基于 Stackelberg 博弈的 WCDMA 网络收益最大化计费的研究

王玉峰[*,**] 王文东[*] 程时端[*]
[*](北京邮电大学网络与交换国家重点实验室 北京 100876)
[**](南京邮电大学通信工程系 南京 210003)

摘 要：该文研究了在 WCDMA 网络中如何选择价格来最大化网络收益。没有采用拥塞相关的计费，而是对每个用户有效传输的单位吞吐量收取固定的费用，但每个用户的传输速率是网络拥塞和单位带宽价格的函数，并在此基础上提出了用户净效用函数。利用 Stackelberg 博弈，建模网络与用户之间的交互，即一方面网络管理者设定价格，以便实现收益最大化，而用户通过自优化效用函数来寻找新的均衡点对此做出响应。本文提供了网络收益与接纳用户数目的定量关系，并研究了网络降低用户传输速率以增大网络容量和拥塞控制的经济动机。

关键词：WCDMA 网络，收益最大化，计费，Stackelberg 博弈
中图分类号：TN915 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2005)09-1488-05

On Revenue-Maximized Pricing for WCDMA Networks Based on Stackelberg Game

Wang Yu-feng[*,**] Wang Wen-dong[*] Cheng Shi-duan[*]
[*](*National Laboratory of Switching Technology & Telecommunication Networks, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing* 100876, *China*)
[**](*Telecommunications Department, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing* 210003, *China*)

Abstract The problem that how to set the price to maximize revenue in WCDMA networks is investigated in this paper. Instead of adopting congestion pricing mechanism, this paper imposes fixed usage price on throughput of each user, which is assumed to be the function of network congestion and usage cost. Based on above assumptions, the net utility functions of users are provided and Stackelberg game is adopted to model the interaction between network and users. That is, network sets the price to maximize revenue, and in response to the price, users maximize their net utility functions to achieve equilibriums. The paper provides the quantitative relation between revenue and the number of admitted users, and infers that although, technically speaking, network can increase system capacity to admit more users through decreasing transmission rate of users, the network has no incentive to adopt this policy. Conversely, network has the incentive to perform congestion control.

Key words WCDMA network, Maximizing revenue, Pricing, Stackelberg game

1 引言

随着对高速率业务(尤其是无线数据应用)的需求不断增加，无线资源管理的重要性日益增加。大部分的无线资源管理方案可以分为以用户为中心或以网络为中心。如最小化特定用户的故障概率可以看作是以用户为中心，因为这类方案试图最大化每个用户的利益。而另一些方案如试图最大化聚集的吞吐量或收益可以看作是以网络为中心的。这就需要考虑在两种资源管理方案之间交互的问题。因此需要显式地引入计费机制来协调以用户为中心和以网络为中心的资源管理方案。

文献[1－4]研究了弹性业务的资源管理，其中定义的系统目标是在流速率受限于容量的条件下，优化聚集的用户效用。为了消除共享链路的用户之间的耦合，系统优化问题分解为辅助的用户和网络优化问题，并采用容量限制的 Lagrange 乘子作为每单位流的价格在这两个子问题之间协调。但这些文章对网络计费的研究基于尾随价格(shadow price)或边际成本(marginal cost)。即，增加一个新的请求或用

2004-03-03 收到，2005-06-15 改回
国家自然科学基金(90204003, 60472067)和国家 973 计划(2003CB314806)资助课题

户到网络中的边际成本确定了对用户收取的费用。在这些方案中，当链路容量没有达到限制时，相应的 Lagrange 乘子(即链路价格)为零。显然它们没有充分考虑网络运营者最大化收益的愿望。

最近，对支持 Internet 业务的 CDMA 系统容量和基于经济模型的资源管理方案进行了大量的研究[5-7]。一般而言，蜂窝系统的容量包括两方面的概念：用户容量，即系统可以同时接纳的用户数目；业务容量，即系统允许同时传输的数据量(满足一定 QoS 需求)。CDMA 具有软容量的概念，即 CDMA 是一个干扰受限系统(Interference limited)，任何降低干扰的方法将增加容量，同时降低 QoS 要求也将增加容量。文献[5]对于支持多类“尽力而为(best effort)”业务的无线 CDMA 系统的容量进行了研究。文献[5]中假设信噪比保持恒定，所以当传输速率下降时，移动用户的载干比也可随之下降。当业务的到达率小于某个值时，通过减小传输速率可以使呼叫阻塞率趋向于 0。但是这些文章中没有考虑网络运营者有无动机(incentive)降低已有用户的发送速率，来接纳所有到达的用户。

无线互联网的迅速发展，对于网络博弈的研究取得了巨大的进展[8-9]。在决策过程的几乎所有级别，参与者之间的相互作用都是不可忽略的。当需要考虑交互时，由于任何一个参与者的行为选择将影响其它参与者的选择，一个自然的模型就涉及到寻求系统的均衡或稳定的操作点。本文不是将价格作为修正机制来协调用户行为和改善系统效率，而是将计费机制作为用户目标和网络目标之间可能的冲突之间的协调者。即服务供应商设定单位吞吐量的价格，用户向网络提供一定数量的业务流(通过优化自己的净效用函数实现)作为对价格的响应。这种情况也被称为两层次规划(bilevel program)。在文献[10]中针对于互联网中存在大量用户的情况，采用了类似的模型。但没有针对 WCDMA 系统的特性进行相应的讨论。

本文针对于 WCDMA 系统中上行链路的模型，研究了网络运营商与用户之间的 Stackelberg 博弈，并给出了网络收益与接纳用户的定量关系，说明了网络有实施拥塞控制的动机。

2　系统模型

考虑单个 CDMA 单元上行链路的情况，假设 W 是片速率(chip rate)，在 WCDMA 中固定等于 3.84Mcps。假设在基站处的背景噪声对所有移动站点都是相同的，则用户 i 在接收端(基站)的信噪比为

$$\mathrm{SIR}_i=\frac{W}{r_i}\frac{g_ip_i}{\sum_{j\neq i}g_jp_j+\eta}=G_i\alpha_i\,,\qquad i=1,2,\cdots,N \tag{1}$$

其中 r_i 是传输速率，p_i 是传输功率，g_i 是基站和移动节点 i 之间的路径增益，η 是背景噪声功率。比率 $G_i=W/r_i$ 是移动节点 i 的扩频因数或处理增益，$\alpha_i=\dfrac{g_ip_i}{\sum_{j\neq i}g_jp_j+\eta}$ 是移动站点 i 载干比(CIR)。信噪比 SIR_i 相应于信号质量，因为它决定了误比特率(BER)。在加性高斯白噪声的假设下，BER 是 SIR_i 的非减函数。假设 γ_i 是实现特定 BER(或等价的，特定帧成功率)的目标信噪比。

本文考虑系统中存在较多用户的情况，每个用户使用较少的资源(即 $\alpha_i \ll 1$)，则用户 i 的负荷因数为

$$\rho_i=\frac{1}{(W/(r_i\gamma_i)+1)}=\frac{\gamma_i}{W/r_i+\gamma_i}\approx\frac{\alpha_i}{1+\alpha_i} \tag{2}$$

且负荷因数必须满足

$$\sum_i\frac{\alpha_i}{1+\alpha_i}=\sum_i\rho_i<1 \tag{3}$$

可以通过微观经济学和博弈理论相关内容获得无线数据应用中非常有用的分布式算法。这种方案的核心是称为“效用函数”的 QoS 指标，定义为某种物理上有意义的实值函数。本文的效用函数 U_i 以用户吞吐量为自变量，是用户吞吐量的凹函数(凹型效用函数代表了经济学中的一个基本原理：边际效用递减[11])。而吞吐量依赖于数据帧成功接收的概率(帧成功函数 f，它由系统的网络属性决定，包括调制技术、前向错误检测方案、信道的特征以及接收器的属性等等因素决定。获得帧成功函数的精确表达式是非常困难或不现实的。因此，在分析研究中经常采用高度简化的函数形式)。

用户 i 希望优化自己的净效用 F_i(即用户 i 所获得的效用减去为获得此效用所付出的代价)。本文所设计的净效用函数没有采用拥塞相关的计费，而是对每个用户有效传输的单位吞吐量收取固定的费用，而且每个用户的传输速率是网络拥塞和单位带宽价格的函数。采用如下形式的用户净效用函数：

$$F_i=U_i\left(W\frac{f(\alpha_iG_i)}{G_i}\right)-\frac{1}{1-\sum_{i=1}^{N}\rho_i}-p\frac{Wf(\alpha_iG_i)}{G_i} \tag{4}$$

式(4)中的第 1 项表示用户 i 的吞吐量为其带来的效用，其中因子 $Wf(\alpha_iG_i)/G_i$ 代表用户的 i 的吞吐量；第 2 项表示链路上的拥塞代价；第 3 项表示用户 i 为其获得的吞吐量所付出的费用，p 代表单位吞吐量的价格。因此，总体而言，式(4)表示用户 i 的净效用。式(4)对 G_i 求偏导(由式(2)知，式(4)中的第 2 项与 G_i 无关)并令其为零可得

$$\frac{\partial F_i}{\partial G_i}=W\left(\frac{\partial U_i}{\partial G_i}-p\right)\left(\frac{\gamma_if'(\gamma_i)-f(\gamma_i)}{G_i^2}\right)=0 \tag{5}$$

则在用户自优化的问题中，信号质量 γ 由帧成功函数 f 决定：

$$f(\gamma)=\gamma f'(\gamma) \tag{6}$$

当有众多移动用户存在时，每个用户仅占用可用资源的很小

的一部分，即 $W/(r_i\gamma_i)>>1$，而 $\gamma_i=\gamma$（由式(6)决定），因此 $\rho_i=(\gamma/W)r_i=\beta r_i$，其中 $\beta=\gamma/W$，令 $f(\gamma)=c$，则用户 i 的净效用函数为

$$F_i=U_i(cr_i)-\frac{1}{1-\beta\bar{r}}-pcr_i \tag{7}$$

其中 $\bar{r}=\sum_j r_j$。

3 Stackelberg 博弈问题描述和分析

本节主要从服务供应商的角度研究如何实现 WCDMA 网络收益最大化。考虑由许多用户接入的无线链路，其中每个用户受限于拥塞控制和计费。一方面网络运营商设定价格参数，以便最大化收益，而用户基于净效用函数最大的原则通过寻找新的均衡点对此做出响应，这种情况被建模为两层次规划或 Stackelberg 问题。它从本质上建模同时考虑复杂的用户反映的情况下决策者的优化问题。

3.1 问题描述

典型地，博弈理论是描述分布式决策环境下竞争场景的有效工具。一个博弈由 3 个部分组成：一组参与者、每个参与者可能的行动集合以及一组效用函数(用于将行动轮廓映射为实数)。以 $\boldsymbol{N}$ 表示参与者集合，通常 $\boldsymbol{N}$ 为有限集 $\boldsymbol{N}=\{1,\cdots,n\}$。对于每个参与者 $i\in\boldsymbol{N}$，A_i 表示参与者 i 的可能采取的行动集合，$A=A_1\times A_2\times\cdots\times A_n$ 表示所有行动轮廓(action profiles)空间。最后，对于每个 $i\in\boldsymbol{N}$，以 $F_i:A\to\boldsymbol{R}$ 表示参与者 i 的净效用函数；$r\in A$ 表示由所有参与者的行动构成的一个策略轮廓，$r_i\in A_i$ 表示参与者 i 在 r 中的行动，r_{-i} 表示其它 $n-1$ 个参与者在 r 中的行动。

博弈理论中一个广泛使用的概念是 Nash 均衡(Nash equilibrium)。在 Nash 均衡，每个参与者的行为是对其竞争对手所采取策略的最好响应。Nash 均衡是一个策略轮廓(Strategy profile)，其中没有一个参与者能够通过单方面的改变策略来进一步提高效用。因此 Nash 均衡是稳定的工作点，因为没有用户有改变策略的动机。

本文的 Stackelberg 博弈问题分为两个子问题：网络收益最大化问题和用户优化净效用问题。在网络收益最大化问题中，基于用户的响应，网络设定价格 p 以最大化收益；在用户自优化净效用的问题中，对于每个给定的价格 p，在网络用户之间定义了一个非协作博弈。因此一个显然的问题涉及到寻求系统的均衡或稳定的操作点，Nash 均衡。在本文中 Nash 均衡在数学上可描述为：对于每个固定的 p，n 个参与者的博弈的均衡是满足如下条件的 n 维矢量 $\{r_i^*(p),\ i=1,\cdots,n\}$，对于所有的 $i\in\boldsymbol{N}$ ($\boldsymbol{N}=\{1,\cdots,n\}$)，有 $r_i\in A_i$，$F_i(r_i^*,r_{-i}^*;p)\ge F_i(r_i,r_{-i}^*;p)$，在本文中，$A_i=\left[0,\dfrac{1}{\beta}-r_{-i}\right]$ 表示用户 i 可以选择的速率范围。

3.2 问题分析

本小节分析用户优化净效用函数问题的 Nash 均衡，并根据用户的响应，讨论网络收益与接纳用户的关系。

令用户的效用函数为 $U_i(r_i)=\omega_i\log(1+cr_i)$（对数表达的效用函数是典型的满足边际效用递减的函数形式）。其中 ω_i 表示用户“支付意愿(willingness-to-pay)”或“预算(budget)”。注意：类似于文献[10]中的理由，我们选择 $\omega_i\log(1+x_i)$ 作为用户的效用函数而不是 $\omega_i\log(x_i)$。

由于采用对数形式的效用函数，则式(7)的用户的净效用函数可改写为

$$F_i(r_i,r_{-i};p)=\omega_i\log(1+cr_i)-\frac{1}{1-\beta\bar{r}}-pcr_i \tag{8}$$

在式(8)两边加上下面的式子：$\sum_{j\ne i}\omega_i\log(1+cr_j)-\sum_{j\ne i}pcr_j$，并将新的函数作为用户 i 的目标函数，采用这种方式并不影响 Nash 均衡。因此，从 Nash 均衡的角度而言，原先的博弈等同于所有用户都具有下面相同的目标函数的博弈：

$$F(r_1,\cdots,r_n;p)=\sum_{i=1}^{n}\omega_i\log(1+cr_i)-\frac{1}{1-\beta\bar{r}}-pc\bar{r} \tag{9}$$

对于所有的 r_i，$i\in\boldsymbol{N}$，有

$$F_{r_ir_j}=-\frac{2\beta}{(1-\beta\bar{r})^3}<0,\quad i\in\boldsymbol{N} \tag{10}$$

$$F_{r_ir_i}=-\frac{\omega_ic^2}{(1+cr_i)^2}-\frac{2\beta}{(1-\beta\bar{r})^3}<F_{r_ir_j}<0 \tag{11}$$

其中 $F_{r_ir_j}$ 表示 F 对 r_i 和 r_j 的偏导。

很显然F的赫斯矩阵是负定的，因此F的最大化问题存在唯一的解[12]，也就是说在给定价格p的情况下，上述的非协作博弈存在唯一的Nash均衡。

由式(9)可得 F 对 r_i 的一阶优化条件为

$$F_{r_i}=\frac{\omega_ic}{1+cr_i}-\frac{\beta}{(1-\beta\bar{r})^2}-pc=0 \tag{12}$$

将上面所得的 n 个式子相加并整理可得

$$g(\bar{r})=\frac{\bar{\omega}}{n+c\bar{r}}-\frac{\beta}{(1-\beta\bar{r})c}-p=0 \tag{13}$$

$$r_i=\frac{\omega_i}{\bar{\omega}c}(n+c\bar{r})-\frac{1}{c},\quad 且\ r_i\ge 0 \tag{14}$$

其中 $\bar{\omega}=\sum_j\omega_j$，而 $\bar{r}\in[0,1/\beta)$，注意到函数 $g(\bar{r})$ 在区间 $[0,\ 1/\beta)$ 内严格递减，而且 $g(1/\beta)=-\infty$，$g(0)=\bar{\omega}/n-\beta/c-p$，因此当且仅当 $g(0)>0$，即 $p<\bar{\omega}/n-\beta/c$ 时，式(13)在区间 $[0,1/\beta)$ 内存在唯一的解。

很显然只有当价格 p 满足上面的限制条件，系统接纳 n 个用户时才存在 Nash 均衡。如果价格 p 超过给定的界限，

则说明当网络接纳所有 n 个用户的情况下，不存在均衡，也就意味着网络需要拒绝某些用户才可能处于均衡状态。

下面分析网络如何设定控制参数(价格 p)，以最大化网络运营的收益。由于单位吞吐量的价格为 p，因此网络最大化下面的目标函数(网络收益)：

$$\max L=\sum_{i=1}^{n} pcr_i = pc\bar{r} = \frac{\bar{\omega}c\bar{r}}{n+c\bar{r}} - \frac{\beta\bar{r}}{(1-\beta\bar{r})^2} \tag{15}$$

由优化条件可得

$$L_{\bar{r}} = \frac{\bar{\omega}cn}{(n+c\bar{r})^2} - \frac{\beta+\beta^2\bar{r}}{(1-\beta\bar{r})^3} = 0 \quad 且 \quad L_{\bar{r}\bar{r}} < 0 \tag{16}$$

显然，函数 $L_{\bar{r}}$ 在区间 $[0,1/\beta)$ 内是严格递减的，而且 $L_{\bar{r}}(1/\beta)=-\infty$，$L_{\bar{r}}(0)=\bar{\omega}c/n-\beta$，因此，当且仅当 $L_{\bar{r}}(0)>0$，即

$$\bar{\omega}/n > \beta/c \tag{17}$$

式(16)在自变量 $\bar{r}$ 的取值区间 $[0,1/\beta)$ 内存在唯一的解，因此，网络未必接纳所有的 n 个用户，对用户的接纳将依赖于式(14)和式(17)。

我们考虑一般的用户接纳机制：假设根据预算将用户按降序排列，即如果 $\omega_i>\omega_j \Rightarrow i<j$，而且假设 $\omega_1>\beta/c$(否则，网络不会接纳一个用户)，定义 n^*是使式(14)和式(17)同时成立的最大的整数 n，则上述 Stackelberg 博弈问题存在唯一的解 $\{r_1^*,\cdots,r_n^*;p^*\}$，其中，$r_i^*=(\omega_i/\bar{\omega}_c^*)(n^*+c\bar{r}^*)-(1/c),\ i\le n^*$，而 $\bar{\omega}^*$ 是前 n^*个 ω_i 之和，而 $\bar{r}^*$ 是在式(16)中用 n^*替换 n 所得到的唯一解，p^*在式(13)中用 n^*替换 n 所得到的值，且 $r_j^*=0,\ j>n^*$。

4　数值分析

本节提供两个数值的例子来验证上节所得的网络收益和接纳用户的关系。

在适当的假设下，对于非相干的 FSK 调制技术，当分组长度为 80bit(假设没有采用纠错技术)，则帧成功函数为 $f(x)=\left[1-\frac{1}{2}\exp\left(-\frac{x}{2}\right)\right]^{80}$，则 $\gamma_0=10.7450$，$f(\gamma_0)=0.83$

我们研究在下面两种用例下接纳的用户数目与网络收益的关系。

用例 1 包括两个场景。场景 1：假设有 300 个用户请求接入，每个用户的预算为 $\omega(i)=300-i+1,\ i=1,\cdots,300$。图 1 表示在场景 1 下接纳用户数目与网络收益的关系；场景 2：用户的预算为 $\omega(i)=\log(300-i+1),\ i=1,\cdots,300$，图 2 表示在场景 2 下接纳用户数目与网络收益的关系。

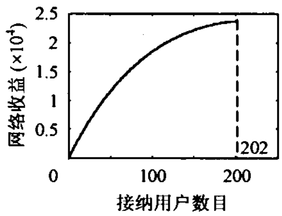

图 1　用户数目与网络收益的关系(例 1-场景 1)

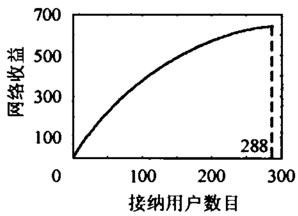

图 2　用户数目与网络收益的关系(例 1-场景 2)

从图 1 和图 2 中可以看出，由于网络的目标是最大化收益，所以网络不是无限制地降低用户传输速率(通过价格的增加)以接纳所有的用户。在上面两种用户预算的情况下，网络拒绝了部分用户，而且可以看出场景 2 接纳的用户数目比场景 1 多，这是因为场景 2 中用户预算比场景 1 小，请求的资源也相应较少，网络接纳更多的用户以使自己的收益增加。

用例 2 也包括两个场景。假设有两类业务，第 1 类业务的预算 $\omega_1=60$，第 2 类业务的预算 $\omega_2=25$。场景 1：两类业务的数目分别为 150，图 3 表示在场景 1 下接纳用户数目与网络收益的关系；场景 2：第 1 类用户数目为 250，第 2 类用户数目为 50，图 4 表示在场景 2 下接纳用户数目与网络收益的关系。

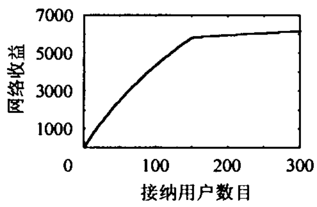

图 3　接纳用户数目与网络收益的关系(例 2-场景 1)

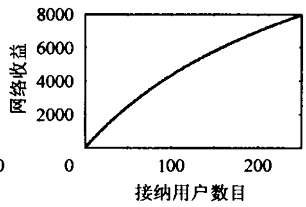

图 4　接纳用户数目与网络收益的关系(例 2—场景 2)

从图 3 和图 4 可以看出，当高优先级类(预算较大)的业务数目增加时，会使低优先级类(预算较小)的业务无法接入，因为网络也没有动机接纳这些低优先级业务 (对这些用户的接纳不会使网络收益增加)。从图 1，2 和 3 还可以看到，对低优先级接纳使网络的边际收益(即每增加单位用户所增加的网络收益)递减。这也说明了网络有提供拥塞控制的动机。

5　结束语

本文考虑了网络收益最大化的计费问题，与基于 Lagrange 乘子的定价机制不同，本文不是将价格作为修正机制来促进用户行为和系统效率，而是将计费机制作为用户目标和网络目标之间可能的冲突之间的协调者。即将服务供应商与用户之间的交互建模为 Stackelberg 博弈，即一方面网络运营商设定价格，以便最大化收益；而用户基于净效用函数最大的原则通过寻找新的均衡点对此做出响应。在用户的净

效用函数中包括了拥塞控制的部分和基于吞吐量的使用费用。本文说明了在用户自优化效用函数的过程，信号质量和传输速率可以分解进行，由帧成功函数决定信号质量，而基于价格和用户的效用函数选择传输速率。本文说明了对于给定的价格，由网络用户参加的非协作博弈存在唯一的均衡。通过对用户和网络之间的Stackelberg博弈的研究，给出了网络收益与接纳用户数目的定量关系，并说明了虽然网络可以通过降低用户的传输速率，扩大系统容量，接纳更多的用户，但网络并没有动机这样做，因为接纳所有用户并不能使网络的收益增加，相反网络有提供拥塞控制的动机，这表明虽然业务是弹性的，但网络也不会无限制地降低其传输速率，以扩大系统容量，从这个意义上讲，对于接入网络的弹性用户是公平的。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] La R J, Anantharam V. Utility-based rate control in the Internet for elastic traffic. *IEEE Trans. on Networking*, 2002, 10(2): 272 – 286.

[3] Bouhtou M, Diallo M, Wynter L. Fair resource allocation and pricing: a numerical study. http://www.prism.uvsq. fr/~wynter/ RESEARCH/fair-pricing.ps.

[4] Wynter L. Optimizing proportionally fair prices. http://www. prism. uvsq.fr/~wynter/ RESEARCH/PFPuniq ueness. ps.

[5] Altman E. Capacity of multi-service cellular networks with transmission-rate control: a queuing analysis. In Proc. of ACM MOBICOM, Atlanta, Georgia, USA, 2002: 205 – 214.

[6] Siris V A. Resource control for elastic traffic in CDMA networks, In Prof. of ACM MOBICOM, Atlanta, Georgia, USA, 2002: 193 – 204.

[7] Hegde N, Altman E. Capacity of multiservice WCDMA networks with variable QoS. In Proc. of IEEE WCNC, New Orleans USA, 2003, (2): 1402 – 1407.

[8] Altman E, Wynter L. Equilibrium, games, and pricing in transportation and telecommunications networks. http://www-sop. inria.fr/mistral/personnel/Eitan.Altman/ PAPERS/ laura.ps.

[9] Altman E, Boulogne T, Azouzi R, Jimenez T, Wynter L. A survey on networking games. http://www-sop.inria.fr/mistral/ personnel/ Eitan.Altman/PAPERS/srvgm.ps.

[10] Basar T, Srikant B. Revenue-maximizing pricing and capacity expansion in a many-users regime. In Proc. of IEEE INFOCOM, New York, USA, 2002, (1): 294 – 301.

[11] 梁小民著. 经济学是什么. 北京: 北京大学出版社, 2001: 43 – 46.

[12] Bertsekas D. Nonlinear Programming. Belmont, MA: Athena Scientific, 1999: 353 – 358.

王玉峰： 男，1974年生，讲师，研究方向为Internet QoS技术、P2P和网格系统等.

王文东： 男，1963年生，教授，研究方向为宽带网络技术.

程时端： 女，1942 年生，教授，博士生导师，研究方向为 IP 和 ATM 技术.