路径计算方式统一,提高了获取最优备份路径的效率。

首先,该算法需要确认进行备份的链路类型,若该链路为空闲链路,则无需进行备份。其次,将要进行备份的链路的两端节点,分别设置为源节点与目的节点,并将该

链路从图 G 中消除。再次,计算源节点到目的节点前 K 条加权最短路径。其中,若获取的路径数量为 K 条,则将这 K 条路径放入该链路的备份路径集合;若获取的路径数量小于 K 条,但大于等于备份方案要求的最低备份数量,则将获得的所有路径放入该链路的备份路径集合;若路径数量小于2条且该链路为重载链路,或者路径不存在且该链路为轻载链路,则要在源节点的邻接节点中选取介数中心度最高的节点,将该节点作为新的源节点,同时将连接这两个节点的链路从图 G 中消除,避免出现环路,随后计算前 K 条加权最短路径,将所能获得的所有路径放入该链路的备份路径集合。最后,根据式(5)计算备份路径集合中每条路径的值并对路径进行排序,根据链路类型选择对应数量的路径作为备份路径,要求选取的备份路径满足带宽限制。若现有集合中的备份路径不满足带宽限制,则在源节点的邻接节点中选取介数中心度最高的节点,将该节点作为新的源节点,后续流程同上。需要注意的是,本文在链路分类和新源节点的选择上均考虑了介数中心度,因而源节点与目的节点存在一定数量的路径显而易见,若出现源节点回溯之后依旧无法找到路径进行连接,则意味着连接源目的节点的路径唯一,此时任何主动式或者被动式的恢复方法都无法在软件层面进行恢复,因而不该算法讨论范围内。

备份路径搜索算法如下:

算法1 备份路径搜索

输入:加权网络拓扑图 G 和链路类型

输出:备份路径

```

1. function Backup_path_selection
2.   For link in LinkTypeSet
3.     IF link = idel
4.       Backup = Reactive(link)
5.     ELIF link = normal
6.       Gremove(Link_left, Link_right)
7.       Backup = KSP(G, Link_left, Link_right)
8.       IF 1 <= Backup.len <= k
9.         Backup.constraint
10.        IF Backup.len < 1
11.          Linkleft = BCnode(Linkleft, G)
12.          Backup = KSP(G, Link_left, Link_right)
13.          Backup.sort
14.        IF Backup.len < 1
15.          Linkleft = BCnode(Linkleft, G)
16.          Backup = KSP(G, Link_left, Link_right)
17.          Backup.constraint
18.          Backup.sort
19.          Linkbackup = Backup[0:1]
20.          Link type[i] = 1
21.        ELIF link = overload
22.          Gremove(Link_left, Link_right)
23.          Backup = KSP(G, Link_left, Link_right)

```

```

24.     IF  $2 \leq Backup.len \leq k$ 
25.         Backup.constraint
26.         IF  $Backup.len < 2$ 
27.             Linkleft = BCnode(Linkleft, G)
28.             Backup = KSP(G, Link_left, Link_right)
29.             Backup.sort
30.     IF  $Backup.len < 2$ 
31.         Linkleft = BCnode(Linkleft, G)
32.         Backup = KSP(G, Link_left, Link_right)
33.         Backup.constraint
34.         Backup.sort
35.         Linkbackup = Backup[0:2]
36.     RETURN Linkbackup
37. END function

```

图1给出了重载链路的备份路径。其中s2-s4为需要备份的链路,s2-s3-s4和s2-s5-s6-s4为备份路径,数值为链路权重。

基于广义网络温度的链路备份方法LBM-GNT(Link Backup Method Based on Generalized Network Temperature)算法流程如图2所示。以链路S2-S4为例,首先,确定该链

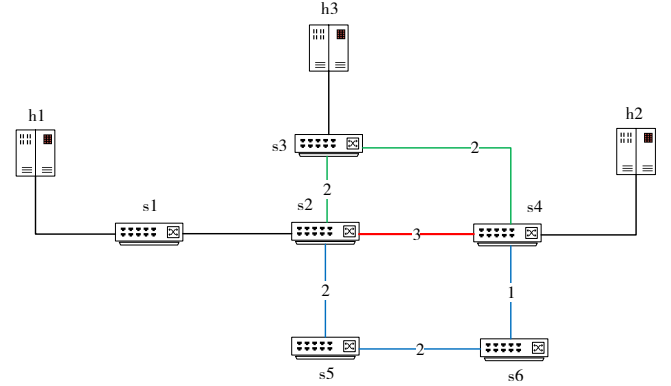


Fig. 1 Backup path for overloaded links

图1 重载链路备份路径

路的类型为重载链路,需要两条备份路径;其次,将链路两端节点作为源目的节点,获取若干条连接源目的节点的最短路径;再次,计算上述最短路径的转发代价函数和链路权重累计函数,并进行增序排序;最后,排除链路带宽不符合要求的最短路径,选取前两条路径作为链路的备份路径。综上完成对网络中所有链路的初始备份,本文定时对备份路径进行更新。

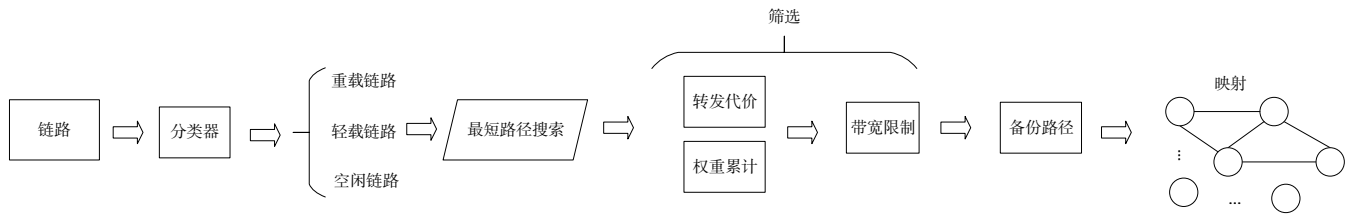


Fig. 2 LBM-GNT algorithm flow

图2 LBM-GNT算法流程

3.5 算法复杂度分析

在BPS算法中,由于需要为重载链路 E_1 和轻载链路 E_2 计算备份路径,而二者的数量为 $|E_1 + E_2|$,因此使用基于Dijkstra算法的KSP算法计算备份路径的时间复杂度为 $O(|E_1 + E_2|V(|E| + |V|\log_2|V|))$ 。在每条链路获取的 k 条候选备份路径后,需要放入队列并排序其最坏时间复杂度为 $O(k\log_2 k)$,上述所有链路的备份路径完成排序的最坏时间复杂度为 $O(|E_1 + E_2|k\log_2 k)$ 。而对于重载链路 V_1 和轻载链路 V_2 的备份路径进行环路检测的时间复杂度则为 $O(|E_1 + E_2|V)$,综上可以得出BPS算法的时间复杂度为 $O(|E_1 + E_2|V(|E| + |V|\log_2|V|) + |E_1 + E_2|k\log_2 k + |E_1 + E_2|V)$,即 $O(|E_1 + E_2|V(|E| + |V|\log_2|V|))$ 。

4 实验与结果分析

4.1 实验环境与数据集

本文所有实验均在一台Dell工作站上完成,该工作站安装Windows 10操作系统,配备了Intel(R) Xeon(R) Gold 6248R 3.00GHz 48核处理器。开发环境使用Python 3.6.0。本文从SDNlib中获取经典拓扑数据集germany50([\[sndlib.zib.de\]\(http://sndlib.zib.de\)\),选取以日作为统计单位,信息包括源目的节点和流量数值信息,拓扑网络一共包含50个节点和88条边。](http://</p>
</div>
<div data-bbox=)

4.2 评价指标

(1)平均带宽利用率。指备份路径中所含链路的带宽利用率之和与备份路径长度的比值,公式如式(11)一式(13)所示。

$$Link_{fact} = Link_o + Link_b \quad (11)$$

$$bw = \frac{Link_{fact}}{Link_{max}} \quad (12)$$

$$bw_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n bw_i}{n} \quad (13)$$

其中, bw 表示链路带宽利用率, $Link_o$ 表示链路中原始数据流占用带宽, $Link_b$ 表示链路中转移数据流占用带宽, $Link_{max}$ 表示链路限制带宽, n 代表备份路径长度。

链路带宽利用率可以衡量网络的负载程度,对于网络链路而言,带宽利用率需要保持在一个合理区间内,带宽利用率过高,将影响数据传输质量。因此,依据文献[6],本文设定链路带宽利用率的阈值为70%,若超出该阈值则可视作该链路拥塞。

(2)备份路径长度。链路所有备份路径的跳数之和,

公式如式(14)所示。

$$len_b = \sum_{i \in l} tip_i \quad (14)$$

其中, tip_i 表示备份路径长度, l 表示链路 i 的备份路径集合。

由于本文的重载链路会有2条备份路径,因此在实验中,主要比较链路的平均备份路径长度,其公式如式(15)所示。

$$len = \frac{len_b}{m} \quad (15)$$

其中, m 表示备份路径集合中备份路径数量。

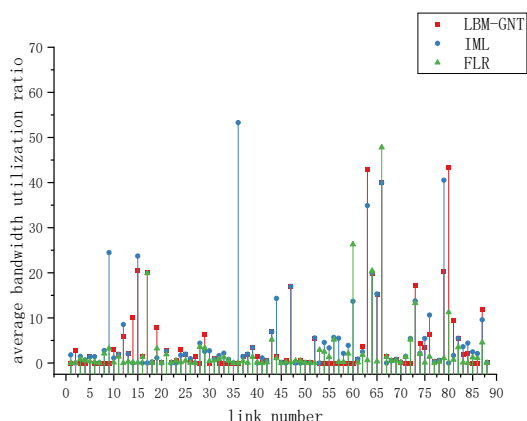
备份路径长度可以衡量备份方法对于流表项资源的消耗,因为备份路径经过的节点需要存储到SDN交换机的流表项^[22]中,因此备份路径长度与流表项数量成正比,链路的备份路径长度越长,消耗资源越多。

4.3 实验结果分析

为了验证 LBM-GNT 方法的有效性,本文设计实验与

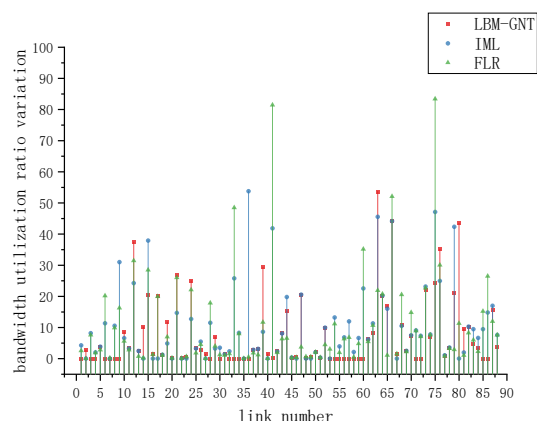
基于最小存储资源的故障恢复方案(FLR)^[7]和基于链路等级的故障恢复方法(IML)^[8]进行对比。在实验中,假设实验环境下所有节点均为转发节点,链路带宽预设为500 M,同时假设转发路径的故障概率 $p_{path} = 1 - \prod_{(i,j) \in path} (1 - p_{ij})$, 其中 p_{ij} 为链路的故障概率,链路故障概率与链路流量负载成正比^[23]。实验中将3种节点类型的分配比设置为2:6:2。

图3展示了LBM-GNT与其他两种方法关于备份路径平均带宽利用率的对比实验结果,其中顶点为方形的垂线代表LBM-GNT方法的实验结果,顶点为圆形的垂线代表IML方法的实验结果,顶点为三角形的垂线代表FLR方法的实验结果。图3(a)(c)给出在3个方法下,在流量迁移前各条链路的备份路径的平均带宽利用率,图3(b)(d)给出3个方法在流量迁移后备份路径的平均带宽利用率,而图3(a)(b)与图3(c)(d)属于两个不同的时间段。



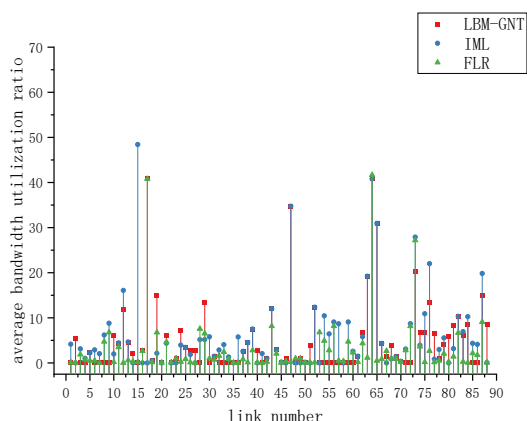
(a) Before traffic migration

(a) 流量迁移前



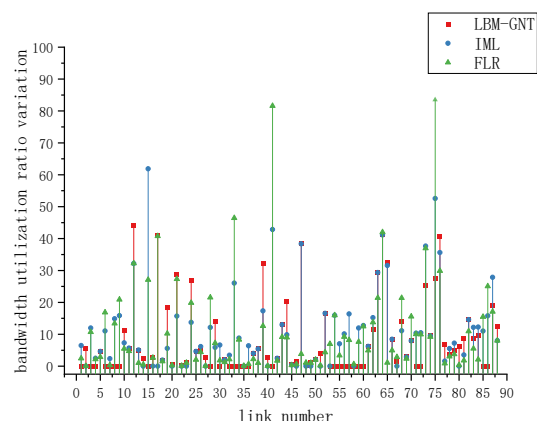
(b) After traffic migration

(b) 流量迁移后



(c) Next moment before traffic migration

(c) 下一时刻的流量迁移前



(d) Next moment after traffic migration

(d) 下一时刻的流量迁移后

Fig. 3 Average bandwidth utilization of backup path

图3 备份路径的平均带宽利用率

从图3(a)可以看出,LBM-GNT方法和IML方法各有2条链路的备份路径平均带宽利用率大于40%,FLR方法则有1条。从图3(c)可以看出,3个方法各有2条链路的备份路径的平均带宽利用率高于40%,且LBM-GNT方法绝大部分链路的备份路径的平均带宽利用率小于其他两种方法。但当流量迁移后,观察图3(b)可以发现,FLR方法有2条链路的备份路径发生拥塞,这是由于FLR方法在选择备份路径时,仅考虑存储资源最少,未考虑链路带宽的使用情况,导致流量迁移后,备份路径出现链路拥塞情况。IML方法有2条链路的备份路径平均带宽利用率高于或者接近50%,而LBM-GNT为1条。IML方法通过流量指标制定链路等级,充分利用了链路的流量信息,因此相比于FLR方法具有更好平衡网络负载的效果,并接近于LBM-GNT方法,但是该方法未考虑到备份路径的带宽使用状况,而LBM-GNT方法综合考虑链路及备份路径的带宽使用状况,使得LBM-GNT备份路径平均带宽利用率的均值相较于IML、FLR方法分别降低了2.58%和2.67%。同理,造成图3(d)中FLR方法有2条链路的备份路径出现拥塞情况,而IML方法有2条链路的备份路径的平均带宽利用率高于60%,LBM-GNT方法的链路备份路径的平均带宽利用率都低于50%。统计LBM-GNT方法的所有链路的备份路径平均带宽利用率均值分别比IML、FLR方法的平均带宽利用率均值低2.64%、2.45%。

上述实验结果表明,在不同时间下使用LBM-GNT方法为链路提供的备份路径,在进行链路故障恢复时,对备

份路径中的链路和数据流的影响更小。这再次证实本文方法充分考虑了网络负载均衡,以及在避免数据丢失和保证网络可靠性方面更具优势。

图4展示了两个时间点下LBM-GNT方法与其他两种方法关于各链路的备份路径长度对比实验结果,其中顶点为方形的垂线代表LBM-GNT方法的实验结果,顶点为圆形的垂线代表IML方法的实验结果,顶点为三角形的垂线代表FLR方法的实验结果。

观察图4(a)可以发现,LBM-GNT方法下有3条链路的平均备份路径长度大于其他两种方法。但随着下一时刻数据量的增长,在图4(b)可发现,LBM-GNT方法有15条链路的平均备份路径长度大于其他方法,IML方法有13条,FLR方法有2条。这是由于FLR方法选取备份路径仅考虑路径最短,而LBM-GNT方法和IML方法为了均衡网络负载,需要向高负载链路提供多条不相交的备份路径,该要求迫使二者方法选择更长的备份路径。统计图4(a)可发现,LBM-GNT方法的各链路的备份路径长度之和为185,低于IML方法的250和FLR方法的245。而在图4(b)中,LBM-GNT方法的各链路的备份路径长度之和为227,IML方法为254,而FLR方法为245。形成上述现象的原因是LBM-GNT方法考虑到不同类型链路对于网络可靠性的影响力不同,因此在不影响网络可靠性的前提下,LBM-GNT方法通过减少对于空闲链路的备份路径的资源投入以及控制重载链路的规模,使得LBM-GNT方法的备份路径长度之和少于IML方法、FLR方法。

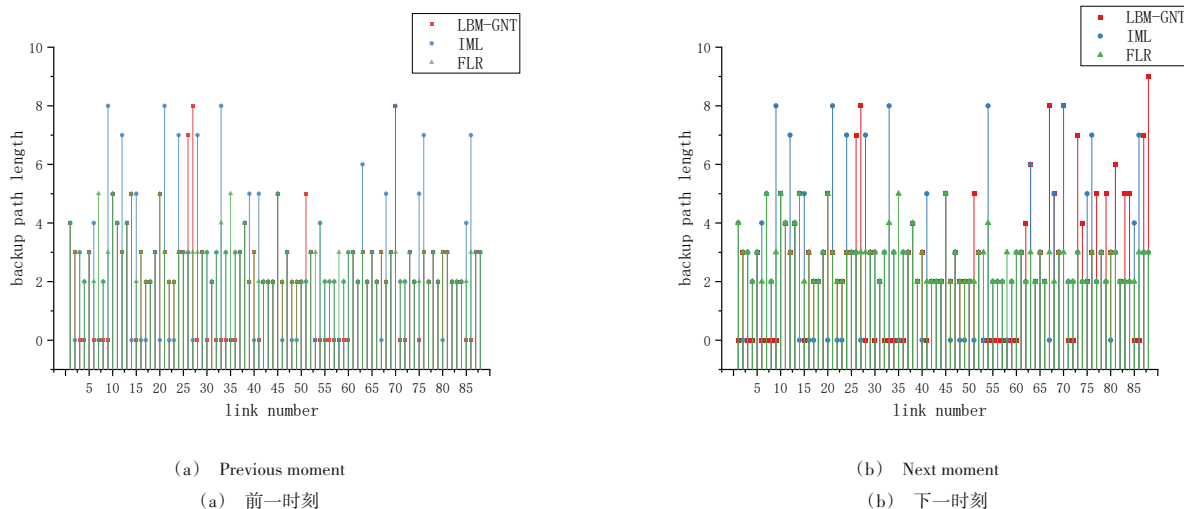


Fig. 4 Backup path length of the link

图4 链路的备份路径长度

由于链路的备份路径长度与备份路径占用SDN交换机流表项资源成正相关,因此实验结果证明LBM-GNT方法在避免链路拥塞的情况下,通过为不同链路定制备份方案,实现了节约流表项这类存储资源消耗的目标,尤其是针对数据流集中于部分链路的场景下,LBM-GNT方法相较于其他两个方案节约资源效果更好。

5 结语

本文提出基于广义网络温度的链路备份方法LBM-GNT,为链路提供备份路径,实现故障链路的快速恢复。通过性能对比实验发现,LBM-GNT方法相较于IML和

FLR方法,其平均带宽利用率更低,因而该方法在优化备份路径的网络负载方面更具优势。同时,LBM-GNT方法的备份路径总长度少于IML方法和FLR方法,表明LBM-GNT方法在节约备份资源消耗方面也具有更好的效果。

然而,本文研究也存在一些不足。由于网络处于不断变化中,故链路的备份路径需要不断更新,才能更好地均衡网络负载。下一步研究需根据网络流量特性,寻找可行且准确的备份路径更新周期的规律。

参考文献:

- [1] ALI J, LEE G M, ROH B H, et al. Software-defined networking approaches for link failure recovery: a survey [J]. *Sustainability*, 2020, 12(10): 4255.
- [2] CHICA J C C, IMBACHI J C, VEGA J F B. Security in SDN: a comprehensive survey [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2020, 159: 102595.
- [3] WASEEM Q, ALSHAMRANI S S, NISAR K, et al. Future technology: software-defined network (SDN) forensic [J]. *Symmetry*, 2021, 13(5): 767.
- [4] PETALE S, THANGARAJ J. Link failure recovery mechanism in software defined networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(7): 1285–1292.
- [5] SHARMA S, STAESSENS D, COLLE D, et al. OpenFlow: meeting carrier-grade recovery requirements [J]. *Computer Communications*, 2013, 36(6): 656–665.
- [6] WANG S S. Research and implementation of link fault recovery technology based on SDN [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
王世双. 基于SDN的链路故障恢复技术的研究与实现 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [7] MOHAN P M, TRUONG-HUU T, GURUSAMY M. TCAM-aware local rerouting for fast and efficient failure recovery in software defined networks [C]//San Diego: 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015.
- [8] ZHANG S, WANG Y, HE Q, et al. Backup-resource based failure recovery approach in sdn data plane [C]//Kanazawa: 2016 18th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2016.
- [9] WANG Z N, WEI M, LI X, et al. An optimization algorithm for the same primary and backup routing of label switching path based on KSP in PTN [C]//Dortmund: 2020 IEEE 5th International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS), 2020.
- [10] FOERSTER K T, PIGNOLET Y A, SCHMID S, et al. CASA: congestion and stretch aware static fast rerouting [C]//IEEE INFOCOM 2019—IEEE Conference on Computer Communications, 2019: 469–477.
- [11] HIRANO Y, HE F, SATO T, et al. Backup network design against multiple link failures to avoid link capacity overestimation [J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2019, 17(2): 1254–1267.
- [12] CHEN Z Q, XIA Z Y. A single link fault recovery model for SDN with congestion avoidance [J]. *Computer Science*, 2023, 50(4): 212–219.
陈自强, 夏正友. 一种拥塞避免的SDN单链路故障恢复模型 [J]. *计算机科学*, 2023, 50(4): 212–219.
- [13] WANG C, LI X, BERTINO E. Network temperature: a novel statistical index for networks measurement and management [J]. *ACM Transactions on Internet Technology (TOIT)*, 2022, 22(3): 1–20.
- [14] CHIU S T, SUSANTO H, LEU F Y. Detection and defense of DDoS attack and flash events by using Shannon entropy [C]//Proceedings of the 16th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS-2022), 2022: 307–314.
- [15] FREEMAN L C. A set of measures of centrality based on betweenness [J]. *Sociometry*, 1977, 40(1): 35–41.
- [16] KITSACK M, GALLOS L K, HAVLIN S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks [J]. *Nature Physics*, 2010, 6(11): 888–893.
- [17] YAN J M. Research on dynamic analysis method of node importance extension clustering in complex networks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
严家萌. 复杂网络节点重要性可拓聚类动态分析方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [18] ZHANG X. Research on traceability algorithm based on node Importance [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
张欣. 基于节点重要性的溯源算法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [19] CHEN Q. Research on node importance ranking method based on network entropy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
陈前. 基于网络熵的节点重要性排序方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [20] JI S W, LUAN D, CHEN Z R, et al. Integrated scheduling in automated container terminals considering AGV conflict-free routing [J]. *Transportation Letters*, 2021, 13(7): 501–513.
- [21] LUAN D. Research on comprehensive scheduling optimization considering spatiotemporal constraints of facilities and equipment resources [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
栾迪. 考虑设施设备资源时空约束的综合调度优化研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [22] YANG X W, XU H L, HUANG L S, et al. Joint virtual switch deployment and routing for load balancing in SDNS [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(3): 397–410.
- [23] LUO G J. Research on survivability mapping mechanism of optical networks based on fault probability model [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
罗广骏. 基于故障概率模型的光网络生存性映射机理研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.

(责任编辑: 孙娟)