

ICN 中免费内容的缓存定价机制^①



吴蓉¹, 郑焱^{1,2}, 杨坚¹

¹(中国科学技术大学 自动化系 未来网络实验室, 合肥 230026)

²(中国科学技术大学 先进技术研究院, 合肥 230026)

通讯作者: 郑焱, E-mail: qzheng@ustc.edu.cn

摘要: 在信息中心网络 (Information-Centric Networking, ICN) 中, 为了激励网络服务提供商部署网络内缓存, 我们需要制定一种合适的定价机制. 目前 ICN 的定价机制仅考虑收费内容, 但实际的情况是, 网络中免费内容远多于收费内容. 为此, 本文区别于 ICN 中传统订阅 (收费内容) 模型, 首次提出了 ICN 中一种具有广告商参与的基于免费内容的定价策略. 并利用博弈论对模型进行求解. 文章分析表明, 网络中的参与者存在最佳的广告收费策略、内容缓存策略以及最佳收益点. 仿真结果可以看出, 该模型可以使参与者在竞争过程中实现利润最大化, 从而达到激励 ISP 部署网络内缓存的目的. 与 ICN 中已有的方案相比, 我们的方案更加贴合实际, 也能获得更优的收益.

关键词: 定价策略; 广告商; 免费内容; 信息中心网络 (ICN); 博弈

引用格式: 吴蓉, 郑焱, 杨坚. ICN 中免费内容的缓存定价机制. 计算机系统应用, 2020, 29(8): 38-47. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7575.html>

Pricing and Caching Strategies for Free Content in Information Centric Networks

WU Rong¹, ZHENG Quan^{1,2}, YANG Jiang¹

¹(Laboratory of Future Networks, Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

²(Institute of Advanced Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to motivate Internet Service Providers (ISPs) to deploy in-network caching, we need to develop a new pricing mechanism among ISPs, Content Provider (CP), and users. The existing pricing mechanism of Information Centric Networks (ICN) mainly considers paid content, but more practically, there is more free content on the network. Therefore, based on the free content, we first propose one pricing and caching mechanism with advertisers' participation in ICN and use game theory to solve our model. The analysis shows that participants in the network have the best advertising charging strategy, content caching strategy, and the best profit point. The simulation results show that the model can maximize the participants' profits in the competition process. At the same time, it can be seen that this model is more practical and more profitable than the traditional charging model, so it can achieve the purpose of motivating ISPs to deploy in-network caching.

Key words: pricing strategies; advertisers; free content; Information-Centric Networking (ICN); game

思科的报告指出, 截至 2022 年, 全球 IP 流量将增长近 3 倍之多^[1]. 为了应对互联网内容交付的快速增长需要一种不同的网络范式, 为此学术界提出了一种以信息为中心的网络. 在信息中心网络 (Information-

Centric Networking, ICN) 中, 用户只对信息 (内容) 感兴趣, 而不关心它位于何处, 甚至不关心它如何交付^[2,3]. ICN 一个重要特点是, 内容可以有选择的存储在路由器上. 通过网络内的缓存, 用户可以就近获取内容, 从

① 基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金 (中电科)(6141B08080101)

Foundation item: Joint Fund for Enterprise Innovation and Development of National Natural Science Foundation of China (CETC) (6141B08080101)

收稿时间: 2020-02-09; 修改时间: 2020-03-08; 采用时间: 2020-03-13; csa 在线出版时间: 2020-07-29

而提高内容分发效率^[4-6]。

合适的定价机制有利于网络的完善与发展,在当前的 Internet 和互连网络中,已经做了很多工作来研究服务定价的经济机制^[7-13]。通常情况下,对于接入 ISP 和传输 ISP 来说,其收入主要来自于提供传输服务时获得的收益。对于 CP 来说,在 IP 网络下的定价机制中,收入来源有两部分:其一小部分来自收费内容,用户需要向 CP 支付内容费用。其他大多数 CP 提供免费内容,但可以从广告商那里获得收入,在此情况下,用户的需求可以用内容关注量来描述,如点击内容或浏览网络广告等^[10]。

一些在 ICN 中的研究表明,使用传统互联网的定价机制不能激励 ISP 在未来网络架构中部署缓存。因此,我们需要新的机制来给予他们在缓存和分发内容方面的经济激励^[14-16]。对于具有网络内缓存的 ICN 网络来说,其 ISP 可以代替 CP 向用户分发内容,那么基于 IP 网络的定价机制就无法契合以内容为中心的网络^[17,18]。为了促进 ICN 网络的发展,需要制定合适的定价机制。已经有部分研究对 ICN 中订阅(收费内容)模型的定价机制做出贡献^[17-23],但到目前为止,没有针对 ICN 网络中大量免费内容进行定价机制研究。

对于上述出现的问题,为了更加完善 ICN 中的定价机制,本文从 ICN 中的免费内容出发,首次提出一种针对免费内容的定价机制。本文的主要工作如下:

(1) 区别 ICN 中传统收费内容模型,在 ICN 网络模型中有效地加入广告商角色,并研究广告商实体与其他实体的交互行为。

(2) 在针对免费内容的情况下,为每个实体建立效用函数,基于所提出的效用函数、用户选择模型和广告商模型,推导出所有 ICN 实体效益最大化的定价策略。

(3) 利用博弈论知识,文章综合考虑了缓存与定价对各自收益的影响,并给出均衡点的求解方法与结果。

(4) 使用 Matlab 进行大量的数值分析,分析不同情况下各个定价与缓存参数的变化对于各个实体收益的影响,对提出的方案进行评估,并与传统的 ICN 收费模型进行对比。

本文结构组织如下:首先概述本文工作动机与主要工作;第 1 节介绍并分析相关定价机制的研究工作;第 2 节给出 ICN 中免费内容的定价模型;第 3 节分析广

告商行为并证明均衡点的存在;第 4 节进行数值分析,给出实验结果;第 5 节总结本文工作与进一步研究方向。

1 相关工作

在当前的互连网络中,已经做了很多研究来提高 ISP 在全球范围内的收入^[7-13]。在传统 IP 网络中,定价收费的典型研究如下:在文献 [12] 中,作者研究了一个简单的基于用户需求的 ISP 和 CP 的双边市场模型,并证明了广告收入可以激励终端用户。在文献 [10] 中,研究了 IP 网络下,CP 的两种收费模式,并分别阐述了两种不同模式下,如何设置合理的收费机制,但是其只考虑了每个角色只有单一实体。在文献 [13] 中,作者研究了具有离网定价的网络模型,探讨了多个 ISP 及 CP 直接的支付调节机制。在文献 [7] 中,作者提出了多个 ISP 和多个 CP 之间的博弈问题,探讨了 ISP 是否有动机缓存 CP 的内容,并证明了公平和有效的利润共享是可以实现的。

然而,由于 IP 网络和 ICN 的特性差异,这些应用于 IP 网络中的收费定价机制均不适用于 ICN 网络^[16]。作为 ICN 网络经济投资策略的早期研究者,Rajahalme 等发现接入 ICN 和传输 ICN 由于缺乏收入而不愿与其他实体进行合作^[16]。Agyapong 等认为如果没有一定的经济补偿,网络中是不会出现最优数量的缓存^[15]。在文献 [17] 中,作者提出了一个具有多级需求的双边市场模型,但该模型主要针对网络延迟敏感的应用。在文献 [18] 中,作者对比了 CDN 定价与 ICN 的区别,并在 ICN 中提出了简单的定价方案。在文献 [19] 中,基于与传统的 Internet 模型基本相同的单边支付方式,作者提出了一种 ICN 中 ISP 与 CP 之间的非合作博弈模型。Mohammad 等提出了一种更加关注流行内容的缓存定价策略^[20]。Hajimirsadeghi 等评估了 ICN 网络中的接入 ISP、传输 ISP、内容提供者之间的联合缓存和定价策略^[21]。在文献 [22] 中,作者提出了一种 ICN 协作定价策略,该策略考虑了两种收费方式:零售和一次性售出的方式。

但以上研究均只关注了 ICN 中的收费内容(即内容本身有费用),但目前没有对 ICN 网络中免费内容进行定价机制方面的研究。根据传统网络发展的启示,网络中的免费内容占绝大多数^[10],所以对于定价机制的研究,不能忽视网络内的免费内容以及重要的参与者——广告商。

为了更加完善 ICN 网络的定价机制, 激励运营部署缓存. 在本文中, 我们给所有实体建立了效用函数和双赢的定价机制, 使得各个实体收益最大化. 特别地, 我们设计了一种新的框架, 主要集中在以下方面: (1) 将广告商角色纳入传统 ICN 网络订阅 (收费) 模型, 并分析该角色与其他实体的交互行为. (2) 针对免费内容为所有实体建立新的效用函数, 以获得双赢的缓存定价策略. (3) 通过大量实验对本方案进行评估和分析, 并与最新的 CARL 订阅模型^[22] 进行对比.

2 系统模型

在本节中, 我们提出了一种新型的 ICN 网络定价模型. 由上节内容所知, 目前的研究均只针对网络内的收费内容. 但在实际中, 根据帕累托法则, 网络中的免费内容要远远多于收费内容. 我们的新模型主要研究网络中免费内容的定价机制. 为此, 新模型中引入了广告商实体. 并且, 该模型还描述了用户和各个 ICN 实体交互的方式, 广告商的出资行为以及各个实体的效用函数. 最后, 利用博弈论求解 ICN 实体的定价策略, 以实现各个 ICN 实体的效益最大化.

2.1 基本框架

如图 1 所示, 我们建立了一个层次网络模型, 其中包含广告商 (advertisers, AD), 两个接入 ISP (A 和 B), 一个传输 ISP (C), 一个内容提供者 (CP) 和任意数量的用户, 我们规定用户可以从一个接入 ISP 转换到另一个接入 ISP. 接入 ISP 的作用是将终端用户连接到网络中, 传输 ISP 为接入 ISP 提供广域传输, 而内容提供者 (CP) 提供网络中内容. 图 1 还简单描绘了各个参与者之间的数据流与支付流的关系.

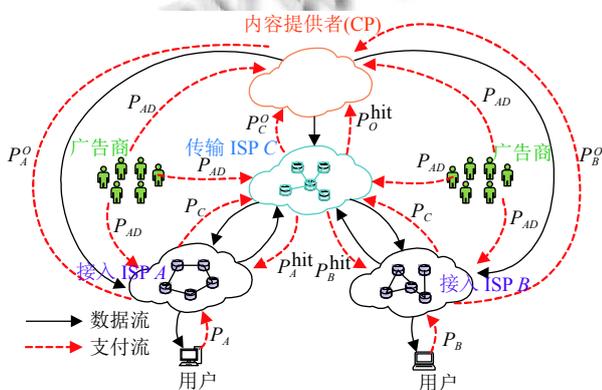


图 1 ICN 网络支付模型图

该模型区别 IP 网络的地方在于: ISP 可以选择缓存 CP 中的部分内容. 当用户请求内容时, 若 ISP 处能够满足用户需求, 用户即从 ISP 处直接获取内容, 否则, 用户从 CP 处获取内容. 此外, 本模型与现有的基于 ICN 中收费内容的模型区别在于: 用户通过观看广告来获得免费内容. 因此, 我们在模型中引入广告商, 在该模式下, 每当用户请求一定的内容, 广告商都必须向内容缓存者支付相应的费用.

本文的主要目的是通过研究不同实体的定价策略、分析各个实体之间的收益关系, 以使各自利益最大化, 达到激励 ISP 部署缓存的目的.

2.2 费用模型

在网络模型中, ISP 具有不同的定价策略, 即该实体向其他实体提供服务时设定的价格. 在模型中, 每个 ISP 设置两个价格^[19]: (1) 转发每单位内容的传输费 P'_K ; (2) 每单位内容在 K 处命中时其收取的存储费 P_K^{hit} . 例如: 用户向 ISP A 请求内容时, ISP A 向用户收取的费用 P_A 包括两部分, 传输费 P'_A 和存储费 P_A^{hit} , 即 $P_A = P'_A + P_A^{hit}$. 由文献 [20] 可知, 在 Internet 传统的存储服务收费策略中, 根据实际情况可以假设存储价格低于传输价格, 且两者之间呈线性关系. 该假设可以表示为: $P'_A = \beta_A P_A^{hit}$, 其中 $\beta_A > 1$.

根据上述分析, 我们可以使用 P_A 表示 ISP A 的定价策略. 同理, ISP B 和 ISP C 的定价策略可以使用 P_B 、 P_C 表示. 内容提供者的定价策略同样包括因缓存内容而带来的存储收益 P_O^{hit} , 与 ISP A 不同的是, CP 作为内容提供者, 当 ISP A 选择从 CP 处缓存内容时, CP 会向 ISP A 收取一次性购买内容的费用. 此外, CP 还会制定广告商为每次点击应付的广告费 P_{AD} . 所以, CP 的定价策略包括内容缓存收益 P_O^{hit} 、一次性售卖内容收益 P^O ^[23] 和广告费 P_{AD} . 在该网络中, 用户向接入 ISP 请求内容时, ISP A 和 ISP B 分别向用户收取费用 P_A 和 P_B . 若接入 ISP 的本地缓存无法满足用户需求, ISP A、B 会将用户需求转发至 ISP C. 而 ISP C 为 ISP A 和 ISP B 转发用户需求并返回所需内容, 其收取的费用为 P_C . 另外, 每当用户请求内容后, 内容存储方均会向广告商收取一定的广告费用.

当用户向 ISP 请求内容时, 接入 ISP 向用户收取的价格会影响到用户的选择. 为了描述价格对用户行为的影响, 根据文献 [20,24], 我们假设两个接入 ISP 在

给出定价策略之前的潜在用户需求比例相同, 即 $\sigma_{A_init} = \sigma_{B_init} = 1/2$. 用 σ_A 和 σ_B 表示接入ISP A和ISP B的实际用户占总用户的比例, 表达式如下:

$$\begin{cases} \sigma_A = \frac{1}{2} - \rho_A P_A + \rho_B P_B \\ \sigma_B = \frac{1}{2} - \rho_B P_B + \rho_A P_A \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ_A 和 ρ_B 表示价格对用户需求的影响因子, 可以看出, ISP A和ISP B的价格可以直接影响用户的需求, 当ISP A的价格上升时, 用户会从ISP A转向ISP B, 因此ISP A处的用户需求会下降. 相应地, ISP B处的用户需求会上升. 反之, ISP B的用户需求下降时, ISP A处的用户需求会上升. 文章中其余的符号说明如表1所示.

表1 符号说明

符号	说明
P_K^f	ISP K收取的每单位内容的流量费
P_K^{hit}	ISP K以及CP收取的每单位内容的存储费
P_K	ISP K向用户收取的每单位内容的总费用
P_{AD}	ISP及CP向广告商收取的每单位内容的费用
C	CP对所有内容的投资费用
$D(C)$	初始用户需求, 随CP的内容投资费C而变化
ρ_K	ISP K的价格对用户需求的影响因子
σ_K	接入ISP K用户需求占总需求的比例
β_K	流量费与存储费的比值($\beta_K > 1$)
$\alpha_{K,M}$	ISP K处的请求在M处得到满足的部分($M=A, B, O$)
c_K	K处的初始缓存成本(包括ISP A、ISP B、CP)
p^O	CP一次性售出所有内容的预期收益
p_M^O	ISP K向CP一次性支付的费用

通过上述的分析可以发现, 网络实体之间存在利益的竞争关系. 例如, 接入ISP A和ISP B之间的竞争, ISP A为了提高自己的收益会提高对用户的定价, 这在一定的范围内是有效的. 若ISP A恶意抬高价格, 其后果是造成用户的大量流失, 从而导致收益下降. 再如, 接入ISP与传输ISP之间, 传输ISP若为了自身利益恶意抬高转发内容的价格, 这会迫使接入ISP缓存更多内容, 以降低中转支出, 这将导致传输ISP的转发量减少而损失收益, 另一方面将导致接入ISP缓存成本的增加. 因此, 网络中存在竞争关系的任意实体都不能恶意抬价来使自身获得更高的收益, 这符合博弈的特点. 本文在后面的章节中采用了博弈论中求解纳什均衡的方法, 分析不同实体之间的效益关系, 探讨各个实体的缓存定价, 从而确定博弈的均衡点, 求得不同实体获得最佳收益的

定价策略.

2.3 广告商模型

根据帕累托法则, CP在网络中提供的内容绝大多数为免费内容. 在Internet网络中, CP从广告商处可以获得额外收入. 与此同时, 为了吸引更多的用户点击内容, CP会对内容做一定的投资. 在广告模式中, 用户需求可用例如内容点击次数即请求次数来表示^[10]. 在ICN中, ISP可以代替CP分发内容, 即也可从广告商处获得相应的收益. 接下来, 我们将描述广告商与网络中ICN实体进行经济交互的行为.

假设网络中存在N个广告商, 每个广告商在给定的时间段内有固定的预算费用 $E^{[10]}$. 每个广告商的投资意愿均为 $v, v \in [0, \bar{v}]$, 其中 v 服从于某种概率分布, 其概率密度函数(PDF)记为 $x(v)$, 累积分布函数(CDF)记为 $X(v)$. 我们假设CP为不同单位内容制定的广告费相同, 且只有当CP为内容制定的广告费 P_{AD} 小于或等于广告商的投资意愿 v 时, 广告商才会投资.

根据上述假设和累积分布函数的性质, 我们可知 $P\{X \geq v\} = 1 - X(v)$. 因此, 广告商的投资概率 $Prob(v \geq P_{AD})$ 可以用 $1 - X(P_{AD})$ 表示. 由概率统计学的知识可知, 广告商的总投资可以由 $N \cdot E \cdot Prob(v \geq P_{AD}) = N \cdot E \cdot [1 - X(P_{AD})]$ 表示.

2.4 效用函数

每个ISP都有缓存内容和转发用户请求的能力, 并基于此来获得相应的收益. 每个ICN实体的收入是它为其其他网络内实体提供服务时获得的收益. ISP和CP在缓存内容时, 都会产生缓存成本, 即为 c_K . 如图1所示, 接入ISP A和B、传输ISP C和内容提供者CP的效用函数可以根据给定价格、缓存成本、用户需求和请求满足的比例来表示.

为了使用数学方法描述各个实体的收益, 根据文献[25]可知, 缓存大小与缓存代价成正比, 且与内容请求命中率相关. 为此, 我们做出如下假设: (1) ISP向CP一次性支付的内容费用与缓存内容的多少成比例; (2) ISP缓存内容占全部内容的比例与用户在此处请求满足的比例相等, 具体来说, 即用内容缓存比 $\alpha_{K,M}$ 表示到达K($K \in A, B$)的请求在实体M($M \in A, B, C, O$)处得到满足的比例^[20].

接入ISP A选择将部分内容缓存至本地, 并向CP一次性支付内容购买费, 同时还会产生因缓存内容

导致的成本支出. ISP A 的效益函数如式 (2).

$$E_A = D(C)[\sigma_A \alpha_{A,A}(P_A - c_A) + \sigma_A \alpha_{A,out}(P_A - P_C) + \sigma_B \alpha_{B,A}(P_A^{hit} - c_A) + (\sigma_A \alpha_{A,A} + \sigma_B \alpha_{B,A})P_{AD}] - P_A^O \quad (2)$$

式 (2) 中, 第 1 项表示 ISP A 的用户请求在 ISP A 处得到满足的部分, 第 2 项表示 ISP A 的用户请求被转发出去的部分, 其中 $\alpha_{A,out} = 1 - \alpha_{A,A}$. 第 3 项表示传输 ISP B 的用户请求转发至 ISP A 并在 ISP A 处得到满足的部分, 第 4 项表示 ISP A 的广告费收益, 尾项表示 ISP A 向 CP 一次性支付的内容费用. ISP A 可以控制的参量为缓存比例变量 $\alpha_{A,A}$ 以及向用户收取的费用 P_A . 接入 ISP B 与 ISP A 相同, 其效用函数如式 (3).

$$E_C = D(C)[\sigma_A \alpha_{A,C}(P_C + P_{AD} - c_C) + \sigma_B \alpha_{B,C}(P_C + P_{AD} - c_C) + \sigma_A \alpha_{A,B}(P_C - P_B^{hit}) + \sigma_A \alpha_{A,O}(P_C - P_O^{hit}) + \sigma_B \alpha_{B,A}(P_C - P_A^{hit}) + \sigma_B \alpha_{B,O}(P_C - P_O^{hit})] - P_C^O \quad (4)$$

式 (4) 中, 第 1 和第 2 项表示 ISP A 和 ISP B 的用户请求 ISP C 处得到满足的部分, 第 3 和第 4 项表示 ISP A 的用户请求经 ISP C 转发并在 ISP B 和 CP 处得到满足的部分, 第 5 和第 6 项表示 ISP B 的用户请求经 ISP C 转发并在 ISP A 和 CP 处得到满足的部分. 尾项表示 ISP C 因缓存内容而向 CP 一次性支付的内容费用. 传输 ISP C 控制缓存变量 $\alpha_{A,B}$ 、 $\alpha_{A,C}$ 、 $\alpha_{A,O}$ 、 $\alpha_{B,A}$ 、 $\alpha_{B,C}$ 、 $\alpha_{B,O}$ 以及为 ISP A 和 ISP B 转发用户请求时收取的服务费用 P_C . CP 的效益函数如下:

$$E_O = D(C)[(\sigma_A \alpha_{A,O} + \sigma_B \alpha_{B,O})(P_O^{hit} + P_{AD} - c_O)] + (P_A^O + P_B^O + P_C^O) \quad (5)$$

$$\begin{cases} \max_{\alpha_{A,A}, P_A} E_A = D(C)[\sigma_A \alpha_{A,A}(P_A - c_A) + \sigma_A(P_A - P_C) + \sigma_B \alpha_{B,A}(\frac{P_A}{1 + \beta_A} - c_A) + (\sigma_A \alpha_{A,A} + \sigma_B \alpha_{B,A})P_{AD}] - \alpha_{A,A}P^O \\ \text{s.t. } 0 \leq \alpha_{A,A} \leq 1, P_A \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

传输 ISP C 效用的最大响应函数为:

$$\begin{cases} \max_{\alpha_{A,C}, \alpha_{B,C}, \alpha_{A,B}, \alpha_{A,O}, \alpha_{B,A}, \alpha_{B,O}, P_C} E_C = D(C)[\sigma_A \alpha_{A,C}(P_C + P_{AD} - c_C) + \sigma_B \alpha_{B,C}(P_C + P_{AD} - c_C) + \sigma_A \alpha_{A,B}(P_C - P_B^{hit}) + \sigma_A \alpha_{A,O}(P_C - P_O^{hit}) + \sigma_B \alpha_{B,A}(P_C - P_A^{hit}) + \sigma_B \alpha_{B,O}(P_C - P_O^{hit})] - \frac{\alpha_{A,C} + \alpha_{B,C}}{2} P^O \\ \text{s.t. } \begin{cases} \alpha_{A,A} + \alpha_{A,B} + \alpha_{A,C} + \alpha_{A,O} = 1, \alpha_{B,A} + \alpha_{B,B} + \alpha_{B,C} + \alpha_{B,O} = 1 \\ 0 \leq \alpha_{A,C} \leq 1, 0 \leq \alpha_{B,C} \leq 1, 0 \leq \alpha_{B,A} \leq 1, 0 \leq \alpha_{B,O} \leq 1, 0 \leq \alpha_{A,B} \leq 1, 0 \leq \alpha_{A,O} \leq 1 \\ P_C \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

CP 效用的最大响应函数为:

$$\begin{cases} \max_{P_O^{hit}, P_{AD}, P^O} E_O = D(C)[(\sigma_A \alpha_{A,O} + \sigma_B \alpha_{B,O})(P_O^{hit} + P_{AD} - c_O)] + (\alpha_{A,A} + \alpha_{B,B} + \frac{\alpha_{A,C} + \alpha_{B,C}}{2})P^O \\ \text{s.t. } P_O^{hit} \geq 0, P_{AD} \geq 0, P^O \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$E_B = D(C)[\sigma_B \alpha_{B,B}(P_B - c_B) + \sigma_B \alpha_{B,out}(P_B - P_C) + \sigma_A \alpha_{A,B}(P_B^{hit} - c_B) + (\sigma_B \alpha_{B,B} + \sigma_A \alpha_{A,B})P_{AD}] - P_B^O \quad (3)$$

式 (3) 中, 第 1 项表示 ISP B 的用户请求在 ISP B 处得到满足的部分, 第 2 项表示 ISP B 的用户请求被转发出去的部分, 其中 $\alpha_{B,out} = 1 - \alpha_{B,B}$. 第 3 项表示 ISP A 的用户请求转发至 ISP B 并在 ISP B 处得到满足的部分, 第 4 项表示 ISP B 的广告费收益, 尾项表示 ISP B 向 CP 一次性购买的内容费用. ISP B 可以控制的参量为缓存比例变量 $\alpha_{B,B}$ 以及向用户收取的费用 P_B . ISP C 的收益函数如式 (4).

式 (5), 第 1 项表示 ISP A 和 ISP B 的用户请求在 CP 处得到满足的部分, 第 2 项表示 ISP A、B 和 C 因缓存 CP 内容而向 CP 支付的购买费. CP 控制的变量为内容存储费 P_O^{hit} , 广告费用 P_{AD} 以及 CP 一次性售出所有内容的预期收益 P^O .

3 免费内容定价策略

3.1 最大效用函数

为了获得各个实体的博弈均衡点, 给出每个博弈实体效用函数的最大响应函数, 接入 ISP A 如式 (6). ISP B 与 A 相似.

3.2 博弈分析

为了解决上述问题,我们需要计算由缓存和定价参数组成的效用函数的导数,并求解以下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_A}{\partial P_A} = 0 & \frac{\partial E_B}{\partial P_B} = 0 & \frac{\partial E_C}{\partial P_C} = 0 & \frac{\partial E_O}{\partial P_O^{hit}} = 0 \\ \frac{\partial E_O}{\partial P^O} = 0 & \frac{\partial E_A}{\partial \alpha_{A,A}} = 0 & \frac{\partial E_A}{\partial \alpha_{A,A}} = 0 & \frac{\partial E_B}{\partial \alpha_{B,B}} = 0 \\ \frac{\partial E_C}{\partial \alpha_{A,C}} = 0 & \frac{\partial E_C}{\partial \alpha_{A,B}} = 0 & \frac{\partial E_C}{\partial \alpha_{A,O}} = 0 & \\ \frac{\partial E_C}{\partial \alpha_{B,C}} = 0 & \frac{\partial E_C}{\partial \alpha_{B,A}} = 0 & \frac{\partial E_C}{\partial \alpha_{B,O}} = 0 & \end{cases} \quad (9)$$

结论 1. 缓存变量 α 在均衡点的取值只能为 0 或者 1^[21].

结论 2. ISP A、ISP B 和 ISP C 缓存内容比例受到缓存内容的代价以及从别处获取内容需付出代价的综合影响.

证明: 因 ISP A、ISP B 和 ISP C 的证明方法相同,本处仅通过 ISP A 来证明该结论.

$$\frac{\partial E_A}{\partial \alpha_{A,A}} = D(C)\sigma_A \left[P_C - \left(\frac{c_A + \frac{P^O}{D(C)} - P_{AD}}{\sigma_A} \right) \right] \quad (10)$$

式(10),小括号中的内容表示 ISP A 缓存内容时所付出的总体代价,记为等效缓存代价 c'_A .当 $c'_A > 0$ 时,表示 ISP A 从别处获取内容需要付出的代价要大于缓存内容需要付出的代价,因此 ISP A 会选择自己缓存内容.相反,当 $c'_A < 0$ 时,表示 ISP A 从别处获取内容需要付出的代价要小于缓存内容需要付出的代价,因此 ISP A

$$D^{AD}(\sigma_A \alpha_{A,O} + \sigma_B \alpha_{B,O}) = \min \left\{ D(C)(\sigma_A \alpha_{A,O} + \sigma_B \alpha_{B,O}), \frac{NE[1 - X(P_{AD})]}{P_{AD}(\sigma_A + \sigma_B)}(\sigma_A \alpha_{A,O} + \sigma_B \alpha_{B,O}) \right\} \quad (13)$$

那么,CP 的效益最大响应函数则为式(14).

$$\max_{P^O, P_{AD}, P^O} E_O = D^{AD} \cdot \left[(\sigma_A \alpha_{A,O} + \sigma_B \alpha_{B,O})(P_O^{hit} + P_{AD} - c_o - C) \right] + \left(\alpha_{A,A} + \alpha_{B,B} + \frac{\alpha_{A,C} + \alpha_{B,C}}{2} \right) P^O \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)绘制出 E_O 随 P_{AD} 单独变化的情况,如图2所示.由图2可知, E_O 在随 P_{AD} 的变化过程中存在最大值,图中曲线的交点即为 P_{AD}^* 的取值.为

$$\max_{P^O, P_{AD}, P^O} E_O = D^{AD} \cdot \left[(\sigma_A \alpha_{A,O} + \sigma_B \alpha_{B,O})(P_O^{hit} + P_{AD} - c_o - C) \right] + \left(\alpha_{A,A} + \alpha_{B,B} + \frac{\alpha_{A,C} + \alpha_{B,C}}{2} \right) P^O \quad (15)$$

在此前提下,无论何种情况,都满足 $D(C) = D^{AD}$,为描述方便,下文都用 $D(C)$ 作为用户的总体需求.

会选择将用户的需求转发出去.

在结论 1 和结论 2 的基础上,我们将 ICN 网络中的博弈情况分为 9 种,具体分类情况见表 2.

表 2 缓存策略表

序号	条件	情况	$\alpha_{A,A}$	$\alpha_{A,B}$	$\alpha_{A,C}$	$\alpha_{A,O}$	$\alpha_{B,B}$	$\alpha_{B,C}$	$\alpha_{B,O}$
1	/	$P_C > c'_A \& P_C > c'_B$	1	0	0	0	1	0	0
2	$2\sigma_B(P_C - c_C) > P^O$		1	0	0	0	0	0	1
3	$P_C > P_O^{hit}$	$c'_A < P_C < c'_B$	1	0	0	0	0	0	1
4	$P_C > P_O^{hit}$		1	0	0	0	0	1	0
5	$2\sigma_A(P_C - c_C) > P^O$		0	0	1	0	1	0	0
6	$P_C > P_O^{hit}$	$c'_B < P_C < c'_A$	0	0	0	1	1	0	0
7	$P_C > P_O^{hit}$		0	1	0	0	1	0	0
8	$2\sigma(P_C - c_C) > P^O$		0	0	1	0	0	0	1
9	$P_C > P_O^{hit}$	$P_C < c'_A \& P_C < c'_B$	0	0	0	1	0	0	1

3.3 广告商与 CP 的行为分析

在广告模式下,我们使用 $D^{AD}(\sigma_A + \sigma_B)$ 表示在广告模式下的用户需求.由 2.3 节内容可知:

$$D^{AD}(\sigma_A + \sigma_B)P_{AD} = NE[1 - X(P_{AD})] \quad (11)$$

根据式(11),在广告模式下,用户需求为:

$$D^{AD} = \frac{NE[1 - X(P_{AD})]}{P_{AD}(\sigma_A + \sigma_B)} \quad (12)$$

当用户从 CP 处获取内容时,CP 处收到的用户需求为 $D^{AD}(\sigma_A \alpha_{A,O} + \sigma_B \alpha_{B,O})$,由于 CP 的用户需求是由 ISP A 与 ISP B 接入,因此 CP 的用户需求要受到 ISP A 与 ISP B 的限制,即 CP 处的请求应该如式(13).

方便计算,假定 v 服从于均匀分布,其概率密度函数 $x(v) = 1/v$,那么累积分布函数为 $X(v) = v/\bar{v}$.所以 $X(P_{AD}) = P_{AD}/\bar{v}$ 可以求得:

3.4 计算结果分析

表 2 将博弈均衡点的情形分为 9 种情况:在情况 1

下,接入ISP A 和ISP B 缓存内容的代价要小于将用户请求转发出去的代价,因此各自选择缓存所有的内容,这将导致传输ISP C 失去作用.在情况2~4下,ISP A 缓存内容的代价较小,但ISP B 缓存内容的代价要高于将用户请求转发出去的代价.情况5~7与情况2~4恰好相反.情况8、9表示ISP A 与ISP B 缓存内容的代价要高于将用户请求转发出去的代价,因此,ISP A 与ISP B 均不会缓存任何内容.我们考虑 $\rho_A = \rho_B = \rho$ 、 $\beta_A = \beta_B = \beta$ 、 $c_A = c_B = c$ ^[21],分别就表2中的情况对各个实体的最佳策略和最佳收益进行了求解,我们列出了表2中情况9的计算结果,计算结果见表3.

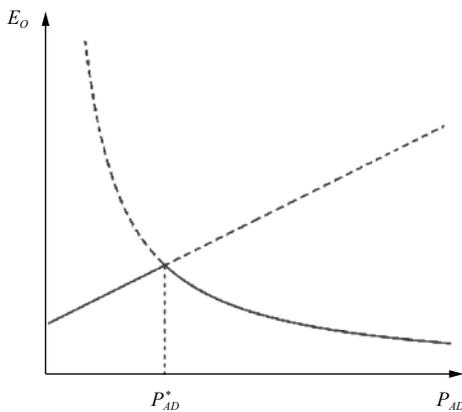


图2 CP 在广告模式下的收益函数

4 数值分析

我们在如图1所示的网络场景中模拟并评估了我们的方案.我们用 $\alpha_{K,M}$ 表示到达K处的请求在M处得到满足的比例,如果没有特殊说明,参照文献[18,22],实验中ISP A 缓存参数: $\alpha_{A,A} = 0.5$ 、 $\alpha_{A,C} = \alpha_{A,B} = 0.1$ 、 $\alpha_{A,O} = 0.3$.ISP B 的缓存参数: $\alpha_{B,B} = 0.4$ 、 $\alpha_{B,C} = 0.2$ 、 $\alpha_{B,O} = \alpha_{B,A} = 0.2$.对于每单位内容,不同的ISP和CP的初始缓存成本为: $c_A = c_B = 0.5$ 、 $c_C = c_O = 0.4$.ISP A、B的初始用户需求均设置为10 000.

根据前文分析可知,网络模型中实体之间采取的策略息息相关,一个竞争者调整策略之后,其他竞争者会做出相应的调整.图3显示了CP制定的广告商费用对ISP A 收费的影响.随着 P_{AD} 的增加,ISP A 为了达到最佳收益,会适当降低对用户的收费,以此换取更多的用户点击量,用户点击量的增加,会带来广告收入的增加.在本模型中,ISP A 的收费与广告商付费成线性关系.

表3 情况9 均衡点计算结果

均衡点	结果
P_A^*	$P_C^* + \frac{1}{2\rho}$
P_B^*	$P_C^* + \frac{1}{2\rho}$
P_C^*	$\min \left\{ \frac{c + \frac{p^O}{D(C)} - P_{AD}^*}{\sigma_A^*}, \frac{c + \frac{p^O}{D(C)} - P_{AD}^*}{\sigma_B^*} \right\}$
P_O^{hit*}	P_C^*
σ_A^*	$\frac{1}{2}$
σ_B^*	$\frac{1}{2}$
E_A^*	$\frac{D(C)}{4\rho}$
E_B^*	$\frac{D(C)}{4\rho}$
E_C^*	0
E_O^*	$D(C)(P_O^{hit*} + P_{AD}^* - c_O - C)$

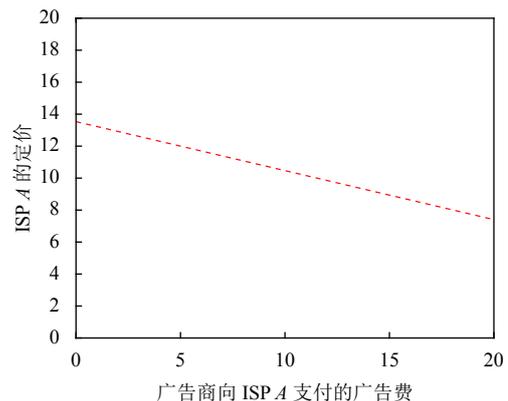


图3 广告商付费对ISP A 定价的影响

图4显示了传输ISP C 转发接入ISP的用户需求时收取的费用对接入ISP收费的影响.从图中可以看出,当ISP C 提高转发费用时,ISP A 会提高对用户收取的费用.尽管此举会降低用户的需求,但总体来说,由于收取费用的增加,ISP A 同样会达到最佳收益.

图5显示了接入ISP A 的定价与传输ISP C 的定价对ISP A 收益的影响.从图中可以看出,随着ISP C 转发费用的提高,ISP A 的整体收益是下降的,当ISP C 免费转发ISP A 的用户需求时,ISP A 的收益最大.同时,ISP A 对用户的收费存在最佳点,即图中的极值点,越过该点后,ISP A 收益会下降,这是因为过高的收费导致用户需求的降低.

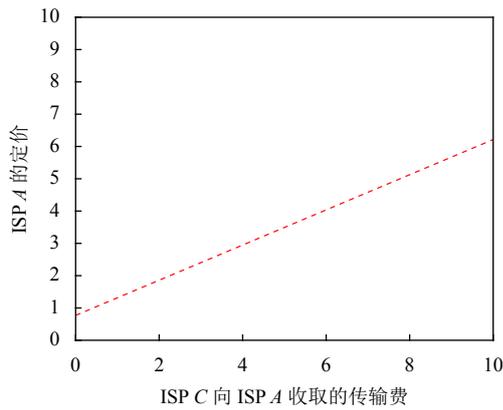


图4 ISP C 的价格对 ISP A 定价的影响

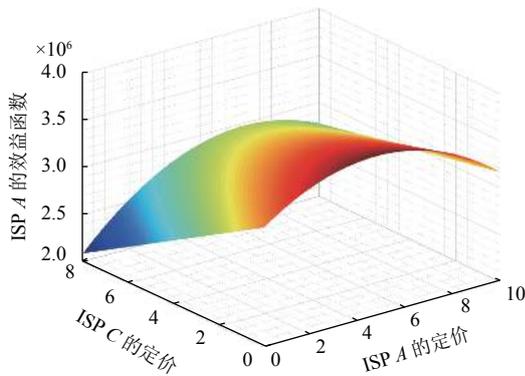


图5 ISP A 和 C 的价格对 ISP A 收益的影响

图 6(a) 描述了 ISP A 的定价与 CP 制定的广告费对各自收益的影响, 从图中可以看出, P_{AD} 与 P_A 均存在一点取值分别使得 E_O 和 E_A 达到最大值. 对于 ISP A 来说, P_{AD} 越大, 其收益越大, 但是 CP 只会从自身的利益考虑 P_{AD} 值的制定. 对于 CP 来说, 随着 P_A 的上升, 其收益呈下降趋势, 但是 ISP A 只会依据自身利益制定 P_A , 最终的结果是, 双方采取适合自身的策略, 使得博弈局面达到平衡.

图 6(b) 描述了 ISP A 的收费价格与 CP 一次性收取的内容费对各自收益的影响. CP 提高一次性收费的价格会使自身利益增加, 但该行为会导致 ISP A 的收益降低, 若一次性收费过高, ISP A 甚至会出现收益为负的局面, 为了改善这一情况, ISP A 会提高自身定价, 这将导致用户需求降低, 进而导致 CP 也无法获得好的收益, 因此 CP 需要制定合理的一次性收费策略.

在图 7 中, 我们将本文的 FCPS 模型与最新的 CARL 订阅模型^[22] 的性能进行了分析比较. 实验中两种模型所有其他参数都取相同的值. 研究表明, 基于订

阅模式的 CARL 模型无法很好的应用于有免费内容存在的实际情况中. 图 7 中, 红色曲线分别模拟了 CARL 模型内容费为 0, 3, 6 下实体的收益情况, 蓝色曲线模拟了广告费用为 3 的 FCPS 模型的收益情况.

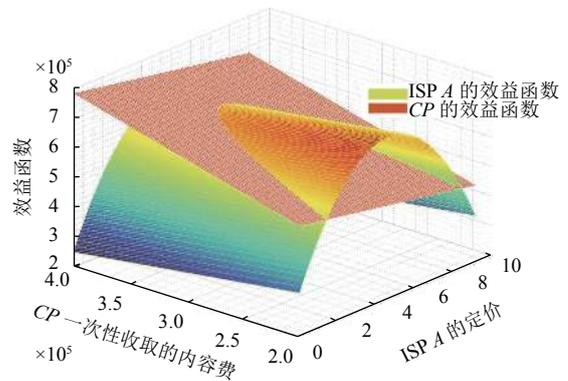
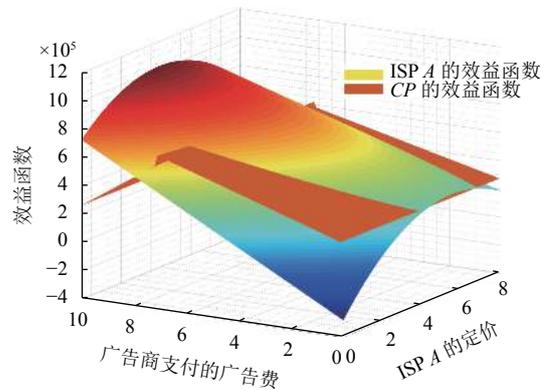


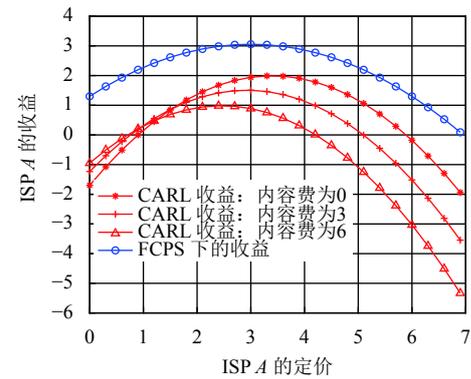
图6 ISP A 的价格和 CP 的价格对收益的影响

为了在订阅(收费)模型中表示出免费内容, 我们将内容费设置为 0, 图 7(a) 和图 7(b) 模拟的结果显示出: 在 ISP 定价较低时, CARL 模型的收益为负值, 这是因为在内容免费的情况下, ISP A 和 ISP C 将会出现支出大于收入的情况. 而 FCPS 将不会出现该情况, 即使 ISP A 与 ISP C 的收费为 0, 由于广告商的存在, 依然能保证其有较好的收益, 这将对激励 ISP 部署缓存十分有利. 实际情况也表明, 当 ISP 的收费比较低时, 会换来更多的用户需求. 为了改善 CARL 模型下收益为负的局面, 我们同时模拟了内容费为 3 和 6 的情况, 模拟结果表明, 在一定收费区间内, 提高内容费会提高 ISP 的收益, 但内容费过高会使用户需求降低, 从而导致收益的下降.

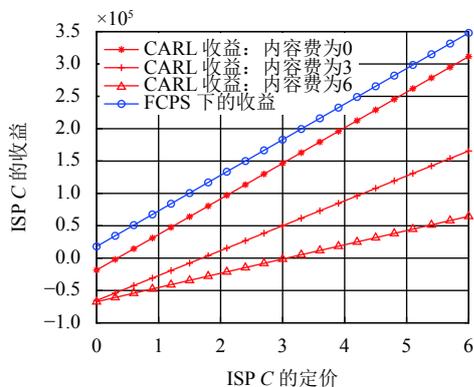
图 7(c) 为 ISP A 的定价对 CP 收益的影响, 在内容费为 0 时, CARL 的 CP 仅有一次性售卖内容的收益, 而没有零售内容的收益. 该情况下, CARL 模型无法显

示 ISP A 的价格对 CP 收益的影响, 显然不太合适. 因为 ISP A 的价格会影响到用户需求, 从而影响 CP 的收益. 即使 CARL 增加内容费用, 也可以看到在 FCPS 模型中, CP 的收益依然更具优势.

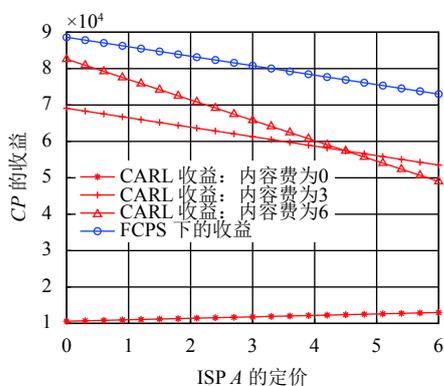
综上, 在内容免费的情况下, CARL 等订阅模型不再适用, 因此需要新的模型来描述 ICN 中实体的经济交互, 而本文的 FCPS 模型基于免费内容进行分析, 更加贴合实际, 更具可用性. 同时, 从对比结果可见, FCPS 模型也会为 ICN 中的各个实体带来更高收益.



(a) ISP A 的定价对 ISP A 收益的影响



(b) ISP C 的定价对 ISP C 收益的影响



(c) ISP A 的定价对 CP 收益的影响

图7 CARL 和 FCPS 的比较

5 结论与展望

在本文中, 区别了 ICN 传统收费内容模型, 我们首次提出了 ICN 中免费内容的定价策略, 有效的将广告商模型加入 ICN 定价模型. 文章研究了广告商与其他实体之间的行为关系, 建立了每个实体的效用函数, 在综合考虑缓存和定价对收益的影响下, 求解出均衡点, 从而得到最佳的缓存定价策略. 为了对提出的方案进行评估, 并与传统的 ICN 收费模型进行对比, 我们使用 Matlab 进行了大量的数值分析, 并阐述了不同情况下各个定价参数与缓存参数的变化对各个实体收益的影响, 同时可以看出我们的模型更具实用性和收益性.

在以后的工作中, 我们还将继续研究广告商的投资意愿在不同概率分布下的情况以及 CP 对内容投资策略的变化带来的影响.

参考文献

- 1 Cisco. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022. Cisco Public, 2018.
- 2 Ahlgren B, Dannewitz C, Imbrenda C, *et al.* A survey of information-centric networking. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(7): 26–36. [doi: 10.1109/mcom.2012.6231276]
- 3 Xylomenos G, Ververidis CN, Siris VA, *et al.* A survey of information-centric networking research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(2): 1024–1049. [doi: 10.1109/SURV.2013.070813.00063]
- 4 Din IU, Hassan S, Khan MK, *et al.* Caching in information-centric networking: Strategies, challenges, and future research directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1443–1474. [doi: 10.1109/COMST.2017.2787609]
- 5 段洁, 邢媛, 赵国锋. 信息中心网络中缓存技术研究综述. *计算机工程与应用*, 2018, 54(2): 1–10. [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1704-0426]
- 6 郭晨, 郑焱, 丁尧, 等. 基于内容热度与节点介数的 NDN 网络缓存策略. *计算机系统应用*, 2017, 26(12): 165–169. [doi: 10.15888/j.cnki.csa.006105]
- 7 Douros VG, Elayoubi SE, Altman E, *et al.* Caching games between content providers and internet service providers. *Performance Evaluation*, 2017, 113: 13–25. [doi: 10.1016/j.peva.2017.04.006]
- 8 刘燕, 郑明春. 基于服务模型的定价机制研究综述. *网络安全技术与应用*, 2012, (12): 44–46. [doi: 10.3969/j.issn.1009-6833.2012.12.017]

- 9 许航天. 基于网络定价策略的通信网资源分配研究 [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- 10 Altman E, Legout A, Xu YD. Network non-neutrality debate: An economic analysis. Proceedings of the 10th International IFIP TC 6 Conference on Networking. Valencia, Spain. 2011. 68–81. [doi: [10.1007/978-3-642-20798-3_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20798-3_6)]
- 11 陈继光, 周亚平, 陈波. 网络服务中基于流量的定价策略. 运筹与管理, 2005, 14(4): 101–106. [doi: [10.3969/j.issn.1007-3221.2005.04.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3221.2005.04.022)]
- 12 Kesidis G. A simple two-sided market model with side-payments and ISP service classes. Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Toronto, ON, Canada. 2014. 595–597, doi: [10.1109/INFCOMW.2014.6849298](https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2014.6849298).
- 13 Altman E, Hanawal MK, Sundaresan R. Regulation of off-network pricing in a nonneutral network. ACM Transactions on Internet Technology, 2012, 14(2–3): 1–21. [doi: [10.1145/2663491](https://doi.org/10.1145/2663491)]
- 14 Araldo A, Rossi D, Martignon F. Cost-aware caching: Caching more (costly items) for less (ISPs operational expenditures). IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016, 27(5): 1316–1330. [doi: [10.1109/tpds.2015.2433296](https://doi.org/10.1109/tpds.2015.2433296)]
- 15 Agyapong PK, Sirbu M. Economic incentives in information-centric networking: Implications for protocol design and public policy. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(12): 18–26. [doi: [10.1109/mcom.2012.6384447](https://doi.org/10.1109/mcom.2012.6384447)]
- 16 Rajahalme J, Särelä M, Nikander P, *et al.* Incentive-compatible caching and peering in data-oriented networks. Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT Conference. New York, NY, USA. 2008. 62.
- 17 Kocak F, Kesidis G, Pham TM, *et al.* The effect of caching on a model of content and access provider revenues in information-centric networks. Proceedings of 2013 International Conference on Social Computing. Alexandria, VA, USA. 2013. 45–50. [doi: [10.1109/socialcom.2013.13](https://doi.org/10.1109/socialcom.2013.13)]
- 18 Pham TM, Fdida S, Antoniadis P. Pricing in information-centric network interconnection. Proceedings of 2013 IFIP Networking Conference. Brooklyn, NY, USA. 2013. 1–9.
- 19 Pham TM. Analysis of ISP caching in information-centric networks. Proceedings of 2015 IEEE RIVF International Conference on Computing & Communication Technologies-Research, Innovation, and Vision for Future (RIVF). Can Tho, Vietnam. 2015. [doi: [10.1109/rivf.2015.7049891](https://doi.org/10.1109/rivf.2015.7049891)]
- 20 Hajimirsadeghi M, Mandayam NB, Reznik A. Joint caching and pricing strategies for popular content in information centric networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(3): 654–667. [doi: [10.1109/jsac.2017.2672161](https://doi.org/10.1109/jsac.2017.2672161)]
- 21 Hajimirsadeghi M, Mandayam NB, Reznik A. Joint caching and pricing strategies for information centric networks. Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego, CA, USA. 2015. 1–6. [doi: [10.1109/glocom.2015.7417138](https://doi.org/10.1109/glocom.2015.7417138)]
- 22 Duan J, Tian RL, Xing Y, *et al.* A collaborative pricing framework for in-network caching in information-centric networking. IEEE Access, 2018, 6: 40485–40493. [doi: [10.1109/access.2018.2849103](https://doi.org/10.1109/access.2018.2849103)]
- 23 段洁. 内容中心网络路由和缓存机制研究 [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- 24 Abolhassani M, Bateni MH, Hajiaghayi MT, *et al.* Network cournot competition. Proceedings of the 10th International Conference on Web and Internet Economics. Beijing, China. 2014. 15–29. [doi: [10.1007/978-3-319-13129-0_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13129-0_2)]
- 25 Wang HZ, Hu J, Min GY, *et al.* Cost-aware optimisation of cache allocation for information-centric networking. Proceedings of 2017 IEEE Global Communications Conference. Singapore. 2017. 1–6. [doi: [10.1109/glocom.2017.8254032](https://doi.org/10.1109/glocom.2017.8254032)]