企业级网络虚拟映射带宽与能耗优化平衡策略*

丛 鑫，訾玲玲
（辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院，辽宁 葫芦岛 125105）

摘 要：利用现有的网络环境运行大规模数据分析和处理任务是企业当前的实际需求。满足需求的途径之一是网络虚拟化技术。相比于云平台虚拟网络映射以最大化收益为出发点，企业级网络虚拟映射要以降低运行费用为目标，同时考虑节点间链路的带宽小的特点。以能源和带宽消耗优化为目标，建立了整数线性规划模型，首先确定虚拟节点和链路映射到底层物理节点和链路的位置；其次确定采用哪条链路传输所需镜像。实验参数来源于实际值，分析了单一优化模型和该模型在实验数值上的差异，最终证明该模型可以在带宽消耗优化和能耗消耗优化取得较好的平衡。

关键词：企业级网络；虚拟映射；能耗优化；带宽优化；整数线性规划
中图分类号：TP393.07 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-3695(2017)10-3144-05
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2017.10.057

Trade-off strategies between bandwidth and energy consumption of virtual embedding in enterprise networks

Cong Xin, Zi Lingling
(*School of Electronic & Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning* 125105, *China*)

Abstract: The actual needs of enterprises are to operate the big data tasks for analyzing and processing by using the current environment of networks. The way to meet the demand is the technology of network virtualization. The goal of the virtual network embedding in cloud is to maximize profits of cloud providers, but the goal of virtual network embedding in enterprise network is to decrease the costs of running expense under the condition that the bandwidth between nodes is very small. For the purpose of consumption optimization in the terms of energy and bandwidth, this paper presented the integral linear programming model. The first step was to determine mapping positions between virtual nodes and physical nodes in the basement, as well as the mapping positions between virtual links and physical links. The second step was to choose the link used to transfer the desired image. The parameters in experiments were set by the actual data. The experiments analyzed the differences between single optimization and our model. The results indicate that the trade-off between energy and bandwidth consumption could be acquired.

Key words: enterprise networks; virtual network embedding; energy optimization; bandwidth optimization; integer linear programming

0 引言

大型企业每天会产生大量的数据，出于对数据泄露风险的考虑，企业处理和分析这些数据往往倾向于在企业内部完成，这就需要构建服务器集群而非租用云平台[1]。当企业规模很大且地理位置分散时，还会组建多个服务器集群，运行和维护这些集群的费用是巨大的[2]。同时，对企业内部已有计算机使用情况调研分析[3]得知，处于开启状态的计算机绝大部分时间 CPU 和网络带宽的利用率都是很低的。此外，数据处理前期投入，底层网络拓扑也无法作出较大的改变。

在当前企业级网络环境下，企业运营服务器集群的巨大费用开销与企业内部计算机利用率极低的状况存在矛盾，任务运行需要多样化的网络拓扑结构与已有网络拓扑结构固化存在矛盾。在对网络虚拟化技术[4]的研究进一步深入和发展的情况下，构建虚拟网络层作为任务运行的载体解决上述两个矛盾是一条有效的途径。网络虚拟化技术使得在同一底层物理网络之上可以共存多个异构的虚拟网络，每个虚拟网络占用整个底层网络的一个资源片段。虚拟网络可以组建特定的拓扑结

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金资助项目（61602227）；辽宁省教育厅科学研究一般项目（L2015225, LJYL019）；辽宁省科技厅博士科研启动基金(201601365)；辽宁工程技术大学博士启动基金资助项目（14-1045, 14-1126）；辽宁工程技术大学生产技术问题创新研究基金资助项目（20160844T, 20160018T）

收稿日期：2016-07-19；**修回日期**：2016-09-18 **基金项目**：国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61602227)；辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2015225)；辽宁工程技术大学博士启动基金资助项目(14-1045,14-1126)；辽宁工程技术大学生产技术问题创新研究基金资助项目(20160844T,20160018T)

作者简介：丛鑫(1982-)，男，辽宁阜新人，讲师，博士，主要研究方向为流媒体、云计算、P2P(chongzi610@163.com)；訾玲玲(1981-)，女，辽宁阜新人，讲师，博士，主要研究方向为图形图像及多媒体、视觉与信息获取.

网络资源的供给,提升底层计算机的利用率。

现有的网络虚拟化方案均聚焦在虚拟映射的有效性方面[6~8],这些映射算法决定了虚拟节点和虚拟链路被分配到底层网络的方式,最终达到预期目标。但确定最优的映射算法是个 NP-Hard 问题[9]。文献[10]设计了云环境下的虚拟网络映射算法,最终在带宽消耗和能耗消耗之间取得了较好的平衡。已有的映射方法[11~13]均以云计算中心网络为运行环境,其目标是最大化云运营商的收益。但企业级网络是供企业内部运行任务而构建,虚拟网络映射的目标为尽可能地降低映射过程中的费用开销。已有研究[14]表明,能耗开销已经占到数据中心总开销的 12% ~20%,占运营开销的 40% ~50%,因此,企业级虚拟网络映射降低费用开销的目标就转变为优化虚拟网络映射过程中的能源消耗。

虚拟网络映射过程中能源消耗主要体现在 CPU 能源消耗和链路带宽能源消耗两个方面,本文主要研究在满足虚拟请求带宽数情况下最小化能源消耗模型,该模型不仅考虑了已有文献对虚拟网络和底层实际网络之间映射关系的假设条件,还考虑了企业数据处理和分析任务过程中的数据源(如图像数据、不同的运行软件和协议栈)对创建虚拟路由器的影响。该模型基于整数线性规划理论,通过设置不同的权重,来取得满足需求带宽和能源开销优化之间的平衡关系。

1　带宽请求与能耗优化模型

1.1　问题描述

企业网内部设备通过交换机互联,那么在同一交换机上连接的设备可以组成一个网络,称之为子网。当多个虚拟网络映射请求到来时,就可以映射到同一子网的不同节点和链路上,如图 1 所示。图 1 表明满足同一个虚拟网络请求的两种映射方法,图 1(a)是以优化底层带宽使用数量为目标,(b)是以优化能源消耗数量为目标。通常,减少能源消耗是通过降低数据传输速率、使用较长路径适配方法、关闭或休眠暂时不用的节点来实现的,但以上方法都会降低运营商所提供的服务质量。因此,在虚拟网络映射过程中,研究解决在不损害服务质量条件下的能源消耗优化问题,是本文关注的重点。

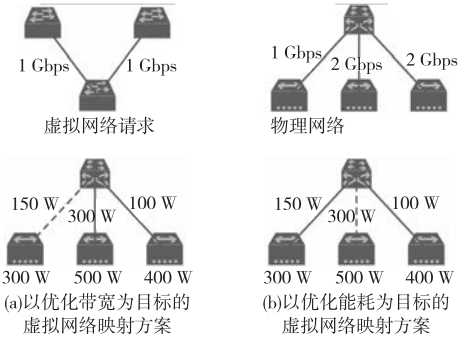


图 1　不同的虚拟网络映射方案对带宽和能耗的影响

1.2　问题建模

模型的提出是为了适应在虚拟请求动态到来时,如何在底层网络建立所需的虚拟网络的情况。包括请求所需的网络拓扑结构,每个虚拟节点和链路的资源需求,实例化虚拟网络的时间界限,实例化虚拟节点的物理位置限制等。

提出的模型在满足虚拟请求所需资源的基础上,计算出应该选择网络中哪些节点和链路,从而实例化虚拟机,最终达到最小化能耗数值和满足带宽消耗。该模型基于 0 ~1 整数线性规划,考虑虚拟机镜像存储位置,对能耗和带宽进行双目标优化。相关参数设置如下:

N:所有路由节点组成的集合。

L:路由之间可以通信的物理链路集合。其中,物理链路 $(n_i,n_j)\in L,n_i,n_j\in N$ 表示路由节点 n_i 和 n_j 有链路 (n_i,n_j) 相连接。

VN:虚拟路由节点组成的集合。

VL:虚拟路由节点之间可以通信的虚拟链路集合。其中,虚拟链路 $(VN_i,VN_j)\in VL,VN_i,VN_j\in VN$ 表示虚拟路由节点 VN_i 和 VN_j 有虚拟链路 (VN_i,VN_j) 相连接。

I:已经安装或存储镜像的路由节点集合。每个镜像包含一种操作系统和一组需要的且可运行的软件集。

C:物理路由节点上可用的 CPU 核心数。$C(n)$ 表示路由节点 $n\in N$ 的 CPU 核心数。

VC:虚拟路由节点所请求的 CPU 核心数。$VC(vn)$ 表示虚拟路由节点 $vn\in VN$ 所请求的 CPU 核心数。

B:物理路由节点之间的链路可用带宽集。$B(u,v),u,v\in N$ 表示物理链路 $l\in L$ 上的可用带宽。

VB:虚拟路由节点之间链路请求的带宽集,$VB(vu,vv),vu,vv\in VN$ 表示虚拟链路 $vl\in VL$ 上的可用带宽。

D:物理链路之间的时间延迟集,$D(u,v),u,v\in N$ 表示物理链路 $l\in L$ 上的延迟值。

VD:虚拟路由节点之间可以容忍的最大的时间延迟集,$VD(vu,vv),vu,vv\in VN$ 表示虚拟链路 $vl\in VL$ 上的可容忍的最大的时间延迟。

$P_{vn,n}$:物理路由节点分配限制条件。此值为 1 表示虚拟节点 vn 可以被映射到物理节点 n 上,反之为 0。特别地,如果用户指定虚拟路由节点 vn 不能被映射到物理节点 n 上,此值必须设置为 0。

$Q_{n,i}$:镜像 i 存储的位置。此值为 1 表示镜像 i 存储的物理路由节点与节点 n 有直接相连的物理链路,反之为 0。

$R_{vn,i}$:需用的软件的存储的位置。此值为 1 表示虚拟节点 vn 所需要的所有软件,包括操作系统、协议栈、支撑软件,都在镜像 i 中,反之为 0。

M:物理路由节点上的可用内存。$M(n)$ 表示物理路由节点 n 上的当前可用的物理内存。

S:镜像的规模。$S(i)$ 表示镜像 i 的大小。

O:实例化虚拟网络的时间上限。

$T_{n,i}$:物理路由节点 n 加载镜像 i,直到启动完毕所需要的时间上限。

E_{start}:底层节点完成启动过程的平均能源消耗。

E_{link}:物理链路能源消耗。$E_{\text{link}}^{(u,v)}$ 代表物理链路 $(u,v)\in L$ 所消耗的链路能耗。

E_{card}:物理线卡能源消耗。

E_{core}:CPU 平均能源消耗。

值得注意的是,网络连接 (D,VD) 允许的最大时间延迟会对某些时间敏感型应用或任务的 QoS 产生影响;虚拟路由请求镜像时,需要获知镜像的存储位置 $(Q_{n,i})$,确定从哪个物理路由节点上下载 $(I,R_{vn,i})$;镜像大小 S 相关于物理路由节点存

储能力(M,S),即节点需要预留多大的空间来存储和安装镜像,同时也影响镜像下载和传输时间;虚拟节点的拥有者可以随着任务运行时间的推移,限制一些物理路由节点的使用($P_{vn,n}$)或在任务开始时不对某些物理路由节点进行映射,从而降低任务运行过程中的能耗值;实例化虚拟网络的可容忍的最大时间,相关于请求服务的优先度和构建虚拟网络的紧急程度(D,S,$T_{n,i}$)。

虚拟网络映射的能源消耗需要计算物理路由节点和链路的能耗值,节点的能耗值包含运行任务所需能耗值和节点启动所需能耗值,链路能耗值包含传输数据时路径上设备的能耗值和启动在路径上的设备的能耗值,故设置两个参数 α_n 和 $\beta_{u,v}$ 用以标志节点启动情况和链路使用情况,其中 n,u,$v \in N$。

$$\alpha_n = \begin{cases} 1 & \text{CPU 已分配核心数} \geqslant 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{1}$$

$$\beta_{u,v} = \begin{cases} 1 & \text{映射到}(u,v)\text{上的虚拟链路数} \geqslant 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{2}$$

研究企业网络环境下的带宽与能耗优化模型,设置参数权重 φ 表征带宽优化,则 $1-\varphi$ 表征能耗优化。为了增加模型的灵活性,设置如下二进制变量。

$X_{n,vn,i}$:虚拟路由节点 vn 是否映射到物理路由节点 n 上,且使用镜像 i,若满足此条件,此值为 1,否则为 0;值得注意的是,当 $R_{vn,i}=0$ 或者 $P_{vn,n}$ 时,vn 不能被映射到 n 上,此时 $X_{n,vn,i}=0$。

$Y_{(u,v),vw}$:虚拟链路 $vw \in VL$ 是否映射到物理链路 $(u,v) \in L$ 上,若是,此值为 1,否则为 0。

$Z_{(u,v),vn,i}$:虚拟路由节点 vn 请求的镜像 i 是否需要通过 (u,v) 传输,若是,此值为 1,否则此值为 0。

U_n:物理路由节点 n 是否需要开启,如果是,此值为 1,否则此值为 0。

$W_{u,v}$:物理链路 $(u,v) \in L$ 是否需要开启,如果是,此值为 1,否则此值为 0。

带宽与能耗模型分成两步:完成虚拟网络映射到物理网络、选择使用物理网络中使用哪条链路来传输镜像。

1)模型描述如下:

$$\begin{aligned} \min\{ & \varphi^* \Big[\sum_{(u,v)\in L} \sum_{vw \in VL} Y_{(u,v),vw} \times VB(vw) \Big] + \\ & (1-\varphi) \times \Big[E_{\text{start}} \times \sum_{n \in N} (\alpha_n + (1-\alpha_n) \times U_n) + \\ & E_{\text{core}} \times \sum_{n \in N} \sum_{vn \in VN} \sum_{i \in I} (X_{n,vn,i} \times VC(vn)) + \\ & (2 \times E_{\text{card}} + E_{\text{link}}^{(u,v)}) \times \sum_{(u,v)\in L} (\beta_{u,v} + (1-\beta_{u,v}) \times W_{u,v}) \Big] \} \end{aligned} \tag{3}$$

限定条件为

$$\forall vn \in VN, \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} X_{n,vn,i} = 1 \tag{4}$$

$$\forall n \in N, \sum_{vn \in VN} \sum_{i \in I} X_{n,vn,i} \leqslant 1 \tag{5}$$

$$\forall n \in N, \sum_{vn \in VN} \sum_{i \in I} VC(vn) \times X_{n,vn,i} \leqslant C(n) \tag{6}$$

$$\forall (u,v) \in L, \sum_{vw \in VL} Y_{(u,v),vw} \times VB(w) \leqslant B(u,v) \tag{7}$$

$$\forall n \in N, \sum_{vn \in VN} \sum_{i \in I} S(i) \times X_{n,vn,i} \leqslant M(n) \tag{8}$$

$$\forall (vm,vn) \in VL, n,m \in N, i \in I,$$

$$\sum_m Y_{(n,m),(vm,vn)} - \sum_m Y_{(m,n),(vm,vn)} = \sum_i X_{n,vm,i} - \sum_i X_{n,vn,i} \tag{9}$$

$$\forall n \in N, U_n > 0, \sum_{vn \in VN} \sum_{i \in I} X_{n,vn,i} \geqslant U_n \tag{10}$$

$$\forall (u,v) \in L, W(u,v) > 0, \sum_{vw \in VL} Y_{(u,v),vw} \geqslant W(u,v) \tag{11}$$

式(4)物理含义为虚拟节点 vn 如果能映射层到物理节点 n 上,则请求的镜像 i 必须被安装完毕;式(5)限制同一个虚拟节点如果不止一次映射到物理节点上时,请求的镜像 i 只能被安装或传输至多一次;式(6)保证虚拟节点 vn 映射到节点 n 上,请求的 CPU 核心数不能超过 n 所拥有的核心数。此限制条件能避免并行程序请求新 CPU 核心时不能满足从而造成程序运行失败的情况;式(7)限制虚拟链路 vw 映射到物理链路 (u,v) 上时,所请求的带宽数不能超过 (u,v) 所能提供的带宽数;式(8)限制如果需要安装镜像,则镜像运行时所占用的内存不能大于物理节点 n 分配给虚拟节点 vn 的内存数;式(9)保证组成虚拟链路的物理链路的可用性。该约束利用节点 n 的出度和入度平衡规则,即当两个虚拟节点 vm、vn 同时映射到同一个物理节点 n 上时,(vm,vn) 之间的数据流向与镜像存储位置相一致;式(10)保证在物理路由节点 n 开启时,有至少一个虚拟节点被映射到该物理节点上。该限制有利于降低节点能源消耗;式(11)保证在物理链路 (u,v) 开启时,有至少一个虚拟链路被映射到该物理链路上。该限制有利于降低带宽能源消耗。

利用模型决策工具 IBM WebSphere ILOG CPLEX 求解上述模型,最终得到 $X_{n,vn,i}$ 和 $Y_{(u,v),w}$。这两个参数的结果作为第二步的输入,从而优化镜像的传输路径,满足用户 QoS 为目标。

虚拟节点 vn 启动之后,需要安装镜像,而后才能正常运行用户的作业。安装镜像的过程主要耗费的时间为传输镜像的物理链路上延迟和镜像传输时间两部分。

2)模型描述如下:

$$\min \sum_{vm \in VN} \sum_{(u,v)\in L} \Big[Z_{(u,v),vn,i} \times D(u,v) + \frac{Z_{(u,v),vn,i} \times S(i)}{B(u,v)} \Big] \tag{12}$$

限定条件为

$$\forall vn \in VN, n,m,r \in N, i \in I,$$

$$\sum_r Z_{(u,r),vn,i} - \sum_r Z_{(r,u),vn,i} = X_{n,vn,i} \times Q_{n,i} \tag{13}$$

保证底层物理链路在传输镜像时可用。

3 实验评估

为了评估提出的模型的有效性,采用 Java 语言编制模拟器。该模拟器以底层网络的拓扑信息为输入,其包含以统计信息为基础的底层节点有效性、物理链路的连通性、链路经过的路由节点和流量情况,这些信息能够辅助识别出哪些节点和链路是可用的。利用 CPLEX 工具集求解模型,获得任务请求所需的虚拟节点映射到物理节点的位置,虚拟链路映射到物理链路的位置。模拟器运行在四个服务器组成的服务器集群和计算机节点组成的网络上,每个服务器拥有四个核心,8 GB 内存。为了评估提出的模型的性能,分别设置 $\varphi=1$ 和 $\varphi=0$,与最小化带宽分配算法(带宽优化)[15]和最小化能耗算法(能耗优化)[10]相比较。同时,设置不同的 φ 值,考察能耗和带宽的变化。详细参数设置如下:

为了详细评估底层物理节点数量对模型算法的影响,设置底层物理节点数的范围在 20 ~ 90,物理链路带宽 10 Mbps ~ 1 Gbps,网络中镜像数三个,每个请求的平均到达时间间隔为 60 s,每个请求申请的虚拟节点个数{2,3,4},每条虚拟链路带宽为 1 Mbps ~ 100 Mbps,每个请求申请的内存数为{512 MB,1 G,2 G},镜像大小 128 M,实例化网络的最大请求时间为 100 s,每个底层物理节点的核心数为{2,4},每个虚拟节点的核心

数为{1,2},物理链路和虚拟链路延迟参考文献[16]的设置。每节点每核心能耗参考文献[16]的设置,值为 166 W,每个线卡的能耗为 300 W,中继器能耗为 15 W。

底层网络拓扑结构参考实际的企业设置,为每个节点安装无线网卡,每个网卡连接到不同的无线路由器上,以模拟不同部门不同地理位置的企业实际办公场景,如需模拟更改物理节点的位置,则改变相应的路由器连接即可。

图 2 显示在底层网络有 90 个底层节点时,随着参数 φ 的增加,能源消耗和带宽消耗的变化趋势。其中,横坐标值是 φ 值,纵坐标是比例。比例定义为:以 $\varphi=1$ 时的带宽值作为基准,则带宽比例值 $=\frac{\varphi\neq1\text{ 时的带宽消耗值}}{\varphi=1\text{ 时的带宽消耗值}}$;$\varphi=0$ 时的能耗值作为基准,则能耗比例值 $=\frac{\varphi\neq0\text{ 时的能源消耗值}}{\varphi=0\text{ 时的能源消耗值}}$。$\varphi$ 当底层节点数目不同时,该变化趋势存在稳定性。随着 φ 值的降低,能源消耗也随之降低,但带宽消耗随之增加,尤其是当 φ 值趋近于 0 时,带宽增加尤为明显。φ 取值范围在[0,0.5]时,能源消耗变化不大,但是相比于完全以带宽优化为主的情况 $\varphi=1$ 时,带宽消耗大约增长了 9%。

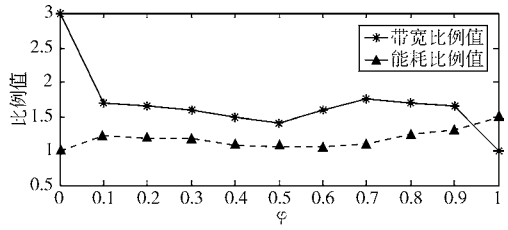


图 2　φ 取不同值是带宽和能耗比例值变化

图 3 和 4 显示了每个请求下的能源和带宽分别与带宽优化和能耗优化算法相比较的情况。随着底层节点数的增加,能源消耗相比于 $\varphi=1$ 时大约增加了 10%,但是当底层节点数非常大时,能源消耗增加趋势变小。此外,带宽消耗相比于 $\varphi=0$ 时,降低约 25%。

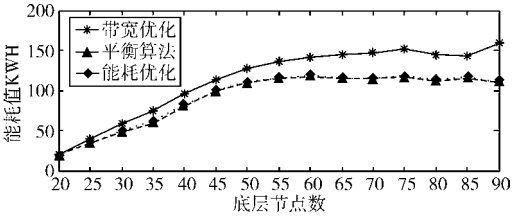


图 3　底层节点数不同时,每虚拟请求能耗值变化

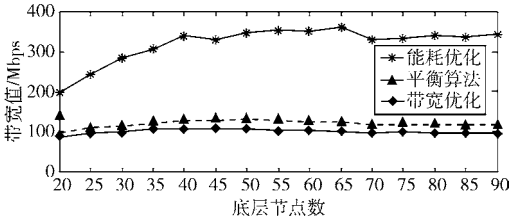


图 4　底层节点数不同时,每虚拟请求带宽值变化

图 5 显示了不同算法的执行时间,当 $\varphi=0$ 时,随着底层节点的规模的增加,算法执行时间大大延长,远高于不考虑能源消耗的情况 $\varphi=1$。$\varphi=0.5$ 时,底层物理节点数量少的情况下,算法执行时间与 $\varphi=1$ 时相差不大,但底层节点规模增大时,算法执行时间大大增加。

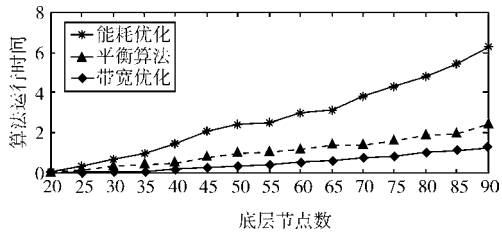


图 5　底层节点数不同时,算法运行时间

3.1　应用示例

图 6 所示是企业网底层网络拓扑结构部分示意图,实验环境按照此图搭建,计算机通过无线网络和有线网络与路由节点相连接。图 7 是任务集运行到某一时刻新到来的三个虚拟网络请求,其中方框内数字代表节点所需的资源数(以所需 CPU 资源为例),边上的数字代表两个节点间通信所需的带宽数。

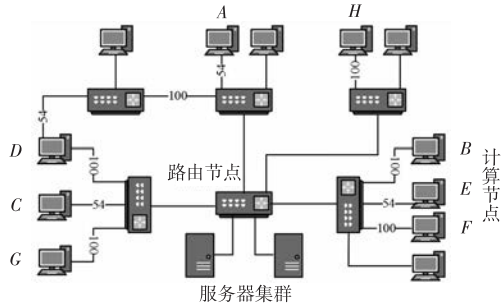


图 6　企业网底层网络拓扑结构(部分)

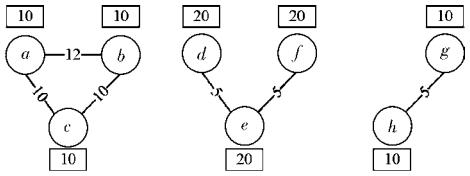


图 7　任务请求示意图

图 8 是图 7 所示请求到来时,底层节点资源数剩余情况。其中方框内数字代表底层节点剩余资源数,边上数字表示两点间带宽资源剩余数。值得注意的是,在底层网络上,D 节点使用无线网卡连接在一台路由节点设备上,使用网卡连接在另一台路由节点设备上。此时由于节点 A 和节点 D 之间空闲带宽数很大,理应将虚拟节点 d 和 e 的链路请求直接映射到 AD 上,但出于能耗优化的考虑,此时需要启动新的路由节点,而 ACD 之间的带宽足够满足虚拟请求 de,故将其映射到链路 ACD 上。

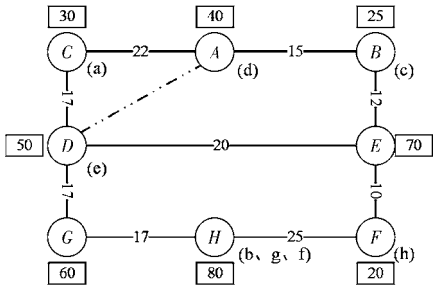


图 8　运行平衡算法后的虚拟网络映射示意图

4　结束语

企业利用现有网络设备搭建大规模数据分析和处理平台的解决方案的关键在于虚拟网络映射,相比于云平台,企业级网络虚拟映射的目标在于降低任务运行过程中的能源消耗。

此外限于企业设备之间的带宽数值,类似于每秒传输 GB 级数据是不可能完成的任务。本文重点考虑了带宽消耗和能源消耗之间的平衡问题,经过实验分析,单一的能耗优化会导致带宽消耗极大,适当的权重所带来的能源消耗值与单一的能耗优化相比相差不大,但带宽消耗至少降低 35%。

参考文献:

[1] Horvitz E, Mulligan D. Data, privacy, and the greater good [J]. Science, 2015, 349(6245): 253-255.

[2] Hou Weigang, Guo Lei. Virtual network embedding for hybrid cloud rendering in optical and data center networks [J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(2): 1-14.

[3] Kent A D, Liebrock L M, Neil J C. Authentication graphs: Analyzing user behavior within an enterprise network [J]. Computers & Security, 2014, 48(7): 150-166.

[4] Feamster N, Gao Lixin, Rexford J. How to lease the Internet in your spare time[J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2007, 37(1): 61-64.

[5] Bavier A, Feamster N, Huang M, *et al*. In VINI veritas: realistic and controlled network experimentation [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(4): 3-14.

[6] Zhu Yi, Xu Jiru, Zhang Qiong, *et al*. Game theory based reliable virtual network mapping for cloud infrastructure[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2016: 1-7.

[7] Zhao Jun, Ma Zhong. Virtual network mapping algorithm based on load balancing multi-objective particle swarm optimization[C]//Proc of the 11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2015: 1-5.

[8] Alhazmi K, Sharkh M A, Shami A. Drawing the cloud map: virtual network provisioning in distributed cloud computing data centers [J]. IEEE Systems Journal, 2016, PP(99): 1-12.

[9] Dubois D J, Casale G. Autonomic provisioning and application mapping on spot cloud resources[C]//Proc of International Conference on Cloud and Autonomic Computing. 2015: 57-68.

[10] Rodriguez E, Alkmim G, Batista D M, *et al*. Trade- off between bandwidth and energy consumption minimization in virtual network mapping [J]. IEEE Latin-America Conference on Communications, 2012, 11(3): 983-988.

[11] 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.

[12] Soualah O, Fajjari I, Aitsaadi N, *et al*. A batch approach for a survivable virtual network embedding based on Monte-Carlo Tree Search [C]//Proc of IEEE International Symposium on Integrated Network Management. 2015: 36-43.

[13] Li Lan, Chen Jianya, Huang Tao, *et al*. An efficient virtual network embedding algorithm based on subgraph[C]//Proc of International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. 2015: 23-28.

[14] Chun B G, Iannaccone Gianlnca, Iannaccone Giuseppe. An energy case for hybrid datacenters [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2010, 44(1): 76- 80.

[15] Yu Ruozhou, Xue Guoliang, Zhang Xiang. Towards min-cost virtual infrastructure embedding[C]//Proc of IEEE Global Communications Conference. 2014: 1-6.

[16] Cisco. Brochures for devices CRS- 1 and components, CISCO ONS 15454 and others[EB/OL]. 2016-01. http: //www. cisco. com/.

(上接第 3124 页)

[5] Hu Su, Bi Guoan, Guan Yongliang, *et al*. TDCS-based cognitive radio networks with multiuser interference avoidance [J]. IEEE Trans on Communications, 2013, 61(12): 4828-4835.

[6] Hu Su, Bi Guoan, Guan Yongliang, *et al*. Spectrum efficiency transform domain communication systems with quadrature cyclic code shift keying [J]. IET Communications, 2013, 7(4): 382-390.

[7] Wang Shu, Da Xinyu, Chu Zhenyong, *et al*. Magnitude weighting selection: a method for peak-to-average power ratio reduction in transform domain communication system [J]. IET Communications, 2015, 9(15): 1894-1901.

[8] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 基于神经网络的变换域通信系统接收技术[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(2): 96-100.

[9] Wu Gang, Hu Su, Li Shaoqian. Low complexity time-frequency synchronization for transform domain communications systems [C] // Proc of the IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing. 2015: 1002-1006.

[10] Wang Chuandan, Zhang Zhongpei, Li Shaoqian. Interference mitigating based on fractional Fourier transform domain communication system [J]. Journal of Electronics (China), 2007, 24(2): 181-186.

[11] Shi Jun, Chi Yonggang, Sha Xuejun, *et al*. Fractional Fourier domain communication system (FrFDCS): analytic, modeling and simulation results [C] // Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering, 2009: 423-426.

[12] Yang Zeyi, Tao Ran, Wang Yue, *et al*. A novel multi-carrier order division multi-access communication system based on TDCS with fractional Fourier transform scheme [J]. Wireless Personal Communications, 2014, 79(2): 1301-1320.

[13] 徐会法, 刘峰. 线性调频信号分数阶频谱特征分析[J]. 信号处理, 2010, 26(12): 1896-1901.

[14] 陶然, 邓冰, 王越. 分数阶傅里叶变换及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

[15] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 变换域通信系统基函数的最佳门限设计[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(10): 2204-2207.

[16] Fumat G, Chargé P , Zoubir A, *et al*. Transform domain communication systems from a multidimensional perspective, impacts on bit error rate and spectrum efficiency [J]. IET Communications, 2011, 5(4): 476-483.

[17] Proakis J G, Salehi M. Digital communications[J]. International, 2017,51(5):3-5.

[18] Sharma M, Gupta R. Basis function and PN phase generation in TDCS and WDCS towards dynamic spectrum access [C] // Proc of the 5th International Conference on Communication Systems and Network Technologies . [S. l.]: IEEE, 2015: 364-368.