

# 互联网流量补贴模型研究与实例分析

苏辉<sup>1</sup> 徐恪<sup>1</sup> 沈蒙<sup>3</sup> 王勇<sup>2</sup> 钟宜峰<sup>1</sup> 李彤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

<sup>2</sup>(清华大学经济学研究所 北京 100084)

<sup>3</sup>(北京理工大学计算机学院 北京 100081)

(suhui12@mails.tsinghua.edu.cn)

## Mobile Data Subsidy Model and Case Study

Su Hui<sup>1</sup>, Xu Ke<sup>1</sup>, Shen Meng<sup>3</sup>, Wang Yong<sup>2</sup>, Zhong Yifeng<sup>1</sup>, and Li Tong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>2</sup>(Institute of Economics, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>3</sup>(School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract** With the advances of mobile Internet market, many customers use smartphones and tablets to replace desktops as the default Internet accessing tools. The demand for mobile data also increases rapidly. Despite the increasing popularity of mobile computing, exploiting its full potential is still difficult due to the expensive Internet access from mobile clients. The conflict of demand-cost has impeded the development of mobile Internet in some extent. It has become a critical issue that how to design the optimal data allocation mechanism for all participants from the global perspective. In this paper, we investigate a novel data allowance (DA) model which enables seamless collaboration between Internet content providers (CPs) and Internet service providers (ISPs). Taking Alibaba's real-world deployment as an example, we provide a detailed economic analysis of this business model and reveal the following findings: Firstly, this model enables a more flexible relationship between ISPs and their customers, which can efficiently increase the active online time of mobile users. Secondly, the proposed CP-provided subsidization policy leads to a win-win solution for both CPs and users. Thirdly, the subsidization policy is restrained by some constraints which ensure the validity of the subsidizing process. We believe that our findings provide important insights for CPs and ISPs to design the effective subsidization mechanism for mobile users in the mobile Internet market.

**Key words** mobile Internet; network economics; mobile data; subsidization mechanism; game theory

收稿日期:2015-12-07;修回日期:2016-01-28

基金项目:国家自然科学基金项目(61170292,61472212);国家科技重大专项基金项目(2015ZX03003004);国家“九七三”重点基础研究发展计划基金项目(2012CB315803);国家“八六三”高技术研究发展计划基金项目(2013AA013302,2015AA015601);欧盟 CROWN 基金项目(FP7-PEOPLE-2013-IRSES-610524);清华信息科学与技术国家实验室(筹)学科交叉基金项目

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61170292,61472212), National Science and Technology Major Project of China (2015ZX03003004), the National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB315803), the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2013AA013302, 2015AA015601), EU Marie Curie Actions CROWN (FP7-PEOPLE-2013-IRSES-610524), and Multidisciplinary Fund of Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology.

通信作者:徐恪(xuke@tsinghua.edu.cn)

**摘要** 随着移动互联网的不断发展,许多网络用户都使用智能手机或是平板电脑取代了传统的台式机作为首选的上网设备.相应地,用户对移动流量的需求增长也非常迅速.然而,由于高昂的访问成本,人们还是难以完全享受移动互联网带来的便利,已经在一定程度上阻碍了移动互联网的发展.从全局角度看,如何为互联网参与者们设计优化的流量分配方案已经成为一个关键问题.针对此问题,提出了一个新的基于互联网内容提供商与运营商合作的流量补贴模型 DA(data allowance),共同为用户提供补贴.通过对该模型的经济学分析,得到以下结论:1)该模式能够在内容商、运营商、用户之间形成更具弹性的关系,能有效延长用户的活跃在线时间;2)提出的内容商补贴策略能够实现用户与内容商的双赢结果;3)流量补贴策略不是可以任意实施的,它有约束条件限制以保证补贴的有效性,能够对互联网内容商和运营商制定补贴策略提供有益参考.

**关键词** 移动互联网;网络经济学;移动流量;补贴机制;博弈论

**中图分类号** TP393

近年来,得益于信息技术的长足进步,移动互联网在工业界和商业界迅猛发展,并保持强劲的增长势头.特别是在中国,2014年年底之前,移动互联网用户数量已经达到5.57亿<sup>[1]</sup>.伴随着移动用户数量的爆炸式增长,对移动流量的消耗也急剧攀升.著名网络公司 CISCO 在其报告中讲到,全球移动流量的消耗量在2014—2019年期间将增加10倍<sup>[2]</sup>.面对这样的情况,一些著名的互联网运营商(Internet service provider, ISP),如 AT&T, T-Mobile 等,提出了给用户提供各种流量套餐的解决方案,但用户仍然感到上网成本在持续上升.出现这种情况的原因是,用户最常使用的那些内容,比如视频和图片等,消耗了大部分流量,很容易就超过了套餐规定的限额.出于减少流量消耗和降低上网成本的目的,一方面大多数用户在条件允许的情况下会将手机信号从3G/4G网络切换到WiFi;另一方面,大多数常用的手机App都内置了流量提醒功能,在下载相关内容前会提请用户确认,比如 GoogleMap 等.

在移动互联网市场中,内容提供商(content provider, CP)产生了大量内容,并通过把这些内容销售给用户以赚取利润.ISP经营的方式是为CP和用户提供接入服务,收取相应的服务费.而用户则是在网络上进行购物、娱乐、通信、社交等活动,获得商品及心理满足感等.对于CP来说,将内容销售给用户,是以消耗流量的多少计算应收取的费用;对于ISP来说,其收取的服务费是根据为CP、用户运输了多少流量的内容计算的;对于用户来说,完成网上的各种活动,也是要消耗流量并为之付出相应成本.可见,三者共同关注的焦点集中在移动流量上.对于

整个移动市场来讲,移动流量已经成为影响市场发展的不可忽视的重要因素.我们认为,所有跟流量有关的问题都可以归结为流量分配的问题.目前,从整个市场全局出发,如何为互联网参与者设计并实施优化的流量分配机制是一个很迫切的问题.显然,对于移动互联网参与者来说,谁能够主导流量分配方案,谁就将在市场中占据主导地位,随之而来的是难以估量的利益.从传统来看,流量分配一直被ISP所把持,实施的手段是推出各种各样的流量套餐.近年来,一些参与者试图打破ISP的垄断,成为规则的制定者.在这样的情形下,市场中一些CP已经察觉到巨大的商机并为用户制定了移动流量的新玩法.2013年11月1日,阿里巴巴集团<sup>①</sup>宣布,自11月1日起,在手机上使用阿里巴巴旗下手机淘宝、来往、天猫等客户端的用户,可以申请领取阿里巴巴赠送的免费流量包,随心所欲免费访问淘宝<sup>[3]</sup>.阿里巴巴免费流量包活动首批覆盖地区包括广东、江苏、浙江、湖南4个省,其中,广东限定为中国移动用户,其他3省限定为中国联通用户.同一设备同一手机号同一淘宝ID只能领取一次,每个号码每月最高可享受2GB免费流量.阿里巴巴承诺,今后将尽全力和运营商合作,努力让更多地区的用户享受到免费流量补贴.该活动一出,上述4省的手机用户立刻成为其他省市手机网民羡慕的对象,一时间,外地网民纷纷求购上述4地的手机号,手机淘宝访问量也出现大幅增长.

在实际的部署中,区分用户流量是免费还是收费由ISP负责.用户的访问请求会被ISP部署在移动互联网中的内容计费网关(content charging

<sup>①</sup> 本文将电商也归入CP一类.

gateway, CCG)检查,CCG 会分辨用户的请求内容并决定是否收取费用. 比如,用户通过手机访问淘宝或天猫,在 2 GB 范围内,ISP 不会收取任何费用. 同时,这笔费用会被累计到 CP 的费用账单里,在结算期由 CP 支付<sup>[4]</sup>. 用户参与该免费流量计划的界面如图 1 所示:



Fig. 1 Alibaba's free data subsidy for end users.

图 1 阿里巴巴为用户提供的免费流量补贴

到了 2014 年,阿里巴巴又推出了升级活动. 12 月 1 日,阿里巴巴宣布联手三大运营商推出面向网购用户的福利产品——“流量钱包”. 用户在淘宝、天猫购物或参加商家活动,就可以获赠一定的流量. 阿里巴巴称,这些流量可像零钱一样“零存整取”,快速提取到手机号码或转赠给家人朋友,兑换成联通、移动、电信等运营商的全国流量包<sup>[5]</sup>. 据阿里巴巴介绍,用户“流量钱包”里的流量主要来自商家或淘宝官方的赠予,比如用户在淘宝、天猫店铺中购物满一定额度、参与互动游戏,或是通过收藏、签到、写评价、抽奖等简单互动操作,都可以获得 5 MB,100 MB 甚至是数 GB 的流量. 每次获得的流量多少由商家等赠予方决定,自动充至用户的淘宝账号中. 根据不同运营商设置的不同的档位,用户可以将流量充入手机号码中,提取成功后当月生效,全国不分地域均可使用. 此外,“流量钱包”中的流量,还可以在朋友和家人的淘宝账号之间互转. 阿里巴巴称,“流量钱包”将率先在淘宝“双 12”活动中推广,目前约 20 万淘宝商家参与到流量赠送活动中,未来消费者将会有更多的方式获得流量补贴. 实际上,相似的流量补贴情况国外也开始出现,比如美国运营商 AT&T 从 2014 年 1 月起也开始提供补贴流量<sup>[6]</sup>.

本文基于阿里巴巴集团的真实部署,设计了一个微观的流量补贴模型 DA(date allowance),并对该模型进行经济学分析与推导. 与前人提出的由 ISP 提供补贴的机制不同<sup>[7-8]</sup>,在 DA 模型中,补贴不再由 ISP 提供,而是由诸如 YouTube, Facebook

或阿里巴巴等 CP 来提供给用户. 但是,新的机制并不意味着 ISP 与流量补贴过程毫无关系,ISP 仍然是不可或缺的角色. 首先,CP 用于补贴用户的流量仍然需要从 ISP 获得;其次,ISP 可以通过改变流量价格影响 CP 补贴用户的决策. 最近,文献[9]提出了由 CP 赞助用户某些特定内容的方法,如用户可以免费浏览某些新闻或视频. 该方法与我们提出的机制不同,并且用户不需要在手机上安装专门的应用软件.

本文中,我们建立了流量补贴 DA 模型,并针对以下问题对模型进行了研究分析:1)面对流量补贴,如何刻画不同用户的收益与反应;2)流量补贴的行为必然会增加 CP 的运营成本,CP 最终能否在这样的机制下获得足够收益;3)CP 提供的补贴配额,如阿里巴巴推出的每月 2 GB,从机制设计的角度来说是否合理,能否从理论角度说明该配额制定的合理性;4)新机制将会对 ISP、CP 和用户之间的关系产生什么样的影响. 总之,我们提出新的流量补贴机制的目的在于缓解当前移动互联网环境下用户流量需求与成本之间的矛盾,并期望提高移动用户的使用体验,促进移动互联网良性发展. 本文的主要贡献总结如下:

1) CP 和用户的行为受约束条件限制,CP 不能过度提供免费流量补贴给用户,用户也不能毫无节制地使用补贴流量.

2) CP 提供流量补贴的机制确实能够有效促进用户的流量消费,但在一定程度上也较易引发网络拥塞,ISP 需要采取措施解决拥塞问题.

3) CP 提供流量补贴的机制能够有效增加 ISP、CP 和用户三方的效用.

本文将研究讨论由 CP 主导的流量补贴机制的相关问题.

## 1 相关工作

移动互联网中的参与角色主要包括 CP、ISP 和用户,以前很多工作都聚焦在这三者上. 从 ISP 与用户间关系的角度, Ma 等人<sup>[10]</sup>研究了包括 3 类 ISP 的网络模型,分析了不同 ISP 之间的双边补偿关系,提出了基于 shapley 值<sup>[11]</sup>的利润分配方法. 张春燕等人<sup>[12]</sup>研究了提供服务的 ISP 与选择服务的用户间存在的动态博弈关系. Xu 等人<sup>[13]</sup>基于合作博弈理论提出了在 ISP 联盟中进行利润分配的方法. 之后, Xu 等人<sup>[14]</sup>还分析并总结了在 P2P 网络和无线网络中的定价和管理问题.

在过去几年里研究 ISP 与 CP 间关系的工作也很多. Hande 等人<sup>[7]</sup>专注于速率分配、拥塞控制和效用最大化等问题,提出了在 ISP 和 CP 间分配利润的一种量化的框架. Zhang 等人<sup>[15]</sup>运用博弈论等工具为无线市场设计了基于时间的流量定价方法,并证明了该方法能使 ISP 获得更多利润. Altman 等人<sup>[16]</sup>设计了一个包含垄断性 ISP 和 CP 的博弈模型,通过基于使用量的价格函数研究了双边传输定价、广告利润及合作等问题.

依照基于 CP 的用户补贴策略, Rao<sup>[17]</sup>的工作展示了这样的补贴策略能增加移动市场运营者的利润. Ma<sup>[18]</sup>从宏观的角度分析了基于 CP 的补贴博弈给 CP 吞吐量、系统利用率、用户和整体福利的影响. 最近, Carlee 等人<sup>[9]</sup>从经济学的角度分析了由 CP 为用户提供赞助流量的行为,以及该策略给 CP 和用户带来的影响.

基于这些工作,我们提出了促进 ISP 与 CP 合作提供补贴的 DA 模型. 在研究中我们关注最重要的设计难点,使用经济学的理论和工具分析相关问题. 虽然在传统电信市场已存在一些补贴模型<sup>[19]</sup>,但这些模型在如何缓解 ISP 与 CP 间的利益冲突,以及如何达成双赢局面仍模糊不清,而本文的目标就在于此.

## 2 模型建立

我们提出的由 CP 主导的流量补贴的设计框架如图 2 所示. 该设计不同于以往的流量模型,不同点在于补贴的主体不再是 ISP. 新的补贴提供者的角色由 CP 担任,用户访问 CP 提供的服务,比如浏览网页、观看视频或是购物等,CP 则为这些用户提供一定量的免费流量作为访问其服务的奖励. 值得注意的是,我们提出的流量补贴模型可以将 ISP、CP、

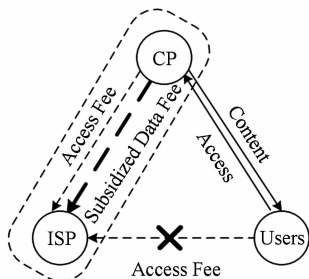


Fig. 2 The framework of CP-provided mobile data subsidy.

图 2 CP 主导流量补贴模型框架

用户间的“三角关系”简化为层次性的结构. 特别是用户只需要为访问的内容向 CP 付费,之后,CP 将代用户向 ISP 支付网络访问费用. 现实生活中有很多相似的例子,比如旅客预定了酒店,酒店会提供往返机场/车站的免费接送服务.

图 3 展示了移动互联网里包含 ISP、CP 和用户 3 个角色的一般性场景. 在该场景中,CP 和用户都通过 ISP 提供的服务连入互联网. 我们将网络中的 ISP 抽象为一个垄断性的“big-ISP”,该 ISP 实际上由各种不同的 ISP 组成,比如 eyeball ISP, content ISP 等. 我们假定在模型中的 3 个角色都是理性的,并且都试图使自身利益最大化. 在这里,我们使用文献<sup>[20]</sup>中提出的方法来定义 3 个角色的效用,即得到的收益与付出的成本之差.

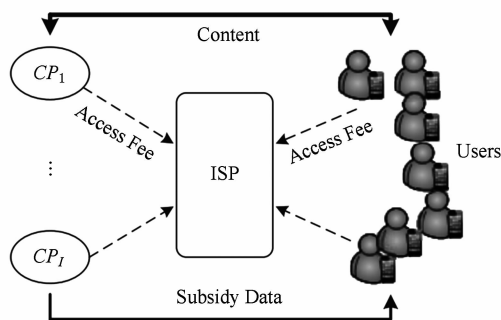


Fig. 3 The general mobile Internet scenario.

图 3 移动互联网一般性场景

我们定义时间段为  $T$ , 时间区间为  $[t-1, t]$ , 其中,  $t=1, 2, \dots, T$ . 一个时间区间可以看作计费周期,比如一天或者一个月. 在一个时间区间中,ISP 对流量的单位定价以及 CP 提供的补贴配额均保持不变. 我们把 CP 提供的某种内容看作一类服务,比如,视频是一种服务,网页也是一种服务. 如果一个 CP 能够提供多种内容,我们把这些内容分别看作不同种类的独立服务,例如,百度能够提供 2 种服务,分别是搜索服务和视频点播服务. 为了便于分析,我们假定一个 CP 只能提供一种服务. 对于一个 CP 提供多种服务的情况,我们将其看作多个 CP. 我们定义独立服务的数量为  $I$ , 变量  $i=1, 2, \dots, I$ . 考虑图 3 所示的场景中用户的数量为  $K$ , 并且  $k=1, 2, \dots, K$ . 令  $\theta_{ki}$  为一个时间区间中第  $k$  个用户对服务  $i$  可能的最大需求量,  $\lambda_{ki}$  为用户的实际流量消耗量, 则有  $\lambda_{ki} \leq \theta_{ki}$ . 该不等式的限制意味着用户在某种服务上的流量消耗不能超过某个上界. 同样,我们令  $v_{ki}$  为第  $k$  个用户对访问服务  $i$  所消耗的单位流量的主观评价或估值. 为了表达不同用户主观评价的差异性,

我们采用文献[15]中定义的满意度函数(satisfaction function)来刻画这种差异性,即满意度函数  $f_{ki}(\cdot) = (\lambda_{ki}/\theta_{ki})^{\beta_{ki}}$ , 其中,参数  $\beta_{ki}$  定义为用户对流量的敏感度. 因此,第  $k$  个用户使用服务  $i$  能够得到的收益可定义为  $v_{ki} \times \theta_{ki} \times f_{ki}(\cdot)$ . 我们定义 ISP 从用户收取的单位流量费用为  $h_u$ ,  $CP_i$  为其用户  $k$  提供的流量补贴总量为  $S_{ik}$ , 则用户  $k$  的访问成本可定义为函数  $C_u(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik})$ . 根据这些定义和符号,用户  $k$  从访问  $CP_i$  的过程中所获取的效用  $\Pi_{u_{ki}}$  为

$$\Pi_{u_{ki}} = v_{ki} \times \theta_{ki} \times f_{ki}(\cdot) - C_u(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik}). \quad (1)$$

对 CP 来说,我们假定其利润与用户访问其内容消耗的流量总量成正比,ISP 从 CP 收取的单位流量费用为  $h_c$ . 相似地,  $CP_i$  为用户  $k$  提供的流量补贴成本可定义为函数  $C_s(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik})$ . 那么,  $CP_i$  从用户  $k$  访问过程中所获取的效用  $\Pi_{CP_{ik}}$  为

$$\Pi_{CP_{ik}} = (\gamma_i - h_c) \times \lambda_{ki} - C_s(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik}), \quad (2)$$

其中,  $\gamma_i$  表示  $CP_i$  从每单位流量获取的利润.

对 ISP 来说,其成本支出的大部分是用于基础设施建设,而为用户传输数据的边际成本与之相比可忽略不计. 因此,ISP 的效用可以表示为

$$\Pi_{ISP} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (h_c \times \lambda_{ki} + C_u(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik}) + C_s(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik})). \quad (3)$$

### 3 模型分析

本节我们将通过 DA 模型分析流量补贴过程. 该过程如下:1)ISP 决定向 CP 和用户收取的单位流量价格;2)CP 决定给用户多少补贴;3)用户根据 ISP 的定价和 CP 的补贴量决定自己在不同 CP 中的流量消耗. 考虑到用户是根据流量价格  $h_u$  和补贴量  $S_{ik}$  来决定用量  $\lambda_{ki}$ , 我们将用户流量的实际用量定义为关于价格和补贴的函数,即  $\lambda_{ki} \triangleq \Phi(h_u, S_{ik})$ , 并且我们假定该函数是连续的和二阶可导的.

下面将讨论如何求解用户的实际流量消耗和 CP 的补贴量,我们通过研究 3 个参与角色的效用变化入手. 由于用户的异质性,不同用户的实际流量消耗可能大于、小于或等于补贴量. 针对这样的情况,我们将对这 3 种情况分别进行讨论. 为了方便起见,我们从一个简化的场景开始,然后我们以此为基础扩展到更复杂的场景,讨论更一般性的结果.

#### 3.1 单 CP、单 ISP 和用户

图 4 展示了在本节中讨论的简化场景. 该场景由唯一的 CP、一个垄断性的 ISP 和一组用户组成.

与第 2 节讨论一致,  $CP_i$  根据 ISP 对单位流量的定价来决定补贴量,然后用户决定是否访问该 CP 以及具体使用量. 通常情况下,我们采用逆向推导法来解决此类问题. 首先,我们在存在流量补贴的情况下推导用户的最佳使用量;然后在知道了用户的最佳策略后,CP 决定它的最优补贴量. 有了这些结果,我们就可以分别计算三者的效用.

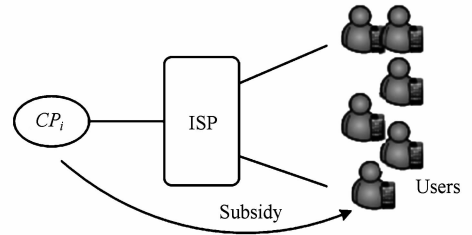


Fig. 4 The simplified scenario.

图 4 简化场景

用户面对补贴的反应是各有差异的,一些用户可能会消耗比平时更多的流量;一些用户可能不受补贴影响,在流量消耗上没有大的变化. 因此,我们根据流量使用情况将用户分为 2 类:1)  $\lambda_{ki} > S_{ik}$ ; 2)  $\lambda_{ki} \leq S_{ik}$ . 一般来说,一个用户能够代表一组特征相似的用户,我们选择用户  $k$  为代表来讨论不同的情况.

1)  $\lambda_{ki} > S_{ik}$ . 在这样的情况中,考虑第 2 节中  $\lambda_{ki} \leq \theta_{ki}$  的限制,则有  $S_{ik} < \lambda_{ki} \leq \theta_{ki}$ , 因此用户  $k$  从  $CP_i$  获取的效用为

$$\Pi_{u_{ki}} = v_{ki} \times \theta_{ki} \times f_{ki}\left(\frac{\lambda_{ki}}{\theta_{ki}}\right) - h_u \times (\lambda_{ki} - S_{ik}). \quad (4)$$

在前面我们已经定义了  $\lambda_{ki} \triangleq \Phi(h_u, S_{ik})$ . 在一个计费周期中,当流量价格已定时,  $h_u$  的值是固定的,可以看作是常数,则用户使用量函数可以表示为  $\lambda_{ki} \triangleq \Phi(S_{ik})$ , 那么补贴量可由函数  $\Phi(\cdot)$  的反函数表示为  $S_{ik} \triangleq \Phi^{-1}(\lambda_{ki})$ , 则式(4)变为

$$\Pi_{u_{ki}} = v_{ki} \times \theta_{ki} \times f_{ki}\left(\frac{\lambda_{ki}}{\theta_{ki}}\right) - h_u \times (\lambda_{ki} - \Phi^{-1}(\lambda_{ki})). \quad (5)$$

因为用户  $k$  是理性的,以实现自我利益最大化为目的. 我们在式(5)中对  $\lambda_{ki}$  求一阶导数,则可求出用户最优使用量  $\lambda_{ki}^*$  的表达式为

$$\lambda_{ki}^* = \begin{cases} 0 \text{ 或 } \theta_{ki}, & f_{ki}''(\cdot) \geq 0, \\ \theta_{ki} \times f_{ki}'^{-1}\left[\frac{h_u}{v_{ki}} \left(1 - \frac{1}{\Phi'(S_{ik})}\right)\right], & \\ f_{ki}''(\cdot) < 0, & \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $f_{ki}'^{-1}(\cdot)$  是满意度函数  $f_{ki}(\cdot)$  的一阶导数的反函数.

从式(6)的推导过程我们可以看到,对于实际使用量超过补贴量的那部分用户来说,  $v_{ki} \times f'_{ki}(\lambda_{ki}/\theta_{ki})$  是一个关键阈值. 如果  $h_u > v_{ki} \times f'_{ki}(\lambda_{ki}/\theta_{ki})$ , 则用户的使用量随补贴  $S_{ik}$  的增加而增加;反之,如果  $h_u < v_{ki} \times f'_{ki}(\lambda_{ki}/\theta_{ki})$ , 则用户的使用量随补贴  $S_{ik}$  的增加而减少.

直觉上,用户的使用量是随流量价格的升高而降低,这在很多情况下都是成立的.但是,从前面的结论可知:1)当系统中存在CP提供的免费补贴时,流量使用量与价格之间的关系被改变了,颠覆了我们的直觉;2)用户的流量使用量由一个阈值决定,当流量定价大于该阈值,使用量与补贴正相关,反之呈负相关.

图5显示了用户使用量与补贴量之间的关系曲线.横轴代表补贴量,变化范围是1~5;纵轴代表用户的实际使用量,单位流量的价格分别设为{0.1, 0.3, 0.5, 0.8}.4条曲线的变化趋势与推导结果相符.从图5可以看到,当单位流量定价更高时,用户使用量增加更快.可能的原因是当流量更贵时,用户会感觉流量更具价值,不能忽视其使用成本,补贴使用户感觉划算;反之,当流量很便宜时,用户可能对于有无补贴无所谓,所以增长较慢.因此,补贴的效果在单位流量价格较高时更明显.此外,我们还观察到,当补贴量变大时,用户流量使用量的增速会变缓,最后趋近于不再增加.这种趋势说明,即使CP无限制补贴,用户也不会无限制地使用.

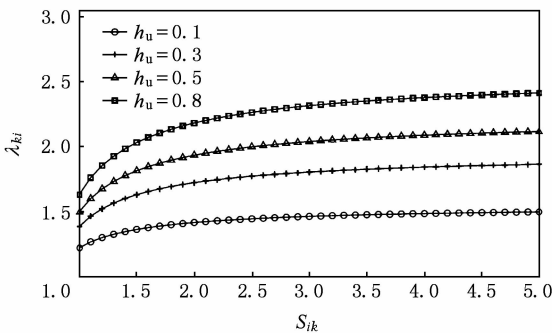


Fig. 5 Relationship between  $\lambda_{ki}$  and subsidy  $S_{ik}$ .

图5 用户使用量与补贴的关系图

下面,我们继续分析  $CP_i$  如何决定为用户  $k$  提供多少补贴.从式(6)可以看到,当  $f''_{ki}(\cdot) \geq 0$ , 如果  $\lambda_{ki}^* = 0$ , 则CP的最佳策略是不提供补贴流量给用户,以保证自己的效用  $\Pi_{CP_{ik}} \geq 0$ .但是,如果该CP是一个初创企业的话,它可能仍然会贴钱实行补贴策略,其目的是为了吸引更多用户.如果  $\lambda_{ki}^* = \theta_{ki}$ , 那么  $\Pi_{CP_{ik}} = (\gamma_i - h_c) \times \theta_{ki} - h_u \times S_{ik} \geq 0$ , 可知CP可以选

择  $0 \sim \frac{(\gamma_i - h_c)}{h_u} \times \theta_{ki}$  之间的任何值作为补贴量.当  $f''_{ki}(\cdot) < 0$ , 则CP的效用函数为

$$\Pi_{CP_{ik}} = (\gamma_i - h_c) \times \lambda_{ki}^* - h_u \times S_{ik}, \quad (7)$$

其中,  $\lambda_{ki}^* = \theta_{ki} \times f'_{ki} \left[ \frac{h_u}{v_{ki}} \times \left( 1 - \frac{1}{\Phi'(S_{ik})} \right) \right]$ .

与前面求解用户最佳流量消耗的过程相似,在式(7)中对  $S_{ik}$  求导,可得到:

$$\frac{\Phi''(S_{ik})}{[\Phi'(S_{ik})]^2} \times f'_{ki} \left[ \frac{h_u}{v_{ki}} \times \left( 1 - \frac{1}{\Phi'(S_{ik})} \right) \right] = \frac{v_{ki}}{(\gamma_i - h_c) \times \theta_{ki}}. \quad (8)$$

式(8)是补贴流量需要满足的关系式,在  $\Phi(\cdot)$  函数确定后,最优补贴流量  $S_{ik}$  可由式(8)求出.

我们将最优补贴流量用  $S_{ik}^*$  表示,那么,  $(\lambda_{ki}^*, S_{ik}^*)$  就是通过逆向推导为用户和CP求得的最优解.由此可得,ISP的效用为

$$\Pi_{ISP_{ik}} = (h_c + h_u) \times \lambda_{ki}^*. \quad (9)$$

2)  $\lambda_{ki} \leq S_{ik}$ . 在这样的情况下,用户的使用成本为0.考虑补贴与用户最大可能使用量之间的关系,有2种子情况:

$$\begin{cases} \lambda_{ki} \leq \theta_{ki} \leq S_{ik}; \\ \lambda_{ki} \leq S_{ik} < \theta_{ki}. \end{cases} \quad (10)$$

① 当  $\lambda_{ki} \leq \theta_{ki} \leq S_{ik}$  时,用户将选择消费最大量  $\theta_{ki}$  以使其效用最大化,其效用为

$$\Pi_{u_{ki}} = v_{ki} \times \theta_{ki}. \quad (11)$$

此时用户的最优使用量  $\lambda_{ki}^* = \theta_{ki}$ , CP提供的最优补贴量  $S_{ik}^* = \theta_{ki}$ , 因此,CP的效用函数为

$$\Pi_{CP_{ik}} = (\gamma_i - h_c - h_u) \times \theta_{ki}. \quad (12)$$

由于有约束条件  $\lambda_{ki} \leq S_{ik}$ , CP需为用户提供足够的补贴,这意味着无论用户消费了多少流量(小于等于  $\theta_{ki}$ ), CP都将为这些用户买单.根据式(12),只要CP的单位流量转化因子  $\gamma_i \geq h_c + h_u$ , 该CP就能从用户那里获益.实际上,现实中很多CP是在贴钱给用户补贴,这是因为其目的是为了吸引更多用户,为将来盈利做打算.

在这样的情况中,ISP的效用函数可表示为

$$\Pi_{ISP_{ik}} = (h_c + h_u) \times \theta_{ki}. \quad (13)$$

② 当  $\lambda_{ki} \leq S_{ik} < \theta_{ki}$  时,用户的效用函数为

$$\Pi_{u_{ki}} = v_{ki} \times \theta_{ki} \times f_{ki} \left( \frac{\lambda_{ki}}{\theta_{ki}} \right). \quad (14)$$

用户将选择尽可能大的使用量以使其效用最大化.因为  $f_{ki}(\cdot)$  是非减函数,在这样的情况下,用户的最优使用量  $\lambda_{ki}^* = S_{ik}$ .对CP来说,其效用函数为

$$\Pi_{CP_{ik}} = (\gamma_i - h_c - h_u) \times S_{ik}. \quad (15)$$

在第 1 个子情况中,CP 需要提供足够的补贴给用户;而在第 2 个子情况中,CP 占据了主导地位,补贴多少,用户使用多少.相似地,CP 要盈利的话,需要保证  $\gamma_i \geq h_c + h_u$  成立. ISP 的效用函数与式(13)相似,即为

$$\Pi_{ISP_{ik}} = (h_c + h_u) \times S_{ik}. \quad (16)$$

### 3.2 多 CPs、多 ISPs 和用户

在真实的移动互联网市场中,存在着多个 CP、多个垄断的 ISP 和用户,最普遍的场景如图 3 所示.由于一般化场景的复杂性,不能将 3.1 节中的结论直接用来解释一般化的情况,但这些结论是我们研究复杂场景的基础.在本节,我们将扩展 3.1 节的结论并介绍一些特殊情况.

1) 3 个参与者的效用.在一般场景中,CP、ISP 和用户的数量分别定义为  $I, M$  和  $K$ .由于用户的异质性,不同用户在面对多个 CP 时可能会有不同的选择,比如某些用户选择在亚马逊购物,而另一些用户选择在淘宝购物.用户消耗流量的习惯也各不相同,一部分用户在面对自己喜欢的或是有用的内容时会愿意消耗更多的流量,而另一部分用户可能不为所动.因此,流量的分布是不均匀的.我们假定用户效用具有可加性,用户从某个 CP 获得的效用不会影响从其他 CP 获得的效用.那么,用户、CP、ISP 的总效用可分别表示为

$$\Pi_{u_k} = \sum_{i=1}^I [v_{ki} \times \theta_{ki} \times f_{ki}(\cdot) - C_u(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik})], \quad (17)$$

$$\Pi_{CP_i} = \sum_{k=1}^K [(\gamma_i - h_c) \times \lambda_{ki} - C_s(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik})], \quad (18)$$

$$\Pi_{ISP_m} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (h_c \times \lambda_{ki} + C_u(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik}) + C_s(h_u, \lambda_{ki}, S_{ik})), \quad (19)$$

其中,  $m$  表示 ISP 的数量.

从 CP 的角度来看,免费的流量补贴能够增加用户的流量消耗和有效在线时间,CP 能够从中获取更多利润.然而,这部分利润的增长不是无限制的,随着补贴量的增加,该利润会达到其拐点.在拐点处,CP 将取得补贴量的最优值.我们可以使用最优化的方法推导出最优补贴量,为 CP 设计有效的补贴机制提供参考.

2) 补贴引发用户迁移.在图 6 所示的场景中,存在 2 个同质的内容提供商  $CP_1$  和  $CP_2$ 、2 个运营商  $ISP_1$  和  $ISP_2$  以及相应的用户组  $U_1$  和  $U_2$ .其中,  $CP_1$  与  $ISP_1$  合作为  $U_1$  中的用户提供补贴,但

$CP_2$  不为用户提供任何补贴.我们假定 2 家 CP 的服务质量相同且能够提供相同的内容,2 家运营商制定的单位流量价格也相同.我们将会看到流量补贴策略会促使用户在 2 家运营商之间迁移.在补贴策略的影响下,部分用户将会迁移到与 CP 有合作的 ISP 那边,即图 6 中的  $ISP_1, ISP_1$  也会因为用户增加而获得额外的利润.因此,ISP 即使不是流量补贴的主导方,也有动力主动参与到补贴计划中.

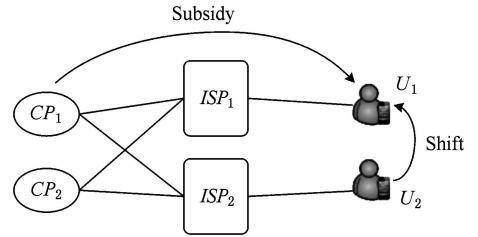


Fig. 6 The user shifting process.

图 6 用户迁移过程

基于用户对补贴策略的反应,我们可以将其分为 2 类:弹性的和非弹性的.弹性的用户看重其自身效用,会根据效用变化选择 ISP.比如,  $U_2$  中的弹性用户 A 发现流量消耗相同的情况下,  $ISP_1$  的用户获得的效用比  $ISP_2$  的用户高,那么他将从  $U_2$  迁移到  $U_1$ ;相反,非弹性用户有更高的忠诚度,一旦选定了 ISP,几乎不会发生变动.

为了便于描述迁移过程,我们定义了 2 个阈值:  $T_{v_i}$  和  $T_{f_j}$ .  $T_{v_i}$  表示用户对  $CP_i$  的主观评价阈值.比如,  $v_{ki} > T_{v_i}$  意味着用户  $k$  愿意选择  $CP_i$  提供的内容.相似地,  $T_{f_j}$  表示用户对  $CP_i$  的满意度阈值,满意度函数  $f_{ki}(\cdot)$  的值越高,则用户更愿意选择  $CP_i$ .为了反映用户在不同 ISP 中选择,我们基于 logit 模型<sup>[21]</sup>定义了一个迁移概率:

$$pr = \frac{\Pi_{u_{ki}}}{\sum_j \Pi_{u_{kj}}}. \quad (20)$$

我们同样定义了迁移概率阈值  $T_{pr}$ ,并结合前面定义的 2 个阈值共同决定用户是否发生迁移.根据前面的讨论,我们在算法 1 中描述用户的迁移过程,该算法的时间复杂度为  $O(T \times I \times N)$ .

#### 算法 1. 用户迁移过程.

输入:用户、CP 和 ISP 的数量,时间段  $T$ ;

输出:用户比例、用户和 CP 的效用.

- ① 初始化用户比例:  $c_1, c_2, \dots, c_j$ ;
- ② for 每个用户和 CP do
- ③ 计算用户、CP 的效用;
- ④ end for



- ⑤ CP 开始提供流量补贴;
- ⑥ while 未到计费周期或用户比例没有收敛到稳定点 do
- ⑦ for 用户、CP do
- ⑧ 计算用户和 CP 的效用;
- ⑨ if 用户是弹性的 then
- ⑩ 计算用户的迁移概率;
- ⑪ 与阈值进行比较判别用户是否发生迁移;
- ⑫ end if
- ⑬ end for
- ⑭ 计算新的用户比例:  $c'_1, c'_2, \dots, c'_j$ ;
- ⑮  $t=t+1$ ;
- ⑯ end while

3) 用户免费上网. 在 CP 提供流量补贴的情况下, 对用户来说免费上网是可以实现的, 图 7 展示了这样的场景. 市场中存在多个异质的 CP, 其数量为  $I$ . 这些 CP 分别提供不同的内容给用户, 比如优酷提供视频、每日头条提供新闻浏览等.

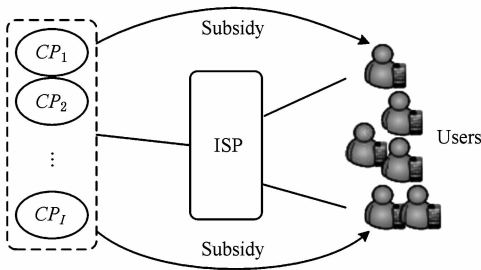


Fig. 7 Heterogeneous CPs subsidize users.

图 7 异质 CP 补贴用户

在这里我们假定这些异质的 CP 是相互独立的, 用户从 CP 获得的效用是可加的. 如果这些异质的 CP 都参与流量补贴计划, 那么用户  $k$  从  $I$  个 CP 获得的总效用为

$$\Pi_{u_k} = \sum_{i=1}^I [\nu_{ki} \times \theta_{ki} \times f_{ki}(\cdot) - h_u \times \Delta(\lambda_{ki}, S_{ik})], \quad (21)$$

其中,  $\Delta(\cdot)$  表示用户实际流量与补贴之间关系的函数, 在 3.1 节中已经讨论过.

相似地, CP 的效用函数为

$$\Pi_{CP_i} = \sum_{k=1}^K [(\gamma_i - h_c) \times \lambda_{ki} - h_u \times \Delta(\lambda_{ki}, S_{ik})], \quad (22)$$

对式(21)(22), 我们可以采用最优化的方法并联合一些限制条件, 比如用户的实际流量使用有界等, 来确保用户的访问成本为 0. 换句话说, 就是用

户可以免费上网. 此外, 我们还需要关注 ISP 提供的信道容量这个重要因素.

## 4 仿真实验

### 4.1 实验参数设置

我们将时间片  $[t-1, t]$  看作一个计费周期, 将在多个时间片中计算用户的效用. 用户对 CP 的单位流量内容的主观评价在  $[0, 1]$  中随机选择. 用户在一个计费周期中的最大流量需求设为在  $[1, 3]$  中随机取得. 用户的实际流量消耗  $\lambda_{ki}$  由公式  $\lambda_{ki} = \lambda_{ki}^* + (\theta_{ki} - \lambda_{ki}^*) \times e^{-\frac{b}{S_{ik}}}$  计算, 其中,  $\lambda_{ki}^*$  是在没有补贴的情况下用户的最佳流量需求,  $b$  是调整因子. 当不存在流量补贴时, 用户的实际使用量为  $\lambda_{ki}^*$ ; 反之, 当流量补贴很大时, 用户的实际使用量为  $\theta_{ki}$ . 流量敏感因子的值设为  $[0, 1]$  间的随机数, 流量补贴设为  $[0.5, 1.5]$  间的随机数. 接下来, 我们设定 CP 的单位流量利润因子  $\gamma_i$  取值区间为  $[0.8, 1]$ , ISP 对单位流量的定价  $h_u$  和  $h_c$  分别设为 0.2. 最后, 我们设定 3 个阈值的取值为  $T_v = 0.6$ ,  $T_f = 0.45$ ,  $T_{pr} = 0.7$ , 用以评估用户的迁移过程.

### 4.2 补贴失效

本文中, 我们认为不论 CP 还是用户都是理性的, 这意味着用户不会无节制消耗流量, CP 也不会过度提供补贴. 在第 3 节的分析讨论中, 我们已经推导出一些补贴过程中的限制条件, 使得补贴失效的条件也包含在其中.

在本节中, 我们研究用户和 CP 的效用随补贴的变化情况. 我们假定只存在一个 CP, 用户的数量设为 200. 我们随机选择一个用户, 他的效用变化如图 8(a) 所示. 可以看到, 用户的效用随补贴的增加持续增长, 该趋势一直保持到补贴量大约为 6 时; 在补贴量超过 6 以后, 用户效用的增加趋势变得平缓, 无论补贴增加得再多, 用户效用也基本不再增加. 在这样的情况下, 我们认为在补贴量超过 6 以后, 在用户端补贴策略就失效了. 再观察图 8(b), 该图展示了 CP 的效用变化, 虚线表示 CP 的效用为 0. 图 8(b) 中, 最初效用有轻微的下降, 然后开始迅速上升; 当补贴量的值达到约 1.9 时, CP 效用取得最大值; 以后, 效用开始随补贴的增加而下降. 当补贴量超过虚线与效用曲线的交叉点, CP 的效用变为负数, 这是 CP 端的补贴失效情况. 因此, CP 需要在 0 和交叉点之间选择合适的补贴量, 以使得补贴策略有效.



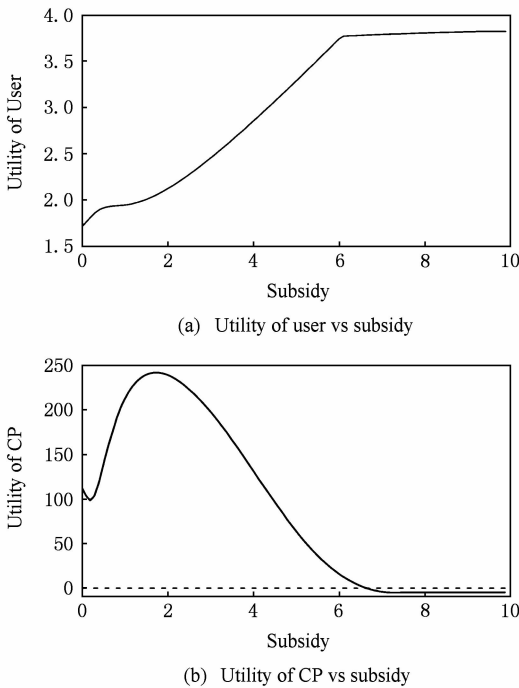


Fig. 8 Subsidization invalidate.

图 8 补贴失效情况

4.3 效用比较

在本节中,我们首先比较在 CP 提供流量补贴前后用户的效用对比. 图 9(a)显示了用户  $k$  在 20

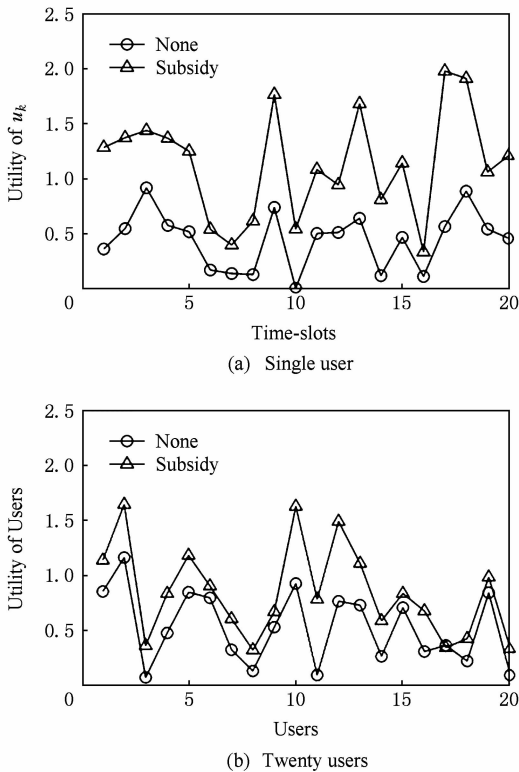


Fig. 9 Utility of users.

图 9 用户效用

个计费周期中的效用对比. 显然, 补贴策略确实能促进用户消耗更多的流量, 也同时获得更多效用. 与没有流量补贴时相比, 用户效用的增加非常明显. 其中, 效用最大的提升点出现在第 17 个计费期, 增加量为 1.4; 效用最小的增量为 0.22, 出现在第 16 个计费期. 特别地, 在第 10 个计费期, 用户本来没有打算消费流量, 但在补贴的激励下仍然消耗了一些流量, 获得了 0.54 的效用. 在图 9(b) 中, 展示了我们随机选择的 20 个用户在 CP 提供补贴前后一个计费期内的效用对比. 显然, 有补贴时效用更高. 其中, 我们发现第 17 个用户很特别, 在补贴前后该用户的效用几乎不变. 可能的原因是, 该用户是非弹性用户, 补贴策略对其使用情况影响不大.

我们还比较了在 20 个计费期内, CP 为 200 个用户提供的总流量和 CP 的效用对比. 在提供补贴前后, 平均流量提供量从 77.84 上升到 252.83, 如图 10(a) 所示. 流量的值 252.83 也说明了一部分用户的实际使用量超过了补贴, 该现象与实际情况是吻合的. 从刺激消费的角度来说, 补贴策略是非常有效的, 图 10(b) 展示了 CP 的效用比较. 在提供补贴的情况下, CP 从用户获得的效用是不提供补贴情况下获得效用的 3 倍左右. 换句话说, 补贴策略确实能使 CP 获利.

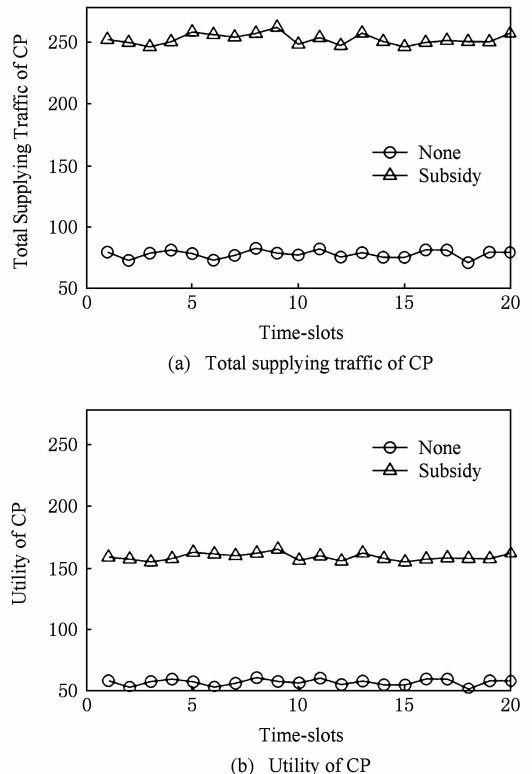


Fig. 10 Total supplying traffic and utility of CP.

图 10 CP 的总流量和效用

### 4.4 拥塞可能性

从 4.3 节的讨论中,我们可以看到大多数用户会受到补贴策略的激励,消耗更多的流量.然而,有人可能会问,这些增加的流量是否更容易引起网络拥塞.图 11 显示了关于拥塞情况的实验结果.该场景假定市场中存在一个垄断的 ISP 和 2 个异质的 CP,ISP 提供的系统容量设为 9.我们比较在 20 个周期内补贴前后网络的拥塞情况.

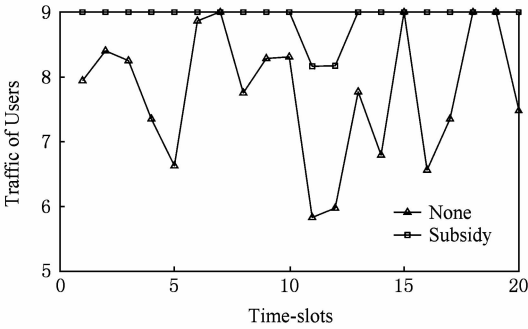


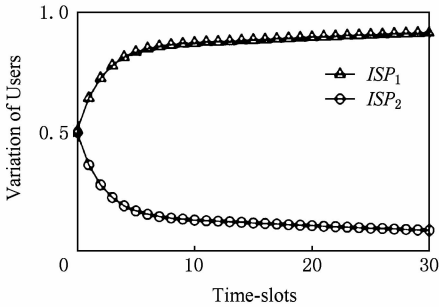
Fig. 11 Aggravating congestion.  
图 11 拥塞加剧

当 CP 没有提供流量补贴时,拥塞情况仅出现了 4 次,分别是第 7,15,18 和 19 个周期.也就是说,拥塞出现的概率不高.当 CP 开始提供流量补贴时,可以很明显地看到在 90% 的周期里用户的需求都超过了系统容量,出现拥塞情况.换句话说,补贴策略能促使用户消耗更多流量,但也更易导致拥塞发

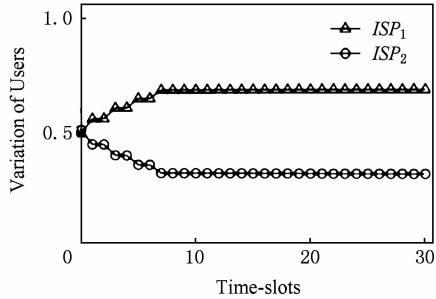
生.因此,对有限的系统流量来说,流量补贴策略可能是一把“双刃剑”.对于 ISP 来说,如果不能扩容,那可能需要采取其他的办法来避免拥塞,比如更有效的定价方法 SDP (smart data pricing)<sup>[12,14]</sup> 等.关于 SDP 的内容超出了本文的范畴,我们将在以后的工作中考虑.

### 4.5 用户的迁移过程

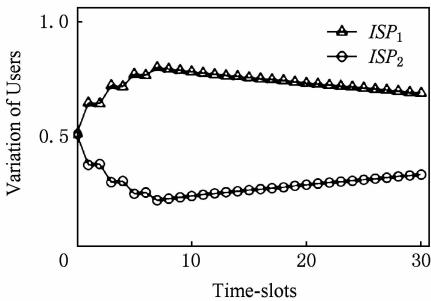
本节对应场景如图 6 所示,我们假定存在 2 个同质的 CP,ISP 的数量设为 2,其中,CP<sub>1</sub> 与 ISP<sub>1</sub> 合作为 ISP<sub>1</sub> 的用户提供流量补贴.我们将比较在不同的参数设置下用户的迁移过程.图 12(a) 显示了 CP<sub>1</sub> 与 ISP<sub>1</sub> 合作的情况.该情况中,用户数 N=10 000,平均补贴量 s<sub>1</sub>=0.7,转移概率 T<sub>pr</sub>=0.7.最初分属 2 个 ISP 的用户比例分别为 r<sub>1</sub>=0.504 2, r<sub>2</sub>=0.495 8.随着演化过程开始,ISP<sub>1</sub> 的用户比例 r<sub>1</sub> 迅速增加,并于第 4 个周期达到 0.8.这意味着几乎有 60% 的原来属于 ISP<sub>2</sub> 的用户转变为 ISP<sub>1</sub> 的用户.最终的稳定点在 r<sub>1</sub>=0.913 1 和 r<sub>2</sub>=0.086 9.我们可以看到,ISP<sub>2</sub> 的用户并没有变为 0,这是因为用户中有一部分是非弹性的,他们不会轻易改变自己的选择.根据最终的用户比例,我们可以推断,CP<sub>2</sub> 可能会被淘汰出局.为了阻止用户流失,CP<sub>2</sub> 也决定与 ISP<sub>2</sub> 合作补贴用户.相关的参数设置参见图 12 (b).CP<sub>2</sub> 从第 9 个周期开始其合作补贴行为,最终用户比例收敛到 r<sub>1</sub>=0.731 8 和 r<sub>2</sub>=0.268 2.可以



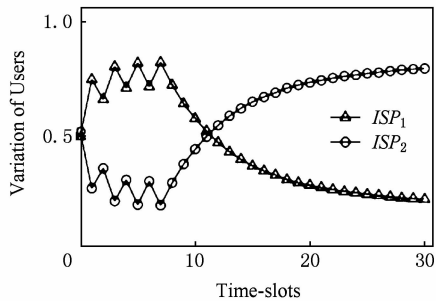
(a) s<sub>1</sub>=0.7, T<sub>pr</sub>=0.7



(b) s<sub>1</sub>=0.7, s<sub>2</sub>=0.9, T<sub>pr</sub>=0.7



(c) s<sub>1</sub>=0.7, s<sub>2</sub>=3.5, T<sub>pr</sub>=0.7



(d) s<sub>1</sub>=0.7, s<sub>2</sub>=1.5, T<sub>pr</sub>=0.6

Fig. 12 Shifting process of users.

图 12 用户的迁移过程

看到  $CP_2$  成功保住了部分用户,但是如果取得更大的进展、赢得更多用户,仅做到这些还不够.从图 12(c) 可以看到,  $CP_2$  增加其平均补贴量的值到 3.5, 此时用户开始从  $ISP_1$  向  $ISP_2$  稳定回流.但是,  $CP_2$  提供的补贴值已经太高,很可能不满足效用大于等于 0 的约束条件.这样不计后果的高补贴行为很可能陷入恶性价格竞争的陷阱中.在图 12(d) 中,我们同时调整平均补贴量和迁移概率的阈值为  $s_2 = 1.5$ ,  $T_{pr} = 0.6$ . 这时我们发现选择  $ISP_2$  的用户开始超过选择  $ISP_1$  的用户,并且这种差异性在持续增加,整个情况跟图 12(a) 相比发生了反转.可见, CP 确实能够通过提供流量补贴吸引用户、刺激消费.但是, CP 制定相关策略时必须遵循约束限制并仔细设计补贴机制.

## 5 结束语

移动互联网市场中的 ISP、CP 和用户之间相互竞争冲突的情况已经在一定程度上阻碍了整个市场的发展.为了减少这些利益冲突情况的发生,我们通过分析,提出一种由 CP 主导的、基于 ISP 与 CP 合作的、为用户提供免费流量补贴的机制.通过现实中实际案例的研究,我们分析了其设计存在的挑战和难点,并基于此提出了 DA 模型,使用经济学的方法对模型进行了仔细研究.我们还将初步结论扩展到一般化的场景中,并为 CP 如何设计恰当的补贴机制提出建议和参考.我们通过仿真实验证明了设计的有效性,同时还展示了一些可能使补贴失效的特殊情况和可能造成网络拥塞的结果.

本文只是研究移动互联网市场中资源分配这一综合课题的第 1 步,一些更有价值和更有趣的结果需要我们去进行更深入、更全面的研究.

## 参 考 文 献

- [1] CNNIC. The 35th statistical report on Internet development in China [EB/OL]. [2015-02-03]. <http://www.cnnic.net.cn/hlwfzyj/hlwzxbz>
- [2] Cisco. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update 2014-2019 white paper [EB/OL]. [2015-02-03]. [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html)
- [3] ZLIZILA. Alibaba offering free data for taobao and alipay apps users [EB/OL]. (2013-10-30) [2015-11-15]. <http://www.alizila.com/alibaba-offering-free-data-taobao-and-alipay-apps-users>
- [4] iResearch. China mobile shopping market gmv hit rmb167.64 bn in 2013 with fast growing penetration [EB/OL]. (2014-01-17) [2015-11-15]. <http://www.iresearchchina.com/views/5405.html>
- [5] Sina Corporation. Alibaba provides data wallet to its customer [EB/OL]. [2014-12-03]. <http://finance.sina.com.cn/world/20141203/081820983594.shtml>
- [6] Brandom R. Sponsored data: AT&T will now let companies buy out your data charges for specific videos and apps [EB/OL]. (2014-01-06) [2015-11-15]. <http://www.theverge.com/2014/1/6/5279894/at-t-announces-net-neutrality-baiting-sponsored-data-mobile-plans>
- [7] Hande P, Mung C, Calderbank R, et al. Network pricing and rate allocation with content provider participation [C] // Proc of IEEE INFOCOM'09. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 990-998
- [8] Wu Y, Kim H, Hande P, et al. Revenue sharing among ISPs in two-sided markets [C] // Proc of IEEE INFOCOM'11. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 596-600
- [9] Carlee J W, Ha S, Mung C. Sponsoring mobile data: An economic analysis of the impact on users and content providers [C] // Proc of IEEE INFOCOM'15. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1499-1507
- [10] Ma R T, Chiu D M, Lui J C, et al. On cooperative settlement between content, transit, and eyeball Internet service providers [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2011, 19(3): 802-815
- [11] Winter E. The shapley value [J]. Handbook of Game Theory with Economic Applications, 2002, 3(2): 2025-2054
- [12] Zhang Chunyan, Xu Ke, Wang Baojin, et al. Optimizing cost and performance in multiple interface mobile hosts [J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(11): 2176-2186 (in Chinese)  
(张春燕, 徐恪, 王保进, 等. 多接口移动主机最优化费用和性能方法研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(11): 2173-2186)
- [13] Xu K, Zhong Y F, He H. Can P2P technology benefit eyeball ISPs? A cooperative profit distribution answer [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(11): 2783-2793
- [14] Xu K, Zhong Y F, He H. Internet Resource Pricing Models [M]. Berlin: Springer, 2014
- [15] Zhang L, Wu W, Wang D. Time-dependent pricing in wireless data networks: Flat-rate vs usage-based schemes [C] // Proc of IEEE INFOCOM'14. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 700-708
- [16] Altman E, Bernhard P, Caron S, et al. A model of network neutrality with usage-based prices [J]. Telecommunication Systems, 2013, 52(2): 601-609
- [17] Rao M P. Sponsored data: How free data will drive increased revenues for operators [EB/OL]. [2014-05-24]. <http://ezinearticles.com/?Sponsored-Data:-How-Free-Data-Will-Drive-Increased-Revenues-For-Operators&id=8527010>

- [18] Ma R T. Subsidization competition: Vitalizing the neutral Internet [C] //Proc of the 10th ACM Int on Conf on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2014: 283-294
- [19] Parsons S G. Cross-subsidization in telecommunications [J]. Journal of Regulatory Economics, 1998, 13(2): 157-182
- [20] Rabin M. Risk aversion and expected utility theory: A calibration theorem [J]. Econometrica, 2000, 68(5): 1281-1292
- [21] McFadden D. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior [G] //Frontiers in Econometrics. New York: Academic, 1974: 105-142



**Su Hui**, born in 1977. PhD candidate. His research interests include computer networking and network economics.



**Xu Ke**, born in 1974. Professor, PhD supervisor. His main research interests include Internet architecture, high performance router, P2P network, Internet of things and network economics.



**Shen Meng**, born in 1988. PhD. Assistant professor. His research interests include cloud computing and networking.



**Wang Yong**, born in 1974. Associate professor and PhD supervisor. His research interests include industrial economics, game theory, and network economics.



**Zhong Yifeng**, born in 1989. PhD candidate. His research interests include P2P network and network economics.



**Li Tong**, born in 1989. PhD candidate. His research interests include network architecture and network science.