

基于博弈理论的 Internet QoS 评估的研究

杨震^① 梁静^② 崔丙锋^① 丁炜^①

^①(北京邮电大学宽带通信网实验室 北京 100876)

^②(中国人民解放军 66083 部队 北京 102488)

摘要 Internet QoS(服务质量)评估是多学科领域的研究问题,本文从博弈理论的视角,基于多项罗吉特(MNL)模型提出了综合考虑服务质量指标和价格因素的 Internet QoS 评估机制。采用 MNL 建模用户的选择行为,同时将各个业务类表示为相对独立的竞争实体,每个业务类最大化自己的效用。通过基于非协作博弈理论的分析,论证了各个业务类的 QoS 指标和价格之间存在均衡,并通过数值分析进行了验证。

关键词 Internet QoS 评估, 非协作博弈, 多项罗吉特模型(MNL), Nash 均衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)02-0290-05

Study on Evaluation of Internet QoS Based on Game Theory

Yang Zhen^① Liang Jing^② Cui Bing-feng^① Ding Wei^①

^①(The Broadband Communication Network Laboratory BUPT Beijing, 100876, China)

^②(Unit 66083 of the chinese People Liberation Army, Beijing 102488, China)

Abstract The evaluation of Internet QoS (Quality of Service) is naturally multi-discipline. This paper examines the Internet QoS evaluation by integrating QoS index with price factor. The multinomial logit model is adopted in this paper, which is used to model the choice behaviour of users. Each service class is modelled as independently competitive entity. The goal of each service class is to maximize its own utility. Through the analysis based on noncooperative game, the conclusion is drawn that the equilibria exist between QoS index and price of each service class, and the numerical results is provided to verify the conclusion.

Key words Internet QoS evaluation, Noncooperative game, Multinomial logit model, Nash equilibrium

1 引言

随着Internet应用的不断增加,多种QoS级别的需求需要在Internet中支持多业务的框架和机制。但是在Internet QoS的提供和评价上,仅仅考虑技术的因素是远远不够的。因为网络用户、服务提供商和工程技术人员所面临的核心问题是如何控制网络持续变化行为。在微观经济学中,价格是一种有效配置资源的机制,因此需要将价格作为网络控制的信号引入网络工程设计中,在Internet QoS的评估中综合考虑网络技术和价格因素。Internet QoS评估本质上是多学科领域的研究问题。

M3I(Market Managed Multi-service Internet)是欧盟的第5个框架计划中的一个项目,其目的是研究Internet资源管理系统。M3I通过对多种级别服务收取不同的费用,而为用户提供多种可选的价格和质量^[1]。文献[2]中考虑了在电信网络中

提供多业务类的计费问题,每种业务类有不同的QoS需求,把业务类定义为业务类型(如话音、视频或数据)与业务的源-宿对的集合,并将最优计费问题建模为非线性的、整数的、期望收益最大化的问题,同时求解价格以及为连接提供QoS保证。另外一个研究的思路是将价格作为内在的(控制)变量,它由网络的负荷函数决定。典型的在这些方案中,价格称为影子价格(shadow price),它实际是最优化约束限制的(如容量限制)拉格朗日(Lagrange)数乘因子,代表超过链路上容量的每个用户的附加费用,用来实现链路容量的供给和需求的均衡^[3,4]。但是上面这些方案没有考虑Internet中QoS指标和价格的均衡问题。随着网络应用的迅速发展,对采用博弈论的方法研究网络取得了巨大的进展^[5]。文献[6]中采用线性的需求函数关系研究了电信网络中若干服务提供商之间价格和QoS指标的均衡问题。

多项罗吉特模型广泛地应用于运输需求的预测和交易,是具有合理理论基础并经过实践验证的较好的用户选择行

为模型^[7]。文献[8]研究了零售存货企业之间价格和服务竞争之间的均衡问题。本文的工作在很大程度上受文献[8]中研究的启发,并将文献[8]中研究供应链管理中的一些假设和结论,适当的应用到Internet QoS评估的研究中。

2 业务类模型和基本假设

Internet QoS 模型中的参数和符号定义为:

$\mathbf{p}=(p_1,\dots,p_N)$ 是业务类的价格矢量, p_i 表示业务类 i 的价格; $\mathbf{f}=(f_1,\dots,f_N)$ 是业务类的QoS矢量, f_i 表示业务类 i 的QoS指标; $d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}): R_+^{N+N} \rightarrow R_+$ 是用户对业务类 i 的需求函数; $\mu_i(f_i, d_i)$ 是业务类 i 为需求 d_i 提供质量为 f_i 的服务时所需要向网络请求的资源量; $R_i(f_i, d_i)$ 是业务类 i 为需求 d_i 提供质量为 f_i 的服务时所付出的费用; $U_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})$ 定义为业务类 i 的净收益(经济学中常称作效用函数)。

网络提供 N 个业务类的集合为 $\mathbf{I}=\{1,2,\dots,N\}$, 每个业务类包含两个参数: $(\mathbf{p}, \mathbf{f}) \in R_+^{N+N}$ 。在 N 个业务类之间存在着需求的博弈替代效应,即每个业务类的需求函数不仅是本身价格和QoS的函数,而且与其他业务类型的价格和QoS有关。假设需求函数 $d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})$ 满足如下的条件: (1)如果: $d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) > 0$, 则 $(\partial d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})/\partial p_i) \leq 0$, $(\partial d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})/\partial f_i) \geq 0$; (2)对于所有的 $j \neq i$, $j=1,\dots,N$, 有 $(\partial d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})/\partial p_j) \geq 0$, $(\partial d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})/\partial f_j) \leq 0$; (3)对于所有的 $i=1,\dots,N$, 有 $\sum_{j=1}^N (\partial d_i/\partial p_j) < 0$ (或对于所有的 $i=1,\dots,N$, $\sum_{j=1}^N (\partial d_j/\partial p_i) < 0$)。在以上假设中:假设 (1)表示任何类的需求是其价格的减函数,是其QoS指标的增函数;假设 (2)表示了各个业务类之间的替代效应,即其他业务类型价格的上升将使此业务类的需求上升,其他业务类的服务质量的提高,将导致此业务类的需求下降;假设 (3)表示没有一个业务类能够期望通过共同提高价格来增加每个业务类的需求,换句话说,如果一个业务类提高价格,则聚集的需求量通常是下降的。

每类业务使用单位网络资源所付出的费用为 v , 业务类 i 向网络请求的资源数量 μ_i 与 i 的需求以及此业务类提供的服务质量有关,业务类的需求越高,且提供的服务质量越好,则所需求的资源 μ_i 越多。业务类 i 为需求 d_i 提供质量为 f_i 的服务时所付出的总费用为 $R_i(f_i, d_i) = v\mu_i(f_i, d_i)$, 业务类 i 需要的资源数量 μ_i 为 $\mu_i(f_i, d_i) = d_i g_i(f_i)$, g_i 是凸的二次可微增函数。其意义是操作费用随服务质量的提高呈凸函数形式增加。业务类 i 的收益为 $p_i d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})$, 将业务类 i 的净收益作为其效用函数: 则 $U_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) = (p_i - v g_i(f_i)) d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})$ 。而业务类 i 的策略空间(业务类 i 可供选择的价格和服务质量范围)为 $R_i = \{(p_i, f_i) : 0 \leq p_i^{\min} = \hat{g}_i(f_i) \leq p_i \leq p^{\max}; 0 \leq f_i^{\min} \leq f_i \leq f_i^{\max}\}$, 其

中 $\hat{g}_i(f_i) = v g_i(f_i)$, $p_i^{\min}$ 与 f_i 的依赖关系显式地消除了那些使业务类的净收益为负的策略。

假设(A) 设 $p_i^{\max} = \max\{p_i^0, 1 + v\alpha_i g_i(f_i)\}$, 其中 p_i^0 是使业务类 i 的需求可以减少到忽略不计的价格。

理论上,需求函数可以采用多种的函数形式,各种函数形式都会对获得的均衡产生不同的影响。在本文采用了MNL模型,来建模用户对各个业务类的需求行为。

关于网络服务的研究中,很少针对用户对于网络服务属性的偏好加以分析。大量的交易模型通过吸引力矢量 $\mathbf{a}=(a_1,\dots,a_N)$ 来描述由竞争的业务类引起的市场分配。业务类 i 所占有的市场份额可表示为: $m_i = a_i / \sum_{j=0}^N a_j$, 其中 a_0 表示不选购任何业务的用户所占有的份额,在本文中令 $a_0=0$ 。在实际应用和理论模型研究中通常广泛使用这种吸引力模型来对市场占有率建模。而业务类的吸引力 a_i 是价格和服务质量的函数,即 $a_i = a_i(p_i, f_i)$, 且 $\partial a_i / \partial p_i \leq 0$; $\partial a_i / \partial f_i \geq 0$ 。假设整个的市场规模为 M , 则业务类 i 的平均

需求量为: $d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) = M \cdot \left[a_i(p_i, f_i) / \sum_{j=0}^N a_j(p_j, f_j) \right]$ 。

大多数的吸引力模型假设特定的引力函数形式,在本文中采用MNL来建模用户的选择行为。MNL模型广泛地应用于运输需求预测和交易,是具有合理理论基础并经过实践验证的较好的用户选择行为模型^[7]。在MNL模型中,个体选择模式是以效用函数为出发点,并假设消费者在选择各种可能的方案时采用效用最大原则。然而并非每一个体选择行为模式都能正确预测每个人的选择,所以效用模式中包含确定性的组成部分和随机的组成部分。一个方案被选择的概率定义为该方案在可能方案中具有效用最大的概率。即假设有 N 种选择方案,表示为 $j=1,\dots,N$, 用户选择方案 j 时获得相

应的效用 U_j , 则用户选择方案 j 的概率为 $q_j = P\left(U_j = \max_{i=1,\dots,n} U_i\right)$,

其中 $U_i = V_i + \varepsilon_i$, 而 V_i 表示效用函数 U_i 的确定性部分; ε_i 表示效用函数 U_i 的随机部分。如果 ε_i 满足独立性且具有相同的gumble分布, 则客户选择方案 j 的概率可以表示为

$$P_j = \exp(V_j) / \sum_{i=1}^N \exp(V_i)。$$

一般的,在MNL模型中, V 表示各种属性参数(这些属性参数表示业务类在各个不同方面对用户的吸引)的线性函数。令 $a_i(p_i, f_i) = \exp\{b_i(f_i) - \alpha_i p_i\}$, 其中 $\alpha_i > 0$ 。

假设(B) 假设 $b_i(f_i)$ 是二次可微的、递增的凹函数。 b_i 是凹函数,代表了业务类 i 的边际吸引力递减的情况,即随着业务类 i 的服务质量的提高,业务类 i 的吸引力增加,但其边际吸引力却在减少。(这种情况可以用一些经济学的实例来描述,如当一种热销的商品在市场上紧缺时,它的边际吸引力

很大, 当市场上这种商品逐渐增多时, 此时, 该商品的边际吸引力在逐渐减少)。

3 基于博弈理论的评价方法

本文的目标是讨论 N 个业务类的价格和 QoS 指标的均衡, 为 Internet QoS 评估提供定量的依据, 主要研究两种场景下的均衡问题, 首先是只有价格参数起作用时的均衡问题, 即假设每个业务类的服务质量指标固定, 研究各个业务类的价格达到均衡状态问题; 然后研究价格和 QoS 的均衡问题, 即每个业务类同时选定价格和服务级别两个参数的均衡问题。这里假设令 $\tilde{x} = \log x$ 。

3.1 基于价格的均衡问题

设 $U_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})$ 是业务类 i 的效用函数, 业务类的 QoS 指标矢量 $\mathbf{f}$ 预先设定为固定值 $\hat{\mathbf{f}}$, 则基于价格的单参数的 Nash 均衡是满足价格矢量 $\mathbf{p}^*$ 的关系式: $U_i(\mathbf{p}^*, \hat{\mathbf{f}}) = \max U_i(p_1^*, \dots, p_{i-1}^*, p_i, p_{i+1}^*, \dots, p_N^*, \hat{\mathbf{f}})$, $i \in I$ 。此种均衡是固定 QoS 矢量 $\hat{\mathbf{f}}$ 的价格均衡。

定理 1 采用一般化的 MNL 模型, 在假设(3)和假设(A)成立的情况下, 则 N 个参与者基于价格的博弈存在唯一的 Nash 均衡。

证明 首先说明效用函数 $U_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})$ 相对于价格矢量 $\mathbf{p}$ 是对数超模的(log-supermodular)。即 $\tilde{U}_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) = \log U_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) = \log(p_i - v g_i(f_i)) + d_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})$ 是以 $\mathbf{p}$ 为超模的。由于所有业务类的效用函数都二次可微, 则超模性等效于下面的不等式: $\partial^2 \tilde{U}_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) / \partial p_i \partial p_j = \partial^2 \tilde{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) / \partial p_i \partial p_j \geq 0$, 而

$$\partial^2 \tilde{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) / \partial p_i \partial p_j = \alpha_i \alpha_j d_i d_j / M^2 \geq 0$$

由文献[9]可知, 基于价格的 N 个参与者的博弈存在均衡, 下面说明均衡的唯一性。由于 $\lim_{p_i \rightarrow v_i g_i(f_i)} \partial^2 \tilde{U}_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) / \partial p_i > 0$,

且根据假设(A), $\lim_{p_i \rightarrow p_i^{\max}} \partial^2 \tilde{U}_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) / \partial p_i < 0$ 。因此基于价格的博弈存在唯一的 Nash 均衡^[8], 它是式(1)的唯一解, 且均衡值在可行区域的内部。

$$\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial p_i} = \frac{1}{p_i - v g_i(f_i)} - \alpha \left(1 - \frac{d_i}{M} \right)_i = 0 \quad (1)$$

价格博弈的超模性意味着从一个可行的价格矢量 $\mathbf{p}_0$ 出发, 采用迭代探索的方案能够收敛到 Nash 均衡, 即在第 k 次迭代中, 保持其他业务类的价格为 $\mathbf{p}^{k-1}$, 业务类 i 决定使其效用最大的价格级别 p_i^k , 即 p_i^k 是方程 $p_i^k = v g_i(f_i) + M / (\alpha_i \cdot (M - d_i(p_i^k, \mathbf{p}_{-i}^{k-1}, \mathbf{f})))$ 的根。

3.2 价格和 QoS 同时的均衡问题

设 $U_i(\mathbf{p}, \mathbf{f})$ 是业务类 i 的效用函数, 当同时设定所有业务类的价格和服务质量指标 $(\mathbf{p}, \mathbf{f})$ 时, 则基于价格和服务质量

两参数 Nash 均衡是满足下面系统关系式的价格矢量和 QoS 指标矢量 $(\mathbf{p}^*, \mathbf{f}^*)$: $U_i(\mathbf{p}^*, \mathbf{f}^*) = \max U_i(p_1^*, \dots, p_{i-1}^*, p_i, p_{i+1}^*, \dots, p_N^*, f_1^*, \dots, f_{i-1}^*, f_i, f_{i+1}^*, \dots, f_N^*)$ 。

假设(C) 设 $\lim_{f_i \rightarrow f_i^{\max}} g'_i(f_i) = +\infty$ 。这种假设对于所研究的大部分的排队系统都是成立的。

定理 2 价格和 QoS 的同时均衡问题, 存在唯一的两参数 Nash 均衡 $(\mathbf{p}^*, \mathbf{f}^*)$, 而且 f_i^* 是下面方程的解: $v g'_i(f_i) = b'_i(f_i) / \alpha_i$ 如果 $g'_i(f_i^{\min}) / b'_i(f_i^{\min}) \leq 1 / (v \alpha_i)$; $f_i^* = f_i^{\min}$, 如果 $g'_i(f_i^{\min}) / b'_i(f_i^{\min}) > 1 / (v \alpha_i)$ 。

证明 由定理 1 的证明可知, 均衡的价格在可行区域的内部, 而由假设(C), 可得 $\lim_{f_i \rightarrow f_i^{\max}} \partial \tilde{U}_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}) / \partial f_i = -\infty$, 因此

由 Lagrange 乘法可得

$$\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial f_i} = -\frac{v g'_i(f_i)}{p_i - v g_i(f_i)} + b'_i(f_i) \left(1 - \frac{d_i}{M} \right) = -\beta_i \quad (2)$$

$$\beta_i(f_i - f_i^{\min}) = 0, \quad \text{其中 } \beta_i \geq 0 \quad (3)$$

由式(1)与式(2)可得: 如果 $g'_i(f_i^{\min}) / b'_i(f_i^{\min}) \leq 1 / (v \alpha_i)$, $v g'_i(f_i) = b'_i(f_i) / \alpha_i$; 如果 $g'_i(f_i^{\min}) / b'_i(f_i^{\min}) > 1 / (v \alpha_i)$, 则 $f_i^* = f_i^{\min}$ 。

3.3 价格与 QoS 指标的关系

前面论证了 QoS 和价格的博弈存在均衡, 本节研究业务类价格和各个业务类的 QoS 指标变化的关系。由于考虑了业务的替代效应(某个业务类的需求函数不仅与该业务类的价格和 QoS 指标有关, 而且与其它业务类的价格和 QoS 指标有关), 因此某个业务的 QoS 指标的变化, 不仅对该业务类产生影响而且对其它业务类也产生影响。

令 $\delta_i(f_i) = v g'_i(f_i) - b'_i(f_i) / \alpha_i$, 且定理 2 求得的业务类 i 的 QoS 指标为 f_i^0 。

定理 3 基于价格的 Internet QoS 评估博弈中, 业务类 i 的均衡价格 p_i^* 随 f_i 的增加而严格增加 ($\partial p_i^* / \partial f_i > 0$); 当 $f_i < f_i^0$ 时; 业务类 j 的均衡价格 p_j^* 随 f_i 的增加而严格下降 ($\partial p_j^* / \partial f_i < 0$), 当 $f_i > f_i^0$ 时, p_j^* 随 f_i 的增加而严格增加 ($\partial p_j^* / \partial f_i > 0$)。

证明 由定理 1 可知均衡的价格矢量 $\mathbf{f}$ 是式(1)的唯一解。则对式(1)左端求偏导, 可得

$$A_{ii} = -\partial^2 \tilde{U}_i / \partial p_i^2 = \alpha_i^2 (M - d_i) / M, \quad i = 1, \dots, N;$$

$$A_{ij} = -\partial^2 \tilde{U}_i / \partial p_i \partial p_j = -\alpha_i \alpha_j d_i d_j / M^2, \quad j \neq i;$$

$$B_{ii} = \partial^2 \tilde{U}_i / \partial p_i \partial f_i = \alpha_i^2 \cdot ((M - d_i) / M^2) \cdot (\delta_i(f_i)(M - d_i) + (M b'_i(f_i) / \alpha_i)), \quad i = 1, \dots, N;$$

$$B_{ij} = \partial^2 \tilde{U}_i / \partial p_i \partial f_j = -\alpha_i b'_j(f_j) d_i d_j / M^2, \quad j \neq i;$$

因有 $\mathbf{A} \cdot (\partial p_i^* / \partial f_j)_{i,j=1}^N = \mathbf{B}$, 注意到:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} b'_1(f_1)/\alpha_1 & \cdots & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & \cdots & b'_N(f_N)/\alpha_N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_1^2 \frac{(M-d_1)^2}{M^2} \delta_1 & \cdots & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & \cdots & \alpha_N^2 \frac{(M-d_N)^2}{M^2} \delta_N \end{pmatrix}$$

上式两边左乘以矩阵 $\mathbf{A}^{-1}$ 可得

$$\partial p_j^* / \partial f_i = (\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})_{ji} = (\mathbf{A}^{-1})_{ji} \cdot (\alpha_i^2 (M-d_i)^2 \delta_i(f_i) / M^2), j \neq i \quad (4)$$

$$\partial p_i^* / \partial f_i = (b'_i(f_i)/\alpha_i) + (\mathbf{A}^{-1})_{ii} \cdot (\alpha_i^2 (M-d_i)^2 \delta_i(f_i) / M^2) \quad (5)$$

由文献 [8] 可知, $\mathbf{A}^{-1}$ 是非负矩阵, 而且 $A_{ii}^{-1} < M^2 / \alpha_i^2 (M-d_i)^2$, 则由式(4)可知, 对于所有的 $j \neq i$, $\partial p_j^* / \partial f_i$ 与 $\delta_i(f_i)$ 符号相同, 因为 $g_i(f_i)$ 是可微的、递增凸函数, 而 $b_i(f_i)$ 是可微的、递增凹函数, 所以有: 当 $f_i < f_i^0$ 时, $\partial p_j^* / \partial f_i < 0$; 当 $f_i > f_i^0$ 时, $\partial p_j^* / \partial f_i > 0$ 。由式(5)可知, $\partial p_i^* / \partial f_i \geq b'_i(f_i)/\alpha_i + \delta_i(f_i) = v g'_i(f_i) > 0$, 因此 p_i^* 在 f_i 的整个范围内严格递增。

4 数值分析

在数值分析中, 我们以分组成功传输的概率作为 QoS 指标来研究价格与服务质量的均衡问题。将分组成功传输概率表示为关系式: $f_i = (1 - P_{\text{loss}}^i)^{1/s}$, 其中 P_{loss}^i 表示业务类 i 所提供服务的分组丢失概率。通常而言, P_{loss}^i 可表示为 $P_{\text{loss}}^i = G(\rho_i)$, 其中 $\rho_i = d_i / \mu_i$ 表示 i 类的业务量密度, 而 $s \geq 1$ 表示扩展因子, 当 $s > 1$ 时, 表示提供的服务质量的递减的回报率。则 $\rho_i = g_i^{-1}(f_i) = 1/G^{-1}(1 - f_i^s)$, 其中 G^{-1} 表示 G 的反函数。

考虑两个业务类的情况, 并采用 $M/M/1/2$ 来建模分组丢失概率。如果业务类提供对网络的接入服务, 而且相对于丢失概率而言, 瓶颈是某个接入网络的公用输入缓冲区, $M/M/1/2$ 对于分组丢失概率的一个较好的近似, 由排队论的理论可得 $P_{\text{loss}}^i = \rho_i^2 / (1 + \rho_i + \rho_i^2)$ 。在本文中考虑扩展因子

$$s=2 \text{ 的情况, 则 } g_i(f_i) = \frac{2f_i^2}{1 - f_i^2 + \sqrt{1 + 2f_i^2 - 3f_i^4}}。$$

令 $M=1, v=2, a_1 = \exp(20f_1 - 2p_1), a_2 = \exp(12f_2 - 2p_2)$, 则均衡时 $f_1 = 0.82, f_2 = 0.74$, 此时的 $p_1 = 4.98, p_2 = 2.02$ 下面图形给出了两种业务类的 QoS 指标与服务质量之间的

关系。

图 1 和图 2 表示当业务类 2 的 QoS 指标保持恒定(即 $f_2=0.74$)时, 业务类 1(业务类 2)的价格与业务类 1 的 QoS 指标之间的变化关系。由图 1 可知, 业务类 1 的价格随业务类 1 的服务质量的提高而增加; 而业务类 1 的 QoS 指标对于业务类 2 的价格的影响是: 当 $f_1 < 0.82$ 时, 业务类 2 的价格随业务类 1 的服务质量的提高而下降, 但当业务类 1 提供的服务质量 $f_1 > 0.82$ 时, 业务类 2 的价格随业务类 1 服务质量的提高而升高。产生这种现象的一个原因是: 当业务类 1 的 QoS 指标超过由定理 2 决定的均衡值时, 由于价格上升引起对于业务需求量的变化(使需求下降)超过了服务质量的升高引起业务需求量的变化(使需求升高), 使业务类 2 的需求相对升高, 从而使业务类 2 的价格也相应升高。图 1 和图 2 的结果与定理 3 中的结论完全一致。

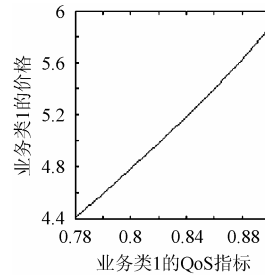


图 1 业务类 1 的价格与业务类 1 QoS 指标之间的关系

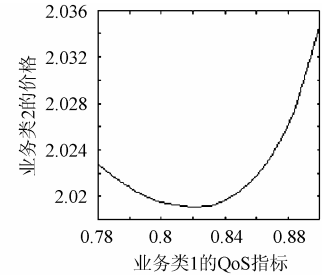


图 2 业务类 2 的价格与业务类 1 QoS 指标之间的关系

图 3 与图 4 是固定业务类 1 的 QoS 指标 $f_1=0.82$ 时, 业务类 2(业务类 1)的价格与业务类 2 的 QoS 指标之间的关系。从中也能观察到与上面相类似的结果: 即业务类 2 的价格随其 QoS 指标的改善而提高; 而当业务类 2 的 QoS 指标 $f_2 < 0.74$ 时, 业务类 1 的价格随业务类 2 的 QoS 指标的改善而下降, 当超过临界值时, 业务类 1 的价格随业务类 2 的 QoS 指标的提高而升高, 这也与理论推导的结果一致。

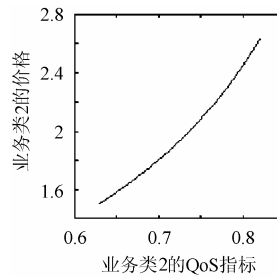


图 3 业务类 2 的价格与业务类 2 QoS 指标之间的关系

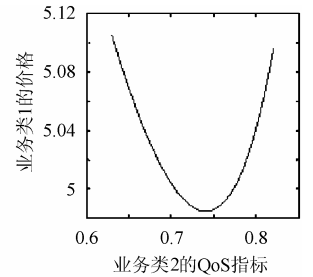


图 4 业务类 1 的价格与业务类 2 QoS 指标之间的关系

5 结束语

本文从博弈理论的视角, 提出了综合考虑服务质量指标和价格因素的 Internet QoS 评估的问题。由于价格因素可以

调节用户对于各种业务类的需求,因此需要将价格作为网络控制的信号引入网络工程设计中,在 Internet QoS 的评估中综合考虑网络技术问题和定价因素。MNL 模型广泛地应用于运输需求的预测和交易,是具有合理理论基础并经过实践验证的较好的用户选择行为模型,它同时将各个业务类表示为相对独立的竞争的实体,每个业务类最大化自己的效用函数。通过基于非协作博弈理论的分析,论证各个业务类的 QoS 指标和价格之间存在均衡。在本文的分析中,业务类的吸引力函数非常重要,它决定了在均衡时的各个业务类的 QoS 指标。在实际应用中,可以采用用户调查和最大似然估值(Maximum Likelihood Estimate, MLE)等方法获得。总之本文在集成考虑 QoS 指标和价格因素的 Internet QoS 评估中做了初步的尝试,这些工作对于进一步的 QoS 评估研究是有益的。

参 考 文 献

- [1] Altmann J, Daanen H, Oliver H. How to market-manage a QoS network. Proc IEEE INFOCOM, New York, USA, 2002, 1: 284 – 293.
 - [2] Keon N J, Anandalingam G. Optimal pricing for multiple services in telecommunications networks offering quality of service guarantees. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, F 2003, 11(1): 66 – 80.
 - [3] Kelly F P, Maulloo A, Tan D. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. *J. Oper. Res. Soc.* 1998, 49(3): 237 – 252.
 - [4] La R J, Anantharam V. Utility-based rate control in the Internet for elastic traffic. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2002, 10(2): 272 – 286.
 - [5] Xi-Ren Cao, Hong-Xia Shen, Milito R, Wirth P. Internet pricing with a game theoretical approach: concepts and examples. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2002, 10(2): 208 – 216.
 - [6] Azouzi R E, Altman E, Wynter L. Telecommunications network equilibrium with price and quality-of-service characteristics. Proc. of ITC, Berlin, Sept. 2003.
 - [7] Talluri K, Ryzin G V. A discrete choice model of yield management. <http://www-1.gsb.columbia.edu/faculty/cmaglaras/B9801-01>.
 - [8] Bernstein F, Federgruen A. A general equilibrium model for industries with price and service competition. <http://faculty.fuqua.duke.edu/~fernando/bio/>
 - [9] Milgrom P, Roberts J. Rationalizability, learning and equilibrium in games with strategic complementarities. *Econometrica*, 1990, 58(6): 1255 – 1277.
- 杨 震: 男, 1976 年生, 博士生, 从事网络流量工程和拥塞控制的研究与开发。
- 梁 静: 女, 1976 年生, 助理工程师, 研究方向为网络流量和拥塞控制算法。
- 崔丙锋: 男, 1976 年生, 博士生, 从事网络流量工程的研究与发。
- 丁 炜: 男, 1935 年生, 博士生导师, 从事高速网络设计的研究。