



研究与开发

基于 SDN 框架的网络资源定价策略

诸葛斌, 亓一航, 傅晗文, 王伟明
(浙江工商大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对网络中用户集中提出资源请求所造成资源负载过重和网络 congestion 的问题, 提出一种基于 SDN 架构的网络资源定价策略。首先, 分析用户的需求和消费模式, 确定资源交易模型。其次, 结合现货消费模式和计划消费确定预约机制下资源动态定价策略模型。最后, 根据所提出的资源定价策略, 对资源价格进行实例仿真, 结果表明, 通过价格刺激用户提前预约资源, 结合每个用户的信任度与消费习惯给出相应的优惠价格, 可以有效地避免用户集中获取网络资源。

关键词: SDN; 网络资源; 用户需求; 定价策略

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018173

Network resource pricing strategy based on SDN framework

ZHUGE Bin, QI Yihang, FU Hanwen, WANG Weiming
Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: A network resource pricing strategy based on SDN framework was proposed to solve the problem of resource overload and network congestion caused by resource requests in the network. Firstly, the user's needs and consumption patterns were analyzed, and the resource transaction model was determined. Secondly, combined with the spot consumption model and plan consumption, the reservation mechanism under the resource dynamic pricing strategy model was determined. Finally, according to the proposed resource pricing strategy, the resource price was simulated, the results show that by stimulating the user to reserve resources in advance and combining the trust degree and consumption habits of each user with corresponding preferential prices, it is possible to effectively avoid the users from obtaining network resources in a centralized manner.

Key words: software defined networking, network resource, user requirement, pricing strategy

收稿日期: 2017-10-23; 修回日期: 2018-05-09

通信作者: 诸葛斌, zhugebin@zjgus.edu.cn

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2012CB315902); 浙江省新型网络标准及应用技术重点实验室基金资助项目(No.2013E10012); 浙江省重点研发计划基金资助项目(No.2017C03058)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program)(No.2012CB315902), Zhejiang Provincial Key Laboratory of New Network Standards and Technologies (NNST)(No.2013E10012), Zhejiang's Key Project of Research and Development Plan (No.2017C03058)



1 引言

随着用户规模增长、网络应用更替,传统的网络资源分配方式已逐渐暴露出其弊端。在网络不断发展的背景下,对资源优化配置研究赋予了更新的涵义^[1]。研究采取一种更合理的价格机制和体系,凸显出网络资源的价值,提高资源利用率,减少资源浪费,为网络市场运作提供基础,是当前学术界一直追求研究的热点问题。针对这一系列的问题,本文提出一种全新的网络服务定价模式,一方面,能合理有效地分配资源;另一方面,能够支持多级别的服务模式,同时,还能收回网络服务运营成本以及提供高效、高质量的网络服务。

2010年,ONF(Open Networking Foundation, 开放网络基金会)提出了软件定义网络(software defined networking, SDN)的概念,其最大的特点是数据平面与控制平面分离,支持集中化网络控制,实现底层网络设施对上层的虚拟化、轻捷的软件可编程能力,最终使网络的管理和控制能力得到巨大的提升^[2]。

邬江兴院士^[3]在未来网络大会上提出了情景拟合的思想。所谓情景拟合,就是通过建立模型来模拟具备暂态稳定性的不确定的宏观情景。具体的方式就是通过网络测量,以感知情景并决定行动,用反馈的方法来实现控制。通过多年持续的研究,目前国内形成了一个以可重构为目标的新型网络技术研究团体,其中国家数字交换系统工程技术研究中心的兰巨龙教授^[4]提出,重构信息通信基础网络通过为用户构建可重构服务承载网的方式,实现其对功能可动态重构和扩展的底层物理网络的共享,从而为不同业务提供其根本需求和可定制的基础网络服务;浙江工商大学^[5]对可重构路由节点的国际标准制定进行了深入研究;清华大学^[6]提出一种可重构的路由器,并重新设计了分发规则和算法。

基于SDN的网络资源定价策略主要针对以下两个问题:在当前网络环境中,当网络资源使用高峰期时,优质资源高负载导致QoS下降;次级资源使用率过低,导致资源闲置浪费。如何制定一个合理的网络资源定价策略,使得资源能够得到合理的分配,排除恶意用户的干扰,使得服务提供商在满足用户需求的情况下,能够获得最大的收益。

本文从用户需求的角度出发,引入用户消费模式,考虑资源交易双方特点,站在资源本身特性与用户需求和消费习惯的角度,分析资源负载情况与用户选择概率,提出一种适用于SDN环境的网络资源动态定价算法,利用该定价方案,使资源消费用户不仅可以进行实时交易,而且可以通过提前预约,获取不同的资源价格折扣,以此刺激用户提前预约资源,合理安排消费时间,达到缓解网络资源负载过重的效果。

2 相关工作

在SDN体系架构中,系统可以更加灵活地调度网络资源,更容易实现资源的定价以及交易管理。当前大部分SDN资源调度都延续传统网络资源调度算法的思路进行研究,比如基于负载均衡通过网络映射实现虚拟网络资源分配^[7],为提高任务满足率和拒绝率,根据测量精度与用户需求来进行动态资源分配^[8]。

SDN架构中对转发层资源进行了抽象描述,并由控制层对底层资源统一集中管理,因此SDN资源和云计算资源在一定程度上具有很大的相似性,可以通过对资源的定价实现资源的调度。其中意大利的Oro SD^[9]提到,在OpenFlow多租户网络中利用拍卖算法对资源进行分配,在SDN的控制转发分离机制下,通过对网络资源进行符合纳什均衡和博弈论的资源定价算法实现了有效的SDN资源分配。许志凯^[10]指出,使用定价和拍卖算法可以有效提高物联网搜索引擎的

工作效率, 本文将结合此文并借鉴云计算中基于经济模型的定价机制, 通过资源控制器对网络资源价格的动态调整来实现负载均衡, 在此基础上进行基于用户消费模式的 SDN 资源交易过程研究。

网络资源分类方法主要依据流量分类算法, 例如随机森林、基于相关的分类、半监督聚类和 one-class SVM, 流量分类算法将流分类和流描述特征作为输入。分类算法的准确性不仅取决于收集的特征的质量, 还取决于所考虑的特征量。特征选择技术是一种重要的技术, 已经被研究了很多年^[11-12]。

在云计算市场中, 多个云计算资源提供商和提出资源请求的用户共同参与资源交易, 由此形成一个竞争市场, 参与交易的双方则针对市场中的各类云计算服务展开交易并追求各自效益最大化。近些年, 国内外对云计算中经济模型的研究有着相当多的文献, 典型的有基于经济模型的资源管理分配^[13]和资源定价^[14-15]等文献。Zaheer 等人^[16]提出了一种基于拍卖的公平资源分配方法。丛鑫等人^[17]提出了一种基于可信拍卖机制的定价机制, 以预期收益为目标, 将不同收益的资源进行组合, 满足竞拍用户需求, 降低资源的剩余量。参考文献[18]通过对传统拍卖的初始定价和拍卖过程中动态定价对传统组合双向拍卖的影响, 提出了一种基于组合双向拍卖的资源定价模型; 王兴伟等人^[19]提出一种基于双向拍卖的资源分配模型, 通过优化周期性双向拍卖模型, 提出了即时和批量的匹配算法来匹配买卖双方集合, 最大化买卖双方的满意度; 参考文献[20]通过引入资源初始价格策略, 在多个资源提供者共存的情况下通过古诺均衡策略得出资源的均价; 参考文献[21]在云计算中提出面向成本优化的虚拟机资源分配方法, 通过现货、按需和预约 3 种不同方式对资源进行分配; 参考文献[22]提出了一种基于拍卖博弈的构建模型, 该模型以业务为参与者, 以业务

资源需求为策略空间。

上述方案均未对网络中的资源类型进行分类, 在不明确购买方需求的情况下, 对网络资源进行定价。并且在这些定价方案中大多只考虑即时的交易情况, 并未考虑用户的消费习惯。

本文在资源的定价过程中充分考虑了资源负载情况对价格的影响, 每一种应用在不同的负载情况下的价格是不一样的。且用户需求的差异也会对资源的价格产生影响。通过对 SDN 的网络资源采用两种不同的交易模式及相应的合理的动态定价机制, 利用 SDN 的集中控制能力实现资源迁移, 以此达到资源负载均衡与资源高效使用的目的。

因此, 结合 SDN 的环境, 本文考虑资源交易双方的特点, 站在资源本身特性与用户需求和消费习惯的角度, 分析资源负载情况与用户选择概率, 提出一种适用于 SDN 环境的基于用户消费模式的动态定价算法, 利用该定价方案, 资源消费用户不仅可以进行实时交易, 而且可以通过提前预约, 获取不同的资源价格折扣, 以此刺激用户提前预约资源, 合理安排消费时间, 达到缓解网络资源负载过重的目的。

3 基于动态交易的 SDN 资源定价策略

在经济领域, 动态交易的相关应用已经有近百年的历史, 而在网络中应用相关算法时间比较短, 但网心科技发布迅雷赚钱宝 Pro^[23]时就提到迅雷赚钱宝将用户的闲置网络资源对应成相应金额的人民币。在迅雷赚钱宝利用资源产生人民币的过程中就用到了关于定价和排序的相关知识。本节提出了理论上的估计和计算, 确保实际操作方向的正确性。

3.1 基于软件定义价格的 SDN 架构

软件定义价格^[24]是一种通过软件和自定义的算法机制来动态定义资源价格的新型定价方式, 包括用户提交资源申请、通过算法确定价格返回



给用户、用户提供价格预算、供应商根据预算决定是否进行交易。该方式可以提高资源定价的灵活性与公平性。

本文基于软件定义价格的 SDN 体系架构，主要研究针对 SDN 资源的定价策略。在该架构的各层中引入价格定义模块应用，通过组合各层的定价因素来确定最终的定价，体系架构如图 1 所示。

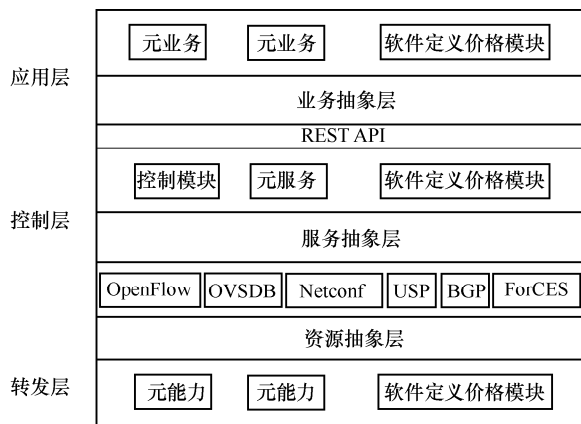


图 1 基于软件定义价格的 SDN 应用架构

提出的 SDN 体系架构是一种基于模型化的架构，各层提供的服务和功能均以元模型为基础，通过资源组合来满足上层用户的多元化需求。其中，元能力是资源抽象层中转发功能的细粒度功能单元。它是网络中的基本承载组件，为元服务提供全网范围多样化的基础承载能力。元服务是依据网络业务的特性和要求而聚类多个元能力所形成的基本网络服务功能组件。元业务中包含了上层应用的特性和要求，可以根据应用的特性和要求抽象出业务所需的最基本的网络服务功能。

SDN 的转发层、控制层与应用层分别对应资源抽象层、服务抽象层与业务抽象层。其中资源抽象层主要用于将转发层中物理资源映射为虚拟资源，对底层物理资源进行抽象。此外，资源抽象层还可以进行资源的调度，实现资源的合理配置，上层应用不会因为缺乏资源而造成性能下降，也不会由于长期空闲而造成资源浪费，以此来提

高资源的利用率。服务抽象层是控制层中用于映射元服务所包含元能力的一种机制。其对全网范围内的基本承载组件进行认知适配，并且依据业务的特性和要求，对具有相同特性的基本承载组件进行聚类，将其抽象为一个元服务。在控制层中通过 OpenFlow、OVSDDB、ForCES 等软件定义网络协议与控制层进行通信。其中控制模块是 SDN 控制器的控制模块。业务抽象层是应用层中用于映射元业务所包含元服务的一种机制。业务抽象层对控制器提供的所有元服务进行认知适配，并基于业务需求选取合适的元服务来抽象成一个元业务。在应用层中主要通过使用 HTTPS 协议，调用 REST API 设计模式的接口来使用控制层资源。

3.2 基于需求分析的资源度量

需求分析是动态定价的前提，只有在了解用户需求的前提下，才能为用户制定更合理的价格与消费方式，实现收益最大化。同时对于网络来说，也能实现合理资源分配，尽可能实现负载均衡。

为了实现对网络资源更明确的定价，本文将对影响资源价格的影响因子进行分析，并赋予不同的权重，体现到资源价格里，为资源确定更合理的基准价格，从而实现更加合理的资源定价与分配。用户的需求与资源状态是资源价格最为直观的体现，基于用户的需求与资源的使用状态对资源进行度量，进行差异化定价，类似百度地图，根据出发地和目的地，依据用户需求，将不同花费的路径列出来，供用户进行自主选择，最终达到优化网络资源配置、大大提高效率的目的。这种定价分配的方式本质上是一种情景拟合，通过对过往网络资源消费状况的建模分析来预测未来资源的消费状况，从而使资源的分配更合理，同时也可以对用户进行个体化分析以及个性化的定制。

在用户需求方面，有以下几点值得考虑：资

源交易方式、请求时间、历史交易价格、是否预约、历史取消预约次数等。其中用户是否预约网络资源以及是否取消预约，将会影响用户信用度，进而影响资源的最终定价。在不同的请求时间，资源的价格必定会不一样。因此，将这些区别归纳为影响因子，赋予不同的权重，直接影响资源的定价。本文中影响因子由权重表示。定价过程如图 2 所示。

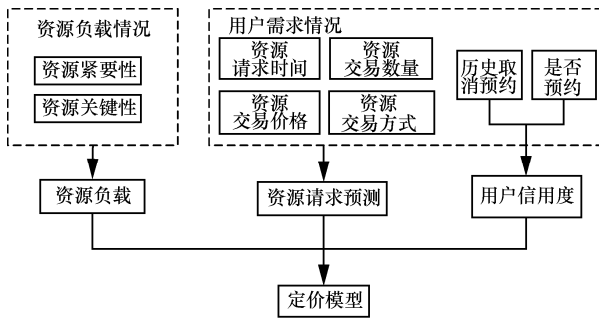


图 2 资源定价过程中的影响因子

通过对资源负载情况进行评估，可以随时把握资源动态，结合用户需求，利用 SDN 架构的特点，为网络系统制定合理、有效的资源定价策略。

3.3 用户消费模式分析

由于 SDN 资源池化、集中管理的特点，网络资源的交易也可以以预约消费的模式实现，即计划性的交易。依据用户的需求，用户可以在使用资源之前，提前提出预约，此时即计划交易模式，用户购买资源的价格将是预约的折扣价；同理，用户若是提出实时的资源请求，即现货交易模式，这时用户购买资源的价格为实时价格。

3.3.1 计划交易模式

计划消费是指消费者当时没有消费，通过事先预约，在未来的某一个时刻消费。在经济学领域，其类似于计划经济。如此可以避免交易的盲目性与无计划性。在此，将计划经济引入网络资源的交易体系之中，将整个 SDN 环境模拟成一个经济交易市场，可以充分利用计划经济理论的优点，提高资源的利用率，实现用户的计划性消费，达到缓解网络资源压力的目的。在这种消费模式

之下，资源的生产、分配与用户的分配都是控制系统提前计划安排的，可以极大地减少与避免网络资源分配不够及时、分配不均等造成的资源浪费及用户满意度低等问题。

在整个 SDN 资源市场中，都可以应用计划消费模式，主要是因为计划消费可以根据用户的需求，为用户制定相应的资源交易表，主要包括资源交易的数量与时间等细节。那么，对于应用层的客户来说，同样也可以采取这种交易方式。

如图 3 所示，用户在会话模块和资源提供商通过资源代理确定交易模式，资源控制层给出具体的定价方案，根据当前所需资源量是否紧张计算出相应价格反馈给客户，客户决定是否以此价格购得资源，以此完成资源交易。

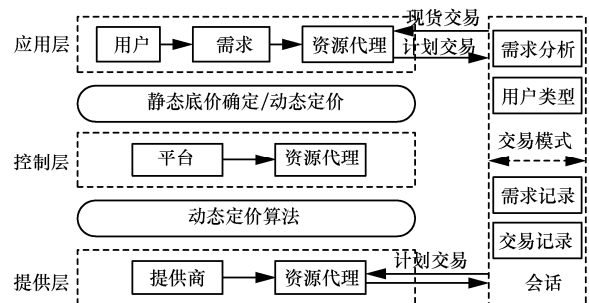


图 3 资源交易模式确定模型

3.3.2 现货消费模式

现货消费是指消费者在当时立即消费，不经过事先预约。相对于计划消费，现货消费显然对资源的要求更高，需要立即提供资源，对于资源的实时调度难度加大，而且参与交易的用户信任度难以确定，交易数量也不明确，综上所述，这样必然会导致交易的风险与成本增加。

因此，这种交易方式一般应用在 SDN 体系的应用层。这一层的资源交易是用户与平台之间的交易，用户需要的资源则是由多种资源组合而成的具有一定功能的元业务。对有些用户来说，需求数量少、种类也比较单一，主要是临时需要某种资源，因此这种适用于小规模的交易方式很适合。



3.4 现货交易定价策略

影响资源价格的主要因素有两个：一是用户的需求，如需求量与需求时间等；二是资源自身状态，如资源是否充足、供大于求还是供不应求。显然资源的状态、系统是过载还是空闲，终究还是由用户的需求影响决定的，因此，为合理确定资源的初始价格，可以从两个角度出发：一是当前资源的状态，二是用户在考量自身需求的前提下，对选择某资源的可能性进行判断。

3.4.1 用户选择模型

对于用户来说，在资源消费时，根据需求的不同可以将用户分为 3 类，分别是时延敏感型、带宽敏感型、价格敏感型。时延敏感型的用户，通常需要的是语音、通话等业务，对时延比较敏感，关注网络链路的实时性；而带宽敏感型用户，追求的是网络带宽，比如下载视频等业务；价格敏感型用户，基本只关注价格因素，选择较为便宜的资源，几乎不在乎其他因素。

因此，用 Logit^[24]选择模型来衡量用户对资源的选择。在经济学领域，Logit 模型是最早的离散选择模型，它基于经济学所说的效用，用户在进行选择时，通常会倾向于对他们来说效用更高的选项。

简要介绍下 Logit 模型，当用户有两种选择方案时， U_1 与 U_2 分别表示用户选择不同方案时的效用，其中 Logit 模型中的效率表示为 $U=V+\delta$ ，其中 V 表示能观察到的影响因素构成的效用， δ 表示不能观察到的因素构成的随机项。 q_1 与 q_2 分别表示用户选择两种方案的概率。

$$\begin{aligned} q_1 &= q(U_1 > U_2) = q(V_1 + \sigma_1 > V_2 + \sigma_2) \\ q_2 &= q(U_2 > U_1) = q(V_2 + \sigma_2 > V_1 + \sigma_1) \end{aligned} \quad (1)$$

通过 Logit 模型推导，可以得到用户选择 i 方案的概率 $q_i = \frac{e^{\theta U_i}}{\sum_{i=asp} e^{\theta U_i}}$ ，其中 θ 是一个正系数，

常用极大似然估计，asp 表示所有选择可能性。

本文在 Logit 模型中加入影响因子模型后，则

有 $q_i = \frac{e^{\theta U_i}}{\sum_{i=asp} e^{\theta U_i}} \left(\sum_{i=1}^m w_i x_i \right)$ ，其中 m 表示影响因子的个数， w_i 表示第 i 个影响因子的权重， x_i 表示第 i 个影响因子的数值。

3.4.2 基于资源负载与用户选择的定价策略

将资源的负载情况与用户的选择结合分析，就能得出对资源交易双方均合理的价格，也能达到资源合理分配的目的。

关于不同元服务之间的比较，用 p 表示元服务的价格，用 L 表示该元服务当前的负载情况产生的额外费用，用 R 表示用户消费时获得的额外收益，用 U 表示用户获取元服务时得到的效用。效用是用户消费时获得的额外收益减去所付出成本。

那么收益模型可以定义为：

$$U = \omega_1 R - (\omega_2 p + \omega_3 L) \quad (2)$$

其中， $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ 是正常数，分别表示每一项的影响因子参数，不同的用户对每一项指标的要求不一样。因此其参数权重不一样。根据参考文献[26]的观点，结合网络中多个用户，可以设用户选择元服务的概率为 q ，则：

$$q_i = \frac{e^{\theta U_i}}{\sum_{i=ass} e^{\theta U_i}} \left(\sum_{i=1}^m w_i x_i \right) \quad (3)$$

其中，ass 表示所有元服务。

此外元服务由多个元能力组成，若确定了选择每一个元能力的概率 q_i ，也可以得到元服务被选择的概率，记为 $q = \prod_{i=1}^m q_i$ 。

对于资源提供商来说，获得最大的收益是他们的最终目的，且成本不变，则第 i 个元服务给资源提供商带来的最大收益为：

$$R_i(P) = q_i \times p_i \times Q - C \quad (4)$$

其中， Q 表示用户选择的这种元服务的数量， C 表示该元服务的固有成本， p_i 表示第 i 个元服务的价格，其为该元服务最合适的定价。

若 p 是满足式 (4) 的最优解, 则 p 一定满足一阶求导等于零, 即满足:

$$R'(p) = \left(q_i + p_i \frac{dq_i}{dp_i} \right) Q = 0 \quad (5)$$

与此同时, 要想得到收益最大化, 还需满足二阶求导小于零, 即满足:

$$R''(p) = \left(2 \frac{dq_i}{dp_i} + p_i \frac{d^2q_i}{d^2p_i} \right) Q < 0 \quad (6)$$

因为求解最优解的关键与用户选择该元服务的概率有关, 而影响用户选择的关键又在于用户最终获得的效用, 该效用归根结底与每一个影响因子的权重息息相关, 即求解最优解, 最重要的就是确定每一个影响因子的权重大小。对于影响因子权重的计算, 主要通过以下 5 步来确定。

步骤 1 通过历史数据获取用户对各个资源的历史交易记录。

步骤 2 调取某一指标的相关数据, 进行归一化处理。

步骤 3 将各个指标数据进行标准化处理:

假设有 m 个指标, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m$, 且其中 $X_i = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 表示 n 个不同影响因子的数值, 各指标数据标准化之后为 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m$ 。

步骤 4 求出各个指标的信息熵:

根据信息熵的定义, 一组数据的信息熵

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, \text{ 其中 } p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}}, j \text{ 指第 } j \text{ 个}$$

元素, 如果 $p_{ij}=0$, 则定义 $\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

步骤 5 确定各个指标的权重:

根据信息熵的计算式, 计算出各个指标的信息熵为 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_m$ 。通过信息熵计算各指标的权重, w_i 表示第 i 个影响因子的权重:

$$w_i = \frac{1 - E_i}{k - \sum E_i} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (7)$$

以上计算所得的第 i 个影响因子的权重是经

过理论推算得到的, 而实际中的情况会更加复杂, 影响因素也会更加多维, 因此要想得到符合实际应用的权重, 需要在实际系统中进行应用, 将得到的实际数值进行拟合调整来得到最佳效果的权重。此后也会根据实际数据得到的权重进行研究。

3.5 预约交易定价策略

与现货交易定价模式不同。预约交易定价过程主要与用户的选择预测及资源当时的负载情况有关。关于对未来的网络架构资源的获取, 用户可以提前预约, 根据自己的需求提前向资源提供商发出请求, 预约好需要的资源数量与种类, 商家根据用户的预定, 为其预留。既然是提前预约, 那么资源的价格显然不会与现货消费的资源价格一致, 因为是提前预约, 给了资源提供商一定的资源准备时间, 起到了减轻网络负载的目的, 这时候的价格会有一定优惠。此外既然是预约, 便可能存在预约用户中途取消预约的情况。如何减少这种情况发生时资源提供商的损失, 又是一个必然要面对的问题。

3.5.1 取消预约风险分析

取消预约行为在酒店预订、航空机票以及医疗就诊等服务中普遍存在, 国内外对这一行为进行了大量研究。网络资源作为一种服务资源, 用户可以提前预约, 那么也将有取消预约的情况发生。

对用户取消预约的行为分析主要在于个体特性的行为预测以及基于统计的概率分析。个体特性行为预测, 主要考察预约用户的消费习惯, 分析影响其取消预约的因素等。概率模型则是以统计为基础, 分为不考虑异质性的概率模型和考虑异质性的概率模型。其中不考虑异质性的概率模型是基于资源提供商中所有历史数据而获得的平均失约率, 将所有用户统一看待, 按照相同的失约率处理; 而考虑异质性的模型是基于对用户的划分, 对某一类用户失约率进行预测, 这一模型更符合实际。

在一般情况下, 假设用户的取消预约行为是



随机的, 该用户的取消过程也是独立的。用户在时刻 t , 没有取消预约的事件为随机事件, 在时间间隔 s 之后, 仍然没有取消预约的概率与时刻 t 无关, 可知该随机事件必然满足指数分布。设 $P_T(t)$ 为在时间长度 t 内用户没有取消预约的概率, 且随着时间的推移, 用户取消预约的概率将越来越低, 即有:

$$P_T(t) = a^t \quad (8)$$

其中, a 满足 $a \geq 0$, 若 $a = 0$, 则 $P_T(t)$ 恒等于 0, 说明无论时间多少, 总有人取消预约; 若 $a = 1$, $P_T(t)$ 恒等于 1, 说明无论时间长短, 都没有人取消预约。显然这两种情况都与实际情况不符。因此存在一个 $\lambda > 0$, 令 $P_T(t)$ 满足:

$$P_T(t) = e^{-\lambda t} \quad (9)$$

用户取消预约的概率不仅与提前预约资源的时间有关, 还与用户历史消费记录所产生的用户信任度密切相关, 对于信任度高的用户来说, 其取消预约的概率相对比较低, 而信任度偏低的用户, 其取消预约的概率相对要高。也就是说, 用户取消预约的概率, 不仅仅与满足指数分布的自然规律相关, 还与用户本身息息相关。将信任度结合到用户取消预约的概率中, 可以确定用户在时间长度 t 内没有取消预约的概率 $P_T(t)$ 为:

$$P_T(t) = Te^{-\lambda t} \quad (10)$$

其中, T 表示用户的信任度, 则在时间长度 t 内, 用户取消资源预约的概率为 $q_0(t)$:

$$q_0(t) = 1 - P_T(t) = 1 - Te^{-\lambda t} \quad (11)$$

通过上述分析, 可知 λ 是对用户取消预约概率描述的参数, 该参数的确定主要通过对大量预约用户取消预约进行概率分析。

3.5.2 针对预约风险的动态定价模型

首先确定所用参数: 资源的初始价格为 p_{D_0} ; 提前 t 天预约资源的价格为 $p_D(t)$; t 天之后用户取消预约的概率为 $q_0(t)$; 用户取消预约时, 用户

所消耗的成本为 C , 资源提供商收取的手续费率 (手续费与预约消费时的价格比例) 为 r 。

如果用户选择提前预约资源, 那么该用户的价格期望 R_D 应该为:

$$R_D = [1 - q_0(t)][p_{D_0} - p_D(t)] - q_0(t)[C + rp_D(t)] \quad (12)$$

(1) 确定手续费率 r

取消预约的手续费率应该与用户提前预约时享有的折扣有关, 用户所享受的折扣越大, 即获取资源的价格越低, 那么用户毁约时资源提供商向其收取的手续费比例则会越高。所以手续费比例应该是一个与资源价格 p 相关的函数 $r = r(p)$, 因为 p 与时间 t 相关, 所以 $r = r(t)$ 。

设手续费率 r 与资源提前预约时的价格 p 成反比例关系, 如式 (13) 所示:

$$r(t) = \frac{f}{p_D(t)} \quad (13)$$

其中, f 为一个正常数, 由资源提供商自己确定。本文假设, 不论什么时候预约资源, 一旦取消预约, 用户所要付出的手续费是相同的, 但是享受的折扣越多, 手续费所占的比例越高。

(2) 确定价格模型

步骤 (1) 所得用户收益 $R_D = [1 - q_0(t)][p_{D_0} - p_D(t)] - q_0(t)[C + f]$ 。用户选择提前预约的消费方式, 则必然满足收益不小于零, 即 $R \geq 0$ 。资源提供商为了获取足够的利益, 使 R 尽可能小, 本文假定资源提供商采取定价策略为 $R=0$ 。

因此, 资源提前预约出售时用户的最终收益随时间变化的价格模型如下:

$$p_D(t) = p_{D_0} - \frac{q_0(t)}{1 - q_0(t)}(C + f) \quad (14)$$

如果资源预售出去的最低价为 p_{\min} , 那么必须满足 $p_D(t) \geq p_{\min}$, 且由式 (11) 可得 $q_0(t) = 1 - Te^{-\lambda t}$ 。

则有:

$$\begin{aligned}
 p_{D_0} - \frac{q_0(t)}{1 - q_0(t)}(C + f) &\geq p_{\min} \\
 p_{D_0} - \frac{1 - Te^{-\lambda t}}{Te^{-\lambda t}}(C + f) &\geq p_{\min} \\
 Te^{-\lambda t} &\geq \frac{C + f}{p_{D_0} - p_{\min} + C + f} \\
 t &\leq \frac{1}{\lambda} \ln \frac{T(p_{D_0} - p_{\min} + C + f)}{(C + f)} \quad (15)
 \end{aligned}$$

即根据资源提供商能够接受的最低价格,且依据越是提前预约,用户享受的资源价格越低的特点,用户提前预约的时间不能大于

$$\frac{1}{\lambda} \ln \frac{T(p_0 - p + C + f)}{C + f}。$$

(3) 确定预约资源不同价格对应的不同时间段

步骤(2)获取了资源的动态定价模型,且获得资源提前预约的最大时间,而实际情况中的资源价格是离散的,并非连续变化的。用 n 表示第 n 个时间段,则 $p_n(t)$ 表示第 n 个时间段资源的价格, $q_n(t)$ 表示第 n 个时间段时用户取消预约的概率,那么:

$$p_n(t) = p_{D_0} - \frac{q_n(t)}{1 - q_n(t)}(C + f) \quad (16)$$

因为用户距离预约的消费时间越长,取消预约的概率越大,也就是说时间间隔越长,概率越高,所以 $q_n(t)$ 是一个增函数,那么在时间段 (t_n, t_{n+1}) ,则有 $q_{n-1}(t) < q_n(t) < q_{n+1}(t)$,且将式(16)改写为:

$$\begin{aligned}
 q_n(t) &= \frac{p_{D_0} - p_n(t)}{(C + f) + p_{D_0} - p_n(t)} = 1 - Te^{-\lambda t} \\
 t &= \frac{1}{\lambda} \ln \frac{T(p_{D_0} - p_n(t) + C + f)}{C + f} \\
 t_{n-1} &< \frac{1}{\lambda} \ln \frac{T(p_{D_0} - p_n(t) + C + f)}{C + f} < t_n \quad (17)
 \end{aligned}$$

所以根据预售资源的价格与手续费,可以确定资源提供商推出每一种价格的时间段。达到让

资源提供商在充分合适的时间段以比较合适的价格提前售出资源的目的,同时以此种方式销售网络资源,可以有效避免用户集中获取网络资源导致造成网络拥塞、负载过重的情况。

本节中用到的Logit模型常常被用来对事物进行分类评定,例如基于Logit模型的居民租车出行影响因素分析^[27]就用来对影响因素进行分类,本文将将租车影响因素替换为资源价格影响因素进行研究。用户选择服务的概率算法在基于多归属组合双向拍卖的SDN资源价格协商算法研究^[26]中有相应的研究,在这里应用了其中的一部分。在参考文献[28]中,提到了运用纳什均衡的思想对网络中的资源进行定价与拍卖。关于信息熵的算法在信息论中的使用也比较频繁,在实际中经常用于计算某事件发生的信息量有多少,在参考文献[29]中,使用熵权法对各种异常网络标签进行权重确立,本文使用熵权法来确定指标的权重。预约风险的动态定价模型在航空公司用得比较广泛,参考文献[30]中Stackelberg提出了一种同时满足网络运营商和用户效用最大的异构无线网络定价的博弈模型和资源分配方案。

4 仿真分析

4.1 基于用户需求的定价过程实例分析

根据资源请求用户类型需求:价格敏感型、带宽敏感型、时延敏感型、普通消费型,其中带宽敏感与时延敏感可以归结为对资源性能敏感,即当前状态下对元服务负载情况的敏感,将用户分为3类,其中涉及的参数为 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \theta)$,其中 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 为影响用户效用的影响因子,其中 ω_1 表示额外收益, ω_2 表示元服务价格, ω_3 表示元服务负载情况。对于用户历史消费的数据,利用熵权法得出; θ 是Logit离散选择模型的参数,常用极大似然估计方法计算,这里取定值0.25。每种用户对应的参数见表1。



表 1 3 种用户涉及的影响因子权重

用户类型	ω_1	ω_2	ω_3
价格敏感型	0.2	0.5	0.3
负载敏感型	0.1	0.3	0.6
普通型	0.3	0.4	0.3

对于元服务 A 与元服务 B, 假设选择元服务 A 与元服务 B 时用户得到的额外收益分别为 60、100, 且二者当前的负载分别为 0.53、0.74, 将其换算成金额来表示, 即负载越大价格越高, 分别为 53、74。其中各个参数均无量纲。3 种用户选择两种元服务的效用见表 2。

表 2 3 种用户选择元服务 A 与元服务 B 的效用

用户类型	元服务 A 的效用	元服务 B 的效用
价格敏感型	$-3.9 - 0.5P$	$-2.2 - 0.5P$
负载敏感型	$-25.8 - 0.3P$	$-34.4 - 0.3P$
普通型	$-2.1 - 0.4P$	$-7.8 - 0.4P$

其中 P 表示资源价格, 将元服务的效用代入式 (2), 并结合式 (4) ~ 式 (6) 在 MATLAB 环境中计算出当资源提供商收益最大时, 不同的用户选择两种元服务的价格, 具体见表 3。

表 3 3 种用户选择元服务 A 与元服务 B 时的最优价格

用户类型	元服务 A 的价格	元服务 B 的效用
价格敏感型	14.9	17.2
负载敏感型	39.7	20.8
普通型	16.3	25.9

由表 3 可以看出, 不同用户选择不同的元服务资源时, 期望的最优价格不同。对于价格敏感型用户来说, 相对于资源的性能负载, 他们更追求优惠的资源价格, 因此元服务 A 与元服务 B 的价格都相对较低, 其中元服务 B 的价格高于元服务 A, 因为元服务 B 当前负载情况高于元服务 A, 这与本文提出的当资源负载较重时, 通过适当提高资源价格, 刺激用户选择价格更优惠、负载较

轻的元服务资源理论相统一。同理, 对于普通型用户这一规律仍然满足。而对于负载敏感型用户来说, 他们更在意哪一种元服务资源当前性能更好, 因而两种元服务价格均相对较高, 但是为了选择性能更好、负载更轻的资源元服务 A, 这一类型的用户就需要付出更高的价格。

4.2 基于预约机制的资源动态定价算法仿真测试

根据预约用户的分析可知, 用户提前预约的时间越长, 用户获取资源的价格越低, 但是因为越提前, 离具体使用资源的日期越远, 用户取消预约的概率也越大。根据历史数据分析, 这里确定 λ 的值为 0.1。且假设不同信任度的 3 类用户, 在不预约资源的情况下, 获取资源原始价格分别为 14.9、39.7、16.3, 信任度分别为 1、0.8、0.7, 不同信任度用户资源初始交易价格见表 4。

表 4 不同信任度用户资源初始交易价格

用户类型	信任度	取消预约的概率 $q(t)$	元服务 A 的价格
用户 1	1	$1 - e^{-0.1t}$	14.9
用户 2	0.8	$1 - 0.8e^{-0.1t}$	39.7
用户 3	0.7	$1 - 0.7e^{-0.1t}$	16.3

那么这些用户采用提前预约方式购买资源时, 取消预约的概率如图 4 所示。

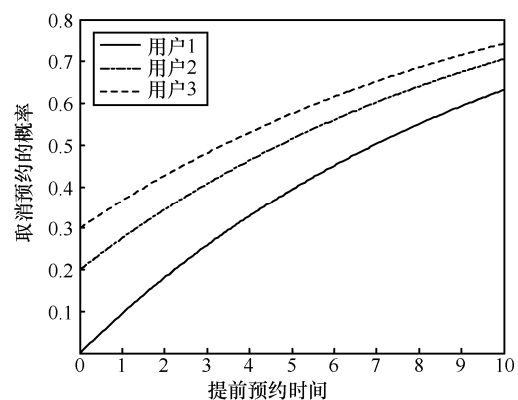


图 4 预约时间与取消预约的概率关系

由图 4 可知, 对于不同信任度的用户, 同样提前 10 天预约资源, 随着时间的推进, 信任度高的

用户取消预约的概率总是比信任度低的用户低，直到时间为 0 时，即到了消费资源的当天，信任度低的用户仍有可能取消预约。说明用户取消资源预约的概率与用户信任度息息相关，同时也能证明将信任度引入预约机制的资源交易过程的合理性。

根据前文的定价过程，其中涉及取消预约的手续费率与提供商能够接受的元服务资源的最低价格。本文以 3 类用户对元服务 A 提前预约的情况进行分析。假设元服务 A 的最低价格为 10，且用户取消预约过程中不需消耗成本，即 $c=0$ ，只需缴纳一定的手续费，且手续费比例与预约资源时的价格相关，通过第 3 节的分析可知，手续费是资源提供商自己定义的一个常数，本文定义为 2.5。

3 类用户的最早预约时间分别为 10 h、23 h、9 h，代入式 (16)，其中 $C=0$ ， f 为 2.5， p_{D_0} 为各类用户选择的原服务价格。

每一个用户，依据用户自身的消费属性与信任度预约元服务资源时，用户不同，其能够提前预约的时间长度不同。如用户 1，作为信任度为 1 的价格敏感型用户，若通过立即现货消费的方式购买元服务资源 A，可以成交的最优价格为 14.9，然而，若其选择通过预约的方式计划消费同一个资源，其能够以更优惠的价格提前预约，价格最低不低于该元服务的最小价格 10，时间间隔不能高于 10；对于用户 2、用户 3 同理。

那么根据该价格模型，每一种用户的元服务资源动态价格与时间的关系如图 5 所示。

由图 5 可以看出，不同的用户可以提前预约的时间长短不相同。提前预约的时间距离使用时间越长，资源价格越便宜，且越接近提供商能够接受的最低价格，提前预约的时间越接近使用元服务资源的时间，资源价格越贵。图 5 (a) 显示该用户可以提前 10 天预约资源，图 5 (b) 的用户可以提前约 23 天预约资源，图 5 (c) 的用户可提前约 9 天预约资源。通过价格刺激用户提前预约

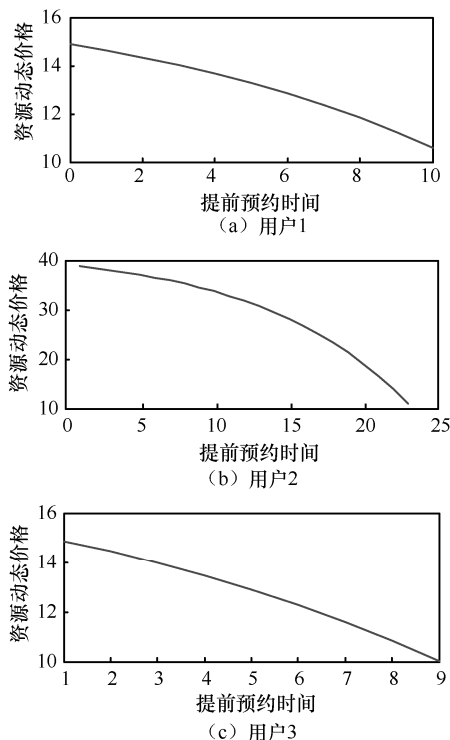


图 5 不同用户提前预约资源时不同时间段对应的优惠价

资源，结合每个用户的信任度与消费习惯给出相应的优惠价格，可以有效地避免用户集中提出资源请求造成地资源负载过重、网络拥塞，从而实现资源的合理分配和保证每时每刻各个元服务或元业务都能正常运转。

5 结束语

本文提出一种基于 SDN 框架的网络资源定价策略。实现资源合理定价，并以价格为杠杆达到网络资源合理分配的目的。结果分析表明，本文所述方法能够有效地制定与调节资源价格，避免用户集中获取网络资源的情况。相信在今后，统一控制资源调度、分配会在大型资源供应商中成为一种必要的措施，以最大化用户效益和自身效益。此外，通过提前预约刺激用户提前预约资源、合理安排消费时间，减少资源分配过程中的空置、浪费将会成为网络优化的重点，今后网络构架中经济学理论的应用将会在网络优化中起到越来越重要的作用。



参考文献:

- [1] ALLENATOR D, THULASIRAM R K. Integrating a financial option based model with GridSim for pricing Grid resources[R]. 2009.
- [2] 软件定义网络 SDN 的现状以及发展趋势[R]. 2015. The current situation and development trend of software-defined network SDN[R]. 2015.
- [3] 郭江兴. 未来网络之憧憬——情景网络[R]. 2015. WU J X. the future of the internet——context network [R]. 2015.
- [4] 梁宁宁, 兰巨龙, 张震. 基于拓扑感知的可重构服务承载网动态重构算法[J]. 通信学报, 2016, 37(2): 72-79. LIANG N N, LAN J L, ZHANG Z. Dynamic reconfiguration algorithm for reconfigurable service bearer networks based on topology awareness[J]. Journal on Communications, 2016, 37(2): 72-79.
- [5] WANG W, OGAWA K, HALEPLIDIS E, et al. Interoperability report for forwarding and control element separation (ForCES): RFC 6984 [S]. 2013.
- [6] 陈文龙, 徐明伟, 徐恪. 可重构集群路由器并行路由分发模型[J]. 通信学报, 2012, 33(6): 118-124. CHEN W L, XU M W, XU K. Parallel routing distribution model for reconfigurable cluster routers[J]. Journal on Communications, 2012, 33(6): 118-124.
- [7] 王力, 赵季红, 曲桦, 等. 软件定义承载网中基于负载均衡的虚拟网络资源分配算法[J]. 电信科学, 2015, 31(11): 32-38. WANG L, ZHAO J H, QU H, et al. Load balance based virtual network resource allocation algorithm in software-defined bearer network[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(11): 32-38.
- [8] 宫法明, 李世宝, 刘建航. 基于 SDN 的动态资源分配算法[J]. 吉林大学学报: 理学版, 2015(6): 1236-1240. GONG F M, LI S B, LIU J H. Dynamic resource allocation algorithm based on SDN[J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2015(6): 1236-1240.
- [9] ORO S D, GALLUCCIO L, MERTIKOPOULOS P, et al. Auction-based resource allocation in Openflow multi-tenant networks[J]. Computer Networks, 2017(115): 29-41.
- [10] 许志凯, 张宏莉, 余翔湛, 等. 基于组合双向拍卖的物联网搜索任务分配机制[J]. 通信学报, 2015, 36(12): 47-56. XU Z K, ZHANG H L, YU X Z, et al. An IoT search task assignment mechanism based on combined double auctions[J]. Journal on Communications, 2015, 36(12): 47-56.
- [11] PASCOAL C, OLIVEIRA M R D, RUI V, et al. Robust feature selection and robust PCA for internet traffic anomaly detection[C]/INFOCOM, March 25-30, 2012, Orlando, FL, USA. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1755-1763.
- [12] MANTERE M, SAILIO M, NOPONEN S. Network traffic features for anomaly detection in specific industrial control system network[J]. Future Internet, 2013, 5(4): 460-473.
- [13] 丁丁, 罗四维, 艾丽华. 基于双向拍卖的适应性云计算资源分配机制[J]. 通信学报, 2012, 33(Z1): 132-140. DING D, LUO S W, AI L H. Adaptive cloud computing resource allocation mechanism based on double auctions[J]. Journal on Communications, 2012, 33(Z1): 132-140.
- [14] 殷波, 张云勇, 王志军, 等. 基于弹性资源调整的云计算资源分配方法[J]. 通信学报, 2014, 35(Z2): 184-190. YIN B, ZHANG Y Y, WANG Z J, et al. Cloud computing resource allocation method based on elastic resource adjustment[J]. Journal on Communications, 2014, 35(Z2): 184-190.
- [15] 许力, 曾智斌, 姚川. 云计算环境中虚拟资源分配优化策略研究[J]. 通信学报, 2012, 33(Z1): 9-16. XU L, ZENG Z B, YAO C. Research on virtual resource allocation optimization strategy in cloud computing environment[J]. Journal on Communications, 2012, 33(Z1): 9-16.
- [16] ZAHEER F E, XIAO J, BOUTABA R. Multi-provider service negotiation and contracting in network virtualization[J]. Network Operations & Management Symposium IEEE, 2010: 471-478.
- [17] 丛鑫, 营玲玲, 孙劲光. 基于可信拍卖机制的视频移植定价策略[J]. 通信学报, 2016, 37(4): 53-63. CONG X, ZI L L, SUN J G. Video migration pricing strategy based on trusted auction mechanism[J]. Journal on Communications, 2016, 37(4): 53-63.
- [18] 薛辉. 基于组合双向拍卖理论的云计算资源定价研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015. XUE H. Research on cloud computing resource pricing based on combined double auction theory[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [19] 王兴伟, 王学毅, 黄敏. 云计算环境下一种基于双向拍卖的资源分配模型[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(2): 309-316. WANG X W, WANG X Y, HUANG M. A resource allocation model based on double auction in cloud computing environment[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(2): 309-316.
- [20] 王波. 基于古诺均衡的云计算资源定价策略研究[D]. 昆明: 云南大学, 2011. WANG B. Research on cloud computing resource pricing strategy based on Cournot equilibrium[D]. Kunming: Yunnan University, 2011.
- [21] 殷波, 张云勇, 房秉毅, 等. 面向成本优化的云计算资源分配方法研究[J]. 电信科学, 2014, 30(11): 22-26. YIN B, ZHANG Y Y, FANG B Y, et al. Research on resource optimization method for cloud computing based on cost optimization[J]. Telecommunication Science, 2014, 30(11): 22-26.
- [22] 梁宁宁, 兰巨龙, 程国振, 等. 基于拍卖博弈的可重构服务承载网动态构建算法[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 82-87. LIANG N N, LAN J L, CHENG G Z, et al. Dynamic construc-

- tion algorithm of reconfigurable service bearer network based on auction game[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 82-87.
- [23] 赵之谦. “玩客”当道网心科技发布迅雷赚钱宝 Pro[J]. 计算机与网络, 2015(23): 36.
ZHAO Z Q. “Playing a guest” on the road to launch thunder and make money with Pro[J]. Computer and Internet, 2015(23): 36.
- [24] 诸葛斌, 朱华, 王保霞, 等. SDN 体系架构中元模型构建机制[J]. 电信科学, 2016, 32(11): 292-231.
ZHUGE B, ZHU H, WANG B X, et al. Meta-model construction mechanism in SDN architecture[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(11): 292-231.
- [25] 杨晓芳, 王喆, 姜海. 基于多项 logit 模型的在线机票代理商选择行为[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(4): 437-442.
YANG X F, WANG Z, JIANG H. Online ticket agent selection behavior based on multiple logit models[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2017, 57(4): 437-442.
- [26] 诸葛斌, 彭丹, 王伟明. 基于多归属组合双向拍卖的 SDN 资源价格协商算法研究[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(4): 591-599.
ZHUGE B, PENG D, WANG W M. Research on SDN resource price negotiation algorithm based on multi-homing combined double auction[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(4): 591-599.
- [27] 杨亚琛, 聂垚, 刘玉印. 基于 Logit 模型的居民租车出行影响因素分析[J]. 中国科技论文, 2017(7): 834-838.
YANG Y X, NIE Y, LIU Y Y. Analysis of influencing factors of resident car rental trip based on logit model[J]. Chinese Science & Technology Dissertations, 2017(7): 834-838.
- [28] ORO S D, GALLUCCIO L. Auction-based resource allocation in OpenFlow multi-tenant networks[J]. Computer Networks, 2017(115): 29-41.
- [29] 李蕊, 张路桥, 李海峰, 等. 基于熵的网络异常流量检测研究综述[J]. 软件学报, 2017, 26(6): 36-39.
LI R, ZHANG L Q, LI H F, et al. A survey of network anomaly traffic detection based on entropy[J]. Journal of Chinese Society of Software, 2017, 26(6): 36-39.
- [30] 姜永, 陈山枝, 胡博. 异构无线网络中基于 Stackelberg 博弈的分布式定价和资源分配算法[J]. 通信学报, 2013, 34(1): 61-68.
JIANG Y, CHEN S Z, HU B. Distributed pricing and resource allocation algorithm based on Stackelberg game in heterogeneous wireless networks[J]. Journal on Communications, 2013, 34(1): 61-68.
- [31] JIANG H. A nested logit-based approach to measuring air shopping screen quality and predicting market share[J]. Revenue and Pricing Management, 2009, 8(2-3): 134-147.

[作者简介]



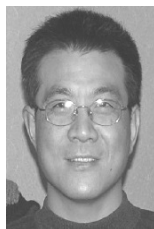
诸葛斌(1976-), 男, 博士, 浙江工商大学信息与工程学院副院长、教授, 主要研究方向为网络与通信技术、互联网技术和网络安全。



元一航(1993-), 男, 浙江工商大学硕士生, 主要研究方向为软件定义网络和未来网络体系结构。



傅晗文(1992-), 男, 浙江工商大学硕士生, 主要研究方向为软件定义网络和未来网络体系结构。



王伟明(1964-), 男, 博士, 浙江工商大学网络与通信工程研究所所长、教授, 主要研究方向为新一代网络体系结构、开放可编程网络。