

网络虚拟化环境中底层资源的动态选择研究—— 一种基于演化博弈的方法

杨宇¹, 陈山枝², 李昕¹

(1. 北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876; 2. 电信科学技术研究院 无线移动通信国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 从虚拟网络的角度考虑虚拟网络对底层资源的选择问题, 将虚拟网络对底层网络中物理路径的自主选择抽象成一个演化博弈, 虚拟网络通过反复博弈学习来调整物理路径的选择。利用模仿者动态方程分析博弈中不同策略的比例动态变化, 证明了模仿者动态是底层资源动态选择博弈的合理策略更新机制。应用势博弈理论分析了博弈的演化过程, 证明了演化的结果会达到演化平衡, 确保了每个虚拟网络都获得了最优策略选择。最后基于模仿者动态策略选择机制提出了一个演化算法, 通过数值仿真模拟了不同初始策略分布下虚拟网络对底层网络路径的选择过程, 实验结果表明演化博弈收敛到了稳定点, 仿真结果与理论分析的结果相吻合。

关键词: 网络虚拟化环境; 演化博弈; 模仿者动态; 势博弈; 演化平衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0025-10

Dynamics of substrate resource selection in network virtualization environment——an evolutionary game approach

YANG Yu¹, CHEN Shan-zhi², LI Xin¹

(1. State Key Lab of Switching and Networking Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. State Key Lab of Wireless Mobile Communication, China Academy of Telecommunication Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The substrate network path selection problem of virtual network was modeled as an evolutionary game. In the process of evolutionary game, virtual networks adjusted the strategies through the iterated game. The replicator dynamics were leveraged equation to analyze the dynamic variation of strategies selection and demonstrates that this dynamics equation is the admissible dynamic to the evolutionary game. The potential game theory was used to analyze the evolutionary process and demonstrates the evolutionary result will converge to the evolutionary equilibrium. At the evolutionary equilibrium, all the virtual networks could get the best selection strategies. Finally, an evolutionary algorithm based on replicator dynamics was proposed. The experiments simulate the process of virtual network selecting the substrate paths in different initial state and reach the evolutionary equilibrium. Simulation results are coincided with the theoretical analysis results.

Key words: network virtualization environment; evolutionary games; replicator dynamics; potential games; evolutionary equilibrium

收稿日期: 2012-07-25

基金项目: 国家重大科技专项基金资助项目(2010ZX03005-002-02, 2011ZX03005-004-02); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320505); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2010AA012501); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011PTB-00-34, 2011PTB-01-01)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project (2010ZX03005-002-02, 2011ZX03005-004-02); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320505); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2010AA012501); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2011PTB-00-34, 2011PTB-01-01)

1 引言

网络虚拟化旨在构建出完全虚拟化的网络环境，通过共享底层的物理资源构建出共存但相互隔离的多样化虚拟网络^[1]，其核心思想是利用节点虚拟技术和链路虚拟技术，将现有的网络服务提供商（ISP, internet service providers）拆分为 2 个相互独立的实体：底层网络提供商（InP, infrastructure providers）和虚拟网络服务提供商（SP, service providers）。InP 负责建设和管理底层网络，将网络资源租赁给虚拟网络，根据资源数量收取费用。SP 从一个或多个 InP 租用底层网络资源，构建和运营多样化的虚拟网络。虚拟网络由虚拟节点和连接这些节点的虚拟链路组成。虚拟网络映射（virtual network mapping）是实现网络虚拟化的关键技术，由底层网络为给定的虚拟网络分配资源，建立虚拟网络与底层网络的对应关系。虚拟网络映射包括虚拟节点映射和虚拟链路映射 2 部分，虚拟节点映射是建立虚拟节点到物理节点的对应关系，而虚拟链路映射是建立虚拟链路到物理路径的对应关系。在网络虚拟化环境中，现有的虚拟网络映射方法都是从底层网络的角度出发，以最大化底层网络的收益为最终目标决定虚拟网络在底层资源的分配。底层网络根据虚拟网络的资源请求分配相应的物理资源，在此期间，虚拟网络不能更改请求资源的数量以及使用时间，这些资源分配方法不能感知虚拟网络的需求，也没有足够地考虑虚拟网络对底层资源的自主性选择。特别是对于资源需求动态变化的虚拟网络来说，虚拟网络只有在当前分配的资源到期后，重新向底层网络申请资源，这不仅减少了底层网络的收益，也不能有效地保证虚拟网络的 QoS。图 1 描述了虚拟网络到底层网络的映射，对于虚拟节点映射到物理节点 S、D 的虚拟网络 VN1 和 VN3，在现有的映射方法中，虚拟链路到物理路径的映射完全由底层网络决定，底层网络以最大化自身收益为目标将虚拟链路映射到相应的物理路径上，虚拟网络 VN1 和 VN3 并不能自主决定对物理路径的选择。

本文从虚拟网络的角度考虑对底层资源的选择问题，将虚拟网络作为虚拟网络映射的操控者，把虚拟链路的映射即虚拟网络对物理路径的自主选择抽象为一个演化博弈（evolutionary game）问题，构建了基于多个群体的动态演化博弈的模型。

在该模型中，本文将映射到相同物理节点对（源节点和目的节点）的虚拟网络划分为一个群体，使用源节点和目的节点间不相交的路径作为群体的策略，并定义了基于链路时延和链路使用花费的效用函数，为使虚拟链路能够得到一个最优的物理网络资源，在演化过程中，利用模仿者动态(replicator dynamics)作为演化博弈的策略更新机制，每个虚拟网络通过比较自身效用和群体中的平均效用来决定是否更改自身的策略，采用势博弈(potential games)理论分析了博弈的演化过程，构建了演化博弈的势函数，通过理论分析证明了动态演化的过程最终会收敛到演化平稳点(stationary point)，即达到演化博弈的均衡状态。最后实现了基于模仿者动态的演化算法，通过仿真分析了虚拟网络对物理路径选择的演化过程，实验结果表明演化博弈最终收敛到了稳定点，验证了理论分析的结果。

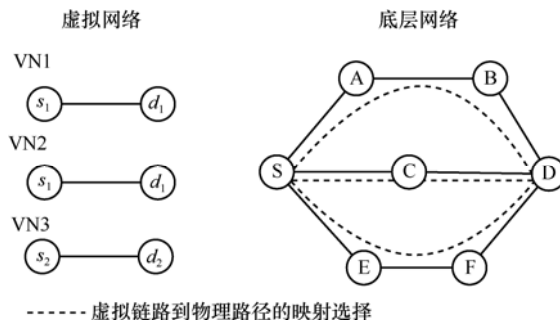


图 1 虚拟网络资源选择示意

2 相关工作

网络虚拟化环境中，虚拟网络对底层网络的资源选择是目前的研究重点，文献[2]提出的虚拟网络映射算法分为两个阶段，先采用贪婪算法将虚拟节点映射到底层资源最大的节点，随后利用 K 最短路径算法以及多商品流算法将虚拟链路映射到物理路径。文献[3]采用混合整数规划的方法，针对不同场景提出确定型的虚拟网映射(D-ViNE)和随机虚拟网映射(R-ViNE)算法。上述虚拟网络资源选择算法都是以最大化底层网络的收益为前提，没有考虑和感知虚拟网络的需求。近年来，博弈论广泛应用于网络资源管理和路由问题。一些文献使用博弈论对网络虚拟化环境中的资源管理问题进行了研究，文献[4]提出了一种非合作博弈的虚拟网络资源分配模型，分析了纳什均衡点的存在性，并通过一个迭代算法，验证了虚拟网络各条链路中的带宽最终

能够收敛到稳定的最优解。文献[5]从底层网络利益最大化和虚拟网络获取资源最大化的角度分析了虚拟网络对底层资源的选择,采用单主多从的 Stackelberg 博弈模型,将全局的最优问题划分为多个局部算法,但该方法只是证明了纳什均衡的存在性,并没有对均衡解给出具体的算法。上述这些工作都是基于虚拟网络是完全理性的这一前提,并要求所有的参与者都能够在完全信息的条件下进行博弈,这些假设条件在现实中很难满足。文献[6]分析了异构无线网络中用户的接入问题,将用户对不同接入网络的选择抽象为一个演化博弈问题,将隶属于不同区域中的用户划分一个群体,通过算法验证了演化博弈的稳定性。文献[7]采用动态演化的博弈模型解决网络中的路由问题,使用边际花费表示参与者的效用,定义了博弈的势函数并证明了演化的稳定性。文献[8]使用演化博弈分析了自私路由问题,研究了在对称实例问题和多商品流实例问题中的演化博弈的收敛稳定性问题。

3 预备知识

3.1 演化博弈

经典博弈论的各种均衡都是建立在参与人是完全理性的基础上,即要求博弈主体在复杂的博弈环境中对于博弈的结构、各博弈方的情况和特征(包括信息和知识结构等)有着准确的认识、分析和判断能力,并在此基础上能够准确地进行推理。这种太过严格的假设,使得博弈中任意一方的理性和能力的缺陷都会导致纳什均衡难以实现。演化博弈在一定程度上对经典博弈论中构造精确、完美的理性假定进行了补充和修正,演化博弈^[9, 10]并不需要参与者是完全理性的。演化博弈以群体为研究对象,将一组具有相同纯策略集的参与者组成一个群体,群体在不同时刻所处的状态用混合策略来表示,参与者的决策是通过参与者之间模仿、学习和突变等动态过程实现。演化博弈并不关心个体参与者选择了哪个策略,而更关心选择某一策略的参与者数量或者参与者数量占群体所有参与者数量的比例,也就是在纯策略上的一个分布。有限理性的参与者在演化博弈的过程中,不断地进行学习 and 策略调整,经过博弈方多次策略调整,最终会收敛到演化稳定策略,通过演化稳定策略从而计算出博弈的均衡解。博弈分析的目的不在于给出博弈方的最优策略选择,而在于有限理性博弈方组成的群体成

员的策略调整过程、趋势和稳定性。

演化动态用于演化博弈理论中参与者的策略改变,是演化博弈中的重要概念。动态演化性意味着博弈的参与者不是通过一次博弈就能找到最优策略,而是需要通过在博弈的过程中不断的学习来调整自己的策略,最终找到符合自身利益要求的策略。如果参与者选择一个策略的具有较大(较小)的效用则增加选择它的频率,同时降低选择低于(高于)平均效用的策略的频率。模仿者动态^[11]是演化博弈理论的基本动态,它能较好地描绘出有限理性参与者的群体行为变化趋势,由之得出的结论能够准确地预测参与者的群体行为。

3.2 势博弈

势博弈^[12]是一类特殊形式的博弈,对于某个博弈来说,如果该博弈存在一个连续可微的标量函数,它的梯度等于博弈的效用函数向量,则该博弈为一个势博弈,这个函数定义为博弈的势函数(potential function)。势函数可以决定博弈的均衡点,并使演化博弈的演化过程特征化。如果博弈的参与者改变策略而获得更大(更小)的效用时,势函数的值也将会相应的改变。

4 底层资源动态选择的博弈模型和演化稳定性分析

在网络虚拟化环境中,虚拟网络到物理网络的映射一般分为虚拟节点映射和虚拟链路映射 2 个阶段。虚拟节点首先按照一定的算法映射到物理节点,随后将虚拟链路映射到相应物理节点间的路径上。本文只考虑虚拟链路的映射阶段,从虚拟网络的角度分析虚拟链路对物理路径的选择。不失一般性,假设每个虚拟网络包含一条虚拟链路的情况,且每个虚拟网络发送的数据流不能分割,只能在一条物理路径上传送。考虑包含一个底层网络和多个虚拟网络的虚拟化场景,底层网络表示为 $G=(V, E)$, 其中, V 是物理节点的集合, E 表示为物理链路的集合。节点对 s_i-d_i 之间不相交的路径记为 P_i , $P_i \subseteq P(E)$, $P(E)$ 为物理链路集合 E 的幂集。本文将虚拟网络自主选择物理路径抽象成一个演化博弈问题,所有虚拟网络中映射到相同物理节点对(源节点和目的节点)的虚拟网络划分为一个群体,通过不断的演化来模拟虚拟网络的对物理路径的选择过程,基于虚拟网络的部分信息和有限的理性,虚拟网络不断改变自身的路径策略选择,直到

同一群体中的所有虚拟网络的效用达到一致，此时，演化博弈达到一个演化平衡状态，任何虚拟网络不会再改变自身的策略选择。

4.1 演化博弈建模

一个演化博弈通常由参与者、策略集合和效用函数组成，网络虚拟化环境中底层资源动态选择的演化博弈模型定义如下。

参与者：在网络虚拟化环境中，将具有多条物理路径选择的虚拟网络作为一个参与者，参与者也就是群体中的成员。

策略：在任意的群体中，物理网络节点间不相交的路径作为虚拟网络可选择的策略。群体中的每个虚拟网络选择的是一个纯策略，对一个群体而言，其群体策略是一个混合策略，即群体中选择不同物理路径的虚拟网络的分布。

群体：所有虚拟网络中映射到相同物理节点对（源节点和目的节点）的虚拟网络划分为一个群体，如图 1 所示，映射到节点对 S-D 的虚拟网络 VN1 和 VN3 就可以构成一个群体。群体的集合定义为 $N = \{1, 2, \dots, n\}, n \geq 1$ ，群体 $i \in N$ 中的虚拟网络的数量为 c_i ，其策略集合为 $S_i = \{1, 2, \dots, m_i\}$ ，其中， m_i 为群体 i 的策略数（即虚拟网络可选择的物理路径的数量）， $S = \bigcup_{i \in N} S_i$ 表示所有群体的策略集合，

$m = \sum_{i=1}^n m_i$ 表示所有的纯策略，用 p_{ij} 表示群体 i 中的第 j 条策略所对应的底层网络的物理路径。群体 i 的策略分布记为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im_i})$ ，此处 x_{ij} 表示群体 i 中选择策略（物理路径） j 的虚拟网络数量，定义 $\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = c_i$ ， c_i 为群体 i 中所有虚拟网络的数量。所有群体的策略分布记为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。在整个网络虚拟化环境中，所有虚拟网络的数量为 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = c$ 。假设相同群体中每个虚拟网络发送的流量相同且流量是恒定的，定义群体 i 中每个虚拟网络的流量为 β_i 。

效用：虚拟网络的效用函数由时延和花销两部分构成，在策略分布 x 下，群体 i 中选择策略 j 的效用定义为

$$F_{ij}(x) = U_{ij}(x) + P_{ij}(x) \quad (1)$$

其中， $U_{ij}(x)$ 表示虚拟网络选择物理路径所获得的时延， $P_{ij}(x)$ 表示虚拟网络使用该物理路径的花费。在底层资源动态选择的博弈中，虚拟网络总是希望

降低自身的效用，因此效用越低的策略更容易被虚拟网络选择。定义链路 $e \in E$ 的时延为该链路所经过流量的线性函数^[13]： $L_e(\Lambda_e) = a_e \Lambda_e + b_e$ ，其中 $a_e, b_e > 0$ ， Λ_e 为经过该链路的流量。物理路径的时延 L_p 为该路径经过的所有链路的时延之和： $L_p(x) = \sum_{e \in p} L_e(\Lambda_e)$ 。当策略分布为 x 时，经过

链路 e 的总流量为 $\Lambda_e(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \beta_i x_{ij} \delta_{ij}^e$ ，其中

$$\delta_{ij}^e = \begin{cases} 1, & e \in p_{ij} \\ 0, & e \notin p_{ij} \end{cases}$$

群体 i 中的虚拟网络选择物理路径 j 的时延为

$$U_{ij}(x) = L_p(x) = \sum_{e \in E} L_e(\Lambda_e) \delta_{ij}^e \quad (2)$$

群体 i 中的虚拟网络选择物理路径 j 的花费定义为

$$P_{ij}(x) = \sum_{e \in E} P_e(\Lambda_e) \delta_{ij}^e \quad (3)$$

其中， $P_e(\Lambda_e)$ 为每条链路的花费， $P_e(\Lambda_e) = \Lambda_e \frac{dL_e}{d\Lambda_e}$ 。

在策略分布为 x 下，每个虚拟网络的效用函数为 $F_{ij}(x) = U_{ij}(x) + P_{ij}(x)$ ，在后面的分析中用向量 $F = (F_{ij}, i \in N, j \in S_i)$ 表示网络虚拟化环境中底层资源的动态选择博弈。

演化平衡是演化博弈的稳定状态，在该状态下，没有虚拟网络会改变自身的策略选择。只要群体中虚拟网络的效用不等于该群体的平均效用，演化过程就会持续下去，直到任意群体中的虚拟网络的效用与该群体的平均效用相等，此时，群体的策略分布称为演化的平稳点。

4.2 基于模仿者动态的演化博弈策略更新机制

模仿者动态是演化博弈常用的策略更新机制，它描述了某一特定策略在一个种群中被采用的比例或频率的动态微分方程，群体中不同策略随着时间推移的演化过程。在模仿者动态中，某一纯策略的参与者个数所占比例的增长率同群体平均效用与使用该策略时所得效用之差成一定的比例关系。在网络虚拟化环境底层资源的动态选择博弈中，如果一个参与者选择某个策略所获得的效用小于该群体的平均效用，那么选择这个策略的参与者的个数增长率为正；如果一个参与者选择某个策略所获

得的效用大于群体的平均效用，那么选择策略的参与者的个体数增长率为负。

在网络虚拟化环境底层资源的动态选择博弈中，虚拟网络的策略组合 x 随时间 t 动态演化，即： $x=x(t)$ ，为了描述方便，下文中 x 和 $x(t)$ 可以互换使用。对 $\forall i \in N, j \in S_i$ ，模仿者动态定义为

$$\begin{aligned} \frac{dx_{ij}(t)}{dt} &= \dot{x}_{ij}(t) \\ &= x_{ij}(t) \left(\bar{F}_i(x) - F_{ij}(x) \right) := V(x) \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\bar{F}_i(x) = \frac{1}{c_i} \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} F_{ij}(x) \quad (5)$$

$\bar{F}_i(x)$ 为群体 i 中选择不同策略的虚拟网络的平均效用。式(4)又可以表示为

$$\dot{x}_{ij} = x_{ij} \left(\frac{1}{c_i} \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} F_{ij}(x) - F_{ij}(x) \right)$$

定理 1 模仿者动态 $\dot{x} = V(x)$ 是底层资源的动态选择博弈的合理策略更新机制。

证明

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{m_i} \dot{x}_{ij} &= \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \left(\bar{F}_i(x) - F_{ij}(x) \right) \\ &= \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \bar{F}_i(x) - \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} F_{ij}(x) \\ &= \bar{F}_i(x) \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} - \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} F_{ij}(x) \\ &= \bar{F}_i(x) \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} - c_i \frac{1}{c_i} \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} F_{ij}(x) \\ &= \bar{F}_i(x) c_i - c_i \bar{F}_i(x) \\ &= 0 \end{aligned}$$

在任意的群体中所有参与者的模仿者动态的和为 0，因此，由式(4)定义的模仿者动态是底层资源动态选择博弈的合理策略更新机制^[8]。

用 x^* 表示演化博弈的平稳点，由演化博弈平稳点的定义可知，在平稳点处，所有的参与者不会再更改自身的策略选择，用模仿者动态公式可以表示为 $\frac{dx_{ij}^*(t)}{dt} = 0$ ，即对 $\forall i \in N, j \in S_i$ ，有 $F_{ij}(x^*) = \bar{F}_i(x^*)$ 。在基于模仿者动态的演化过程中，如果虚拟网络选择物理路径 j 的效用小于群体中的平均效用，群体中选择物理路径 j 的虚拟网络就会

增加；如果选择物理路径 j 的效用大于群体中的平均效用，群体中选择物理路径 j 的虚拟网络数量就会减少，虚拟网络不会选择一个效用大于本群体平均效用的策略。如果当前的策略分布没有达到稳定状态，那么必然有虚拟网络存在着策略调整，即某个群体中的虚拟网络可以通过调整其策略进一步获利，一旦策略分布达到稳定状态，则没有虚拟网络会调整策略，即任何虚拟网络都不可能通过对自己目前选择的物理路径进行调整来改变效用，也就是说此时的策略分布将不会随着时间的变化而发生改变。

4.3 底层资源动态选择博弈是一个势博弈

在网络虚拟化环境中，定义系统的总效用

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} U_{ij}(x)$$

下面证明该函数是底层资源动态选择博弈的势函数，且该函数可以决定底层资源动态选择博弈的均衡点。

定义 1 如果一个博弈存在一个连续可微的标量函数 $f(x)$ ，满足条件 $\frac{\partial f(x)}{\partial x_{ij}} = F_{ij}(x)$ ，则称博弈是一个势博弈， $f(x)$ 为博弈的势函数^[12]。

定理 2 底层资源动态选择博弈 F 是一个势博弈，系统的总效用 $f(x)$ 是博弈的势函数，当 $x_{ij} = 0$ 时表示物理路径 j 对群体 i 中的虚拟网络是无效的。

证明 对系统的总效用 $f(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} U_{ij}(x)$ ，

求偏导可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_{ij}} &= \frac{\partial \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} U_{ij}(x) \right)}{\partial x_{ij}} \\ &= U_{ij}(x) + \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^{m_a} x_{ab} \frac{\partial U_{ab}(x)}{\partial x_{ij}} \\ &= U_{ij}(x) + \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^{m_a} x_{ab} \frac{\partial \left(\sum_{e \in E} L_e(\Lambda_e) \delta_{ab}^e \right)}{\partial x_{ij}} \\ &= U_{ij}(x) + \sum_{e \in E} \Lambda_e \frac{dL_e(\Lambda_e)}{d\Lambda_e} \delta_{ij}^e \\ &= U_{ij}(x) + P_{ij}(x) \\ &= F_{ij}(x) \end{aligned}$$

由上可知，网络虚拟化环境中底层资源动态选择博弈 F 是一个势博弈，其势函数正是系统的总效

用函数 $f(x)$ 。

4.3.1 演化博弈的稳定性分析

这一部分中, 利用李雅普诺夫函数分析了模仿者动态解的稳定性特征, 证明了底层资源动态选择博弈 F 是模仿者动态的李雅普诺夫函数。

定理 3 底层资源动态选择博弈 F 的势函数 $f(x)$ 是模仿者动态 $\dot{x} = V(x)$ 的全局李雅普诺夫 (Lyapunov) 函数。

证明 显然 $f(x)$ 是连续可微的, 同时

$$\begin{aligned} \frac{df(x(t))}{dt} &= \nabla f(x_t) \cdot \dot{x} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{\partial f}{\partial x_{ij}} \frac{dx_{ij}(t)}{dt} \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} V_{ij}(x) F_{ij}(x) \end{aligned}$$

将 $\dot{x}_{ij} = x_{ij} \left(\frac{1}{c_i} \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} F_{ij}(x) - F_{ij}(x) \right)$ 代入上式

可得

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} V_{ij}(x) F_{ij}(x) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij}(x) x_{ij} (\bar{F}_i(x) - F_{ij}(x)) \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{m_i} F_{ij}(x) x_{ij} \bar{F}_i(x) - \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij}(x)^2 x_{ij} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{m_i} F_{ij}(x) x_{ij} \frac{1}{c_i} \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij}(x) x_{ij} - \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij}(x)^2 x_{ij} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{c_i} \left(\sum_{j=1}^{m_i} F_{ij}(x) x_{ij} \right)^2 - \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij}(x)^2 x_{ij} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n c_i \left(\left(\sum_{j=1}^{m_i} \frac{x_{ij}}{c_i} F_{ij}(x) \right)^2 - \sum_{j=1}^{m_i} \frac{x_{ij}}{c_i} F_{ij}(x)^2 \right) \quad (6) \end{aligned}$$

由 Jenson 不等式可知, 式(6)是非正的^[4], 当且仅当 $V(x) = 0$ 时, 有 $\frac{df(x_t)}{dt} = 0$, 由上可知, 势函数 $f(x)$ 可以作为博弈的李雅普诺夫函数。因此, 模仿者动态方程 $\dot{x} = V(x)$ 的平稳点是渐进稳定的, 又

由文献[12]可知, 演化博弈的平稳点都是纳什均衡点, 所以, 当 $V(x) = 0$ 时的点既是演化博弈的平稳点也是纳什均衡点。

4.3.2 纳什均衡和势函数最小值的一致性

在网络虚拟化环境中, 基于模仿者动态的底层资源动态选择博弈最终会收敛到演化的平稳点, 并在演化的平稳点处达到了纳什均衡。由定理 3 可知,

$\frac{df(x(t))}{dt} \leq 0$, 即虚拟网络降低自身效用的策略调整必定减小势函数的值, 在演化博弈的过程中, 虚拟网络在最小化自身的效用的同时, 自然地也会使得全局势函数值的最小化。下面证明演化博弈的纳什均衡点与势函数最小值的一致性。

在网络虚拟化环境中, 最小化系统的总效用问题可以表示为

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} U_{ij}(x) \\ \text{subject to} & \begin{cases} \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = c_i, \forall i \in N \\ x_{ij} \geq 0, \forall i \in N, \forall j \in S_i \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

将式(7)表示的系统总效用 $f(x)$ 最小化问题转化成拉格朗日 (Lagrange) 最小化问题表示

$$\begin{aligned} L(x, \lambda, \mu) &= \\ &f(x) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \lambda_{ij} x_{ij} - \sum_{i=1}^n \mu_i \left(\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} - c_i \right) \quad (8) \end{aligned}$$

定理 4 x^* 是底层资源动态选择博弈 F 的纳什均衡当且仅当它满足势函数 $f(x)$ 取得最小值的一阶 Kuhn-Tucker 条件, 即对 $\forall i \in N, \forall j \in S_i$, 存在 λ, μ , 满足

$$(KT1) \quad \frac{\partial f(x)}{\partial x_{ij}} = \lambda_{ij} + \mu_i$$

$$(KT2) \quad \lambda_{ij} x_{ij} = 0$$

$$(KT3) \quad \lambda_{ij} \geq 0$$

证明

1) 若 x^* 是底层资源动态选择博弈 F 的纳什均衡, 对任意群体中的虚拟网络的效用达到最小, 因为 $F(x) = \nabla f(x)$, 取 $\mu_i = \min_{j \in S_i} F_{ij}(x)$, $\lambda_{ij} = F_{ij}(x) - \mu_i \geq 0$, $\lambda_{ij} x_{ij} = 0$, 则此时均衡点 x^* 满足一阶 Kuhn-Tucker 条件。

2) 设 (x, λ, μ) 满足一阶 Kuhn-Tucker 条件, $\forall i \in N$ 则根据式 (KT1) 和 (KT2) 有

$$F_{ij}(x) = \frac{\partial f(x)}{\partial x_{ij}} = \mu_i$$

又由 (KT1) 和 (KT3) 可知, $\forall j \in S_i$: $F_{ij}(x) = \mu_i + \lambda_{ij} \geq \mu_i$, 可知群体 i 中选择任意策略的虚拟网络的效用 $F_{ij}(x) = \mu_i = \min_{j \in S_i} F_{ij}(x)$, 说明在策略分布为 x^* 时, 任意的群体中的虚拟网络效用达到最

小, 即虚拟网络不会改变自身对物理路径的策略选择, 所以 x^* 是博弈 F 的 Nash 均衡。证毕。

定理 5 底层资源动态选择博弈 F 的势函数 $f(x)$ 存在的唯一最小值的点且该最小值点是博弈的纳什均衡。

证明 对势函数 $f(x)$ 求二阶偏导可知:

$$\frac{d^2 f(x)}{d^2 x_{ij}} > 0$$

底层资源动态选择博弈 F 的势函数 $f(x)$ 是严格凸的, 可以得到 $f(x)$ 有唯一的最小值, 由定理 4 可知, 势函数达到最小值时不再存在有效的行为调整, 即达到了纳什均衡, 取得唯一最小值的点也是博弈的纳什均衡。因此, 满足纳什均衡的策略分布 x 也是整个系统效用最小问题 $\min f(x) =$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} U_{ij}(x) \text{ 的解。}$$

5 算法实现

针对网络虚拟化环境中底层资源的动态选择博弈问题, 提出了一个基于模仿者动态的演化博弈算法, 算法的基本思想是: 在初始条件下, 每个群体中的虚拟网络随机选择一个策略, 底层网络根据当前的策略分布向虚拟网络通告该虚拟网络所在群体的平均效用, 每个虚拟网络将自身的效用与该虚拟网络所在群体的平均效用相比较, 如果当前的效用大于群体的平均效用, 则虚拟网络随机选择一个新的策略; 如果当前效用小于平均效用, 虚拟网络不需要改变当前的策略, 当任意群体中的虚拟网络不再改变自身的策略选择时, 此时演化达到了稳定状态, 算法结束。演化算法具体的流程如下。

1) 网络虚拟化环境中每个群体的虚拟网络随机选择一个物理路径作为初始策略。

2) 对任意群体 i 中的一个虚拟网络选择策略 j , 根据式(2)计算当前的效用值 $F_{ij}(x)$ 。

3) 底层网络根据当前的策略分布向群体 i 的所有虚拟网络通告群体 i 的平均效用, 如果当前虚拟网络的效用 $F_{ij}(x) > \bar{F}_i(x)$, 该虚拟网络生成一个随

机数 $rand()$, 如果 $rand() < \frac{(F_{ij}(x) - \bar{F}_i(x))}{\bar{F}_i(x)}$, 则虚拟

网络随机选择一个新的策略, 即 $k \neq j$, 使得 $F_{ik}(x) < F_{ij}(x)$ 。

4) 当任意群体中每个虚拟网络的效用不再发

生变化, 则算法终止, 否则回到 2) 继续演化。

网络虚拟化环境中底层资源动态选择博弈的演化算法伪代码描述如下。

Algorithm. Evolution game iteration algorithm:

Scenario:

Set populationSet = {1, 2, L, n};

Set policySet_{*i*} = {1, 2, L, m_{*i*}}, $\exists i = 1, 2, L, n$;

Set $v_i, \beta_i, \exists i = 1, 2, L, n$;

Initialization:

initialize value for

$x_{ij}, \exists i = 1, 2, L, n \text{ and } j = 1, 2, L, m_i$;

Iteration:

for each Population in the model

Compute the $F_{ij}(x)$ of each policy in the population by equation (1);

Compute the $\bar{F}_i(x)$ of the population by equation (5);

for each VN in the population

if $F_{ij}(x) > \bar{F}_i(x)$

if $rand() < \frac{(F_{ij}(x) - \bar{F}_i(x))}{\bar{F}_i(x)}$

Choose policy k , where $k \neq j$
and $F_{ik}(x) < F_{ij}(x)$;

end if

end if

end for

if x_{ij} never changed

break;

end for

6 数值仿真

6.1 仿真场景和参数设定

现在考虑一个具体的网络场景, 本文采用 Abilene 骨干网络作为底层网络^[15], 网络拓扑如图 2 所示, 其中, 链路旁边的函数为该链路的时延函数。考虑包含两个群体的演化博弈问题。假设虚拟节点映射到物理节点对 11-8 的所有虚拟网络构成群体 A, 虚拟节点映射到物理节点对 5-3 的虚拟网络构成群体 B。群体 A 中包含 100 个虚拟网络, 每个虚拟网络发送的流量为 $\beta_1 = 0.5$, 该群体中每个虚拟网络可选择的策略为物理路径 (策略 1) 11→9→8 和物理路径 (策略 2) 11→10→6→7→8。群体 B 包含 300 个虚拟网络, 每个虚拟网络发送的流量为

$\beta_2 = 0.2$ ，该群体中每个虚拟网络可选择的策略为物理路径（策略 1） $5 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3$ 和物理路径（策略 2） $5 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 。初始条件下，每个群体中选择不同策略的虚拟网络的数量是随机的，实验采用 MATLAB 进行仿真。

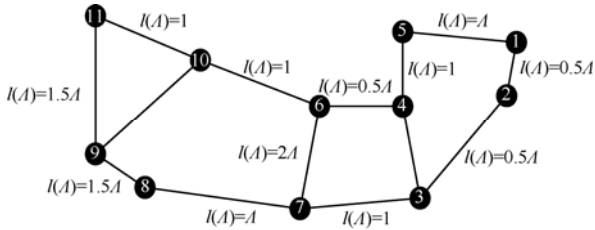


图 2 Abilene 骨干网络拓扑

6.2 数值结果分析

1) 演化博弈中虚拟网络策略的动态选择

图 3 用相平面图表示了虚拟网络在不同初始策略下的演化动态，其中，横轴表示群体 A 中选择策略 2（路径 $11 \rightarrow 10 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ ）的虚拟网络的数量占该群体虚拟网络总数的比例，纵轴表示群体 B 选择策略 1（路径 $5 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3$ ）的虚拟网络占该群体虚拟网络总数的比例。由图可知，随着演化的进行，群体在不同初始分布策略下的稳定点是一致的。

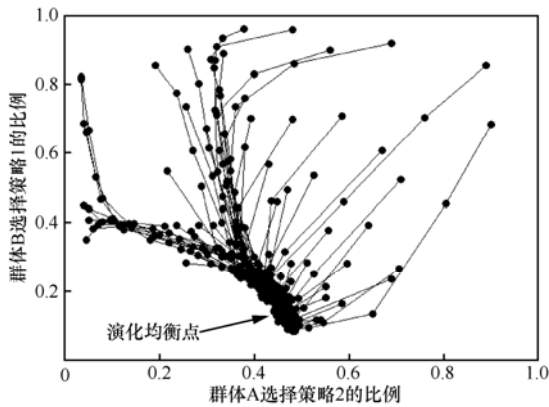


图 3 虚拟网络在不同策略选择下的演化过程

图 4 表示了固定初始策略下群体 A 中虚拟网络的策略选择最终趋向于稳定的过程。在初始状态下，由于群体中选择不同策略的虚拟网络的效用不平衡，大于群体平均效用的虚拟网络会调整自身的策略选择，所以整个群体 A 的策略不断变化，经过约 7 次迭代后，最终达到了一个稳定的状态，此时群体 A 中每个虚拟网络的效用是相等的。图 5 给出了在固定初始策略下，群体 B 中虚拟网络的策略选择最终趋向于稳定的过程。

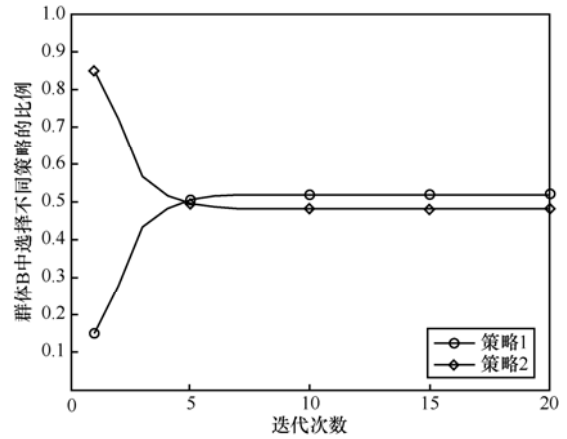


图 4 群体 A 中虚拟网络策略选择的演化过程

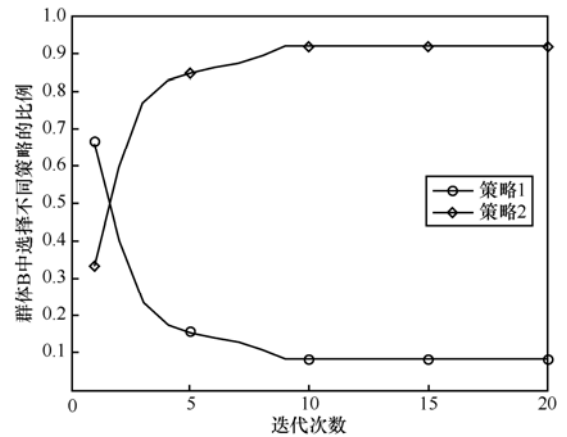


图 5 群体 B 中虚拟网络策略选择的演化过程

图 6 给出了固定群体 B 的策略分布的初始值，群体 A 在不同初始策略下的演化最终趋于稳定的过程。当群体 A 的初始策略分布分别为 (0.4, 0.6)、(0.5, 0.5)、(0.6, 0.4) 时，每个虚拟网络通过比较自身的效用和群体的平均效用进行策略更改，随着演化的进行，最终群体 A 中选择不同初始策略的虚拟网络的比率都趋向于一致。

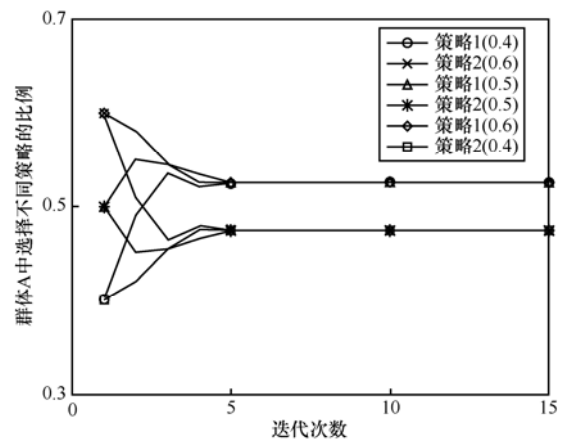


图 6 群体 A 的不同初始策略分布的演化过程

2) 同群体中虚拟网络的效用一致性

对于相同群体中选择不同初始策略的虚拟网络，演化的结果是无论选择哪种策略的虚拟网络，最终他们的效用都会达到一致。图 7 表示了在给定了群体 B 的初始策略分布下，群体 A 中选择不同初始策略的虚拟网络的演化过程。初始状态下，群体 A 的策略分布分别为 (0.4, 0.6)、(0.5, 0.5)、(0.6, 0.4)，经过多次演化后，群体 A 中的每个虚拟网络的效用趋于一致。

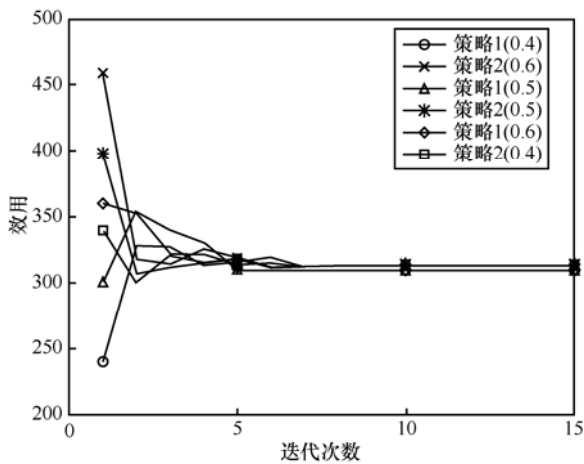


图 7 群体 A 中虚拟网络效用的一致性

3) 演化过程中系统总体效用的变化

图 8 给出了在其他群体初始值确定的情况下，当群体 A 中选择策略 1 的初始值分别为 0.4,0.6,0.8 时，系统总体效用随着演化过程的变化趋势。对给定的初始策略，系统的整体效用随着演化过程逐渐降低，直到在稳定点时系统的效用达到最低，且无论初始条件下的策略分布如何，在演化到达平稳点后，系统的整体效用都趋向一致，与理论证明的结果相吻合。

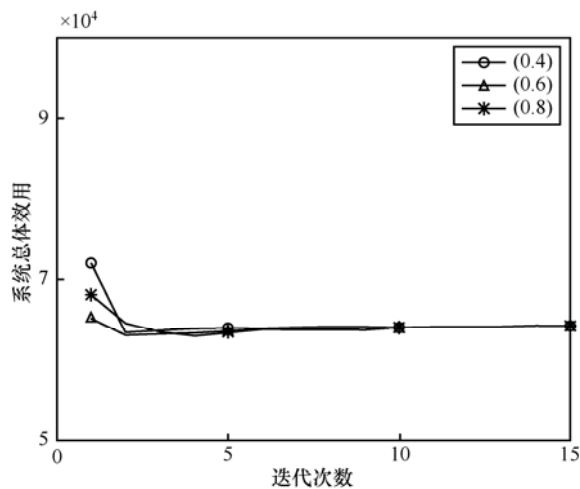


图 8 演化过程中系统总体效用的变化

4) 演化过程中底层网络的资源使用情况

图 9 给出了在固定初始策略下底层链路压力^[16] (link stress) 随着演化过程的变化情况，底层链路压力表示为底层链路所承载的虚拟网络的数量。图 9 中分析了群体 A 的策略 1 中的链路 11-9、群体 B 的策略 2 中的链路 1-2 和 2 个群体的共用链路 6-7 的压力变化情况。随着群体 A 和群体 B 中的虚拟网络的演化，底层链路的压力不断发生变化，经过约 9 次迭代后，群体中的虚拟网络不再改变自身的策略，到达稳定状态，此时底层链路的压力也不再改变。

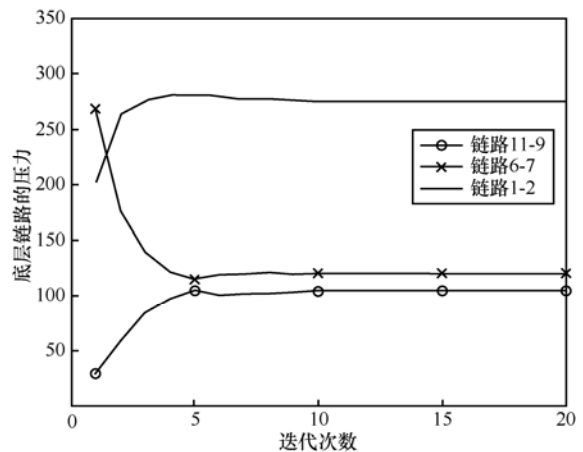


图 9 演化过程中底层链路的压力变化

7 结束语

本文在网络虚拟化的场景下，从虚拟网络的角度讨论了虚拟网络对底层资源的选择问题，把虚拟网络对底层网络的物理路径选择抽象成一个演化博弈模型，将映射到相同物理节点对（源节点和目的节点）的虚拟网络划分为一个群体，采用模仿者动态作为虚拟网络动态选择策略的机制，证明了模仿者动态是虚拟网络对底层资源选择博弈的合理策略更新机制。同时，采用势博弈理论分析了博弈的演化过程，构建了演化博弈的势函数，证明了演化的过程会收敛到一个稳定状态，并获得了演化稳定策略。最后，基于模仿者动态的原理，提出了一个演化算法，通过仿真实验，验证了该算法的有效性以及演化过程的收敛性。仿真结果表明，群体中选择不同策略的虚拟网络的效用最终会趋向于一致，达到稳定状态，符合理论分析的结果。本文只考虑了链路时延作为虚拟网络效用的博弈问题，多类别多需求的虚拟网络对底层网络的资源选择将是下一步的工作重点。

参考文献:

- [1] FEAMSTER N, GAO L, REXFORD J. How to lease the Internet in your spare time[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(1): 61-64.
- [2] YU M, YI Y, REXFORD J, *et al.* Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 17-29.
- [3] CHOWDHURY N M M K, RAHMAN M R, BOUTABA R. Virtual network embedding with coordinated node and link mapping[A]. IEEE INFOCOM[C]. Brazil, 2009. 783-791.
- [4] ZHOU Y, LI Y, SUN G, *et al.* Game theory based bandwidth allocation scheme for network virtualization[A]. Miami, Florida, USA, 2010 IEEE Global Telecommunications Conference[C]. 2010. 1-5.
- [5] WANG C, WANG C, YUAN Y. Game based dynamical bandwidth allocation model for virtual networks[A]. 2009 1st International Conference on, Information Science and Engineering[C]. Nanjing, China, 2009. 1745-1747.
- [6] NIYATO D, HOSSAIN E. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: an evolutionary game approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 2008-2017.
- [7] ALTMAN E, HAYEL Y, KAMEDA H. Evolutionary dynamics and potential games in non-cooperative routing[A]. The 5th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks and Workshops[C]. Limassol, Cyprus, 2007.1-5.
- [8] FISCHER S, V O CKING B. On the evolution of selfish routing[J]. Algorithms--ESA 2004, 2004. 323-334.
- [9] WEIBULL J W. Evolutionary Game Theory[M]. Cambridge: The MIT Press, 1997.
- [10] SANDHOLM W H, EBRARY I. Population Games and Evolutionary Dynamics[M]. Cambridge: MIT Press, 2010.
- [11] TAYLO R P D, JONKER L B. Evolutionary stable strategies and game dynamics[J]. Mathematical Biosciences, 1978, 40(1): 145-156.
- [12] SANDHOLM W H. Potential games with continuous player sets[J]. Journal of Economic Theory, 2001, 97(1): 81-108.
- [13] KAPORIS A C, SPIRAKIS P G. The price of optimum in stackelberg games on arbitrary single commodity networks and latency functions[A]. Proceedings of the eighteenth annual ACM symposium on Parallelism in algorithms and architectures[C]. Cambridge, USA, 2006.19-28.
- [14] SHAKKOTTAI S, ALTMAN E, KUMAR A. The case for non-cooperative multihoming of users to access points in IEEE 802.11 WLANs[A]. IEEE Infocom[C]. Barcelona, Spain, 2006.1-12.
- [15] Abilene backbone[EB/OL]. <http://abilene.internet2.edu>, 2012.
- [16] ZHU Y, AMMAR M. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[A]. IEEE INFOCOM[C]. Barcelona, Spain, 2006.1-12.

作者简介:



杨宇 (1984-), 男, 山西吕梁人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为网络虚拟化、博弈论和 SDN 网络等。



陈山枝 (1969-), 男, 浙江台州人, 电信科学技术研究院高级工程师, 主要研究方向为移动性管理、自组织网络和网络生存性等。



李昕 (1976-), 男, 河南安阳人, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为下一代互联网技术、网络生存性技术、媒体网络技术。