

多维度防策略性云带宽预留拍卖机制设计

郑臻哲 吴帆 陈贵海

(上海交通大学计算机科学与工程系 上海 200240)

摘要 带宽预留正成为云计算中的增值服务.然而,不同于传统的CPU或存储资源,数据中心网络的带宽资源还没有被高效地分配与利用.现有云带宽资源大都采用现用现付(pay-as-you-go)的形式进行售卖,云带宽用户通过竞争来使用带宽资源,导致数据传输没有性能保证.带宽预留服务还未在现有云计算产业中得到部署.在该论文中,作者考虑在开放拍卖市场中,云服务提供商和云带宽用户之间的带宽交易问题.设计一个贴近实际的云带宽预留拍卖需要克服三大难点:理性(自私)用户的多维度策略行为、多样化云带需求模型和最优社会效益求解的复杂性.在云带宽市场中,云用户拥有多个维度私有信息,比如带宽资源估值、带宽资源需求量和感兴趣的数据中心.这使得云用户具有更强大的市场操控能力.在多样的云应用中,为了支持时延敏感的数据传输或是严格时限的数据传输,云带宽用户会有不同的带宽预留需求.云带宽预留分配问题可以建模成多种不同的组合优化问题.这些组合优化问题通常是NP-难的,因此无法在有效的时间内求得最优解.综合考虑这些设计难点,作者提出首个防策略性云带宽预留拍卖机制,称为SPAR(Strategy-Proof Auction mechanisms for cloud bandwidth Reservation)机制.SPAR机制包括三个拍卖机制SPAR-VCG,SPAR-APX和SPAR-GDY,以支持不同带宽需求模型下的带宽分配.当云带宽用户能够接受被分配到的部分带宽资源,可以采用作者提出SPAR-VCG机制来实现防策略性,并在多项式时间内达到最优社会福利.SPAR-VCG机制的设计结合了线性规划求解模型和传统的VCG机制设计方法.当云带宽用户对于每个感兴趣的数据中心有严格的带宽需求,考虑到最优带宽分配方法求解的复杂性,作者设计了SPAR-APX机制,同样能够实现防策略性并达到近似最优社会福利.理论分析指出SPAR-APX机制的近似比是 \sqrt{B} ,其中 B 代表数据中心的总带宽.作者还证明了该近似比是所有贪心分配算法所能达到的最优近似比.针对于另外一个更普适的带宽需求场景:用户对于感兴趣数据中心有总的带宽需求但是对于每个感兴趣的数据中心却没有严格带宽需求,作者设计了基于贪心策略的带宽分配方案:SPAR-GDY机制.SPAR-GDY机制能够保证两个维度的防策略性,并且在实际环境中都能达到较好社会福利.作者同时还说明了在该灵活带宽需求模型下要保证三个维度的防策略性和近似比保证的困难性.作者实现了这三个带宽预留机制,并且用大规模仿真实验来衡量机制性能.相比于现有的工作,SPAR机制在社会福利、收益、满意度和带宽利用率上都能够达到更优的系统性能,并且在小规模云带宽市场中接近最优解.该论文中所提出的拍卖机制也能够用于分配其他类型的云带宽资源,比如处理器运行时间和存储空间等.

关键词 数据中心网络;云带宽预留;分布式系统;博弈论;拍卖理论;机制设计

中图法分类号 TP391 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2019.00701

On Designing Multi-Dimensional Strategy-Proof Auctions for Distributed Cloud Bandwidth Reservation

ZHENG Zhen-Zhe Wu Fan CHEN Gui-Hai

(Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract Bandwidth reservation is becoming a value-added feature for cloud computing services. However, in contrast to CPU or storage resources, bandwidth resource in data-center networks has not been efficiently allocated. The current cloud bandwidth is sold in a pay-as-you-go way.

收稿日期:2018-06-25;在线出版日期:2018-11-06.本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展计划基金项目(2014CB340303)、国家自然科学基金项目(61672348,61672353,61472252)、上海市科学技术委员会基金项目(15220721300)资助.郑臻哲,男,1989年生,博士,主要研究方向为算法博弈论、云计算、无线网络.E-mail: zhengzhenzhe@sjtu.edu.cn.吴帆(通信作者),男,1981年生,博士,教授,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究领域为网络经济学、无线网络、移动计算、隐私安全.E-mail: fwu@cs.sjtu.edu.cn.陈贵海,男,1963年生,博士,教授,中国计算机学会(CCF)会员,国家杰出青年科学基金入选者,国家重点研发计划项目负责人,主要研究领域为分布式计算、计算机网络、并行计算.

The cloud tenants compete for using the bandwidth resources, resulting in the unpredictable performance in data transportation. The bandwidth reservation services have not been deployed in cloud computing industry. In this paper, we consider bandwidth resource trading between a cloud provider and multiple cloud tenants in an open auction-based market. Designing practical auction mechanisms for bandwidth reservation has to overcome three major challenges: i. e., multi-dimensional strategic behaviors, flexible bandwidth demands, and high computational complexity. In cloud bandwidth markets, cloud tenants have multiple private parameters: bandwidth valuation, bandwidth demand and the preference on data centers, making the cloud tenants have much power to manipulate the market. In diverse cloud applications, tenants may have flexible bandwidth reservation demands, to support delay-sensitive transportation or strict deadline transportation. The cloud bandwidth allocation can be modeled as different types of combinatorial optimization problem, which is NP-Hard in general, and thus it is computationally intractable to derivate the optimal solution. Jointly considering these three challenges, we propose the first family of multi-dimensional Strategy-Proof Auction mechanisms for cloud bandwidth Reservation (SPAR). SPAR contains three auction mechanisms: SPAR-VCG, SPAR-APX and SPAR-GDY, to support different types of bandwidth demand models. First, we present SPAR-VCG that achieves both strategy-proofness and optimal social welfare in polynomial time, when tenants accept partially filled bandwidth demands. The SPAR-VCG mechanism is an integration of a linear programming solving module and the traditional VCG mechanism. Then, considering the computational intractability of the optimal solution for the general bandwidth demand model, we propose SPAR-APX that guarantees strategy-proofness and achieves approximate social welfare for the scenario that tenants have strict requirements on the amount of bandwidth reserved on each of data centers. Our theoretical analysis shows that the approximation ratio of SPAR-APX is \sqrt{B} , where B is the total bandwidth capacity of all data centers. We also prove that this approximation ratio is tight for all greedy-based allocation algorithms. Furthermore, we propose a greedy-based auction mechanism SPAR-GDY for an important and general case, in which cloud tenants only have a strict requirement on the total bandwidth from their preferred data centers but do not have strict bandwidth requirement on each of preferred data centers. SPAR-GDY can guarantee the property of strategy-proofness in two private parameters and achieves good social welfare in most practical cases. We also demonstrate the hardness to achieve strategy-proofness for all the three private parameters, and good approximation ratio in this flexible bandwidth demand model. We implement these three auction mechanisms, and extensively evaluate the performance of them using network simulation. Our simulation results show that SPAR achieve good performance in terms of social welfare, tenant satisfaction ratio and bandwidth utilization, and approach to the optimal social welfare in the small-scale cloud market. The auction mechanisms proposed in this paper can also be applied to allocate other kinds of divisible cloud resources subjecting to specific constraints (e. g., processor times and storage space).

Keywords data center networking; cloud bandwidth reservation; distributed system; game theory; auction theory; mechanism design

1 引 言

云计算为大规模互联网应用部署提供便利,为海

量数据的计算、存储与传输提供保障。互联网服务提供商能够从云计算平台以虚拟机的方式,租用计算和存储资源,无需花费高昂的成本来搭建专有的数据中心。一些互联网应用已经将其部分服务迁移到

云平台,比如北美主要的视频流服务提供商 Netflix 公司,在 2010 年已经将他们的数据存储系统、视频流服务系统、编码系统和其他主要服务模块迁移到亚马逊的 Web 服务平台(Amazon Web Services, AWS)^[1]. 在云平台上部署的应用还有很大一部分是大数据应用. 比如金融行业的高效运转有赖于对海量市场数据的快速分析,以便做出快速的交易决策(如广告营销、风险管理和动态定价等). 由于数据通常储存于不同区域数据中心,大数据服务应用的瓶颈往往来源于数据传输,这比数据处理需要更多的时间. 因此,带宽敏感的互联网应用希望能够从云平台上获得可靠的带宽资源保证,以满足其大数据传输需求.

和传统的云计算资源(CPU 或者存储资源)相比,现有云计算平台只提供了初步的云带宽管理方案,还没有推出动态云带宽预留服务. 当前的云带宽资源管理方法大都采用现用现付(pay-as-you-go)的形式,也即云应用以抢占的方式来使用带宽资源. 虽然 CPU 和存储资源容易通过虚拟机抽象的方式提供,但是数据中心网络具有不同类别的交换机、路由器和复杂的网络拓扑结构,这使得云带宽资源很难被抽象为虚拟服务. 最近,数据中心网络技术的发展为提供带宽预留服务创造了可能^[2-4]. 工业界的云服务提供商也部署了一些初步的大数据传输方案. 比如,Amazon 推出了 AWS 专用网络连接服务(AWS Direct Connect),使得云用户能够在亚马逊数据中心和应用之间建立私有数据传输链路. IBM 公司也成立了一家名为 Aspera 的公司,来为出入云端的大数据流量提供数据传输服务. 但是这些带宽服务仍然采用的是现用现付的方式,还没有推出云带宽预留服务. 随着这些技术的进一步成熟,我们相信未来将会出现新兴的云带宽交易市场,使得云用户能够动态地从云服务提供商处购买云带宽资源以保证大规模数据传输的性能.

本论文的研究主要关注寡头云带宽市场,也即由一个云服务提供商和多个云带宽用户构成的市场. 我们采用拍卖理论工具来求解云带宽市场中的社会效益最大化问题. 我们首先总结求解社会效益最大化问题的技术挑战.

(1) 理性(自私)用户的策略行为. 第一个设计挑战是保证机制的防策略性,这延续了传统拍卖机制设计的要求. 在云带宽市场中,云带宽用户存在多维度私有信息,包括带宽估值、带宽需求量和数据中心地理位置偏好程度. 多维度私有信息使得云带宽

用户可以组合出复杂的策略行为来操纵市场. 我们试图设计防策略性拍卖机制来防止用户复杂的自私策略行为. 云带宽拍卖机制设计属于多维度机制设计(Multi-Dimensional Mechanism Design),是机制设计领域尚未解决的开放性问题^[5-6].

(2) 多样化云带宽需求. 第二个设计挑战主要来自于不同应用场景下云带宽用户的多样化带宽需求. 例如,某些用户没有严格的带宽要求,能够接受任意数量的带宽资源. 时延敏感的应用,比如金融大数据分析,对分配的带宽资源数量有严格的要求. 在某些应用中,云带宽用户对于每个数据中心预留的带宽还会有具体要求. 比如,在大数据服务应用中,数据消费者分布在不同的地域,请求的数据类型也千差万别. 数据服务商需要在不同地域的数据中心预留不同数量的带宽资源. 要设计满足用户多样化带宽需求的拍卖机制需要新的拍卖理论设计技巧.

(3) 最优社会效益求解复杂性. 最后一个挑战是最优带宽分配方案求解的复杂性. 我们将不同带宽需求模型下的带宽分配问题建模成不同的组合优化问题,如单维度或多维度背包问题(Knapsack problems)^[7]. 寻找这些组合优化问题的最优解往往需要较高的计算复杂度. 传统的防策略性拍卖机制,比如 VCG 机制(以三位经济学家 Vickrey^[8], Clarke^[9] 和 Groves^[10] 的名字命名)无法直接运用于解决云带宽资源的分配问题. 这些组合优化问题的经典近似算法,比如背包问题的完全多项式近似算法(Full Polynomial-Time Approximation Scheme, FPTAS)不能满足单调性. 因此,现有近似算法也无法直接运用于解决云带宽资源的分配问题. 我们需要新的机制设计技巧来构建云带宽拍卖机制,既能保证带宽分配性能,也能满足防策略性.

在本论文中,我们运用拍卖理论来探究云带宽资源的售卖策略,并重点考虑社会福利最大化问题. 针对社会福利最大化的云带宽资源分配问题,我们综合考虑了理性(自私)用户的策略行为、多样化云带宽需求和最优社会福利求解复杂性这三点挑战,并设计了满足防策略性的云带宽拍卖机制,称为 SPAR 机制. SPAR 机制包括三个不同的拍卖机制: SPAR-VCG, SPAR-APX 和 SPAR-GDY^①,以满足三种不同的云带宽市场需求模型. SPAR-VCG 机制

① 我们在 SPAR 名称后面添加后缀来表示三个不同模型下相应的机制. 第一个机制是基于经济学经典机制 VCG,故称为 SPAR-VCG,第二个机制是基于近似算法(Approximation Algorithm),故称为 SPAR-APX,第三个机制是基于贪心算法(Greedy Algorithm),所以记为 SPAR-GDY.

基于经典 VCG 机制,适用于当云带宽用户能够接受任意分配带宽资源的情况. SPAR-VCG 机制能够在多项式时间复杂度内达到最优社会福利并能保证防策略性. 当云带宽用户对于每个数据中心都有严格带宽需求时,我们提出了基于贪心策略的拍卖机制,即 SPAR-APX 机制,来达到次优社会福利,并证明其近似比为 \sqrt{B} ,其中 B 是所有数据中心带宽总和. SPAR-APX 机制同样也能满足防策略性. 我们还证明了贪心分配算法的性能下界是 \sqrt{B} ,表明 SPAR-APX 机制达到了贪心算法的最好近似比. 进一步考虑灵活云带宽需求模型:云带宽用户对于感兴趣的数据中心所分配的带宽总量有严格的要求,也即用户对预留的带宽总和有限制,但对于特定数据中心上的带宽却没有要求. 在该带宽需求模型下,我们设计了 SPAR-GDY 机制来保证防策略性,并能够在大多数情况下获得较好的社会效益.

本论文的研究内容与贡献总结如下:

首先考虑的区间带宽需求模型是云带宽买家愿意支付在最大带宽需求范围内任意数量的带宽资源. 对于该带宽需求模型,提出了 SPAR-VCG 机制,结合了线性规划解决方案和传统的 VCG 机制设计思想. SPAR-VCG 机制能够在多项式时间内达到最优社会福利,且能满足防策略性.

接下来考虑严格的带宽需求模型:云带宽用户对于特定数据中心有固定数量的带宽需求. 考虑到在该模型下求解最优解的高计算复杂性,我们提出近似最优的云带宽拍卖机制,能够保证所达到的近似比 \sqrt{B} 是所有贪心算法中最优的. 还证明了该机制同样在带宽估值、感兴趣数据中心集合和带宽需求向量三个维度满足防策略性.

我们进一步提出基于贪心分配思想的拍卖机制 SPAR-GDY 来处理更普适的带宽需求模型,即云带宽用户对感兴趣数据中心的带宽总和和严格数量要求. 机制 SPAR-GDY 在带宽估值和带宽需求向量两个维度满足防策略性,并且在大多数情况下能达到较好的社会效益. 我们讨论了在该带宽需求模型下,要保证三个维度私有信息的防策略性和近似比的技术难度.

最后,我们实现了这三个云带宽拍卖机制,并用大量仿真实验来衡量带宽拍卖机制的性能. 实验结果表明 SPAR 机制在社会福利、云带宽用户满意度和云带宽资源利用率三方面都能达到较好的性能.

本文在第 2 节中,回顾云计算中带宽资源分配

的相关工作;在第 3 节中,我们描述云带宽拍卖模型,包括云带宽服务商、云带宽用户、云带宽需求模型、云带宽用户效益函数和云带宽服务提供商的优化目标;在第 4 节中,考虑社会效益最大化的云带宽拍卖机制设计,并提出 SPAR 机制. 对于云带宽用户的三种不同需求模型:区间需求模型、严格需求模型和灵活需求模型,分别设计了三种拍卖机制:SPAR-VCG、SPAR-APX 和 SPAR-GDY;在第 5 节中,对三种拍卖机制,我们做性能分析和实验仿真;最后,在第 6 节中,对本文内容进行总结.

2 相关工作

在本小节中,我们回顾借助博弈论原理来进行网络资源(特别是云带宽资源)的分配的研究现状. 文献[11]引入中间商来整合市场的带宽需求,并且负责和带宽用户进行议价,以确定带宽资源的价格. 然而,他们的方法只能达到纳什均衡,因此存在纳什均衡固有缺陷. 在文献[12-13]中,作者考虑了数据中心网络流量的动态性:存在大量较短的流和突发性的流. 在控制理论的框架下,他们提出了一套基于 Logistic 模型的分布式流量控制算法,并且证明了算法的稳定性和快速收敛性. Guo 等人将数据中心带宽分配问题建模成合作博弈模型,既保证了 VM 的基本带宽需求,并将剩余带宽按比例的方式进行分配. 他们提出的 Falloc 带宽分配算法能够达到非对称的纳什交涉方案(Nash Bargaining Solution)^[14-15]. Wang 等人为云服务提供商提出了在混合定价模型下(既存在现收现付定价模式(Pay-as-you-go Pricing),也存在拍卖机制定价模式(Auction-like Spot Market))的最优带宽容量分割策略^[16]. 在文献[17]中,作者基于组合拍卖机制提出了防串谋的云带宽定价机制. 我们借鉴拍卖理论基本原理来研究以社会效益最大化为目标的云带宽资源预留分配问题. 拍卖理论是经济学和理论计算机领域的热门研究方向. 各种形式的拍卖机制已经被运用于解决网络中的各类资源分配问题,比如频谱拍卖机制^[18-19]等. 运用定价原理来为通信网络中的资源进行定价也有大量相关工作. TCP 网络协议可以解释为是某种拥塞定价机制协议(Congestion Pricing Scheme)^[20-21]. Acemoglu 等人研究了在无线网络中的门槛定价策略(Entry Price Strategy)和传输能量分配策略(Power Allocation Rule)^[22]. Başar 和 Srikant 教授设计了在单链路网络^[23]和多链路网

络^[24]中,基于带宽使用量的定价机制(Usage-based Pricing Schemes),并且探究了能够提高带宽交易收益的条件. Jalaparti 等人将带宽动态定价策略和流量工程(Traffic Engineering)技术结合起来,考虑了数据中心之间带宽预留分配问题,并提出了 Pretium 定价机制^[4]. Guo 等人发现具有相同 CPU 和存储的 VM 实例,在带宽性能上最多会有 16 倍的差距. 他们提出 SoftBW 系统来对 VM 实例的带宽资源使用情况收费. SoftBW 系统采用了基于带宽使用情况的定价策略,并且采用调度算法来实现带宽保证和分配的公平性^[25]. 最近, Zheng 等人设计动态定价策略来最大化带宽提供商的收益^[26]. 该工作提出了云带宽定价理论的框架:云服务提供商为每条链路在每个时刻制定价格,用户根据数据传输请求选择路由路径和数据传输量.

拍卖机制和定价策略都是对于稀缺网络资源进行合理分配的有效方式,两者各有优缺点. 拍卖机制的优点是能够根据用户提交的信息来优化资源分配算法,提高资源使用率,最大化社会福利. 相应的缺点是需要设计复杂的拍卖规则来防止用户通过恶意报价来操纵市场. 另外拍卖机制也给用户增加了负担,用户需要准确了解网络资源的估值,并且需要根据复杂多变的市场情况动态地改变报价策略. 因此,类似于广告拍卖中的实时竞拍(Real-time Bidding)^[27],已经有相关工作研究在云带宽拍卖市场中如何为用户设计竞拍策略^[28]. 相对来说,定价策略的优点是规则简单、便捷,用户无需报价,只需根据市场价格决定是否购买资源以及购买的数量. 这样,就无需担心用户对于市场的操纵行为. 但是缺点是资源拥有者需要在有限的信息下准确制定、调整价格以符合市场的供需关系. 由于缺少用户对于资源的估值信息,资源定价过程变得非常困难,往往需要借助机器学习等方法来辅佐定价.

我们接下来回顾网络系统工程方向的工作是如何进行云带宽资源分配的. 研究者已经提出了诸多数据中心网络系统来解决云带宽资源的分配和预留机制. NetShare 系统是一个分层的最大最小带宽分配框架,依靠集中的带宽分配者来划分链路的带宽^[29]. SecondNet 系统通过对数据中心网络资源的虚拟化来为 VMs 之间的数据传输提供保障^[3]. ElasticSwitch 系统考虑到数据中心网络中流量的突发性,能够实现云带宽资源的灵活复用. 相比于 SecondNet 系统的静态带宽预留, ElasticSwitch 系统能够更好地利用云带宽资源,并且能够适用于现

有的商业交换机和网络拓扑结构^[30]. ElasticSwitch 系统在复用云带宽资源的同时有可能无法实现严格的带宽保证,为了克服这一困难, Li 等人提出了 DFlow 机制,将一个流划分成两个不同优先级的子流,并将每个子流单独用来实现带宽保证或者是带宽复用,从而同时实现了带宽保证和带宽复用两方面优化目标^[31]. Trinity 系统能够进一步保证较短的云流量能够具有较低的延迟,同时实现了带宽保证、带宽复用和较低延迟三个优化目标^[32]. 利用软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)技术,云服务公司已经建立了专有的数据中心互联广域网络,比如 Google 公司的 B4 网络^[33]和微软公司的 SWAN 网络^[34],来连接这些公司在各地的数据中心.

我们最后简单回顾在云计算中传统云资源分配. 资源的合理分配是云计算中的关键问题,已经有多种高效的分配方法. Zhang 等人为具有异质云资源需求的用户设计了在线拍卖机制,能够动态地反应市场的供需关系^[35]. 为了更好地利用空闲云计算资源, Yi 等人提出了一种灵活的云计算实例服务,通过该服务,用户能够为具有时延容忍的计算任务指定完成率. 作者提出了一个两阶段定价框架,所制定的价格反映了市场的供求关系,并且最大化云服务提供商的利益^[36]. 大量云用户通常会请求较少或较短的云资源. 云服务提供商预先设定的资源实例往往无法满足这类云用户的需求,并造成了资源浪费. Yi 等人提出了云资源团购的想法,将这类用户的小规模资源请求汇聚成较大的资源请求. 作者将静态分组问题建模成装箱问题(Bin Packing Problem),将动态分组问题建模成动态多维背包问题(Multi-dimensional Knapsack Problem)^[37]. 最近研究者 Wang 等人采用机器学习的方法来对云资源进行分配^[38]. SDN 技术已经被成功地运用于专属广域网络的搭建中. 传统的交换机(Switches)和控制器(Controller)之间的匹配是静态的. 网络流量的动态性会造成控制器较长的响应时间和维护成本. 为了更好地利用 SDN 中的控制器资源, Wang 等人将交换机和控制器的动态匹配过程建模成在线优化问题. 研究者把在线优化问题解耦成一系列的稳定匹配问题,并提出启发式算法高效地解决了稳定匹配问题^[39].

本论文是作者发表的会议短文工作^[40]的拓展,我们做了大量的修改和扩充,现有的版本所具有的创新性和贡献可以总结为如下 4 个方面:

(1) 我们提出了贴近实际的灵活带宽需求模型: 用户对于每个感兴趣的数据中心都有严格的带宽需求. 针对灵活带宽需求模型, 我们设计了 SPAR-APX 机制, 并严谨地证明了 SPAR-APX 机制能够同时达到防策略性和的近似比. 我们还证明了所有贪心算法的近似比下界是 \sqrt{B} , 这意味着 SPAR-APX 算法是最优的贪心分配算法. SPAR-APX 机制的设计和分析是本文的主体.

(2) 完整版论文另外一个新的贡献是我们将防策略性的概念拓展到多维度私有信息. 在机制设计领域, 要达到多维度的防策略性是公认的难题. 在云带宽市场的特殊模型下, 我们一定程度上解决了多维度机制设计难题. 对于 SPAR-APX 机制, 我们巧妙地设计贪心分配规则, 不仅能够得到较好的近似比, 也能保证在带宽估值、感兴趣数据中心集合和带宽需求向量三个维度的防策略性. 对于会议版本中的主要内容 SPAR-GDY 机制, 我们也做了大量的修改和讨论. 我们修改了 SPAR-GDY 机制的带宽分配方式, 使其能够保证在带宽估值和感兴趣数据中心这两个维度的防策略性. 我们还讨论了 SPAR-GDY 机制要在带宽需求向量这个维度达到防策略性的困难程度. 对于 SPAR-GDY 机制的性能保证, 我们构造了一个极端的例子来说明 SPAR-GDY 机制没有有效的近似比.

(3) 我们还对近年来的相关工作进行了大量的补充和讨论. 对于在不同带宽需求模型下的带宽分配问题, 我们进行了深入的探讨和经典的分配问题 (Assignment Problem), 如多维背包问题、网络流最大化问题等建立了联系, 并说明了经典分配算法无法适用于云带宽分配问题.

(4) 我们重写了会议版本的大部分内容, 以更清晰地表述相关概念、算法设计思想和实验结果. 为了保持相关内容的一致性, 我们保留了相应的符号和图标.

3 云带宽拍卖模型

在本小节中, 描述云带宽市场中最大化社会效益云带宽分配问题的拍卖模型.

我们考虑开放云带宽交易市场, 其中有一个云带宽服务提供商和多个云带宽用户. 云带宽服务提供商拥有多个数据中心, 云带宽用户可以是在线视频服务提供商、数据交易平台等. 云带宽服务提供商的目标是最大化带宽分配所能达到的社会效益. 我

们将云带宽预留分配问题建模成密式拍卖, 其中云带宽用户同时提交投标价格. 我们假设云带宽服务提供商, 也就是拍卖商, 是可信的机构. 拍卖商需要确定带宽分配方案和用户带宽收费标准. 接下来依次介绍带宽市场的各个组成部分.

(1) 云带宽服务商. 云带宽服务提供商, 比如亚马逊的 Amazon Web Services (AWS)、谷歌的 Google Cloud Platform 和微软的 Windows Azure 在世界范围内拥有多个数据中心^①. 集合 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 表示其数据中心. 每个数据中心 $l \in M$ 拥有带宽容 B_l 和带宽服务单位开销 c_l . 将数据中心的带宽总容量记为 $B \triangleq \sum_{l=1}^m B_l$, 并用向量 $\mathbf{B} = (B_1, B_2, \dots, B_m)$ 和 $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ 来分别表示数据中心的带宽容量和单位带宽开销.

(2) 云带宽用户. 在云带宽市场中有多个带宽用户, 记为集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, 比如在线视频流提供商 Netflix、Hulu 和 Youku, 还有数据交易市场等. 假设每个云带宽用户 $i \in N$ 想要预留带宽总量 D_i 来满足其数据传输服务质量要求, 并且对于单位带宽资源有 v_i 的估值. 所有云带宽用户的估值可以表示成 $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$. 对于每一个云带宽用户 $i \in N$, 集合 $M_i \subseteq M$ 表示他所感兴趣的数据中心. 云带宽用户 i 希望能够在感兴趣的数据中心上预留一定的带宽资源以用于大数据传输. 云带宽用户对于数据中心的偏好来至多方面, 比如不同地域数据中心在进行数据传输时会有不同的数据延迟, 因此云带宽用户会倾向于选择延迟更低的数据中心进行数据传输. 考虑到云带宽用户有可能要应答具有不同规模和不同延迟的数据传输请求, 他可能需要在不同的数据中心预留不同数量的带宽资源. 具体地说, 向量 $\mathbf{d}_i = (d_i^1, d_i^2, \dots, d_i^m)$ 表示云带宽用户 $i \in N$ 的带宽预留需求, 其中 d_i^l 表示在数据中心 $l \in M$ 上希望能够预留的带宽资源. 将云带宽用户 $i \in N$ 总带宽需求记为 $D_i = \sum_{l \in M_i} d_i^l$. 向量 $\mathbf{M} = (M_1, M_2, \dots, M_n)$ 和 $\mathbf{d} = (\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_n)$ 分别表示所有云带宽用户的感兴趣数据中心集合和带宽需求集合. 单位带宽资源估值 v_i 、感兴趣数据中心集合 M_i 还有带宽需求向量 \mathbf{d}_i

^① 亚马逊云平台 AWS 运营着总共 55 个逻辑区域, 分布于全球 18 个物理区域 (regions): <https://aws.amazon.com/about-aws/global-infrastructure/>. Google 的 GCP 云平台运营着 52 个逻辑区域, 分布于 17 个物理区域 <https://cloud.google.com/about/locations/#locations>. 微软 Azure 平台将数据中心部署在全球 54 个区域中 <https://azure.microsoft.com/en-us/global-infrastructure/regions/>.

三个维度都是云带宽用户 $i \in \mathbb{N}$ 的私有信息. 私有信息在机制设计理论中通常也被称为属性 (types)^[41]. 需要强调的是我们所考虑的带宽分配拍卖模型属于多维度机制设计的范畴^[5-6].

(3) 带宽需求模型. 我们考虑三种不同的带宽需求模型: 区间需求模型、严格需求模型和灵活需求模型, 来刻画云带宽市场中用户多样化的带宽需求. 在区间需求模型中, 云带宽用户 i 愿意支付每一单位云带宽资源, 即使在数据中心 M_i 被分配到的带宽资源小于需求带宽 D_i . 该模型类似于当下云计算资源的即用即买 (pay-as-you-go) 定价模型. 我们进一步考虑严格带宽需求模型: 云带宽用户 $i \in \mathbb{N}$ 对于数据中心 $l \in M_i$ 具有严格的带宽需求 d_l^i . 这意味着云带宽用户 i 在数据中心 $l \in M_i$ 上, 只接受 d_l^i 带宽资源或者没有被分配带宽资源, 而不接受其他分配结果. 最后, 我们考虑更加普适的带宽需求模型: 用户 $i \in \mathbb{N}$ 对于每一个感兴趣的数据中心并没有具体的带宽需求数量, 而是对所有数据中心 M_i 具有带宽需求总量 D_i . 我们强调该模型下的带宽需求也是严格的, 即云带宽用户要么被分配总带宽 D_i , 要么没有被分配带宽. 该普适带宽需求模型是基于对现有数据中心网络架构的观察. 正如之前所讨论的, 数据传输的网络延迟 (决定于数据传输起点和终点之间的距离) 是选择感兴趣数据中心集合的重要衡量因素. 在同一地域 (region) 的数据中心, 但有可能在不同的逻辑区域 (zones), 具有相同的数据延迟. 这意味着在同一区域数据中心预留的带宽资源在数据传输延迟上对于用户是等价的. 因此, 在这种场景下, 云带宽用户只对总预留带宽有严格的数量要求.

(4) 分配方案和定价策略. 在云带宽拍卖机制中, 云带宽用户同时将投标报价 $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 、带宽需求 $\mathbf{d} = (d_1^i, d_2^i, \dots, d_n^i)$ 和感兴趣数据中心 $\mathbf{M}' = (M_1', M_2', \dots, M_n')$ 这三个维度信息提交给拍卖商. 这些投标信息和私有信息并不一定相等. 当收集完这些投标信息之后, 云服务提供商决定获胜的云带宽用户 \mathbb{W} , 为每个获胜用户分配带宽资源 $A = (a_l^i)_{i \in \mathbb{N}, l \in M}$ 和确定每个获胜用户所需要支付的费用 $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$. 其中 a_l^i 表示在数据中心 $l \in M$ 为用户 $i \in \mathbb{N}$ 预留的带宽资源数量, 并用 p_l 来表示对于云带宽用户 i 每单位带宽所收取的费用.

为了保证云带宽服务提供商能够获得非负的利润, 要求收取的费用不能小于预先设定的价格 $p_0 > 0$, 比如预留价格可以设定为 $p_0 = \max_{l \in M} (c_l)$, 其中 c_l 是数据中心 $l \in M$ 所提供的每一单带宽成本. 这样就

能使得收取的单位云带宽费用总是大于单位带宽成本, 保证云带宽服务商获得非负利润.

(5) 云带宽用户效益. 我们将云带宽用户 i 的效益 u_i 定义为分配到带宽资源的估值和带宽资源费用之差. 最终被分配的带宽资源 $a_i \triangleq \sum_{l \in M_i} a_l^i$ 有可能不等于带宽需求 $D_i = \sum_{l \in M_i} d_l^i$. 一方面, 在区间需求模型中, 被分配的带宽量 a_i 可能比需求的带宽量 D_i 小. 因此, 在这种情况下, 云带宽用户 i 对于分配的带宽资源的估值为 $v_i \times a_i$. 另一方面, 云带宽用户有可能对带宽需求信息进行欺骗. 在三种模型中, a_i 都有可能大于 D_i . 在这种情况下, 云带宽用户 i 对于带宽资源的估值是 $v_i \times D_i$. 为了能够反映这两种场景下的效益函数, 定义云带宽用户 $i \in \mathbb{N}$ 的效益为

$$u_i \triangleq v_i \times \min\{D_i, a_i\} - p_i \times a_i.$$

云带宽用户对于分配到的每一单位带宽资源并不是都有估值, 但是却必须对所有分配到的带宽资源支付费用.

云带宽用户是理性且自私的, 因此每位用户的目标是最大化自己的效益. 云带宽用户试图操控他的私有信息, 包括带宽资源估值、感兴趣的数据中心和带宽需求, 来寻找更高的收益. 和云带宽用户相比, 云带宽提供商的目标是最大化社会福利 (Social Welfare), 我们将社会福利定义如下.

定义 1 社会福利 (Social Welfare) 在云带宽拍卖中的社会福利被定义为云带宽用户对于分配到的带宽资源的估值总和与提供带宽资源的费用之差

$$SW = \sum_{i \in \mathbb{W}} v_i \times \min\{D_i, a_i\} - \sum_{i \in \mathbb{W}} c_i \times a_i.$$

最大化社会福利意味着我们能够将带宽资源分配给对带宽资源估值最高的云带宽用户, 也就是最需要资源的用户将会被分配资源, 提高了带宽资源的利用率. 云带宽市场中另外一个优化目标是最大化带宽交易利润, 特别是在专属广域网中, 比如 Google 的 B4 和微软的 SWAN 数据中心网络, 云带宽服务提供商想要从带宽售卖过程中获得更高的利润来弥补建立数据中心互联网络的高昂成本. 利润最大化拍卖机制以 Myerson 拍卖为代表^[42]. Myerson 拍卖机制通过用户的估值分布信息为资源设定预留价格, 只有当用户的报价高于预留价格时才售卖资源. 该预留价格参数的设定将影响到带宽资源分配所获得的利润和社会福利, 因此云带宽服务商可以根据自身优化目标适当调整预留价格. 关于如何优化预留价格以达到最大化带宽售卖利润或者是在利润和

社会福利之间做权衡已经超出了本文的范围. 本论文考虑社会最大化为优化目标, 从长远的角度看, 最大化社会福利也能够一定程度上最大化带宽交易所获得利润.

3.1 博弈论简介

我们首先总结采用博弈论理论来研究云带宽交易市场所具有的优势, 可以归纳为如下 3 点:

(1) 云带宽交易市场和传统的市场一样都需要考虑参与者的理性自私行为. 我们可以采用策略博弈模型(Strategic Game Model)来研究用户的策略交互行为及其对云带宽分配方案所得到社会福利的影响.

(2) 拍卖理论为我们提供了在竞争环境下多目标优化的理论基础和可行方法. 我们能够运用拍卖理论来设计博弈规则, 以激励理性(自私)用户协同合作, 并达到最优近似最优带宽分配性能.

(3) 算法博弈论中的相关结论为我们在策略环境下, 设计具有多项式的带宽拍卖机制提供了线索. 一方面, 传统的近似算法设计往往无法满足博弈论的相关性质, 另一方面, 传统的博弈论机制常常具有较高的计算复杂性; 不适用于大规模的云带宽交易市场. 算法博弈论的研究成果克服了上述两方面的困难.

接下来, 我们简要回顾在本论文中需要用到的博弈论相关概念. 在博弈论里一个重要的概念是占优策略(Dominant Strategy).

定义 2. 占优策略(Dominant Strategy)在策略博弈模型中, 一个策略 s_i 是玩家 i 的占优策略, 当且仅当对于该玩家的任何其他策略 $s'_i \neq s_i$ 和其他玩家可能的策略集合 s_{-i} , 如下等式成立

$$u_i(s_i, s_{-i}) \geq u_i(s'_i, s_{-i}).$$

占优策略的概念是机制设计中激励相容(Incentive-Compatibility)性质的基础. 在拍卖理论中, 激励相容的性质意味着任何玩家都没有动机对其私有信息进行策略性操纵, 也即是真实地揭示出私有信息是每个玩家的占优策略, 能够最大化玩家收益. 在本论文中, 我们考虑玩家具有多维度的私有信息. 机制设计中另外一个重要概念是个人理性(Individual-Rationality), 表示每一个参与博弈的玩家所得到的收益不少于玩家不参加博弈所能获得的收益. 根据如上讨论, 我们可以引入防策略性机制的定义.

定义 3. 防策略性机制(Strategy-Proof Mechanism)当机制满足激励相容和个人理性这两个性质

时, 我们称其满足防策略性.

接下来, 我们介绍算法设计中近似比的概念.

定义 4. α -近似算法(α -approximation algorithm)一个算法被称为 α 近似, 当最优解和算法得到的近似解的比值在任何实例中都小于 α , 比值 α 也被称为该算法的近似比.

4 社会效益最大化云带宽拍卖机制

在本小节中, 分别根据云带宽市场中三种带宽需求模型: 区间需求模型、严格需求模型和灵活需求模型, 设计三种云带宽拍卖机制, SPAR-VCG、SPAR-APX 和 SPAR-GDY.

4.1 最优云带宽拍卖(SPAR-VCG)

首先考虑区间带宽需求模型, 也就是云带宽用户愿意支付在他最大带宽需求范围内任意单位的带宽资源. 我们提出了基于传统 VCG 拍卖机制的云带宽分配方案, 称为 SPAR-VCG 机制. 该机制在多项式时间能达到最优社会效益, 并且在带宽资源估值、感兴趣数据中心集合和带宽需求数量这三个维度都能保证防策略性. SPAR-VCG 机制包含两个主要部分: 最优云带宽分配方案和基于 VCG 机制的收费机制.

(1) 最优云带宽分配方案. 给定数据中心云带宽容量向量 \mathbf{B} 和每单位带宽开销向量 \mathbf{c} , 用户的投标信息(包括报价信息 \mathbf{b} 、感兴趣数据中心向量 \mathbf{M} 和带宽需求向量 \mathbf{d}), 我们能够将在该模型下的云带宽分配方案建模成线性规划问题 $\mathcal{LP-I}$.

$$\text{最大化} \quad \text{SW} = \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) a_i^l$$

$$\text{限制条件} \quad \sum_{i \in \mathbf{N}} a_i^l \leq B_l, \quad \forall l \in \mathbf{M} \quad (1)$$

$$0 \leq a_i^l \leq d_i^l, \quad \forall i \in \mathbf{N}, \quad \forall l \in M_i \quad (2)$$

限制条件(1)表示了在每个数据中心的带宽容量限制. 限制条件(2)表示了云带宽用户 i 在每个数据中心所预留的带宽资源不能超过需求的带宽资源, 并且须是非负的.

通过求解上述线性规划问题, 能够在多项式时间内得到最优带宽分配方案 A^* , 达到最大的社会福利.

(2) 基于 VCG 的定价机制. 对于资源分配问题, 当存在多项式时间复杂度算法能够计算出最优方案时, 可以采用传统 VCG 机制来计算所应支付的价格, 并能保证防策略性.

我们用 A^* 和 A' 来表示用户 i 参与拍卖或不参

与拍卖的带宽分配结果矩阵. 那么对于获胜用户 i 所应支付的带宽资源费用 p_i^* 是

$$\begin{aligned}
 p_i^* \sum_{l \in M_i} a_i^{*l} &= \\
 \frac{\sum_{j \neq i} \sum_{l \in M_j} (b_j - c_l) a_j^{*l} - \left(\sum_{j \neq i} \sum_{l \in M_j} (b_j - c_l) a_j^{*l} - \sum_{l \in M_i} c_l a_i^{*l} \right)}{\sum_{l \in M_i} a_i^{*l}}, & \\
 \Rightarrow p_i^* &= \\
 \frac{\sum_{j \neq i} \sum_{l \in M_j} (b_j - c_l) a_j^{*l} - \sum_{j \neq i} \sum_{l \in M_j} (b_j - c_l) a_j^{*l} + \sum_{l \in M_i} c_l a_i^{*l}}{\sum_{l \in M_i} a_i^{*l}} & \\
 & (3)
 \end{aligned}$$

直观地讲, VCG 机制对于获胜用户 i 所收取的费用 p_i^* 是两种社会效益之差. 具体地说, 在等式 (3) 中, 第一项是云带宽用户 i 不参与拍卖所能获得的社会效益, 第二项是当用户 i 参与拍卖时的社会福利, 但需要去除他的估值. 在某些情况下, 有可能出现 $p_i^* < p_0$, 因此获胜用户 i 所应该支付的费用 p_i 被设定为: $p_i = \max\{p_i^*, p_0\}$. 对于失败用户, 他们并没有被收取任何费用.

通过求解之前的线性规划, 能够得到最优的带宽分配方案, 并且获胜买家的费用独立于其报价信息, 因此对于机制 SPAR-VCG, 可以得到如下结论.

定理 1. 机制 SPAR-VCG 是一个多维度防策略性云带宽拍卖机制, 并且能够达到最优社会福利.

4.2 近似最优云带宽拍卖 (SPAR-APX)

在实际应用中, 云带宽用户可能会有严格的带宽要求, 并且只有当请求的带宽资源完全被满足的情况下, 才愿意支付带宽费用. 此外, 云带宽用户, 比如在线视频流提供商或者是数据交易市场运维者, 对于每个感兴趣的数据中心会有不同的带宽资源需求. 在本小节中, 我们提出了近似最优的防策略性拍卖机制, 称为 SPAR-APX 机制, 来解决严格带宽需求模型下的云带宽预留机制.

在给出机制 SPAR-APX 的具体设计思路之前, 首先形式化地描述在严格带宽需求模型下的社会福利最大化问题.

$$\text{最大化} \quad SW = \sum_{i \in \mathbb{N}} \sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) a_i^l$$

$$\text{限制条件} \quad \sum_{i \in \mathbb{N}, l \in M_l} a_i^l \leq B_l, \quad \forall l \in \mathbb{M},$$

$$a_i^l = d_i^l x_i, \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (4)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (5)$$

在严格带宽需求模型下, 云带宽用户对于每个感兴趣的数据中心都有一个严格的带宽需求. 如果云用户 i 在拍卖中获胜, 设置成 $x_i = 1$, 在数据中心

$l \in M_i$ 所预留的带宽资源就必须等于他所需求的带宽数量 d_i^l , 也就是限制条件 (4) 中的 $a_i^l = d_i^l$.

多维背包问题 (Multi-dimensional Knapsack problem)^[7, 43] 可以用来解释以上的二元规划.

$\sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) a_i^l$ 是云带宽用户 i 所贡献的社会福利,

对应于多维背包问题中物品 i 所产生的收益. d_i^l 对应于物品 i 在第 l 个维度的重量, 数据中心 $l \in \mathbb{M}$ 的带宽容量 B_l 可以看成是背包在第 l 个维度的容量. 因为多维度背包问题是 NP-Complete 问题, 没有 FPTAS 算法, 除非 $P = NP$ ^[44]. 虽然启发式算法在实际中能够达到好的实际效果^[7], 近似算法在所有实例中都能有性能保证^[43], 但是这些算法不满足单调性, 无法保证防策略性. 在本小节中, 我们试图设计具有多项式时间复杂度的算法, 能够达到较好的近似比, 并能在三个不同的维度 (带宽估值、感兴趣数据中心集合和带宽需求) 满足防策略性.

(1) SPAR-APX 机制设计. SPAR-APX 机制同样包含两方面内容: 贪心带宽分配方案和带宽收费机制.

(2) 带宽分配方案. 在 SPAR-APX 机制中, 云带宽用户 $i \in \mathbb{N}$ 在感兴趣的数据中心 M_i 上有严格的带宽需求 d_i , 单位的带宽估值为 b_i . 因此, 能够计算出用户 i 若获胜所能贡献的社会福利, 也即 $\sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) d_i^l$.

基于贪心策略的资源分配算法, 关键的步骤是设计排序指标. 根据该指标贪心地选取最优用户, 并最终达到较好的性能保证. 我们提出两条直观的规则来设计排序指标. 一方面, 由于带宽分配目标是最大化社会效益, 因此排序指标应该和云带宽用户所贡献的社会效益成正比; 另一方面, 考虑到一个具有高带宽需求的用户可能会阻止其他用户分配到带宽资源, 因而排序指标必须和请求的带宽资源总和成反比. 这里列举了一系列满足如上两条规则的排序指标, 并从中选取一个指标来达到最优近似比. 一个很自然的排序指标是

$$\bar{b}_i = \frac{\sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) d_i^l}{\sum_{l \in M_i} d_i^l} \quad (6)$$

这个指标按每单位带宽的平均社会福利来进行排序. 我们或许更倾向于将该排序指标中每个数据中心的带宽估值通过相应的数据中心带宽容量进行归一化, 并使用如下修正之后的排序指标:

$$\bar{b}_i = \frac{\sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) d_i^l}{\sum_{l \in M_i} (d_i^l / B_l)} \quad (7)$$

可以将等式(6)和等式(7)中的排序指标拓展到更普适的形式:

$$\bar{b}_i = \frac{\sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) d_i^l}{\left(\sum_{l \in M_i} (d_i^l)^x \right)^{1/y}}, \quad \forall x \geq 1, y \geq 1 \quad (8)$$

$$\bar{b}_i = \frac{\sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) d_i^l}{\left(\sum_{l \in M_i} (d_i^l / B_l)^x \right)^{1/y}}, \quad \forall x \geq 1, y \geq 1 \quad (9)$$

SPAR-APX 机制采用的是等式(8)中的排序方式,并且将参数 x 和 y 分别设为 1 和 2,也就是

$$\bar{b}_i \triangleq \frac{\sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) d_i^l}{\sqrt{D_i}} \quad (10)$$

我们将在下面的分析中证明选择该排序指标能够达到所有贪心排序算法的最好近似比。

SPAR-APX 机制将用户根据该排序指标以非递减的顺序进行排序:

$$\beta: \bar{b}_1 \geq \bar{b}_2 \geq \dots \geq \bar{b}_n.$$

SPAR-APX 机制采用和报价无关的规则来打破排序指标相等的情况,并依据序列 β 依次查看每个用户 i 的带宽请求是否能被剩余的带宽资源满足。如果还拥有足够的带宽资源,那么机制 SPAR-APX 就将用户 i 添加到获胜买家集合,并分配给用户 i 的需求带宽。如果没有足够的带宽,SPAR-APX 机制就忽略用户 i ,继续检查下一个用户。算法 1 展示了上面所描述的带宽资源分配的过程。

算法 1. SPAR-APX 机制贪心带宽分配方案。

输入: 数据中心集合 M , 带宽容量向量 B , 单位带宽开销 c , 云带宽用户集合 N , 投标价格向量 b , 带宽需求向量 d , 感兴趣数据中心向量 M

输出: 获胜云带宽用户集合 W , 带宽分配矩阵 A

$W \leftarrow \emptyset; A \leftarrow 0^{n,m};$

FORALL $i \in N$

$$\bar{b}_i = \left(\sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) d_i^l \right) / \sqrt{D_i};$$

ENDFOR

对 $\bar{b}_i, i \in N$ 以非递增的顺序进行排序 $\beta': \bar{b}'_1 \geq \bar{b}'_2 \geq \dots \geq \bar{b}'_n;$

FOR $i=1$ to n

IF $d_i^l \leq B_l, \forall l \in M_i$

$W \leftarrow W \cup \{i\};$

FORALL $l \in M_i$

$a_i^l \leftarrow d_i^l; B_l \leftarrow B_l - d_i^l;$

ENDFOR

ENDIF

ENDFOR

RETURN 集合 W 和集合 A ;

(3) 带宽收费机制。收费机制的计算是基于临界竞争者(Critical Competitor)。我们将这个概念定义如下。

定义 5. 临界竞争者(Critical Competitor)云带宽用户 $i \in W$ 的临界竞争者 $cc(i) \in N$ 是在序列 β 中满足如下条件的第一个竞争者: 给定排除 $i \in W$ 的剩余云带宽用户 $N \setminus \{i\}$, 如果带宽分配算法(也就是算法 2)选中了该竞争者, 那么云带宽用户 $i \in W$ 就不能被分配到带宽资源。

对于用户 i 的收费可以区分如下 3 种不同的情况:

(1) 如果用户 i 在拍卖中失败, 那么其费用是 0;

(2) 如果用户 $i \in W$ 获胜, 并且临界竞争者 $cc(i)$ 不存在, 那么对他的收费同样是 p_0 ;

(3) 如果用户 $i \in W$ 获胜, 并且存在临界竞争者 $cc(i)$, 那么他需要支付的费用 p_i 是其临界报价, 这是用户要在拍卖中获胜必须声称的最小报价。临界报价 p_i 应满足如下两个条件:

$$\frac{\sum_{l \in M_i} (p_i - c_l) \times d_i^l}{\sqrt{D_i}} \geq \bar{b}_{cc(i)} \text{ 和 } p_i \geq p_0.$$

因此, 对获胜用户 i 的收费设定为

$$p_i = \max \left\{ \frac{b_{cc(i)} \sqrt{D_i} + \sum_{l \in M_i} c_l \times d_i^l}{D_i}, p_0 \right\} \quad (11)$$

算法 2 展示了机制 SPAR-APX 的带宽定价规则。首先确定云带宽用户 i 的临界竞争者 j , 并通过等式(11)计算收费价格。

算法 2. SPAR-APX 机制对于获胜用户 $i \in W$ 的收费机制。

输入: 带宽容量向量 B , 带宽需求向量 D , 感兴趣数据中心集合 M , 排序指标 β

输出: 对于获胜用户 i 的收费 p_i

$p_i \leftarrow p_0;$

FOR $j=1$ to n

IF $j \neq i$ and $d_j^l \leq B_l,$

FORALL $l \in M_j$

FOR $l \in M_i$

$B_l \leftarrow B_l - d_j^l;$

ENDFOR

```

IF  $\exists l \in M_i, B_l < d_i^l$ 
   $cc(i) \leftarrow j$ ;
  
$$p_i \leftarrow \max \left\{ \frac{\bar{b}_{cc(i)} \sqrt{D_i} + \sum_{l \in M_i} c_l \times d_i^l}{D_i}, p_0 \right\}$$
;
BREAK;
ENDIF
ENDFOR
ENDFOR
RETURN  $p_i$ ;

```

算法 1 和算法 2 的运行时间都是 $O(mn)$ 。因为算法 2 需要被调用 $O(n)$ 次, 所以机制 SPAR-APX 总时间复杂度是 $O(mn^2)$ 。

接下来, 我们分析 SPAR-APX 机制的防策略性和近似比。

定理 2. SPAR-APX 机制是在三个私有信息维度的防策略性云带宽拍卖机制。

证明. 机制 SPAR-APX 中的带宽分配算法在投标价格这个维度具有单调性, 也就是对于具有更高投标价格的获胜用户仍然能够在拍卖中获胜。由于机制 SPAR-APX 中的收费策略是基于临界价格的, 根据 Myerson 定理^[42], 能够证明在带宽估值这个维度的防策略性。为了避免赘述, 这里略去具体的证明。感兴趣的读者可以参考文章 Myerson 定理的相关证明思路或者会议版文章定理 2 的证明^[40]。

现在证明对于每一个用户来说 $i \in \mathbb{N}$, 提交真实的带宽需求信息 \mathbf{d}_i 是用户的占优策略。在 SPAR-APX 机制中, 云带宽用户并没有动机去欺骗比真实带宽需求更小的需求向量, 因为这样的欺骗行为将会使得用户被分配到的带宽资源不能满足其带宽需求, 从而获得 0 的信道估值。因此, 只需考虑汇报的带宽需求向量 \mathbf{d}'_i 大于真实带宽需求向量 \mathbf{d}_i 。这里我们称一个带宽需求向量 \mathbf{d}'_i 大于另外一个需求向量 \mathbf{d}_i , 记为 $\mathbf{d}'_i > \mathbf{d}_i$, 当向量 \mathbf{d}'_i 中的任何元素都不小于向量 \mathbf{d}_i 中对应的元素, 并且在向量 \mathbf{d}_i 中有一个元素严格大于向量 \mathbf{d}'_i 中对应的元素。由于已经证明真实地揭示带宽估值是占优策略, 在以下的分析中, 可以设置 $b_i = v_i$ 。我们进一步划分为如下两种情况:

(1) 当用户 i 提交真实带宽需求, 他在拍卖中获胜, 并且获得效益 u_i 。假设用户 i 在带宽需求上欺骗, 投标的需求向量为 $\mathbf{d}'_i > \mathbf{d}_i$, 我们将在需求向量 \mathbf{d}'_i 中的总需求表示成 $D'_i = \sum_{l=1}^m d_i^l$ 。进一步考虑如下两种情况:

情况 A. 用户 i 在操纵带宽需求之后仍然在拍卖中获胜。可通过如下等式来计算其收益:

$$u'_i = v_i \times D_i - p'_i \times D'_i$$

$$= v_i \times D_i - \frac{\bar{b}'_{cc(i)} \sqrt{D'_i} + \sum_{l \in M_i} c_l \times d_i^l}{D'_i} \times D'_i \quad (12)$$

汇报更大的带宽需求向量 $\mathbf{d}'_i > \mathbf{d}_i$ 将有可能和具有更高临界报价的临界竞争者产生带宽资源分配上的冲突, 因此 $\bar{b}'_{cc(i)} \geq \bar{b}_{cc(i)}$ 。结合如下两个条件 $D'_i > D_i$ 和 $d_i^l \geq d_i^l$, 对于任意的 $1 \leq l \leq m$, 能够得到如下推导:

$$(4.11) \leq v_i \times D_i - (\bar{b}_{cc(i)} \sqrt{D_i} + \sum_{l \in M_i} c_l \times d_i^l)$$

$$= (v_i - p_i) \times D_i \quad (13)$$

情况 B. 用户 i 欺骗之后在拍卖中失败。这种情况下他的收益是 0, 这肯定不会大于 u_i , 因为我们有 $u_i \geq 0$ 。

(2) 当用户真实地揭示出带宽需求时, 他在拍卖中失败, 获得的收益为 0。在这种情况下, 用户 i 的排序指标小于他的临界竞争者 $cc(i)$ 的排序指标, 也就是 $\bar{b}_i \leq \bar{b}_{cc(i)}$ 。如果用户欺骗完带宽需求之后仍然在拍卖中失败, 那么其收益仍然是 0。因此仅仅需考虑用户 i 在带宽需求上进行欺骗 $\mathbf{d}'_i > \mathbf{d}_i$, 并最终在拍卖中获胜。我们指出在这种情况下, 用户的收益仍然是非正的。

$$u'_i = v_i \times D_i - \frac{\bar{b}'_{cc(i)} \sqrt{D'_i} + \sum_{l \in M_i} c_l \times d_i^l}{D'_i} \times D'_i$$

$$\leq v_i \times D_i - (\bar{b}_{cc(i)} \sqrt{D_i} + \sum_{l \in M_i} c_l \times d_i^l)$$

$$\leq v_i \times D_i - (\bar{b}_i \sqrt{D_i} + \sum_{l \in M_i} c_l \times d_i^l)$$

$$= (v_i - b_i) \times D_i = 0.$$

式中第一个不等式可以从式(13)直接推导得到。第二个不等式来自于 $\bar{b}_i \leq \bar{b}_{cc(i)}$ 。根据在等式(10)中虚拟报价的定义, 我们可以得到最后等式结果。

由以上的讨论, 我们可以得出, 提交真实的带宽需求是每个用户的占优策略。需要指出的是, 这个结果也意味着每个用户 $i \in \mathbb{N}$ 没有动机来操纵感兴趣的数据中心集合 M_i 。用户操纵的感兴趣数据中心集合肯定是真实感兴趣数据中心的超集, 也就是 $M'_i \supset M_i$ 。该操纵行为等价于在需求向量 \mathbf{d}_i 中的对应元素从 0 改变成正数。所以我们可以得出结论: 提交真实感兴趣数据中心集合同样也是每位用户的占优策略。

从以上讨论中,可以证明机制 SPAR-APX 能够防止云带宽用户在三个维度(带宽估值、带宽需求和感兴趣的数据中心集合)上的策略行为.真实地投标这些私有信息是每个用户的占优策略,所以机制 SPAR-APX 满足激励相容的性质(Incentive-Compatibility).

现在证明机制 SPAR-APX 同样能保证个人理性(Individual-Rationality).根据个人理性的定义,每个用户真实地参与拍卖所能获得的收益需要大于不参与拍卖所能获得的收益.假设不参与拍卖所能获得的收益是 0.区分出如下两种情况:

(1) 用户 i 获胜,并且得到收益 $u_i = (v_i - p_i) \times D_i$.进一步考虑两种情况:

情况 A. 用户 i 的临界竞拍者不存在,因此 $p_i = p_0 \leq b_i = v_i$.

情况 B. 用户 i 有一个临界竞拍者 $cc(i)$,并且收费 p_i 并不比 v_i 大.

$$p_i = \frac{\bar{b}_{cc(i)} \sqrt{d_i} + \sum_{l \in M_i} c_l \times d_l^l}{d_i} \leq \frac{\bar{b}_i \sqrt{d_i} + \sum_{l \in M_i} c_l \times d_l^l}{d_i} = b_i = v_i.$$

因此,在这种情况下,用户 i 的效益 u_i 永远是非负的.

(2) 当用户 i 在拍卖中失败,并且获得效益 $u_i = 0$.这种情况下用户的效益也是非负的.

因此,机制 SPAR-APX 也能够达到个人理性的性质.

由于机制 SPAR-APX 满足激励相容和个人理性,可以得出结论机制 SPAR-APX 是防策略性的.

证毕.

我们最后证明机制 SPAR-APX 的近似比.

定理 3. 机制 SPAR-APX 的近似比是 \sqrt{B} ,其中 $B = \sum_{l \in M} B_l$ 是所有数据中心的总带宽.

证明. 用 (\mathbb{W}^*, A^*) 表示最优带宽分配方案,用 (\mathbb{W}, A) 表示机制 SPAR-APX 的带宽分配结果.最优带宽分配方案和机制 SPAR-APX 的分配方案所能达到的社会福利分别是 $\sum_{i \in \mathbb{W}^*} \sum_{l \in M_i} (v_i - c_l) a_i^l$ 和

$\sum_{i \in \mathbb{W}} \sum_{l \in M_i} (v_i - c_l) a_i^l$.不失一般性,可以假设获胜用户

集合 \mathbb{W}^* 和 \mathbb{W} 没有相同的用户.如果用户集合 \mathbb{W}^* 和 \mathbb{W} 具有共同用户,我们可以去除该共同用户,考虑更小的子问题.在该子问题下分析所得的近似比

能够直接得到原问题也满足该近似比.

对于每个用户 $i \in \mathbb{W}$,集合 \mathbb{W}_i^* 表示在集合 \mathbb{W}^* 中满足如下条件的用户:一旦算法 1 在序列 β' 中将带宽分配给用户 i 之后,这些用户都无分配到带宽资源.我们观察到每个用户 $j \in \mathbb{W}_i^*$ 都只能被映射到一个且唯一一个在集合 \mathbb{W} 中的用户.因此,我们有 $\bigcup_{i \in \mathbb{W}} \mathbb{W}_i^* = \mathbb{W}^*$.由于每个 $j \in \mathbb{W}_i^*$ 在排序 β' 中,都出现在用户 i 之后,所以我们有

$$\sum_{l \in M_j} (v_j - c_l) d_j^l \leq \frac{\sqrt{d_j} \sum_{l \in M_i} (v_i - c_l) d_i^l}{\sqrt{d_i}}.$$

将所有的 $j \in \mathbb{W}_i^*$ 累加,能够得到

$$\sum_{j \in \mathbb{W}_i^*} \sum_{l \in M_j} (v_j - c_l) d_j^l \leq \frac{\sum_{l \in M_i} (v_i - c_l) d_i^l}{\sqrt{d_i}} \sum_{j \in \mathbb{W}_i^*} \sqrt{d_j}.$$

使用柯西-施瓦茨不等式(Cauchy-Schwarz Inequality),能够得到

$$\sum_{j \in \mathbb{W}_i^*} \sqrt{d_j} \leq \sqrt{|\mathbb{W}_i^*|} \sqrt{\sum_{j \in \mathbb{W}_i^*} d_j} \leq \sqrt{|\mathbb{W}_i^*|} \sqrt{B} \quad (14)$$

最后一个不等式来自于所有分配给集合 $\mathbb{W}_i^* \subseteq \mathbb{W}^*$ 中用户的带宽总和肯定小于总带宽 B .根据集合 \mathbb{W}_i^* 的定义,能够得到对于每一个用户 $j \in \mathbb{W}_i^*$,至少存在一个数据中心 $l \in M$ 使得如下不等式成立

$$\sum_{k \in \beta_i} d_k^l + d_i^l \leq B_l \text{ 和 } \sum_{k \in \beta_i} d_k^l + d_i^l > B_l \quad (15)$$

其中 β_i 表示在序列 β 中且在用户 i 之前的用户集合.由于带宽的需求 d_i^l 至少是 1,因此总共最多会有 d_i 个这种类型的不等式.此外,集合 \mathbb{W}_i^* 的大小最多是 d_i ,也就是 $|\mathbb{W}_i^*| \leq d_i$.将不等式(14)和(15)结合起来,能够得到

$$\sum_{j \in \mathbb{W}_i^*} \sum_{l \in M_j} (v_j - c_l) d_j^l \leq \sum_{l \in M_i} (v_i - c_l) d_i^l \sqrt{B}.$$

由于有 $\mathbb{W}^* = \bigcup_{i \in \mathbb{W}} \mathbb{W}_i^*$,最终能够得到

$$\sum_{j \in \mathbb{W}^*} \sum_{l \in M_j} (v_j - c_l) d_j^l \leq \sqrt{B} \sum_{i \in \mathbb{W}} \sum_{l \in M_i} (v_i - c_l) d_i^l.$$

因此机制 SPAR-APX 的近似比是 \sqrt{B} .证毕.

以下定理描述了在该带宽需求模型下任何基于贪心策略分配算法的性能下界.

定理 4. 在严格带宽需求模型下,不存在多项式的贪心算法能够保证近似比优于 \sqrt{B} .

证明. 我们构造如下两组实例,使得任何贪心算法都只能得到 \sqrt{B} 的近似比,也就是任何贪心算

法对于其中某个实例只能得到 \sqrt{B} 的近似。

(1) 在第一组实例中, 有 $B+1$ 个云用户:

第一个用户 i_1 请求所有数据中心中的所有带宽, 也就是对于所有的 $l \in \mathbb{M}$, 我们有 $d_{i_1}^l = B_l$, 并且其带宽估值为 $v_{i_1} = \sqrt{B}$ 。

其余的 B 个用户为单位带宽需求用户。我们定义单位带宽需求用户为只请求 1 单位带宽, 并且带宽估值为 1 的用户, 也就是其带宽请求和估值分别是 $v_i = 1$ 和 $d_i^l = 1$ 对于某个数据中心 $l \in \mathbb{M}$ 。对于其他的 B 个用户, 我们为每个数据中心 $l \in \mathbb{M}$ 匹配 B_l 个单位带宽需求用户。

(2) 在第二组实例中, 我们引入两类带宽用户:

第一类用户和实例 1 中的用户 i_1 一致。

第二类用户 i_2 满足某种特定性质的单位带宽需求用户。该性质是在所有可能的单位带宽用户中被贪心算法所赋予排位最高的用户。

如果用户 i_1 在贪心算法中的排位高于用户 i_2 的排位, 那么在第一个实例中, 贪心算法所得到的社会福利是 \sqrt{B} , 但是最优的社会福利是 B , 因此贪心算法所得到 \sqrt{B} 近似。如果用户 i_2 的排位高于用户 i_1 , 那么在第二个实例中, 贪心算法所得到的社会福利是 1, 而最优社会福利是 \sqrt{B} , 同样获得 \sqrt{B} 的近似比。因此, 对于我们所构造的两组实例, 任意的贪心算法都不可能得到比 \sqrt{B} 更好的近似比。证毕。

在机制 SPAR-APX 中所选取的排序准则是最好的贪心策略准则, 所达到的上界和在定理 4 中所得到的下界是符合的。如果采用其他的近似算法设计技巧, 可以进一步提高算法近似比, 比如采用 Primal-Dual 技术。然而 Primal-Dual 算法过于复杂, 无法在实际系统中使用, 并且很难给云带宽用户讲解算法背后原理。相比之下, 贪心算法在实际的大型系统中可以取得更好的效果, 也更容易部署, 比如在线广告拍卖中的普适第二价格拍卖 (General Second Price (GSP) Auction)。基于这些考虑, 我们更倾向于采用简洁的贪心排序机制来设计云带宽交易市场。

4.3 贪心分配下的云带宽拍卖 (SPAR-GDY)

在本小节中, 我们考虑云带宽市场中另外一个普适的带宽需求模型。在一些情况下, 云带宽用户并不会对感兴趣的数据中心有进一步的偏好, 仅仅要求所有数据中心预留的带宽总和达到一定的带宽数量。可以将该带宽需求模型下的最大化社会福利

问题建模成如下线性规划 $\mathcal{LP-II}$ 。

$$\begin{aligned} \text{最大化} \quad & SW = \sum_{i \in \mathbb{N}} \sum_{l \in M_i} (b_i - c_l) a_i^l \\ \text{限制条件} \quad & \sum_{i \in \mathbb{N}, l \in M_i} a_i^l \leq B_l, \quad \forall l \in \mathbb{M}, \\ & \sum_{l \in M_i} a_i^l = D_i, \quad \forall i \in \mathbb{N}, a_i^l \geq 0, \\ & a_i^l \geq 0, \quad \forall i \in \mathbb{N}, \forall l \in M_i \end{aligned} \quad (16)$$

如果线性规划 $\mathcal{LP-II}$ 具有可行解, 也就是云带宽提供商有足够的带宽资源能够满足所有云带宽用户的需求, 那么可以简单的对每个用户收取费用 p_0 。如果没有足够的带宽, 该问题可以建模成二元规划问题, 我们将限制条件 (16) 用以下两个限制条件代替。

$$\begin{aligned} \sum_{l \in M_i} a_i^l &= x_i D_i, \quad \forall i \in \mathbb{N}, \\ x_i &\in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

在上述二元规划中, 云带宽服务提供商不仅需要确定获胜云带宽用户集合 (通过决策变量 x_i), 还需要决定给获胜用户在每个数据中心预留的带宽资源数量 (通过决策变量 a_i^l)。背包模型并不能很好地刻画该二元规划问题, 我们可以将该问题规约到可拆分流最大化问题 (Splittable Flow Maximization)。这个规约是完全的, 当将数据中心的的服务开销归一化为常数或是零, 这两个问题是等价的。由于可拆分流最大化问题是 NP-hard 问题, 因此在灵活的带宽需求模型下, 社会福利最大化问题在多项式时间内无法求得最优解。因此, 我们提出了基于贪心策略的云带宽拍卖机制, 称为 SPAR-GDY, 来求解灵活带宽需求模型下的社会福利最大化问题。

(1) SPAR-GDY 机制设计。和机制 SPAR-APX 相同, 机制 SPAR-GDY 同样也包含两部分: 贪心带宽分配方案和带宽定价策略。

(2) 带宽分配方案。机制 SPAR-GDY 试图将带宽资源分配给能够带来高社会效益的云带宽用户。云带宽用户 i 所能贡献的社会福利决定于带宽分配算法的输出结果, 也就是在每个感兴趣的数据中心所需要预留的带宽资源, 即 a_i^l 。但是这个信息无法提前知道。因此, 我们无法采用 SPAR-APX 机制里的分配方法。我们通过如下排序指标 \hat{b}_i 来预测用户 i 所能贡献的社会效益:

$$\hat{b}_i = \frac{1}{D_i} \times D_i \left[b_i - \frac{\sum_{l \in M_i} c_l B_l}{\sum_{l \in M_i} B_l} \right] = \left[b_i - \frac{\sum_{l \in M_i} c_l B_l}{\sum_{l \in M_i} B_l} \right].$$

这里使用所有感兴趣数据中心服务开销的加权

平均,也就是 $\frac{\sum_{l \in M_i} c_l B_l}{\sum_{l \in M_i} B_l}$,来预测服务云带宽用户 i 所

产生的带宽开销.和机制 SPAR-APX 相同,我们也可以设计其他形式的排序指标,也就是预测的社会福利和带宽需求总和开方根的比值.在之后的分析中会讨论选择这样的排序指标的原因.

在计算完每个云带宽用户的排序指标之后,机制 SPAR-GDY 根据排序指标,以非递增的顺序进行排序: $\beta': \hat{b}'_1 \geq \hat{b}'_2 \geq \dots \geq \hat{b}'_n$.之后,机制 SPAR-GDY 根据序列 β' 来依次检查每个用户 i 的需求是否能被剩下的带宽资源满足.如果现有的带宽资源能够满足用户的需求,那么机制 SPAR-GDY 就将用户 i 选为获胜用户.如果没有足够剩余带宽,那么机制 SPAR-GDY 就忽略用户 i ,考虑下一个用户.最终,SPAR-GDY 机制返回获胜用户集合 \mathbb{W} 和带宽分配方案 A .

(3) 带宽定价策略.定价策略同样是通过寻找临界竞争者(Critical Competitor)来确定.可以分三种情况来讨论对于用户 $i \in \mathbb{N}$ 的收费策略:

情况 A. 如果用户 i 在拍卖中失败,那么他的费用为 0;

情况 B. 如果用户 $i \in \mathbb{W}$ 的临界竞争者 $cc(i)$ 不存在,那么他的带宽费用是 p_0 ;

情况 C. 如果用户 $i \in \mathbb{W}$ 存在一个临界竞争者 $cc(i)$,那么对于用户 i 的费用 p_i 为其临界价格,指的是用户要在拍卖中获胜所应提交的最小报价.这意味着用户 i 的临界价格应该不小于其竞争者的 $cc(i)$ 的报价.有如下两个条件:

$$\left[p_i - \frac{\sum_{l \in M_i} c_l B_l}{\sum_{l \in M_i} B_l} \right] \geq \hat{b}_{cc(i)} \text{ 和 } p_i \geq p_0.$$

对于获胜用户 i 的收费 p_i :

$$p_i = \max \left\{ \hat{b}_{cc(i)} + \frac{\sum_{l \in M_i} c_l B_l}{\sum_{l \in M_i} B_l}, p_0 \right\} \quad (17)$$

机制分析

定理 5. 机制 SPAR-GDY 在带宽估值和带宽需求两个维度上是防策略性带宽拍卖机制.

证明. 我们可以采用和定理 2 中类似的证明技巧来分析在带宽估值这个维度上的防策略性,故

不再重复讨论.

在机制 SPAR-GDY 中,排序指标和用户的带宽需求相互独立.这意味着用户不能通过欺骗带宽需求信息来操纵带宽分配结果.在等式(17)中的收费机制同样也是和带宽需求相互独立.因此,用户无法通过操纵带宽需求来获得额外效益,保证了在带宽需求这个维度上的防策略性. 证毕.

这里强调要满足感兴趣数据中心这个维度防策略性的技术挑战.一个云带宽用户能够通过引入不感兴趣的数据中心集合,来减少带宽使用费用.比如,如果用户所引入的数据中心具有较大的带宽容量,那么在费用等式(17)的第一项,也就是 $\hat{b}_{cc(i)}$ 将有可能为 0.在这种操控行为下,云带宽用户不存在竞争买家.

在最大化社会福利上,机制 SPAR-GDY 无法在所有情况下都有近似比保障,这是由于求解可划分流最大化问题是非常困难的.虽然我们在实验部分会说明机制 SPAR-GDY 在大多数情况下会有较好的性能表现,即所取得的社会福利接近最优社会福利.但是,在某些极端情况下,SPAR-GDY 机制将会有任意差的近似比,也即机制 SPAR-GDY 所得到的社会福利远小于最优社会福利.现实中极端例子的出现概率很小,从我们实验结果中可以看出在平均情况下 SPAR-GDY 机制会有较好的性能保证.但是,近似算法的分析思想是要保证算法在任意情况下都有性能保证,而不是平均情况,或者大多数情况.因此,我们构造一个简单的例子来说明特殊情况下 SPAR-GDY 无法保证系统性能.在该例子中有两个数据中心 $\mathbb{M} = \{1, 2\}$,带宽容量为 $(B_1, B_2) = (B, 100B)$,带宽服务成本为 $(c_1, c_2) = (1, 100)$.有两个带宽用户 $\mathbb{N} = \{1, 2\}$,拥有的带宽单位估值为 $(v_1, v_2) = (2, 100)$,带宽需求为 $(d_1, d_2) = (B, B)$,感兴趣的数据中心集合为 $(M_1, M_2) = (\{1\}, \{1, 2\})$.最优带宽分配方案应该是把数据中心 1 中的所有带宽分配给用户 2,达到最大社会效益 $(v_2 - c_1)B = 99B$.然而,机制 SPAR-GDY 是将数据中心 1 中的带宽分配给用户 1,将数据中心 2 的带宽分配给用户 2,并且达到社会福利 $(v_1 - c_1)B + (v_2 - c_2)B = B$.最优的社会福利和机制 SPAR-GDY 所得到社会福利的比值是 $\frac{v_2 - c_1}{v_1 - c_1}$.该比值可以是任意大的,在我们的例子中,该比值为 99,如果 v_2 取 10^5 , B_2 取 10^5 , c_2 也取 10^5 ,那么分配结果不变,但是近似比的比值变为 $10^5 - 1$,也即我们能够通过选取不同的 v_2, B_2

和 c_2 来使得机制 SPAR-GDY 所能得到的社会福利远小于最优社会福利, 说明了机制 SPAR-GDY 在某些特殊情况下将会得到任意大的近似比, 没有性能保证. 该例子进一步说明了要在灵活带宽需求模型下设计近似算法具有较大的挑战. 与 SPAR-GDY 机制不同, 在严格带宽需求模型下, SPAR-APX 机制具有近似比保证, 因此, SPAR-APX 机制所能得到的社会福利在任何情况下都能够一定程度上接近最优社会福利. 我们未来的工作是进一步改进 SPAR-GDY 机制, 为灵活带宽需求模型设计具有性能保证的近似算法.

4.4 混合需求模型下的云带宽拍卖

在实际带宽市场中, 可能同时出现三种带宽需求模型: 有些用户符合区间带宽需求模型, 有些用户将提出严格带宽需求, 另外一些用户的带宽需求可能是灵活的. 在混合需求模型下的带宽分配问题变得更加困难. 如之前所述, 灵活需求模型下的带宽分配问题可以转化为可划分流的最大化问题, 该问题还没有有效的近似算法. 如果在添加其他带宽需求模型, 将使带宽分配问题变得更加复杂. 即使混合模型中只有区间需求模型和严格需求模型, 设计高效的近似算法也是非常复杂的. 在混合带宽需求模型下, 每个模型各有特点, 我们很难设计统一的算法来达到较好的性能. 单独运行 SPAR-VCG 或者 SPAR-APX 机制将无法得到相应的结果. 设计符合混合带宽需求模型的带宽分配机制是我们未来的研究方向. 这里, 我们简略地介绍一种简便的方法: 在实际中, 我们可以引入用户优先级的概念, 将带宽混合需求模型下的带宽分配问题解耦为三个经典需求模型下的带宽分配问题. 例如, 我们可以对分配带宽没有严格需求的用户(即区间需求模型用户)赋予最低优先级, 对于具有严格带宽需求的用户可以赋予最高优先级, 而符合灵活需求模型的用户赋予中间优先级. 该优先级分配符合实际中用户的带宽需求紧迫程度. 针对三种不同优先级的用户我们分别采用 SPAR-APX 机制、SPAR-GDY 机制和 SPAR-VCG 机制来依次进行带宽分配.

5 实验仿真结果

我们实现了机制 SPAR, 并通过网络仿真的方法衡量了该机制性能. 所采用的实验平台是标准的台式机, 配备了 Intel(R) 的 i5 3.10 GHz 内核, 操作系统为 64 位 Ubuntu 14.04 Linux 操作系统. 在本

小节展示实验仿真结果.

实验方法论

首先介绍实验设置. 数据中心的单位带宽成本在区间 $(0, 1]$ 上均匀分布的, 云带宽用户的单位带宽估值在区间 $(1, 2]$ 上均匀分布, 这保证了对于带宽资源的估值总大于带宽成本. 每个用户的带宽需求范围从 0 到 1. 我们假设每个数据中心的带宽容量是区间 $(1, 10]$ 的随机数. 每个云带宽用户随机选取不超过总数据中心数目三分之一作为他感兴趣的数据中心集合, 并且将其带宽需求随机地分散在这些感兴趣的数据中心上. 由于数据延迟是选择数据中心的关键指标, 考虑到位于同一物理区域(region)的数据中心提供相同时延的数据传输, 故在实验中, 依据现今云服务平台物理数据中心区域的数量, 我们将数据中心的数目设定为 5 和 15. 现实中云服务提供商的物理数据中心区域(Region)也基本是这个数量级, 比如亚马逊的云平台 AWS 在全球总共有 18 个物理区域^①, Google 的 GCP 云平台有 17 个物理区域^②, 微软的 Azure 平台在全球有 54 个区域^③. 我们衡量了 SPAR 机制在不同的带宽用户数量上的性能. 我们假设带宽用户的数量以 20 的增长幅度从 20 变化到 300. 最终实验结果是 1000 次实验结果的平均^④.

我们将 SPAR 机制和最优机制, 还有纳什均衡下的机制进行对比. 由于 SPAR-APX 机制和 SPAR-GDY 机制下的社会福利最大化问题无法高效地求得最优解, 只能在较小问题规模下, 使用暴力方法求得最优解. 我们用最佳反馈(Best Response)技术来计算纳什均衡下的性能. 在实验结果图中, 我们用符号“5 Datacenter”, “5 Datacenter(NE)”和“5 Datacenter(OPT)”来分别表示在数据中心数目为 5 时, SPAR 机制, 纳什均衡机制和最优机制所达到的性能. 符号“15 Datacenter”, “15 Datacenter(NE)”, “15 Datacenter(OPT)”表达类似的含义, 只是数据中心数目增加为 15.

我们采用以下 3 个指标来衡量机制 SPAR 的性能.

- ① 亚马逊云数据中心全球位置分布: <https://aws.amazon.com/about-aws/global-infrastructure/>.
- ② Google 云数据中心全球位置分布: <https://cloud.google.com/about/>.
- ③ 微软云数据中心全球位置分布: <https://azure.microsoft.com/en-us/global-infrastructure/regions/>.
- ④ 我们的实验参数, 包括数据中心的数目和用户数量等也可以取不同的数值. 在不同的实验参数设定下, 我们能够得到的实验结果具有类似的趋势, 揭示了相同的实验规律. 因此, 我们这里仅展示这些特定参数下的实验结果来说明我们机制的性能.

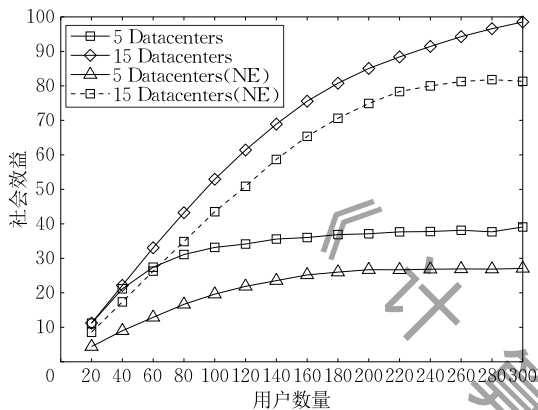
(1) 社会福利. 社会福利是所有获胜用户的估值价格总和与被分配带宽资源的成本之差.

(2) 用户满意度. 用户满意度指市场中被分配到带宽资源的用户比例.

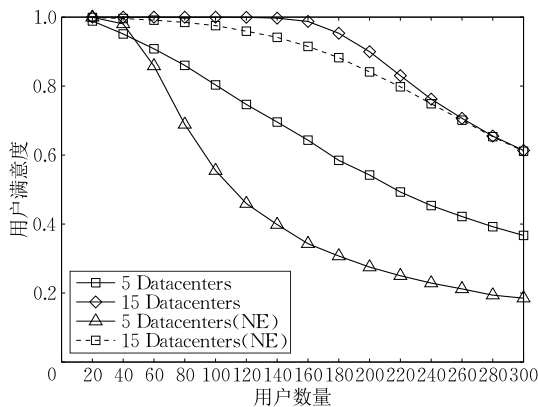
(3) 带宽利用率. 带宽资源利用率指被分配的带宽资源和总带宽资源比例.

机制 SPAR 的性能

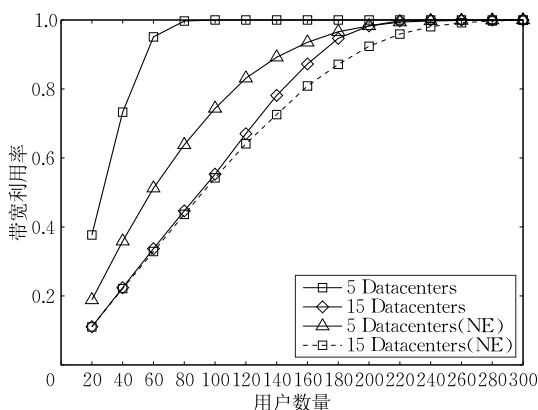
在图 1 中,我们展示了当数据中心的数目为 5 和 15 时,SPAR-VCG 机制的社会效益、用户满意度



(a) 社会效益



(b) 用户满意度



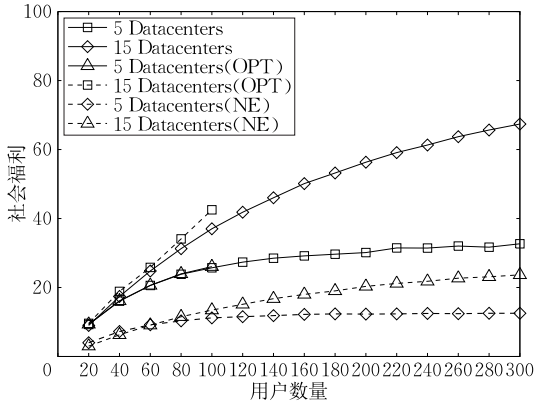
(c) 带宽利用率

图 1 机制 SPAR-VCG 的性能

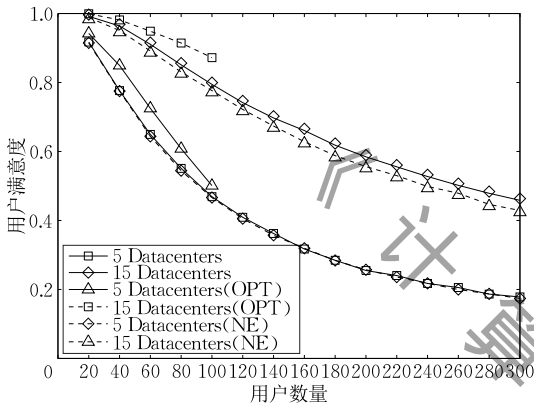
和带宽利用率这三个维度的系统性能随着用户人数的改变. 可以看到随着用户数目的增加, 社会福利和带宽利用率也随着增加, 但用户满意度却下降. 这是因为当市场中有更多用户时, 更多的带宽资源将会被出售. 这意味着会有更高的带宽利用率(带宽总量是固定的). 由于带宽估值总大于带宽成本, 因此更多的分配带宽将会获得更大社会效益. 用户满意度的降低是因为随着用户数量的增加, 用户之间的竞争变得更激烈. 给定固定数量的用户, 当数据中心数目变大时, 社会效益和用户满意度也会变大, 但是带宽的利用率将会变小. 更多的数据中心意味着更多带宽资源供给, 固定数目的用户意味着固定的带宽资源需求. 因此更多的带宽将被分配, 增加社会效益和用户满意度. 当具有更大带宽资源供给时, 带宽资源的利用率将会变得更低. 因为带宽资源被分配的数量小于带宽资源供给增加的数量.

在图 2 中, 我们绘制了机制 SPAR-APX 所获得的社会福利、用户满意度和带宽资源利用率三个指标. 和机制 SPAR-VCG 类似, 在给定固定数量数据中心时, 社会福利和带宽资源的利用率同样是随着云带宽用户数量的增加而增加, 但是用户满意度却下降. 当云带宽用户的数量固定时, 社会福利和用户满意度随着数据中心数目的增加而增加, 但带宽利用率却降低. 这三个指标变化趋势的原因和机制 SPAR-VCG 的变化原因类似. 正如图 2 所示, 还能够观察到机制 SPAR-APX 在三个维度的性能都接近最优解性能. 比如, 从图 2(a) 中, 能够看到当数据中心数量被固定在 15 时, 机制 SPAR-APX 在所有情况下都能获得至少 89.03% 的最优社会福利. 这表示机制 SPAR-APX 在实际中表现出了良好的性能, 只是在某些极端条件下会有性能下降. 将机制 SPAR-APX 的实验结果(图 2)和机制 SPAR-VCG 的实验结果进行比较(图 1), 能够观察到机制 SPAR-APX 的社会福利远小于机制 SPAR-VCG 的社会福利. 机制 SPAR-APX 的用户满意度很快降到 1 以下, 且无法达到 1, 即使当云带宽用户足够大时. 造成这种性能下降的原因是, 在机制 SPAR-APX 中采用了更严格的带宽需求模型, 这些带宽需求将更难被满足, 导致了市场中有更少的带宽资源会被分配出去.

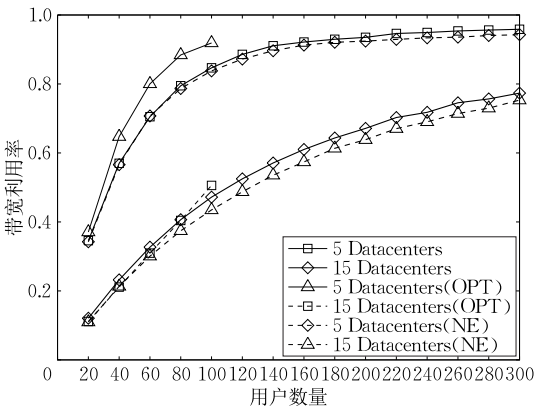
图 3 展示了机制 SPAR-GDY 所能达到的系统性能随用户数量变化的曲线. 同样可以观察到机制 SPAR-GDY 的三个系统性能指标和之前的机制具有相同趋势. 机制 SPAR-GDY 所能达到的社会



(a) 社会福利

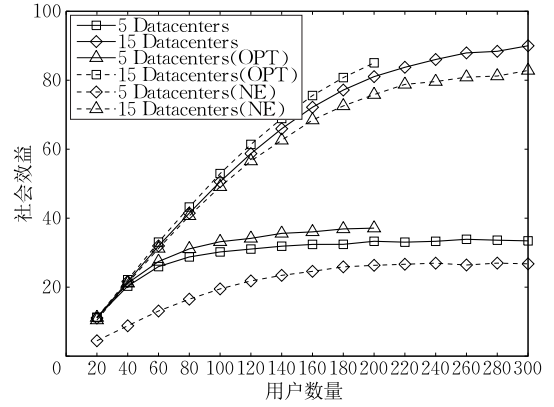


(b) 用户满意度

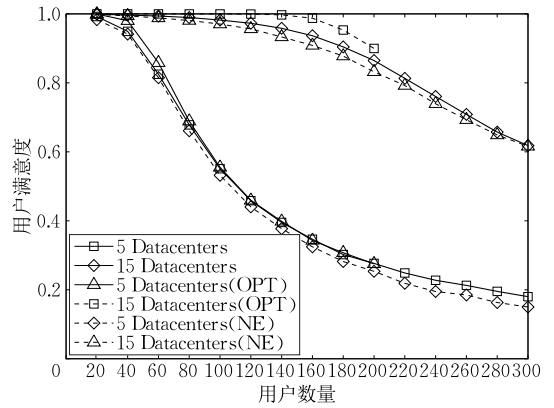


(c) 带宽利用率

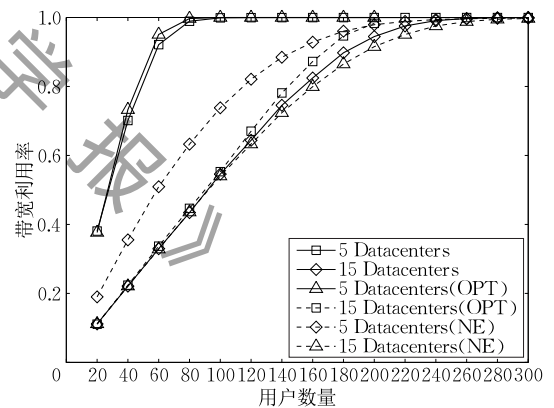
图 2 机制 SPAR-APX 的性能



(a) 社会福利



(b) 用户满意度



(c) 带宽利用率

图 3 机制 SPAR-GDY 的性能

福利接近最优社会福利,特别是当用户数目较小时.当数据中心数目固定在 15,机制 SPAR-GDY 能够达到最优社会福利的 93.58%.这表明机制 SPAR-GDY 只是在某些极端情况下才会有较差的系统性能.和机制 SPAR-APX 相比,机制 SPAR-GDY 达到了更好的性能,这是因为该机制考虑的是灵活带宽需求模型.在机制 SPAR-GDY 中的云带宽用户对于来自他感兴趣的数据中心的带宽资源并没有区

分,这使得云带宽提供商能够将带宽资源分配给更多的云带宽用户,进而获得更高系统性能.正如图 3 所展示,灵活的带宽需求模型还能获得更高的带宽资源利用率.当云带宽用户的数量多于 60,数据中心的数目被固定在 5 的时候,带宽资源的利用率接近 1.从图 1、图 2 和图 3 中,我们能够看到机制 SPAR 在社会福利、用户满意度和带宽资源利用率上都优于基于纳什均衡的机制.

6 总结与展望

在本论文中,我们重点研究了云带宽资源的动态分配,运用拍卖理论来设计云带宽定价机制,以最大化资源分配的社会效益,提高云带宽资源利用率。我们首先提炼出设计合理、贴近实际的云带宽拍卖机制所应考虑三点设计难点:理性用户的策略行为、云带宽需求多样性和最优社会效益求解的复杂性。考虑了三种不同的云带宽需求模型,区间需求模型(用户愿意支付部分满足的带宽资源)、严格需求模型(用户对每个数据中心有严格的带宽需求)和灵活需求模型(用户对总带宽有严格的要求,对每个数据中心的分配带宽无具体要求)。基于传统的 VCG 机制,提出了防策略性和能达到最优社会福利的 SPAR-VCG 机制来解决区间需求模型下的云带宽分配问题。对于严格需求模型,提出了 SPAR-APX 机制来防范用户在高维度私有信息上的操纵行为,并达到近似最优社会福利。对于灵活需求模型,基于贪心策略设计了 SPAR-GDY 机制,保证在带宽估值和带宽需求两个维度上的防策略,并在大多数情况下都能达到较好的社会效益。我们还分析了在灵活需求模型上要达到三个维度的防策略性和近似最优社会效益的困难之处。仿真实验结果表明,SPAR 机制在社会福利、用户满意度和云带宽资源利用率等指标上,相对于以往的工作能达到更优的性能。

在云带宽拍卖设计中最重要的目标仍然是防止用户复杂的策略行为。在未来的研究中,我们将探讨在灵活的云带宽需求模型下,如何设计既能保证多个维度私有信息的防策略性,又能实现近似最优社会福利的带宽分配算法。本论文讨论的云带宽市场只限于单个云带宽服务商,在实际市场中可能同时存在多个云带宽服务商,需要考虑双边云带宽拍卖(Double Auction)机制设计,来刻画多个云带宽提供商之间的竞争关系,并综合考虑市场的供给和需求。

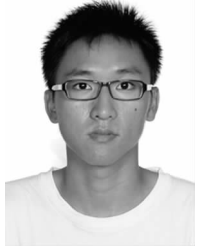
参 考 文 献

- [1] Adhikari V K, Guo Y, Hao F, et al. Unreeling Netflix: Understanding and improving multi-CDN movie delivery//Proceedings of the 31st Annual IEEE International Conference on Computer Communications(INFOCOM). Orlando, USA, 2012: 1620-1628
- [2] Ballani H, Costa P, Karagiannis T, et al. Towards predictable datacenter networks//Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM). Toronto, Canada, 2011: 242-253
- [3] Guo C, Lu G, Wang H J, et al. SecondNet: A data center network virtualization architecture with bandwidth guarantees //Proceedings of the 6th International Conference (Co-NEXT). Philadelphia, USA, 2010: 15:1-15:12
- [4] Jalaparti V, Bliznets I, Kandula S, et al. Dynamic pricing and traffic engineering for timely inter-datacenter transfers//Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM). Florianopolis, Brazil, 2016: 73-86
- [5] Branco F. The design of multidimensional auctions. The RAND Journal of Economics, 1997, 28(1): 63-81
- [6] Cai Y, Daskalakis C, Weinberg S M. Optimal multidimensional mechanism design: Reducing revenue to welfare maximization //Proceedings of the 53rd Annual Symposium on Foundations of Computer Science(FOCS). New Brunswick, USA, 2012: 130-139
- [7] Kellerer H, Pferschy U, Pisinger D. Knapsack Problems. New York, USA: Springer, 2004
- [8] Vickrey W. Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders. The Journal of Finance, 1961, 16(1): 8-37
- [9] Clarke E H. Multipart pricing of public goods. Public choice, 1971, 11(1): 17-33
- [10] Groves T. Incentives in teams. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1973, 41(4): 617-631
- [11] Niu D, Feng C, Li B. Pricing cloud bandwidth reservations under demand uncertainty//Proceedings of the Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems(SIGMETRICS). London, UK, 2012: 151-162
- [12] Liu F, Guo J, Huang X, et al. eBA: Efficient bandwidth guarantee under traffic variability in datacenters. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(1): 506-519
- [13] Guo J, Liu F, Huang X, et al. On efficient bandwidth allocation for traffic variability in datacenters//Proceedings of the 33rd Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM). Toronto, Canada, 2014: 1572-1580
- [14] Guo J, Liu F, Lui J C, et al. Fair network bandwidth allocation in IaaS datacenters via a cooperative game approach. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(2): 873-886
- [15] Guo J, Liu F, Tang H, et al. Falloc: Fair network bandwidth allocation in IaaS datacenters via a bargaining game approach//Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP). Goettingen, Germany, 2013: 1-10
- [16] Wang W, Li B, Liang B. Towards optimal capacity segmentation with hybrid cloud pricing//Proceedings of the 33rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Philadelphia, USA, 2012: 425-434

- [17] Wang Q, Ren K, Meng X. When cloud meets eBay: Towards effective pricing for cloud computing//Proceedings of the 31st Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM). Orlando, USA, 2012; 936-944
- [18] Zhou X, Gandhi S, Suri S, et al. Ebay in the sky: Strategy-proof wireless spectrum auctions//Proceedings of the 14th International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). San Francisco, USA, 2008; 2-13
- [19] Zhou X, Zheng H. TRUST: A general framework for truthful double spectrum auctions//Proceedings of the 28th Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Rio de Janeiro, Brazil, 2009; 999-1007
- [20] Kelly F P, Maulloo A K, Tan D K H. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research Society*, 1998, 49(3): 237-252
- [21] Srikant R. The mathematics of Internet congestion control. Cambridge, UK: Birkhauser, 2004
- [22] Acemoglu D, Ozdaglar A, Srikant R. The marginal user principle for resource allocation in wireless networks//Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Nassau, Bahamas, 2004; 1544-1549
- [23] Başar T, Srikant R. Revenue-maximizing pricing and capacity expansion in a many-users regime//Proceedings of the 21st Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). New York, USA, 2002; 294-301
- [24] Başar T, Srikant R. A Stackelberg network game with a large number of followers. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2002, 115(3): 479-490
- [25] Guo J, Liu F, Wang T, et al. Pricing intra-datacenter networks with over-committed bandwidth guarantee//Proceedings of the 2017 USENIX Conference on USENIX Annual Technical Conference (ATC). Santa Clara, USA, 2017; 69-81
- [26] Zheng Z, Srikant R, Chen G. Pricing for revenue maximization in inter-datacenter networks//Proceedings of the 37th Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Honolulu, USA, 2018; 28-36
- [27] Yuan S, Wang J, Zhao X. Real-time bidding for online advertising: Measurement and analysis//Proceedings of the Seventh International Workshop on Data Mining for Online Advertising. Chicago, USA, 2013; 1-8
- [28] Zheng L, Joe-Wong C, Tan C W, et al. How to bid the cloud//Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM). London, UK, 2015; 71-84
- [29] Lam V T, Radhakrishnan S, Pan R, et al. NetShare and stochastic NetShare: Predictable bandwidth allocation for data centers. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 2012, 42(3): 5-11
- [30] Popa L, Yalagandula P, Banerjee S, et al. Practical work-conserving bandwidth guarantees for cloud computing//Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM). Hong Kong, China, 2013; 351-362
- [31] Li L, Liu K, Fu B, et al. Isolating bandwidth guarantees from work conservation in the cloud//Proceedings of the 21st IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC). Messina, Italy, 2016; 926-931
- [32] Hu S, Bai W, Chen K, et al. Providing bandwidth guarantees, work conservation and low latency simultaneously in the cloud//Proceedings of the 35th Annual IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). San Francisco, USA, 2016; 1-9
- [33] Jain S, Kumar A, Mandal S, et al. B4: Experience with a globally-deployed software defined WAN//Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM). Hong Kong, China, 2013; 3-14
- [34] Hong C-Y, Kandula S, Mahajan R, et al. Achieving high utilization with software-driven WAN//Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM). Hong Kong, China, 2013; 15-26
- [35] Zhang H, Jiang H, Li B, et al. A framework for truthful online auctions in cloud computing with heterogeneous user demands. *IEEE Transactions on Computers*, 2016, 65(3): 805-818
- [36] Yi X, Liu F, Li Z, et al. Flexible instance: Meeting deadlines of delay tolerant jobs in the cloud with dynamic pricing//Proceedings of the 36th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Nara, Japan, 2016; 415-424
- [37] Yi X, Liu F, Niu D, et al. Cocoa: Dynamic container-based group buying strategies for cloud computing. *ACM Transactions on Modeling and Performance Evaluation of Computing Systems*, 2017, 2(2): 8;1-8;31
- [38] Wang M, Cui Y, Wang X, et al. Machine learning for networking: Workflow, advances and opportunities. *IEEE Network*, 2018, 32(2): 92-99
- [39] Wang T, Liu F, Xu H. An efficient online algorithm for dynamic SDN controller assignment in data center networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(5): 2788-2801
- [40] Gui Y, Zheng Z, Wu F, et al. SOAR: Strategy-proof auction mechanisms for distributed cloud bandwidth reservation//Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). Macau, China, 2014; 162-166
- [41] Osborne M J, Rubenstein A. *A Course in Game Theory*. London, UK: MIT Press, 1994
- [42] Myerson R B. Optimal auction design. *Mathematics of Operations Research*, 1981, 6(1): 58-73

- [43] Puchinger J, Raidl G R, Pferschy U. The multidimensional knapsack problem: structure and algorithms. *INFORMS Journal on Computing*, 2010, 22(2): 250-265
- [44] Gens G, Levner E. Complexity of approximation algorithms

for combinatorial problems: A survey. *ACM Special Interest Group on Algorithms and Computation Theory (SIGACT) News*, 1980, 12(3): 52-65



ZHENG Zhen-Zhe, born in 1989, Ph. D. His research interests include algorithmic game theory, cloud computing and wireless networking.

WU Fan, born in 1981, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include network economics, wireless networking, mobile computing and privacy preservation.

CHEN Gui-Hai, born in 1963, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include distributed computing, computer networking and parallel computing.

Background

With the growing deployment of globally-distributed applications, inter-datacenter networks are becoming an important resource in cloud computing. Many services rely on low-latency communication and high-throughput data transfers among data centers to improve the quality of experience for their consumers. Bandwidth reservation has been recognized as a value-added service to the cloud provider in recent years, and is becoming an important research topic in resource management of cloud computing. Due to the intensive market demand for cloud bandwidth resources, researchers from both industry and academia have started to design new resource allocation algorithm to enable bandwidth reservation service. Several auction-based cloud bandwidth markets have been proposed to maximize different system objectives, such as social welfare, revenue or the trade-off between them. However, most of existing works fail to consider the strategic behaviors of users or just investigate the single dimensional strategic behavior, which lead to market chaos and performance degeneration.

In this paper, we consider bandwidth reservation trading between a cloud provider and multiple tenants in an open market, and introduce an auction model to strengthen the market, resisting users' strategy behaviors in multiple dimensions. We summarized three design challenges for a practical auction mechanism for cloud bandwidth reservation: strategy-proofness, flexible bandwidth reservation demands, and the difficulty to achieve optimal allocation. By jointly considering these three design challenges, we propose a family of strategy-proof Auction mechanisms for cloud bandwidth reservation, which contains three auctions mechanisms:

SPAR-VCG, SPA-RAPX and SPAR-GDY to support different types of bandwidth demand models. SPAR-VCG is a VCG-based bandwidth auction mechanism for the case that tenants accept partially filled demands, achieving both optimal social welfare and strategy-proofness in polynomial time. When tenants have strict bandwidth demand in each of the data centers, we propose a greedy-based auction mechanism, namely SPAR-APX, to guarantee strategy-proofness and achieve suboptimal social welfare with a good approximation. We further consider a flexible bandwidth demand model, in which tenants have a strict requirement on the total bandwidth reserved from some preferred data centers. In this case, SPAR-GDY can be applied to guarantee strategy-proofness and to achieve good social welfare in most cases. The auction mechanisms proposed in this paper can be used as a starting architecture to build the future cloud bandwidth market. The auction mechanisms can also be applied to allocate other kinds of divisible resources subjecting to specific constraints (e. g. , processor times, memory, and storage space).

We have conducted related research projects about designing different open markets in different network context, such as data centers, spectrum auctions, and mobile crowdsourcing. Our results have been published in top tier journals and conferences, such as *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, *IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC)*, *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, *IEEE INFOCOM*, *ACM MobiHoc*.

This work was supported in part by the State Key Development Program for Basic Research of China (973 Project 2014CB340303).