

一种面向节点负载均衡的虚拟网络重构算法

李振涛 孟相如 赵志远 苏玉泽

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘 要 为提高虚拟网络请求接受率,针对物理节点负载不均衡的问题,提出一种面向节点负载均衡的虚拟网络重构算法。根据物理节点的平均可用计算资源和最小可用计算资源,设置一个阈值,对超过阈值的物理节点进行重配置,动态地选择需要迁移的虚拟节点,在均衡物理节点负载的情况下,尽可能地减少虚拟节点的迁移数量。仿真结果表明,所提方法均衡了物理节点负载,提高了物理网络资源利用率和虚拟网络请求接受率。

关键词 网络虚拟化,虚拟网络,重构,节点负载均衡

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.07.015

Virtual Network Reconfiguration Algorithm for Nodes Load Balancing

LI Zhen-tao MENG Xiang-ru ZHAO Zhi-yuan SU Yu-ze

(Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract In order to improve the acceptance ratio of virtual network embedding, this paper proposed a virtual network reconfiguration algorithm based on nodes load balancing, which aims to overcome the problem of physical network nodes imbalance. The algorithm sets a threshold based on available and minimal physical nodes resource, resets the physical nodes which exceed the threshold, and formulates a flexible strategy for selecting virtual nodes on the reconfigured physical nodes. The method reduces the number of migrated virtual nodes in case of balancing physical nodes load. The simulation results show that the method balances physical nodes load, and improves the acceptance ratio of virtual network request and the utilization rate of physical network resource.

Keywords Network virtualization, Virtual network, Reconfiguration, Nodes load balancing

1 引言

网络虚拟化技术将网络服务提供与基础设施提供两个功能分开,可以在基础设施上共存多个异构的虚拟网络,满足不同用户的需求^[1-2]。因此,网络虚拟化技术使得在不影响现有网络的前提下,部署新的网络架构、协议以及应用成为可能,成为了缓解互联网结构“僵化”的有效手段。其核心问题是如何为带有节点和链路资源约束条件的虚拟网络分配底层物理网络资源,即虚拟网络映射。

针对虚拟网络映射的研究已取得一定成果^[1-3],但由于虚拟网络映射请求到来的时刻不同,且虚拟网络的生存时间也不同,随着时间的推移,底层网络负载分布将会发生较大变化,甚至出现某些节点(链路)负载达到瓶颈的问题。针对此问题,学术界提出了虚拟网络重构策略^[4-11]。文献[4]提出了一种基于负载均衡的重构资源分配算法,其依据具体业务需求,将服务承载网络实时映射到所需的资源承载网络的节点和链路上。文献[5]统计并预测了物理资源利用情况,对虚拟网络进行周期性重映射,一定程度地均衡了物理网络负载,但其重构了全部的虚拟网络,导致映射更复杂。针对重构的复杂度大的问题,文献[6]只迁移虚拟网络中部分虚拟节点或链

路,但重构开销较大。为降低重构开销,文献[7-8]以重构前后的拓扑结构变化情况、重配置改善度作为重构效果的评价标准,取得了较好的效果。

目前,虚拟网络重构一般分为 4 个步骤:1)根据阈值选择重配置的物理节点(链路);2)选择物理节点上需要迁移的虚拟节点;3)选择目标物理节点;4)为虚拟节点及其相关联的虚拟链路分配资源。从现有研究来看,一方面,大部分研究把物理节点调整的阈值设置为固定的,这与虚拟网络动态地到来和离开不相符,本文将根据物理节点的平均可用计算资源和最小可用计算资源,设置动态阈值。另一方面,部分研究在选择需要迁移的虚拟节点时,采用先大后小的策略,这样容易出现迁移的虚拟节点不恰当的问题。针对此问题,本文首先计算阈值与需要重配置的物理节点的可用计算资源的差值 θ ,优先选择计算资源需求量最接近 θ 的虚拟节点进行迁移,如果物理节点的可用资源依然不符合要求,再计算 θ 与已选择出的虚拟节点资源需求量的差值 θ' ,继续选择计算资源需求量最接近 θ' 的虚拟节点,重复以上步骤,直至物理节点的可用资源不小于阈值。这样可以在均衡物理节点负载的同时,尽可能地降低重构复杂度,提高虚拟网络的请求接受率。

到稿日期:2017-05-04 返修日期:2017-07-13 本文受国家自然科学基金(61401499)资助。

李振涛(1990—),男,硕士生,主要研究方向为网络虚拟化,E-mail:1934204360@qq.com;孟相如(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带通信网络,E-mail:xrmeng@126.com(通信作者);赵志远(1989—),男,博士生,主要研究方向为网络虚拟化;苏玉泽(1990—),男,博士生,主要研究方向为网络虚拟化。

2 问题描述与重构模型

资源的负载均衡包括节点和链路两方面,而面向节点负载均衡的虚拟网络重构是指在满足虚拟网络资源需求约束的前提下,根据物理网络负载情况,调整虚拟节点分布,均衡底层节点负载,提高虚拟网络的请求接受率。

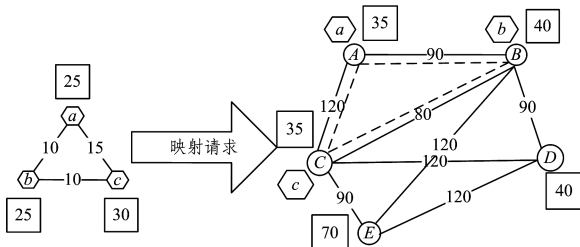
2.1 问题描述

2.1.1 物理网络

物理网络表示为有权无向图 $G^s = (N^s, E^s)$, 其中 N^s 是物理节点 n^s 的集合, E^s 为物理链路 e^s 的集合。物理节点 n^s 具有计算资源属性和地理位置属性, 其中节点计算资源用 $C(n^s)$ 表示, 随着资源被占用, 剩余的可用计算资源表示为 $cpu(n^s)$; 节点的地理位置用 $loc(n^s)$ 表示, 其坐标为 (x^s, y^s) , 物理链路 e^s 的可用带宽表示为 $b(e^s)$ 。

2.1.2 虚拟网络映射

虚拟网络表示为有权无向图 $G^v = (N^v, E^v)$, 其中 N^v 是虚拟节点 n^v 的集合, E^v 为虚拟链路 e^v 的集合。 n^v 具有计算资源需求 $cpu(n^v)$ 和地理位置 $loc(n^v)$ 的属性, e^v 的带宽需求表示为 $b(e^v)$ 。虚拟网络映射是将物理网络资源按照某种约束条件分配给虚拟网络。其中, 虚拟节点分配到的物理节点满足位置约束 $D(n^v)$ 和计算资源约束; 虚拟链路映射到底层网络的一条无环路径上, 路径上每条链路的可用带宽满足虚拟链路的带宽需求, 即 $b(e^s) > b(e^v)$, 且该路径端点应为虚拟链路的两个节点所映射的物理节点^[9, 11-13]。图1描述了一个虚拟网络映射方案, 其中, 节点映射方案为 $\{a \rightarrow A, b \rightarrow B, c \rightarrow C\}$, 链路映射方案为 $\{(a, b) \rightarrow (A, B), (a, c) \rightarrow (A, C)\}$ 。



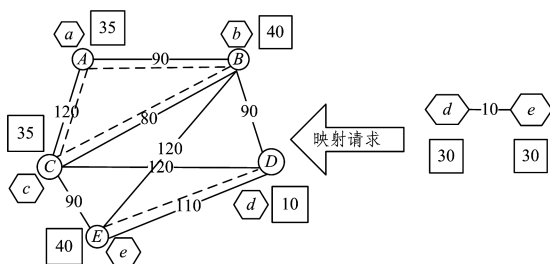
注:图中左半部分为虚拟网络1,右半部分为底层物理网络

图1 虚拟网络映射实例1

Fig.1 Example 1 of virtual network embedding

2.1.3 节点负载均衡的虚拟网络重构

当底层物理节点负载不均衡时,通过某种策略对虚拟网络进行重构,以调整物理节点负载。如图2所示,当虚拟网络2到达时,虚拟网络1的生存时间未结束,节点的映射方案为 $\{d \rightarrow D, e \rightarrow E\}$, 链路映射方案为 $\{(d, e) \rightarrow (D, E)\}$, 虽然映射请求成功,但是节点D的可用计算资源较少,节点负载不均衡。



注:图中左半部分为底层物理网络,右半部分为虚拟网络2

图2 虚拟网络映射实例2

Fig.2 Example 2 of virtual network embedding

当虚拟网络1映射结束时,节点d迁移到C,有利于物理网络负载均衡,如图3所示。

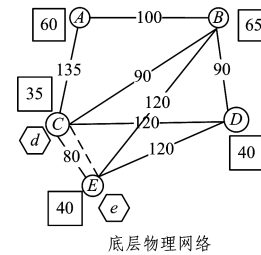


图3 虚拟网络映射重构实例

Fig.3 Example of virtual network embedding reconfiguration

2.2 重构模型建立

2.2.1 参数设置

1) t 时刻物理节点的资源阈值为:

$$thred(G^s, t) = \mu \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M cpu(n_i^s) + \lambda \min(cpu(n_i^s)), 1 \leq i \leq M \quad (1)$$

其中, $\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M cpu(n_i^s)$ 为底层物理网络节点的可用计算资源平均值, $\min(cpu(n_i^s))$ 为底层物理网络中最小可用计算资源。

随着虚拟网络请求的到达、映射和离开, $\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M cpu(n_i^s)$ 和 $\min(cpu(n_i^s))$ 不断变化, 因此 $thred$ 是一个动态值, 这使得过载物理节点的选择更合理。

2) 阈值与物理节点可用资源的差 $\theta = thred - cpu(n^s)$ 。

3) 重配置的物理节点集合 $\Phi_n = \{\Phi_n^s\}$ 。

4) 需要重新映射的虚拟节点集合 $\Psi_n = \{\Psi_n^v\}$ 。

5) 目标物理节点集合 $\Omega_n = \{\Omega_n^s\}$ 。

2.2.2 评价指标

1) 请求接受率

虚拟网络的请求接受率为:

$$\eta_{accept} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{VNR_{suc}(T)}{VNR(T) + \delta} \quad (2)$$

其中, $VNR_{suc}(T)$ 表示时间 T 内虚拟网络请求成功映射的个数, $VNR(T)$ 表示时间 T 内虚拟网络的请求总数, δ 为无限趋近于0的正数。

2) 收益开销比

定义虚拟网络映射请求 VNR 在时刻 t 的收益为:

$$Rev(G^v, t) = \sum_{n^v \in N^v} cpu(n^v) + \alpha \sum_{e^v \in E^v} b(e^v) \quad (3)$$

式(3)表示 t 时刻映射成功的虚拟网络节点计算资源需求与链路带宽需求和, α 是调节链路带宽和节点计算资源权重的参数。定义虚拟网络的长期平均收益为:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T Rev(G^v, t)}{T + \delta} \quad (4)$$

定义物理网络在时刻 t 为满足虚拟网络请求的开销为:

$$Cost(G^s, t) = \sum_{n^v \in N^v} \sum_{n^s \in N^s} n_v^s cpu(n^v) + \beta \sum_{e^v \in E^v} \sum_{e^s \in E^s} e_v^s b(e^v) \quad (5)$$

式(5)表示 t 时刻虚拟网络占用的底层物理网络资源。其中, n_v^s 表示 n^v 和 n^s 的对应关系, 如果 n^v 映射到 n^s 上, $n_v^s =$

1, 否则 $n_v^s = 0$; 同理, e_v^s 表示 e^v 和 e^s 的对应关系, 如果 e^v 成功映射到 e^s 上, 则 $e_v^s = 1$, 否则 $e_v^s = 0$ 。β 是调节物理节点计算资源与链路带宽开销权重的参数。物理网络的长期平均开销为:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T Cost(G^s, t)}{T + \delta} \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可得出虚拟网络映射请求的长期平均收益开销比为:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T Rev(G^v, t)}{\sum_{t=0}^T Cost(G^s, t)} \quad (7)$$

3) 物理节点的利用率方差

M 个底层物理节点中, 第 i 个节点的利用率为 $\zeta(n_i^s) = 1 - \frac{cpu(n_i^s)}{C(n_i^s)}$, 其中 $1 \leq i \leq M$, 则 t 时刻物理节点的利用率方差为:

$$D(n^s, t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\zeta(n_i^s) - \overline{\zeta(n^s)})^2 \quad (8)$$

其中, $\overline{\zeta(n^s)}$ 是物理节点在 t 时刻的平均利用率; $D(n^s, t)$ 为评价节点负载均衡度的重要指标, $D(n^s, t)$ 越小, 节点负载均衡。

3 面向节点负载均衡的虚拟网络重构算法设计

以 T_{period} 为周期进行虚拟网络重构, 重构过程如图 4 所示。

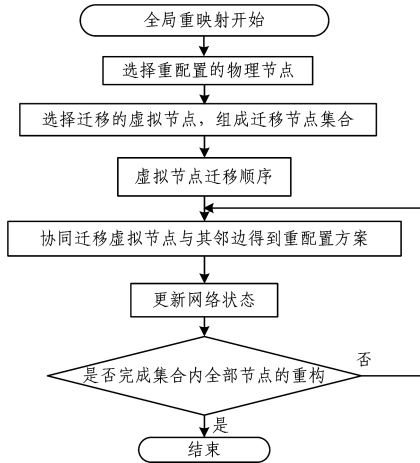


图 4 虚拟网络的重构流程

Fig. 4 Reconfiguration procedure of virtual network

具体步骤如下。

Step1 当 t 为 T_{period} 整数倍数时, 根据式(1)计算阈值 $thred(G^s, t)$ 。

Step2 选择需要重配置的物理节点: 当物理节点 $\theta > 0$ 时, 将其存入 Φ_n , 遍历底层物理节点, 将所有满足上式的 n^s 组成集合 Φ_n 。

Step3 选择需要迁移的虚拟节点, 具体流程如图 5 所示。

1) 对于 Φ_n 中某一个物理节点 n^s , 启动虚拟节点选择程序。如果 n^s 承载的 M 个虚拟节点中存在 $cpu(n_1^v), \dots, cpu(n_M^v) \geq \theta$, 其中 $1 \leq i \leq n \leq M$, 那么把 $cpu(n_i^v) (1 \leq i \leq n)$ 中值最小的虚拟节点存入 Ψ_n 。

2) 如果 n^s 上承载的 M 个虚拟节点的 cpu 都小于 θ , 那么就计算资源需求量最大的虚拟节点 cpu_{max} 存入 Ψ_n , 并根据 $\theta' = \theta - cpu_{max}$, 从剩余的虚拟节点中继续选择计算资源需求量与 θ' 最接近的虚拟节点, 存入 Ψ_n 。

3) 重复以上步骤, 直至物理节点的可用资源大于阈值。

4) 遍历 Φ_n , 选出所有待重配置的节点上需要迁移的虚拟节点, 组成集合 Ψ_n 。

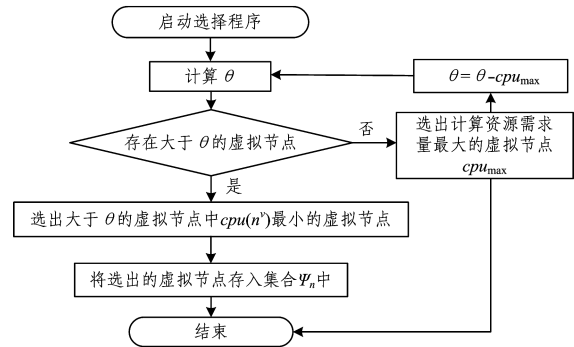


图 5 虚拟节点选择流程

Fig. 5 Procedure of selecting virtual nodes

Step4 选择候选的目标物理节点。

- 1) 将 Φ_n 中包含的物理节点从底层物理节点中删除。
- 2) 将可用计算资源小于虚拟节点资源需求的物理节点, 从底层物理节点中删除。
- 3) 将与虚拟节点距离大于 $D(n^v)$ 的物理节点删除。
- 4) 将与将要迁移的虚拟节点在同一个虚拟网络中的虚拟节点对应的物理节点从底层物理节点中删除。
- 5) 将节点资源可用量小于将要迁移的虚拟节点计算资源需求量与阈值之和的物理节点删除。

得到目标物理节点集合 Ω_n 。

Step5 虚拟节点迁移的方案。

1) 对 Ψ_n 内的虚拟节点按计算资源需求 $cpu(n^v)$ 由大到小排序, 首先映射计算资源需求大的虚拟节点。

2) 将虚拟节点 n^v 映射到 Ω_n 内节点计算资源最多的目标节点, 同时将 n^v 相连的虚拟链路 e^v 映射到与 n^s 相连的物理链路 n^s 上, 如果链路映射成功, 则进行下一个虚拟节点映射, 如果链路映射不成功, 则将虚拟节点 n^v 映射到 Ω_n 内节点计算资源次之的目标节点上, 以此类推, 若候选物理节点均不满足映射条件, 则此次迁移方案失效, 对虚拟节点 n^v 不进行迁移。

3) 遍历 Ψ_n 内的虚拟节点。

4 性能评估与分析

从虚拟网络请求接受率、底层网络长期平均收益开销比、底层网络资源利用率 3 方面来检验本文所提方法的性能。

4.1 仿真环境设置

由 GT-ITM 拓扑生成器随机产生物理网络拓扑和虚拟网络拓扑。其中, 物理网络节点个数为 100, 节点间连接率为 0.5, 其位置坐标 x^s 和 y^s 均服从 $[0, 1000]$ 的均匀分布, 物理节点的计算资源和物理链路的带宽资源服从 $[50, 100]$ 的均匀分布。虚拟网络中, 节点数目服从 $[2, 10]$ 的均匀分布, 其位置

坐标 x^v 和 y^v 均服从 $[0,1000]$ 的均匀分布,请求的位置约束 $D(n^v)$ 取 200,节点连接率为 0.5,节点的计算资源需求服从 $[10,30]$ 的均匀分布,链路的带宽服从 $[10,15]$ 的均匀分布。实验通过 Matlab 进行仿真评估,运行时间为 3000 个时间单元,虚拟网络请求到达率服从参数为 0.1 的 Poisson 分布,重构周期 T_{period} 为 300 个时间单元。每个虚拟网络持续时间服从参数为 450 的指数分布,另外,式(1)中 $\mu=0.7, \lambda=0.3$,式(3)和式(5)中 $\alpha=\beta=1$ 。

仿真实验对 3 种映射算法进行比较,3 种算法描述如表 1 所列。其中,第一种方法为基本虚拟网络映射算法,不进行重构策略;第二种方法采用拓扑感知的重构策略,但其采用固定的物理节点负载阈值,不能充分反映动态变化的物理网络资源状态,且其虚拟节点选择策略不够灵活;第三种方法为本文所提方法,在重构策略启动后,将负载超过动态阈值的物理节点筛选出来,并根据图 5 中的虚拟节点选择流程,整合其上需要迁移的虚拟节点,同时根据候选物理节点的选择原则确定目标物理节点集合,并逐个将待迁移虚拟点及与其相关联的链路进行协同映射。为降低因数据随机性带来的仿真结果不稳定,重复仿真 20 次,并求取 20 次实验结果的平均值。

表 1 算法描述

Table 1 Algorithm description

名称	算法描述
K-TC ^[3]	虚拟节点映射过程考虑节点连接度,链路映射采用 k 最短路径算法
K-TC+TA-VNR ^[10]	拓扑感知的虚拟网络重构算法,先大后小地选择需要迁移的虚拟节点
K-TC+DN-VNR	本文提出的重构算法,自适应地设置阈值,动态地选择需要迁移的虚拟节点,最小化虚拟节点迁移数量,均衡节点负载

4.2 仿真结果分析

1) 虚拟网络请求接受率

图 6 为在实验仿真中 3 种算法的虚拟网络请求接受率随时间变化的情况。500 个单位时间前,物理网络资源丰富,请求接受率较高,随着时间推移,物理网络资源消耗,3 种算法的请求接受率降低并达到稳态。其中,没有进行网络重构的 K-TC 算法的请求接受率最低,低于 65%;K-TC+TA-VNR 算法的请求接受率较好;本文提出的 K-TC+DN-VNR 算法的请求接受率最高,达到了 75% 以上,这是因为该算法在重构过程中灵活地选择迁移的虚拟节点,更有利于后期虚拟网络映射,在提高虚拟网络请求接受率方面具有一定优势。

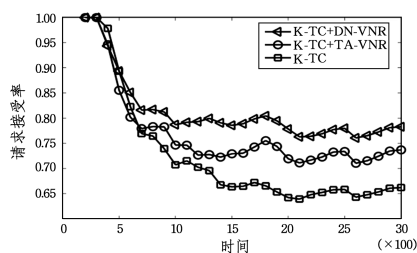


图 6 虚拟网络请求接受率

Fig. 6 Request acceptance ratio of virtual network

2) 节点资源利用率

图 7 表明 K-TC+TA-VNR 算法和 K-TC+DN-VNR 算

法明显降低了节点利用率方差,有效均衡了物理节点负载。重构算法定期统计物理节点负载,当其负载超过阈值时,迁移其上的虚拟节点。而随着时间的推移,特别是 1500 个单位时间后,K-TC+DN-VNR 算法的效果比 K-TC+TA-VNR 算法好,主要原因在于在节点需求总量一定的情况下,节点负载越均衡,则节点资源利用率越合理。

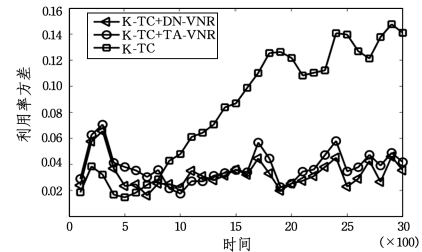


图 7 节点资源利用率方差

Fig. 7 Variance of utilization rate of physical nodes resource

3) 请求收益开销比

图 8 为算法对长期平均收益开销比的影响,可以看出 3 种算法得出的虚拟网络长期收益开销比差别不大。在节点资源需求不变的情况下,收益开销比主要与虚拟链路占用物理路径的跳数有关,而本次仿真环境中,虚拟链路需求服从 $[10,15]$ 的均匀分布,物理链路的带宽服从 $[50,100]$ 的均匀分布,完全可以满足其需求。另外,在虚拟网络映射收益开销的定义式(3)和式(5)中, α 和 β 均取 1,对于链路的权重没有做更高的要求,因此 3 种算法收益开销比之间的差距不大。

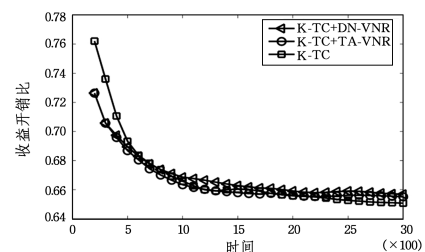


图 8 虚拟网络请求收益开销比

Fig. 8 Ratio of income and expense of virtual network request

结束语 本文以均衡物理节点负载为目标,从迁移虚拟节点入手,提出了面向节点均衡的虚拟网络重构算法 K-TC+DN-VNR。该算法根据底层物理节点的实时状态设置阈值,对负载超过阈值的物理节点进行重配置,灵活地选择需要迁移的虚拟节点,均衡了底层物理节点的资源负载,同时提高了虚拟网络的请求接受率。下一步将结合链路负载均衡,开展虚拟网络重构的研究工作。

参考文献

[1] CHENG X,ZHANG Z B,SU S,et al.Survey of virtual network embedding problem [J]. Journal on Communications, 2011, 32(10):113-121. (in Chinese)
程祥,张忠宝,苏森,等.虚拟网络映射问题研究综述[J].通信学报,2011,32(10):113-121.

- [14] LIU W X, YU S Z, HU X, et al. Selective caching in content-centric networking[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(2): 275-288. (in Chinese)
刘外喜, 余顺争, 胡晓, 等. CCN 中选择性缓存机制的研究[J]. 计算机学报, 2014, 37(2): 275-288.
- [15] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community Structure in Social and Biological Networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 99(12): 7821-7826.
- [16] RAGHAVAN U N, ALBERT R, KUMARA S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2007, 76(3 Pt 2): 036106.
- [17] NEWMAN M E. Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices[J]. Physical review E, 2006, 74(3 Pt 2): 036104.
- [18] RUI L L, PENG H, HUANG H Q, et al. Popularity and Centrality Based Selective Caching Scheme for Information-centric Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 38(2): 325-331. (in Chinese)
- 芮兰兰, 彭昊, 黄豪球, 等. 基于内容流行度和节点中心度匹配的信息中心网络缓存策略[J]. 电子与信息学报, 2015, 38(2): 325-331.
- [19] ALEXANDER A, MOISEENKO I, ZHANG L X. ndnSIM: NDN simulator for NS-3 Named Data Networking (NDN) Project [R]. 2012.
- [20] openflow[EB/OL]. <https://www.nsnam.org/docs/release/3.13/models/html/openflow-switch.html>.
- [21] ZEGURA E, CALVERT K. Georgia tech Internet topology models[EB/OL]. <http://www.cc.gatech.edu/projects/gtitm>.
- [22] BRESLAU L, CAO P, FAN L, et al. Web caching and Zipf-like distributions: evidence and implications[C] // 18th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York: IEEE, 2002: 126-134.
- [23] ZHAO G F, XING Y, DUAN J, et al. Time-driven ICN caching mechanism in internet of things[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018, 30(1): 68-74. (in Chinese)
赵国峰, 邢媛, 段洁, 等. 物联网中时间驱动的 ICN 缓存机制研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2018, 30(1): 68-74.

(上接第 98 页)

- [2] WEN T, YU H F, LI L M. The road to network virtualization [J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(3): 2-7. (in Chinese)
温涛, 虞红芳, 李乐民. 网络虚拟化的过去、现在和未来[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(3): 2-7.
- [3] CUI H Y, GAO W J, LIU J, et al. A virtual network embedding algorithm based on virtual topology connection feature[C] // IEEE 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Atlantic, 2013: 1-5.
- [4] HU Y X, LAN J L, WU J X. Research on resource reconfiguration model of substrate carrier network based on hardware virtualization [J]. Journal on Communications, 2011, 32(12): 36-42. (in Chinese)
胡宇翔, 兰巨龙, 邬江兴. 基于固件虚拟的承载网络资源重构模型研究[J]. 通信学报, 2011, 32(12): 36-42.
- [5] XU Z, LIANG W, XIA Q. Efficient virtual network embedding via exploring periodic resource demands[C] // 39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Edmonton, Canada: IEEE, 2014: 90-98.
- [6] CAO B, LANG W Q, LI Y. Virtual network reconfiguration in wireless network virtualization based on maximum revenue [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2016, 28(5): 620-627. (in Chinese)
曹斌, 郎文强, 李云. 基于最大收益的无线虚拟网络重映射算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(5): 620-627.
- [7] QU H, ZHAO J H, GUO S L, et al. Resource reconfiguration method based on minimum cost for network virtualization [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(5): 114-118. (in Chinese)
曲桦, 赵季红, 郭爽乐, 等. 基于最小代价的虚拟网络重配置方法[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(5): 114-118.
- [8] HU Q, WANG Y, CAO X. Survivable Network Virtualization for Single Facility Node Failure: A Network Flow Perspective [J]. Optical Switching & Networking, 2013, 10(4): 406-415.
- [9] XIAO A L, WANG Y, MENG L M, et al. Virtual network embedding approach to survive multiple node failures [J]. Journal on Communications, 2015, 36(4): 1-8. (in Chinese)
肖蔼玲, 王颖, 孟洛明, 等. 面向多节点故障的生存性虚拟网络映射方法[J]. 通信学报, 2015, 36(4): 1-8.
- [10] PENG L M. A topology-awareness virtual network reconfiguration algorithm [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(5): 110-115. (in Chinese)
彭利民. 一种拓扑感知的虚拟网络重构算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(5): 110-115.
- [11] LIU H. Research on green resource allocation management [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)
刘慧. 绿色化资源分配机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [12] XIAO A, WANG Y, MENG L, et al. Topology-Aware Remapping to Survive Virtual Networks against Substrate Node Failures[C] // IEICE 15th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS). 2013: 406-411.
- [13] LI L. Research on virtual network embedding algorithms in service-oriented future Internet architecture [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)
李澜. 面向服务的未来互联网体系虚拟网络映射方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.