基于网络收缩的节点可复用虚拟网络映射算法

吴 果[1] 房礼国[1] 徐晓辉[2]
(解放军信息工程大学 郑州 450001)[1] (91959部队 三亚 572000)[2]

摘 要 针对节点可复用虚拟网络映射中随机节点复用不能较好地利用节点可复用特点的问题,提出了一种基于网络收缩的节点可复用虚拟网络映射算法。通过将网络映射分为网络收缩与映射阶段,将复用节点选择与映射过程分离。在网络收缩过程中,针对收缩网络特性提出了基于邻居节点合并的网络收缩算法,该算法能够在约束最大节点资源需求与最大链路资源需求的条件下,取得较小的网络规模。实验证明,基于网络收缩的节点可复用虚拟网络映射算法具有更优的映射质量以及更少的时间消耗。

关键词 网络虚拟化,虚拟网络映射,网络收缩
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.06.015

Node Reusable Virtual Network Embedding Algorithm Based on Network Shrinking

WU Guo[1] FANG Li-guo[1] XU Xiao-hui[2]
(The PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)[1]
(91959 Troops, Sanya 572000, China)[2]

Abstract A node reusable virtual network embedding algorithm based on network shrinking was presented for the problem that random node reusing fails to take the best of the features. Through parting network embed processing into network shrinking phases and mapping phases, choosing and embedding reusable nodes will be taken apart. In the process of network shrinking, aiming at shrinking network properties, a network shrinking algorithm based on combining neighborhood nodes was presented, which makes network smaller under the condition of constricting biggest node resource needs and biggest periodic line resource needs. Experiments have proved that node reusable virtual network embedding algorithm based on network shrinking has better embedding quality and consumes less time.

Keywords Network virtualization, Virtual network mapping, Network shrinkage

1 引言

随着新兴网络技术的不断发展,现有的网络组织架构已经很难满足需求,“网络僵化”已经越来越阻碍互联网的发展[1]。网络虚拟化允许多个虚拟网络共存于同一个物理网络之上,能够有效缓解上述问题,逐渐成为下一代互联网的发展趋势[2-3]。

网络虚拟化中的一个基础问题是如何将虚拟节点资源需求(如CPU资源)和虚拟链路资源需求(如带宽资源)映射到有限的底层物理网络资源上。而这样的问题同时涉及资源、拓扑异构等多种问题,已被证明为NP难问题[2]。优质的映射算法应该既能保持较高的请求接受率,又能进行高效的映射。文献[3-14]从多个方面对虚拟网络的映射算法进行了研究,但都只是针对单个虚拟网络中的虚拟节点与物理节点一对一映射的情况。

随着主机虚拟技术的不断发展,一些主流虚拟化产品均已实现通过物理主机的内存交换代替虚拟链路的数据交换[15],这就使得单个虚拟网络中的多个虚拟节点映射到同一个物理节点变得切实可行。这种技术即为可复用技术[16]。在节点可复用虚拟网络映射算法中,虚拟网络对底层链路的资源需求可以转换为对底层节点的资源需求,反之不成立。在节点计算资源充足的情况下,节点可复用可以充分利用富余的节点资源,使得更多的虚拟网络请求被接受。

随机可复用物理节点选择[17]是一种简单可行的选择方法,在按顺序为每个虚拟节点映射物理节点时,使当前虚拟节点以一定概率重复选择前一个虚拟节点所映射的物理节点。这种方式虽然能够在一定程度上利用节点可复用的特性,但是扩大了映射算法的搜索空间,实际上将复用节点选择的优化问题交由后续的映射算法解决,对映射质量的提升不大。

2 问题分析

在可复用节点条件下,虚拟网络请求的映射方案求取可以按两种不同的思路进行:1)在虚拟网络映射的同时选取可重用节点,节点可重用依赖于虚拟网络映射算法;2)将节点可

到稿日期:2016-05-03 返修日期:2016-09-03

吴 果(1975—),女,硕士,副教授,主要研究方向为信息安全;房礼国(1981—),男,硕士,讲师,主要研究方向为信息安全;徐晓辉(1981—),男,硕士,工程师,主要研究方向为信息安全。

重用过程独立于原始的虚拟网络映射过程，先进行节点可重用操作，再对可重用节点操作后的网络进行映射。两种思路所对应的映射模型如图 1 所示。

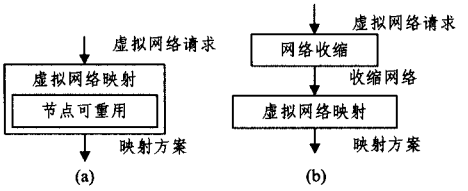

图 1 可复用节点条件下的不同映射模型

在第一类映射方案求取中，虚拟网络映射与节点可重用相对紧密地耦合在一起，针对不同的虚拟网络映射算法，该算法可能需要不同的节点可重用实现以满足需求。另外，这种紧耦合的关系还会使计算复杂化，使得解的求取变得更为困难。在第二类映射方案求取中，虚拟网络映射与节点可重用相对独立，针对不同的虚拟网络映射算法，可以使用相同的节点可重用实现。由于虚拟网络映射与节点可重用相分离，将复杂的求解过程分解为两个部分独立进行，虚拟网络映射算法处理的网络规模较第一类方案小，使得解的求取变得较为容易。图 2 为一个网络收缩的实例，其中多个原始虚拟节点将收缩为一个虚拟节点，收缩后的节点资源需求等于所有原始虚拟节点资源需求以及节点之间的全部链路的加权带宽需求之和。

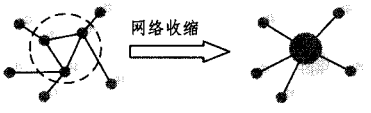

图 2 网络收缩

在第二类方法中，随着输入映射算法网络规模的减小，某些节点的资源需求将增大，这种特性有可能对虚拟网络的请求接受造成阻碍。考虑一个极限情形，当一个新的虚拟网络请求到达时，其所有的原始虚拟节点收缩为单个节点，那么可能会出现：1)单个节点需求过大，虽然任一物理节点保有较多资源，但收缩后的节点需求仍不能得到满足；2)链路带宽闲置，即所有的原始虚拟网络请求中的资源需求都转化为对节点的资源需求，使得接受的请求仅消耗物理网络的节点资源，无法利用物理网络的链路带宽资源。因此，网络收缩应该达到一种平衡，即在使得适量的链路带宽需求转化为节点资源需求的同时，应尽可能压缩虚拟网络的规模。

本文提出了一种基于网络收缩的节点可复用虚拟网络映射算法，将整个映射过程分为两个二阶段：网络收缩阶段和映射阶段，使复用节点选择及网络拓扑映射工作相分离。在网络收缩阶段，首先将虚拟网络收缩为更易于后续映射的小规模网络。在映射阶段，采用基于离散粒子群的虚拟网络映射算法进行映射。基于离散粒子群的虚拟网络映射算法本身具有较高的请求接受率以及资源利用率。

3 网络收缩

定义无向图 $G_V=(N_V,L_V)$ 为虚拟网络，其中 N_V 表示所有虚拟节点的集合，L_V 表示所有虚拟链路的集合。类似地定义无向图 $G_V'=(N_V',L_V')$ 为收缩网络，其中 N_V' 表示所有收缩节点的集合，L_V' 表示所有收缩链路的集合。D_N 与 D_L 分别表示节点资源需求与链路资源需求。

网络收缩可以表示为 $S:G_V\rightarrow G_V'$，其中节点收缩可以表示为：

$$f_N(n_V)=n_V',n_V\in N_V \tag{1}$$

对于任意 $u,v\in N_V$，$p(l_V)=\{u,v\}$，链路收缩可以表示为：

$$f_L(l_V)=\begin{cases}l_V',l_V\in L_V, & \text{iff } f_N(u)\neq f_N(v)\\ n_V',l_V\in L_V, & \text{iff } f_N(u)=f(v)=n_V'\end{cases} \tag{2}$$

对于任意 $u,v,w,x\in N_V$，当 $p(l_V^1)=\{u,v\}$，$p(l_V^2)=\{w,x\}$，$\{f_N(u),f_N(v)\}=\{f_N(w),f_N(x)\}$ 时，有 $f_L(l_V^1)=f_L(l_V^2)$，其中，$p(l_V)$ 表示链路 l_V 两端关联的节点集合。资源需求变化可以表示为：

$$\begin{aligned}D_N(n_V')&=\sum_{f_N(n_V)=n_V'}D_N(n_V)+\varepsilon\sum_{f_L(l_V)=n_V'}D_L(l_V)\\ D_L(l_V')&=\sum_{f_L(l_V)=l_V'}D_L(l_V)\end{aligned} \tag{3}$$

其中，ε 为链路资源需求与节点资源需求的转化比。

为了提升物理网络对收缩网络的接受率，收缩网络应该具有以下几个特性：1)不应该出现资源需求过大的节点；2)不应该出现资源需求过大的链接；3)收缩网络规模应该尽量小。根据上述特性，可以将网络收缩问题描述如下：

$$\begin{aligned}&\text{Minimizing }\Big(\sum_{l_V'\in L_V'}D_L(l_V')\Big)\\ &\text{s.t. }\max_{n_V'\in N_V'}D_N(n_V')<\alpha\max_{n_V\in N_V}D_N(n_V),\\ &\qquad\max_{l_V'\in L_V'}D_L(l_V')<\beta\max_{l_V\in L_V}D_L(l_V)\end{aligned} \tag{4}$$

4 基于邻居节点合并的网络收缩算法

如果采用单纯全局解搜索的方法进行求解，搜索空间大小实际上就是排列组合中将 n 个不同元素分到 1 到 n 个相同组的分法种数之和。记搜索空间大小为 $Q(n)$，那么有：

$$Q(n)=\sum_{i=1}^{n}\frac{E(n-i)}{(i-1)!}i^{(n-1)},E(m)=\sum_{k=0}^{m}(-1)^k\frac{1}{k!} \tag{5}$$

由式(5)比较容易看出搜索空间大小根据节点数量呈指数增长。

事实上，网络收缩的目标是使链路资源需求在一定限制条件下向节点资源转化，在仅考虑单个节点合并的前提下，可以发现仅当节点与其某个邻居节点合并时才能实现上述转化。基于这个事实，本文提出了一种基于邻居节点合并的网络收缩算法，该算法通过多轮节点合并，可将节点之间关联的链路资源需求转化为节点资源需求。

在多轮节点合并之前，首先根据虚拟网络生成候选节点集合。在多轮节点合并的过程中，每次选取候选节点中度数最小的节点尝试与其邻居节点进行合并。若合并成功，则进行虚拟网络调整；若失败，仅将该节点从候选节点集合中删除。

网络调整包括节点调整与链路调整两个步骤。首先，合并两个目标节点为新的节点，新节点的资源需求为两个节点的 CPU 资源需求与 $\varepsilon\times$ 节点间链路的带宽资源需求之和。链路调整针对除去目标节点之间链路的所有关联链路，合并两端节点相同的链路并更新链路资源需求。

算法 1 基于邻居节点合并的网络收缩算法

1. vnetCopy ← 虚拟网络拓扑

2. cpuThreshold←α×最大 CPU 资源需求
3. bwThreshold←β×最大带宽资源需求
4. vnList←虚拟网络节点集
5. while vnList 不为空 do
6.　　c←从 vnList 中选择度数最小的节点,并将该节点从 vnLis 中删除
7. for n in c 的邻居节点集合 do
8. bridge←节点 n 和节点 c 之间的链路
9. otherList←节点 n 和节点 c 的所有关联链路集与{bridge}的差集
10. 由 n,c,bridgeList 计算合并后的 CPU 需求;由 otherList 计算合并后的带宽需求
11.　　if 同时满足 CPU 与带宽需求约束 do
12. 对 vnetCopy 进行调整,并将节点 n 从 vnList 中删除,将合并后的节点加入 vnList
13.　　break
14. return vnetCopy

5　实验

为了验证本文提出的网络收缩算法在节点可复用条件下对提高虚拟网络映射质量的有效性,选取了文献[17]提出的随机节点复用节点选取算法以及文献[18]提出的不可复用节点算法进行比较。3 种算法均采用离散粒子群算法进行映射。评价指标为整体请求接受率以及单个虚拟网络请求的映射总时长。

实验环境配置为 Intel(R)酷睿 I7-3770 CPU3.4GHz,8GBRAM 主机,操作系统为 Ubuntu 14.10 32 位,算法采用 JAVA 语言编程实现。根据 GT-ITM 规则生成网络拓扑,其中底层网络包含 100 个节点,约 500 条链路。底层网络的 CPU 资源服从 160～200 的均匀分布,带宽资源服从 80～100 的均匀分布。仿真器约运行 5000 个时间单元,每 100 个时间单元内虚拟网络请求到达服从均值为 10 的泊松分布,每一个虚拟网络的生存时间服从 950～1050 的均匀分布。对于单个虚拟网络请求,虚拟网络节点服从 2～20 的均匀分布,每一对虚拟网络节点的连通概率为 0.4。虚拟网络节点的 CPU 资源需求与带宽资源需求服从 2～10 的均匀分布。网络收缩阶段中涉及到的参数设定为 $\alpha=3,\beta=2,\varepsilon=1$;映射阶段涉及到的参数设定为:群体择优概率以及个体择优概率都为 0.5,粒子个数为 10 个,迭代轮次为 15。

请求接受率的变化如图 3 所示。

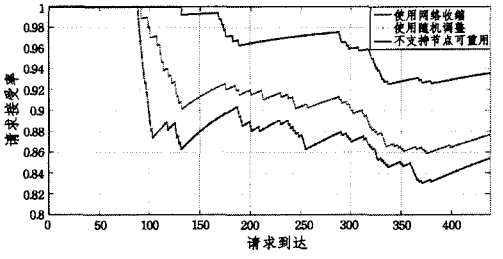

图 3　请求接受率变化

从图 3 可以看出,相比不支持节点可复用的虚拟网络映射算法,基于网络收缩的虚拟网络映射算法最终使请求接收率提高了 8.0%,相比于基于随机节点复用的虚拟网络映射算法最终使请求接受率提高了 5.8%。基于随机节点复用的映射算法仅能够在不支持节点可复用的虚拟网络映射算法的基础上提高了 2.2%的请求接受率,其原因是基于随机节点复用的映射在选择复用节点时很难得出较优方案,不能很好地利用节点可复用特性来提升虚拟网络请求接收率。基于网络收缩的虚拟网络映射算法首先将虚拟网络转化为规模更小的网络,网络节点资源与链路资源需求更加均衡,整体链路需求降低,能够更好地提高虚拟网络映射质量。表 1 列出了 3 种不同算法的整体耗时,结合请求接受率可以看出,随机节点复用由于将节点可复用选优的工作交由映射算法本身完成,整体耗时与不支持节点可复用的算法耗时相差不大,映射效果由于搜索空间的扩大也没有较大提升;使用网络收缩的虚拟网络映射算法中,映射算法直接处理的虚拟网络规模较小,资源需求相对平衡,链路资源需求较原始拓扑更低,使得算法在映射质量以及耗时方面都优于随机节点复用算法。

表 1　算法整体耗时/s

虚拟网络映射算法	算法耗时
使用网络收缩	664.4
使用随机节点复用	901.3
不支持节点可复用	967.9

结束语　本文围绕节点可复用虚拟网络映射算法的特性进行探讨。与基于随机节点复用的虚拟网络映射算法不同,本文将复用节点选择与网络映射过程分离,提出了一种基于网络收缩的节点可复用虚拟网络映射算法。网络收缩先于网络映射过程,在最大节点资源需求与最大链路资源需求的约束下,将虚拟网络收缩为规模更小的网络。由于收缩后的网络具有规模更小、链路带宽需求总量更低、节点与链路需求更均衡的特性,使得总体映射质量和映射效率都有所提高。

参 考 文 献

[1] ZHANG S L,QIU X S,MENG L M. Service fault diagnosis algorithm in network virtualization environment[J]. Journal of Software,2012,23(10):2772-2782.

[2] CAI Z P,LIU Q,LU P,et al. Virtual network mapping model and optimization algorithms[J]. Journal of Software,2012,23(4):864-877.

[3] QOMG S D,LIAO J X,ZHU X M,et al. Virtual network embedding algorithms in the network virtualization environment[J]. Journal of Software,2012,23(11):3045-3058.

[4] ZHU Q,WANG H Q,FENG G S,et al. A Hybrid Reliable Heuristic Mapping Method Based on Survivable Virtual Networks for Network Virtualization[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society,2015(1):1-8.

[5] CAO W,WANG H,LIU L. An Ant Colony Optimization Algorithm for Virtual Network Embedding[M]// Algorithms and Architectures for Parallel Processing. Springer International Publishing,2014:299-309.

[6] ZHU Q,WANG H Q,MA C G,et al. A heuristic reliable mapping algorithm for virtual network survivability [J]. Journal of Communication,2015,36(7):109-119. (in Chinese)
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.

[7] DAVALOS E,ACEVAL C,FRANCO V,et al. A multi-objective approach for virtual network embedding[C]// 2015 Latin American Computing Conference (CLEI). IEEE,2015:1-8.

(下转第 120 页)

Network [J]. Telecommunications Science, 2014, 30(7): 19-25. (in Chinese)
陈杰，刘建伟，王蒙蒙，等. 基于安全基片的可重构网络安全管控机制[J]. 电信科学，2014，30(7)：19-25.

[9] WANG N, ZHANG Y, SERRAT J, et al. A two-dimensional architecture for end-to-end resource management in virtual network environments [J]. Network, IEEE, 2012, 26(5): 8-14.

[10] DUAN Q. End-to-end modelling and performance analysis for network virtualisation in the next generation internet [J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2012, 8(1): 53-69.

[11] FAJJARI I, AYARI M, BRAHAM O, et al. Towards an Autonomic Piloting Virtual Network Architecture [C]// International Conference on New Technologies, Mobility & Security. Paris: IEEE, 2011: 1-5.

[12] DUTTA R, ROUSKAS G N, BALDINE I, et al. The SILO architecture for services integration, control, and optimization for the future internet [C]// Proc of the IEEE International Conference on Communications 2007 (ICC'07). Glasgow: IEEE, 2007: 1899-1904.

[13] WOLF T. In-network services for customization in next-generation networks [J]. IEEE Network, 2010, 24(4): 6-12.

[14] KOFLER K, HAQ I U, SCHIKUTA E. User-Centric, Heuristic Optimization of Service Composition in Clouds[C]// Proceedings of the 16th international Euro-Par conference on Parallel processing: Part I. ISChina: Springer-Verlag, 2010: 405-417.

[15] ZENG C, GUO X, OU W J, et al. Cloud Computing Service Composition and Search Based on Semantic[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Cloud Computing. Beijing: Springer-Verlag, 2009: 290-300.

[16] HUANG J, LIU G Q, DUAN Q. On modeling and optimization for composite network-Cloud service provisioning [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 45(10): 35-43.

[17] HOU F, MAO X J, WU W. Self-Organizing management approach for cloud services based on multi-agent system [J]. Journal of Software, 2015, 26(4): 835-848. (in Chinese)
侯富，毛新军，吴伟. 一种基于多 Agent 系统的云服务自组织管理方法[J]. 软件学报，2015，26(4)：835-848.

[18] GOMES R L, BITTENCOURR L F, MADEIRA E R M, et al. An architecture for dynamic resource adjustment in VSDNs based on traffic demand [C]// 2014 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'14). Austin: IEEE, 2014: 2005-2010.

[19] WANG W D, TIAN Y, GONG X Y, et al. Software defined autonomic QoS model for future Internet[J]. Journal of Systems & Software, 2015, 110(C): 122-135.

[20] CHIOSI M, CLARKE D, WILLIS P, et al. Network Functions Virtualisation: An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges and Call for Action [C]// Proceddings of SDN and OpenFlow World Congress 2012, Darmstadt: E-STI, 2012: 22-24.

[21] SHEN W Y, YOSHIDA M, KAWABATA T, et al. vConductor: An NFV management solution for realizing end-to-end virtual network services[C]// 2014 16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS). Xinzhu: IEEE, 2014: 1-6.

[22] WOOLDRIDGE M. An Introduction to Multi-Agent Systems [J]. Wiley & Sons, 2011, 4(2): 125-128.

[23] ZHANG J H, DUAN T, ZHANG X H, et al. A reconfigurable and evolvable platform for network function innovation [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 18-25. (in Chinese)
张建辉，段通，张校辉，等. 可重构可演进的网络功能创新平台[J]. 电信科学，2015，31(12)：18-25.

[24] NetFPGA-10G project [EB/OL]. https://github.com/NetFPGA/NetFP-GA-public/wiki.

(上接第 93 页)

[8] BECK M T, FISCHER A, BOTERO J F, et al. Distributed and scalable embedding of virtual networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015, 56: 124-136.

[9] KHAN M M A, SHAHRIAR N, AHMED R, et al. SiMPLE: Survivability in multi-path link embedding[C]// 2015 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM). IEEE, 2015: 210-218.

[10] NAKIBLY G, COHEN R, KATZIR L. Optimizing data plane resources for multipath flows[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2015, 23(1): 138-147.

[11] YU M, 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.

[12] HOUIDI I, LOUATI W, ZEGHLACHE D. A distributed virtual network mapping algorithm[C]// IEEE ICC Proceedings. Beijing, China, 2008: 5634-5640.

[13] LISCHA J, KARL H. A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection[C]// 1st ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures Proceedings. Barcelona, Spain, 2009: 81-88.

[14] CHOWDHURY N, RAHMAN M, BOUTABA R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping [C]// IEEE INFOCOM Proceedings. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 783-791.

[15] JIAN W, KWAME-LANTE W, KARTIK G. XenLoop: A transparent high performance inter-VN network loopback[J]. Cluster Computing, 2009, 12(2): 141-152.

[16] CHEN L W W C, LING-DI J P. Virtual Network Mapping Algorithm with Repeatable Mapping over Substrate Nodes[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(4): 908-914.

[17] LIU X D, LIU K, WANG C. A node reusable virtual network embedding algorithmbased on discrete particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Science, 2015, 37(2): 276-280. (in Chinese)
刘向东，刘奎，王聪. 基于离散粒子群的节点可重用虚拟网络映射算法[J]. 计算机工程与科学，2015，37(2)：276-280.

[18] ZHANG Z B, CHENG X, SU S, et al. Virtual Network Embedding Based on Particle Swarm Optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(10): 2240-2244.