

网络虚拟化环境下资源监控策略

贾伟, 夏靖波

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 在网络虚拟化环境下,对底层物理网络资源状态的实时监控有助于更好地为虚拟网络服务提供支持。构建了虚拟网络资源管理架构,采用了基于监控代理的策略来实现网络资源的实时监控,并综合考虑监控信息上报所需的带宽、时延以及节点负载能力,构建了监控代理部署问题的二进制组合优化模型,通过改进的粒子群算法来求解该问题的近似最优解。仿真结果表明:该策略生成的监控方案具有较好的性能表现。

关键词: 网络虚拟化; 资源监控; 二进制组合优化; 改进的粒子群算法

中图分类号: V271.4; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)11-0061-06

Resource Monitoring Policy for Network Virtualization Environment

JIA Wei, XIA Jing-bo

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

Abstract: Monitoring network resource can provide effective support for better virtual network service under the environment of network virtualization. The management structure of virtual network resource is built up, then a method based on monitoring agent is used for realizing real-time monitoring of network resource. Considering synthetically the bandwidth, delay of reporting monitoring information and load of network node, a binary combinatorial optimal model for the deployment of monitoring agent is established, which is solved to find the approximate optimal solution by improved particle swarm algorithm. The simulation result indicates that the deployment of monitoring agent generated by proposed method has fine performance.

Key words: network virtualization; resource monitoring; binary combinatorial optimization; improved particle swarm algorithm

1 问题描述

网络虚拟化技术是未来网络体系结构的研究热点^[1],该技术改变了以往设施与服务紧密耦合的特点,将基础设施提供者(Infrastructure Provider, InP)和服务提供者(Service Provider, SP)分离。在网络虚拟化环境中,虚拟网络之间相互隔离,可以独立地运行新的网络协议,具有安全、灵活、异构融合等特点^[2]。

虚拟网络映射问题是网络虚拟化环境下需要解决的一个关键问题,它主要完成虚拟网络承载资源的优化分配,即将虚拟链路和节点映射到底层的物理链路和节点上,国内外很多学者对此展开深入研究^[3-8]。

然而虚拟网络的周期性生存的特点将导致底层物理网络资源状态的动态变化,同时物理网络资源也可能由于故障、遭受破坏等原因而动态变化。因此要更好地映射决策首先需要对底层物理网络资源的运行状态进行实时监控了解。

文献[9-10]采用了不同的计算方法研究了虚拟网络中管理和监控节点的部署问题,但是其监控节点数目是需要人为预先确定的,同时也没有考虑时延和带宽参数对监控性能的影响;文献[11]在网络虚拟化环境下,通过设置监控代理来配合区域中心节点监控整个网络的状态,并基于量子遗传算法进行了代理部署方案的求解,但只是从提高响应速度方面考虑,没有考虑网络状态信息上报的带宽消耗以及节点的负载能力。

如图1所示,如果按照文献[11]的开销定义,在以节点7作为监控代理的情况下,节点3的最短路径为(3,6,8,7)。其时延开销为25,跳数为3;但路径(3,7)

收稿日期:2015-01-29

修回日期:2015-03-09

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2012JZ8005)

作者简介:贾伟(1986—),男,陕西西安人,博士生,研究方向为网络虚拟化、宽带通信网络。

的时延开销为 30,跳数为 1;相比路径(3,7)的时延开销比最短路径多了 5,但是带宽开销是最短路径的 3 倍(假定每条链路的带宽开销相同)。可见,只考虑时延开销作为通信开销是不符合实际情况的,单纯地以提高响应速度而牺牲网络带宽的方法也是不可取的。

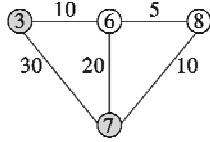


图 1 底层物理网络

Fig. 1 Underlying physical network

文献[12]提出了考虑带宽和延迟约束的资源监控模型,基于改进的贪婪算法进行部署方案的求解。但是贪婪算法容易导致监控区域分布不均衡,从而造成开销过大、响应时间较长的后果。

本文针对上述问题,提出了相应的解决方案。以减少监控产生的带宽开销为目标函数,将监控节点的负载均衡度作为约束条件,同时根据时延来确定监控代理区域的划分,最后采用基于融合分布估计的粒子群算法生成监控代理方案。

2 虚拟网络资源管理框架

在网络虚拟化环境下,底层物理网络是各种异构网系相互融合的复杂巨网络,它的覆盖范围广、结构复杂,要实现如此大规模的资源管理和维护是相当困难的。为了解决该问题以及实现对资源可管可控的需要,本文构建了一种层次化分层分域的资源管理框架,从而实现底层物理网络的集中式管理、分布式控制,如图 2 所示。

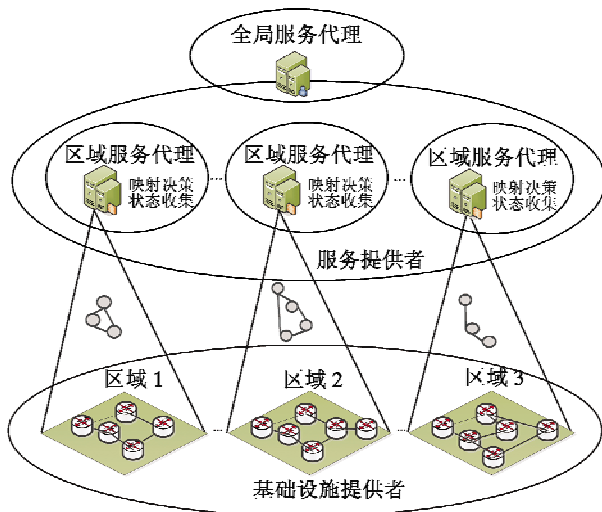


图 2 虚拟网络资源管理框架

Fig. 2 Virtual network resource management framework

在框架中包含了基础设施提供者和服务提供者两

种角色。

1) 基础设施提供者。负责底层网络资源的管理和维护,本文将底层物理网络划分为小的区域,便于实现网络资源的维护和管理。

2) 服务提供者。负责接收用户的服务请求,并向基础设施提供者申请网络资源,其中包含区域服务代理和全局服务代理两种角色。

① 区域服务代理。作为区域网络资源的代理完成本区域网络资源的管理和维护,并实时向全局服务代理上报本区域的网络资源状态,同时接收区域内用户的虚拟网络请求,完成虚拟请求向底层物理资源的映射决策。当某一区域服务代理出现故障不能正常工作时,相邻的区域服务代理可以接替其进行保障。

② 全局服务代理。是为了实现集中式管理的需要,负责管理各个区域服务代理。接收区域服务代理上报的区域网络资源状态,掌握全局范围内网络资源的实时运行状态,同时当出现跨域的虚拟网络请求时协调区域服务代理进行处理。

3 基于监控代理的网络资源监控模型构建

3.1 网络资源监控问题描述

底层物理网络为虚拟网络提供可承载的基础网络资源,对其运行状态的实时掌握一方面有助于映射决策的执行,另一方面便于对底层物理网络进行及时维护。

网络资源状态监控需要对底层物理网络节点的状态(CPU、内存使用情况)和底层物理网络链路的状态(带宽使用情况、链路时延等)进行收集,而链路的状态可以由连接该链路的端节点进行收集,因此只需要底层物理节点将节点及其周边链路状态信息上报即可。

在上述虚拟网络资源管理框架下,区域通信服务代理完成区域内物理网络资源运行状态的收集和维护,并完成虚拟网络的映射。这里的区域服务代理承载于底层物理网络的某一节点上,并配置专用的服务器来进行映射决策、网络状态的信息收集和分析(后面统称为区域中心节点),其他网络节点实时地将节点和链路状态信息上报区域中心节点。

但同时带来相应问题:为了收集区域内网络资源的状态信息,所有节点都会将其状态以及连接的链路状态信息上报给区域中心节点,这样虽然可以获得区域内网络资源的状态,但所有节点的信息上报给网络带来巨大的带宽开销,导致网络拥塞以及网络资源的浪费,同时也造成了响应时间较长以及区域中心节点负载过大的问题。

为了有效地解决该问题,本文在底层网络节点上部

信息,最终由各个监控代理向区域中心节点上报网络状态信息。其优点为:1) 通过监测代理以及监控区域的动态调整来实时适应网络环境的变化;2) 能够有效减少大量网络状态信息对于网络带宽的占用,避免网络拥塞,能够适应日益扩大的网络规模;3) 能够有效减小区域中心节点的负载;4) 可以适应网络资源的异构性。

通过在底层网络中部署监控代理可以有效减小因为所有节点上报信息带来的较大通信开销,同时提高监控系统的响应速度。但是监控代理的数量以及监控区域的划定直接影响着网络资源监控的性能,本文将针对如何生成满足约束条件的最优监控代理部署方案展开研究。

3.2 基于监控代理的网络资源监控系统模型

基于监控代理的网络资源监控系统模型如图 3 所示。区域中心节点承载于一个底层物理网络节点上,并能够动态地确定监控代理的个数以及选择哪些节点作为监测代理。监测代理实时收集监测区域内的网络状态信息,并将信息上报区域中心节点。

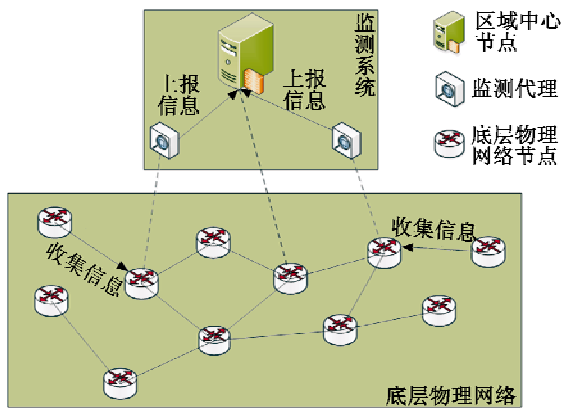


图 3 网络资源监控系统模型

Fig. 3 Network resource monitoring system model

3.3 监控代理部署问题的二进制组合优化模型

本文将底层物理网络用加权无向图 $G = (N, L)$ 表示,其中: N 代表物理网络节点集合; L 代表物理链路集合。底层物理网络被抽象成为一组节点和链路的集合,在此基础上做如下定义。

1) 定义一个 $n \times n$ 的最短路径矩阵 C ,矩阵中的取值为两两节点之间的最小延迟(通过 Dijkstra 算法求出),其中,第 s 行第 d 列的值为 $\min(s, d)$,表示节点 s 到 d 的延迟最小。

2) 定义二进制变量 x_i, y_j, j 代表底层节点的编号。

具体表示为 $x_i = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 是监控代理} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$,这样将会形成一个监控代理的集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$, p 表示监控代理的个数。

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } j \text{ 属于监控代理 } i \text{ 的监测区域} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}, y_{ij} \text{ 是}$$

根据定义 1) 的最短路径矩阵确定的,保证节点 j 到监控代理具有最小的延迟。

3) 区域中心节点位置的确定。区域中心节点位置的设置也会对监控系统的性能产生一定的影响。区域中心节点不但要维护处理监控代理上报的状态信息,还要根据底层网络的状态完成映射决策,因此必须要保证节点自身具有较强的处理能力以及较好的网络连接性。本文基于网络中心性理论来确定区域中心节点的位置选择,网络中心性指采用定量方法对每个节点处于网络中心地位的程度进行刻画,从而描述整个网络的核心,选择紧密中心度作为区域中心节点位置的选择指标,定义紧密中心度为

$$T(i) = CPU(i) \cdot \frac{\sum_{j=1}^N C(i, j)}{N - 1} \quad (1)$$

表示节点 i 到其他所有节点的平均最小延迟开销与节点 i 处理能力的乘积。通过选取紧密中心最大节点作为区域中心节点可以拥有较强的处理能力以及最少的通信开销。

4) 定义监控代理的负载均衡度。监控代理每监测一个节点就会带来一定的负载,监控的节点越多负载越大。因此就需要对每个监控代理的监控区域进行动态划分,使整个网络中监控代理保持一个较好的负载均衡。

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (L(i) - \bar{L})^2} \quad (2)$$

$$\bar{L} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p L(i) \quad (3)$$

5) 定义目标函数。本文要保证监控该系统的带宽开销最小,同时具有最小的负载均衡度。其中带宽开销主要涉及:① 被监测节点向监控代理上报信息的开销;② 监控代理向区域中心节点上报信息的开销。负载均衡度由定义 4) 确定。因此定义目标函数为

$$\min \left(\sum_{i=1}^N x_i B(a_i, m) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{ij} B(x_j, a_i) \right) \& \& \eta \quad (4)$$

式中: m 为区域中心节点; a_i 为监控代理; $B(x_j, a_i)$ 为被监测节点向监控代理上报状态信息的带宽开销; $B(a_i, m)$ 为监控代理向区域中心节点上报状态信息的带宽开销。

约束条件为

$$\sum_{i=1}^p y_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

表示被监测节点只能属于一个监测代理;

$$y_{ij} \leq x_i \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

表示一个区域只能有一个监测代理;

$$D(j, a_i) = \sum_{l \in p(j, a_i)} D(l) \leq \theta \quad (7)$$

表示被监测节点到监测代理的时延不超过最大时延容忍 θ ;

$$\eta < T_{Th} \quad (8)$$

表示负载均衡度要小于阈值 T_{Th} , 阈值设为 20%。

4 基于融合分布估计的粒子群算法的监控代理部署策略

上文构建了基于监控代理的网络资源监控模型, 并将部署方案的求解抽象为带有约束的二进制组合优化模型, 文献[13]的研究表明该问题的求解是一个 NP 难问题。因此本文考虑基于粒子群优化算法来进行模型近似最优解的求取, 并针对基本粒子群算法收敛速度较慢、局部搜索能力弱等缺陷进行改进优化, 从而获得最优的监控代理部署方案。

4.1 粒子群算法的基本描述

粒子群优化算法是基于群体智能理论的优化算法, 它通过群体中粒子间产生的合作和竞争进行优化搜索。与传统进化算法相比, 粒子群算法保留了基于种群的全局搜索策略, 采用速度-位移模型避免了复杂的遗传操作, 能够以较少的迭代次数获得最优解^[14]。但是基本的粒子群算法存在算法运行到后期时收敛速度较慢, 局部搜索能力弱, 求解精度不高, 而分布式估计算法通过选择所有个体历史最优位置, 建立反映优质解分布的概率模型, 这个概率模型表示解空间中最具有潜优解的区域分布信息, 对于新种群, 从概率模型和至今全局最优项随机获取信息。因此本文结合分布估计算法对粒子群优化算法^[12]进行改进, 用于解决监控代理部署问题。

基于分布估计改进的粒子群算法将统计当前代粒子个体的历史最佳位置中每一维出现 1 的个体数量, 然后根据概率模型计算一个概率向量 $\mathbf{P}(t) = (\mathbf{p}_1(t), \mathbf{p}_2(t), \dots, \mathbf{p}_d(t))$, 其中, $\mathbf{p}_j(t)$ 表示粒子位置的第 j 维上取 1 的概率, 然后根据概率向量 $\mathbf{P}(t)$ 引导粒子进行解的搜索, 实现迭代更新。概率向量 $\mathbf{P}(t)$ 按照式(9)进行初始化, 并按照式(10)进行更新。

$$\mathbf{p}_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{b_{id}}(t) \quad (9)$$

$$\mathbf{p}_j(t+1) = (1 - \lambda)\mathbf{p}_j(t) + \lambda \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{b_{id}}(t) \quad (10)$$

式中, λ 为学习概率, $\lambda \in [0, 1]$, 它可以进行局部搜索和全局搜索的平衡。

引入概率 β 作为搜索的控制参数, 以大概率 β 从概率向量抽样产生新解, 以小概率 $1 - \beta$ 直接复制当代

种群全局最优解。具体流程如下所示。

产生一个随机数 $r_1, r_1 \in (0, 1)$

当 $r_1 < \beta$

$r_1 < p_d, x_{id}(t+1) = 1$

否则, $x_{id}(t+1) = 0$

否则, $x_{id}(t+1) = g_{bd}(t)$

为了保持粒子群体的多样性, 引入进化算法中的变异操作, 以此对新产生的粒子以一定的概率进行变异。

4.2 相关参数和操作的重定义

粒子群算法最初主要用于连续域的优化问题, 而本文的网络资源监控部署问题属于离散优化问题, 因此需要根据具体问题对粒子的相关参数和操作进行重定义。

定义 1 粒子的位置: 粒子的位置向量 $\mathbf{X}_m = (\mathbf{x}_{m1}, \mathbf{x}_{m2}, \dots, \mathbf{x}_{md})$ 被定义为第 m 个部署方案, 维数 d 对应于底层物理网络节点的个数。该位置粒子任意方向 \mathbf{x}_{mj} 取值为 $\{0, 1\}$, $\mathbf{x}_{mj} = 1$ 表示该节点为监控代理; 否则, $\mathbf{x}_{mj} = 0$ 。如 $\mathbf{X}_m = (0, 1, 0, 1, 1, 0, 1)$ 表示第 m 个部署方案中底层物理网络节点数 7 个, 其中第 2, 4, 5, 7 部署监控代理。

定义 2 粒子的适应度: 粒子的适应度越高代表粒子离最优解越近。粒子的适应度与求解问题的目标函数相关, 定义适应度值为

$$fit(\mathbf{X}_m) = \left(\sum_{i=1}^N x_i B(a_i, m) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{ij} B(x_j, a_i) \right)^{-1} \quad (11)$$

定义 3 粒子概率向量 $\mathbf{P}(t)$: 粒子的概率向量每一维 $\mathbf{p}_j(t)$ 表示第 j 个节点部署监控代理的概率。

定义 4 粒子的变异: 指当概率趋近于 0 或 1 的时候, 产生个体的趋同。因此借鉴遗传算法的变异操作对新产生的粒子以一定的概率 α 进行变异, 这样可以保证粒子个体的多样性, 避免算法早熟, 即

$$\mathbf{X}_i(t+1) = \mathbf{X}_i(t) \otimes \mathbf{X} \quad (12)$$

\mathbf{X} 定义为和 $\mathbf{X}_i(t)$ 维数相等的随机生成的 0-1 向量, 每一维的取值为 0 或者 1, 1 代表与之进行 \otimes 操作的向量每一维有变化, 0 代表不变化, 如 $(0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1) \otimes (0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1) = (0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0)$ 。

4.3 部署方案的工作流程

初始化粒子种群规模 m , 对应于 m 个可行的部署方案, 然后按照改进的粒子群算法进行迭代求解, 在满足最大迭代次数后输出最优解, 即为对应的部署方案。工作流程的伪代码如下所示。

输入: 粒子种群规模 m , 最大迭代次数 N_t , 粒子的搜索控制参数 β , 变异概率 α , 学习概率 λ , 负载均衡门限 T_{Th} 。

输出: 最优部署方案 \mathbf{X}_{best} 。

1) 根据区域中心节点位置确定原则确定其位置。

2) 计算最短路径矩阵 \mathbf{C} 。

3) 初始化粒子种群,生成 m 个初代种群 $X(t)$,初始化粒子的位置。

4) 根据最短路径矩阵 C 确定每个监测代理区域。

5) 根据适应度函数计算所有粒子的个体历史最优解和全局最优解。

6) 根据式(9)初始化概率向量。

7) 按照 3.1 节中的流程生成新个体粒子。

8) 按照式(12)进行粒子的变异操作。

9) 根据适应度函数计算所有粒子的适应度,比较更新粒子个体的历史最优解和全局最优解。

10) 根据式(10)更新概率向量。

11) 判断是否满足最大迭代次数 N_t ,若满足,则停止输出最优解;若不满足,则转至步骤 8)。

5 仿真及结果分析

5.1 仿真参数设置

本文参考了文献[12,14]的参数设置。网络拓扑由 GT-ITM 随机生成,节点的 CPU 能力和链路的可用带宽服从[10,100]的均匀分布,链路时延(单位,ms)服从[0.1,2.0]的均匀分布,延迟容忍系数为 10 ms。假定被监测节点向监测代理上传的状态信息量为 2 kbit,所有普通节点产生负载服从[0.2,0.5]均匀分布。算法中最大迭代次数取 200,种群规模 $m = 10$,变异概率 $\alpha = 0.001$,粒子的搜索控制参数 $\beta = 0.9$,学习概率 $\lambda = 0.7$ 。

5.2 仿真结果分析

图 4 所示为网络监控代理比例随着节点数目的变化图。从图中可以看出,监控代理的比例随着网络节点的数目不断变化,当网络节点数增大时,监控代理的个数也相应增大,这是符合逻辑的,但是监控代理个数占总节点的比例是有一定上限的。监控代理的比例在 100,200,300,400,500 个节点时监控代理比例在 [0.04,0.10]之间,正好也验证了文献[15]的分析结果,对于大规模的分布式网络,监测代理数量不应超过网络节点总数的 10%。

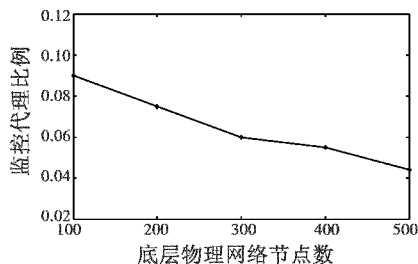


图 4 网络监控代理比例

Fig. 4 Proportion of network monitoring agent

图 5 所示为响应时间随着节点数目的变化图。从

图中可以看出,本文的方法明显要优于采用贪婪算法的响应时间,这是因为本文的算法通过对粒子群算法的优化,能够求得全局近似最优解。而且本文没有对链路用于状态信息上报的最大可利用带宽进行限制,所以节点状态信息必然是根据到监控代理的最小延迟路径进行上报,响应时间较短。同时区域中心节点位置的优化确定的响应时间也较短。

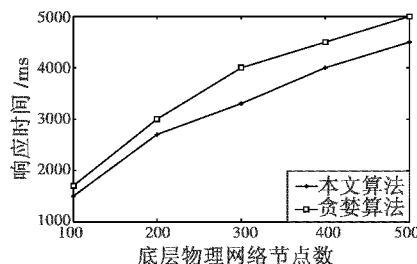


图 5 网络监控响应时间

Fig. 5 Response time of network monitoring

图 6 所示为带宽开销随着节点数目的变化图。从图中可以看出,随着节点数的增加,两种算法网络带宽开销都会不断增大,但本文算法的带宽开销要优于其他两种算法,这还得益于算法能够根据带宽开销最小的目标函数求得全局近似最优解。

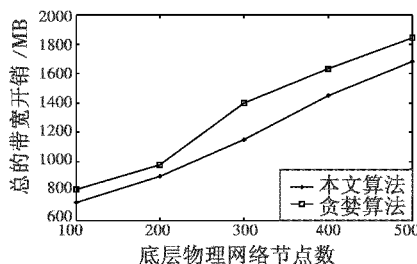


图 6 网络监控带宽消耗

Fig. 6 Bandwidth consumption of network monitoring

图 7 所示为监控代理的负载均衡度随节点数目的变化图。从图中可以看出,本文算法的负载均衡度要小于贪婪算法,这是因为本文的算法以负载均衡度作为目标函数,可以动态地调整监控区域,这样得到的部署方案自然具有最小的负载均衡度。而贪婪算法则是要保证一个监控代理尽可能覆盖更多的节点,从而导致较高的负载均衡度。

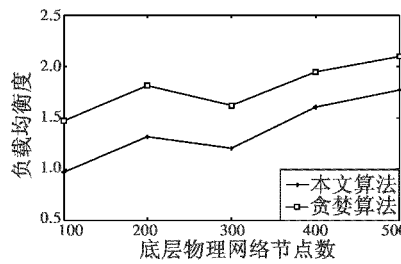


图 7 网络监控负载均衡度

Fig. 7 Load balance of network monitoring

6 结束语

虚拟网络由于天然的特点能够更好地适用于不断出现的新型服务,未来必将成为研究的热点。然而虚拟网络是承载于底层的物理网络之上,底层物理网络的性能直接影响着虚拟网络是否能够提供可靠的服务,因此必须对底层物理网络的状态进行实时了解和掌握。

本文针对如何有效地监控底层物理网络资源状态展开深入研究,首先构建了虚拟网络的资源管理架构,在此基础上采用部署监控代理的方法,构建了监控代理部署问题的二进制组合优化模型,最后基于改进的粒子群算法寻求最优的监控代理部署方案,相比其他方法获得更好的性能表现。但是本文的研究只是针对于如何实时高效地获取网络的状态信息,下一步考虑如何对监控的状态信息进行深入分析,并结合态势感知的概念,将网络的运行状态上升到网络运行态势的层面,进行综合分析、预测、评估,从而更好地为虚拟网络服务提供支持。

参 考 文 献

- [1] WANG A, IYER M, DUTTA R, et al. Network virtualization: technologies, perspectives, and frontiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4):523-547.
- [2] KERDSRI J, WIPUSITWARKUN K. Network virtualization for military application: review and initial development of conceptual design [C]//The 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Pyeong Chang, 2012:61-66.
- [3] FISCHER A, BOTERO J F. Virtual network embedding: a survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4):1888-1906.
- [4] CHOWDHURY M, RAHMAN M R, BOUTABA R. ViNE-Yard: virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(1):206-219.
- [5] 苑迎,王翠荣,王聪,等.基于DPSO负载可控的虚拟网络映射算法[J].*东北大学学报:自然科学版*,2014,35(1):10-14.(YUAN Y, WANG C R, WANG C, et al. Load controllable virtual network embedding algorithm based on discrete particle swarm optimization [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science Edition*, 2014, 35(1):10-14.)
- [6] 黄彬彬,荣恒,彭凯,等.基于粒子群优化的负载均衡的虚拟网络映射[J].*电子与信息学报*,2013,35(7):1753-1759.(HUANG B B, RONG H, PENG K, et al. Load-balancing based on particle swarm optimization in virtual network mapping [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(7):1753-1759.)
- [7] ZHANG S, WU J. Virtual network embedding with opportunistic resource sharing [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(3):816-827.
- [8] MELO M, SARGENTO S, KILLAT U, et al. Optimal virtual network embedding: node-link formulation [J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2013, 10(4):356-368.
- [9] CLEGG R G, CLAYMAN S. On the selection of management/monitoring nodes in highly dynamic networks [J]. *IEEE Transactions on Computer*, 2013, 62(6):1207-1220.
- [10] MAMATAS L, CLAYMAN S. Towards an information management overlay for emerging networks [C]//Proceedings of Network Operations and Management Symposium, 2010:527-534.
- [11] 江逸茗,兰巨龙,周慧琴.网络虚拟化环境下的资源监控策略[J].*电子与信息学报*,2014,36(3):708-714.(JIANG Y M, LAN J L, ZHOU H Q. Resource monitoring policy for network virtualization environment [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3):708-714.)
- [12] 刘湘辉,景宁,殷建平,等.带宽延迟约束的层次化网络监测模型[J].*电子与信息学报*,2008,30(3):712-716.(LIU X H, JING N, YIN J P, et al. The hierarchical network monitoring model with bounded bandwidth and delay constraints [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(3):712-716.)
- [13] LIU X H, YIN J P, LU X C, et al. The distributed network monitoring model with bounded delay constraints [J]. *Wuhan University Journal of Natural Science Edition*, 2004, 9(4):429-434.
- [14] 周雅兰,王甲海,印鉴.一种基于分布估计的离散粒子群优化算法[J].*电子学报*,2008,36(6):1242-1248.(ZHOU Y L, WANG J H, YIN J. A discrete particle swarm optimization algorithm based on estimation of distribution [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(6):1242-1248.)
- [15] LIOTTA A, PAULOU G, KNIGHT G. Exploiting agent mobility for large-scale network monitoring [J]. *IEEE Network*, 2002, 16(3):7-15.