

虚拟网络资源负载均衡分配数学建模方法

王晓霞, 万莉娟

(齐齐哈尔大学 理学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

摘要: 针对因资源分配不均匀导致网络吞吐量较低的问题, 提出一种虚拟网络资源负载均衡分配数学建模方法. 首先, 设定资源负载分配的目标函数, 计算服务器链路剩余资源与剩余带宽的最佳比例关系, 根据计算结果进行虚拟网络资源映射; 其次, 利用计算能力率、通信率、路径能力和关联度等网络能力因子参数反映资源的负载均衡情况; 最后, 基于求得的虚拟网络节点能力指标, 设置资源属性调度周期, 引入公平因子, 更新链路的吞吐量, 得到虚拟网络资源负载均衡分配模型, 并基于该模型实现资源负载均衡分配. 实验结果表明, 该方法有效改善了资源分配的均衡度, 使网络吞吐量得到明显提升.

关键词: 虚拟网络资源; 负载均衡分配; 能力因子; 吞吐量

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2025)02-0580-05

Mathematical Modeling Method for Virtual Network Resource Load Balancing Allocation

WANG Xiaoxia, WAN Lijuan

(College of Science, Qiqihar University, Qiqihar 161005, Heilongjiang Province, China)

Abstract: Aiming at the problem of low network throughput caused by uneven resource allocation, we proposed a mathematical modeling method for virtual network resource load balancing allocation. Firstly, we set an objective function for resource load allocation, calculated the optimal ratio between remaining resources and remaining bandwidth of server links, and mapped virtual network resource based on the calculation results. Secondly, we used the network ability factor parameters such as computing power rate, communication rate, path capability, and correlation degree to reflect the load balancing situation of resources. Finally, based on the obtained virtual network node capability indicators, we set resource attribute scheduling cycles, introduced fairness factors, updated throughput of the link, obtained a virtual network resource load balancing allocation model, and achieved resource load balancing allocation based on this model. The experimental results show that the proposed method effectively improves the balance of resource allocation, resulting in a significant increase in network throughput.

Keywords: virtual network resource; load balancing allocation; ability factor; throughput

随着云计算和虚拟化技术的普及, 大量应用和服务迁移到虚拟化环境中, 导致虚拟网络中的负载分布变得更复杂. 虚拟网络资源负载均衡分配方法旨在寻找更高效、智能的算法和策略, 以实现负载

均衡和资源优化,提升用户体验和系统可靠性。

杨守义等^[1]建立了网络集群负载均衡计算模型,并根据模型求解每个资源的权重因子以及传输时延和能耗数值,通过调整参数对能耗进行加权,求得每个节点的平衡因子,通过因子进行调节规划。由于网络环境中资源所在链路分支各有不同,计算资源平衡权重时需对每个分支进行最小化开支定界,因此运算量较大,存在一定的计算误差。姜洪超^[2]以网络传输最大利用率为条件建立资源分配优化模型,网络资源负载变化通常与资源在链路中的离散关系存在一定关联,该方法没有预先计算服务负载,导致链路资源约束存在误差,当增加服务量时,不能第一时间得到与之对应的链路负载增加值,资源分配误差较大。Li等^[3]计算在最低传输时延标准下每个任务到达接收端时的能耗负载数值,利用用户关联和子信道分配实现资源分配,但由于资源之间存在特征冲突问题,一次迭代分配不能改善冗余问题,资源中的冗余节点会对资源分配产生干扰性,影响了负载均衡度。Tan等^[4]提出了一种多智能体在线学习算法,计算资源分配的约束条件,通过约束函数完成资源均衡分配,但由于网络资源具有动态特性,该方法未考虑随时间更改的特征值,因此经过资源负载分配后吞吐量未得到明显改善。针对上述问题,为实现虚拟网络资源的负载均衡分配,本文提出一种虚拟网络资源负载均衡分配数学建模方法,以提升资源分配均衡度。

1 虚拟网络资源映射

映射可根据虚拟网络资源的特性、负载情况以及性能要求,将用户请求均匀地分配到不同的虚拟机或服务器上,避免资源的过度或不均匀使用,提高系统的整体性能和吞吐量。因此,在资源分配前,需先对虚拟网络资源进行映射研究。

在虚拟网络资源映射过程中,需预先设定资源负载分配的目标函数,即网络虚拟链路上的剩余带宽不能低于资源请求所需的最小带宽值:

$$f_w^{\min}(u,v) \leq b_w(i,j), \quad \forall (u,v) \in L_v, \quad (i,j) \in L_s, \quad (1)$$

其中 (u,v) 表示虚拟链路, L_v 表示在虚拟网络中进行资源请求的节点集合, (i,j) 表示传输链路, L_s 表示在虚拟网络中进行资源交互^[5]的节点集合, $f_w^{\min}(u,v)$ 表示资源请求所需的最小带宽值, $b_w(i,j)$ 表示剩余带宽。基于上述给出的目标函数,计算服务器链路剩余资源与剩余带宽的最佳比例关系,用最小标准方差表示:

$$\min S^2 = \sqrt{\sum_{(i,j)}^N \left[b_w(i,j) - \frac{1}{N} \cdot \sum_{(i,j)}^M W(b_w(i,j)) \right]}, \quad (2)$$

其中 M 表示服务器总数, W 表示剩余带宽的运行权重, N 表示链路总数。

为满足目标函数,并保证服务器链路剩余资源与剩余带宽的最佳比例关系,虚拟节点和虚拟链路需要分别映射在服务器和物理链路上,同一个虚拟资源节点不能同时映射到同一服务器或物理链路上,针对该情况给出映射公式为

$$\begin{cases} \sum_{i \in N_s} x_i^{tr} \times \min S^2 \leq 1, \\ \sum_{i \in N_v} f_{ij}^{tr} \times \min S^2 > 1, \end{cases} \quad (3)$$

其中 x_i^{tr} 表示虚拟节点映射到服务器上的因子数(为0或1), f_{ij}^{tr} 表示虚拟链路 (u,v) 映射到 (i,j) 的资源带宽^[6]。

通过上述过程对虚拟网络中资源链路和节点之间的映射关系进行合理分析,可在资源请求时准确得出链路带宽的最佳比例值,后续资源负载分配可根据比例值设置分配带宽,提高分配精准度。

2 虚拟网络节点能力计算

由于虚拟网络中资源属性存在差异,因此为保证负载均衡分配效益的最大化,下面给出几种具有代表性的资源属性,并计算能力率、通信率、路径能力和关联度等网络能力因子^[7]。通过上述参数反

映资源的负载均衡情况,使后续虚拟网络资源负载均衡分配更具有针对性,以提高分配质量.

2.1 资源负载能力

资源负载能力^[8]即网络中节点剩余负载的计算能力,可反映目前节点在全部节点中的资源排名情况,公式为

$$\text{Ratio}^{\text{cpt}}(n^s) = \frac{\text{Power}^{\text{cpt}}(n^s)}{\max \text{Power}^{\text{cpt}}(x_i^{\text{tr}} + f_{ij}^{\text{tr}})}, \quad (4)$$

其中 n^s 表示物理节点, $\text{Power}^{\text{cpt}}$ 表示资源负载能力因子.

2.2 节点的负载通信率

当虚拟节点被映射到网络中底层节点上时,物理节点可与其他节点相连,此时节点之间的通信能力可通过节点之间的链路关联计算,其可反映周围链路的资源负载情况^[9],公式为

$$\text{Ratio}^{\text{com}}(n^s) = \frac{\text{Power}^{\text{com}}(n^s)}{\sum_{l^s \in n^s} \text{bandwidth}(l^s)}, \quad (5)$$

其中 $\text{Power}^{\text{com}}(n^s)$ 表示底层节点周围链路的资源负载, $\text{bandwidth}(l^s)$ 表示链路 l^s 的带宽.

2.3 路径能力

路径能力即虚拟网络中某条路径能有效传输资源的能力,公式为

$$\text{Power}^{\text{path}}(p^s) = \frac{h_s \times A_l(p^s)}{\sum_{\forall l^s \in p^s} \text{bandwidth}(l^s)} + \frac{1}{h_s}, \quad (6)$$

其中 $\text{Power}^{\text{path}}(p^s)$ 表示资源节点的路径能力, h_s 表示跳跃节点, p^s 表示跳跃链路. 由于路径由节点跳数组成的,因此当路径中每条链路中可用带宽之和与全部带宽总数相等时,即可反映链路的通信能力. 通信能力越低的链路,负载能力越差.

2.4 节点之间的关联度数值

若实现节点与链路之间的资源协调分配,则需计算关联度因子. 关联度因子是指虚拟网络的映射拓扑结构与节点之间结构的相似性关系,公式为

$$C = \text{dis}(l^s, p^s), \quad (7)$$

其中 $\text{dis}(l^s, p^s)$ 表示链路 l^s 与跳跃链路 p^s 之间的关联值.

3 数学建模

根据上述过程求得的资源负载能力、负载通信率、路径能力和节点关联度指标,对虚拟网络资源负载均衡分配进行数学建模. 设资源属性调度周期为

$$T = \frac{R_n(T)}{\zeta[\text{Ratio}^{\text{cpt}}(n^s) + \text{Ratio}^{\text{com}}(n^s) + \text{Power}^{\text{path}}(p^s) + C]}, \quad (8)$$

其中 T 表示资源属性调度周期, $R_n(T)$ 表示在调度周期内链路的吞吐量, ζ 表示资源分配的公平因子. 为更好地实现资源均衡分配,提高公平性,定义公平因子 ζ 为

$$\zeta = T \times \left[\frac{r_n(k_1)}{r_n(k_2)} \right]^\rho, \quad (9)$$

其中 ρ 表示调节因子, $r_n(k_1)$ 表示资源一次分配的边缘载波, $r_n(k_2)$ 表示资源二次分配的边缘载波. ζ 的引入不影响资源之间的传输,只影响资源分配,经过 ρ 调节后,位于网络边缘位置的资源优先分配,以避免负载不均衡的问题.

在边缘载波分配结束后,更新链路的吞吐量为

$$R_n''(T) = R_n(T-1)(1-1/T_c)^\xi, \quad (10)$$

其中 T_c 表示经过每次调度后资源传输窗口的长度. 根据上述资源边缘载波调度问题的推导和分析,可得虚拟网络资源负载均衡分配的数学模型为

$$R_n''(T) \sum_{k_1} p_m(k_1) + R_n''(T) \sum_{k_2} p_m(k_2) < p, \quad (11)$$

其中 p 为资源传输功率约束值, 表示所有资源的传输子载波需小于 p .

基于式(11)对虚拟网络资源进行分配, 既能考虑到资源的公平性, 又能实现网络边缘位置资源的优先分配, 有利于实现资源负载均衡分配.

4 性能测试

4.1 测试环境与评估指标设置

为验证本文虚拟网络资源负载均衡分配方法在实际应用中的效果, 选择 NSFNET 网络和 USNET 网络分别进行资源分配, 不同网络的结构和内部资源分布情况均不相同, 能更直观、清晰地对比分配效果. 其中, NSFNET 网络为一种高速网络, 能提供高速数据传输和互联网服务, USNET 网络为一种教育网络. 选择在 NSFNET 网络和 USNET 网络下进行资源分配验证具有数据可用性优势, 因为 NSFNET 网络和 USNET 网络相关的拓扑结构、流量数据和性能参数等信息较易获得, 可作为建模和验证的基础数据, 以更好地进行实验和模拟, 并评估和分析资源分配模型的性能和优势. 网络相关参数设置如下: 系统带宽为 10 MHz, 帧长为 5 ms, 采样点数为 1 024 个, 载频为 2.5 GHz, 窗口长度为 128, 调整步长为 0.2, 频域与时域的比值为 1 : 1.

4.1.1 负载均衡度

采用负载均衡度指标作为负载均衡分配模型的验证参数, 其能反映整个链路的资源负载累积情况, 负载均衡度数值越大表示分配效果越好, 其数学表达式为

$$\text{Load} = \frac{\sum_{i=1}^K (E_i - \bar{E})^2}{K \cdot \bar{E}^2}, \tag{12}$$

其中 E_i 表示第 i 个节点的负载, \bar{E} 表示所有节点的平均负载, K 表示节点总数.

4.1.2 吞吐量

吞吐量是指在网络中通过传输信道或链路传递资源的速率值, 其作为验证网络资源均衡情况的重要指标, 数值越大表示信道传输的资源量越大, 资源分配效果越明显.

4.2 分配效果分析

为验证资源负载均衡分配建模的效果, 将本文方法与文献[1]方法、文献[2]方法和文献[3]方法进行对比, 不同方法的负载均衡度对比结果如图 1 和图 2 所示.

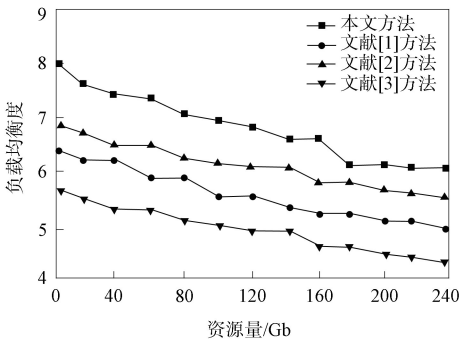


图 1 NSFNET 网络下不同方法的负载均衡度

Fig. 1 Load balancing degree of different methods in NSFNET network

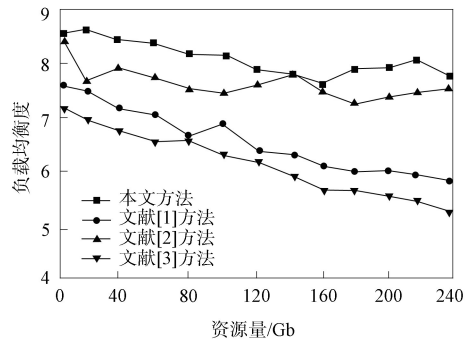


图 2 USNET 网络下不同方法的负载均衡度

Fig. 2 Load balancing degree of different methods in USNET network

由图 1 和图 2 可见, 针对 NSFNET 网络和 USNET 网络分别进行资源分配, 在不同资源量条件下, 本文方法的负载均衡度均高于文献[1]方法、文献[2]方法和文献[3]方法, 说明针对不同网络本文方法均能保证较高的资源分配效果, 其负载均衡度较高. 通过对比两种不同网络下不同方法的资源负载均衡度可见, 本文方法减轻了链路负担, 且不易受环境变化影响, 能实现资源负载均衡分配.

不同方法的吞吐量对比结果如图 3 所示. 由图 3 可见, 受资源链路中冗余数据等影响, 文献[1]方法、文献[2]方法和文献[3]方法的虚拟网络资源节点吞吐量均较低, 而经过本文方法分配后虚拟网络

数据吞吐量得到明显改善,每个链路可根据当前的传输环境以及目标函数,挑选最合理的资源传输链路,实现虚拟网络的高效运行。

综上所述,针对因资源分配不均匀导致网络吞吐量较低的问题,本文提出了一种虚拟网络资源负载均衡分配的数学建模方法。该方法将计算能力率、通信率、路径能力和关联度等网络能力因子作为反映资源负载均衡情况的参数,通过这些因子评估并调整资源分配,从而提高了网络吞吐量。基于虚拟网络节点能力指标设定资源属性调度周期,并引入公平因子更新链路的吞吐量,从而可根据网络中节点的实际能力,合理地调度资源分配并保持资源的公平性。实验结果表明,本文方法能有效改善资源分配的均衡度,并显著提升网络的吞吐量。

参 考 文 献

- [1] 杨守义,成昊泽,党亚萍. 基于集群协作的云雾混合计算资源分配和负载均衡策略 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45(7): 2423-2431. (YANG S Y, CHENG H Z, DANG Y P. Resource Allocation and Load Balancing Strategy in Cloud-Fog Hybrid Computing Based on Cluster-Collaboration [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(7): 2423-2431.)
- [2] 姜洪超. 基于虚拟化技术的 5G 核心网资源配置算法 [J]. 移动通信, 2021, 45(6): 103-107. (JIANG H C. Resource Allocation Algorithm of 5G Core Network Based on Virtualization Technology [J]. Mobile Communications, 2021, 45(6): 103-107.)
- [3] LI L Q, NIU Y, MAO S W, et al. Resource Allocation and Computation Offloading in a Millimeter-Wave Train-Ground Network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(10): 10615-10630.
- [4] TAN J, RAMIN K, KARL H, et al. Multi-agent Reinforcement Learning for Long-Term Network Resource Allocation through Auction: A V2X Application [J]. Computer Communications, 2022, 194(10): 333-347.
- [5] 刘焕淋,胡俊岭,任杰,等. 基于光路负载均衡和邻域匹配的串扰感知资源分配方法 [J]. 电子学报, 2022, 50(11): 2746-2753. (LIU H L, HU J L, REN J, et al. Crosstalk Aware Resource Allocation Method Based on Lightpath Load Balancing and Neighborhood Matching [J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(11): 2746-2753.)
- [6] 陈淑平,周慧霖,何王全,等. 用于超大 Infiniband 网络的负载均衡多播路由 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(5): 138-147. (CHEN S P, ZHOU H L, HE W Q, et al. Load-Balanced Multicast Routing for Large-Scale Infiniband Network [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(5): 138-147.)
- [7] 阳勇,孟相如,康巧燕,等. 拓扑与资源感知的虚拟网络功能迁移方法 [J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(11): 2161-2170. (YANG Y, MENG X R, KANG Q Y, et al. Virtual Network Function Migration Method Based on Topology and Resource Awareness [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15(11): 2161-2170.)
- [8] 许红亮,杨桂芹,蒋占军. 基于软件定义网络的数据中心自适应多路径负载均衡算法 [J]. 计算机应用, 2021, 41(4): 1160-1164. (XU H L, YANG G Q, JIANG Z J. Data Center Adaptive Multi-path Load Balancing Algorithm Based on Software Defined Network [J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(4): 1160-1164.)
- [9] 向征. 基于改进拉格朗日松弛算法的电力通信网络负载均衡优化策略研究 [J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 85-91. (XIANG Z. Research on Load Balancing Optimization Strategy of Power Communication Network Based on Improved Lagrange Relaxation Algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 85-91.)

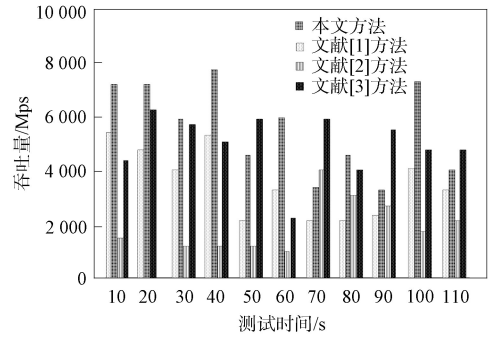


图 3 不同方法虚拟网络资源节点吞吐量的变化
Fig. 3 Changes in throughput of virtual network resource nodes by different methods