

基于博弈论的服务覆盖网络资源定价方法

郑明春^{1,2}, 杨寿保¹, 刘希玉²

(1. 中国科学技术大学计算机科学与技术学院, 安徽合肥 230027; 2. 山东师范大学管理与经济学院, 山东济南 250014)

摘要: 服务覆盖网络 Service Overlay Networks (SON) 是一种建立在基础网络之上的虚拟网络, 它购买基础网络的资源, 并向用户提供跨域的 QoS 敏感的增值服务而获取效益, 因此, 网络资源定价是 SON 健康运作的 key 问题. 基于博弈论方法研究了 SON 在弹性需求下的网络资源定价问题. 描述了一种 SON 结构, 然后建立了双层规划模型描述 SON 资源定价问题, 模型考虑了拥塞和 QoS 对目标的影响. 上层模型以 SON 收益与成本之差最大化为目标, 下层是 Wardrop 用户均衡模型. 设计了在没有精确的拥塞度量函数、需求函数的情况下, 采用 Trial-and-error 方法和差分灵敏度分析方法结合的启发式求解算法, 算例分析验证了模型的收敛性和合理性.

关键词: 服务覆盖网络; 博弈论; QoS; 资源定价; Wardrop 用户平衡

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2010.04.017

A resource pricing method based on game theory for service overlay networks

ZHENG Mingchun^{1, 2}, YANG Shoubao¹, LIU Xiyu²

(1. School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. College of Management and Economy, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: Service overlay network (SON) is a virtual service network built on underlying network. It purchases resource from the underlying network and provides cross-domain and QoS sensitive value-added services to gain profits. Resource pricing is thus a key problem for the SON operator. This paper is devoted to the study of the problem of resource pricing with elastic demand based on game theory. After giving a SON architecture, the pricing problem was formulated in a bilevel programming model taking the effect of congestion and QoS on objective into consideration. The upper level model aims to maximize the difference between the revenues and the cost of the whole SON system, while the lower level model is a Wardrop user equilibrium model with elastic demand. A heuristic solution algorithm based on the trial-and-error procedure and difference sensitivity analysis method is designed for the proposed bilevel programming model when precise link congestion metric function and demand function are unknown. Numerical examples are also performed to illustrate the convergence and effectiveness of the bilevel programming model.

Key words: service overlay networks; games theory; QoS; resource pricing; Wardrop user equilibrium

收稿日期: 2008-12-17; 修回日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(60873058), 山东省自然科学基金和山东省泰山学者基金资助.

作者简介: 郑明春, 女, 1963年生, 教授. 研究方向: Internet 服务质量, 流量控制和拥塞控制. E-mail: zhengmc@ustc.edu.cn

通讯作者: 杨寿保, 教授. E-mail: syang@ustc.edu.cn

0 引言

IP 网络已经成为承载各种数据传输的高速公路,各种新型的应用大量涌现,尤其是如 VoIP、VOD 等以多媒体传输为主要通信量的应用使传统的尽力传递型的互联网设计遇到了严重的挑战.由于互联网的基础是由若干相互连接的自治系统 AS (autonomous system) 构成的,而 AS 的经营者 ISP 是互相独立的,他们只能在自己的管辖域提供 QoS 服务,因此,各种应用的 QoS 需求难以实现跨域的端到端的保证. IAB 也指出,Internet 尚没有有效的端到端的 QoS 保证.

为此, Duan 等^[1]学者提出了服务覆盖网络 SON (service overlay network) 的概念,它是在现有 IP 基础网络之上建立的虚拟网络, SON 经营者向 ISP 购买具有一定带宽保证的链路构成跨区域的虚拟覆盖网,然后向用户提供端到端 QoS 保证的增值服务而获得效益,依据服务等级合同 SLA (service level agreement), SON 经营商与 ISP、其他 SON 经营者和其服务的用户之间建立经济关系,通过在 Overlay 网络结点上部署有效的管理设施,实现端到端 QoS. 由于实现了网络服务与底层设施的分离,因此 SON 的建立使跨区域的端到端的 QoS 体系的部署成为可能.

对于服务覆盖网络来说,一方面 SON 必须通过提供优质服务获取效益,因此,精致的定价方案是 SON 健康运作的关键;另一方面,由于 SON 提供商可以通过在少数结点上部署跨域的 QoS 管理设施,因此其定价方案的实施更加合理和方便.

关于基础网络资源分配和定价研究已经有许多有意义的工作^[2-4],其中一些文献提出了拥塞定价的方法^[2,4],这些方法对于网络流量控制起到了很好的作用.但是,SON 的资源服务的经济模型与基础网络研究有不同之处:一是 SON 介于 ISP 和终端用户之间,其经济关系不同;二是由于 SON 的资源定价与分配问题只涉及虚拟链,其服务质量的度量不能依赖精确的基础网络性能数据;其三,基础网络的资源定价方案假设在一段较长时间内(如 24 小时)用户的需求总和是相对稳定的,需求的变化与用户的习惯有关,拥塞定价的目的是用经济手段干涉用户的习惯,调节高峰时段的流量.而 SON 则不同,它们的服务对象是对通信具有高质量要求的用户,用户的接入需求总量是与服务质量相关的,拥塞定

价的作用不仅能调节高峰时段流量,而且能实现虚拟链路流量的优化分配,达到用户与 SON 利益的博弈平衡.为此,最近,学者们开始关注 SON 经济模型的研究^[5-7].文献[5]中提出了两个模型,一个模型确定选择哪些结点作为 SON 结点使 SON 安装成本最低,另一个模型计算使 SON 效益最大化的预留虚拟链带宽;文献[6]中提出了一种考虑了影子价格的 SON 带宽优化分配模型;文献[7]中则针对模型解过程复杂的问题,提出了一种基于随机过程的带宽提供优化模型,并用梯度方法求出了模型的解.这些工作主要集中于带宽分配问题,而 SON 资源定价的研究尚未见报道.

根据以上分析,本文基于博弈论方法,研究了 SON 的资源定价问题,其目标是在弹性需求条件下,求出使 SON 效益最大化的资源定价方案,以激励 SON 服务商部署 QoS 机制.同时,本文着重解决了在没有精确的需求函数和网络拥塞度量函数的前提下,得到模型优化解的方法.

1 SON 结构

SON 建立的目的是使网络应用服务与网络基础设施分离,降低服务管理与 QoS 控制的复杂性,使 SON 有能力开发面向用户的有特色的服务.本文设计了一种适合该需求的 SON 的体系结构,如图 1 所示. SON 的结点(也称服务网关)分布在不同的自治域 AS 中,或者位于域之间独立于 AS,它们可以是边缘网关结点,也可以是内部结点,本文假设 SON 结点的位置是预先确定的, SON 结点之间构成虚拟链,这些虚拟链由底层基础网络的若干具有一定带宽保证的实际物理链路支持, SON 服务提供

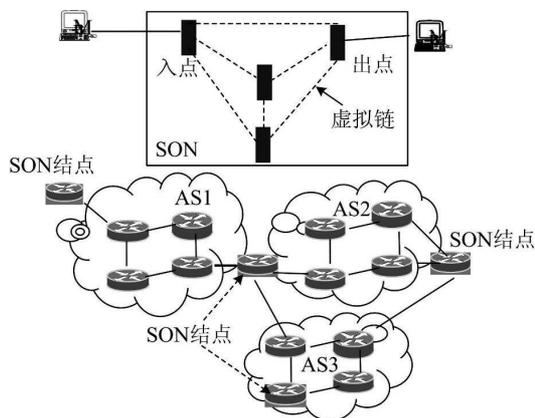


图 1 服务覆盖网络体系结构

Fig. 1 Service overlay network architecture

商按照 SLA 协议购买这些物理链路, SON 可以在选定的 SON 结点上部署很少的控制设施, 保证 SON 的服务性能. 在 SON 中, 从发送端到接收端构成一条虚拟路径, 在每一条虚拟路径上, 定义发送端接入网络中第一个 SON 结点为入点, 接收端最后一个 SON 结点为出点. 在入口结点, 到达的分组首先按应用分类聚集, 进行接纳控制, 并负责监视聚集的速率, 调节通信量的输出速率, 出点记录到达的分组, 向入点进行反馈.

2 SON 定价问题

SON 定价研究的目的是通过合理的定价方案的实施, 在保证用户的 QoS 需求的前提下, 实现服务网络利益最大化. 本文研究的定价方案考虑了网络拥塞和服务质量对目标的影响.

SON 空间是一个由虚拟链集合 A 和 SON 结点集合 R 构成的图 $G, G=(R, A)$. 设 $a=(r_1, r_2)$ ($r_1, r_2 \in R$), 表示 SON 管理的结点 r_1 到 r_2 之间的一段虚拟链路, \bar{R} 表示 SON 入口结点的集合, $\bar{A}=\{a=(r_1, r_2) \mid r_1 \in \bar{R}, r_2 \in R\}$ 表示连接入口结点链路的集合, 以下称入口链路集合. 假设在测量时隙 t 内, SON 向请求接入 SON 的用户提供每单位带宽价格是 ω , 同时, 在所有虚拟链路上, SON 需要向 ISP 交纳租用基础网络的费用, 函数 $\varphi(c)$ 表示每租用 c 数量带宽需要支付的费用, 如果用 B 表示由于 SON 没有达到 SLA 约定的服务质量而支出的惩罚成本, S 表示由于用户过量使用瓶颈资源而对用户加收的服务费, 即拥塞收费, 则 SON 最终收益可以表示为 W :

$$W = \sum_{a \in A} \omega v_a + S - \sum_{a \in A} \varphi_a(\bar{C}_a) - B \quad (1)$$

其中, \bar{C}_a 是任意链路 a 最大容量, v_a ($a \in \bar{A}$) 是入口结点接入的流量需求. SON 的最优资源定价方案 ω 可以通过解优化模型(P1)得到:

$$(P1) \quad \max W \quad (2)$$

本文假设 SON 拥有的资源是静态的, 即 \bar{C}_a 是不变的, 且 $\varphi(c)$ 是线性的情况. 根据 Low 和 Lapsley 的研究^[8], 如果网络提供商根据观察到的网络需求确定一种使自己利益最大化的价格方案并以此为依据进行资源分配, 用户会立即在此方案下调整自己的网络需求以达到其效用最大化, 假定用户的行为是“近视”的, 即他们不考虑其他用户对他们的行为的反应, 这种行为被称为不协作的博弈. Low 等的研

究显示, 假如网络调节价格的周期足够长, 系统会再次趋向于使提供商利益最大化的解, 这个过程的多次反复, 将趋于 Nash 均衡. 进一步, Ganesh 等^[2]应用不动点理论求出了 Nash 均衡时资源定价, 并解释了一个有启发意义的结论: 在大系统条件下, Nash 均衡与 Wardrop 均衡^[9]是等价的. 但是, Ganesh 等的模型只是间接地考虑了丢包率对网络定价的影响, 而且没有进一步研究网络服务质量保证问题. Wardrop 用户平衡 UE (user equilibrium) 模型是典型的不协作的博弈模型, 虽然 UE 模型整体上没有确切的经济意义, 但是它刻画了平衡状态下网络需求、资源分配的关系, 这启发我们用 Wardrop 用户平衡理论研究 SON 定价问题. 另一个有趣的工作是 Meng 等^[10]在交通规划研究中提出的 Trial-and-error 定价方法, 他们解决了在没有精确的需求函数的情况下, 求解平衡状态下定价的问题.

以上分析说明: 由于 SON 系统是一个典型的复杂系统, 基于价格的市场博弈将达到 Wardrop 用户均衡.

3 模型描述和解

我们将 SON 定价问题看作一个有多用户参与的博弈系统, SON 制定收费方案, 用户根据收费方案和网络服务质量状况, 决定自己的资源需求, SON 管理者再根据用户对于上次决策的反应调整收费方案, 如此反复, 最终达到系统平衡, 我们用双层数学规划描述该问题.

上层规划以网络收益与网络成本之差最大化为目标, 即上述的(P1)模型, 下层模型是 Wardrop 用户平衡模型. 借助 Trial-and-error 方法, 在不需要精确给出需求函数、拥塞度量函数的情况下, 应用投影梯度方法, 在可行解方向, 交互得到下层模型中链路流量需求和拥塞价格. 最后, 应用差分灵敏度分析法, 求解双层模型, 得到 SON 的最优定价方案.

首先说明以下用到的符号: P 表示 SON 从入点到出点之间的路径(记为 $I-O$ 对)的集合; R_p 表示 $I-O$ 对 p ($p \in P$) 上所有 SON 结点的集合; v_a 表示虚拟链 a 上的通信量需求; d_p 表示 $I-O$ 对 p 上的需求; f_r^p 是在路由器 r 上的属于 p 上的通信量, $r \in R_p, p \in P$; A 表示瓶颈链路的集合, $A \subset A$; γ_a 表示 SON 虚拟链 a 上每租用单位带宽, 需要支付给 ISP 的费用. 并且, 假设问题前提如下:

(I) 用户与 SON 提供商签订包括 QoS 的

SLA 协议, SON 管理的服务网关具有 QoS 选路的能力.

(II) QoS 性能包括带宽、时延和抖动等, 在 SON 中, 我们将这些参数都转化为时延表示, 作为 QoS 的度量, 称为广义时延, 定义虚拟链路上的广义时延是一个关于通信量的非负的、严格递增的并且连续可导的函数, 记为: $t_a(\nu_a)$.

(III) SON 与用户约定一致的双向惩罚原则: 一方面, 在瓶颈链路上, 当负载超过一个预先设定的拥塞负载门限时, 则向用户加收服务费, 以使用户尽量避免在拥挤的时段, 访问热门的地址, 这种服务费按广义拥塞时延的度量收取, 记为 τ ; 另一方面, 在所有路段, 如果服务质量没有达到 SLA 约定, 则 SON 供应商需要向用户支付违约金, 费率是 π , 称为惩罚费率. 通常认为, 一般情况下, 拥塞是链路负载超过链路能力引起的, 经验表明(如图 2), 当链路负载达到膝点“Knee”时, 网络性能开始下降, 当负载到达崖点“Cliff”时, 网络由于拥塞而崩溃. 因此, 我们设定 $\nu_a = \bar{C}_a \eta_a$ 为膝点, 当 $\nu_a \geq \bar{C}_a \eta_a$ 时, 拥塞时延 $\mu_a > 0$.

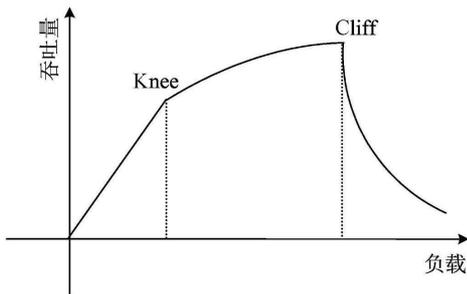


图 2 拥塞原理

Fig. 2 Congestion principle

(IV) 对每一个 I-D 对 $p \in P$, 需求函数 $d_p = D_p(x_p)$ 是一个关于广义时延 x_p 的非负的、严格减少的、有界的并且连续可导的函数.

(V) 链路 a 上的通信量需求是一个与 SON 收费方案有关的函数 $\nu_a = V(\omega, \lambda, \pi)$, 其中 ω 是 SON 向接入用户提供单位资源的价格, λ 是所有瓶颈链路的每单位带宽拥塞价格向量, π 是 SON 的 QoS 违约惩罚费率.

3.1 上层规划

上层规划的目标是网络收益与网络成本之差最大化, 约束条件是入口链路接纳的业务量不超过 SON 规定的带宽分配上限, 细化模型(P1)得到上层规划模型(P2):

$$(P2) \quad \max F(\omega, \nu, \lambda) = \sum_{a \in A} \omega \nu_a + \sum_{a \in A} \nu_a \lambda_a - \sum_{a \in A} \gamma_a \bar{C}_a - \sum_{a \in A} \nu_a \pi \omega \rho_a \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \omega \geq 0 \quad (4)$$

$$\nu_a \leq \bar{C}_a \eta_a, \quad a \in A \quad (5)$$

公式(3)的第一项是 SON 的利润, 因为 SON 的利润仅仅与接入的通信量有关, 所以, SON 的收益仅来自入口链路; 第二项表示用户在瓶颈链路上由于过量使用资源而多支付的服务费, 即拥塞支出; 第三项是购买基础带宽的成本; 第四项表示 SON 没有达到 SLA 约定的服务质量而支出的惩罚成本, ρ_a 是违约概率, 我们参考 REM 算法中的标记概率的计算方法^[11], 定义链路 a 的违约概率:

$$\rho_a = (1 - \varphi^{\nu_a}), \quad a \in A \quad (6)$$

$\zeta > 0, \varphi > 1$ 是常数. 同第一项一样, 第四项也只对入口结点接入的通信量进行计算. 公式的约束条件表示入口链路接入的通信量必须小于其链路分配阈值.

3.2 下层规划

我们用具有弹性需求的 Wardrop 用户平衡模型(UE)作为下层规划, 目标是在某种定价方案 ω 确定的前提下, 求解最优拥塞定价方案 $\lambda^* = (\dots, \lambda_a^*, \dots)^T (a \in A)$, 并得到平衡状态下各虚拟链路的通信需求量. 下面首先说明 SON 系统满足 UE 平衡条件.

令 $C_a = \eta_a \bar{C}_a$, 根据假设(III), C_a 是拥塞“膝点”, 拥塞收费应该从“膝点”开始, 即最优拥塞定价应该满足以下公式:

$$\lambda_a^* = 0, \quad \text{如果 } \nu_a(\lambda^*) < C_a, \quad a \in A \quad (7)$$

$$\lambda_a^* \geq 0, \quad \text{如果 } \nu_a(\lambda^*) = C_a, \quad a \in A \quad (8)$$

瓶颈链路上广义时延是:

$$\bar{t}_a(\nu) = t_a(\nu) + \mu_a, \quad a \in A \quad (9)$$

其中, μ_a 是拥塞产生的广义时延, 以下简称为拥塞时延, 根据假设(I)和(II), 用户通信量分组被转发的路径将是最小时延路径, 即

$$\sum_{a \in A} t_a \delta_{ar}^p + \sum_{a \in A} \mu_a \delta_{ar}^p = l_a, \quad \text{if } f_r^p > 0, \quad r \in R_p, \quad p \in P \quad (10)$$

$$\sum_{a \in A} t_a \delta_{ar}^p + \sum_{a \in A} \mu_a \delta_{ar}^p > l_a, \quad \text{if } f_r^p = 0, \quad r \in R_p, \quad p \in P \quad (11)$$

$$D_p^{-1}(d_p) = u_p, \quad \text{if } d_p > 0, \quad p \in P \quad (12)$$

$$D_p^{-1}(d_p) > u_p, \quad \text{if } d_p = 0, \quad p \in P \quad (13)$$

其中, f_r^p 是在收费方案 λ^* 下 $I-O$ 对 p 上的流量; l_p 是 p 上的最小广义时延; δ_a^p 是指示参数, 当路由器 r 在 p 上, 且包含链路 a 时等于 1, 否则等于 0. 式(9)~(13)说明, 在 SON 达到稳定状态时, 用户被分配了一条广义时延最短的路径, 即用户获得了最好的 QoS 服务, 这与 UE 的条件是一致的, 该问题可以用数学模型(P3)表示:

$$(P3) \quad \min F(v, d) =$$

$$\sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(x) dx - \sum_{p \in P} \int_0^{d_p} D^{-1}(y) dy \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{r \in R_p} f_r^p = d_p, \quad p \in P \quad (15)$$

$$v_a = \sum_{p \in P} \sum_{r \in R_p} f_r^p \delta_a^p, \quad a \in A \quad (16)$$

$$v_a \leq C_a, \quad a \in A \quad (17)$$

$$f_r^p \geq 0, \quad r \in R_p, \quad p \in P \quad (18)$$

其中, d_p 是在测量时间 t 内路径 p 上的需求. (P3) 是非线性严格凸规划, 因此其最优目标函数解是唯一的, 由式(7)~(8)和式(10)~(13)可知, $K-T$ 条件成立, 所以, 存在链路最优负载分配方案 $v_a(\lambda^*)$ 和路径上的弹性需求 $d_p(\lambda^*)$, 使 SON 性能最优, λ^* 就是最优拥塞收费方案.

考虑了带宽约束公式的拉格朗日函数是

$$L(v, d, \mu) = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(x) dx + \sum_{p \in P} \int_0^{d_p} D^{-1}(y) dy + \sum_{a \in A} \mu_a (v_a - C_a) \quad (19)$$

其对偶规划(P4):

$$(P4) \quad \max_{\mu \geq 0} \varphi(\mu) \quad (20)$$

$$\varphi(\mu) = \min L(v, d, \mu) \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{r \in R_p} f_r^p = d_p, \quad p \in P \quad (22)$$

$$v_a = \sum_{p \in P} \sum_{r \in R_p} f_r^p \delta_a^p, \quad a \in A \quad (23)$$

$$f_r^p \geq 0, \quad r \in R_p, \quad p \in P \quad (24)$$

根据文献[12], 有以下结论:

(I) $\varphi(\mu)$ 是凹的, 并且是连续可导的函数, 且有

$$\partial \varphi(\mu) / \partial \mu_a = v_a(\mu) - C_a, \quad a \in A \quad (25)$$

(II) 设 Γ^* 是(P3)规划全部优化解的集合, 令 $\mu^* \in \Gamma^*$, 则 $(v(\mu^*), d(\mu^*))$ 是(P3)的唯一最优解, μ^* 是最优的拉格朗日乘子.

实际上, 带有带宽约束的、弹性需求的用户平衡公式中拉格朗日乘子 μ_a 就是链路 a 上由排队引起

的延迟, 在 SON 中, 就是拥塞引起的时延.

设拥塞价格 $\lambda^* = \mu^* * \tau$, τ 是前面假设(III)提到的拥塞费率, 所以 SON 拥塞定价问题可以通过解(P4)规划得到. 由公式(25)可以看出, (P4)规划的拉格朗日乘子的梯度可由链路流量 $v_a(\mu)$ 减去链路容量上限 C_a 得到, 在任意的虚拟瓶颈链路 a 上, 对某种确定的拥塞收费方案 λ_a , 通过观察 SON 管理的虚拟结点可以得到 v_a , 因此, 我们采用文献[10]提出的 Trial-and-error 的方法容易找到最优拥塞定价 λ^* . 为此, 构造迭代公式:

$$\mu_a^{(k+1)} = \max \{ \mu_a^{(k)} + \beta_k (v_a^{(k)} - C_a), 0 \}, \quad a \in A \quad (26)$$

其中, $\beta_k > 0$, $\sum_{k=1}^{\infty} \beta_k = \infty$, $\sum_{k=1}^{\infty} \beta_k < \infty$

$$\beta_k = \frac{\alpha}{k}, \quad k = 1, \dots, \infty, \quad \alpha > 0 \quad (27)$$

容易验证, 式(26)符合投影梯度运算, 并且 μ_a 收敛到最优解 μ_a^* . 由式(26)得到:

$$\lambda_a^{(k+1)} = \max \{ \lambda_a^{(k)} + \beta_k \tau (v_a^{(k)} - C_a), 0 \}, \quad a \in A \quad (28)$$

Trial-and-error 算法如下:

Step 1 给出一种拥塞收费方案 $\{\lambda_a, a \in A\}$ 作为初始向量, 令 $0 < \beta_1 \leq 1, k=1$;

Step 2 观察 SON 瓶颈链路上结点通信量, 得到 $\{v_a^{(k)}, a \in A\}$;

Step 3 更新收费拥塞方案: $\lambda_a^{(k+1)} = \max \{ \lambda_a^{(k)} + \beta_k \tau (v_a^{(k)} - C_a), 0 \}, a \in A, \beta_k$ 满足式(27);

Step 4 假如 $\|\lambda^{(k+1)} - \lambda^{(k)}\| < \epsilon$, 那么迭代停止, 否则令 $k=k+1$ 转 Step 2.

其中, $\|\cdot\|$ 表示欧氏模, $\epsilon > 0$ 是一个很小的预先设定的大于零的实数. 至此, 下层规划的解完成, 得到平衡状态下的瓶颈链路通信量向量需求 $v^* = (\dots, v_a^*, \dots)^T (a \in A)$ 和最优拥塞收费方案向量 $\lambda^* = (\dots, \lambda_a^*, \dots)^T (a \in A)$. 实际上, 我们可以同时得到平衡状态下所有虚拟链路的通信量需求向量.

3.3 基于差分灵敏度的启发式求解算法

一般而言, 双层规划问题是一个 NP 问题, 不存在多项式求解算法, 因此, 人们通常采用启发式算法, 如基于灵敏度的分析方法^[13]. 在双层规划模型中使用灵敏度分析方法的关键是计算平衡路段流量对资源定价 ω 的导数, 然后, 找出平衡链路流量与

收费标准价格 ω 之间近似的线性关系. 设 ω^* 为某一次定价标准, $v_a(\omega^*)$ 为相应的平衡链路流量, 则 v_a 的一阶泰勒展开为

$$v_a(\omega) = v_a(\omega^*) + \sum_{a \in A} \left[\frac{\partial v_a(\omega)}{\partial \omega} \right]_{\omega=\omega^*} (\omega - \omega^*), \quad a \in A \quad (29)$$

将上式代入上层规划中, 则上层问题就变为一个以 ω 为变量的普通的非线性规划问题, 可以用已有的方法求解. 对于求出的新的最优解, 再一次求解下层模型, 得到新的平衡链路流量需求, 重复这个过程, 则有望收敛于双层规划的最优解. 但是, 该算法求解的前提是必须找到平衡链路流量需求关于价格 ω 的精确的连续函数, 且该函数存在一阶偏导数, 这在实际中是很难找到的. 然而由偏导数的定义可知偏导数就是函数在某个自变量处的变化率, 由此自然想到, 我们可以利用求解平衡条件下的链路流量对价格变化量的差商作为用户平衡条件下的链路通信量对价格变化的偏导数的近似值. 这样我们既可避免精确的需求函数和偏导数不存在的情形, 又可避免利用灵敏度分析法求偏导数过程中的一些繁琐的解析计算, 实际上, 虚拟链路上通信量需求的变化反映了用户对于当前价格和服务质量做出的反应, 这种启发式交互过程符合市场博弈的原理. 用差分灵敏度方法求解问题的基本思路如下:

首先利用惩罚函数法将上层模型化为无约束的规划问题, 得到模型 (P5), 它与 (P2) 有相同的最优解.

$$(P5) \quad \min F(\omega, M_i) = - \sum_{a \in A} \omega v_a - \sum_{a \in A} v_a \lambda_a + \sum_{a \in A} \gamma_a \bar{C}_a + \sum_{a \in A} v_a \pi \omega^0_a + M_i P(v) \quad (30)$$

$$P(v) = \max(0, -w)^2 + \sum_{a \in A} \max(0, (v_a - \bar{C}_a \eta_a))^2 \quad (31)$$

其中, M_i 是惩罚因子, 满足:

$$0 < M_1 < M_2 < \dots < M_i < \dots, \lim_{i \rightarrow \infty} M_i = +\infty$$

对给定的惩罚因子 $M_i > 0$ (开始取 $M_i = 2$), 假定初始价格是 ω , 收费方案的变化量是 $\Delta\omega$, 进行探测搜索, 利用 Trial-and-error 方法求解下层模型, 得到各条虚拟链路通信量需求向量的变化量 $\{\Delta v_a\} (a \in A)$, 进而得到可以作为微商 $\frac{\partial v_a(\omega)}{\partial \omega}$ 的近似值的差商

$\frac{\Delta v_a(\omega)}{\Delta \omega}$, 然后将式 (29) 改写成差分公式:

$$v_a(\omega) \approx v_a(\omega^*) + \sum_{a \in A} \left[\frac{\Delta v_a(\omega)}{\Delta \omega} \right] (\omega - \omega^*) \quad (32)$$

将式 (32) 带到上层模型 (P5) 中, 这时, 我们可以用惩罚函数求解这个非线性规划问题, 然后求解 (P5) 得到该惩罚因子 M_i 下的最优价格解. 如果找到一个解后发现 $\omega < 0$, 或者入口链路流量大于带宽分配阈值的情况, 则增大惩罚因子 M_i 的值, 令 $M_{i+1} = M_i * 2$, 再解上层模型, 直到满足条件, 重复上述过程, 则有望收敛于双层规划的最优解, 即找到最优资源定价 ω . 算法步骤如下:

Step 1 设网络资源收费标准的初始值 ω , 令迭代次数 $k=0$;

Step 2 对于给定的 ω^k , 用 Trial-and-error 方法求解下层问题, 得到平衡状态下链路需求 $v_a^k (a \in A)$ 和拥塞定价 $\lambda_a^k (a \in A)$;

Step 3 利用差分灵敏度法计算平衡状态下每条虚拟链路需求量对定价的差商 $\frac{\Delta v_a(\omega)}{\Delta \omega} (a \in A)$;

Step 4 将式 (32) 带入上层目标函数中, 用惩罚函数法求解上层问题, 得到一组新的收费定价 ω^{k+1} ;

Step 5 如果 $\max |\omega^{k+1} - \omega^k| \leq \epsilon$, 则停止, ϵ 为迭代精度; 否则, 令 $k=k+1$, 转 Step 2.

需要说明的是: 一般地, 由于双层规划问题本质上的非凸性, 基于差分的近似求解算法求得的收敛点可能是局部最优解, 但是本文中差分灵敏度公式代入上层模型后是一个典型的二次规划, 所以利用该方法可以得到双层规划的最优解.

4 算例分析

为了说明算法的有效性, 我们进行了算例分析. 模拟实验设计了一个简单的拓扑结构如图 3 所示, 链路容量见表 1, 其中, 结点 A 是入点、D 是出点, 链路 5 是拥塞收费链路.

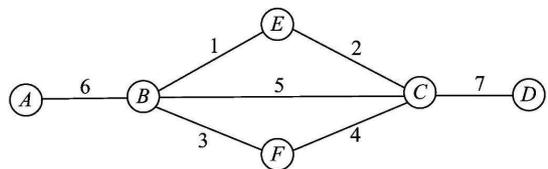


图 3 模拟实验网络拓扑

Fig.3 The network topology for the simulation example

表 1 链路参数
Tab.1 Parameters of links

链路号	链路容量/Mbps	带宽分配率阈值初值
1	50	0.5
2	30	0.8
3	30	0.8
4	30	0.8
5	40	0.8
6	100	0.8
7	100	0.8

算例 4.1 下层模型的收敛性. 按照算法的设计, 下层模型通过观察 SON 瓶颈链路的流量, 交互得到拥塞收费最优解. 为了测试算法, 我们在实验中假设了广义时延函数和需求函数, 然后应用 Frank-Wolfe 算法求解 (P4) 规划, 这些工作在应用 Trial-and-error 算法时是不需要的. 设每条链路路上的初始广义时延函数和广义时延函数被假设为式 (33), (34):

$$t_0 = \frac{l}{C_a * \eta_a} \tag{33}$$

$$t = t_0 \left[1 + 0.06 * \left(\frac{v_a}{C_a * \eta_a} \right)^3 \right] \tag{34}$$

式中, l 是发送数据包的长度.

图 4 显示了下层模型的收敛性, 从图中可以看出 α (见式 (27)) 对于算法的收敛性影响不大, 并且在收敛稳定状态, 瓶颈链路的负载确实满足约束条件, 即在 32 Mbps 之下.

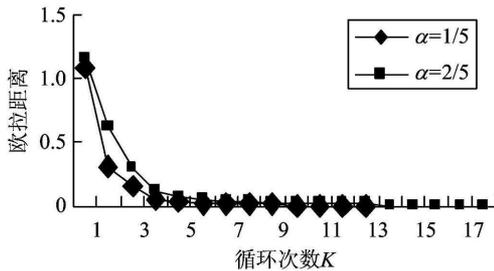


图 4 下层模型的收敛性

Fig.4 The convergent trend of lower model

算例 4.2 双层模型性能分析. 为了分析模型性能, 我们在上层模型中也假设了需求函数, 该函数只考虑了定价对需求的影响(式 (35)), 并在下层模型中假设用户需求仅对 ω/π 敏感.

$$v_a^{k+1} = \beta_a^k \exp(-0.005 * \omega) \tag{35}$$

求偏导数:

$$\frac{\partial v}{\partial \omega} \Big|_{\omega=w^*} = (-0.005) v_a^k \beta \exp(-0.005 * \omega) \tag{36}$$

将式(36)代入式(29), 然后解(P5), 用惩罚函数法求解上层模型, 得到最优解 ω .

图 5 表明了 SON 收益与带宽分配率之间的关系. 从图中可以看出, 开始时, 随着入口链路带宽分配率的增加, 入口链路流量增加, 所以, SON 收入呈增加趋势, 当 η 达到某个值(图中是 0.76)时, SON 收入达到最大, 随后随着 η 增加, SON 收入急剧下降, 然后在较低水平上呈摆动状态. 这是因为 η 较高时, SON 违约概率增大, 而且, 由于进入网络的流量增大, 拥塞价格迅速增加, 因此, 拥塞价格与网络定价比迅速加大, 用户的需求减少, 所以, SON 收入急剧减少, 这与算法的设计相吻合. 图 6 则显示了双层模型的收敛性, 实验显示, 各种参数的变化对网络定价影响很小, 说明模型是稳定的.

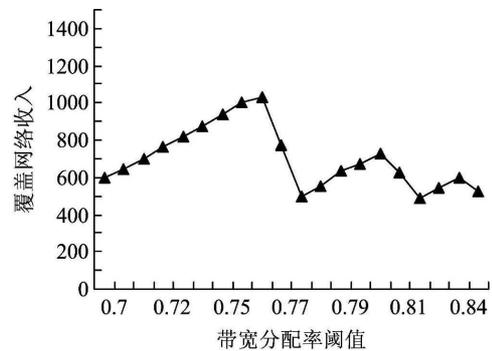


图 5 SON 收入随带宽分配率阈值变化

Fig.5 Changes of SON's revenue with different bandwidth utilization threshold

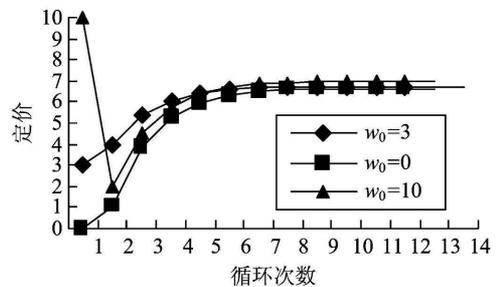


图 6 双层模型的收敛性

Fig.6 The convergent trend of bilevel programming model

5 结论

针对服务覆盖网络 SON 的资源定价和分配问

题,本文用博弈论方法研究了 SON 经济模型,提出了适合 SON 的资源定价的双层规划模型.算例分析的求解过程用 VBA 完成,结果表明,该算法是合理和有效的.

参考文献(References)

- [1] Duan Z H, Zhang Z L, Hou Y W. Service overlay networks: SLA, QoS, and bandwidth provisioning[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(6): 870-883.
- [2] Ganesh A, Laevens K, Steinberg R. Congestion pricing and noncooperative games in communication networks[J]. Operations Research, 2007, 55(3): 430-438.
- [3] Lee J W, Chiang M, Calderbank A R. Price-based distributed algorithms for rate-reliability tradeoff in network utility maximization [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(5): 962-976.
- [4] Stidham S, Jr. Pricing and congestion management in a network with heterogeneous users [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(6): 976-981.
- [5] Capone A, Elias J, Martignon F. Routing and resource optimization in service overlay networks[J]. Computer Networks, 2009, 53(2): 180-190.
- [6] Lam N, Dziong Z, Mason L. Network capacity allocation in service overlay networks[C]//Proceedings of the 20th International Teletraffic Congress. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 224-235.
- [7] Park K J, Choi C H. Optimization driven bandwidth provisioning in service overlay networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(14): 3 169-3 177.
- [8] Low S, Lapsley D. Optimization flow control-I: Basic algorithm and convergence [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(6): 861-874.
- [9] Wardrop J G. Some theoretical aspects of road traffic research[J]. ICE Proceedings: Engineering Divisions, 1952, 1(3): 325-362.
- [10] Meng Qiang, Xu Wei, Yang Hai. Trial-and-error procedure for implementing a road-pricing scheme[J]. Transportation Research Record, 2005, 1923: 103-109.
- [11] Athuraliya S, Low S H, Li V H, et al. REM: Active queue management [J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 48-53.
- [12] Bazaraa M S, Sherali H D, Shetty C M. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1993.
- [13] Yang H. Sensitivity analysis for queueing equilibrium network flow and its application to traffic control[J]. Mathematical and Computer Modelling, 1995, 22: 247-258.