# 基于广义网络温度GNT的虚拟网络映射方法

# 摘要

本文提出一种基于广义网络温度(Generalized Network Temperature，GNT)的虚拟网络映射方法。该方法首先从底层网络中提取流量特征，计算底层节点的广义网络温度; 然后将节点GNT值与底层拓扑资源信息结合，综合评估底层节点的重要性，并按重要性降序排序，节点排名越高，节点映射能力越强; 之后采用贪婪策略映射虚拟节点，虚拟节点映射完毕后利用Dijkstra最短路径算法映射虚拟链路，最终完成整个虚拟网络的映射过程。仿真结果表明，本文提出的两阶段启发式虚拟网络映射算法可以提高虚拟网络映射的成功率和底层网络资源的利用率，同时缓解网络阻塞与资源碎片化问题。

# 引言

随着互联网的快速发展，传统互联网的僵化问题愈发严重，为了有效解决互联网的僵化问题，引进了虚拟化技术。而作为虚拟化技术的关键问题之一的虚拟网络映射问题(Virtual Network Embedding，VNE)，由于其存在多个维度的条件约束[1]，因此被证明是NP-hard问题。现有的解决虚拟网络映射的算法大致分为: 精确解算法类，启发式算法类以及元启发式算法类。由于启发式算法能够在多项式时间内方便快捷地得到虚拟网络映射方案，因此拥有巨大研究价值与应用前景。

而目前的启发式虚拟网络映射算法在进行节点重要性排序时，只考虑网络拓扑结构与全局网络资源，忽略了网络负载变化对于节点重要性排名的影响。针对这个问题，本文基于王昌达等提出的广义网络温度(Generalized Network Temperature，GNT)，提出了基于广义网络温度的虚拟网络映射算法。本文的贡献:

贡献1: 本算法采用了新型的节点排序方法，同时考虑网络的静态和动态属性。大部分基于节点重要性的两阶段启发式算法在进行节点排序时，仅考虑网络拓扑特征(比如，节点度属性、节点强度属性等)和网络资源(比如，节点CPU资源与链路带宽和的乘积)，在映射虚拟网络时会出现节点CPU资源满足约束但链路资源不满足约束的情况，导致虚拟网络映射失败。

贡献2: 同时考虑网络的静态和动态属性，节点的重要性会随着网络流量的变化而变化，会影响虚拟网络映射的成功率。

贡献3: 本文建立了一个仿真实验平台来验证所提出的算法的可行性，并选取几个同类型且具有代表性的经典算法作为对比算法，在相同的实验条件下进行仿真实验，在虚拟网络映射成功率与长期收益支出比等评价指标方面进行性能比较。

# 相关工作

随着互联网的蓬勃发展，网络设备数量、网络流量以及终端用户的数量呈指数倍增长，同时互联网的僵化问题[2][3]也日趋严重。而虚拟化技术[4]允许将多个虚拟网络部署在同一个底层网络上，彼此之间互不干扰，并且实现底层网络资源的共享，最大化网络资源的利用率。因此，虚拟化技术被认为是解决互联网僵化问题并且推动互联网进一步发展的有效方案。

在虚拟化技术中，虚拟网络由一系列虚拟节点以及连接虚拟节点的虚拟链路组成。而底层网络由许多底层物理节点与物理链路组成[5]。根据终端用户提出的虚拟网络请求，将虚拟网络映射到共享的底层物理网络上的过程被成为虚拟网络映射(VNE，Virtual Network Embedding)。

文献[6][7]是关于网络虚拟化与虚拟网络映射问题的研究综述，证明VNE问题是一个NP-hard问题。在文献[7]中，作者根据采用的优化策略将虚拟网络映射算法分为三类: 精确解算法类、启发式算法类和元启发式算法类。精确解算法和元启发式算法可以得到最佳或接近最佳的映射方案，但算法复杂度太大，无法应用到实际的网络环境中。与上述两类算法不同的是，启发式算法计算复杂度低，可以在多项式时间内找到可行的映射方案，因此拥有更大的研究价值与应用前景。

启发式算法一般将虚拟网络映射分成三个阶段，即节点排序、虚拟节点映射阶段和虚拟链路映射阶段。在进行节点映射之前，一般会根据网络拓扑属性和网络资源属性对底层物理节点和虚拟节点进行排序。本小节重点介绍具有代表性的启发式虚拟网络映射算法:

在文献[8]中，Yu等人基于节点乘积值提出启发式映射算法，成为沿用至今的最经典的启发式虚拟网络映射算法。其核心思路为: 首先对所有物理节点和虚拟节点进行排序，然后使用贪婪策略进行节点映射，最后采用Dijkstra方法[12]和多商品流(Multi-Community Flow，MCF)方法[12]来解决虚拟链路映射。Yu在进行节点排序时，排序值由两部分组成: 节点自身的CPU资源和节点所有直连链路的带宽和，排序值代表该节点在局部网络的映射能力，排序值越大，映射能力越强。该节点排序方法简单方便，但忽略了节点在整个网络中的影响力，导致映射能力强的底层物理节点被过早浪费。

在文献[9]中，Cheng等人提出了一种基于拓扑感知的启发式虚拟网络映射算法。与文献[8]不同的是，在进行节点排序时，Cheng等人利用马尔可夫随机游走模型(Markov Random Walk model)来迭代地求解节点最终稳定的排序值。但Cheng等人仍然忽略了节点在整个网络中的影响力。

在文献[10]中，Feng等人引入新的节点拓扑属性提出了三种不同的节点排序方法，但其本质仍然是根据节点CPU、直连链路带宽和以及物理路径的中间节点数来确定节点的排序值。

而在文献[12]中，Zhang等人将节点度属性和聚类系数作为节点排序的依据，其余步骤与之前的算法相类似。但节点度属性与聚类系数信息仍然属于局部拓扑属性，忽略了全局拓扑属性。

在文献[11]中，Gong等人提出了一种基于节点值的启发式虚拟网络映射算法。作者根据虚拟网络的映射收益来决定虚拟网络映射的顺序，然后使用类似文献[9]的方法进行节点排序，之后的虚拟节点映射与虚拟链路映射都与文献[8]相同。

综上所述, 现阶段大多数启发式虚拟网络映射算法采用的节点排序方法还是基于静态的网络拓扑与网络资源，忽略了网络负载变化对节点重要性的影响。在未来的网络环境下，虚拟网络请求是动态的和不可预测的。随着虚拟网络请求的到达与离开，底层物理网络的资源分布和负载分布也是动态变化的，而仅仅根据静态的网络拓扑与网络资源信息，无法为后续到达的虚拟网络请求找到合适的映射方案，导致底层资源的浪费。

# 相关知识

本节由两部分内容组成，第一部分介绍VNE虚拟网络映射问题模型的建立，虚拟网络映射过程以及相关评价指标; 第二部分详细介绍广义网络温度的相关内容，最后介绍计算广义网络温度用到的三种网络熵的定义与性质。

## 3.1 虚拟网络映射问题

本节介绍虚拟网络映射问题，包括: 网络模型的建立，虚拟网络映射流程以及相关评价指标。

### 3.1.1 底层网络

底层网络可以用一个带权无向全连通图，其中，下标”S”是”Substrate”的首字母，和分别代表底层网络物理节点集合与物理链路集合，和分别代表的是底层网络中的节点和链路数量。和分别表示底层网络节点和链路的相关属性，节点属性包括: 计算能力、内存大小、地理位置等，链路属性则包括: 带宽容量、传输延迟等。与大多数先前研究相同，文本将CPU计算能力和地理位置限制作为节点属性，将带宽容量作为链路属性。另外，表示底层网络中无环路径的集合。

### 3.1.2虚拟网络模型

与底层网络类似，虚拟网络也是由虚拟化后的虚拟节点通过虚拟链路连接组成，同样用带权无向全连通图表示: 。其中，和分别代表虚拟网络中的虚拟节点和虚拟链路，而和则分别代表虚拟节点和虚拟链路的数量。虚拟节点和虚拟链路分别附带有以表示的CPU需求、地理位置需求和以表示的带宽容量需求。除此之外，用表示虚拟网络请求的到达时间，用表示虚拟网络请求的持续时间。当接收到虚拟网络请求时，需要为其分配底层网络资源。如果当前底层网络能够满足该虚拟网络请求的各项需求和约束条件，就接受该请求，反之，拒绝该请求。最后，用表示虚拟节点可以接受的对应底层节点实际地理位置与期望地理位置的最大距离。

### 3.1.3虚拟网络映射过程

在满足虚拟网络的节点和链路各项需求与约束条件的前提下，将虚拟网络映射到底层网络的过程称为虚拟网络映射(Virtual Network Embedding，VNE)，该过程通常包含两个子过程: 节点映射子过程和链路映射子过程。

1. **虚拟节点映射子过程**: 将虚拟网络所有的虚拟节点映射到互不相同的底层物理节点上，并且节点的CPU计算需求与地理位置需求必须得到满足。对于所有的节点

s.t.:

其中，是虚拟节点映射函数。

公式3.2和3.3保证每个虚拟节点的CPU计算需求和地理位置需求都能得到满足，而公式3.4保证了来自同一个虚拟网络请求的不同虚拟节点不会映射到同一个底层物理节点上。需要特别注意的是，来自不同虚拟网络的多个虚拟节点可以共享同一个底层物理节点。

1. **虚拟链路映射子过程**: 将虚拟网络所有的虚拟链路映射到底层物理网络的不同物理路径上，并且虚拟链路的带宽容量需求都必须得到满足。对于所有的虚拟链路:

s.t.:

其中，是虚拟链路映射函数。

公式3.6保证每条虚拟链路的带宽容量需求都能得到满足。

只有当虚拟节点映射子过程和虚拟链路映射子过程都成功完成，虚拟网路的映射才算成功，否则虚拟网络映射失败。当虚拟网络被成功映射之后，在其持续时间内都将占有所分配的网络资源，待生命周期结束之后，才会将其占有的网络资源释放掉，用以重新分配给后续的虚拟网络请求。

### 3.1.4评价指标

在进行虚拟网络映射时，需要利用评价指标对算法性能进行量化与评估，便于与其他算法进行比较。本节介绍VNE算法研究中常用的评价指标:

1. **虚拟网络映射接受率**: 又称虚拟网络映射成功率，是VNE算法研究中最重要的评价指标。虚拟网络映射接受率由映射成功的虚拟网络数量占全部虚拟网络请求的比值所决定，直接反应算法的映射性能，即接受率越高，算法的映射能力越强。虚拟网络映射接受率的计算公式如下所示:

其中，分子表示从零时刻开始经过T时间成功映射的虚拟网请求的数量，而分母表示这段时间内的经过算法处理的虚拟网络请求的总数量。

1. **虚拟网络映射收益**: 虚拟网络服务提供商通过将虚拟资源以虚拟网络的形式租给终端用户，向终端用户收取费用，这部分费用即虚拟网络的映射收益。对于虚拟网络服务提供商来说，需要尽可能最大化虚拟网络的映射收益。虚拟网映射收益的计算公式如下:
2. **虚拟网络映射成本**: 又称虚拟网络映射支出。除了最大化虚拟网络映射收益之外，虚拟网络服务提供商还需要付出虚拟网络映射成本，并尽可能最小化该成本。虚拟网络映射成本的计算公式如下:

符号表示底层链路是否被虚拟网络占用，若占用，取值为1，否则取值为0。

1. **虚拟网络收益支出比**:在VNE算法研究中，单独使用虚拟网络收益和支出不能全面地反映算法的性能，为了避免该缺陷，通常使用虚拟网络收益支出比来讨论算法的性能，计算公式如下:

更一般的，使用长期收益支出比来评价算法的性能，计算方式如下:

## 3.2 广义网络温度

### 3.2.1 广义网络温度

广义网络温度(Generalized Network Temperature，GNT)是王昌达[14]等人提出的一种兼顾网络拓扑与网络流量的度量指标，具有时空融合特性。该指标在网络攻击检测，网络安全态势评估等多个领域具有广泛的应用场景。文献[15]使用GNT作为检测指标对DDoS攻击进行检测，取得了较好的检测结果。在文献(陈)中，作者提出了基于GNT与网络拓扑结构的节点重要性排序方法。

在热力学中，温度T定义为一个绝热系统中热量的引进或流失额度与由此导致的热力学熵的变化量的微商。在文献[14]温度，作者用网络的Shannon熵取代热力学熵，用网络中＂在传输数据包数量的变化＂取代热力学中＂热量的引进或流失额度＂，最终得到新的度量指标，即广义网络温度GNT，具体定义如下:

其中，表示网络中传输数据包数量的变化，而表示由数据包数量变化导致的Shannon熵的变化。

与热力学温度类似，GNT数值一般不会出现较大波动，用于衡量节点附近数据传输的繁忙程度，GNT值越高，越繁忙。

### 3.2.2 网络熵

本小节介绍GNT中使用的网络熵，包括: 香农Shannon熵、Rényi 熵和Tsallis熵。

#### 3.2.2.1 香农Shannon熵:

信息论之父香农将统计物理中熵的概念引申到信道通信的过程中，并将其定义为信息熵(也称香农熵)，从而实现对信息的度量，奠定了信息论和数字通信的基础。对于一个随机变量，其香农熵定义为:

其中，为变量的可能取值，其对应的概率为。底数对应香农熵的量纲，时量纲为bit(比特)，(自然对数底)时量纲为nat(纳特)，本论文中，如无特殊说明，后面的讨论中将省略底数，统一取(即量纲为纳特)，并用表示。

香农熵的性质: 1) 连续性: 变量的香农熵会随着概率发生连续性变化; 2) 单调性: 变量的香农熵随着变量取值的增多而单调增加; 3) 可加性: 不同来源的信息可以叠加，具体如下式:

在文献[14]中，作者使用Shannon熵作为GNT的网络熵，但在某些特定场景下，Shannon熵的效果略差于其他类型的熵，因此为了更好地提高算法的普适性，本文将引入更多类型的网络熵。

#### 3.2.2.2 Rényi 熵

Rényi 熵是香农熵的广义形式，由香农熵稍微放宽可加性条件得到，具体定义如下:

比香农熵，Rényi 熵引入可调节参数，对信息量的度量更具一般性与灵活性。特别地，当时，Rényi 熵退化为香农熵，即。

#### 3.2.2.3 Tsallis熵

而Tsallis熵则是由巴西物理学家Constantino Tsallis于1998年提出，其具体定义如下:

Tsallis 具有伪可加性，具体体现为:

其中，同Rényi 熵一致，是可调节参数。当时，值越小，的值越接近于0，此时高概率事件的分布相比于低概率事件更明显，因此Tsallis熵在时主要体现高概率事件的分布状态; 相反，在时，主要体现低概率事件的分布状态。

综上所诉，香农熵更具广泛和普遍意义，而Rényi 熵和Tsallis熵则通过引入可调节参数对香农熵进行进一步的推广，有所侧重地对信息进行度量。

# 基于GNT的虚拟网络映射方法

启发式虚拟网络映射算法主要分为三个步骤，包括: 网络节点排序、虚拟节点映射、虚拟链路映射。在进行虚拟网络映射时，本文兼顾网络流量变化和网络拓扑资源信息，提出了VNE-GNT算法。其基本思想是: 在底层网络中，网络节点附近的网络流量负载变化越大，其附近的GNT广义网络温度也就越大。因此，通过广义网络温度GNT衡量网络流量变化对于网络熵的影响，同时结合网络拓扑与网络资源信息，综合衡量节点的重要性。节点排序完成之后，利用贪心策略进行虚拟节点的映射，然后利用Dijkstra最短路径算法进行虚拟链路的映射，最终将整个虚拟网络映射到底层网络中。

## 4.1 网络节点排序

在进行虚拟网络映射时，不同重要性的节点对于映射结果的影响是不同的，节点越重要，对映射结果的影响越大。

一般的，网络节点的重要性不仅与网络的拓扑结构和自身网络资源有关，也与当前的网络负载状况有关，节点重要性会随着网络负载变化而变化。然而，目前已知的启发式虚拟网络映射算法在进行节点排序时，大多是基于网络拓扑与网络资源的静态分析的方法。在网络状态不断变化的情况下，这些方法普遍不能全面准确地衡量网络节点的重要性，导致虚拟网络映射成功率和网络资源利用率的降低。

因此，本文在进行节点重要性排序时，将网络拓扑结构和网络资源与网络负载变化相结合，综合衡量节点的重要性。

首先引入网络流量矩阵，用以表示一个网络的负载情况。通过网络流量矩阵可以得到底层网络流量的全局视图，能够从更宏观的角度观察网络状态[16]，用于之后计算网络节点的广义网络温度GNT。

**定义1** **网络流量矩阵:** 由当前网络中所有的OD(Origin-Destination)流量组成的矩阵，其中OD流定义为从节点(源节点)进入，最后流出节点(目标节点)的所有流量的集合。

用表示一个拥有个网络节点的网络的流量矩阵，包含个元素。如下表所示的网络流量矩阵(单位为kbps)的例子，行代表源节点，列代表目的节点，矩阵第行元素的和代表从源节点流出的总流量，而矩阵第列元素的和则代表着流入目的节点的总流量。

表 4.1网络流量矩阵

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 节点s编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 94.21 | 857.36 | 60239 | 35975 | 29014 |
| 2 | 9715.8 | 2005.4 | 3767.8 | 14178 | 5365.1 |
| 3 | 19364 | 8964.1 | 22608 | 53185 | 401.72 |
| 4 | 4715.2 | 54568 | 34389 | 0.3556 | 4322.8 |
| 5 | 3748 | 19934 | 1207.1 | 11793 | 0 |

根据网络熵和网络流量矩阵的定义，可以将一个源节点附近聚集的所有OD流看成是基本状态，满足上文提到的网络熵概率的条件，将状态的概率定义为:

其中，代表从源节点流出的网络流量总和。

根据三种网络熵的定义，节点附近的网络熵计算公式如下:

进一步得到节点的广义网络温度GNT:

形式上，广义网路温度是网络流量相对于网络熵的导数，其物理意义是网络熵随网络流量变化的变化率。节点附近网络流量变化越快，网络熵也变化越快，节点的GNT也就越大。通过广义网络温度GNT就可以快速找到负载变化明显的节点，从而避免虚拟网络映射到该类节点上，防止造成网络负载阻塞。

网络流量矩阵中的元素只体现源节点和目的节点之间的OD流信息，不包括OD流的路径信息，因此还需要结合网络拓扑信息与节点自身网络资源信息才能综合评价节点的重要性，提高节点排序的准确性。

**定义2网络节点的度属性**: 定义为与该节点直接相连的节点数量，体现了该节点与其他节点的连接关系，具体定义如下:

其中，代表网络中节点的数量。与节点直接相连的节点数量越多，节点的度也就越大，表明该节点在整个网络中的连接程度越高，对于虚拟网络映射结果的影响也就越大。

**定义3 网络节点的资源强度:** 定义为网络节点自身CPU资源与该节点的链路强度的乘积，表明节点的映射能力。资源强度值越大，节点的映射能力越强。具体定义如下:

在虚拟网络映射到底层网络上时，虚拟网络会占用底层网络资源，直至生命周期结束才会释放被占用的资源。并且由于终端用户需要使用虚拟网络提供的服务，会增加虚拟网络映射区域网络流量，导致该区域广义网络温度的增加，影响整个底层网络的广义热平衡状态。因此，对于一个虚拟网络请求，在选择映射位置的同时还需要兼顾底层网络状态的变化。

节点最终的排序值由三部分组成，具体定义如下:

其中，广义网络温度GNT衡量节点附近数据传输的繁忙程度，GNT值越高，越繁忙。因此，更倾向于选择广义网络温度相对较低的节点进行映射，优化虚拟网络的部署位置，避免网络负载拥塞问题，同时，位于表达式分子位置的节点度属性与节点资源属性可以提高资源丰富的网络节点的排名，提高节点映射成功率，从而提升虚拟网络的部署效率。

节点排序的伪代码如下所示:

|  |
| --- |
| **算法1:** 节点重要性排序算法 |
| **输入:** 时刻流量矩阵，时刻流量矩阵，网络拓扑，网络资源信息  **输出:** 节点排序结果 |
| 1. // 计算节点GNT值 2. for 每一个网络节点 do 3. for 每一个网络节点 do  6. 计算节点 的广义网络温度: 7. End For 8. // 计算节点度属性 9. For 每一个网络节点 do: 10. 初始化: 11. For 每一个网络节点 do: 12. if节点和节点之间存在一条直连链路: 14. End For 15. // 计算节点CPU与节点链路强度乘积 16. For 每一个网络节点 do: 17. 初始化: 18. For 每一个网络节点 do: 19. if 节点和节点之间存在一条直连链路:  22. End For 23. // 计算最终的节点排序值 24. For 每一个网络节点 do: 25. 计算节点排序值: 26. End For |

## 4.2 虚拟节点映射

在节点排序完成之后，采用贪婪策略进行虚拟节点的映射。具体流程如下: 对于某个虚拟节点来说，从底层网络的所有节点中挑选节点排序值最高的网络节点。如果底层节点可以满足虚拟节点的CPU资源约束，那么该虚拟节点就成功映射到这个底层节点上。但如果底层节点不能满足约束条件，就需要从所有底层节点中挑选节点排序值第二高的底层节点，继续上述过程，直到找到合适的底层节点。如果所有底层节点都不能满足该虚拟节点的资源需求，那么该虚拟节点映射失败。

在虚拟节点映射成功后，会采用上述策略继续映射剩下的虚拟节点，同时还要保证满足＂同一个虚拟网络的不同虚拟节点不会映射到同一个底层节点＂的约束条件。

当且仅当一个虚拟网络请求的所有虚拟节点都成功映射时，节点映射才算成功，否则，如果有任意一个虚拟节点没有被成功映射，那么该虚拟网络就会被拒绝。

## 4.3 虚拟链路映射

在所有虚拟节点都被成功映射之后，开始进行虚拟链路的映射。假设虚拟节点和之间存在一条虚拟链路，而这两个虚拟节点分别映射到底层节点和上。与传统最短路径方法不同的是，在进行链路映射之前，首先将底层节点和之间所有不满足虚拟链路带宽需求的链路删除，然后再采用Dijkstra最短路径算法计算出底层节点和之间的最短路径，同时组成该最短路径的所有底层链路都满足虚拟链路的带宽需求，这样，虚拟链路映射成功。对剩余虚拟链路继续采用上述策略，直至所有虚拟链路都成功映射。如果有任意一条虚拟链路映射失败，则整个虚拟链路映射失败。

当且仅当所有虚拟节点和虚拟链路都被成功映射，才会接受该虚拟网络请求，否则，拒绝该虚拟网络请求。

|  |
| --- |
| **算法2:** VNE-GNT虚拟网络映射算法 |
| **输入:** 底层物理网络，虚拟网络  **输出:** 虚拟网络的映射结果，并更新映射后的底层物理网络 |
| 1. // 虚拟节点映射过程 2. 利用上一节的网络节点排序方法，对底层物理节点降序排序 3. For 每一个虚拟节点 do: 4. For 每一个底层物理节点 do: 5. if 底层节点的资源满足要求 and 地理位置满足要求 and 没有同一个虚拟网的其他节点映射到该底层节点上: 6. 则将该虚拟节点映射到该底层节点上 7. break 8. else: 9. 继续判断下一个底层节点 10. End For 11. // 虚拟链路映射过程 12. For 每一条虚拟链路 do: 13. 对于当前虚拟链路的带宽需求，将底层网络中不满足该需求的链路删除 14. 利用Dijkstra最短路径算法寻找一条底层链路 15. End For 16. // 输出虚拟网络的映射结果，并更新底层物理网络的状态，等待后续虚拟网络请求到达 |

### 4.4 网络状态更新

随着新的虚拟网络请求的到达与旧的虚拟网络请求的离开，底层网络的资源与流量状态会不断发生变化，需要及时对网络状态进行更新。常用的网络状态更新方式有以下两种:

1. 主动更新: 每隔固定的时间间隔，主动更新网络状态。
2. 被动更新: 只有在收到新的虚拟网络请求时，才被动地更新网络流量状态。

## 4.5 算法复杂度分析

此外，本文还讨论VNE-GNT算法的复杂度。算法复杂度主要由三部分组成: 网络节点排序，虚拟节点映射部分和虚拟链路映射部分。其中，在网络节点排序阶段，复杂度为; 虚拟节点映射部分的复杂度为，而虚拟链路映射部分的复杂度为。因此，该算法可以在多项式时间内完成虚拟网络请求的映射。

# 实验评估

本节首先设计了基于三种网络熵的虚拟网络映射实验，然后将本文提出的算法与经典的虚拟网络映射算法进行对比，以验证本文算法的可行性与优越性。

## 5.1 实验环境和参数设置

为了评估算法的性能，本文进行了仿真实验。算法的仿真工作所采用的底层物理网络的参数设置如表5.1所示，这些参数设置是VNE算法研究领域具有代表性的参数设置:

表格 5.1 底层物理网络的参数设置

|  |  |
| --- | --- |
| 底层网络生成方法 | Waxman方法[17]， |
| 底层节点个数 | 50 |
| 节点容量 | [50，100]，整数，均匀分布 |
| 链路带宽 | [50，100]，整数，均匀分布 |
| 底层节点的位置 | [0，100]区间，随机分布 |

虚拟网络的参数设置如表5.2所示:

表格 5.2 虚拟网络的参数设置

|  |  |
| --- | --- |
| 虚拟网络生成方法 | Waxman方法， |
| 虚拟网络到达率 | 10个/1000单位时间 |
| 每个虚拟网的生命周期 | 1000单位时间 |
| 虚拟节点个数 | [2，10]，整数，随机分布 |
| 节点CPU需求 | [1，20]，整数，均匀分布 |
| 链路带宽需求 | [1，20]，整数，均匀分布 |
| 虚拟节点位置 | [0，100]区间，随机分布 |
| 虚拟节点最大允许偏差 | [3，8]，整数，均匀分布 |

本章节的算法仿真的工作时长为100000个时间单位。在本文中，一个时间单位代表一分钟。也就是说，本章节的算法仿真工作将持续100000分钟。

此外，在使用Rényi熵和Tsallis熵进行节点重要性排序时，可变参数的取值对广义网络温度的计算有影响，为了得到最佳的性能，本文与文献保持一致，即使用Rényi熵时，而使用Tsallis熵时。

本章节的算法实验仿真工作是在个人工作站上进行的，操作系统是Windows 11，用的是AMD Ryzen 5 4600H with Radeon Graphics，配备16.0GB的RAM。

## 5.2 对比算法介绍

本文提出的两阶段启发式虚拟网络映射方法使用(香农熵，瑞利熵，T熵)三种网络熵来计算网络节点的广义网络温度指标。除了本文提出的算法，还选取几个同类型且具有代表性的经典算法作为对比算法，包括: G-SP、VNE-DCC、MO-NPSO、RW-BFS，在相同的实验条件下进行仿真实验，进行性能比较。

表格 5.3 对比算法介绍

|  |  |
| --- | --- |
| 算法名称 | 算法描述 |
| G-SP | 基于节点cpu与带宽和的乘积进行节点排序，贪心映射虚拟节点，Dijkstra最短路径算法进行虚拟链路映射 |
| VNE-DCC | 基于节点度与聚类系数进行节点排序，利用BFS算法进行虚拟节点映射，最后采用K-Shortest算法映射虚拟链路 |
| M0-NPSO | 利用多目标改进粒子群优化算法进行虚拟网的映射 |
| RW-BFS | 利用随机游走对节点排序，利用BFS算法同时完成虚拟节点与虚拟链路的映射 |

## 5.3 基于三种网络熵的虚拟网络映射实验

实验未完成，后续添加内容

## 5.4 经典算法对比试验

实验未完成，后续添加内容

# 结论与展望

大多数启发式虚拟网络映射算法在进行节点排序时，只考虑网络拓扑和网络资源等静态信息，而忽略了网络流量的变化对网络节点重要性的影响。针对此问题，设计实现了一种基于广义网络温度的启发式虚拟网络映射方法。与现有的虚拟网络映射算法相比，本文兼顾网络流量变化和网络拓扑与资源信息，综合评估网络节点的排序值，是典型的静态与动态相结合的节点排序方法。

实验结果表明，本文提出的基于广义网络温度的虚拟网络映射方法与经典的VNE算法相比，可以得到更加准确的节点排序结果，从而提高虚拟网络的映射成功率与底层网络资源的利用率。

但是，本文也存在一些不足之处。比如在计算网络节点的广义网络温度时，使用了三种网络熵: Shannon熵，Rényi熵和Tsallis 熵。因此下一阶段的主要工作就是进一步研究这些网络熵的性质，引入更多参数与定义，建立广义网络温度动力学模型。同时，还可以引入更多形式的网络熵重新定义广义网络温度，进一步提升算法的性能。

另外，在网络节点排序时，只考虑了节点度作为节点拓扑特征，而网络的拓扑特征对于网络节点的重要性是必不可少的。因此可以考虑引入更多拓扑特征，通过研究单一特征对算法映射性能的影响，从而选择出对算法性能影响最大的因素，提升算法性能。

最后，同大多数VNE算法一样，虚拟网络在映射到底层网络之后，资源分配方案在虚拟网络生命周期内都不会发生改变。但底层网络是动态的，随着虚拟网请求的不断地到来和离去，底层网络资源被不断占用与释放，导致底层网络的资源碎片化愈发严重，降低后续到来的虚拟网请求的接受率。因此，对虚拟网络的映射方案进行动态调整是十分必要的，比如可以周期地将部署在负载高且资源少的区域的虚拟网络迁移到负载低且资源多的区域，提高整个网络的资源利用率，缓解资源碎片化与网络阻塞问题。

参考文献:

1. Yin,L.,Chen,Z.,Qiu,L.,et al. Interference based virtual network embedding[A].// 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]，Kuala Lumpur: IEEE Press，2016: 1-6.
2. Chowdhury N，Boutaba R. Network Virtualization: State of the Art and Research Challenges [J]. IEEE Communications Magazine，2009，47(7): 20-26.
3. Chowdhury N，Boutaba R. A Survey of Network Virtualization [J]. Computer Networks (Elsevier)，2010，54(5): 862-876.
4. Cisco. Network Virtualization: The New Building Blocks of Network Design [EB/OL] [2016-06-08]. Available: <http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns340/ns517/>.
5. Nonde,L.,Elograshi,T.,Elmirghani,J.Cloud Virtual Network Embedding:Profit，Power and Acceptance [A]. // 2015 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM) [C]，San Diego: IEEE Press，2015: 1-6.
6. Fischer A，Betro J，et al. Virtual Network Embedding: A Surevy [J]. IEEE Cummunications Surveys and Tutorials，2013，15(4):1888-1906.
7. Cao H，Hu H，Qu Z，Yang L. Heuristic Solution of Virtual Network Embedding: A Survey [J]. China Communications，2018，15(3):186-219.
8. Yu. M，Yi Y，Rexford J，et al. Rethinking virtual Network Embeding: Substrate Support for Path Splitting and Migration [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review，2008，38(2):17-29.
9. Cheng X，Su S，Zhang Z，et al. Virtual Network Embedding Through Topology-Aware Node Ranking [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review，2011，41(2):38-47.
10. Feng M，Liao J，Wang J，Qing S，Q. Qi. Topology-Aware Virtual Network Embedding Based on Multiple Characteristics [C]. IEEE Conference on Communications (ICC)，2014: 2956-2962.
11. Gong L，Wen Y，Zhu Z，Lee T. Revenue-Driven Virtual Network Embedding Based on Global Resource Information [C]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)，2013: 2294-2299.
12. Zhang P，Yao H，Liu Y. Virtual Network Embedding Based on the Degree and Clustering Coefficient Information [J]. IEEE Access，2016，4(1): 6572-8580
13. Cormen T，Stein C，Rivest R，Leiserson C，Introduction to Algorithms [M]. McGraw-Hill Higher Education，2001.
14. Chang da Wang，Xiao wei Li，and Elisa Bertino. 2022. Network Temperature: A Novel Statistical Index for Networks Measurement and Management. ACM Trans. Internet Technol.22,3,Article 66 (August 2022)，20 pages. DOI:https://doi.org/10.1145/3511093
15. 韦尧. 基于熵变率的DDoS攻击检测方法研究. Diss. 江苏大学.
16. 丁美美. 基于主成分分析的网络流量异常检测研究[D].北京：北京交通大学，2017.
17. Waxman B M. Routing of Multipoint Connections [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications，1988，6(9): 1617-1622.