

可生存性虚拟网络映射算法的研究

黄丽萍, 杨龙祥

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要:网络虚拟化是未来网络的关键技术之一。网络虚拟化技术能共享底层网络资源,在此基础上建立多个相互隔离的虚拟网络。每个虚拟网络由虚拟节点和节点之间的虚拟链路组成。在网络虚拟化环境下,如何有效地将虚拟网络映射到底层网络上,即虚拟网络映射问题。由于底层网络易出现故障,从而导致映射到底层网络上的虚拟网络不能继续工作。如何从底层网络故障中快速恢复过来,并且最大可能地降低损失,已成为当前研究虚拟网络映射问题的重点。为了全面了解可生存性虚拟网络映射问题,从问题定义、故障原因、映射目标等方面对可生存性虚拟网络映射算法进行了综述。在按照算法不同特性进行分类和讨论的基础上,对几种典型的算法进行比较分析,据此指出未来的研究趋势。

关键词:网络虚拟化;虚拟网络;虚拟网络映射;映射算法;可生存性算法

中图分类号:TP393.01

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2018)07-0144-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.07.031

A Survey on Survivable Virtual Network Embedding Algorithm

HUANG Li-ping, YANG Long-xiang

(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract:Network virtualization, as one of the key technologies of the future network, can share substrate network resources, and build multiple isolated virtual networks based on that. Every virtual network is composed of virtual nodes and virtual links. In the environment of network virtualization, efficient mapping of virtual networks onto a substrate network is known as the virtual network embedding problem. Because the substrate network is failure-prone, affecting all the VNs using it. How to quickly recover from the underlying network fault and minimize the loss has become the focus of current study on virtual network mapping. To fully understand the problem of survivable virtual network mapping, we present a survey of current SVNE algorithms from the aspects of problem definition, cause of fault and embedding objects. Based on the classification and discussion of different characteristics of the algorithm, we make a comparison and analysis for several typical algorithms and point out the future research trends.

Key words:network virtualization; virtual network; virtual network embedding; embedding algorithm; survivable algorithm

0 引言

网络虚拟化技术被视为是构建新一代网络的重要技术,可以有效解决网络的“僵化”问题^[1-4]。在网络虚拟化环境下,传统的网络服务运营商被分为两个角色^[5-6],即底层网络运营商和服务运营商。在网络虚拟化中,主要实体是虚拟网络。虚拟网络由虚拟节点和虚拟链路两部分组成,虚拟节点间通过虚拟链路相互连接,每个虚拟节点和虚拟链路拥有与物理节点和链路相同的属性。因此,如何有效地分配物理资源给不同的虚拟网络,即虚拟网络映射问题,是网络虚拟环境下必须解决的难题。该问题已被证明为 NP-hard

问题^[7-9]。为了提高底层网络运营商的收益,很多研究主要集中于提高虚拟网络映射的成功率和底层网络资源的利用率等方面。

然而,底层网络很容易出现故障。所以,在找到一个有效的虚拟网络映射方法之后,保证虚拟网络的可生存性也是非常重要的^[10]。针对虚拟网络的可靠映射问题,目前主要有两种机制,分别是保护和恢复机制^[11]。故障保护机制是一种预先准备的方式,在故障发生之前就预先保留一定的备份资源。相反,恢复机制则是在故障发生之后,启动备份恢复机制。为了对可生存性虚拟网络映射问题的研究提供一个全面的视

收稿日期:2017-06-15

修回日期:2017-10-24

网络出版时间:2018-02-24

基金项目:国家自然科学基金(61372124);国家“973”重点基础研究发展计划项目(2013CB329104)

作者简介:黄丽萍(1993-),女,硕士,研究方向为移动通信与无线技术;杨龙祥,教授,博导,研究方向为移动无线通信系统和物联网。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180224.1519.048.html>

野,文中从问题定义、存在挑战、映射目标等方面对可生存性虚拟网络映射问题的不同研究算法进行综述。在按照算法不同特性进行分类和讨论的基础上,对几种典型的算法进行比较分析,并据此指出未来的研究趋势。

1 虚拟网络映射问题描述

1.1 底层网络

底层网络使用带权无向图 $G_s = (N_s, E_s, A_s^N, A_s^E)$ 表示,其中 N_s 和 E_s 分别代表底层网络节点集合和链路集合。每个底层节点 $n_s \in N_s$ 的属性集合用 A_s^N 表示。节点的属性分别为可用CPU资源占用比 $CPU(n_s)$ 、可用内存占用比 $memory(n_s)$ 和位置 $loc(n_s)$ 。节点 i 和 j 之间链路 $e_s(i, j) \in E_s$ 的属性集合为 A_s^E ,链路的属性为可用带宽占用比 $b(e_s)$ 。使用 P_s 表示底层网络所有无环路径的集合,节点 i 和 j 之间的无环路径集合为 $P_s(i, j)$ 。图 1(a) 是底层网络,链路上的数字代表链路可用带宽,节点周围长方形内的数字代表可用 CPU。

1.2 虚拟网络请求

虚拟网络请求与底层网络相似,也被描述为一个带权无向图 $G_v = (N_v, E_v, C_v^N, C_v^E)$ 。其中 N_v 和 E_v 分别代表虚拟网络请求的节点集合和链路集合。虚拟网络

请求对节点属性的约束用集合 C_v^N 表示,包括可用 CPU 占用比需求 $CPU(n_v)$ 、可用内存占用比 $memory(n_v)$ 和位置 $loc(n_v)$ 。虚拟网络请求中对链路属性的约束用集合 C_v^E 表示,包括可用带宽占用比需求 $b(e_v)$,如图 1(a) 所示。

1.3 虚拟网络映射

如图 1(a) 所示,虚拟网络请求的节点映射方案分别是 $\{a \rightarrow C, b \rightarrow D, c \rightarrow A\}$,链路方案是 $\{(a, b) \rightarrow (C, D), (a, c) \rightarrow (C, A), (b, c) \rightarrow (D, A)\}$ 。节点和链路的分配同时满足虚拟网络请求的约束条件。

1.4 可生存性的虚拟网络映射

当一个底层单节点失效时,其周围相连的链路也随即失效,这会导致映射到这些底层链路上的多条虚拟链路同时失效,从而使已经映射的虚拟网络不能继续工作(如图 1 所示)。图 1(a) 是一个成功的虚拟网络映射。节点和链路映射方法分别是: $\{a \rightarrow C, b \rightarrow D, c \rightarrow A\}$ 和 $\{ab \rightarrow CD, ac \rightarrow CA, bc \rightarrow DA\}$ 。虚拟网络的节点和链路约束都满足。图 1(b) 表示的是当底层节点 D 发生故障时,一个可存活的虚拟网络映射方法。虚拟节点迁移到底层节点 E 上。与 b 相连的虚拟链路 ab 和 bc 分别重新映射到 (CG) 和 (CH, HE, EB) 上。经过节点迁移和链路重新映射,虚拟网络重新恢复正常。

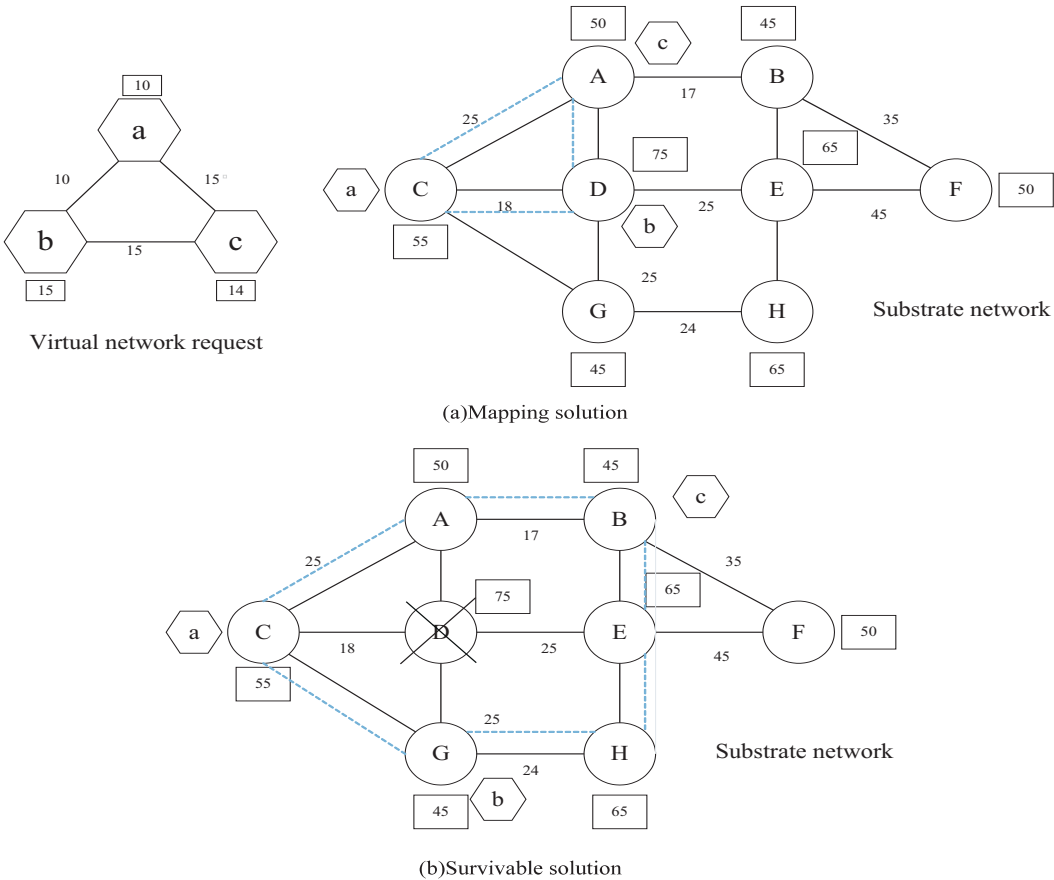


图 1 虚拟网络映射实例

2 可生存的虚拟网络映射算法

可生存性虚拟网络映射算法(SVNE)的主要目的就是在底层网络节点或是链路出现故障后,能够保证运行在底层网络上的虚拟网络的可生存性。图 2 是对现有的 SVNE 研究算法的分类树。文献[12]主要解决底层网络中单个节点的故障;文献[13]则集中在单条链路故障问题。文献[14-15]则分别从经济效益和

地点约束进行研究。文献[16]研究了在 SVNE 中的资源分配效率问题。目前解决可生存性的虚拟网络映射问题主要是提供备份资源。文献[17]提出共享备份方案,允许多条虚拟链路共享分配的备份资源。本节将基于图 2 的分类,阐述当前为解决 SVNE 问题所提出的算法。

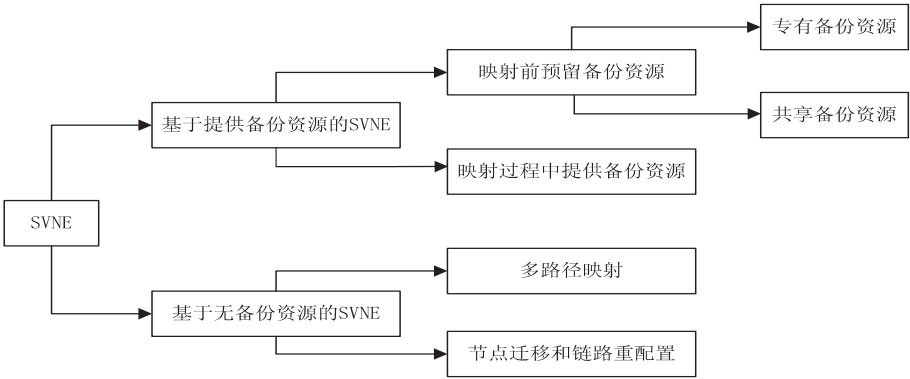


图 2 可生存的虚拟网络映射算法分类

2.1 基于提供备份资源的 SVNE

目前主要解决 SVNE 的方法是分配备份资源。文献[17]提出强生存性和弱生存性。弱生存性只能保证虚拟节点在故障出现的时候保持连接,而强生存性则可以保证原始的虚拟网络拓扑在发生故障时保持连通。

文献[17]为了从底层链路故障问题中快速恢复,使用了两种类型的恢复方法,即链路(局部)恢复和路径(端到端)恢复。该文提出一种混合策略启发式算法(hybrid policy)解决 SVNE。该算法分为三个分离的阶段。第一阶段是在虚拟网络请求到来前,基础设施供应商使用路径选择算法预先为每一条底层链路计算一组可能的备份绕道。第二阶段是当虚拟网络请求到达时,使用现存的启发式算法执行节点映射和链路映射。最后一个阶段是当底层链路出现故障时,启动备份绕道优化方法,在第一阶段选择的候选备份绕道路径中为受到影响的链路重新路由。该算法降低了计算复杂性,在接受率、收益、带宽效率、执行时间等方面都比一般算法优异。

文献[18]针对多个节点故障提出了基于拓扑意识的 SVNE 算法。该算法分为三个阶段。第一阶段是虚拟网络请求到来前,预先分配了专用的备份定额,为每个底层节点创建了一个候选集。第二阶段是虚拟网络请求到来时,使用基于恢复性的虚拟网络映射来分配虚拟网络主要资源,虚拟网络中的重要虚拟节点要被映射到可恢复性更好的底层节点上。第三阶段是当底层节点发生故障时,启动利益驱动的再映射算法,恢复尽可能多的受影响的虚拟网络。

文献[19]提出一种基于底层资源的负载均衡的分配资源的方法和重新配置备份资源的策略。为了确保从底层链路故障中的成功恢复,对于任意一条虚拟链路,一条带宽等于主要链路的备份链路也被映射到底层链路中,和主要路径不重叠。不同的备份路径可以在同一条底层链路上共享相同的备份带宽资源。在故障发生前,备份路径上是没有数据传输的,所以可以尝试用备份流去接受第一次未被接受的 VN。该算法的本质是重新配置备份资源从而提高接受率。通过这种方式,可以根据自己的需求重新配置,删除和添加备份资源。相比于主要资源的迁移,备份资源的重新配置更加简单且风险低,同时也提高了资源的利用率。

2.2 基于无备份资源的 SVNE

为了保证虚拟网络的可生存性,之前的很多研究工作都是通过给虚拟网络分配备份资源。这种方式虽然保护了虚拟网络,但是会增加基础设施提供商的成本。以降低基础设施提供商的成本为目标,许多研究提出在不预备备份资源的前提下解决可生存的虚拟网络问题。

文献[20]提出一种两步策略。第一步是预防策略,第二步是恢复策略。在第一步中,通过将每一条虚拟链路映射到多条路径上,减轻由底层故障产生的损害,防止虚拟链路失去全部的容量。这一步需要解决 VNE 问题,通过使用模拟退火法,可以找到全局最优解。该算法通过迭代产生可能的映射,直到达到最大的迭代次数 K。在每次迭代中,通过将它和几个相似的方法进行比较,从而改善当前的方法。在第二步中,提出容量恢复策略。该策略代替分配备份资源,而是

将受到损害的虚拟网络链路重新分配到未受到影响的
路径上。该路径必须是在第一步中被选来用于分配虚
拟链路或是在运行过程中未受到影响的_{路径}。该算法
与提供备份资源相比,降低了基础设施提供商的成本,
同时还提高了虚拟网络的接受率。

文献[21]提出一种基于节点迁移和链路再映射
的启发式可生存虚拟网络映射算法(SVNE-NOLR)。
该算法不会预先为虚拟网络分配备份资源,而是采用
具有全局寻优能力的人工蜂群算法求取近似最优
解^[22]。如果底层节点发生故障,则使用贪婪算法将受
到影响的节点迁移到正常节点上,然后使用 Dijkstra
最短路径算法重新映射受到故障影响的虚拟链路。该
算法没有预留备份资源,不会产生资源的冗余,并且提
高了虚拟网络请求的接受率和虚拟网络的恢复率,同

时改善了底层网络的负载强度。

$$(p)=\frac{\text{length}(p)}{\min_{l\in p}(l_{ij})}$$

2.3 典型可生存虚拟映射算法的比较总结

综上所述,SVNE 算法目前主要是从两个方向进
行研究,一个方向是提供备份资源,在故障发生时立即
调度该备份资源,从而恢复受到影响的虚拟网络。提
供备份资源也有两种方式:第一种是主动式的。在故
障发生前,准备好足够的备份资源;第二种是反应式
的。当故障发生时,根据其需要提供备份资源。另一
个方向是不提供备份资源,而是通过节点迁移和链路
再映射或是路径映射等方式恢复受到影响的虚拟网
络。表 1 为不同分类下典型算法的比较总结。

表 1 典型算法比较总结

算法	分类	算法描述	对比分析
SVNE-Hybrid	提供备份资源	预先分配保护路径	快速恢复资源利用不高
SVNE-LC	提供备份资源	基于位置约束	带宽消耗少,成本低,计算复杂度高
SVNE-LB-R	提供备份资源	基于负载平衡和备份资源再配置	提高链路映射阶段的资源利用率,接受率高
SVNE-NM-LR	无备份资源	基于节点迁移和链路重映射	资源利用率高,不保证多个故障的恢复
SVNE-SA	无备份资源	基于模拟退火法	恢复性好,接受率高
SVNE-Blind	无备份资源	最简单的虚拟网络映射	高的恢复负载型和重配置成本

3 总结与展望

主要讨论了虚拟网络映射的可生存性问题,即如
何使虚拟网络从底层节点或链路故障中快速恢复,并
且对现有的一些解决算法进行总结分类。目前,一大
部分研究主要是基于提供备份资源来保证虚拟网络
的可生存性。当故障发生时,启动备份恢复机制,为受
到影响的虚拟节点或是链路提供备份资源,保证虚拟
网络的连通性。还有一些研究是基于无备份资源的前
提下保证虚拟网络的可生存性。但是在现有的研究
中,依然存在一定的局限性。

(1)大部分研究只考虑单个底层节点故障或是单
条链路故障的情况。目前提出的一些算法能够很好
地解决底层网络单点故障的问题,完全恢复受到影
响的虚拟网络,但是如果发生了底层网络多点故障,
则只能恢复一部分受到影响的虚拟网络,算法的性
能大大下降。

(2)资源利用率不高。提供备份资源一般有两
种方式,一种是在映射前预备足够的备份资源,一
种是在发生故障时提供相应需求的备份资源。第一
种方法易

造成资源闲置,产生浪费。第二种易造成备份资
源不足,影响虚拟网络的恢复。这两种方法都使得
资源利用效率不高。

未来的研究方向可以关注两个方面:

(1)多个节点故障和多条链路故障问题。大部
分研究的前提还是针对底层网络中单点故障提出
的。现有方案虽然可以保证在底层单条链路故障
的情况下完全恢复受到影响的虚拟网络,但是当出
现多条链路故障时,恢复率会下降,不能保证提供
完全的可生存性。

(2)无线虚拟网络映射^[23-24]的可生存性问题。
无线网络和有线网络的区别主要在于无线链路的
广播特性,因此无线链路之间存在干扰。无线网
络中的节点还存在移动性,影响已成功映射的虚
拟网络的服务质量。所以,当无线底层网络中出
现故障时,如何保证虚拟网络的可生存性是未来
研究的方向之一。

4 结束语

虚拟网络映射的可生存性问题作为网络虚拟
化环境下的重要问题已经受到研究者的广泛关
注,找到一种可靠的算法能够在底层网络发生故
障时保护受到影

响的虚拟网络存在许多挑战。例如针对底层节点故障提出的预留备份资源方案和节点迁移方案,这些方案的目的是为了能保证底层网络发生故障时虚拟网络能够快速恢复。但从整体上讲,目前该领域的发展还未成熟,从理论到具体应用还有很大的差距。

文中对已有的 SVNE 算法进行研究,提出一种全新的分类方法,详细介绍了每一类算法的典型方案,并进行对比总结,最后指出 SVNE 问题未来的研究方向。

参考文献:

- [1] FISCHER A, BOTERO J F, TILL BECK M, et al. Virtual network embedding: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1888–1906.
- [2] 卢波. 虚拟网络映射策略与算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [3] 刘认伦, 杨龙祥. 虚拟网络映射节能算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(3): 29–34.
- [4] CHOWDHURY N M M K, BOUTABA R. A survey of network virtualization [J]. Computer Networks, 2010, 54(5): 862–876.
- [5] 蔡志平, 刘强, 吕品, 等. 虚拟网络映射模型及其优化算法[J]. 软件学报, 2012, 23(4): 864–877.
- [6] 郑雪纯, 杨龙祥. 虚拟网络中的能效优化技术与方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(2): 168–173.
- [7] YU Minlan, YI Y, REXFORD J, et al. Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 17–29.
- [8] CHENG Xiang, SU Sen, ZHANG Zhongbao, et al. Virtual network embedding through topology-aware node ranking [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(2): 38–47.
- [9] 程祥. 高效可靠的虚拟网络映射技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- [10] 朱强, 王慧强, 马春光, 等. 虚拟网络可生存的启发式可靠映射算法[J]. 通信学报, 2015, 36(7): 109–119.
- [11] RAHMAN M R, AIB I, BOUTABA R. Survivable virtual network embedding [C]//9th international IFIP TC 6 networking conference. Chennai, India; [s. n.], 2010: 77–84.
- [12] 刘光远, 苏森. 面向底层单节点失效的轻量级可靠虚拟网络映射算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(11): 2644–2649.
- [13] GUO Tao, WANG Ning, MOESSNER K, et al. Shared backup network provision for virtual network embedding [C]//IEEE international conference on communications. Kyoto, Japan: IEEE, 2011.
- [14] RAHMAN M R, BOUTABA R. SVNE: survivable virtual network embedding algorithms for network virtualization [J]. IEEE Transactions on Network & Service Management, 2013, 10(2): 105–118.
- [15] HU Qian, WANG Yang, CAO Xiaojun. Location-constrained survivable network virtualization [C]//35th IEEE symposium. Newark, NJ, USA: IEEE, 2012.
- [16] YU Hongfang, QIAO Chunming, ANAND V, et al. Survivable virtual infrastructure mapping in a federated computing and networking system under single regional failures [C]//Proceedings of global communications conference. Miami, Florida, USA: IEEE, 2010: 1–6.
- [17] KHAN M M A, SHAHRIAR N, AHMED R, et al. Multi-path link embedding for survivability in virtual networks [J]. IEEE Transactions on Network & Service Management, 2016, 13(2): 253–266.
- [18] XIAO Ailing, WANG Ying, MENG Luoming, et al. Topology-aware virtual network embedding to survive multiple node failures [C]//Proceedings of global communications conference. [s. l.]: IEEE, 2014: 1823–1828.
- [19] OLIVEIRA R R, MARCON D S, BAYS L R, et al. No more backups: toward efficient embedding of survivable virtual networks [C]//IEEE international conference on communications. [s. l.]: IEEE, 2013: 2128–2132.
- [20] FORTZ B, THORUP M. Increasing internet capacity using local search [J]. Computational Optimization and Applications, 2004, 29(1): 13–48.
- [21] QIANG Zhu, QIANG Wanghui, SHENG Fengguang, et al. Heuristic survivable virtual network embedding based on node migration and link remapping [C]//7th joint international information technology and artificial intelligence conference. Chongqing, China: IEEE, 2015: 181–185.
- [22] 朱强, 王慧强, 冯光升, 等. VNE-ABC: 基于人工蜂群的网络虚拟化映射算法[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(1): 68–73.
- [23] PARK K M, KIM C K. A framework for virtual network embedding in wireless networks [C]//International conference on future internet technologies. [s. l.]: ACM, 2009: 5–7.
- [24] VAN D B J, AHMADI H, DOYLE L E. A dynamic embedding algorithm for wireless network virtualization [C]//Vehicular technology conference. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2014: 1–6.