

QoS 约束的链路故障多备份路径恢复算法

崔文岩*^① 孟相如^① 杨欢欢^{①②} 李纪真^① 陈天平^① 康巧燕^①

^①(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

^②(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要: 链路故障的恢复, 不仅仅是选择一条连通的备份路径问题, 还应考虑网络业务故障恢复过程中的 QoS 需求。针对此问题, 该文基于多备份路径策略, 构建概率关联故障模型和重路由流量丢弃量优化目标。并基于该优化目标, 以业务的 QoS 需求为约束, 建立故障恢复问题的数学模型, 提出一种 QoS 约束的链路故障多备份路径恢复算法。该算法构建单条备份路径时, 以最大程度地减少重路由流量丢弃为目标, 并采用改进的 QoS 约束的 k 最短路径法进行拼接, 且给与高优先级链路更多的保护资源。此外还证明了算法的正确性并分析了时间空间复杂度。在 NS2 环境下的仿真结果表明, 该算法显著提升了链路故障恢复率和重路由流量 QoS 满足率, 且 QoS 约束条件越强, 相较于其它算法优势越明显。

关键词: 链路故障恢复; 多备份路径; QoS; 重路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)08-1850-08

DOI: 10.11999/JEIT151230

Link Failure Recovery Algorithm Based on Multiple Backup Paths with QoS Constraint

CUI Wenyan^① MENG Xiangru^① YANG Huanhuan^{①②}

LI Jizhen^① CHEN Tianping^① KANG Qiaoyan^①

^①(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

^②(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Recovery of link failure is not only the issue of selecting a connected backup path, but the QoS requirement in the process of failure recovery of the network service should be also taken into account. The probabilistically correlated failure model and rerouting traffic disruption optimization target are built based on multiple backup paths strategy. Furthermore, a mathematical model of the failure recovery problem is modeled, which takes the minimum rerouting traffic disruption as the target and the QoS requirement as the constrain, and a link failure recovery algorithm based on multiple backup paths with QoS constrain is proposed. The proposed algorithm takes reducing rerouting traffic disruption farthest as the target and adopts the improved k shortest path algorithm with QoS constrain to splice the single backup path, and it gives the links more protection resource with high priority. Moreover, the correctness of the proposed algorithm is proved, and the time complex and the space complex are computed. The simulation results under NS2 show that the proposed algorithm significantly improves link failure recovery rate and the QoS satisfaction rate of the rerouting traffic, and it performs better when the QoS constrain is stronger.

Key words: Link failure recovery; Multiple backup paths; QoS; Reroute

1 引言

随着通信技术的快速发展, 网络链路带宽得到不断扩充。目前全球至少有来自 20 多个国家的 53

个运营商已经部署或正在考虑部署 400 GB/s 的骨干网络^[1]。高速骨干网链路即使短暂的故障也会造成大量的数据包丢弃, 严重影响通信质量。根据对 ISP 的观察, 骨干网链路一年内大约有 30% 的概率会出现故障^[2], 表明链路故障是网络中较为普遍的现象。因此, 加快故障的恢复速度, 降低故障造成的业务丢弃已成为当前研究亟待解决的问题。

网络故障主要表现为链路故障, 链路故障恢复策略可分为主动式和被动式两种^[3,4]。被动式策略在网络故障后动态自适应地进行全网资源重分配, 但

收稿日期: 2015-11-03; 改回日期: 2016-03-03; 网络出版: 2016-05-09

*通信作者: 崔文岩 cwy_edu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61201209, 61401499), 陕西省自然科学基金(2013JQ8013, 2015JM6340)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61201209, 61401499), Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2013JQ8013, 2015JM6340)

路由重新收敛花费较多的时间而不可接受。因此目前故障快速恢复研究以主动式策略为主,通过提前对网络进行资源规划和预留,使得故障时能迅速切换,如基于多拓扑^[6]和基于备份路径的故障恢复技术。多拓扑技术需要配置多个拓扑子层,路由存储消耗大;基于备份路径的故障恢复技术提供端到端路径重路由,在全局范围内进行流量分配,易于基于现有协议实现。因此,备份路径技术是当前故障恢复领域研究的热点^[6-11]。

故障恢复的本质在于维持故障链路承载流量的传输,因此应从流量持续传输角度解决故障恢复问题。大部分故障恢复工作集中在如何选择可靠备份路径上,且一般利用单一备份路径进行故障恢复。然而当流量超出备份路径可用带宽时,单一备份路径无法满足故障恢复的要求。受到这一启发,文献[8]将多路径技术引入到故障恢复中,采用多条备份路径共同承担流量,减少了流量的丢弃。在此基础上,文献[9]提出一种结合故障恢复与流量工程的网络结构,在多路径故障恢复基础上进行流量工程优化,其目的是进行负载均衡,且假设备份路径可用带宽满足故障恢复需求。文献[10]考虑了不同故障状况,通过将重路由流量分配给有跳数限制的多条备份路径,在网络投入运行之前就设计好应对各种故障场景的最低容量备份网络。文献[11]提出一种跨层故障恢复模型,考虑了备份链路的可靠性,提升了故障恢复成功率。然而,上述故障恢复算法大都以最大化重路由为目标,未考虑恢复后的流量是否满足用户的需求。但是经由备份路径的重路由流量即使最终传输成功,由于时延超时、链路过载等原因,也无法满足业务的服务质量需求(Quality of Service, QoS),属于无效流量。虽然文献[12]提出了一种满足 QoS 约束的自适应调整的多路径路由,但未考虑故障恢复问题。因此,目前已提出的大部分链路故障恢复算法不能很好地确保业务的服务质量。

为此,本文针对 QoS 约束下的链路故障恢复问题进行研究,即在网络可用带宽和业务时延需求约束下进行最大化重路由流量问题求解。首先基于多备份路径策略建立概率关联故障模型和重路由流量丢弃优化目标,并构建 QoS 约束的故障多备份路径恢复问题的数学优化模型。然后,设计 QoS 约束的链路故障多备份路径恢复算法(Multiple backup Paths Recovery for link failure with QoS constrain algorithm, MPR-QoS)对此问题进行求解。MPR-QoS 算法在构建单条备份路径时,利用改进的 QoS 约束的 k 最短路径法进行拼接,并以最大化减少重路由流量丢弃为目标,且分配给高优先级链

路更多的保护资源。此外还证明了算法的正确性并对时间空间复杂度进行了分析。最后,在 NS2 仿真环境下从故障恢复率、重路由流量 QoS 满足率、链路过载率和算法运行时间等方面验证了本文算法的优越性。

2 问题描述

2.1 备份路径策略

备份路径策略是基于备份路径故障恢复方法的关键问题^[8],对故障恢复效果有较大影响。虽然采用更多的备份路径可以减少流量的丢弃,但是如果备份路径数量过大会大大增加配置复杂度和存储开销,并且网络对节点对之间可以设置的备份路径数量有严格的限制,为此,本文设定每条链路最多拥有 N 条备份路径。文献[9]指出拥塞网络的队列时延随跳数呈指数规律增加,且光网络中的信号质量随着路径跳数的增加而迅速下降,因此为支撑 QoS 需求,对备份路径施加跳数限制是非常有必要的,文中限制备份路径最大跳数为 H 。网络拓扑利用有权无向图 $G(V,E)$ 表示,其中 V 和 E 分别表示路由器节点和链路集合。

2.2 概率关联故障模型

当前的链路故障恢复算法大多是针对独立故障的,而事实上有时候链路故障并不是完全独立的,比如当底层光纤链路故障时,由其承载的多条逻辑链路可能会同时失效,即链路故障之间存在概率关联。共享风险链路组(Shared Risk Link Group, SRLG)模型^[13]用来表示一组共享同一风险的链路集合,当 SRLG 中的一条链路失效时,该组中其它链路以 1 的概率出现失效。但实际上关联故障并非 100% 绝对关联,拥有关联故障的两条链路中的一条链路发生故障时,另一条链路只是以某一概率发生故障。为此,我们给出了概率共享风险链路组概念,在传统的 SRLG 模型中加入故障关联概率来表示拥有一定概率关联的故障模型。

定义 1 概率共享风险链路组(Probabilistically Shared Risk Link Group, PSRLG), 设 R 为 SRLG 事件集合,当任意事件 $r \in R$ 发生时,故障发生概率不为 0 的链路集合构成事件 r 的 PSRLG, 如式(1)所示。

$$r_{\text{PSRLG}} = \{e_{i,j} \in E : p_r(i,j) \neq 0\} \quad (1)$$

其中 $p_r(i,j)$ 为 SRLG 事件 r 发生时链路 $e_{i,j}$ 发生故障的概率。

链路 $e_{i,j}$ 与链路 $e_{u,v}$ 之间存在故障关联是指当某事件 r 发生时, $p_r(i,j) \neq 0$ 且 $p_r(u,v) \neq 0$ 。而传统的 SRLG 模型中,链路 $e_{i,j}$ 与链路 $e_{u,v}$ 之间存在故障关

联是指事件 r 发生时, $p_r(i, j) = 1$ 且 $p_r(u, v) = 1$, 显然传统的 SRLG 模型只是概率关联模型的一个特例。利用概率关联故障模型可以更加真实地刻画关联故障的特点。

用 p_r 表示事件 r 发生概率, 链路 $e_{u,v}$ 和 $e_{i,j}$ 存在故障关联时, 各自发生故障的概率分别用 $p_{u,v}$ 和 $p_{i,j}$ 表示。

$$p_{u,v} = p_r \cdot p_r(u, v) \quad (2)$$

$$p_{i,j} = p_r \cdot p_r(i, j) \quad (3)$$

根据式(2)和式(3), 只有当 $p_r \neq 0$ 时, $p_{u,v}$ 与 $p_{i,j}$ 不为 0, 即链路 $e_{u,v}$ 与 $e_{i,j}$ 存在故障关联时各自发生故障的概率同时受到事件 r 的影响。利用概率关联故障模型可以方便地得到存在关联故障链路发生故障的概率。

2.3 优化目标

对于任意链路 $e_{i,j} \in E$, 用 $c_{i,j}$ 表示其带宽容量, 用 $l_{i,j}$ 表示无故障时其流量负载。那么链路 $e_{i,j}$ 的可用带宽为 $c_{i,j} - l_{i,j}$, 是链路 $e_{i,j}$ 能够承载的最大重路由流量。利用 $B_{i,j}^k$ 表示链路 $e_{i,j}$ 的第 k 条备份路径, 用 $r_{i,j}^k$ 表示备份路径 $B_{i,j}^k$ 为链路 $e_{i,j}$ 保留的带宽, 由最多 N 条备份路径保护的重路由流量共计 $\sum_{k=1}^N r_{i,j}^k$, 假设所有 N 条备份路径均可用, 重路由流量丢弃量可用式(4)表示, 重路由流量丢弃量是指链路故障时原承载流量与经过所有备份路径重路由的总流量之差, 这部分流量在故障时被丢弃掉, 显然, 被丢弃的流量越小越好。

$$\text{TD}_{i,j} = l_{i,j} - \sum_{k=1}^N r_{i,j}^k \quad (4)$$

式(4)中假设 N 条备份路径均可用, 根据前面分析, 链路之间存在概率关联故障, 那么链路 $e_{i,j}$ 故障时 $B_{i,j}^k$ 也可能同时发生故障, 如果 $B_{i,j}^k$ 发生故障, 其上承载的重路由流量被丢弃。利用 $p_{i,j}$ 表示链路 $e_{i,j}$ 故障概率, 并设链路 $e_{i,j}$ 故障时 $B_{i,j}^k$ 的故障概率为 $P(B_{i,j}^k | e_{i,j})$, 则考虑备份路径可靠性时链路 $e_{i,j}$ 故障下的重路由流量丢弃量可用式(5)表示。

$$\text{TD}_{i,j,p} = p_{i,j} \left(\sum_{k=1}^N P(B_{i,j}^k | e_{i,j}) r_{i,j}^k + l_{i,j} - \sum_{k=1}^N r_{i,j}^k \right) \quad (5)$$

式中, $P(B_{i,j}^k | e_{i,j})$ 为条件概率, 只有当链路 $e_{i,j}$ 的故障与其第 k 条备份路径 $B_{i,j}^k$ 的故障存在关联时, 其值不为 0。

下面求解 $P(B_{i,j}^k | e_{i,j})$ 值。用 $S(B_{i,j}^k)$ 表示构成 $B_{i,j}^k$ 的所有链路集合, 则 $B_{i,j}^k$ 发生故障的概率可用式(6)表示。

$$P(B_{i,j}^k) = 1 - \prod_{e_{u,v} \in S(B_{i,j}^k)} (1 - p_{u,v}) \quad (6)$$

其中, 链路 $e_{u,v}$ 代表 $S(B_{i,j}^k)$ 的任意元素, $p_{u,v}$ 是链路 $e_{u,v}$ 发生故障的概率。

结合概率关联故障模型, $P(B_{i,j}^k | e_{i,j})$ 可以进一步表示为

$$P(B_{i,j}^k | e_{i,j}) = \frac{\left(1 - \prod_{e_{u,v} \in S(B_{i,j}^k)} (1 - p_r \cdot p_r(u, v)) \right)}{p_r \cdot p_r(i, j)} \quad (7)$$

那么, 网络中所有链路因故障造成的重路由流量丢弃量之和可以表示为

$$\text{TD} = \sum_{e_{i,j} \in E} \left(\sum_{k=1}^N \left(1 - \prod_{e_{u,v} \in S(B_{i,j}^k)} (1 - p_r \cdot p_r(u, v)) \right) r_{i,j}^k + p_r \cdot p_r(i, j) \left(l_{i,j} - \sum_{k=1}^N r_{i,j}^k \right) \right) \quad (8)$$

本文算法的设计目标就是在业务 QoS 需求约束下, 使得式(8)值最小, 式(8)即为本文的优化目标。

3 故障多备份路径恢复问题的数学模型

本节以最小化重路由流量丢弃为目标, 以业务 QoS 需求为约束, 利用多备份路径技术, 对故障恢复问题进行混合整数线性规划 (Mixed Integer Linear Program, MILP) 建模。

(1) 变量: 变量 $r_{i,j}^k$ 表示第 k 条备份路径 $B_{i,j}^k$ 为链路 $e_{i,j}$ 保留的带宽。布尔变量 $x_{u,v}^{i,j,k}$: 若 $e_{u,v}$ 是构成 $B_{i,j}^k$ 的某一条链路则置为 1; 否则为 0。

(2) 目标函数:

$$\text{Min TD} \quad (9)$$

本文的目标函数是最小化全网范围内的重路由流量丢弃量。它包含两部分, 一是超出所有备份路径重路由能力部分, 二是因备份路径自身故障而丢弃部分。

(3) 约束条件:

(a) 流守恒约束:

$$\sum_{\forall u: e_{v,u} \in E} f_{e_{v,u}}^h(e_{i,j}) - \sum_{\forall u: e_{u,v} \in E} f_{e_{u,v}}^{h-1}(e_{i,j}) = 0, \quad \forall e_{i,j} \in E, \forall v \in V \setminus \{i, j\} \quad (10)$$

约束式(10)是网络中节点流守恒限制。表示链路 $e_{i,j}$ 故障时, 通过 $h-1$ 跳数备份路径进入任意节点 $v \in V \setminus \{i, j\}$ 的所有流量之和等于流出该节点的经过 h 跳数的所有备份路径流量之和, 需要特别指出的是链路 $e_{i,j}$ 的端节点不满足此约束。其中 $f_{e_{u,v}}^h(e_{i,j})$ 表示链路 $e_{i,j}$ 故障时, 从节点 i 到 u 经过 h 跳数的所有备份路径重路由流量之和。

(b) 容量约束:

$$\sum_{k=1}^N r_{i,j}^k \leq l_{i,j} \quad (11)$$

$$\sum_{e_{i,j} \in E} f_{e_{u,v}}(e_{i,j}) \leq c_{u,v} - l_{u,v} \quad (12)$$

式(11)为重路由流量约束,式(12)为链路带宽容量约束。重路由流量约束表示链路 $e_{i,j}$ 的所有备份路径重路由流量最大是其负载。链路带宽容量约束表示每条链路承载的重路由流量不应超过其可用带宽。其中 $f_{e_{u,v}}(e_{i,j})$ 表示链路 $e_{i,j}$ 故障时分配给链路 $e_{u,v}$ 的流量,其值可用式(13)表示。

$$f_{e_{u,v}}(e_{i,j}) = \sum_{k=1}^N x_{u,v}^{i,j,k} r_{i,j}^k \quad (13)$$

$f_{e_{u,v}}(e_{i,j})$ 由从节点 i 到 u 经过不同跳数的所有备份路径重路由流量之和构成,如式(14)所示,式(13)与式(14)是等价关系。

$$f_{e_{u,v}}(e_{i,j}) = \sum_{h=0}^H f_{e_{u,v}}^h(e_{i,j}) \quad (14)$$

(c)变量约束:

$$1 \leq k \leq N, 0 \leq h \leq H \quad (15)$$

$$r_{i,j}^k \geq 0 \quad (16)$$

$$x_{u,v}^{i,j,k} \in \{0,1\} \quad (17)$$

式(15)表示每条链路最多有 N 条备份路径,每条备份路径的时延最大为 H 跳。式(16)表示备份路径预留带宽非负。 $x_{u,v}^{i,j,k}$ 满足整数约束条件式(17),因此本模型属于非确定性多项式时间难问题(NP-hard)。

4 MPR-QoS 算法设计

链路故障恢复问题的 MILP 模型是 NP-hard 问题,虽然可以利用单纯形法等传统线性规划方法求解,但随着问题规模的增加,计算时间复杂度较高,并不适用于大规模网络故障恢复问题的求解。因此,本节设计 MPR-QoS 算法对 QoS 约束下的故障多备份路径恢复问题进行求解。该算法由单条备份路径拼接和备份路径选择两个子算法构成,其求解目标是在 QoS 约束下通过为网络中每条链路选择最多 N 条备份路径,并合理分配资源使得全网重路由流量丢弃量最小。

4.1 单条备份路径拼接

链路的备份路径选择是逐条进行的,单条备份路径的选择类似于计算最短路径的 k 最短路径算法,从节点 i 开始,通过逐条添加链路来扩充备份路径。假设链路 $e_{i,j}$ 已有 $k-1$ 条备份路径,额外添加一条备份路径减少的流量丢弃量可用式(18)表示。

$$\Delta TD_{i,j} = p_{i,j} r_{i,j}^k \left(1 - P(B_{i,j}^k | e_{i,j})\right) \quad (18)$$

MPR-QoS 算法在进行单条备份路径拼接时,目的是要构造一条使 $\Delta TD_{i,j}$ 最大的 $B_{i,j}^k$ 。以链路 $e_{i,j}$ 的第 k 条备份路径的拼接算法为例给出表 1 所示的单条备份路径拼接算法。单条备份路径拼接采用改进的 k 最短路径法,使之保证每一条备份路径存在可用的带宽且满足业务时延约束,选取最短备份路径集合 $\Omega(BP_{i,j})$ 中 $\Delta TD_{i,j}$ 最大的最短备份路径作为链路 $e_{i,j}$ 的第 k 条备份路径。

表 1 MPR-QoS 的单条备份路径拼接算法
(链路 $e_{i,j}$ 第 k 条备份路径拼接算法)

输入: $G(V,E), H$	
输出: SingleBPSplicingList	
1	for 对于链路 $e_{i,j} \in E$ do
2	采用 k 最短路径法计算链路 $e_{i,j}$ 的最短备份路径集合 $\Omega(BP_{i,j})$,且 $\forall BP \in \Omega(BP_{i,j})$ 存在可用的带宽并满足时延约束
3	if $\Omega(BP_{i,j})$ 为空 then
4	return SingleBPSplicing_Failed
5	else
6	for $\Omega(BP_{i,j})$ 中的每条最短备份路径 BP do
7	计算 $\Delta TD_{i,j}$ 值
8	end for
9	将 $\Delta TD_{i,j}$ 值最大的最短备份路径 BP 作为链路 $e_{i,j}$ 的第 k 条备份路径,并将结果存入 SingleBP-SplicingList 中
10	end if
11	end for

4.2 备份路径选择

由于承载较多流量负载的链路在故障时重路由流量较多,很可能因为网络中没有足够多的带宽资源而造成重路由流量的丢弃,而高故障概率链路更易发生故障,因此本文利用链路的流量负载与故障概率之积来确定其受保护优先级,定义链路 $e_{i,j}$ 的优先级如式(19)。

$$LP_{i,j} = p_{i,j} l_{i,j} \quad (19)$$

MPR-QoS 算法在备份路径选择阶段的算法是一种启发式的多轮迭代算法,如表 2 所示。该算法首先按照承载流量负载大小和故障概率计算链路的优先级 LP,并根据 LP 值的大小依次为每一条链路构造最多 N 条备份路径,构建每一条备份路径的同时,更新链路的剩余重路由流量负载和网络带宽资源。

相比较已有的基于备份路径的故障恢复算法^[14,15],MPR-QoS 算法的优势在于,一是通过为每条链路确定优先级,使得高优先级链路获得更多的保护资源,降低了全网范围内因故障造成的流量负载的丢弃;二是在每一轮迭代构造单条备份路径时,

不仅考虑可用带宽资源, 还考虑备份路径的时延, 在业务 QoS 约束下, 确保每一条新增的备份路径均最大程度地减少重路由流量的丢弃。最终, MPR-QoS 算法既满足了业务 QoS 约束, 又最大程度地保证了故障链路流量负载的重路由。

表 2 MPR-QoS 的备份路径选择算法

输入: $G(V, E), N, \text{SingleBPSplicingList}$
输出: BPSelectingList
1 for 对于每一条链路 $e_{i,j} \in E$ do
2 计算 $e_{i,j}$ 的优先级 $\text{LP}_{i,j}$
3 end for
4 按照 LP 值从大到小顺序对 $e_{i,j}$ 排序, 并将排序结果存入链表 LinkPriorityList 中
5 for LinkPriorityList 中的每一条链路 $e_{i,j}$ do
6 $k = 1$
7 while $k \leq N$ do
8 采用单条备份路径拼接算法构造第 k 条备份路径 $B_{i,j}^k$
9 if 第 k 条备份路径构造失败 then
10 break
11 else
12 更新链路 $e_{i,j}$ 的重路由流量负载和网络带宽资源
13 $k = k + 1$
14 end while
15 end for
16 将每条链路的备份路径构造结果存入 BPSelectingList 中

4.3 MPR-QoS 正确性证明

定理 1 在给定的网络拓扑约束下, 假设 k 最短路径算法能生成 k 条最短路径, 那么 MPR-QoS 的单条备份路径拼接算法能生成满足可用带宽和业务时延约束的备份路径集合 $\Omega(\text{BP}_{i,j})$ 。

证明 考察 4.1 节算法描述可知单条备份路径拼接算法对 k 最短路径算法的扩展主要在两个方面: (1) 在 k 条最短路径构建过程中增加跳数 H 限制, 改变了 k 条最短路径生成的判断条件; (2) 在 k 条最短路径生成完毕后增加可用带宽约束, 保留满足可用带宽备份路径至 $\Omega(\text{BP}_{i,j})$ 。 k 最短路径算法可以通过构建包含 k 个最短路径的 k 最短路径树 T_k , 树 T_k 的根节点为 i , 叶子节点为终节点 j 的 k 个备份。为此, 单条备份路径拼接算法基于 k 最短路径树 T_k 实现^[16]。

下面采用数学归纳法证明。

当 $k = 1$ 时, 生成树 T_k 只包含 1 条最短路径。如果该最短路径构建过程中 H 超时, 得到 $\Omega(\text{BP}_{i,j})$ 为空; 如果 H 时延满足但不存在可用带宽, 同样得到 $\Omega(\text{BP}_{i,j})$ 为空; 如果 2 个条件均满足, 得到 $\Omega(\text{BP}_{i,j})$

包含一个元素。命题成立。

假设当 $k = n$ 时命题成立。即单条备份路径拼接算法能生成满足可用带宽和时延约束的备份路径集。

当 $k = n + 1$ 时, 讨论第 $n + 1$ 条备份路径生成的情况, 即利用已求得的 p_1, p_2, \dots, p_n 求取 p_{n+1} 。

我们利用偏离路径概念构建 T_k 。假设 $p = (m_1, m_2, \dots, m_r)$ 和 $q = (n_1, n_2, \dots, n_s)$ 分别为 i 到 j 的两条路径, 如果有满足以下约束的 x ,

(1) $x < r$ 且 $x < s$; (2) $m_t = n_t (0 \leq t \leq x)$; (3) $m_{x+1} \neq n_{x+1}$; (4) $(n_{x+1}, n_{x+2}, \dots, n_s)$ 是 n_{x+1} 至 j 的最短路径。则称 (n_x, n_{x+1}) 为 q 对 p 的偏离边, $(n_{x+1}, n_{x+2}, \dots, n_s)$ 为 q 对 p 的最短偏离路径。标准的最短路径求解算法中, 在已知前 n 条最短路径求解 p_{n+1} 的过程如下: 首先遍历 p_n 中除了节点 j 的所有节点 m_t , 以得到偏离节点, 得到 m_t 至节点 j 的最短路径; 然后将该路径与 p_n 上从 i 到 m_t 的路径进行拼接, 得到 p_{n+1} 的候选路径; 最后从候选路径集中选取最短的路径最为 p_{n+1} 。

单条备份路径拼接算法相比基于最短偏离路径的 p_{n+1} 生成算法, 主要改变发生在遍历 m_t 寻找至节点 j 最短路径的过程, 此过程加入了时延及带宽约束。每一个节点 m_t 至 j 的最短路径可以采用 Dijkstra 算法求解, 加入时延及带宽约束后得到的节点 m_t 至 j 的最短路径集合是未加约束的子集, 即缩小了偏离节点范围, 得到的 m_t 至 j 的最短路径可能是次最短路径; 由于 $k = n$ 时命题成立, p_n 上从 i 到 m_t 的路径是满足时延及带宽约束的最短路径, 将 i 到 m_t 与 m_t 至 j 的最短路径拼接即可得到 p_{n+1} 的候选路径; 最后选取可用带宽最大的路径作为 p_{n+1} 。

则当 $k = n + 1$ 时命题成立。

通过以上证明可知定理 1 得证。

MPR-QoS 备份路径选择算法通过多轮迭代运算完成, 主要嵌套单条备份路径拼接算法实现, 本质上是迭代运算过程。因此, 在单条备份路径拼接算法可以正确执行的情况下, 备份路径选择算法可以正确执行。另外, MPR-QoS 算法基于 k 最短路径算法实现, 同样可以保证产生的路径是无环路的。证毕

4.4 MPR-QoS 时间、空间复杂度分析

MPR-QoS 算法的单条备份路径拼接过程类似于 k 最短路径算法, 因此拥有同样的计算复杂度 $O(|E| + |V|) \lg(V)$ 。由于网络中共有 $|E|$ 条链路, 每条链路最多有 N 条备份路径, 则 MPR-QoS 算法的计算复杂度为 $O(|E| + |V|) \lg(V) N |E|$ 。

MPR-QoS 算法采用 4 个 1 维向量存储算法运行产生的数据: 1 个向量存储每条链路的最短备份路径集合 $\Omega(BP_{i,j})$, 路径可由一系列节点描述, 单条路径的存储空间不会超过 V , 则该向量存储空间最多为 $k|V||E|$; 1 个向量作为链表存储单条备份路径拼接结果, 所需存储空间最多为 $N|V||E|$; 1 个向量存储链路优先级排序结果, 存储空间为 $|E|$; 1 个向量存储链路的备份路径构造结果, 存储空间为 $N|V||E|$ 。因此, MPR-QoS 算法的空间复杂度为 $O(N|V||E|)$ 。

5 性能评估与分析

NS2 作为主流的网络仿真工具, 可以有效地实现网络协议和算法的正确性验证和性能分析。本文以此为仿真平台, 对 MPR-QoS 算法和已有链路故障恢复算法进行对比仿真, 并从链路故障恢复能力、重路由流量 QoS 满足率、链路过载率和算法运行时间 4 个方面讨论 MPR-QoS 算法的性能。

5.1 实验环境设置

实验拓扑采用 Tier-1 骨干网络^[7], 仿真参数设置如表 3。计算链路最短备份路径的 k 最短路径算法中的 k 值取 5。

链路故障场景做以下设置。共配置 9 个共享风险链路组(SRLG)事件, 各事件包含共享风险链路 2~5 条, 令 SRLG 事件发生故障概率(式(2)中的 p_r) 范围为 $[0.05\%, 0.5\%]$, 各 SRLG 事件故障下其组内链路的条件概率范围为 $[0.3, 1]$ 。在独立故障链路中取 10% 作为高概率故障链路, 其故障概率范围为 $[0.1\%, 0.5\%]$, 其余链路的故障概率范围为 $[0.01\%, 0.1\%]$ 。共配置 50 组故障概率场景, 针对每组故障概率场景在不同的随机数种子(seed)下进行 50 次故障恢复仿真。每次仿真中随机选择 1 条链路作为故障链路, 若该链路包含于某概率共享风险链路组中, 则按照条件概率选择并发的关联故障链路, 并取实验结果的平均值作为最终仿真结果。

表 3 仿真参数设置

类别	节点	边	链路带宽	流类别	流速率	包大小	输出队列长度	阈值 T_1	阈值 T_2	流数量
数值	50	180	(5/权重)Mbps	CBR	200kbps	1 kB	50 个数据包	10% 队列长度	100% 队列长度	20~160

对比算法描述如下: SelectBP^[11]算法考虑备份路径的可用带宽约束, 不考虑备份路径时延, 以最小化重路由流量丢弃量为目标; R3^[8]算法以多重故障下的网络无拥塞为目标; FR-TE^[9]算法以故障恢复过程的全网范围内负载均衡最优化为目标。

5.2 性能分析

本文从故障恢复率、重路由流量 QoS 满足率、链路过载率和算法运行时间 4 个方面对算法进行性能比较, 仿真结果表明 MPR-QoS 算法具有以下优势。

(1)提升了故障恢复率: 故障恢复率是完全恢复的故障链路所占比例, 算法 MPR-QoS 考虑备份路径数目 N 分别为 2, 3, 4 三种情况, 算法对比在 2 种不同时敏业务下进行, 结果如图 1 所示。由图可知, MPR-QoS 算法随着备份路径数 N 的增大, 故障恢复率呈逐渐上升趋势, 且在高时敏业务时提升了约 17.5%, 因此 N 值可以设置的大一些, 但是备份路径数过多会增加路由器的工作量, 使得算法实用性较差, 且网络对于可以设置的备份路径数量有严格的限制, 因此综合考虑, 将 MPR-QoS 的 N 值设为 4。 N 为 4 时, 相比较其它故障恢复算法, 低时敏业务时 MPR-QoS 算法故障恢复率最多提升了 35.1%, 高时敏业务时 MPR-QoS 算法故障恢复率最多提升

了 48.0%。仍以备份路径取 4 为例, 相比低时敏业务需求, 高时敏业务需求时, MPR-QoS 算法故障恢复率下降了约 2.8%, 而其它故障恢复算法故障恢复率最多下降了约 19.9%, 表明业务时敏需求的增强对 MPR-QoS 算法的故障恢复率影响更小。主要原因是 MPR-QoS 算法采用概率关联故障模型只挑选可靠的备份路径, 且优先保护高优先级链路, 使得易发生故障和高负载链路获得更多的保护资源。由于缺乏时延限制, SelectBP, FR-TE 和 R3 算法在高时敏业务下, 故障恢复效果较差, 受业务时敏性影响大, FR-TE 和 R3 算法没有考虑备份路径的可靠性问题, 故障恢复率较低。

(2)显著提升了链路故障时的重路由流量 QoS 满足率, 且网络业务时敏性越强, 算法优势越明显: 重路由流量 QoS 满足率是满足业务 QoS 需求的重路由流量占总重路由流量的比例, 不同业务时敏需求下 4 种算法的重路由流量 QoS 满足率的仿真结果如图 2 所示, 其中业务时敏需求分布范围为 $[50 \text{ ms}, 275 \text{ ms}]$, 与现实网络中的大部分业务时延需求相一致^[9], 设置 MPR-QoS 算法的备份路径 H 值与业务时敏需求相匹配, N 值取 4。从图中可以看出, MPR-QoS 算法的重路由流量 QoS 满足率始终维持在 98% 以上, 基本不受业务时敏需求的影响, 而 SelectBP,

FR-TE 和 R3 算法随着业务时敏需求的增强, 重路由流量 QoS 满足率迅速下降, FR-TE 算法在业务需求 50 ms 时相比 275 ms 时, 重路由流量 QoS 满足率下降量达 54.8%。主要原因是 MPR-QoS 算法考虑了 QoS 约束, 而其它 3 种算法缺乏这一限制, 当业务时延需求增强时, 满足 QoS 需求的流量逐渐下降, 严重影响业务传输质量。

(3)避免了链路过载情况的发生: 链路过载率是因重路由过载的链路占所有链路的比例。由于运营商一般将链路利用率控制在 40% 以内^[1], 本文仿真分布范围为 [5%, 40%] 链路利用率时链路过载情况, 图 3 为加载低时敏业务时的仿真结果。由图中可以看出, MPR-QoS 和 SelectBP 算法链路过载率始终保持在 5% 以内, 与链路利用率无关; FR-TE 和 R3 算法随着链路利用率的升高, 链路出现大范围的过载, 当链路利用率达到 40% 时, 2 种算法的链路过载率超过 45%, 大大降低了故障恢复性能。主要原因是 MPR-QoS 和 SelectBP 算法仅采用具有可用带宽的链路来恢复故障, 且严格控制备份路径的重路由流量, 最大程度地避免了链路过载情况的发生。

(4)降低了链路故障恢复问题的求解时间: 表 4 表示 4 种算法求解链路故障恢复问题的平均运行时间。从表中可以看出, 相较于 MPR-QoS 和 SelectBP 算法, FR-TE 和 R3 算法时间开销较大, 极大地影响链路故障恢复时配置保护资源所需的时间。主要

原因是 MPR-QoS 和 SelectBP 算法采用了多轮启发式算法, 大大缩短了问题求解时间, 而 FR-TE 和 R3 算法采用传统的线性规划方法求解约束优化问题, 求解时间随着网络规模的增长呈指数规律增加。

表 4 算法运行时间(s)

算法	MPR-QoS	SelectBP	FR-TE	R3
运行时间	59.6	70.1	419.9	128.7

6 结束语

本文研究了具有 QoS 约束的链路故障恢复问题。以往的故障恢复算法目标是寻找可连通的备份路径, 并尽最大努力地保证故障链路的重路由, 忽略了业务的 QoS 需求, 特别对于高时延敏感业务, 重路由后的流量中无效流量占很大的比例。针对此问题, 本文在网络可用带宽资源和业务时延约束下最大化重路由流量, 提出故障概率关联的多备份路径模型, 并将故障恢复问题建模为 MILP 模型, 利用提出的 MPR-QoS 算法进行求解。此外通过数学推导证明提出的算法理论上是正确的。仿真结果表明, 与传统的故障恢复算法相比, MPR-QoS 算法提升了故障恢复率, 避免了链路过载现象的发生, 降低了运行时间, 显著地提升了链路故障时的重路由流量 QoS 满足率, 且网络业务时延敏感需求越强, 算法优势就越明显。

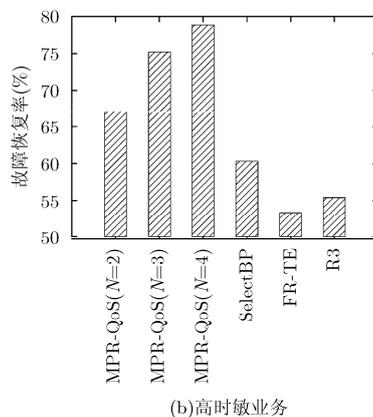
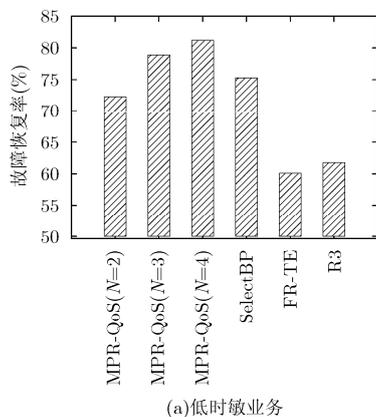


图 1 故障恢复率

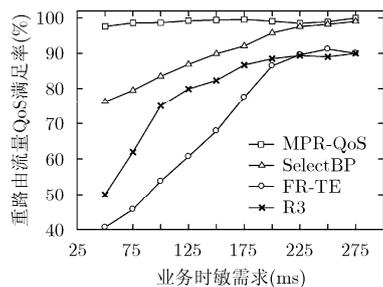


图 2 重路由流量 QoS 满足率

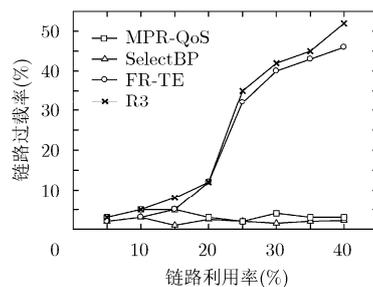


图 3 链路过载率

参 考 文 献

- [1] WELLBROCK G and XIA T J. How will optical transport deal with future network traffic growth?[C]. Optical Communication(ECOC), Cannes, France, 2014: 21–25. doi: 10.1109/ECOC.2014.6964248.
- [2] TURNER D, LEVCHENKO K, SNOEREN A C, *et al.* California fault lines: understanding the causes and impact of network failures[C]. ACM SIGCOMM, New Delhi, India, 2010: 315–326. doi: 10.1145/1851275.1851220.
- [3] 张民贵, 刘斌. IP 网络的快速故障恢复[J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1595–1602.
ZHANG Mingui and LIU Bin. Fast failure recovery of IP networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(8): 1595–1602.
- [4] 齐宁, 汪斌强, 王志明. 可重构服务承载网容错构建算法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 468–473. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00670.
QI Ning, WANG Binqiang, and WANG Zhiming. Research on reconfigurable service carrying network resilient construction algorithms[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 468–473. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00670.
- [5] SHAND M and BRYANT S. IP fast reroute framework[P]. America, RFC5714, 2010.
- [6] 王禹, 王振兴, 张连成. 一种基于结构化备份子图的路由系统失效恢复方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(9): 2254–2260. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01669.
WANG Yu, WANG Zhenxing, and ZHANG Liancheng. A failure recovery method for routing system based on structured backup subgraph[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(9): 2254–2260. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01669.
- [7] YANG B H, LIU J D, and SHENKER S, *et al.* Keep forwarding: Towards k -link failure resilient routing[C]. IEEE INFOCOM 2014 IEEE Conference on Computer Communications, Toronto, Canada, 2014: 1617–1625. doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6848098.
- [8] WANG Y, WANG H, MAHIMKAR A, *et al.* R3: resilient routing reconfiguration[C]. ACM SIGCOMM, New Delhi, India, 2010: 291–302. doi: 10.1145/1851275.1851218.
- [9] SUCHARA M, XU D, DOVERSPIKE R, *et al.* Network architecture for joint failure recovery and traffic engineering[C]. ACM SIGMETRICS, New York, NY, USA, 2011: 97–108. doi: 10.1145/2007116.2007128.
- [10] BANNER R and ORDA A. Designing low-capacity backup networks for fast restoration[C]. 2010 Proceedings IEEE INFOCOM, San Diego, America, 2010: 1–9. doi: 10.1109/INFOCOM.2010.5462007.
- [11] ZHENG Q, CAO G H, THOMAS F, *et al.* Cross-layer approach for minimizing routing disruption in IP networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(7): 1659–1669. doi: 10.1109/TPDS.2013.157.
- [12] MISRA S, XUE G L, and YANG D J. Polynomial time approximations for multi-path routing with bandwidth and delay constrains[C]. IEEE INFOCOM, Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 558–566. doi: 10.1109/INFOCOM.2009.5061962.
- [13] TERESA G, MIGUEL S, JOSE C, *et al.* Two heuristics for calculating a shared risk link group disjoint set of paths of min-sum cost[J]. *Journal of Network and System Management*, 2014, 37(10): 332–338. doi: 10.1007/s10922-014-9332-6.
- [14] ZHENG Q, CAO G, PORTA T L, *et al.* Optimal recovery from large-scale failures in IP networks[C]. IEEE ICDCS, Macau, China, 2012: 295–304. doi: 10.1109/ICDCS.2012.47.
- [15] JOHNSTON M, LEE H W, and MODIANO E. A robust optimization approach to backup network design with random failures[C]. IEEE INFOCOM, Shanghai, China, 2011: 1512–1520. doi: 10.1287/opre.1050.0238.
- [16] 周灵, 王建新. 路径节点驱动的低代价最短路径树算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(5): 721–728.
ZHOU Ling and WANG Jianxin. Path nodes-driven least-cost shortest path tree algorithm[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2011, 48(5): 721–728.
- [17] ZHENG Q, ZHAO J, and CAO G H. A cross-layer approach for IP network protection[C]. Dependable Systems and Networks (DSN), Boston, MA, USA, 2012: 1–12.
- 崔文岩: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为信息系统网络抗毁技术.
- 孟相如: 男, 1963 年生, 博士, 教授, 研究方向为宽带通信网.
- 杨欢欢: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为下一代通信技术.