

移动补贴市场运营商定价策略与收益分配

苏 辉, 谭 崎, 赵 乙, 徐 恪

(清华大学 计算机科学与技术系, 计算机网络技术研究所, 北京 100084)

摘 要: 虚拟网络运营商(ISP)的出现改变了移动互联网市场中运营商之间的连接和经济关系。该文建立博弈模型, 分别在合作情况下和非合作情况下, 使用博弈理论分析了移动补贴市场中流量分配、运营商之间的定价关系及收益的变化, 提出了一种在运营商之间分配收益的机制, 并通过 Nash 讨价还价解的方法对收益分配因子进行了优化和求解。结果表明: 运营商之间的定价随补贴的增加而升高, 该文所提出的收益分配机制能促使运营商自发将其优化目标调整为社会福利最大化。

关键词: 移动互联网; 补贴市场; 虚拟运营商; 定价; 收益分配

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2018)01-0008-06

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.22.002

Pricing strategy and revenue allocation between service providers in mobile sponsored markets

SU Hui, TAN Qi, ZHAO Yi, XU Ke

(Institute of Computer Networks, Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The virtual Internet service providers (ISPs) have changed the connection and economic relationships among ISPs in mobile Internet sponsored markets. Game theory is used to develop a model to study the competition among ISPs and to analyze data allocation, pricing and utility issues for cooperative and non-cooperative games for ISPs in the mobile sponsored market. This paper also presents a revenue allocation mechanism and solves for the optimal allocation factor using the Nash bargaining solution. The results show that the price difference between ISPs increases with the sponsored level and the revenue allocation mechanism encourages the ISPs to adjust their optimized purposes to maximize the social welfare.

Key words: mobile Internet; sponsored market; virtual Internet service provider (ISP); pricing; revenue allocation

当前移动互联网市场中主要存在 3 类参与方, 分别是: 网络运营商 (Internet service provider,

ISP)、内容提供商 (content provider, CP) 和用户。其中 ISP 分别向 CP 和用户 提供互联网连接服务, 并收取相应的连接服务费, 形成了典型的以 ISP 为中心的双边市场^[1]。

实际上, 互联网市场中存在多类功能不同的 ISP, 比如传输 ISP、本地 ISP 等^[2]。通常, 市场中 ISP 之间由地位和功能不同可以形成对等关系和非对等关系。此外, ISP 之间还存在复杂的经济关系, 形成了不同的结算关系或利润分配约定^[2-6]。在 20 世纪 90 年代, Bailey 和 Huston 就开始研究 ISP 之间的互联结算关系^[3-4]。Huston^[4]对比了传统电信结算模型与基于互联网的结算模型的异同。Faratin 等^[5]讨论了 ISP 之间的非对等连接关系和结算时产生的争议。Ma 等^[2, 6]提出使用 Shapley 机制来解决三级 ISP 之间的利润分配问题。

文[2-6]的研究及其结论主要基于市场中的传统连接关系和模式。近年来随着网络技术的发展, 市场中出现了新角色和新模式。虚拟网络运营商是市场中出现的一种新角色, 它没有自己的通信网络, 需要从传统网络运营商那里购买通信资源, 经过重新设计后销售给用户。最近, 市场中还出现了一种被称为流量补贴计划 (sponsored data plan, SDP) 的新补贴模式^[7-8], 由 CP 为其用户提供流量补贴。这些新角色和新模式的出现, 使市场中各方的连接关系和经济关系发生了变化, 已有的研究结

收稿日期: 2017-04-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61472212);

国家科技重大专项(2015ZX03003004);

国家“八六三”高技术项目(2013AA013302,

2015AA015601);

欧盟第七框架玛丽居里国际科研人员交流计划

(FP7-PEOPLE-2013-IRSES-610524)

作者简介: 苏辉(1977—), 男, 博士研究生。

通信作者: 徐恪, 教授, E-mail: xuke@tsinghua.edu.cn

论不能解释出现的新现象,也无法准确刻画 SDP 条件下市场各方的经济关系。

针对这些问题,本文提出一个包含 ISP、CP 和用户的移动互联网补贴市场模型,其中的 ISP 角色由两个互连的传统 ISP(traditional ISP, t-ISP)和虚拟 ISP(virtual ISP, v-ISP)组成。基于该模型,分析了两个 ISP 在达成合作的情况下,收益分配需要满足的条件;研究了在非合作情况下,ISP 之间的定价策略及各自的收益;基于以上研究,通过 Nash 讨价还价解的方法对收益分配因子进行求解和优化。

1 系统模型及相关定义

在 SDP 条件下,存在虚拟 ISP 的移动互联网补贴市场模型如图 1 所示。该市场中,除了内容提供商 CP 和用户外,包含两种类型的运营商:t-ISP 和 v-ISP。t-ISP 为 CP 提供互联网接入服务,v-ISP 为用户提供互联网接入服务。如果被访问的 CP 加入了 SDP 计划,则会为其用户补贴部分比例流量。在这里,系统中只考虑使用 v-ISP 提供服务的那部分用户,这是因为本文主要关注 ISP 之间的互动关系和定价策略,这其中涉及的流量变化、利润转移等只与 v-ISP 及其用户有关。模型中两类 ISP 的互动过程可以通过 Stackelberg 博弈模型来进行描述。由于 v-ISP 需要向 t-ISP 租用通信线路,因此 t-ISP 占据优势地位,是市场中的领导者,而 v-ISP 是跟随者。

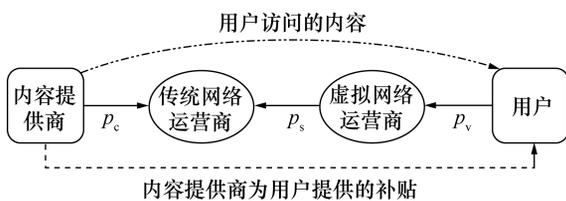


图 1 存在虚拟 ISP 和 SDP 的市场

1.1 用户模型

对市场中的用户来说,其收益来自于访问 CP 提供的内容。使用 x 表示用户访问 CP 消耗的流量,则用户获得的收益可定义为 $\sigma_c f_c(x)$ 。其中 σ_c 是比例因子,反映了用户的效用水平。对于收益函数 $f_c(x)$,假定该函数为不减的上凸函数,该假定意味着用户的边际收益随使用量的增加逐渐减小,符合现实情况。用户联网需要使用虚拟 v-ISP 提供的互联网连接服务,向 v-ISP 支付的单位流量服务费用 p_v 表示。实际上,目前市场中绝大部分 ISP,

已经用分层定价的机制取代了按使用量定价的方式。不过,这种分层定价的方式仍然可以看作是按使用量定价,这两种模式都鼓励用户访问更多内容^[9]。如果用户访问的 CP 加入了 SDP 计划,则该 CP 将为用户提供流量补贴,CP 提供的流量补贴比例记为 h 。因此,用户可以通过求解其效用最大化问题得到最优使用量:

$$\begin{aligned} \max_x u(x) &= \sigma_c f_c(x) - (1-h)xp_v, \\ \text{s. t. } &x \geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

在效用函数的选择上,考虑使用常见的 α -fair 函数^[10],即 $f_c(x) = x^{1-\alpha_c}/(1-\alpha_c)$, $0 < \alpha_c < 1$ 。在 v-ISP 收取的价格和 CP 提供的补贴比例给定的情况下,即 $\{p_v, h\}$ 是定值,此时用户的最优流量使用量为

$$x_c^*(p_v, h) = \left[\frac{\sigma_c}{(1-h)p_v} \right]^{\frac{1}{\alpha_c}}. \quad (2)$$

由式(2)可得用户使用量的价格弹性 $\epsilon_c = 1/\alpha_c$ 。价格弹性越小,表示用户的流量使用量受价格变动的的影响越小。

1.2 内容提供商模型

对市场中的内容提供商 CP 来说,其收益来自于为用户提供的内容,可定义为 $\sigma_c f_c(x)$ 。其中 σ_c 是比例因子,反映了 CP 的效用水平。CP 需要向 t-ISP 支付连接网络的服务费,相应的单位流量价格用 p_c 表示。此外,如果该 CP 加入了 SDP 计划,则当 t-ISP 和 v-ISP 选定了向 CP 以及用户收取的服务价格后,CP 需要根据定价情况决定为其用户提供的补贴比例。因此,CP 的最优策略可以通过求解其效用最大化问题得到:

$$\begin{aligned} \max_x g(x) &= \sigma_c f_c(x) - hxp_v - xp_c, \\ \text{s. t. } &x \geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

下面从系统中有效流量的角度来讨论 CP 的最优决策。系统中的有效流量是由用户和 CP 共同决定的。与用户相似,CP 的效用函数也使用 α -fair 函数,即 $f_c(x) = x^{1-\alpha_c}/(1-\alpha_c)$, $0 < \alpha_c < 1$ 。在给定 ISP 价格和补贴比例的情况下,即 $\{p_v, p_c, h\}$ 是定值,此时 CP 最优的流量提供量为

$$x_c^*(p_c, p_v, h) = \left(\frac{\sigma_c}{hp_v + p_c} \right)^{\frac{1}{\alpha_c}}. \quad (4)$$

出于简化数学推导的目的,令 $\alpha_c = \alpha_c = \alpha$,则 CP 的最优决策如引理 1 所示。

引理 1 当 t-ISP 和 v-ISP 向 CP 和用户收取的流量传输价格 $\{p_v, p_c\}$ 给定时,则 CP 向用户提供

的流量补贴比例为

$$h = \begin{cases} 0, & \sigma_c/\sigma_e \leq \alpha + p_c/p_v; \\ \frac{\sigma_c/\sigma_e - \alpha - p_c/p_c}{\sigma_c/\sigma_e + 1 - \alpha}, & \sigma_c/\sigma_e > \alpha + p_c/p_v. \end{cases} \quad (5)$$

证明: 出于篇幅考虑, 证明过程请参见文[11], 下同。

1.3 网络运营商模型

在市场中共存在两类网络运营商: t-ISP 和 v-ISP。对于 t-ISP 来说, 它的利润主要来自两个方面: 1) 为市场中的 CP 提供连接服务收取的费用, 即 p_c ; 2) 为 v-ISP 提供流量传输服务收取的费用, 即 p_s 。t-ISP 的成本支出包括网络基础设施投入的固定成本和为客户提供传输服务时产生的可变成本, 由于固定成本是常数且对结论没有影响, 这里只考虑可变成本部分, 用 c_t 表示 t-ISP 提供传输服务时的单位边际成本。对于 v-ISP 来说, 它的利润主要来自从用户收取的网络服务费, 也就是 p_v , 以及 CP 为其用户提供的补贴。相似地, 其单位边际成本用 c_v 表示。综上所述, 可以得到两类 ISP 的效用表达式:

$$\pi_{t\text{-isp}} = (p_c + p_s)x - c_t x, \quad (6)$$

$$\pi_{v\text{-isp}} = (p_v - p_s)x - c_v x. \quad (7)$$

这里, 两类 ISP 效用方程中的流量 x 表示系统中的有效流量, 也就是从 CP 端顺利传输到用户端的流量总量。显然, 由式(2)和(4)可得

$$x \leq \min\{x_c^*(p_v, h), x_e^*(p_c, p_v, h)\}.$$

2 合作博弈及收益分配

在理性的前提下, 不论是 t-ISP 还是 v-ISP, 都以最大化自身收益为目标。此时, 两者的目标是对立的, 不会选择与对方合作。从机制设计的角度来看, 如果能设计一种利润分享机制使两个 ISP 取得比非合作情况下更好的收益, 则可以促使它们达成合作。

2.1 合作下的收益分配

假定市场中的 t-ISP 与 v-ISP 已经达成一种利润分配约定, 该约定可以用三元组 $\{\theta_t, \theta_v, p_s\}$ 来描述。其中, $0 \leq \theta_t \leq 1$ 表示 t-ISP 在其收益中想要保留的比例, 也即是说, t-ISP 愿意将自己收益中 $1 - \theta_t$ 的部分分享给 v-ISP。对于 v-ISP, $0 \leq \theta_v \leq 1$ 表示其想要保留的收益的比例, $1 - \theta_v$ 表示 v-ISP 愿意分享给 t-ISP 的比例, 则 t-ISP 与 v-ISP 的效用可以表示为:

$$\pi_{t\text{-isp}} = \theta_t p_c x + (1 - \theta_v) p_v x + p_s x - c_t x, \quad (8)$$

$$\pi_{v\text{-isp}} = \theta_v p_v x + (1 - \theta_t) p_c x - p_s x - c_v x. \quad (9)$$

那么, 市场中两类 ISP 产生的社会福利可以表示为两者效用之和,

$$\pi_{\text{isp}} = p_c x + p_v x - c_t x - c_v x. \quad (10)$$

要使得 ISP 带来的社会福利最大化, 则需要确定三元组 $\{\theta_t, \theta_v, p_s\}$ 中各参数之间的关系。

定理 1 给定利润分配三元组 $\{\theta_t, \theta_v, p_s\}$ 。如果条件 $\theta_t = 1 - \theta_v$, 并且两个 ISP 之间的传输服务价格 $p_s = c_t - \theta_t(c_t + c_v)$ 成立, 那么 t-ISP 与 v-ISP 能够达成合作约定。该约定在最大化各 ISP 自身收益的同时, 使得社会福利也达到最大。特别地, t-ISP 的效用可以表示为 $\pi_{t\text{-isp}} = \theta_t \pi_{\text{isp}}$, 同时 v-ISP 的效用可以表示为 $\pi_{v\text{-isp}} = (1 - \theta_t) \pi_{\text{isp}}$ 。

从定理 1 可以看到, 由于 $0 \leq \theta_t \leq 1$, 两类 ISP 之间的传输服务价格满足条件 $p_s = c_t - \theta_t(c_t + c_v) \leq c_t$ 。这个条件意味着 t-ISP 向 v-ISP 收取的传输服务费小于自己的边际成本, 为了补偿这部分损失, t-ISP 要求分享一部分 v-ISP 的收益。该利润分配约定也指出, 无论是 t-ISP 还是 v-ISP, 谁想要多分到一些整体收益, 即 $(p_c + p_v)x$, 谁就不得不因此承担更多的整体成本开销, 即 $c_t + c_v$ 。

2.2 合作下的定价策略

市场中的 ISP 在相互合作的情况下, 需要调整其各自的定价策略以实现整体收益最优, 即社会福利最大化。市场中的 ISP 达成收益分享约定后, 社会福利最大化问题为:

$$\begin{aligned} \max \pi_{\text{isp}} &= p_c x + p_v h x + p_v(1 - h)x - c_t x - c_v x, \\ \text{s. t. } \sigma_c f_c(x) &\geq p_c x + p_v h x, \sigma_e f_e(x) \geq p_v(1 - h)x, \\ 0 &\leq x \leq x_{\text{eff}}, p_c \geq 0, p_v \geq 0. \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $x_{\text{eff}} = \min\{x_c^*(p_v, h), x_e^*(p_c, p_v, h)\}$ 。

式(11)是非凸优化问题, 通常难以求解。这里将其转化为式(12)表示的等价凸优化问题(等价问题的证明过程请参见文[11]):

$$\begin{aligned} \max \pi_{\text{isp}} &= \sigma_c f_c(x) + \sigma_e f_e(x) - c_t x - c_v x, \\ \text{s. t. } x &\leq x_{\text{eff}}. \end{aligned} \quad (12)$$

令 x^* 为优化问题(12)的最优解, 则 x^* 需要满足条件 $\alpha_c/(x^*)^{\alpha_c} + \alpha_e/(x^*)^{\alpha_e} = c_t + c_v$ 。为了便于处理, 不妨令 $\alpha_c = \alpha_e = \alpha$, 则可得系统中流量的最优值为

$$x^* = \left(\frac{\sigma_c + \sigma_e}{c_t + c_v} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (13)$$

由式(2)、(4)和(13), 可得 ISP 的最优价格为:

$$p_v^* = \frac{\sigma_e}{\sigma_c + \sigma_e} (c_t + c_v) \frac{1}{1-h}, \quad (14)$$

$$p_c^* = \frac{\sigma_e}{\sigma_c + \sigma_e} (c_t + c_v) \left(\sigma_c - \frac{1}{1-h} \right). \quad (15)$$

从式(14)和(15)可知, 当 CP 不提供补贴时, ISP 将其成本开销按比例分配到 CP 和用户中, 分配的比例与 CP 和用户各自的效用水平相关。当 CP 提供补贴时, ISP 的价格不仅与其运营成本、CP 和用户的效用水平相关, 还与 CP 提供的补贴比例相关。

定理 2 当系统中流量达到最优时, 市场中 ISP 决定的网络服务价格与市场中 CP 为用户提供的补贴相关。v-ISP 对用户收取的最优价格 p_v^* 随补贴 h 的增加而上升, t-ISP 对 CP 收取的最优价格 p_c^* 随补贴 h 的增加而降低。

从定理 2 可以看到, 当 CP 提供的补贴上升时, 用户使用流量会上升, v-ISP 可以通过提高服务价格获取更多收益; 然而, 补贴越高, CP 就需要分出更多收益用于补贴, 自己保留的收益会减少, 而 t-ISP 的服务价格依赖于 CP 的收益。此时市场中 ISP 处于合作情况, t-ISP 不会出于私心提高价格。

3 非合作博弈

当 ISP 之间未能就合作达成一致时, 它们都以最大化自身收益为目的。首先, 当价格 p_s 给定时, v-ISP 通过求解优化问题(16)决定自己的最优流量传输量,

$$\max_{x \geq 0} \frac{\sigma_e f_e(x)}{1-h} - c_v x - p_s x. \quad (16)$$

由式(16)可解得, v-ISP 的最优流量传输量为 $x_v^* = \{\sigma_e / [(c_v + p_s)(1-h)]\}^{\frac{1}{\alpha}}$ 。t-ISP 通过求解优化问题(17)决定自己的最优流量传输量和传输服务价格,

$$\begin{aligned} \max_{x \geq 0, p_s \geq 0} \quad & \sigma_c f_c(x) - \frac{h}{1-h} \sigma_e f_e(x) + p_s x - c_t x, \\ \text{s. t.} \quad & x \leq x_v^*. \end{aligned} \quad (17)$$

对优化问题(17)求解, 并令 $\alpha_e = \alpha_c = \alpha$, 可得 ISP 之间的最优定价及系统最优流量分别为:

$$p_s^* = \frac{\alpha \sigma_e c_v + h \sigma_e c_v + \sigma_e c_t - (1-h) \sigma_c c_v}{(1-h)(\sigma_e + \sigma_c) - \alpha \sigma_e}, \quad (18)$$

$$x^* = \left[\frac{(1-h)(\sigma_e + \sigma_c) - \alpha \sigma_e}{(c_t + c_v)(1-h)} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (19)$$

定理 3 考虑 ISP 之间的最优传输服务价格 p_s^* , 当 CP 提供的补贴满足条件

$$\frac{(\sigma_c - \alpha \sigma_e) c_v - \sigma_e c_t}{(\sigma_e + \sigma_c) c_v} < h < \frac{\sigma_c + (1-\alpha) \sigma_e}{\sigma_e + \sigma_c}$$

时, p_s^* 随 h 的增加而上升。

定理 4 考虑 ISP 之间的最优传输服务价格 p_s^* , 当条件

$$\frac{(1-h) \sigma_c c_v - (h c_v + c_t) \sigma_e}{\sigma_e c_v} < \alpha < \frac{(1-h)(\sigma_e + \sigma_c)}{\sigma_e}$$

成立, p_s^* 随 α 的增加而上升。

定理 3 和 4 表明, CP 提高补贴时, 用户的使用量会上升, v-ISP 的收益增加。CP 补贴增加导致利润转移的比例上升, t-ISP 从 CP 获得的收益将下降, 因此 CP 会上调对 v-ISP 的服务价格以补偿损失。此外, ISP 之间的非合作竞争会造成社会福利的下降。不过, 当市场中的 CP 和用户价格弹性越低时, 社会福利的损失会越少。因此, α 越大时, 市场中 ISP 能获取的收益越多, t-ISP 可以制定一个较高的价格。

令 Π_{isp}^n 表示非合作博弈时 ISP 产生的社会福利, Π_{isp}^* 表示合作博弈情况下 ISP 产生的社会福利, 则有:

引理 2 当 $\alpha_e = \alpha_c = \alpha$ 时, 那么有 $M = \Pi_{isp}^n / \Pi_{isp}^*$, 其中

$$M = \left(\frac{1}{1-h} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left[\frac{(1-h)(\sigma_e + \sigma_c) + (1-\alpha) \sigma_e}{\sigma_e + \sigma_c} \right] \cdot \left[\frac{(1-h)(\sigma_e + \sigma_c) - \alpha \sigma_e}{\sigma_e + \sigma_c} \right]^{\frac{1}{\alpha}-1}.$$

引理 2 给出了非合作情况和合作情况下市场中 ISP 获取的总体效用的比率 M , 该比率可以反映出市场中社会福利的减少情况。

4 最优收益分配

本文在 2.1 节提出了一种收益分配机制, 但没有给出 θ 的解。本节中基于 Nash 讨价还价解的方法^[12-13]对 θ 进行求解。

这里, 将非合作博弈的均衡点看作“威胁点”, 这意味着如果没有使用利润分配机制, 市场中的 ISP 仍然通过非合作博弈取得其收益。令 θ^* 表示基于非对称 Nash 讨价还价解的最优分配因子。接下来, 首先找到 θ^* 的可行解区间, 然后给出其确定解。

对于 t-ISP, 令 π_{t-isp}^* 为其能获得的最大效用, π_{t-isp}^n 为其在非合作情况下的效用, 则有

$$\pi_{t-isp}^* = \theta^* \Pi_{isp}^* = \theta^* \frac{\pi_{t-isp}^n + \pi_{v-isp}^n}{M}. \quad (20)$$

为了保证收益条件 $\pi_{t-isp}^* \geq \pi_{t-isp}^n$ 成立, 则最优分配因子 θ^* 需要满足

$$\theta^* \geq \frac{\pi_{t-isp}^n}{\pi_{t-isp}^n + \pi_{v-isp}^n} M. \quad (21)$$

相似地, v-ISP 的最优效用可以表示为

$$\pi_{v\text{-isp}}^* = (1 - \theta^*) \Pi_{\text{isp}}^* = (1 - \theta^*) \frac{\pi_{t\text{-isp}}^n + \pi_{v\text{-isp}}^n}{M}. \quad (22)$$

为了保证收益条件 $\pi_{v\text{-isp}}^* > \pi_{v\text{-isp}}^n$ 成立, 则最优分配因子 θ^* 需要满足

$$1 - \theta^* \geq \frac{\pi_{v\text{-isp}}^n}{\pi_{t\text{-isp}}^n + \pi_{v\text{-isp}}^n} M. \quad (23)$$

由条件(21)和(23), 可得最优收益分配因子的可行解区间为

$$\theta^* \in \left[\frac{\pi_{t\text{-isp}}^n}{\pi_{t\text{-isp}}^n + \pi_{v\text{-isp}}^n} M, 1 - \frac{\pi_{v\text{-isp}}^n}{\pi_{t\text{-isp}}^n + \pi_{v\text{-isp}}^n} M \right]. \quad (24)$$

当 $\alpha_c = \alpha_c = \alpha$ 时, 将 t-ISP 和 v-ISP 分别在非合作及合作情况下的效用带入式(24), 可得最优收益分配因子 θ^* 的范围为

$$\sigma_c (AB)^{\frac{1}{\alpha}} C^{\frac{1}{\alpha}-1} \leq \theta^* \leq 1 - \frac{(1-h)\sigma_c - h\sigma_c + (\alpha+2h+1)(1-\alpha)\sigma_c}{\alpha} (AB)^{\frac{1}{\alpha}} C^{\frac{1}{\alpha}-1}.$$

其中: $A = \frac{1}{1-h}$, $B = \frac{1}{\sigma_c + \sigma_c}$, $C = (1-h)(\sigma_c + \sigma_c - \alpha\sigma_c)$.

接下来, 对 θ 进行求解。由于市场中的 ISP 讨价还价能力不同, 其收益分配可表示为:

$$\begin{aligned} & \max_{0 \leq \theta \leq 1} (\theta \Pi_{\text{isp}}^* - r_t)^{\omega_t} [(1-\theta)\Pi_{\text{isp}}^* - r_v]^{\omega_v}, \\ & \text{s. t. } \theta \Pi_{\text{isp}}^* - r_t \geq 0, (1-\theta)\Pi_{\text{isp}}^* - r_v \geq 0, \\ & r_t = \Pi_{t\text{-isp}}^n, r_v = \Pi_{v\text{-isp}}^n. \end{aligned} \quad (25)$$

其中: r_t 和 r_v 表示 t-ISP 和 v-ISP 对收益的最小需求; ω_t 和 ω_v 表示 t-ISP 和 v-ISP 的讨价还价能力。

根据 Nash 讨价还价解的方法, 优化问题(25)的最优解可以通过式(26)求解得到:

$$\begin{aligned} \Pi_{t\text{-isp}}^* &= r_t + [\Pi_{\text{isp}}^* - (r_t + r_v)] \frac{\omega_t}{\omega_t + \omega_v}, \\ \Pi_{v\text{-isp}}^* &= r_v + [\Pi_{\text{isp}}^* - (r_t + r_v)] \frac{\omega_v}{\omega_t + \omega_v}. \end{aligned} \quad (26)$$

这种最优收益分配机制揭示了非对称 Nash 讨价还价解方法背后的基本原理, 即只要 ISP 的收益能达到其威胁点, 从合作博弈中得到的额外社会福利就能够根据参与者讨价还价的能力公平分配。这里, 最优的收益分配因子可以表示为

$$\theta^* = \left(1 - \frac{r_t + r_v}{\Pi_{\text{isp}}^*} \right) \frac{\omega_t}{\omega_t + \omega_v} + \frac{r_t}{\Pi_{\text{isp}}^*}. \quad (27)$$

5 仿真实验

本节通过仿真实验展示在非合作博弈下, 市场中传统 ISP 与虚拟 ISP 之间的定价变化情况。此外, 还展示了非合作博弈和合作博弈下, ISP 的总

收益变化情况。最后, 展示了最优收益分配因子随 ISP 讨价还价能力的变化情况。

5.1 ISP 之间的定价

ISP 之间的最优传输服务价格 p_s^* 的变化情况如图 2 所示。当 CP 为用户提供的补贴越多, p_s^* 越高, 这是因为 CP 将其一部分收益通过补贴转移给了 v-ISP, 所以 t-ISP 可以收取较高价格。特别地, 当参数 α 越大时, 该价格增长的速度越快。

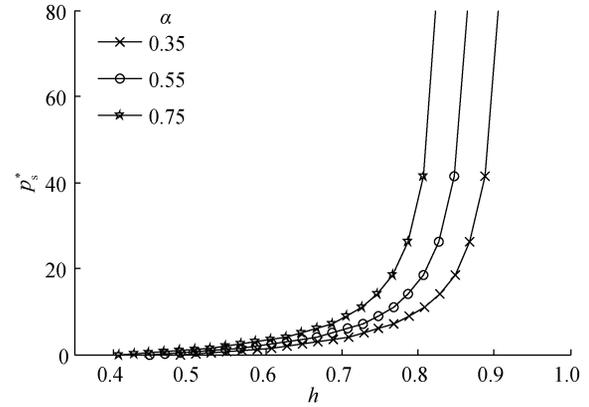


图 2 ISP 之间价格 p_s^* 随 h 的变化

5.2 ISP 的总体收益

市场中 ISP 的总体收益在非合作博弈和合作博弈情况下的比值 M 分别随 CP 的补贴水平 h 的变化情况如图 3 所示。

在图 3 中, 市场中 ISP 收益之比随 CP 补贴水平单调减小, 这说明随着 CP 补贴水平的上升, 在非合作博弈情况下 ISP 的总体收益与合作博弈下总体收益之间的差距越来越大。特别地, 在补贴之初, ISP 总体收益差距不大, 且参数 α 越大, 总体收益之间的差距越小, 收益比值的下降趋势也较平缓; 但随着补贴比例增大, 收益比值呈现加速下降趋势, 且参数 α 越大, 下降速度越快。

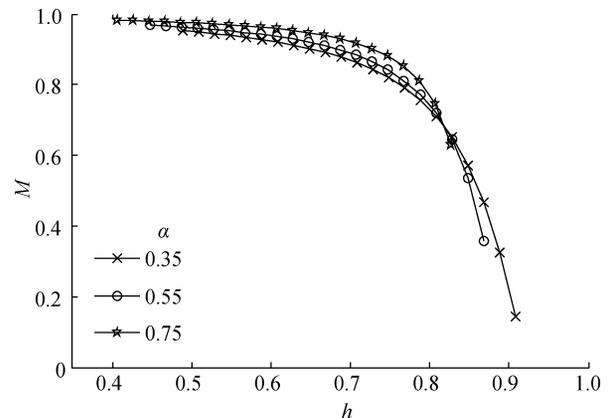


图 3 ISP 总体收益随 h 的变化

5.3 最优收益分配因子

图 4 显示了最优收益分配因子 θ^* 随 w_t 的变化情况。其中, 上下两条横线分别是 θ^* 的上界和下界。可以看到, 最优收益分配因子 θ^* 随 w_t 单调递增, 说明 t-ISP 讨价还价能力越强, 能分到的收益越多。v-ISP 的情况与之类似, 其收益与 t-ISP 形成互补关系。

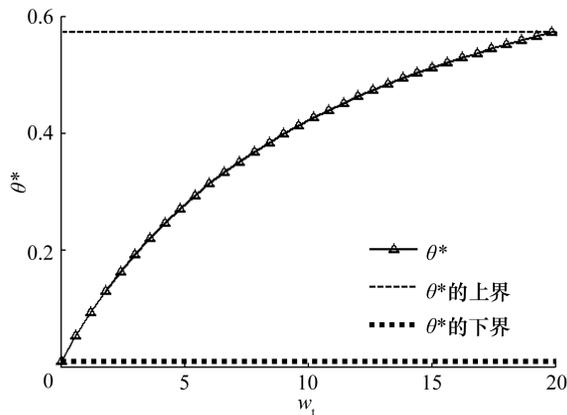


图 4 θ^* 随 w_t 的变化

6 结 论

本文研究了移动互联网流量补贴市场中传统 ISP 与虚拟 ISP 之间的定价关系和利润分配等问题, 提出一种带约束力的利润共享分配方案, 以促进市场中 ISP 开始合作。通过小心地选择 ISP 之间合适的传输服务价格, 该利润共享约定能够使 ISP 自发地将其优化目标调整为最大化社会福利。基于该共享约定, 进一步量化了收益分配因子的可行解空间, 使得市场中 ISP 能够获得不少于非合作情况下的收益。最后, 使用 Nash 讨价还价解的方法, 对最优收益分配因子进行了求解。

参考文献 (References)

[1] HANDE P, CHIANG M, CALDERBANK R, et al. Network pricing and rate allocation with content provider participation [C]//Proceeding of 28th IEEE INFOCOM. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 990-998.

[2] MARTIN B, CHIU D M, LUI J C S, et al. On cooperative settlement between content, transit, and eyeball Internet service providers [J]. TON, 2011, 19(3): 802-815.

[3] BAILEY J P. The economics of Internet interconnection agreements [M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1997.

[4] HUSTON G. ISP Survival guide: Strategies for running a competitive ISP [M]. New York, USA: Wiley, 1999.

[5] FARATIN P, CLARK D, GILMORE P, et al. Complexity of Internet interconnections: Technology, incentives and implications for policy [C]// Proceedings of the 35th Research Conference on Communication, Information and Internet Policy (TPRC). Arlington, USA, 2007: 1-31.

[6] MARTIN B, CHIU D M, LUI J, et al. Internet economics: The use of Shapley value for ISP settlement [J]. TON, 2010, 18(3): 775-787.

[7] JOE-WONG C, HA S, CHIANG M. Sponsoring mobile data: An economic analysis of the impact on users and content providers [C]//Proceeding of IEEE INFOCOM 2015. Hong Kong, China, 2015: 1499-1507.

[8] ZHANG L, WU W, WANG D. Sponsored data plan: A two-class service model in wireless data networks [C]//Proceeding of ACM SIGMETRICS 2015. Portland, USA, 2015, 43(1): 85-96.

[9] ZHANG L, WU W, WANG D. Time dependent pricing in wireless data networks: Flat-rate vs. usage-based schemes [C]//Proceeding of IEEE INFOCOM 2014. Toronto, Canada, 2014: 700-708.

[10] MO J, WALRAND J. Fair end-to-end window-based congestion control [J]. TON, 2000, 8(5): 556-567.

[11] SU H. The proof process [OL/Z]. [2017-06-21]. <https://www.dropbox.com/s/wu8hkfj5b68s2xd//proof.pdf?dl=0>.

[12] NASH Jr J F. The bargaining problem [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1950, 18(2): 155-162.

[13] BINMORE K, RUBINSTEIN A, WOLINSKY A. The Nash bargaining solution in economic modeling [J]. The RAND Journal of Economics, 1986, 17(2): 176-188.

(责任编辑 李丽)