核心链路感知的可生存虚拟网络链路保护方法

苏玉泽*① 孟相如② 康巧燕② 韩晓阳①

①(空军工程大学研究生院 西安 710051)

②(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘 要：针对现有可生存虚拟网络链路保护方法无差别对待所有虚拟链路、备份资源消耗多且故障后网络恢复时延长的问题，该文提出一种核心链路感知的可生存虚拟网络链路保护(CLA-SVNLP)方法。首先，综合考虑虚拟链路动态和静态两方面因素构建虚拟链路核心度度量模型，依据虚拟网络生存性需求，对核心度较高的虚拟链路进行备份保护；其次，将p圈引入可生存虚拟网络链路保护，依据虚拟网络特点构建p圈，为核心虚拟链路提供1:N保护，即每条核心虚拟链路平均消耗1/N条的备份链路带宽资源以减少备份链路资源消耗，并将单物理链路保护问题转化为多个p圈内的单虚拟链路保护问题；最后网络编码技术与p圈结合，将备份链路对核心虚拟链路提供的1:N保护转化为1+N保护，避免了故障后定位、检测及数据重传。仿真结果表明，该方法提高了备份资源利用率且缩短了故障后的网络恢复时延。

关键词：可生存虚拟网络；链路保护；核心链路感知；p圈；网络编码

中图分类号：TP393 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2019)07-1587-07

DOI: 10.11999/JEIT180737

Core Link Aware Survivable Virtual Network Link Protection Method

SU Yuze① MENG Xiangru② KANG Qiaoyan② HAN Xiaoyang①

①(*Graduate College, Air Force Engineering University, Xi'an* 710051, *China*)

②(*Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an* 710077, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of all virtual links take without discrimination, high backup resource consumption and long network recovery delay after failures in existing survivable virtual network link protection methods, a Core Link Aware Survivable Virtual Network Link Protection (CLA-SVNLP) method is proposed. At first, the core degree metric model of virtual link is constructed by considering virtual link dynamic and static factors. According to virtual network survivable needs, virtual links with high core degrees are protected by backup resources. Then the p-cycle is introduced into survivable virtual network link protection and the p-cycle is constructed based on the characteristics of virtual network to provide 1:N protection for core virtual links. That means each core virtual link consumes 1/N backup link bandwidth resources and the backup link resource consumption is reduced. It also transforms the single physical link protection into single virtual link protection in multiple p-cycles. At last, the network coding and p-cycle are both used to transform the 1:N protection into 1+N protection for core virtual links which avoids fault location, detection and data retransmission after failures. Simulation results show that the proposed method can improve the utilization of backup resource and shorten the network recovery delay after failures.

Key words: Survivable virtual network; Link protection; Core link aware; P-cycle; Network coding

1 引言

随着互联网规模的不断扩大以及用户数量的爆炸增长，网络僵化问题成为制约网络体系结构创新发展的瓶颈。网络虚拟化技术通过资源抽象、聚合、隔离等机制允许多个异构的虚拟网络同时运行于同一底层物理网络，共享底层基础设施资源，已成为解决网络僵化问题的有效手段，同时作为下一代网络实现的关键技术，获得广泛关注[1,2]。

虚拟网络映射是指在网络虚拟化环境中以满足各类约束条件为前提，通过合理的资源分配来构建

收稿日期：2018-07-20；改回日期：2019-01-31；网络出版：2019-03-16

*通信作者： 苏玉泽 glgiuip@163.com

基金项目：国家自然科学基金(61401499)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61401499)

虚拟网络的过程，它已被证明是NP-hard问题，且大量研究集中于假设虚拟网络无故障情况下如何提高其映射效率[3,4]。但是网络运行过程中会受到各种攻击、自然灾害以及自身损毁等生存威胁，故障难以避免，且其中70%的网络故障是单链路故障[5]。在网络虚拟化环境中，底层物理网络承载多个类型不一的虚拟网络，当物理链路故障时，承载其上的多条虚拟链路会发生故障，影响虚拟网络性能的发挥。因此，针对单物理链路故障，研究网络虚拟化环境下的链路保护对虚拟网络的安全稳定具有重要意义。

网络虚拟化环境中针对链路故障的可生存性研究分为两类：重构和保护策略[6]。重构策略是指不为链路预留备份资源，链路故障后通过重构的方式进行恢复，但是恢复时延长且成功率难以保证[7]。保护策略是指提前为链路备份资源，链路故障后及时从故障部件切换至备份部件。其中，保护策略可分为专有保护[8]与共享保护[9]。专有保护指备份资源仅用于特定链路的保护；共享保护指备份资源可以同时为多条链路提供保护。

为了降低虚拟网络链路备份资源消耗，p圈等保护圈开始用于虚拟网络链路的备份保护[10]。文献[11]提出一种两阶段的虚拟网络链路保护策略，首先在虚拟层进行虚拟网络拓扑增强，之后在物理层构建p圈来提高备份资源利用率。但p圈仅能提供1:N的链路保护，无法缩短虚拟网络故障后的恢复时延。为了缩短网络故障后的恢复时延，网络编码技术逐渐获得关注，并开始应用于下一代SONET, MPLS/GMPLS和IP-over-WDM中[12,13]。文献[14]将网络编码应用于虚拟网络链路保护，提出一种编码感知的虚拟网络映射方法，并设计了两种网络编码方案，但是该方法缺乏对降低备份链路资源消耗以及如何选取核心链路进行针对性保护的考虑。

综上所述，降低备份资源消耗和缩短网络恢复时延是可生存虚拟网络链路保护的关键研究点。本文针对如何为虚拟网络链路提供精准、高效以及实时保护的问题，综合考虑选取核心虚拟链路、降低备份资源消耗和缩短网络恢复时延，提出一种核心链路感知的可生存虚拟网络链路保护(Core Link Awart Survivable Virtual Network Link Protection, CLA-SVNLP)方法。首先从动态和静态角度度量虚拟链路核心度，选取核心链路进行保护，提供精准保护的同时减少备份资源消耗；之后构建网络虚拟化环境中的p圈，将单物理链路保护转化为多个p圈内的单虚拟链路保护问题，对核心虚拟链路提供1:N保护，降低备份链路资源消耗；最后引入网络编码技术将p圈的1:N保护转化为1+N保护以缩短网络恢复时延。最后设置仿真实验，验证本文所提方法性能。

2 问题描述

本文采用虚拟链路备份保护的方法，即以虚拟链路为备份目标，首先构建虚拟链路核心度度量模型，选取需要保护的核心虚拟链路，并构建p圈减少备份链路资源消耗，同时引入网络编码技术缩短网络恢复时延。但是相较于传统的网络链路保护，可生存虚拟网络链路保护存在以下3个特征，对以上技术的引入和应用提出了不同要求。

(1) 虚拟网络映射与链路保护的本质是如何合理地分配和共享有限的物理网络资源。所以，在采取合理虚拟网络映射算法前提下，构建准确的虚拟链路核心度度量模型以选取核心链路进行优先保护可以更有针对性地利用有限的底层网络资源。其次，在备份资源一定的情况下，采取更高效的虚拟网络链路保护方法提高底层资源利用效率同样重要。

(2) 由于多条虚拟链路共享1条物理链路，所以当1条物理链路失效时，可能会出现故障物理链路承载的多条虚拟链路同时失效，且至少两条虚拟链路位于同一p圈内的情况。虽然p圈能提供1:N的链路保护，但当同一p圈内同时出现多条故障链路时，无法保证所有故障虚拟链路同时恢复。因此，需要设计一种更加适合网络虚拟化环境的p圈构建技术。

(3) 本文并未对整条物理链路进行保护，因为对整条物理链路进行保护即对其承载的所有虚拟链路进行了保护，无法实现核心虚拟链路的精准保护，造成资源浪费，而对物理链路承载的多条核心虚拟链路分别保护同样可以实现物理链路故障后的网络恢复。

3 网络模型及评价指标

3.1 网络模型

(1) 物理网络：物理网络用带权无向图$\boldsymbol{G}_{\mathrm{S}}=(N_{\mathrm{S}}, L_{\mathrm{S}})$表示，$N_{\mathrm{S}}$与$L_{\mathrm{S}}$分别表示物理网络节点集合和链路集合。物理节点的基本属性有$\mathrm{cpu}(n_{\mathrm{s}})$, $\mathrm{loc}(n_{\mathrm{s}})$。$\mathrm{cpu}(n_{\mathrm{s}})$为物理节点$n_{\mathrm{s}}$的可用CPU资源，$\mathrm{loc}(n_{\mathrm{s}})$为物理节点$n_{\mathrm{s}}$的地理位置属性。物理链路的基本属性$\mathrm{bw}(l_{\mathrm{s}})$为物理链路$l_{\mathrm{s}}$的可用带宽资源。

(2) 虚拟网络：与物理网络类似，虚拟网络用带权无向图$\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}=(N_{\mathrm{V}}, L_{\mathrm{V}})$表示，$N_{\mathrm{V}}$与$L_{\mathrm{V}}$分别表示虚拟网络节点集合和链路集合。$L_{\mathrm{V}}=L_{\mathrm{Vp}}\cup L_{\mathrm{Vb}}$, $L_{\mathrm{Vp}}\cap L_{\mathrm{Vb}}=\varnothing$，其中，$L_{\mathrm{Vb}}$表示备份虚拟链路集合，$L_{\mathrm{Vp}}$表示主虚拟链路集合。虚拟节点的基本属性$\mathrm{cpu}(n_{\mathrm{v}})$为虚拟节点$n_{\mathrm{v}}$的CPU资源需求。虚拟链路的基本属性$\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vp}})$和$\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vb}})$为主虚拟链路$l_{\mathrm{vp}}$和备份虚拟链路$l_{\mathrm{vb}}$的带宽资源需求。

3.2 评价指标

本文选用虚拟网络请求接受率、长期平均收益开销比、备份带宽比和平均网络恢复时延作为主要评价指标。

(1) 请求接受率：虚拟网络请求接受率即t时刻成功映射的虚拟网络数量与所有虚拟网络映射请求总数之比。

(2) 长期平均收益开销比：对虚拟网络请求$\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}=(N_{\mathrm{V}}, L_{\mathrm{V}})$，定义收益$R(G_{\mathrm{V}}, t)$和开销$C(G_{\mathrm{V}}, t)$为

$$R(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}, t)=\alpha \sum_{n_{\mathrm{v}}\in N_{\mathrm{V}}} \mathrm{cpu}(n_{\mathrm{v}})+\sum_{l_{\mathrm{vp}}\in L_{\mathrm{Vp}}} \mathrm{bw}(l_{\mathrm{vp}}) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} C(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}, t)=&\beta \sum_{n_{\mathrm{v}}\in N_{\mathrm{V}}} \mathrm{cpu}(n_{\mathrm{v}})+\sum_{l_{\mathrm{vp}}\in L_{\mathrm{Vp}}} \mathrm{hops}(l_{\mathrm{vp}})\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vp}}) \\ &+\sum_{l_{\mathrm{vb}}\in L_{\mathrm{Vb}}} \mathrm{hops}(l_{\mathrm{vb}})\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vb}}) \end{aligned} \tag{2}$$

其中，参数α, β分别为节点与链路资源的比重参数，本文均设置为1。$\mathrm{hops}(l_{\mathrm{vp}})$为主虚拟链路$l_{\mathrm{vp}}$在映射的物理网络上经过的跳数。$\mathrm{hops}(l_{\mathrm{vb}})$为备份虚拟链路$l_{\mathrm{vb}}$在物理网络上的跳数。

通常利用长期平均收益开销比来表征虚拟网络稳定状态下的性能，表示为

$$R/C=\lim_{T\to\infty} \frac{\sum\limits_{t=0}^{T} \sum\limits_{\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}\subset \mathrm{VN}_{\mathrm{map}}(t)} R(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}, t)}{\sum\limits_{t=0}^{T} \sum\limits_{\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}\subset \mathrm{VN}_{\mathrm{map}}(t)} C(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}, t)} \tag{3}$$

其中，$\mathrm{VN}_{\mathrm{map}}(t)$是$t$时刻成功映射的虚拟网络集合。

(3) 备份带宽比：本文用备份带宽比表征备份资源的利用率，定义为

$$\mathrm{BBR}=\lim_{T\to\infty} \frac{\sum\limits_{t=0}^{T} \sum\limits_{\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}\subset \mathrm{VN}_{\mathrm{map}}(t)} \sum\limits_{l_{\mathrm{vb}}\in L_{\mathrm{Vb}}} \mathrm{hops}(l_{\mathrm{vb}})\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vb}})}{\sum\limits_{t=0}^{T} \sum\limits_{\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}\subset \mathrm{VN}_{\mathrm{map}}(t)} \sum\limits_{l_{\mathrm{vp}}\in L_{\mathrm{Vp}}} \mathrm{hops}(l_{\mathrm{vp}})\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vp}})} \tag{4}$$

(4)平均网络恢复时延：本文用平均网络恢复时延表征网络恢复效率，即网络中所有故障的总恢复时延与网络故障总数之比。

4 核心链路感知的可生存虚拟网络链路保护方法

4.1 虚拟链路核心度度量模型

由于底层物理网络资源有限，无法对所有虚拟链路进行备份保护。因此，本文首先建立虚拟链路核心度度量模型，选择核心虚拟链路进行备份保护。本文重点从静态与动态两方面考虑虚拟链路核心度度量因素。静态因素主要指虚拟链路在虚拟拓扑中的关键度[15]。动态因素主要指虚拟链路上承载的业务类型以及链路负载情况。本文综合考虑虚拟链路核心度静态与动态因素，给出虚拟链路核心度度量模型，如式(5)所示

$$\begin{aligned} \mathrm{LCR}(l_{\mathrm{vp}})&=\mathrm{CR}(l_{\mathrm{vp}})\cdot \mathrm{LR}(l_{\mathrm{vp}})\cdot \eta(l_{\mathrm{vp}}) \\ &=\sum_{i,j} \frac{\sum\limits_{p\in P_{ij}} \varphi_p^{l_{\mathrm{vp}}}}{|P_{ij}|}\cdot \frac{u\_\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vp}})}{\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vp}})}\cdot \eta(l_{\mathrm{vp}}), \\ &\quad \eta(l_{\mathrm{vp}})\in[0,1] \end{aligned} \tag{5}$$

其中，$\mathrm{CR}(l_{\mathrm{vp}})$为链路关键度，$P_{ij}$为虚拟节点$i$与$j$之间最短路径的集合，$\varphi_p^{l_{\mathrm{vp}}}$表示经过虚拟链路$l_{\mathrm{vp}}$的最短路径数量。链路负载度$\mathrm{LR}(l_{\mathrm{vp}})$用已使用的虚拟链路资源$u_\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vp}})$与虚拟链路总资源$\mathrm{bw}(l_{\mathrm{vp}})$之比表征，$\eta(l_{\mathrm{vp}})$表征虚拟链路$l_{\mathrm{vp}}$承载业务的重要度，业务重要度越高，$\eta(l_{\mathrm{vp}})$值越大。

依据虚拟网络生存性需求设置虚拟链路核心度阈值δ，若$\mathrm{LCR}(l_{\mathrm{vp}})>\delta$，则此虚拟链路为核心虚拟链路，需要进行备份保护。核心链路失效对网络产生的影响极大，且如果恢复失败，则此虚拟链路所在的虚拟网络会产生相应赔偿金。因此，基于虚拟链路核心度，本文给出虚拟链路失效后的虚拟网络赔偿金定义，并重新定义虚拟网络长期平均收益以及收益开销比。

虚拟链路失效后的虚拟网络赔偿金定义如式(6)所示

$$P(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}, t)=\zeta\cdot \sum_{l_{\mathrm{f}}\in L_{\mathrm{F}}} \mathrm{bw}(l_{\mathrm{f}})\cdot \mathrm{LCR}(l_{\mathrm{f}}) \tag{6}$$

其中，ζ为赔偿金系数，L_{F}为失效虚拟链路集合，$L_{\mathrm{F}}\subset L_{\mathrm{V}}$。在赔偿金系数一定的前提下，核心虚拟链路失效对整个虚拟网络的影响越大，赔偿金越多。所以，对虚拟网络的长期平均收益进行重新定义，如式(7)所示

$$\begin{aligned} R'(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}, t)&=R(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}, t)-P(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}, t) \\ &=\alpha \sum_{n_{\mathrm{v}}\in N_{\mathrm{V}}} \mathrm{cpu}(n_{\mathrm{v}})+\sum_{l_{\mathrm{vp}}\in L_{\mathrm{Vp}}} \mathrm{bw}(l_{\mathrm{vp}}) \\ &\quad -\zeta\cdot \sum_{l_{\mathrm{f}}\in L_{\mathrm{F}}} \mathrm{bw}(l_{\mathrm{f}})\cdot \mathrm{LCR}(l_{\mathrm{f}}) \end{aligned} \tag{7}$$

对虚拟网络的长期平均收益开销比进行重新定义，如式(8)所示

$$R'/C=\lim_{T\to\infty}\frac{\sum_{t=0}^{T}\sum_{\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}\subset\mathrm{VN}_{\mathrm{map}}(t)}R'(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}},t)}{\sum_{t=0}^{T}\sum_{\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}\subset\mathrm{VN}_{\mathrm{map}}(t)}C(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}},t)}=\lim_{T\to\infty}\frac{\sum_{t=0}^{T}\sum_{\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}\subset\mathrm{VN}_{\mathrm{map}}(t)}(R(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}},t)-P(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}},t))}{\sum_{t=0}^{T}\sum_{\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}}\subset\mathrm{VN}_{\mathrm{map}}(t)}C(\boldsymbol{G}_{\mathrm{V}},t)} \tag{8}$$

4.2 网络虚拟化环境下的p圈构造

本文针对单物理链路故障引起的多条虚拟链路故障，选用p圈对核心虚拟链路进行保护。p圈通过共享备份资源可以提供1:N链路保护，极大减少了备份资源消耗，且构造方法简单，在光网络、IP网络以及覆盖网络中得到广泛应用。

但是多个异构的虚拟网络映射在同一物理网络上，因此存在多条虚拟链路映射在同一条底层链路上。p圈虽然可以为N条虚拟链路提供保护，但是当同一p圈内的两条或者多条链路同时故障时，则无法保证同时全部恢复，所以为了有效应对单物理链路故障，本文在构建p圈时，将同一物理链路承载的多条虚拟链路置于多个不同的p圈内，保证单物理链路故障时，每个p圈内最多一条关联的虚拟链路发生故障，即将单物理链路故障导致的多条虚拟链路故障保护问题转化为多条独立虚拟链路分别构造p圈的问题。

4.3 基于p圈和网络编码的可生存虚拟网络链路保护

虽然构造p圈可以降低备份资源消耗，但是网络恢复时延较长，为此，引入网络编码技术。网络编码技术与链路保护技术相结合可以将1:N链路保护转化为1+N链路保护，减少故障定位、检测和数据重传，缩短网络恢复时延。

每个p圈分为2个半p圈：顺时针(T圈)和逆时针(S圈)，数据可以在其上以相反的方向同时传输。p圈为备份的保护链路，p圈内的跨接链路为主链路，承担业务的数据传输。圈上节点在向跨接链路发送数据的同时，也将本轮次在T圈和S圈上接收到的数据进行编码后继续在圈上传输，当跨接链路故障时，只需将T圈和S圈上的数据与本地数据进行解码即可恢复出丢失数据。

在p圈中，节点S_i和T_j分别位于S圈和T圈，且$S=\{S_1,S_2,\cdots,S_N\}$，$T=\{T_1,T_2,\cdots,T_N\}$。从节点S_i发送至节点T_j的数据表示为u_i，从节点T_j发送至S_i的数据表示为d_j。$\gamma(S_i)$表示S圈上S_i的下一节点，$\gamma(T_j)$表示S圈上T_j的下一节点；$\gamma^{-1}(S_i)$表示S圈上S_i的上一节点，$\gamma^{-1}(T_j)$表示S圈上T_j的上一节点。$\mu(S_i)$表示T圈上S_i的下一节点，$\mu(T_j)$表示T圈上T_j的下一节点；$\mu^{-1}(S_i)$表示T圈上S_i的上一节点，$\mu^{-1}(T_j)$表示T圈上T_j的上一节点。$U_{\mathrm{S}}(S_i)$表示S_i在S圈上的上游节点集合，$U_{\mathrm{T}}(S_i)$表示S_i在T圈上的上游节点集合。$N(S_i)$表示节点S_i在主链路另一侧的节点。

图1所示的是基于p圈和网络编码的可生存虚拟网络链路保护的一个示例。其中，有4条核心虚拟链路(跨接链路)被一个p圈保护。数据在p圈以及跨接链路上同时传输。节点将产生或者到达的数据发送至跨接链路，同时对S圈和T圈上的数据进行编码，并将编码结果分别在各自方向进行传输，本文所用的编码算法为异或(XOR)运算。

在S圈上,节点S_i首先将它的上一节点$\gamma^{-1}(S_i)$发送来的数据$g_{\gamma^{-1}(S_i)\to S_i}$与跨接链路发送来的数据$d_j$和自身产生或者到达的数据$u_i$进行编码，编码结果$g_{S_i\to\gamma(S_i)}$再发送至节点$\gamma(S_i)$，即

$$g_{S_i\to\gamma(S_i)}=g_{\gamma^{-1}(S_i)\to S_i}+(u_i+d_j) \tag{9}$$

同理，在T圈上,节点S_i首先将它的上一节点$\mu^{-1}(S_i)$发送来的数据$k_{\mu^{-1}(S_i)\to S_i}$与跨接链路发送来的数据d_j和自身产生或者到达的数据u_i进行编码，编码结果$k_{S_i\to\mu(S_i)}$再发送至节点$\mu(S_i)$，其中

$$k_{S_i\to\mu(S_i)}=k_{\mu^{-1}(S_i)\to S_i}+(u_i+d_j) \tag{10}$$

假设位于节点S_i和T_j之间的跨接路径发生故障导致失效，则在节点S_i处，S圈的上游节点集合与集合S的交集节点的编码数据为$\sum_{\{k:S_k\in U_S\{S_i\}\cap S\}}u_k+\sum_{\{k:T_k\in N(U_S\{S_i\}\cap S)\}}d_k$，S圈的上游节点集合与集合$T$的交集节点的编码数据为$\sum_{\{k:T_k\in U_S\{S_i\}\cap T\}}d_k+$

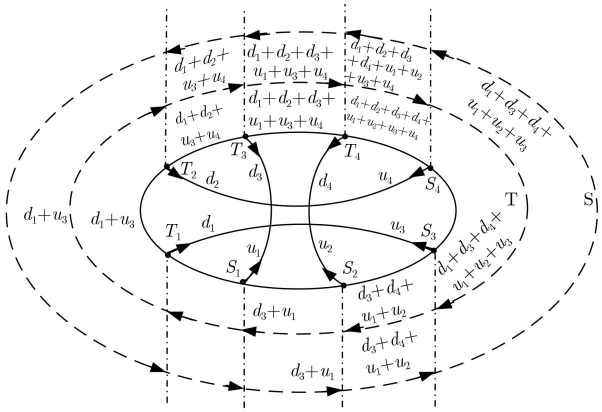

图 1 基于p圈和网络编码的可生存虚拟网络链路保护示例

$\sum_{\{k:S_k\in N(U_S\{S_i\}\cap T)\}} u_k$。T圈的上游节点集合与集合$S$的交集节点的编码数据为$\sum_{\{k:S_k\in U_T\{S_i\}\cap S\}} u_k+\sum_{\{k:T_k\in N(U_T\{S_i\}\cap S)\}} d_k$，T圈的上游节点集合与集合$T$的交集节点的编码数据为$\sum_{\{k:T_k\in U_T\{S_i\}\cap T\}} d_k+\sum_{\{k:S_k\in N(U_T\{S_i\}\cap T)\}} u_k$。

所以，将节点S_i收到的S圈上游节点的总数据与T圈上游节点的总数据进行编码运算，即

$$\begin{aligned}
&g_{\gamma^{-1}(S_i)\to S_i}+k_{\mu^{-1}(S_i)\to S_i}\\
&=\left(\sum_{\{k:S_k\in U_S(S_i)\cap S\}} u_k+\sum_{\{k:T_k\in N(U_S\{S_i\}\cap S)\}} d_k\right)\\
&\quad+\left(\sum_{\{k:T_k\in U_S(S_i)\cap T\}} d_k+\sum_{\{k:S_k\in N(U_S(S_i)\cap T)\}} u_k\right)\\
&\quad+\left(\sum_{\{k:S_k\in U_T(S_i)\cap S\}} u_k+\sum_{\{k:T_k\in N(U_T(S_i)\cap S)\}} d_k\right)\\
&\quad+\left(\sum_{\{k:T_k\in U_T(S_i)\cap T\}} d_k+\sum_{\{k:S_k\in N(U_T(S_i)\cap T)\}} u_k\right)\\
&=\left(\sum_{\{k:S_k\in S\backslash\{S_i\}\}} u_k+\sum_{\{k:T_k\in T\}} d_k\right)\\
&\quad+\left(\sum_{\{k:S_k\in S\}} u_k+\sum_{\{k:T_k\in T\backslash\{T_j\}\}} d_k\right)=u_i+d_j \quad (11)
\end{aligned}$$

最后再将其与节点S_i自身产生或者达到的数据u_i进行编码运算，即可恢复出丢失的数据d_j。同理，在节点T_j也可恢复出丢失的数据u_i。

4.4 方法复杂度

首先，虚拟链路核心度计算次数、网络编码XOR运算次数均与核心链路的数量有关，所以它们的复杂度均为$O(|E_{\mathrm{C}}|)$，其中，$|E_{\mathrm{C}}|$为核心链路数量；其次是p圈构造的复杂度，构造两条基本链路组成的p圈时的复杂度为$O\left(|N_{\mathrm{V}}|^2\right)$，$|N_{\mathrm{V}}|$为虚拟网络节点数量，则构造$|E_{\mathrm{C}}|$条核心链路组成的p圈的复杂度为$O\left(|E_{\mathrm{C}}|\cdot|N_{\mathrm{V}}|^2\right)$。所以，本文所提方法的复杂度为$O\left(|E_{\mathrm{C}}|\cdot|N_{\mathrm{V}}|^2+2|E_{\mathrm{C}}|\right)$。

5 性能评估与分析

为验证方法性能，本节从请求接受率、长期平均收益开销比、备份带宽比和平均网络恢复时延4个角度验证本文所提方法的性能。

5.1 仿真环境

仿真实验使用的底层网络拓扑与虚拟网络拓扑均由改进的Salam网络拓扑随机生成算法生成。底层物理网络在1000 × 1000范围内生成均匀分布的100个节点和500条链路。物理节点的CPU资源和物理链路的带宽资源均服从[50,100]的均匀分布。虚拟网络请求到达服从泊松分布，到达时间单元为100，到达个数期望为5。虚拟网络请求的生存时间服从期望为1000个时间单元的指数分布，虚拟节点的数目服从[5,8]的均匀分布，节点间链路连接概率为0.5。节点的CPU资源需求和虚拟链路带宽资源需求均服从[0,5]的均匀分布，假设所有虚拟节点的位置距离约束量为500。η服从[0.2,1]的均匀分布，每条虚拟链路的负载服从[0.5,1]的均匀分布，阈值门限δ=0.35，赔偿金系数ζ=10。将已成功映射的虚拟链路存入集合I_{VL}，并将其映射的物理链路存入集合I_{SL}。随机从I_{SL}中选取$\lceil u\cdot \mathrm{lh}(I_{\mathrm{SL}})\rceil$条物理链路作为故障物理链路存入集合$F_{\mathrm{SL}}$，$\mu$为物理链路故障率，$\mu$=0.1，$\mathrm{lh}(I_{\mathrm{SL}})$为集合$I_{\mathrm{SL}}$内元素数量。

模拟运行5×10^4个时间单位。仿真实验共进行10次，取其平均值作为最终仿真结果以消除随机因素影响。

5.2 对比评价

本文进行了4种可生存虚拟网络链路保护方法(见表1)的比较，且算法采用相同的底层物理网络以及虚拟请求，由于部分对比算法在各自的仿真环境中采用的虚拟网络映射算法不同，为了消除虚拟网络映射算法对仿真结果的影响，所有虚拟网络链路保护方法均采用EAJTA-VNE算法[16]作为虚拟网络映射算法。由于除本文所提CLA-SVNLP方法外，其它3种方法不涉及核心虚拟链路的选取，因

表 1　方法比较

方法名称	方法描述
CLA-SVNLP	核心链路感知的可生存虚拟网络链路保护方法
1+1保护[8]	1+1的专有虚拟链路保护方法
SPA-BK[9]	物理层预留备份资源的Shared Pre-Allocation共享机制
G-Coding[14]	虚拟拓扑增强且采用通用网络编码策略的共享机制

此设置其它3种算法随机选择与CLA-SVNLP方法核心链路数量相等的虚拟链路进行保护。

图2所示的是4种方法虚拟网络映射请求接受率比较图。由于底层物理网络资源主要用于虚拟网络映射和核心虚拟链路备份保护，当备份资源利用效率较高时，会保留更多的资源用于虚拟网络映射，所以虚拟网络请求接受率可以表征备份资源的利用效率。从图2中可以看出，CLA-SVNLP方法的请求接受率最高，维持在0.69左右，它采用p圈对虚拟链路进行备份保护，减少了备份资源消耗。其次是G-Coding方法，它先对虚拟链路进行备份，再对增强后的虚拟网络进行映射，它的请求接受率维持在0.67左右。SPA-BK方法是从所有物理链路资源中预留一部分用于虚拟链路保护，它存在一定盲目性，但虚拟网络请求接受率仍旧高于1+1保护。1+1保护是典型的专有保护方法，资源利用率最低，它的请求接受率仅0.52左右。

图3所示的是4种方法长期平均收益开销比的比较。可以看出，1+1保护的长期平均收益开销比最低。因为它对虚拟链路进行专有保护，较大比例资源被用于备份，降低了收益，增大了开销。SPA-BK方法在物理层预留一定比例的物理链路资源进行共享保护，所以长期平均收益开销比高于1+1保护。相比于SPA-BK方法，G-Coding在虚拟层对需要保护的虚拟链路进行拓扑增强，备份资源的分配更有针对性，所以G-Coding方法的长期平均收益开销比高于SPA-BK方法。CLA-SVNLP方法针对虚拟链路采用p圈保护减少备份开销，而且通过对核心虚拟链路进行针对性保护，减少了虚拟链路失效后产生的虚拟网络赔偿金，所以其长期平均收益开销比最高。

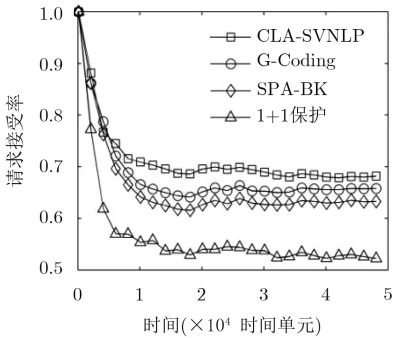

图 2 请求接受率比较

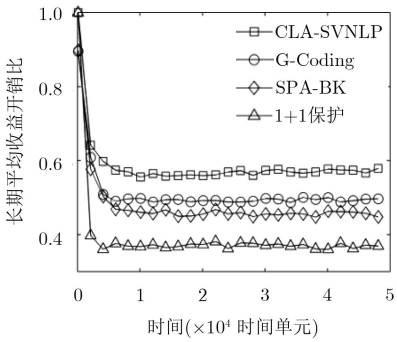

图 3 长期平均收益开销比比较

图4所示的是4种方法的备份带宽比。可以看出，1+1保护方法的备份带宽比最大，即备份相同的虚拟链路消耗的资源最多，之后是SPA-BK方法和G-Coding方法，CLA-SVNLP方法的备份带宽比最低，即备份资源利用率最高。

表2所示的是4种方法在不同物理链路故障率下平均网络恢复时延的比较。可以看出，平均网络恢复时延与物理链路故障率无直接关系，且CLA-SVNLP和G-Coding方法的平均网络恢复时延最短。由于CLA-SVNLP和G-Coding方法引入了网络编码技术，当一条虚拟链路故障时，可以通过备份链路上的编码数据进行恢复，而无需进行故障定位、检测以及数据重传，缩短了约50%的平均网络恢复时延。

综合比较上述4种方法，可以发现CLA-SVNLP方法不仅具有最高的资源利用效率，以最小的资源消耗代价保护了最多的虚拟链路，获得了最高的长期平均收益开销比，而且网络编码的引入更是缩短了CLA-SVNLP方法的平均网络恢复时延，所以CLA-SVNLP更适合可生存虚拟网络链路保护。

6 结束语

本文针对如何为虚拟网络链路提供精准、高效

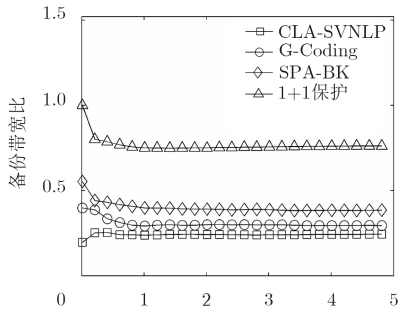

图 4 备份带宽比比较

表 2 平均网络恢复时延(ms)

算法名称	μ				
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
CLA-SVNLP	2.10	2.20	2.18	2.16	2.14
G-Coding[14]	2.11	2.18	2.25	2.27	2.26
SPA-BK[9]	4.13	4.12	4.29	4.30	4.27
1+1保护[8]	4.25	4.20	4.35	4.33	4.31

以及实时保护的问题进行了研究，提出一种核心链路感知的可生存虚拟网络链路保护方法。首先，综合考虑动态与静态两方面因素，构建准确的虚拟链路核心度度量模型；其次，在网络虚拟化环境构建合适的p圈对核心链路提供1:N保护，降低备份资源消耗；之后，网络编码技术与p圈相结合，将1:N保护转化为1+N保护，减少故障后的故障定位、检测及数据重传。最后通过仿真实验验证，本文所提CLA-SVNLP方法不仅具有最高的虚拟网络请求接受率和长期平均收益开销比，而且具有最低的备份带宽比，实现了备份资源的高效利用，同时显著缩短了平均网络恢复时延，适合于可生存虚拟网络的链路保护。

参 考 文 献

[1] LI Defang, HONG Peilin, XUE Kaiping, *et al*. Virtual network function placement considering resource optimization and SFC requests in cloud datacenter[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2018, 29(7): 1664–1677. doi: 10.1109/TPDS.2018.2802518.

[2] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICHO J L, *et al*. Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 236–262. doi: 10.1109/COMST.2015.2477041.

[3] 赵志远, 孟相如, 苏玉泽, 等. 基于节点邻近感知与路径综合评估的虚拟网络映射算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1979–1985. doi: 10.11999/JEIT161252.
ZHAO Zhiyuan, MENG Xiangru, SU Yuze, *et al*. Virtual network mapping algorithm based on node adjacent-awareness and path comprehensive evaluation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1979–1985. doi: 10.11999/JEIT161252.

[4] 江逸茗, 马海龙, 卜佑军, 等. 面向收益最大化的虚拟网跨域映射策略[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(2): 118–125. doi: 10.15961/j.jsuese.201601266.
JIANG Yiming, MA Hailong, BU Youjun, *et al*. Inter-domain virtual network embedding policy for revenue maximization[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(2): 118–125. doi: 10.15961/j.jsuese.201601266.

[5] MARKOPOULOU A, IANNACCONE G, BHATTACHARYYA S, *et al*. Characterization of failures in an operational IP backbone network[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(4): 749–762. doi: 10.1109/TNET.2007.902727.

[6] SHAHRIAR N, CHOWDHURY S R, AHMED R, *et al*. Virtual network survivability through joint spare capacity allocation and embedding[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(3): 502–518. doi: 10.1109/JSAC.2018.2815430.

[7] KAMAL A E and AL-KOFAHI O. Efficient and agile 1+N protection[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(1): 169–180. doi: 10.1109/TCOMM.2011.102910.090178.

[8] RAHMAN M R and BOUTABA R. SVNE: Survivable virtual network embedding algorithms for network virtualization[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2013, 10(2): 105–118. doi: 10.1109/TNSM.2013.013013.110202.

[9] GUO Tao, WANG Ning, MOESSNER K, *et al*. Shared backup network provision for virtual network embedding[C]. Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Communications, Kyoto, Japan, 2011: 1–5. doi: 10.1109/icc.2011.5963301.

[10] LI Bin, LU Chao, QI Bing, *et al*. P-cycle based protection scheme with cycle multiplexing and capacity balance for multicast service in substation communication network[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 102: 340–348. doi: 10.1016/j.ijepes.2018.04.038.

[11] JARRAY A and KARMOUCH A. Cost-efficient mapping for fault-tolerant virtual networks[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2015, 64(3): 668–681. doi: 10.1109/TC.2013.2295612.

[12] KAFAIE S, AHMED M H, CHEN Yuanzhu, *et al*. Performance analysis of network coding with IEEE 802.11 DCF in multi-hop wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 17(5): 1148–1161. doi: 10.1109/TMC.2017.2737422.

[13] HAI D T. On optimal designs of transparent WDM networks with 1+1 protection leveraged by all-optical XOR network coding schemes[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 40: 93–100. doi: 10.1016/j.yofte.2017.11.009.

[14] WANG Zhiming, WU Jiangxing, and CHENG Dongnian. Coding-aware virtual network mapping for surviving single link failure[C]. Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications, Sydney, Australia, 2014: 3025–3030. doi: 10.1109/ICC.2014.6883785.

[15] 梁宁宁, 兰巨龙, 张震. 基于拓扑感知的可重构服务承载网动态重构算法[J]. 通信学报, 2016, 37(2): 72–79. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016032.
LIANG Ningning, LAN Julong, and ZHANG Zhen. Dynamic topology awareness-based reconfigurable service carrying network reconfiguration[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(2): 72–79. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016032.

[16] 苏玉泽, 孟相如, 孟庆微, 等. 环境自适应的拓扑联合感知虚拟网映射算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(1): 79–86. doi: 10.11999/JEIT170325.
SU Yuze, MENG Xiangru, MENG Qingwei, *et al*. Environment adaptive and joint topology aware virtual network embedding algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(1): 79–86. doi: 10.11999/JEIT170325.

苏玉泽：男，1990年生，博士生，研究方向为虚拟网络映射、网络生存性.

孟相如：男，1963年生，教授，研究方向为下一代网络、网络安全.

康巧燕：女，1980年生，副教授，研究方向为网络生存性、下一代网络.

韩晓阳：男，1986年生，博士生，研究方向为虚拟网络映射、网络优化.