

套餐计费模式下的ICN缓存定价机制

郑焯^{1,2}, 林锦涛¹, 阎文亮¹, 徐正欢³, 施钱宝², 杨锋^{1,2}

1. 中国科学技术大学自动化, 合肥 230026

2. 合肥综合性国家科学中心人工智能研究院, 合肥 230088

3. 中国科学技术大学先进技术研究院, 合肥 230088

摘要: 信息中心网络 (Information-Centric Networking, ICN) 通过网络内缓存, 实现内容与位置分离, 能够更好地满足大规模内容分发的需求, 均衡网络流量。合理的定价机制能够促使运营商参与ICN的部署, 促进ICN的发展。套餐计费是当前应用最广泛且具有实际价值的计费模式, 现有的ICN定价研究聚焦于按流量计费的模式, 对套餐计费缺少研究。文章考虑套餐计费与流量计费两种模式, 研究用户与ISP、CP之间的相互作用, 并建立效用函数。文章首先分析各个实体的缓存行为, 观察到ISP将不缓存或尽可能多的缓存内容, 并且ICN实体的缓存策略收到其它实体定价策略的综合影响。然后根据内容缓存情况, 求解模型的Nash均衡点, 制定最佳的定价策略。研究发现, 套餐计费模式更符合ICN中运营商与用户的需求, 可以实现激励ICN发展的目的。

关键词: 信息中心网络, 定价机制, 缓存, 博弈, 套餐计费

ICN Cache Pricing Mechanism Under Package Billing Model

Quan Zheng^{1,2}, Jintao Lin¹, Wenliang Yan¹, Zhenghuan Xu³, Qianbao Shi², Feng Yang^{1,2}

1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

2. Institute of Artificial Intelligence, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230088

3. Institute of Advanced Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230088

Abstract: Information-Centric Networking (ICN) enables content and location separation through in-network caching, which can better meet the needs of large-scale content distribution and balance network traffic. A reasonable pricing mechanism can motivate operators to participate in ICN deployment and promote the development of ICNs. Package billing is the most widely used billing model with practical value. Existing ICN pricing research focuses on the per-traffic billing model and lacks research on package billing. The article considers both package billing and traffic billing models, studies the interaction between users, ISPs and CPs, and establishes the utility function. The article first analyzes the caching behavior of each entity and observes that ISPs will not cache or cache as much content as possible, and that the caching strategy of ICN entities receives the combined effect of the pricing strategies of other entities. Then, the Nash equilibrium point of the model is solved to develop the optimal pricing strategy based on content caching. It is found that the package billing model is more in line with the needs of operators and users in ICNs and can achieve the purpose of incentivizing ICN development.

Key Words: Information Centric Networks, Pricing Mechanism, Caching, Game, Package billing

1 简介

互联网的使用情况在近几年发生巨大变化, IP流量激增, 且大部分流量与内容请求相关。信息中心网络 (ICN) 被提出以满足不断增长的互联网内容分发需求。在ICN中, 用户只关心内容本身, 而不关心内容的源头以及获取内容的方式^[1,2]。ICN的重要功能是在网络内缓存, 即在路由器或服务器上部署可选网络内缓存。通过网络内缓存, 用户可以直接从附近的内容缓存路由器获取内容, 从而提高内容分发效率, 均衡网络流量^[3]。相较于传统的IP网络, ICN具有明显的技术优势。但是, 部署新兴网络架构还需要经济利益的驱动, 良好的费用结算模式对运营商参与ICN的

部署与发展有着积极意义。若无法获得足够的利益, 运营商不愿意缓存数据, 甚至不愿意部署ICN^[4]。为了促进ICN的部署, 促进内容的分发与共享, 需要找到适合所有ICN实体的共赢的经济框架。

传统的互联网业务模型中, 网络服务提供商 (ISP) 转发用户内容请求给内容提供商 (CP), CP提供相应内容并向用户收取订阅费用, ISP则在传输业务中向用户与CP收取服务费用。ICN部署后, ISP可以代替CP进行内容分发, 流量不经过CP, 此时CP不应收取内容订阅费, 因此传统的收费模型并不适用于ICN^[5-8]。在定价机制方面, 学者们已经做了很多工作^[9-15], 但都是基于流量计费模式。对于用户, 线性增长的流量并不会带来相应的价值, 如1GB的高清视频达不到200MB普通视频5倍的价值, 即内容价值与内容大小非线性相关。流量计费模式会成为用户使用网络

**2020年安徽省重点研发计划 (202004a05020078); 国家网络创新基础设施项目: 国家未来智能网络试验设施 (2016-000052-73-01-000515);

服务的阻碍,用户也更倾向于套餐计费模式^[16],因此,研究套餐计费模式十分必要。

基于上述问题,为了促进ICN的部署与发展,本文针对套餐计费模式,提出相应的定价机制,主要工作如下:1)研究套餐计费模式与流量计费模式下,服务质量和价格对用户数量的影响。2)分析各个ICN实体之间的数据流与经济流,建立经济模型,为所有实体建立效用函数。并且分析ICN实体在非合作博弈下的效用最大化问题,求解出均衡点,分析基于代价最小的ISP缓存与转发的决策切换过程。3)进行数值模拟,分析两种模式下服务质量、定价策略、缓存参数对ICN实体的缓存定价策略的影响。

本文结构组织如下:第1节介绍本文工作动机与主要工作;第2节介绍当前定价机制方面的研究;第3节建立套餐计费模式与流量计费模式下的ICN实体定价模型;第4节求解效用函数最大化问题的Nash均衡解并分析;第5节进行数值模拟,并对实验结果进行分析;第6节总结工作。

2 相关工作

针对传统IP网络,[5]分析了价格与服务质量的作⽤,研究了ISP与CP的行为以及价格竞争对其市场份额的影响。Abylay等人研究了在多个ISP的场景下,基于Stackelberg博弈下的CP向用户赞助内容的收益情况^[6]。除此之外,对于IP网络的网路中立性问题,Hanawal等人探讨了网络中立性原则下,CP通过披露用户需求信息支持特定ISP对几个相互竞争ISP利益产生的影响,并提出两种支付机制,探究其产生的社会福利影响^[7]。[8]考虑一个简单的双边市场模型,研究不同类型的ISP的行为特征,并考虑网络中立性问题,证明了CP将广告收入用以激励最终用户能够增加用户数量,增加总体收益。

由于ICN网络的网路内缓存特性,ICN可以向CP购买内容,也可以代替CP分发内容。现有的IP定价机制并不适合ICN,并且只有在适当的收费机制下,ICN才能获得良好的发展。

Agyapong等人评估了ICN网络中不同类型的网络参与者的经济激励,证明如果没有足够的经济激励,ICN实体不会缓存内容或不会缓存最优数量的内容^[4]。[9]研究了ICN模型中ISP与CP之间的非合作博弈,基于Nash均衡分析固定缓存策略下网络实体间的价格博弈,并证明ICN的缓存投资是利可图的。[10]研究目前内容交付网络(CDN)中的经济流动,并探索它们在ICN互联场景中的可能演变,提出了ICN互连中的定价模型;同时考虑了用户在不同接入ISP之间的迁移行为,并证明ICN互连的经济可行性与稳定性。[9,10]均只考虑了价格对用户行为的影响,忽略了接入ISP的服务质量的作用。[11]制定了一个三阶段Stackelberg博弈,分析了两种不同定价场景下的动态博弈完美平衡,证明了移动边缘缓存的经济可行性。但是文章模型只涉及单个接入ISP与单个传输ISP,未能体现ICN场景下传输ISP的转发决策。

ICN中,ISP与CP之间的关系较IP网络更加多样化。[12]分析了接入ISP与多个CP组成联盟以降低运营成本的可能性,联盟之中应用Shapley值进行公平的利润分配,并且探索了联盟的稳定性与网络中立性问题。[13]考虑ICN网络模型中一个具有多类需求尤其是延迟敏感型需求的双边市场,ISP可能向CP付费,CP可能向ISP付费;通过Nash均衡分析缓存参数在Nash均衡下如何达到最优。[12,13]都只考虑接入ISP,然而用户与CP享受更加广域的服务,传输ISP是不可缺少的,文章对传输ISP在网络架构中的影响探索较为简化。

上述对于ICN的探索主要基于流量计费模式,但用户并不希望使用流量计费^[14]。套餐计费模式是当前国内的主流计费模式,研究在ICN场景套餐计费模式的影响对于研究各ICN实体的定价策略是必要的。在本文中,我们研究套餐计费模式与流量计费模式下的ICN实体的定价策略,为未来ICN场景下运营商定价提供参考,最终促进ICN的发展。

3 系统模型

在本节中提出了套餐计费模式与流量计费模式下的ICN定价模型。模型中的ICN实体包括接入ISP、传输ISP和CP。模型定义了用户与各个实体之间的交互行为(包括数据流与支付流),并描述了套餐计费模式下用户的数量变化以及接入ISP的效用函数。

3.1 基本框架

与传统IP网络相比,本文模型的主要区别在于ISP可以预先缓存CP的内容,当收到的请求在本地缓存命中时直接响应请求。每个接入ISP有一定数量的用户,用户数量会根据收取的费用与服务质量改变。当用户的请求到达接入ISP时,若缓存未命中,则将请求转发给传输ISP。传输ISP位于接入ISP与CP之间,负责二者之间的请求与内容传输。当传输ISP收到来自接入ISP的请求时,将在接入ISP与CP中寻找携带目标内容的实体并转发请求。CP负责提供内容,包括ISP预先缓存的部分内容与用户请求的内容。

3.2 费用模型

为简化计算,本文仅考虑包含两个接入ISP(A和B)、一个传输ISP(C)和一个CP(D)的网络传输模型,如图1所示。ISP A采取套餐计费模式,ISP B采取流量计费模式;只有接入ISP缓存内容,传输ISP仅提供内容传输服务。图1中还提供了各个实体与用户之间的数据流和支付流。本文中使用的符号说明见表1,表中 $k \in \{A, B\}$ 、 $K \in \{A, B, C\}$ 、 $M \in \{A, B, D\}$ 。

3.3 效用函数

为了更好地分析两种计费模型, 本文仅考虑接入ISP的效用函数。本文使用价格、带宽服务成本、缓存成本、内容缓存比与用户请求命中率表示ISP A、B的效用函数。

由于缓存内容数量与缓存代价成正比^[6], 为了方便数学计算, 对模型作出以下假设: 1) CP向ISP收取的内容一次性售卖费用与ISP预先缓存的内容数量成正比^[7]; 2) ISP缓存的内容占全部内容的比例与用户请求在本地缓存命中的概率相同, 即用接入ISP k的用户请求在ICN实体M处缓存命中的比例表示ISP预先缓存的内容占全部内容的比例^[17]。

套餐计费模式下, 不论用户使用多少流量, 统一收取相同的固定费用, 令:

$$\begin{cases} E(A_1)=u_A(P_A^{acc}-t_A\beta_A-N\alpha_{A,A}c_A \\ -N\alpha_{A,out}P_C^{net}) \\ E(A_2)=u_B N\alpha_{B,A}(P_A-c_A) \\ E(A_3)=-\alpha_{A,A}P_D^{pro} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\alpha_{A,A}$ 为ISP的用户请求本地缓存命中的概率, $\alpha_{A,out}=1-\alpha_{A,A}$ 为未命中的概率。

$E(A_1)$ 表示ISP A的用户为ISP A带来的效用, 包括向用户收取的网络接入费用、为用户提供网络服务的产生的带宽成本、缓存成本以及转发成本。

$E(A_2)$ 表示ISP C的请求为ISP A带来的收益, 当ISP B的未命中请求被ISP C转发向ISP A时, ISP A向ISP C提供服务而获得效用。

$E(A_3)$ 表示ISP A缓存内容而产生的与缓存成本, 即CP向ISP A收取的内容一次性售卖费用。

则ISP A的效用函数为:

$$E(A)=E(A_1)+E(A_2)+E(A_3) \quad (6)$$

ISP A通过控制 $\alpha_{A,A}$ 、 β_A 、 P_A^{acc} 以及 P_A 以增加自身效用。

考虑流量计费模式, ISP B向用户与ISP按流量使用量收取相同的内容服务费 P_B 。令:

$$\begin{cases} E(B_1)=u_B(NP_B-t_B\beta_B-N\alpha_{B,B}c_B \\ -N\alpha_{B,out}P_C^{net}) \\ E(B_2)=u_A N\alpha_{A,B}(P_B-c_B) \\ E(B_3)=-\alpha_{B,B}P_D^{pro} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $E(B_1)$ 表示ISP B的用户为ISP B带来的效用。与套餐计费模式不同, 向用户收取内容服务费用。 $E(B_2)$ 与 $E(B_3)$ 与无限模式相同。

因此, 得到ISP B的效用函数:

$$E(B)=E(B_1)+E(B_2)+E(B_3) \quad (8)$$

ISP B通过控制 $\alpha_{B,B}$ 、 β_B 以及 P_B 以增加自身效用。

于是得到ISP A与ISP B的效用函数最大化问题:

$$\begin{aligned} \max_{\alpha_{A,A}, \beta_A, P_A, P_A^{acc}} E(A) &= u_A(P_A^{acc}-t_A\beta_A \\ &-N\alpha_{A,A}c_A-N\alpha_{A,out}P_C^{net})+u_B N\alpha_{B,A}(P_A \\ &-c_A)-\alpha_{A,A}P_D^{pro} \\ \text{s.t.} &\begin{cases} 0 \leq \alpha_{A,A} \leq 1 \\ \beta_A \geq 0 \\ P_A \geq 0 \\ P_A^{acc} \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \max_{\alpha_{B,B}, \beta_B, P_B} E(B) &= u_B(NP_B-t_B\beta_B \\ &-N\alpha_{B,B}c_B-N\alpha_{B,out}P_C^{net})+u_A N\alpha_{A,B}(P_B \\ &-c_B)-\alpha_{B,B}P_D^{pro} \\ \text{s.t.} &\begin{cases} 0 \leq \alpha_{B,B} \leq 1 \\ \beta_B \geq 0 \\ P_B \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

4 模型分析

4.1 服务策略分析

首先分析各个实体的缓存策略。为了解缓存变量对效用函数的影响, 即求解以下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial E(A)}{\partial \alpha_{A,A}} = 0, \\ \frac{\partial E(B)}{\partial \alpha_{B,B}} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

结论1: 缓存变量 α 在均衡点的取值只能为0或者最大值, 且受到缓存策略成本与转发策略成本的综合影响。

证明: 以ISP A的效用函数为例:

$$\frac{\partial E(A)}{\partial \alpha_{A,A}} = u_A N(P_C^{net}-c_A)-P_D^{hit} \quad (12)$$

式(12)等号右侧的值与 $\alpha_{A,A}$ 无关, 因此 $E(A)$ 是 $\alpha_{A,A}$ 的单调函数。为使效用函数 $E(A)$ 最大, $\alpha_{A,A}$ 应取0或者最大值。

令 $c_{AA} = \frac{P_D^{pro}}{u_A N} + c_A$ 。由(12)可以观察到, 当

$P_C^{net} \geq c_{AA}$ 时, $\frac{\partial E(A)}{\partial \alpha_{A,A}} \geq 0$, 此时ISP A将尽可能地缓存内容, 当 $P_C^{net} \leq c_{AA}$ 时则不缓存内容。 c_{AA} 可看作对

于单位内容的用户请求, ISP A的缓存策略成本, P_C^{net} 是ISP A将请求转发出去时ISP C收取的费用, 可看作ISP A的转发策略成本。当ISP A收到用户请求时, 会比较两种策略成本, 选择代价较低的策略。对于ISP B也是相同的, ISP B的缓存策略成本 $c_{BB} = \frac{P_D^{pro}}{u_B N} + c_B$, 转发策略成本与ISP A相同。

结论2: 必定存在一个最优网络带宽 β_k^* 使得接入ISP获得最大收益。

证明: 以ISP A为例, 求解 $\frac{\partial E(A)}{\partial \beta_A} = 0$, 得到:

$$t_A[\beta_A + (1 + \beta_A)\log(1 + \beta_A)] = P_A^{acc} - N\alpha_{A,A}c_A - N\alpha_{A,out}P_C^{net} \quad (13)$$

式(13)中, 等号左侧是关于 β_A 的单调连续函数, 记为 $f(\beta_A)$ 。等号右侧部分, 由于ISP A出于盈利目的指定定价策略, 向单个用户收取的费用必定不小于服务成本, 所以等式右侧非负。由于 $f(0) = 0$ 且 $f(+\infty) = +\infty$, 因此必存在 $\beta_A^* \geq 0$ 使得式(13)成立。

4.2 定价策略分析

4.2.1 套餐计费模式定价策略

首先, 分析套餐计费模式下的定价策略, 即求解下列方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial E(A)}{\partial \beta_A} = 0, \\ \frac{\partial E(A)}{\partial P_A} = 0, \\ \frac{\partial E(A)}{\partial P_A^{acc}} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

结论3: 套餐计费模式下, 接入ISP向用户收取的网络接入费用与服务单个用户的服务成本成正比。

证明: 求解 $\frac{\partial E(A)}{\partial P_A^{acc}} = 0$ 得到:

$$P_A^{acc*} = \frac{\epsilon}{\epsilon - 1} (t_A \beta_A + N\alpha_{A,A}c_A + N\alpha_{A,out}P_C^{net}) \quad (15)$$

式(15)中, 括号内第一项为ISP A服务单个用户的带宽成本, 第二项为请求缓存命中时产生的总缓存成本, 第三项为请求未命中时转发请求的总转发成本。因此括号中部分为ISP A服务单个用户的总服务成本。由式(15)可知, ISP A的最优网络接入费用为总服务成本的 $\frac{\epsilon}{\epsilon - 1}$ 倍。

4.2.2 流量计费模式定价策略

首先, 分析流量计费模式下的定价策略, 即求解下列方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial E(B)}{\partial \beta_B} = 0, \\ \frac{\partial E(B)}{\partial P_B} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

结论4: 套餐计费模式更有利于ICN部署与发展, 用户在更能从套餐计费模式中获利。

证明: 求解 $\frac{\partial E(B)}{\partial P_B} = 0$, 得到:

$$P_B^* = \frac{u_B \epsilon (t_B \beta_B + N\alpha_{B,B}c_B + N\alpha_{B,out}P_C^{net})}{N((\epsilon - 1)u_B - u_A \alpha_{A,B})} \quad (17)$$

式(17)中, ISP B向用户收的费用 P_B^* 受到ISP A的用户数量 u_A 的影响, 且 u_A 越大, P_B^* 越高。这是由于ISP之间的请求转发使得ISP获得一些非本地用户, 用户基数增加使得ISP可以向用户收取更高的价格。 u_A 的增加是ISP A的更低的服务价格或更高的服务质量造成, 但ISP B的用户并未享受到这些优惠却需要为此买单, 这对用户是难以接受的, 而套餐计费模式能屏蔽其它ISP的影响, 用户只需为享受到的服务付费。因此两种模式中, 套餐计费模式更符合用户的需求。

由式(4)(15)得, 套餐计费模式中, ISP A向用户收取的平均内容服务费

$$p_A = \frac{\epsilon (t_A \beta_A + N\alpha_{A,A}c_A + N\alpha_{A,out}P_C^{net})}{N(\epsilon - 1)} \quad (18)$$

对比(17)(18), 可以发现其它条件相同的情况下, $P_A^* \geq p_A$, 这说明套餐计费模式下, 用户需要支付的费用更少。因此, 在保证运营商利益的前提下, 用户更能从套餐计费模式中收益。套餐计费模式可以满足ICN发展中运营商与用户的需求, 能够促进ICN的发展。

5 仿真实验

根据图1的ICN模型进行数值模拟并评估模型。实验中包含两个接入ISP, 一个传输ISP和一个CP, 实体之间通过调整自身定价策略以最大化效用。如无特殊说明, 设置缓存参数为: $\alpha_{A,A} = 0.5$ 、 $\alpha_{A,B} = 0.1$ 、 $\alpha_{A,D} = 0.4$ 、 $\alpha_{B,A} = 0.2$ 、 $\alpha_{B,B} = 0.4$ 、 $\alpha_{B,D} = 0.4$ 。其余参数为: $\epsilon = 2$ 、 $t_A = t_B = 1$ 、 $c_A = c_B = 0.05$ 、 $U_A = U_B = 1000$ 、 $N = 1000$ 。

图2展示了 P_A^{acc} 与 P_A 对ISP A效用函数的影响。从图中可以看出, 随 P_A^{acc} 的提高, ISP A的效用呈现

先增后减的趋势。这是由于当 $P_A^{acc} < P_A^{acc*}$ 时, P_A^{acc} 的提高导致用户数量急剧减少, 但由于收取费用的增加, ISP整体效用仍呈现上升趋势。当 $P_A^{acc} > P_A^{acc*}$ 时, 用户数量已经降得足够少, 即使继续向单个用户加收费用, 依旧无法阻止总体收益的下降趋势。而随着 P_A 的增加, 效用函数呈现线性增长的趋势。这是由于来自ISP B的用户请求带来收益增长, 因此在一定范围内, P_A 越大, 效用越高, 但这并不是无限制的, 具体原因在后续说明。

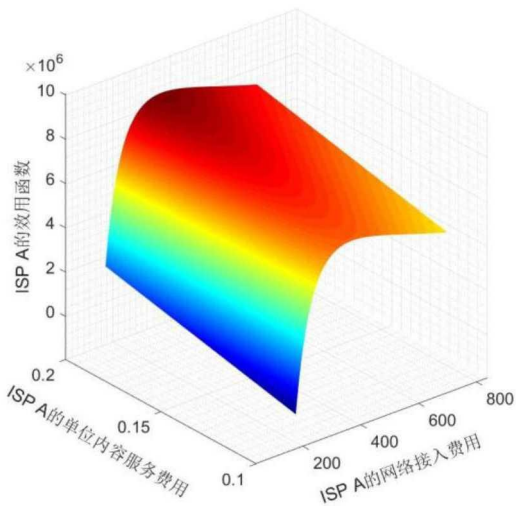


图 2: ISP A 的网络接入费用与单位内容服务费对ISP A效用函数的影响

图3显示了 β_A 对 P_A^{acc*} 的影响。随着 β_A 的增加, ISP A的用户获得了更好的服务质量, 但这也会增加ISP的服务成本。由结论3可知, P_A^{acc*} 应与单个用户的总服务成本成正比, 因此最优网络接入费用随着服务带宽的增加而增加。虽然 β_A 增加导致服务质量的提升, 但由此带来的服务成本增加以及 P_A^{acc*} 增长导致的用户数量减少仍会影响ISP A的总体效用。因此ISP需要着眼总服务成本, 选择合理的带宽策略。

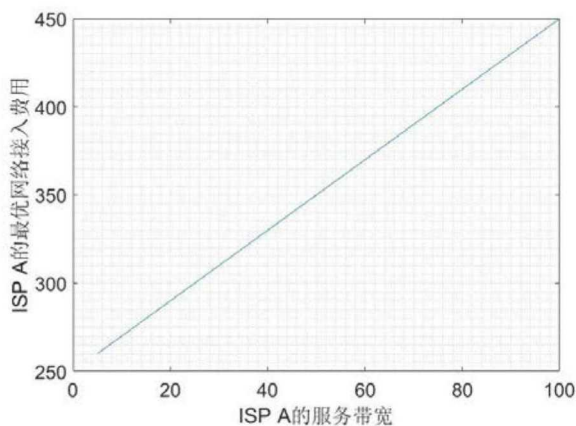


图 3: ISP A 的服务带宽对最优网络接入费的影响

图4显示了 P_B 对ISP B的效用的影响。可以观察到, 当 P_B 较小时, 随着 P_B 的增长, 效用呈现先增后减的趋势, 这与图2表示的趋势相近, 都是用户数量的较少与收取费用的增加综合导致的。但当 P_B 较大时, ISP B的效用又一次呈现先增后减, 而且是断崖式下跌。这是因为, 随着 P_B 的增加, 虽然用户数量较少导致来自本地用户请求的收益减少, 但来自ISP A的用户请求带来的收益持续增加, 二者叠加使得总体效用仍增长。但当 $P_B \geq P_D^{hit}$ 时, ISP C的转发策略发生变化, 请求将不再转发给ISP B, 于是ISP B只能获得本地用户请求带来的收益。由此可以发现, ICN架构中ISP有着灵活的定价策略。当 P_D^{hit} 足够大时, ISP甚至改变业务重心, 从面向ISP的业务中获利。

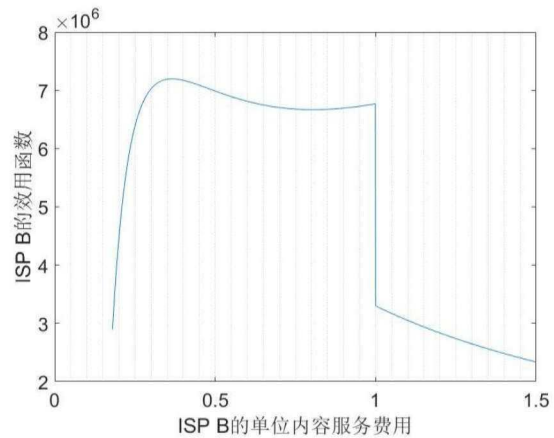


图 4: ISP B 的单位内容服务费对ISP B效用函数的影响

图5显示了 P_B 对ISP A的效用的影响。可以观察到, 随着 P_B 的增长, ISP A的效用呈现迅速下降的趋势。这是由于 P_B 的增长造成ISP B用户数量的减少。此时, ISP A从ISP B的用户请求获得的收益也降低了。虽然ISP可以从面向ISP的业务中获利, 但这部分效用受其它ISP定价策略的影响较大, 因此ISP需要根据其它ISP的定价策略谨慎选择业务重心。

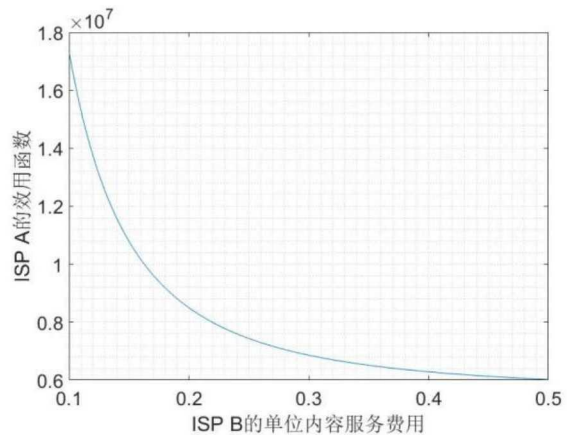


图 5: ISP B 的单位内容服务费对ISP A效用函数的影响

6 结论与展望

本文中,针对套餐计费模式与流量计费模式研究ICN中的缓存定价机制,研究用户、ISP和CP之间的交互。通过建立效用函数并求解Nash均衡点,得出两种模式下的最佳缓存与定价策略。分析发现ICN实体的缓存定价策略收到网络架构中其它实体的影响,同时也影响着其它实体策略。同时在ICN中,流量计费模式下ISP本地用户会受到其它ISP服务策略的影响而支付更多费用,而套餐计费模式能有效屏蔽不合理的影响,更符合ICN中运营商与用户需求,能够促进ICN的发展。通过对模型进行数值模拟,研究缓存参数、价格等条件对效用的影响,实验结果证明了所提出的缓存与定价策略的合理性与准确性。

参考文献

- [1] B. Ahlgren, Dannewitz, et al. A Survey of Information-Centric Networking. *IEEE Communication Magazine*, 2012, 50(7): 26-36.
- [2] G. Xylomenos, CN. Ververidis, et al. A Survey of Information-Centric Networking Research. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2014, 16(2): 1024-1049.
- [3] Q. Zheng, T. Yang, et al. On the Analysis of Cache Invalidation With LRU Replacement. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2022, 33(3): 654-666.
- [4] PK. Agyapong, M. Sirbu. Economic Incentives in Information-Centric Networking: Implications for Protocol Design and Public Policy. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(12): 18-26.
- [5] M. Ghasemi, I. Matta, et al. The Effect of (Non-)Competing Brokers on the Quality and Price of Differentiated Internet Services. *Computer Networks*, 2019, 160: 144-164.
- [6] A. Satybaldy, C. Joo. Pricing and Revenue Sharing Between ISPs Under Content Sponsoring. *Mobile Networks and Applications*, 2021, 26(2): 501-511.
- [7] MK. Hanawal, E. Altman. Network Non-Neutrality through Preferential Signaling. *2013 11th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, AD HOC and Wireless Networks (WIOPT)*, 2013: 232-239.
- [8] G. Kesidis. A Simple Two-Sided Market Model with Side-Payments and ISP Service Classes. *2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2014: 595-597.
- [9] TM. Pham. Analysis of ISP Caching in Information-Centric Networks. *IEEE RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies-Research, Innovation, and Vision for the Future (RIVF)*, 2015: 151-156.
- [10] TM. Pham, S. Fdida, P. Antoniadis. Pricing in Information-Centric Network Interconnection. *IFIP Networking Conference*, 2013: 1-9.
- [11] CK. Jiang, L. Gao, et al. On Economic Viability of Mobile Edge Caching. *2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020: 1-6.
- [12] D. Mitra, A. Sridhar. Consortiums of ISP-Content Providers Formed by Nash Bargaining for Internet Content Delivery. *2019 IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM)*, 2019: 631-639.
- [13] F. Kocak, G. Kesidis. The Effect of Caching on a Model of Content and Access Provider Revenues in Information-Centric Networks. *2013 ASE/IEEE International Conference on Social Computing (SOCIALCOM)*, 2013: 45-50.
- [14] 史庭祥, 章璐, 李立平. 5G时代的运营商计费模式探讨. *信息技术与政策*, 2021, 47(5): 73-79.
- [15] D. Mitra, Q. Wang, A. Hong, Emerging Internet Content and Service Providers' Relationships: Models and Analyses of Engineering, Business and Policy Impact. *2017 IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM)*, 2017: 1-9.
- [16] HZ. Wang, H. Jia, et al. Cost-Aware Optimisation of Cache Allocation for Information-Centric Networking. *2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017)*, 2017: 1-6.
- [17] J. Duan, RL. Tian, et al. A Collaborative Pricing Framework for In-Network Caching in Information-Centric Networking. *IEEE Access*, 2018, 6(1): 40485-40493.