

## 区分服务 QoP 的可生存虚拟网络映射算法研究

刘光远, 双锴, 苏森

(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 用户对虚拟网保护需求呈现多样化的趋势, 针对如何实现不同需求的可生存虚拟网映射是当前研究亟待解决的问题。建立了区分保护质量 (QoP) 的可生存虚拟网络映射问题的数学模型, 然后提出了一种启发式算法进行求解。该算法包括广度优先搜索的节点映射策略和区分 QoP 的链路映射策略。模拟实验表明, 该算法不仅能满足用户不同的虚拟网保护需求, 而且相比现有算法降低了底层网络资源开销。

**关键词:** 可生存虚拟网络映射; 区分服务 QoP; 数学模型; 启发式

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)12-0079-05

## Survivable virtual network mapping with differentiated services QoP

LIU Guang-yuan, SHUANG Kai, SU Sen

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** The protection needs of virtual network are more and more diversified. So how to realize survival virtual network mapping of different needs is the important issue. The mathematical model of differentiated services QoP issue was formulated. Then a heuristic algorithm was proposed to solve it. The simulation results demonstrate the algorithm can satisfy various virtual networks protection for users and decline the substrate network bandwidth cost compared with other algorithms.

**Key words:** survival virtual network mapping; differentiated services QoP; mathematical model; heuristic

### 1 引言

随着 VNI、SDN、Openflow 等研究的兴起, 网络虚拟化已经成为目前的一个研究热点。网络虚拟化技术允许在共享的物理网络基础设施之上提供共存的多重异构虚拟网络, 使得在不影响现有网络的前提下引入新的网络架构、协议和服务成为可能, 从而有效地支持网络技术的创新<sup>[1]</sup>。虚拟网映射问题<sup>[2]</sup>是网络虚拟化研究的关键内容, 主要完成为带有不同节点和链路资源约束条件和拓扑结构需求的虚拟网络请求分配相应底层网络资源的任务。由于硬软件错误或黑客攻击, 底层网络中的节点和链路可能会失效。而一个节点或链路失效可能

会引起多个虚拟网络服务不可用, 直接造成服务提供商的经济损失。因此如何实现虚拟网的可生存映射是当前研究亟待解决的问题。

目前, 虚拟网可生存方面已有的研究通常是基于冗余资源的保护方法。针对底层单链路失效问题, Rahman 等人<sup>[3]</sup>提出了基于被动恢复机制的底层链路生存性算法。Chen 等人<sup>[4]</sup>针对相同情境, 改用主动恢复机制并提出了链路带宽共享算法以提高底层资源利用率。针对底层节点失效问题, Yeow 等人<sup>[5]</sup>提出基于共享资源池的机制来达到  $n:k$  的保护。Cai 等人<sup>[6]</sup>提出一种基于代价最小原则的节点迁移与重映射算法。针对虚拟网区域故障, Yu 等人<sup>[7]</sup>以最小资源消耗为目标提出了一种启发式算法

收稿日期: 2013-06-29; 修回日期: 2013-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170274); 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2011CB302506); 国家自然科学基金委创新研究群体基金资助项目(60821001)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61170274); The National Basic Research Program of China (2011CB302506); Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (60821001)

进行求解。以上研究的不足在于仅针对单一虚拟网服务保护需求进行映射，而实际互联网用户租用服务的目的和预算不同，因此对虚拟网服务保护需求是不一样的。通常在保证数据可正确到达目的地的前提下，用户为了节省服务费用支出，是可以忍受一定服务流量损失和延时的。Gerstel O 等人<sup>[8]</sup>提出了保护质量 (QoP) 的概念，用参数  $q$  表示在单链路失效状态下服务需要提供的保护资源比例。 $q$  是一个 0~1 之间的数，表示用户的不同需求。当  $q$  为 1 时，服务为完整保护状态，当  $q$  为 0 时，则表示服务不需要被保护。但是文献<sup>[8]</sup>实质是研究路由和波长分配问题，因此仅考虑了带宽约束，而本文是设计虚拟网映射算法，需考虑节点和带宽 2 种约束。

因此，受文献<sup>[8]</sup>的启发，本文提出一种区分服务 QoP 的可生存虚拟网络映射方法，根据用户的不同保护需求将虚拟网络服务进行分类，然后分别将其映射到底层物理网络上，并为其分配不同的网络资源，目标是在满足不同服务 QoP 需求的同时，最小化底层网络资源开销。该研究可为网络运营商节约成本，并为用户提供更灵活的虚拟网服务选择方案。

## 2 网络模型与问题描述

虚拟网络映射模型包含底层物理网络和虚拟网络请求 2 个方面，本节首先给出底层物理网络和虚拟网络请求的网络模型和形式化描述，然后给出区分服务 QoP 的可生存虚拟网络映射的问题描述。

### 2.1 底层网络

本文采用文献<sup>[2]</sup>给出的虚拟网络映射模型描述。物理网络拓扑标记为带权无向图  $G_s = (N_s, E_s, C_s^n, C_s^l)$ ，其中， $N_s$  表示物理网络节点的集合， $E_s$  表示物理网络链路的集合， $C_s^n$  表示物理网络节点的计算能力， $C_s^l$  表示物理网络链路带宽。图 1(a)描绘了一个底层物理网络实例，其中，矩形框里的数字分别表示各个节点的可用计算资源，链路附近的数字表示该链路的可用带宽资源。

### 2.2 虚拟网络请求

与底层物理网络类似，虚拟网络拓扑也可被标记为带权无向图  $G_v = (N_v, E_v, R_v^n, R_v^l)$ ，其中， $N_v$  为虚拟网络节点的集合， $E_v$  为虚拟网络链路的集合。 $R_v^n$  表示虚拟节点能力需求， $R_v^l$  表示虚拟链路带宽资源需求。当第  $i$  个虚拟网络请求到达后，物理网

络需要为其分配满足其节点与链路资源需求的相应资源。当物理网络资源不足时，应该拒绝或延迟映射该虚拟网络请求。图 1(b)和图 1(c)分别描绘了带有节点与链路资源约束的 2 个不同虚拟网络请求实例。

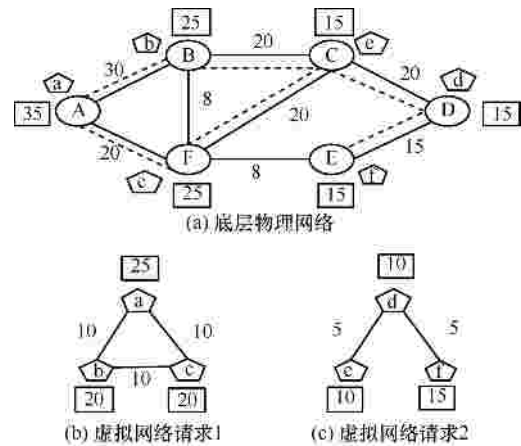


图 1 虚拟网络映射实例

### 2.3 区分服务 QoP 的可生存虚拟网络映射问题描述

虚拟网络映射问题被定义为映射： $M : G_v(N_v, E_v) \rightarrow G_s(N_s, E_s)$ ，包括节点和链路映射 2 个方面。图 1(c)给出了 2 个虚拟网络请求的一种可行映射方案。如图 1 所示，虚拟网络请求 1 的节点映射方案为  $\{a \rightarrow A, b \rightarrow B, c \rightarrow F\}$ ，链路映射方案为  $\{(a, b) \rightarrow (A, B), (a, c) \rightarrow (A, F), (b, c) \rightarrow (B, C, F)\}$ 。虚拟网络请求 2 的节点映射方案为  $\{d \rightarrow D, e \rightarrow C, f \rightarrow E\}$ ，链路映射方案为  $\{(d, e) \rightarrow (D, C), (d, f) \rightarrow (D, E)\}$ 。

可生存的虚拟网络映射是指在满足基本虚拟网络资源映射需求的情况下，当底层链路或节点失效后，虚拟网络仍能对外提供服务。如图 1(a)所示，虚拟网络请求 1 的底层网络映射方案就是一个链路可生存映射方案。而本文的主要工作是在满足虚拟网络可生存的前提下，如何实现区分服务 QoP 的虚拟网络映射。

假设底层网络支持路径分裂，也就是说一条虚拟链路可以映射到多条底层物理链路上。基于文献<sup>[8]</sup>的启发和后面算法设计的方便，本文将用户对服务 QoP 的需求参数  $q$  进行量化，划分为  $q=0$ 、 $q<1/2$ 、 $q>1/2$ 、 $q=1$  共计 4 个等级， $q=0$  表示不需要服务保护， $q<1/2$  表示需要小于 1/2 失效带宽的服务保护， $q>1/2$  表示需要大于 1/2 失效带宽的服务保护， $q=1$  表示需要完全保护。

区分服务 QoP 的虚拟网络映射问题就是如何

将以上 4 类虚拟网络请求映射到同一个底层物理网络之上，目标是在满足不同服务 QoP 需求的前提下，尽可能减少底层网络资源开销。

### 3 区分服务 QoP 的可生存虚拟网络映射问题的数学模型

本节对区分服务 QoP 的可生存虚拟网络映射问题进行了混合规划建模。以下是数学模型中所使用的符号和变量说明。

变量说明：

$d_{ij}$  表示 2 个底层节点  $i$  和节点  $j$  之间的带宽能力；

$q$  表示链路失效后带宽需要恢复的比例(见 2.3 节)；

$p_{ij}$  表示映射到底层链路  $(i, j)$  上的满足虚拟链路能力约束的链路带宽资源；

$s_{ij}$  表示底层链路  $(i, j)$  的空闲带宽资源；

$f_{kl}^{ij}$  表示底层链路  $(k, l)$  失效后，链路  $(i, j)$  为其分配的满足 QoP 保护需求的带宽资源。

$$M_{ij}^{mn} = \begin{cases} 1, & \text{虚拟链路}(m, n)\text{映射到底层物理链路}(i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$x_i^m = \begin{cases} 1, & \text{虚拟节点}m\text{映射到底层物理节点}i\text{上} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

本文以最小化底层网络资源映射开销为目标函数，以满足 QoP 链路保护为约束，对该问题进行混合规划建模，具体结果如下所示

目标函数

$$\min \sum_{(m, n) \in E_v, (i, j) \in E_s} M_{ij}^{mn} (p_{ij} + s_{ij}) \quad (1)$$

节点能力约束

$$\forall m \in N_v, \forall i \in N_s, x_i^m \cdot CPU(m) \leq CPU(i) \quad (2)$$

带宽能力约束

$$\forall (i, j) \in E_s, \forall (m, n) \in E_v, \sum M_{ij}^{mn} p_{ij} \leq d_{ij} \quad (3)$$

链路连通性约束

$$\forall i \in N_s, \forall (m, n) \in E_v, \sum_{(i, j) \in E_s} M_{ij}^{mn} - \sum_{(j, i) \in E_s} M_{ji}^{mn} = \begin{cases} 1, & x_i^m = 1 \\ -1, & x_i^n = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

QoP 链路保护约束

$$\forall i \in N_s, \forall (k, l) \in E_s,$$

$$\sum_{(i, j) \in E_s} f_{kl}^{ij} - \sum_{(j, i) \in E_s} f_{kl}^{ij} = \begin{cases} d_{ij} q, & x_i^m = 1 \\ -d_{ij} q, & x_i^n = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{kl}^{ij} \leq p_{ij} + s_{ij}, \forall (i, j) \in E_s, \forall (k, l) \in E_s \quad (6)$$

节点映射约束

$$\begin{cases} \sum_{m \in N_v} x_i^m = 1, \forall i \in N_s \\ \sum_{i \in N_s} x_i^m = 1, \forall m \in N_v \end{cases} \quad (7)$$

说明 通常虚拟网络节点映射开销是固定的，所以不同虚拟网络映射方案映射开销的不同主要取决于链路映射开销的不同，因此本文以式(1)作为该模型的目标函数，最小化底层链路资源开销。式(2)~式(4)分别是节点和链路的资源约束以及链路连通性约束条件。式(5)和式(6)给出了底层单链路失效时满足 QoP 要求的链路带宽保护约束，式(7)表示对于同一个虚拟网络请求的虚拟节点必须映射到不同的底层网络节点上。

### 4 启发式算法

混合规划对于小规模的网络可以快速找到该问题的最优解，但是随着问题规模的增大，计算时间变得让人难以接受<sup>[9]</sup>。对于求解在线的虚拟网络映射问题，设计启发式算法更能满足其对时间的要求。本文设计的启发式算法的目标是，给定虚拟网络请求和底层物理网络，虚拟网络映射方案必须能够保证底层单链路失效后满足不同虚拟网服务的 QoP 保护需求，同时最小化底层链路资源开销。

假设底层网络支持路径分裂，尽可能将一条虚拟链路映射到多条底层物理链路上，这样可以减少单链路失效带来的危险，从而减少保护带宽的分配。早期的研究表明<sup>[10]</sup>，虚拟节点以广度优先搜索的方式进行映射的同时考虑虚拟链路的映射，可以提高虚拟网络映射的成功率。所以本文的启发式算法采用了相同的节点映射策略。

算法首先构建一个广度优先搜索树  $G_v$ ，根节点是虚拟网络中最大 CPU 能力请求节点。在每一级的搜索树上，节点按照 CPU 请求的大小按递减的方式进行排序。然后对于每个待映射虚拟节点  $n_v^i$  ( $n_v^i \in N_v$ )，建立一个底层候选映射节点集合，该集中的节点，其可用 CPU 能力均不小于虚拟节点

$n_v^i$  的 CPU 能力请求,且集合中的元素按照 CPU 能力递减的方式进行排序。最后,以广度优先的方式映射每个虚拟节点  $n_v^i$  到满足各自 CPU 需求的底层网络节点上,同时映射与该节点相关的虚拟链路。在链路被映射之前,首先检查 2 个节点之间是否存在  $k$  条最短路径<sup>[11]</sup> ( $k \geq 2$ ),如果不存在,则重新映射该节点,若存在则采用最短路径法按照虚拟链路带宽需求和 QoP 保护带宽需求进行多路径映射。

QoP-VNE 算法主流程如图 2 所示,其中链路映射策略如图 3 所示。

```

算法 1 QoP-VNE 主程序
1) 构建广度优先搜索树  $G_v$ 
2) 对于每一级的搜索树,将待映射的虚拟节点按 CPU 能力需求递减的顺序进行排序
3) For 每个底层虚拟节点  $n_v^i$  ( $n_v^i \in N_v$ ) do
4) 为  $n_v^i$  建立底层映射候选节点列表
5) If 广度搜索方式映射虚拟节点( $n_v^i$ ) && 算法 2 then
6) 继续映射  $n_v^{i+1}$ 
   else
7) 返回映射失败
   end if
8) end for
  
```

图 2 QoP-VNE 算法主流程

```

算法 2 区分 QoP 的链路映射策略
1) For 每个待映射的虚拟链路 do
2) 对候选底层链路集合按带宽大小降序排列
3) if  $0 < q < 1/2$  Then
4) 选取两条最短链路,将虚拟链路带宽平均分配到两条底层链路上
5) else if  $1 > q > 1/2$  then
6) 计算多条链路中满足  $q$  的虚拟链路映射开销最小方案,然后进行映射
7) else if  $q = 0$  then 选取单条最短路径进行映射
8) else if  $q = 1$  then 分别选取两条最短路径作为主路径和保护路径进行映射,且带宽相同
   end if
end for
  
```

图 3 链路映射策略

### 5 性能评估与分析

为了验证算法的有效性,在先前工作成果<sup>[10,12-14]</sup>的基础上对虚拟网络映射模拟器进行改进,并使用 C++ 语言实现了该算法。

### 5.1 实验设置

底层物理网络拓扑由 GT-ITM 工具随机产生<sup>[15]</sup>,其中包含 120 个节点和 600 条链路,与一个中等规模的 ISP 运营商类似。物理网络节点计算资源与链路带宽资源服从 30~80 的均匀分布。虚拟网络节点的度为 2~5,节点个数随机产生且服从 3~10 的均匀分布,每一对虚拟网络节点以 0.5 的概率相连。虚拟网络节点计算资源需求服从 0~15 的均匀分布,链路带宽资源需求服从 0~30 的均匀分布。假设在每 100 个时间单元内虚拟网络请求的到达服从均值为 5 的泊松分布,每一个虚拟网络的保护参数  $q$  的大小随机产生,虚拟网生存时间服从指数分布,其平均生存时间为 600 个时间单元。每次模拟实验运行 50 000 个时间单元,大约包含 2 500 个虚拟网络请求。

模拟实验对以下 3 种虚拟网络映射算法(见表 1)进行比较和评估,所有被评估的算法均采用相同的底层网络资源与虚拟网络请求作为输入。

表 1 比较算法	
算法名称	算法描述
QoP-VNE	本文所提出的满足不同 QoP 需求的可生存虚拟网络映射算法
1+1 protection	主链路和保护链路不相交且带宽相等的可生存虚拟网络映射算法 <sup>[3]</sup>
1+q protection	主链路和保护链路不相交且满足 $q$ 保护需求的可生存虚拟网络映射算法

### 5.2 模拟实验结果与分析

在底层网络单链路失效后,1+1、1+q、QoP-VNE 算法均能满足服务可生存性保护需求,但在区分不同 QoP 需求的映射条件下,3 种算法实际使用的保护资源数量是不同的。对于实际的虚拟网络映射算法,在满足虚拟网络 QoP 需求的同时,应该尽可能地高效利用底层网络资源以映射更多的虚拟网络请求,为底层网络运营商带来更多的收益。因此实验选取了底层网络带宽开销和底层网络长期收益开销比(一段时间内底层网络承载虚拟网络所获收益/承载虚拟网络资源开销)2 个指标对 3 种算法进行比较。下面是通过模拟实验得出的结果。

QoP-VNE 算法在满足 QoP 需求的同时相比其他算法需要更少的底层网络带宽资源。

如图 4 所示,1+1 保护算法由于对所有的保护需求  $q$  都采取了相同的保护方法,即建立与主链路带宽完全相等的后备链路来进行保护,所以带宽开销最大,1+q 保护算法的开销次之,本文所提出的 QoP-VNE 算法的带宽开销最小。在  $q=0.5$  时,QoP

的带宽开销比  $1+q$  节省了大约 44.4%，这是因为 QoP-VNE 算法采用多路径映射策略，链路失效的风险低，且不用单独为主链路分配保护链路，因此需要更少的保护带宽。此外，从图 4 中可以看出 QoP-VNE 和  $1+p$  相比  $1+1$  保护方法能更灵活地满足不同服务的保护需求。

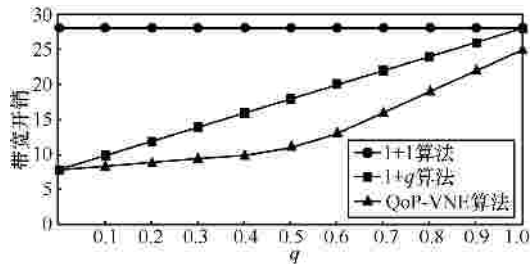


图 4 不同  $q$  值下各个算法的带宽开销

QoP-VNE 算法相比其他算法可获得更好的长期收益开销比 (R/C)。

如图 5 所示 QoP-VNE 算法的 R/C 平均高出  $1+1$  算法 27.7%，高出  $1+q$  算法 7.2%，这是因为其带宽消耗低于其他 2 种算法，在获取相同收益的同时付出较少的代价。除此之外，节省出来的带宽还可以用于映射更多的虚拟网络请求。因此 QoP-VNE 算法可为底层网络运营商节约成本，获取更多的收益。

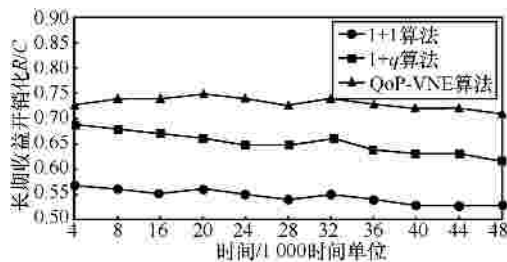


图 5 长期收益开销比 R/C

## 6 结束语

本文针对不同 QoP 需求的可生存虚拟网映射问题进行了论述，并对该问题建立了混合规划模型。因为该问题为 NP 难问题，所以本文设计了一种新的启发式算法对其进行求解，该算法包括广度优先搜索的节点映射策略和区分 QoP 的链路映射策略。实验结果表明，所提算法在底层网络带宽开销和长期收益开销比等指标上具有优势，是一种有效区分服务 QoP 的可生存虚拟网络映射方案。

### 参考文献：

[1] CHOWDHURY M, BOUTABA R. A survey of network virtualization[J].

Computer Networks, 2010,54(5):862-876.

[2] 程祥, 张宝宝, 苏森等. 虚拟网络映射问题研究综述[J]. 通信学报, 2011,32(10):143-151.

CHENG X, ZHANG Z B, SU S, *et al.* Survey of virtual network embedding problem[J]. Journal on Communications, 2011, 32(10):143-151.

[3] RAHMAN M, AIB I, BOUTABA R. Survivable virtual network embedding[A]. IFIP Networking[C]. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 40-52.

[4] CHEN Y, LI J, WO T, *et al.* Resilient virtual network service provision in network virtualization environments[A]. Proc IEEE ICPADS[C]. Shanghai, China, 2010.51-58.

[5] YEOW W L, WESTPHAL C, KOZAT U. Designing and embedding reliable virtual infrastructures[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41:51-64.

[6] CAI Z P, LIU F, XIAO N, *et al.* Virtual network embedding for evolving networks[A]. Proc IEEE Globecom[C]. Miami, Florida, USA, 2010.1-5.

[7] YU H F, QIAO C M, ANAND V. Survivable virtual infrastructure mapping in a federated computing and networking system under single regional failures[A]. Proc IEEE Globecom[C]. Miami, Florida, USA, 2010.1-6.

[8] GERSTEL O, SASAKI G. Quality of protection (QoP): a quantitative unifying paradigm to protection service grades[J]. Optical Networks Magazine, 2002, 3(3):40-49.

[9] KARP R M. On the computational complexity of combinatorial problems[J]. Networks, 2004, 5(175):45-68.

[10] CHENG X, SU S, ZHANG Z, *et al.* Virtual network embedding through topology-aware node ranking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41:39-47.

[11] EPPSTEIN D. Finding the k shortest paths[A]. Proceedings of IEEE Symposium on Foundations of Computer Science[C]. Santa Fe, New Mexico, 1994.154-165.

[12] 程祥, 张宝宝, 苏森等. 基于粒子群优化的虚拟网络映射算法[J]. 电子学报, 2011,10: 2240-2244.

CHENG X, ZHANG Z B, SU S, *et al.* Virtual network embedding based on particle swarm optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 10: 2240-2244.

[13] CHENG X, SU S, ZHANG Z, *et al.* Virtual network embedding through topology awareness and optimization[J]. Elsevier Computer Networks, 2012, 56:1797-1813.

[14] SU S, CHENG X, ZHANG Z. Virtual network embedding with survivable routing[J]. Journal of Internet Technology, 2013, 6:122-124.

[15] ZEGURA E W, CALVERT K L, BHATTACHARJEE S. How to model an internetwork[A]. Proc IEEE INFOCOM[C]. San Francisco, USA, 1996.594-602.

### 作者简介：



刘光远 (1981-)，男，河北石家庄人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为下一代互联网与云计算技术。

双锴 (1977-)，男，辽宁铁岭人，北京邮电大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为下一代网络技术、分布式计算技术。

苏森 (1971-)，男，山东菏泽人，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为服务计算、云计算、网络虚拟化、大数据处理。