

移动边缘计算中基于视频内容协作分发的联合激励机制*

刘伟^{1,2,3}, 张涛¹

(1. 武汉理工大学计算机科学与技术学院, 武汉 430070; 2. 交通物联网技术湖北重点实验室, 武汉 430070; 3. 同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 随着智能设备存储和传输能力的提升, 用户可通过设备—设备连接共享视频服务, 在移动边缘网络中实现视频内容协作分发。然而, 现有架构缺少合适的激励机制解决中继传输节点经济收益受损和本地数据泄露问题。针对视频内容边缘协作分发系统存在的问题, 提出适用于多码率编码视频的联合安全和经济激励机制, 并对该机制的差分隐私性、近似诚实性和个体理性进行了理论上的证明。最后由实验数据表明, 该机制能有效保护参与用户的个体利益, 提高视频服务总体效益。

关键词: 移动边缘计算; 视频内容协作分发; 激励机制; 差分隐私; 反向拍卖

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2021)09-045-2803-08
doi:10.19734/j.issn.1001-3695.2020.12.0560

Joint incentive mechanism based on video content cooperative delivery in mobile edge computing

Liu Wei^{1,2,3}, Zhang Tao¹

(1. College of Computer Science & Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Key Laboratory of Transportation Internet of Things, Wuhan 430070, China; 3. The Key Laboratory of Embedded System & Service Computing Ministry of Education (Tongji University), Shanghai 201804, China)

Abstract: With the rapid growth of storage and transmission capabilities smart devices, streaming users can share video services through device-to-device (D2D) communications to achieve video content cooperative delivery in mobile edge computing. However, existing architectures lack suitable incentive mechanisms to solve the problem of economic loss and local data leakage of relay transmission nodes. Aiming at the problems existing in video content cooperative delivery system, this paper proposed a joint security and benefit incentive mechanism for multi-bitrate encoding video. And it gave a proof to show that the method satisfied differential privacy, approximate honesty and individual rational. Finally, experimental results show that the mechanism cannot only protect the individual interests of users, but also improve the overall benefits of video services.

Key words: mobile edge computing; video content cooperative delivery; incentive mechanism; differential privacy; reverse auction

0 引言

随着移动通信技术的发展和智能终端的普及应用, 无线流量数据呈指数级增长趋势。思科研究报告显示, 2017—2022年全球互联网流量的年均复合增长率将达到46%, 其中移动视频流量的比重由55%上升至71%^[1]。视频服务的高带宽需求和日益拥挤的无线频谱资源给视频内容分发带来了新的难题。视频内容提供商为实现超清、低延迟的视频服务, 提高用户体验质量, 广泛应用了基于码流自适应技术的视频云分发系统, 在云服务器缓存多个视频码率版本, 并划分为独立的视频片段, 根据智能终端缓冲区或网络状况动态调整分发的视频码率^[2]。

由于云服务器距离终端设备较远, 往往会带来较大的通信延迟, 成为提升视频内容分发系统性能的瓶颈。移动边缘计算的进一步发展, 使得视频内容提供商可将视频数据缓存在距离移动用户更近的位置, 从而降低视频内容分发的传输延迟^[3]。由于边缘服务器的缓存资源有限, 部署于边缘端的视频内容分发系统仅能缓存部分码率版本, 并依靠转码技术实现视频码率

的动态调整。同时边缘计算中用户移动会导致数据传输速率变化, 难以保证视频服务质量的稳定。为解决上述两个问题, 有必要在移动边缘计算网络中促进用户之间的相互协作, 允许将具有较强计算和通信能力的终端设备上移至边缘层, 作为中继传输节点提供视频转码和传输服务, 弥补边缘服务器资源短缺的不足, 构成视频内容边缘协作分发系统。

现有工作研究了无线网络中视频内容协作分发的通用架构, 允许其他智能终端作为视频内容分发路径的中继传输节点, 从云数据中心获取视频内容并基于D2D通信技术传输给目标视频观看用户。考虑到移动边缘计算网络的特性, 上述通用架构不能直接应用于边缘端视频服务中。首先, 相较于安全可靠的云数据中心, 边缘服务器更易遭受外部攻击, 通常假定其处于半可信敌手环境中, 即中继传输节点容易被外部获取本地数据, 面临着隐私数据泄露的风险^[4]。其次, 提供视频转码和传输服务的中继传输节点需要消耗智能终端电量, 导致其经济收益下降。因此面向视频内容边缘协作分发系统中存在的安全和经济问题, 如何提出合适的激励机制促进中继传输节点

收稿日期: 2020-12-15; **修回日期:** 2021-02-08 **基金项目:** 湖北省自然科学基金面上项目(2020CFB749); 同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室开放基金资助项目(ESSCKF2018-05); 计算机体系结构国家重点实验室开放课题(CARCHB202015)

作者简介: 刘伟(1978-), 男, 湖北人, 副教授, 博士, 主要研究方向为云计算与边缘计算(wliu@whut.edu.cn); 张涛(1996-), 男, 河南人, 硕士, 主要研究方向为云计算与边缘计算。

提供视频转码和传输服务,提高视频服务的质量是该系统需要解决的关键问题。

本文研究主要关注由单个边缘服务器和多个配备智能终端的移动用户构成的视频内容边缘协作分发场景,采用联合安全和经济激励机制促进中继传输节点提供计算资源和通信资源,实现视频服务效益最大化。首先假设边缘服务器处于半可信敌手环境,构建基于差分隐私的安全激励机制以实现本地数据隐私性和可用性的平衡;其次为保证中继传输节点的经济收益,构建基于反向拍卖的经济激励机制;最后考虑到中继传输节点本地资源的异构性,需要选择合适的视频内容分发路径和码率,设计基于联合激励机制的视频内容协作分发算法,实现视频服务效益的最大化。

1 相关工作

随着流媒体服务的快速兴起和 D2D 通信技术的日益成熟,当前许多研究基于无线网络场景提出视频内容协作分发策略,以提升视频服务的用户体验质量。文献[5]基于用户异构的视频请求,提出了视频内容协作分发通用架构,并采用 Lyapunov 在线算法优化视频下载和传输决策,有效提高了网络状况较差时用户的观看体验质量。Anis 等人^[6]基于视频的伸缩编码形式,构建了视频协作传输用户组并提出优先度感知的视频分层协作传输策略。文献[7]量化了基于 D2D 通信技术传输的视频服务质量,并提出两跳传输策略优化视频服务总体效益。文献[8]则考虑了 D2D 通信网络中用户的社交属性,基于用户历史通信数据选择合适的视频内容分发协作者。

上述工作均提出有效的协作策略提升视频服务的质量,并降低了视频内容协作分发的成本。但是这些协作策略以消耗智能终端设备的本地资源为前提,存在部分用户经济收益受损的问题,导致其拒绝参与到协作传输架构中。因此许多工作基于用户理性且自私的假设提出合适的经济激励机制,根据视频内容分发场景特征提出不同的经济利益量化模型。一部分工作考虑了中继传输节点的终端能耗成本,文献[9]量化了视频内容协作分发架构的额外能耗成本,并构建基于多维拍卖模型的经济激励机制,保证参与用户在视频传输过程中的个体利益;文献[10]综合考虑用户的视频质量偏好和传输能耗对经济激励机制的影响,基于合作博弈论提出了视频服务定价策略;文献[11]进一步考虑了用户潜在的自私行为导致信息不对称的问题,采用契约理论解决视频内容协作分发者和接收者的最优匹配问题;文献[12]在视频众包网络中为促进边缘端节点主动提供通信和存储资源,基于两阶段博弈策略量化参与用户的经济收益。另一部分工作则考虑了终端本地缓存视频的经济价值,文献[13]提出了基于移动机会网络的视频数据交换模型,根据视频质量和副本数量给出视频数据的定价策略,并设计多用户博弈算法激励用户交换本地视频数据;文献[14]结合考虑了视频质量的经济收益和协作传输用户的社交属性,提出了基于 Stackelberg 博弈的定价策略和经济激励机制。

但是上述激励机制不能直接应用于移动边缘计算网络,一方面是因为上移至边缘层的中继传输节点需要进一步考虑视频转码所消耗的终端本地计算资源成本,另一方面是中继传输节点面临着隐私数据泄露问题。区别于上述研究中诚实可信的视频数据中心,边缘服务器更易遭受外界攻击并导致用户数据泄露,需要采取有效的安全激励机制,保证中继传输节点数据的隐私性。现有应用于移动边缘计算的隐私保护方案主要关注三类方法:

a) 匿名化。将身份信息移除后再将感知数据上报给边缘平台,这种方法的缺点是无法抵抗外界的背景知识攻击^[15]。

b) 同态加密。本地数据可通过同态加密技术生成密钥,

经加密变换后上传至边缘平台,但是该技术需要的计算开销大,并且无法保证数据的计算可用性^[16]。

c) 隐私保护联邦学习框架。通过将训练任务下放到用户侧,仅将训练得到的模型参数发送至边缘端,但缺点同样是无法保证数据的计算可用性^[17]。

因此,现有可应用于边缘计算网络的隐私保护方案在视频内容协作分发系统中均存在一定不足,需要提出本地化轻量级的安全激励机制平衡数据隐私性和计算可用性。综上所述,有必要面向视频内容边缘协作分发系统中参与用户的本地数据泄露和经济收益受损问题,结合视频服务特性设计一种联合安全和经济激励机制,并实现视频服务效益最大化。

2 视频内容边缘协作分发系统模型

本章将构建视频内容边缘协作分发架构的系统模型,并设计最大化视频服务效益的优化目标。如图1所示,视频内容边缘协作分发架构由边缘协作平台、多个中继传输节点和视频观看用户组成。其中边缘服务器存储视频观看用户请求的视频数据,并与微基站组成边缘协作平台收集终端视频请求、地理位置和数据传输速率等信息,决定视频内容分发路径、视频码率以及中继传输节点应获得的协作报酬;中继传输节点可利用智能终端本地资源,作为视频内容分发路径的协作者,接收边缘服务器传输的视频数据并完成视频转码,基于 D2D 通信技术发送至目标视频观看用户,可用集合 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 表示;视频观看用户通过无线链路连接边缘服务器并上传视频请求,根据边缘协作平台的决策信息支付中继传输节点报酬,可用集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示。下面将具体介绍视频内容边缘协作分发系统的组成部分。

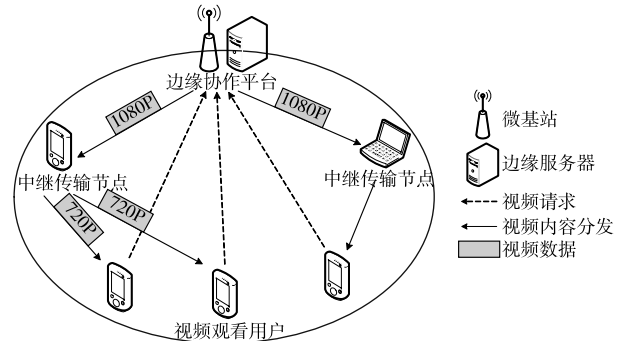


图1 移动边缘计算中视频内容协作分发架构
Fig.1 Video content cooperative delivery architecture in mobile edge computing

a) 视频数据。视频观看用户请求的视频数据存在多种码率版本,且视频码率版本越高,用户观看视频的体验质量越好。码率集合可表示为 $Z_n = \{z_{n,1}, z_{n,2}, \dots, z_{n,r}, \dots, z_{n,R}\}$, 其中 $z_{n,1}$ 表示最低视频码率版本, $z_{n,R}$ 表示最高视频码率版本,依靠转码技术可由高码率视频数据获得低码率版本^[18]。同时视频数据被划分为多个独立且连续的视频片段,每个视频片段时长表示为 l_n 。

b) 边缘协作平台。它由边缘服务器和微基站组成,提供视频服务并作为视频内容边缘协作分发系统的决策者。为提高决策效率,定义视频内容协作分发周期 $\tau = \max(l_n)$, 边缘协作平台在每个周期内收集用户视频请求,并完成一次视频内容协作分发决策。由于边缘服务器的存储空间有限,仅能缓存视频数据的部分码率版本。定义二元变量 $c_{n,r}$ 表示视频数据的缓存状态,当 $c_{n,r} = 1$ 时,表示边缘服务器已缓存视频码率版本 $z_{n,r}$, 否则 $c_{n,r} = 0$ 。假设边缘服务器提供的视频缓存空间为 C , 则视频缓存约束可表示为

$$\sum_{n \in N} \sum_{r \in Z_n} c_{n,r} \times z_{n,r} \times l_n \leq C \quad (1)$$

c) 视频观看用户。假设有多个持有智能终端并观看视频

的移动用户,每个视频内容协作分发周期中,视频观看用户 n 的多码率视频请求可表示为 $D_{n,r} \in D_n$,其中 D_n 表示视频观看用户 n 的请求集合, $D_{n,r} = \{z_{n,r}, p_n\}$ 表示码率版本为 $z_{n,r}$ 的视频请求, $p_n = \{x_n, y_n\}$ 表示视频观看用户的地理位置坐标。

d) 中继传输节点。假设有多个具备计算能力和通信能力的移动终端设备,作为视频内容协作分发的中继传输节点。每个视频内容协作分发周期中,可用 $p_m = \{x_m, y_m\}$ 表示中继传输节点 m 的地理位置坐标, B_m 表示从边缘服务器获取视频数据的传输速率。中继传输节点和视频观看用户通过基于复用模式的 D2D 通信技术发送视频数据,该技术由微基站控制 D2D 通信设备复用其他蜂窝网络用户的无线频谱资源,具备自动连接、干扰可控和频谱资源利用率高的优点^[19]。D2D 通信模式下信道增益 $\sigma_{m,n}$ 服从瑞利分布,可表示为

$$\sigma_{m,n} = d_{m,n}^{-\mu} \sigma_0 = [(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2]^{-\frac{1}{2}\mu} \sigma_0 \quad (2)$$

其中: $d_{m,n}$ 表示中继传输节点 m 和视频观看用户 n 的相对距离; μ 表示信道衰落系数; σ_0 表示高斯信道系数。

根据香农定理,中继传输节点 m 和视频观看用户 n 的 D2D 传输速率可表示为

$$R_{m,n} = B \times \log_2 \left(1 + \frac{P_m \sigma_{m,n}}{N_0 + P_c \sigma_{n,c}} \right) \quad (3)$$

其中: B 表示信道带宽; P_m 和 P_c 分别为中继传输节点 m 和蜂窝上行链路复用用户 c 的终端发射功率; N_0 表示高斯白噪声功率。

由于中继传输节点的计算能力和通信能力存在差别,导致终端设备能耗成本 $v_{m,n,r}$ 和视频分发时长 $t_{m,n,r}$ 不同,需作为选择视频内容分发路径和码率的关键信息上传至边缘协作平台。考虑到外界的背景知识攻击可根据中继传输节点的本地数据,推断出频繁访问的位置、数据传输速率等隐私信息,需要提出合适的激励机制对真实能耗成本 $v_{m,n,r}$ 和视频分发时长 $t_{m,n,r}$ 作隐私化处理得到 $v'_{m,n,r}$ 和 $t'_{m,n,r}$,该机制的具体设计将于 3.1 节作详细介绍。每个视频内容协作分发周期,中继传输节点可完成的最大视频请求数量定义为 λ 。

e) 视频内容协作分发决策。边缘协作平台收集中继传输节点的隐私化信息后,需要根据视频请求作出视频内容协作分发决策,决策信息可表示为 $\{e_{n,r}, h_{m,n,r}, q_{m,n,r}\}$ 。其中,二元变量 $e_{n,r}$ 表示向视频观看用户 n 传输的视频码率,当视频码率版本为 $z_{n,r}$ 时, $e_{n,r} = 1$, 否则 $e_{n,r} = 0$ 。多码率视频请求 D_n 中仅有一个码率请求能被响应,满足:

$$\sum_{z_{n,r} \in Z_n} e_{n,r} = 1 \quad (4)$$

二元变量 $h_{m,n,r}$ 表示视频观看用户 n 的协作者。当 $h_{m,n,r} = 1$, 表示中继传输节点 m 向视频观看用户 n 提供视频转码和传输服务,否则 $h_{m,n,r} = 0$ 。 $q_{m,n,r}$ 表示视频观看用户 n 需要向协作者支付的报酬。当 $h_{m,n,r} = 0$ 时,协作报酬 $q_{m,n,r} = 0$ 。该报酬由基于反向拍卖模型的经济激励机制决定,其中反向拍卖是一种由买家提交请求并发起拍卖,卖家提交投标信息参与竞拍,拍卖商决定优胜者和交易价格的市场资源分配策略,主要用于促进用户间协作的达成,以及最优化资源分配策略的实现,具体基于反向拍卖的经济激励机制设计将于 3.2 节作详细介绍。

f) 视频观看用户效益。本文将视频观看用户 n 的效益 $Q_{n,r}$ 定义为观看视频的体验质量收益 $s_{n,r}$ 与支付的协作报酬 $v_{n,r}$ 之差,即 $Q_{n,r} = s_{n,r} - v_{n,r}$ 。视频观看用户的体验质量收益 $s_{n,r}$ 与视频码率和延迟时间直接相关^[20],可表示为

$$s_{n,r} = e_{n,r} \times \sum_{m \in M} h_{m,n,r} (\theta_n d_{n,r} - \tau_n t_{m,n,r}^{\text{delay}}) \quad (5)$$

其中: θ_n 表示单位视频码率的观看收益; τ_n 表示视频传输延迟单位时间的收益损失; $d_{n,r} = z_{n,r} \times l_n$ 表示完成视频请求 $D_{n,r}$ 传输的数据量; $t_{m,n,r}^{\text{delay}} = t_{m,n,r}^{\text{start}} + t_{m,n,r}$ 表示视频传输延迟时间; $t_{m,n,r}^{\text{start}}$ 表示视频传输的开始时间。

经济激励机制约束下,视频观看用户需要向提供视频分发服务的中继传输节点支付报酬,该报酬 $v_{n,r}$ 可表示为

$$v_{n,r} = e_{n,r} \times \sum_{m \in M} h_{m,n,r} q_{m,n,r} \quad (6)$$

g) 中继传输节点效益。本文将中继传输节点 m 的效益 $Q_{m,n,r}$ 定义为协作报酬收益 $s_{m,n,r}$ 与终端能耗成本 $v_{m,n,r}$ 之差,即 $Q_{m,n,r} = s_{m,n,r} - v_{m,n,r}$ 。其中,协作报酬收益 $s_{m,n,r}$ 可表示为

$$s_{m,n,r} = e_{n,r} h_{m,n,r} q_{m,n,r} \quad (7)$$

终端能耗成本 $v_{m,n,r}$ 由三部分组成。(a) 中继传输节点 m 从边缘服务器下载原始视频数据的能耗成本,传输数据量由边缘服务器已缓存的视频码率决定,下载能耗成本可表示为

$$v_{m,n,r}^{\text{BS}} = e_{n,r} h_{m,n,r} \left(\phi_m^{\text{BS}} d'_{n,r} + \varphi_m^{\text{BS}} \frac{d'_{n,r}}{B_m} \right) \quad (8)$$

其中: ϕ_m^{BS} 表示中继传输节点 m 从边缘服务器下载单位码率视频数据的能耗成本; φ_m^{BS} 表示中继传输节点 m 从边缘服务器下载视频时单位时间的能耗成本; $d'_{n,r}$ 表示边缘服务器已缓存视频的数据量,可表示为

$$d'_{n,r} = \sum_{z_{n,r} \in Z_n} c_{n,r} \times z_{n,r} \times l_n \quad (9)$$

(b) 中继传输节点提供本地计算资源,完成视频转码服务的能耗成本^[21]可表示为

$$v_{m,n,r}^{\text{LC}} = e_{n,r} h_{m,n,r} \psi_m \frac{k_m f_m^2 \left(\sum_{z_{n,r} \in Z_n} (c_{n,r} \times z_{n,r} - e_{n,r} \times z_{n,r}) \right) l_n}{w} \quad (10)$$

其中: f_m 表示中继传输节点 m 的 CPU 频率 (cycle/s); k_m 表示能量转换效率; w 表示单位码率视频转码消耗的计算资源 (cycle/bit); ψ_m 表示单位计算资源的能耗成本。

(c) 中继传输节点基于 D2D 通信技术向目标视频观看用户传输视频的能耗成本可表示为

$$v_{m,n,r}^{\text{D2D}} = e_{n,r} h_{m,n,r} \left(\phi_m^{\text{D2D}} d_{n,r} + \varphi_m^{\text{D2D}} \frac{d_{n,r}}{R_{m,n}} \right) \quad (11)$$

其中: ϕ_m^{D2D} 表示中继传输节点 m 基于 D2D 通信技术传输单位码率视频数据的能耗成本; φ_m^{D2D} 表示中继传输节点 m 基于 D2D 通信技术传输视频时单位时间的能耗成本。

因此终端能耗总成本可表示为 $v_{m,n,r} = v_{m,n,r}^{\text{BS}} + v_{m,n,r}^{\text{LC}} + v_{m,n,r}^{\text{D2D}}$ 。同样地,视频分发时长 $t_{m,n,r}$ 由三部分组成,可表示为

$$t_{m,n,r} = \frac{d'_{n,r}}{B_m} + \frac{\left(\sum_{z_{n,r} \in Z_n} (c_{n,r} \times z_{n,r} - e_{n,r} \times z_{n,r}) \right) w}{f_m} + \frac{d_{n,r}}{R_{m,n}} \quad (12)$$

h) 优化目标。视频内容边缘协作分发系统中,定义优化目标为所有用户的视频服务效益总和最大化,包括视频观看用户和中继传输节点,可表示为

$$\max Q = \sum_{n \in N} \sum_{z_{n,r} \in Z_n} Q_{n,r} + \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{z_{n,r} \in Z_n} Q_{m,n,r} \quad (13)$$

最大化视频服务效益意味着在边缘服务器有限的资源约束下,中继传输节点需要提供充足的计算资源和通信资源,以提高视频服务体验质量,并降低视频内容协作分发的能耗成本。因此本文面向中继传输节点的数据泄露和经济收益受损问题,设计了一种联合安全和经济激励机制,并以最大化视频服务效益为目标作出视频内容协作分发决策。因此该联合激励机制需要基于个体理性约束满足本地化差分隐私和近似诚实性。

i) 约束条件。(a) 本地化差分隐私。差分隐私的思想是对原始数据或者原始数据上的函数、查询结果添加随机噪声,以使在数据集中插入或删除某一条数据记录不会影响输出结果从而实现隐私保护^[22]。本地化差分隐私的形式化定义如下。

定义 1 给定 I 个用户,每个用户对应一条记录,给定一个隐私算法 O 及其定义域 $Dom(O)$ 和值域 $Ran(O)$,若算法 O 在任意两条记录 i 和 $i'(i, i' \in Dom(O))$ 上得到相同的数据结果 i^* ($i^* \in Ran(O)$) 满足式(14),则算法 O 满足 ε -本地化差分隐私。

$$\Pr[O(i) = i^*] \leq \Pr[O(i') = i^*] \times e^\varepsilon \quad (14)$$

其中:非负参数 ε 称为差分隐私损失参数,表示数据隐私化程

度。当 ε 降低时,隐私保护程度提高。通过调整 ε 的取值,可以平衡差分隐私模型中数据隐私性和可用性。

(b) 近似诚实性。反向拍卖机制中,若该机制是诚实的,那么参与拍卖的卖家不能通过虚假报价而提高自身效益,即反向拍卖机制中诚实报价是卖家的占优策略。为保证中继传输节点经济效益不受虚假报价的影响,基于反向拍卖的经济激励机制需要满足诚实性要求^[23]。诚实性的形式化定义如下。

定义2 反向拍卖过程中,投标价格 b_m 是卖家 m 的真实成本,投标价格集合 B_m 是其他卖家的投标价格,那么对于卖家 m 的任一虚假报价 b'_m ($b_m \neq b'_m$),该反向拍卖机制满足诚实性当且仅当式(15)成立。

$$Q_{m,n,r}(b_m, B_m) \geq Q_{m,n,r}(b'_m, B_m) \quad (15)$$

反向拍卖机制中,精准的诚实性要求十分严格,因此往往采用近似诚实性衡量反向拍卖的有效性。反向拍卖机制满足近似真实性当且仅当:

$$Q_{m,n,r}(b_m, B_m) \geq Q_{m,n,r}(b'_m, B_m) - \gamma \quad (16)$$

其中: γ 是一个很小的正实数,表示卖家 m 投标虚假报价时取得额外收益的上限。因此近似假定反向拍卖过程中,每个卖家上传的投标价格等于终端能耗成本,即 $b_{m,n,r} = v_{m,n,r}$ 。

(c) 个体理性。视频内容边缘协作分发系统中,基于个体理性且自私的假设,若中继传输节点的数据泄露或经济效益受损,将拒绝提供充足的计算资源和通信资源^[24]。因此本文联合安全和经济激励机制提出了个体理性约束:

$$(1 - \beta_m) \times q_{m,n,r} - v_{m,n,r} \geq 0 \quad (17)$$

其中: β_m 表示中继传输节点 m 的隐私泄露度,其取决于安全激励机制的隐私保护策略;协作报酬 $q_{m,n,r}$ 取决于经济激励机制的反向拍卖模型设计。

3 联合安全和经济激励机制设计

本章将给出视频内容边缘协作分发系统中联合安全和经济激励机制的详细设计,用于促进中继传输节点提供充足的通信资源和计算资源,并以最大化视频服务效益为目标提出视频内容协作分发算法。

3.1 基于差分隐私的安全激励机制

视频内容边缘协作分发系统中,为解决中继传输节点上传的终端能耗成本 $v_{m,n,r}$ 和视频分发时长 $t_{m,n,r}$ 信息导致本地数据泄露的问题,本节提出基于差分隐私的安全激励机制,实现本地数据隐私性和可用性的平衡。

由于视频码率信息是离散且数量有限的,可采用指数机制建立差分隐私模型。指数机制基于中心化差分隐私的思想,对于给定的数据集 D ,构建得分函数 q 对输出域 R 中每一个输出值 r 确定分值,输出任一输出值 r 的概率与分值成指数比^[25]。指数机制的形式化定义可以表示为

定义3 指数机制,给定得分函数 $q: (D, r) \rightarrow R$,如果算法 M 满足式(18),则算法 M 满足 ε -差分隐私。

$$M(D, q) = \{r: |Pr[r \in R] \propto \exp \frac{\varepsilon q(D, r)}{2\Delta q}\} \quad (18)$$

其中:得分函数 q 定义输出域中数据的分值; Δq 表示得分函数的全局敏感度,约束数据模糊的最大偏差。基于指数机制的差分隐私模型在决策平台处于半可信敌手环境时,可通过代理商匿名上传真实信息并获取全局敏感度,满足本地化差分隐私的要求^[26]。

由于视频数据存在多个码率版本,中继传输节点上传至边缘服务器的数据属于包含视频码率版本及对应终端能耗的多维信息,所以所有中继传输节点的能耗成本数据集存在多维全局敏感度 Δv^{multil} 和单维全局敏感度 Δv^{single} 。多维全局敏感度 $\Delta v^{multil} = \max(v_{m,n,R}) - \min(v_{m,n,R})$,表示对于视频请求 D_n ,所有

中继传输节点终端能耗成本最大值与最小值之差。基于多维全局敏感度的指数机制将添加更多的噪声,并导致数据可用性下降,视频服务总体效益较低。单维全局敏感度 $\Delta v^{single} = \max(v_{m,n,r}) - \min(v_{m,n,r})$,表示对于视频请求 $D_n, r \in D_n$,所有中继传输节点终端能耗成本最大值与最小值之差。单维全局敏感度通常比全局敏感度要小,基于单维全局敏感度的指数机制数据可用性高,但可添加的噪声小,数据隐私化程度低。为平衡中继传输节点数据的隐私性和可用性,本节提出一种基于多维码率的全局敏感度 Δv ,可表示为

$$\Delta v = \max(v_{m,n,r}, \min(v_{m,n,r+1})) - \min(v_{m,n,r}, \max(v_{m,n,r-1})) \quad (19)$$

其中: $\min(v_{m,n,r+1})$ 表示对于视频请求 $D_{n,r+1}$,中继传输节点上传的终端能耗成本最小值; $\max(v_{m,n,r-1})$ 表示对于视频请求 $D_{n,r-1}$,中继传输节点上传的终端能耗成本最大值。

为保证指数机制模糊化函数的有效性,得分函数 $q(v', v)$ 对于自变量 $|v' - v|$ 为单调非递增函数,并且需要满足 ε -差分隐私。因此将得分函数 $q(v', v)$ 设置为线性函数。

$$q(v', v) = 1 - |v' - v| \quad (20)$$

由此可得到基于指数机制的模糊化函数。

$$P(v' | v) \propto \exp(\varepsilon \times \frac{q(v', v)}{2\Delta v}) = \frac{\exp(\varepsilon \times \frac{1 - |v' - v|}{2\Delta v})}{\sum_v \exp(\varepsilon \times \frac{1 - |v - v'|}{2\Delta v})} \quad (21)$$

经证明模糊化函数 $P(v' | v)$ 满足差分隐私,并于3.4节给出证明详细过程。根据模糊化函数式(21),中继传输节点可根据真实终端能耗成本 $v_{m,n,r}$ 计算出响应其他模糊协作成本的概率,并随机选择出模糊终端能耗成本 $v'_{m,n,r}$ 。对应的模糊视频分发时间 $t'_{m,n,r}$ 可表示为

$$t'_{m,n,r} = t_{m,n,r} \times \frac{v'_{m,n,r}}{v_{m,n,r}} \quad (22)$$

为量化中继传输节点数据的隐私化程度,可将隐私泄露度定义为

$$\beta_m = \frac{1}{\ln \frac{1}{Pr(v'_{m,n,r} = v_{m,n,r})}} \quad (23)$$

其中: $Pr(v'_{m,n,r} = v_{m,n,r})$ 表示中继传输节点 m 真实终端能耗成本 $v_{m,n,r}$ 和模糊终端能耗成本 $v'_{m,n,r}$ 相等的概率,其期望表示为

$$E[Pr(v'_{m,n,r} = v_{m,n,r})] = \frac{1}{\sum_v \exp(\varepsilon \times \frac{1 - |v_{m,n,r} - v'_{m,n,r}|}{2\Delta v})} \quad (24)$$

3.2 基于反向拍卖的经济激励机制

视频内容边缘协作分发系统中,为确定中继传输节点的协作报酬,保证其经济效益不受损,本节设计了一种基于反向拍卖的经济激励机制,确定视频内容协作分发时投标信息、拍卖报酬和优胜者选择三个关键因素。

1) 单维度投标信息

单维度反向拍卖机制中,决策平台可以根据不同卖家投标价格,将问题转换成多用户完全匹配问题,采用经典匹配算法,如 Hungarian 算法求解。但是本文提出的基于多维视频码率的反向拍卖机制,无法直接根据多维投标信息完成用户匹配决策。因此首先需要构建单维投标信息 $G'_{m,n,r}$,将多维拍卖属性转换为单维拍卖属性^[27]。

$$G'_{m,n,r} = \theta_n d_{n,r} - \tau_n t_{m,n,r}^{delay} - v'_{m,n,r} \quad (25)$$

2) 拍卖报酬函数

考虑到视频内容协作分发时电量消耗成本,需要边缘协作平台设计拍卖报酬函数用于保证中继传输节点的经济收益。为了约束部分卖家恶意提交虚假投标信息,导致其他卖家的经济效益降低,反向拍卖机制中的拍卖报酬函数需满足近似诚实性。因此本文设计基于固定支付的拍卖报酬函数 $q_{m,n,r}$,可表示为

$$q_{m,n,r} = \Delta v + v'_{m,n,r} \quad (26)$$

经证明拍卖报酬函数 $q_{m,n,r}$ 满足 $2\varepsilon\Delta v$ -近似诚实性,并于3.4节给出证明详细过程。即可假设中继传输节点投标价格等于模糊终端能耗成本,即 $b_{m,n,r} = v'_{m,n,r}$ 。

3) 优胜者选择问题

考虑到中继传输节点计算和通信能力的异构性,视频协作平台选择的协作者与视频服务效益密切相关。为实现视频服务效益的最大化,可将问题式(13)转换为反向拍卖机制中的优胜者选择问题,并表示为

$$\max Q = \sum_{n \in N} \sum_{r \in R_n} Q_{n,r} + \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{r \in R_n} Q_{m,n,r} = \sum_{n \in N} \sum_{r \in R_n} e_{n,r} s_{n,r} - \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{r \in R_n} e_{n,r} h_{m,n,r} v_{m,n,r} \quad (27)$$

$$\text{s. t. } \sum_{r \in R_n} e_{n,r} = 1, \sum_{m \in M} h_{m,n,r} \leq \lambda_m, (1 - \beta_m) \times q_{m,n,r} - v_{m,n,r} \geq 0$$

定理1 该反向拍卖机制中优胜者选择问题是 NP-hard 问题。

证明 考虑优胜者选择问题的一种特殊情况,视频观看用户仅有一种可选择的视频码率,即 $Z=1$; 视频观看用户和中继传输节点的数量相等,即 $N=M$; 中继传输节点可完成的视频请求数量为1,即 $\lambda=1$ 。此时可将问题描述为存在 N 个视频观看用户提供的任务,分配给 N 个中继传输节点完成,求解效益最高的任务分配方式,即

$$\max \sum_{n \in N} h_{m,n,r} (s_{n,r} - v_{m,n,r}) \quad (28)$$

可以看出,该特殊情况等价于典型的任务分配问题,属于整数线性规划问题的一种。已知整数线性规划问题属于 NP-hard 问题,因此优胜者选择问题的特殊情况属于 NP-hard 问题,故该反向拍卖机制下的优胜者选择问题也属于 NP-hard 问题。

3.3 算法设计

根据联合安全和经济激励机制设计,本文将最大化视频服务效益问题转换为反向拍卖机制中基于个体理性约束的优胜者选择问题。针对优胜者选择问题,本节提出一种基于联合激励机制的视频内容协作分发算法 VCCDIM (video content cooperative delivery with joint incentive mechanism),该算法求解的关键是图结构的正确定义。具体而言,在 D2D 通信连接图的基础上初始化二分图结构,然后通过以下步骤对基本图进行修改:

1) D2D 通信连接图

首先建立以视频观看用户和中继传输节点为顶点的完全加权二分图。顶点集 M 由中继传输节点组成,顶点数量是 M ; 顶点集 N 由视频观看用户组成,特别地,视频观看用户不同码率的视频请求视为单独的顶点,顶点数量是 $\sum_{n=1}^N R_n$ 。二分图中边的权重由中继传输节点 m 完成该码率视频请求的单维投标信息 $G'_{m,n,r}$ 决定。若中继传输节点 m 未提交投标信息,则将权重设置为0。

2) 二分图匹配

传统的完全加权二分图可采用 Kuhn-Munkres 算法求解最优解。其步骤为:a)基于二分图中边的权重初始化可行顶标的值;b)调用匈牙利算法寻找完备匹配;c)若未找到完备匹配,则修改可行顶标的值;d)重复调用匈牙利算法直到寻找到完备匹配,并作为二分图最大权匹配的解。考虑到视频内容协作分发过程中的码率决策约束,步骤b)调用匈牙利算法得到的完备匹配解不适用于该问题。因此进一步提出修剪顶点集 N 和生成顶点集 M 应用于完备匹配求解中。

3) 修剪顶点集 N

在匈牙利算法寻找完备匹配过程中,若视频请求集 D_n 中任一码率请求 $D_{n,r}$ 完成匹配,则对顶点集 N 进行修剪,将该视频请求集 D_n 中其他码率请求 $D_{n,-r}$ 对应的单维投标信息置为0。

4) 生成顶点集 M

在匈牙利算法寻找完备匹配过程中,若中继传输节点 m

完成匹配,则在顶点集 M 中继续生成节点 m_i ,初始化该节点开始传输视频的时间 $t_{m,n,r}^{start}$ 、二分图权重以及可行顶标的值。

优胜者选择核心问题的求解过程由算法1表示。

算法1 视频内容协作分发算法 VCCDIM

输入:中继传输节点 M ; 视频观看用户 N ; 单维投标信息 $G'_{m,n,r}$; 模糊化协作时间 $t'_{m,n,r}$ 。

输出:视频服务效益 Q 。

a) 初始化 D2D 通信连接图及权重;

b) 计算顶点集的可行顶标 $U_{n,r} = \max(G'_{m,n,r})$, $U_m = 0$; /* 对每个节点进行计算 */

c) 匈牙利算法求解二分图完备匹配;

(a) 若步骤c) 视频观看用户顶点集 N 中任一节点完成匹配,则修剪该节点对应的其他码率视频请求,即对应顶点集 M 的所有单维投标信息置为0;

(b) 若步骤c) 中继传输节点顶点集 M 中任一节点完成匹配,则生成新节点,由式(24)生成对应顶点集 N 的单维投标信息 $G'_{m,n,r}$;

(c) 若步骤c) 未求解出二分图完备匹配,则修改顶点集可行顶标, $U_{n,r} = U_{n,r} - \min(U_{n,r} + U_m - G'_{m,n,r})$, $U_m = \min(U_{n,r} + U_m - G'_{m,n,r})$, 循环步骤c)直到求解出二分图完备匹配;

d) 由式(12)计算视频服务效益 Q 。

3.4 性能分析

定理2 本文提出的安全激励机制满足 ε -差分隐私。

证明 基于指数机制的终端能耗成本模糊化函数 $P(v|v)$ 满足 ε -差分隐私。证明见附录。

定理3 本文提出的基于反向拍卖的经济激励机制满足近似诚实性,且 $\gamma = 2\varepsilon\Delta v$ 。

证明 为证明该机制满足近似诚实性,假设 v_1 是中继传输节点 m 针对视频请求 D_n 的真实投标价格, v_2 是中继传输节点 m 的任一虚假投标价格。由定理3可知:

$$\frac{P(v'|v_1)}{P(v'|v_2)} \leq \exp(\varepsilon)$$

由报酬函数 $q_{m,n,r}$ 可得

$$\begin{aligned} E[q(v_1, D_{n,r})] &= \sum_{v'} q(v', D_{n,r}) P(v'|v_1) E[q(v_2, D_{n,r})] = \\ &= \sum_{v'} q(v', D_{n,r}) P(v'|v_2) \geq E[q(v_2, D_{n,r})] = \sum_{v'} q(v', D_{n,r}) P(v'|v_2) = \\ &= \exp(-\varepsilon) E[q(v_1, D_{n,r})] \geq E[q(v_1, D_{n,r})] - \varepsilon \times E[q(v_1, D_{n,r})] \geq \\ &= E[q(v_1, D_{n,r})] - \varepsilon \Delta v - \varepsilon \Delta v = E[q(v_1, D_{n,r})] - 2\varepsilon \Delta v \end{aligned}$$

其中:差分隐私损失参数 ε 和 Δv 均为常数。因此该反向拍卖机制中,报酬函数 $q_{m,n,r}$ 满足 $2\varepsilon\Delta v$ 近似诚实性。

定理4 本文基于联合激励机制的视频内容协作分发算法 VCCDIM 的复杂度为 $O(MR + \lambda MN)$ 。

证明 本文算法 VCCDIM 由中继传输节点安全激励机制中的差分隐私算法和经济激励机制中的优胜者选择算法两部分组成,设参与的视频观看用户数量为 N ,多码率视频请求数量为 $R = \sum_{n=1}^N R_n$,中继传输节点数量为 M ,可完成的视频请求数量为 λ 。

VCCDIM 算法中,基于指数机制的差分隐私算法时间复杂度取决于可选择的模糊投标信息的数量,即 $O(MR)$; 优胜者选择算法的核心是基于 Kuhn-Munkres 算法求解,时间复杂度取决于顶点集元素的数量。视频观看用户顶点集的元素个数为 $\sum_{n=1}^N R_n$,经过修剪顶点集后元素个数为 N 。中继传输节点顶点集的元素个数为 M ,经过生成顶点集后元素个数为 λM ,时间复杂度可表示为 $O(\lambda MN)$ 。因此,VCCDIM 算法的总时间复杂度为 $O(MR + \lambda MN)$ 。

定理5 算法 VCCDIM 满足全局收敛性,且最大迭代次数为 r_{VCCDIM} 。

证明 若算法 VCCDIM 可由概率1收敛到全局最优解,则可表示为

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P_k(C_{VCCDIM}) = 1 \quad (29)$$

其中:事件 C_{VCCDIM} 表示算法 VCCDIM 收敛到全局最优解; k 表示迭代次数。算法 VCCDIM 运行过程中存在两次迭代操作:

a)调用匈牙利算法从初始节点开始寻找增广路径,并加入到二分图完备匹配集中;b)采用修改基本图的 Kuhn-Munkres 算法迭代修改可行顶标的值,寻找二分图最大权匹配。因此依据条件概率公式, $P_k(C_{VCCDIM})$ 可表示为

$$P_k(C_{VCCDIM}) = P_k(C_{R-KM}C_{HM}) = P_{k_1}(C_{HM})P_{k_2}(C_{R-KM}|C_{HM}) \quad (30)$$

其中:事件 C_{R-KM} 表示修改基本图的 Kuhn-Munkres 算法收敛到全局最优解;事件 C_{HM} 表示匈牙利算法收敛到全局最优解。因此需要分别证明 $P_{k_1}(C_{HM})$ 和 $P_{k_2}(C_{R-KM}|C_{HM})$ 的收敛性。

为证明匈牙利算法和修改基本图的 Kuhn-Munkres 算法的收敛性,需确保最优解可通过其他任意状态以概率方式可达,且每次迭代关于算法求解目标是单调的。首先分析 $P_{k_1}(C_{HM})$ 的收敛性,匈牙利算法中增广路径要求该路径的起点和终点一定是未匹配的顶点,每次迭代寻找到增广路径均可使已匹配的顶点数量增加,即算法关于求解目标是单调递增的。同时匈牙利算法中二分图匹配不是最优解必存在增广路径^[28],因此 $P_{k_1}(C_{HM})$ 满足全局收敛性,即

$$\lim_{k_1 \rightarrow \infty} P_{k_1}(C_{HM}) = 1$$

修改基本图的 Kuhn-Munkres 算法每次迭代通过修改可行顶标的值可增加增广路径和已匹配顶点数量,直至调用匈牙利算法求解出完备匹配,作为二分图最大权匹配的解。因此该算法关于求解目标是单调递增的,且最优解可达,即

$$\lim_{k_2 \rightarrow \infty} P_{k_2}(C_{R-KM}|C_{HM}) = 1$$

根据式(29)(30)可知算法 VCCDIM 满足全局收敛性。

由于算法 VCCDIM 运行过程中存在两次迭代操作,最大迭代次数 r_{VCCDIM} 可表示为

$$r_{VCCDIM} = \sum_{k_2=1}^{r_{R-KM}} r_{HM}(k_2) \quad (31)$$

其中: r_{R-KM} 表示修改基本图的 Kuhn-Munkres 算法的最大迭代次数; $r_{HM}(k_2)$ 表示第 k_2 次调用匈牙利算法的最大迭代次数。

为求解算法 VCCDIM 的最大迭代次数,假设运行过程中需要修改所有顶点集的可行顶标。修改基本图的 Kuhn-Munkres 算法迭代次数取决于顶点集数量。经修剪顶点操作后,顶点集 N 参与匹配的顶点数量为 N ;经生成顶点操作后,顶点集 M 参与匹配的顶点数量为 λM 。因此最大迭代次数可表示为 $r_{R-KM} = \min(N, \lambda M)$ 。

匈牙利算法的最大迭代次数取决于参与二分图匹配的顶点数量,在修改基本图的 Kuhn-Munkres 算法第 k_2 次迭代过程中,匈牙利算法最大迭代次数可表示为 $r_{HM}(k_2) = k_2$ 。

因此最大迭代次数 r_{VCCDIM} 可进一步表示为

$$r_{VCCDIM} = \sum_{k_2=1}^{r_{R-KM}} r_{HM}(k_2) = \min\left(\frac{N^2 + N}{2}, \frac{\lambda^2 M^2 + \lambda M}{2}\right)$$

4 实验和结果

4.1 实验环境

本文在阿里云平台上对 VCCDIM 算法进行实验验证,租用的服务器型号是 Intel Xeon Platinum 8269CY, CPU 参数为四核 Intel Xeon Platinum 8269CY, 16 GB RAM。算法采用 C++ 语言编写,软件运行环境为 Ubuntu 16.04 LTS 64 bit, Visual Studio 2018, MySQL Server 5.7。

4.2 仿真实验设置

本文在多个连续视频内容协作分发周期验证 VCCDIM 算法性能,仿真实验中共采用 100 个视频内容协作分发周期,每个周期时长为 5 s,默认视频观看用户数量为 40,中继传输节点数量为 60,平均用户移动速度为 1 m/s,差分隐私损失参数 ϵ 值为 0.5,其他数据和参数如下:

a)流媒体视频。视频观看用户请求的视频数据来自于

BestTV 视频浏览日志^[29]。BestTV 是中国最大的视频服务提供商之一,提供五种不同的视频码率 {0.2, 0.4, 0.7, 1.3, 2.3} Mbps,该视频数据集包含视频编号、视频片段长度、请求时间等信息。

b)用户移动轨迹。采用微软移动轨迹数据集模拟每个视频内容协作分发周期的用户地理坐标^[30]。该轨迹数据集出自微软研究的 GeoLife 项目,记录从 2007 年 4 月到 2012 年 8 月共 182 个用户的轨迹数据,包括用户的经度、纬度、高度以及时间戳等信息。同一时间段随机选取 100 个用户轨迹数据模拟用户的地理位置变化,并假设每个视频内容协作分发周期内,用户的地理位置不发生变化,在视频内容协作分发周期开始时,边缘协作平台收集用户信息并统计进入或者离开服务器覆盖范围智能终端节点。

c)视频数据下载速率。采用挪威无线网络会话日志的记录模拟下载视频的速率^[31]。该数据集记录了 1 000 条用户在下载视频时传输数据量、传输时间等信息,每条记录的时长为 5 s。

d)D2D 传输数据。采用 Haggie 项目中 D2D 传输数据集模拟用户间传输视频数据的速率^[32]。该数据集记录了两年来基于 D2D 通信的终端设备信息,包括用户地理位置、文件传输量、传输时间等数据。

e)边缘计算网络参数。设置模拟值表示边缘计算网络性能,单个边缘网络提供视频服务范围为 100 m × 100 m,其他网络性能参数如表 1 所示^[33]。

表 1 网络性能参数

Tab. 1 Network performance parameters	
名称	参数
系统带宽 B/MHz	20
噪声功率谱密度 $N_0/\text{dBm/Hz}$	-174
基站发射功率 P_0/dBm	46
D2D 用户发射功率 P_m/dBm	23

为衡量算法性能,实验算法除本文 VCCDIM 算法外,还包括不考虑本地数据隐私的多用户视频内容协作分发算法 NPCD(non-private cooperative diversity)和基于用户历史数据的协作传输算法 MACD(matching aware cooperative diversity)。其中 NPCD 算法用来衡量视频内容协作分发的最优性能,记做视频服务效益最优值 Q_{\max} ;MACD 算法是解决视频内容协作分发数据隐私问题的另一种策略,通过用户历史地理位置、传输速率等信息近似替代当前视频协作周期用户数据。

本文将对视频服务效益、视频服务效益损耗率、隐私泄露度等性能指标进行比较与讨论。其中视频服务效益 Q 是中继传输节点 m 和视频观看用户 n 的效益总和,可由式(9)计算所得;视频服务效益损耗率 ζ 表示联合激励机制中数据可用性的下降程度, $\zeta = (Q_{\max} - Q)/Q_{\max}$;隐私泄露度 β_m 表示中继传输用户的数据保护程度,可由式(23)计算所得。

4.3 实验结果和分析

1) 视频下载速率对算法性能的影响

图 2 展示了视频服务效益随中继传输节点平均下载速率增长的变化情况。当中继传输节点平均下载速率相同时,本文 VCCDIM 算法取得的视频服务效益低于 NPCD 算法,这说明基于差分隐私的安全激励机制在一定程度上降低了本地数据的可用性。随着平均下载速率的增加,视频服务效益损耗率 ζ 由 4.8% 上升至 21.6%,但仍取得较高的视频服务效益,实现了本地数据隐私性和可用性的平衡。MACD 算法取得的视频服务效益最低,其原因是本文考虑了用户频繁移动的网络场景,视频下载速率与 D2D 传输速率随时间变化较大,基于历史信息的 MACD 算法很难取得较好的预测结果,导致视频服务效益下降。随着中继传输节点下载速率的增长,各算法取得的视频服务效益均提高,其原因是更高的下载速率能够提高视频内

容分发的码率,并降低传输延迟,从而提升视频服务效益。

2) 用户移动速度对算法性能的影响

图3展示了随着平均用户移动速度的增长,各算法的视频服务效益呈现出不同程度的下降趋势。当平均移动速度较低时(0.1 m/s),MACD算法取得的视频服务效益高于VCCDIM算法,其原因是用户移动速度较低时,基于历史数据的MACD算法能取得较高的预测准确度。随着平均移动速度的增加,MACD算法预测准确度不足,视频服务效益下降较快;VCCDIM和NPCD算法的视频服务效益下降趋势较为平缓,其原因是:a)本文提出的视频内容协作分发策略以视频内容协作分发周期为单位完成决策,有效避免了因用户移动导致的视频服务效益急剧下降;b)平均用户移动性的提升导致用户移动范围扩大,分散的地理位置导致用户间相对距离增加,D2D传输速率下降,因此视频服务效益呈现下降趋势。

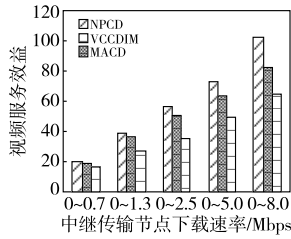


图2 不同视频下载速率对视频服务效益的影响

Fig.2 Performance of video services benefit under different streaming download rates

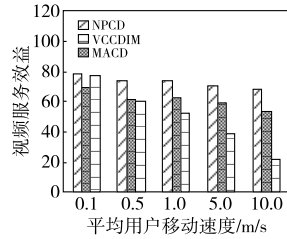


图3 不同用户移动速度对视频服务效益的影响

Fig.3 Performance of video services benefit under different users' moving speeds

3) 视频观看用户数量对算法性能的影响

图4展示了视频服务效益随视频观看用户数量增长的变化情况。VCCDIM算法取得的视频服务效益持续增加,提升趋势逐渐变缓,其原因是中继传输节点可提供的计算资源和通信资源有限。同时VCCDIM算法增长速率低于NPCD算法,视频服务效益损耗率 ζ 由8.0%上升至17.6%,其原因是随着视频观看用户数量的提升,基于差分隐私的安全激励机制中全局敏感度 Δv 提高,数据模糊化程度提升导致本地数据可用性降低。

4) 中继传输节点数量对算法性能的影响

图5展示了视频服务效益随中继传输节点数量增长的变化情况。VCCDIM算法取得的视频服务效益缓慢增加,其原因是更多的中继传输节点数量意味着有可能存在计算能力和通信能力更强的终端节点,从而提高视频服务效益。VCCDIM算法增长速率略低于NPCD算法,视频服务效益损耗率 ζ 由10.8%上升至14.5%,其原因同样是 Δv 提高导致本地数据可用性降低。

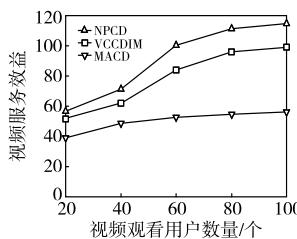


图4 不同视频观看用户数量对视频服务效益的影响

Fig.4 Performance of video services benefit under different number of streaming users

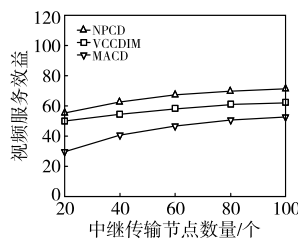


图5 不同中继传输节点数量对视频服务效益的影响

Fig.5 Performance of total video services benefit under different number of relay transmission users

5) 差分隐私损失参数对算法性能的影响

图6展示了视频服务效益和隐私泄露度随差分隐私损失参数 ϵ 增长的变化情况。差分隐私损失参数 ϵ 较小时,表示用户数据的模糊化程度高,数据可用性较低,视频服务效益较差。因此随着差分隐私损失参数 ϵ 的增加,视频服务效益持续增

加,并逐渐接近算法NPCD取得的视频服务效益,同时隐私泄露度 β_m 持续增加,算法的输出结果更有可能泄露数据信息。

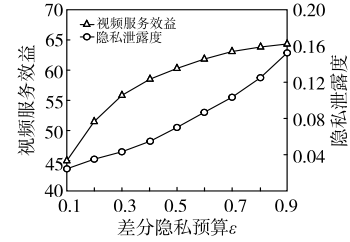


图6 差分隐私预算 ϵ 对视频服务效益和隐私泄露度的影响

Fig.6 Performance of video services benefit and privacy protection under different-privacy budget ϵ

5 结束语

本文面向移动边缘计算网络中视频内容协作分发系统,设计了联合安全和经济激励机制和视频内容协作分发算法VCCDIM,促进中继传输节点主动提供视频转码和通信服务,提高了视频服务总体效益。本文首先构建差分隐私模型应用于安全激励机制中,实现中继传输节点数据的隐私性和计算可用性的平衡;然后提出基于反向拍卖的经济激励机制,设计协作报酬函数和优胜者决策函数,最后证明基于个体理性约束的联合拍卖机制满足差分隐私和近似诚实性。实验结果表明,算法VCCDIM在视频服务效益提升上取得较好的性能。本文仅对单个边缘服务器网络架构下的视频内容协作分发问题进行了初步讨论,未来可着眼于以下方面对该问题进行深入讨论:a)多个边缘服务器提供视频服务的场景需要考虑视频观看用户的服务器选择和网络切换,解决多维度的视频内容分发路径选择问题;b)用户高速且频繁的移动特征会影响视频内容协作分发系统的性能,需要面向移动特性提出优化方案。

附录

证明 给定差分隐私预算 ϵ ,基于指数机制的模糊化函数 $P(v'|v)$ 满足 ϵ -差分隐私。

对于视频请求 $D_{n,r}$,假定 v_1 和 v_2 是两个不相同的真实投标价格, $P(v'|v_1)$ 和 $P(v'|v_2)$ 分别表示投标价格 v_1 和 v_2 模糊化成 v' 的概率,因此:

$$\begin{aligned}
 P(v'|v_1) &= \frac{\exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'|}{2\Delta v})}{\sum_v \exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'|}{2\Delta v})} \\
 P(v'|v_2) &= \frac{\exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v})}{\sum_v \exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v})} \\
 \frac{P(v'|v_1)}{P(v'|v_2)} &= \frac{\exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'|}{2\Delta v})}{\exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v})} = \frac{\sum_v \exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'|}{2\Delta v})}{\sum_v \exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v})} \\
 &= \frac{\exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'|}{2\Delta v})}{\exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v})} \cdot \frac{\sum_v \exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'|}{2\Delta v})}{\sum_v \exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v})} \\
 &\leq \exp(\frac{\epsilon}{2\Delta v} \cdot (|v_2 - v'| - |v_1 - v'|)) \cdot \frac{\sum_v \exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'|}{2\Delta v})}{\sum_v \exp(\epsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v})} \leq
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \exp\left(\frac{\varepsilon \cdot \Delta v_{single}}{2\Delta v}\right) \cdot \frac{\sum_{v'} \exp\left(\varepsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'|}{2\Delta v}\right)}{\sum_{v'} \exp\left(\varepsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v}\right)} \leq \\
& \exp\left(\frac{\varepsilon \cdot \Delta v}{2\Delta v}\right) \cdot \frac{\sum_{v'} \exp\left(\varepsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'|}{2\Delta v}\right)}{\sum_{v'} \exp\left(\varepsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v}\right)} \leq \\
& \exp\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \cdot \frac{\sum_{v'} \exp\left(\varepsilon \cdot \frac{1 - |v_1 - v'| + \Delta v}{2\Delta v}\right)}{\sum_{v'} \exp\left(\varepsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v}\right)} \leq \\
& \exp\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \cdot \frac{\sum_{v'} \exp\left(\varepsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v}\right)}{\sum_{v'} \exp\left(\varepsilon \cdot \frac{1 - |v_2 - v'|}{2\Delta v}\right)} = \\
& \exp\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) = \\
& \exp(\varepsilon)
\end{aligned}$$

即基于指数机制的模糊化函数 $P(v'|v)$ 满足 ε -差分隐私。

参考文献:

- [1] Cisco. Cisco visual networking index [EB/OL]. [2019]. <http://www.cisco.com/>.
- [2] Eirini L, Konstantinos S, Emmanouil P, *et al.* QoE-SDN App: a rate-guided QoE-aware SDN-APP for HTTP adaptive video streaming [J]. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2018, 36(3): 598-615.
- [3] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型 [J]. *计算机研究与发展*, 2017, 54(5): 907-924. (Shi Weisong, Sun Hui, Cao Jie, *et al.* Edge computing: an emerging computing model for the Internet of everything era [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2017, 54(5): 907-924.)
- [4] 周俊, 沈华杰, 林中允, 等. 边缘计算隐私保护研究进展 [J]. *计算机研究与发展*, 2020, 57(10): 2027-2051. (Zhou Jun, Shen Huajie, Lin Zhongyun, *et al.* Research advances on privacy preserving in edge computing [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2020, 57(10): 2027-2051.)
- [5] Gao Lin, Tang Ming, Pang Haitian, *et al.* Multi-user cooperative mobile video streaming: performance analysis and online mechanism design [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2019, 18(2): 376-389.
- [6] Anis E, Muhamad F, Vaneet A. GroupCast: preference-aware cooperative video streaming with scalable video coding [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2019, 27(3): 1138-1150.
- [7] Zhang Xi, Zhu Qixuan. D2D offloading for statistical QoS provisionings over 5G multimedia mobile wireless networks [C]//Proc of the 38th IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2019: 82-90.
- [8] Yan Junjie, Wu Dapeng, Wang Ruyan. Socially aware trust framework for multimedia delivery in D2D cooperative communication [J]. *IEEE Trans on Multimedia*, 2019, 21(3): 625-635.
- [9] Tang Ming, Pang Haitian, Wang Shou, *et al.* Multi-dimensional auction mechanisms for crowdsourced mobile video streaming [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2018, 26(5): 2062-2075.
- [10] Ma Ge, Xue Rongsheng, Gu Weixi. An incentive mechanism design for resource collection in crowdsourced CDN: poster abstract [C]//Proc of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2020: 657-658.
- [11] Xu Zeyu, Wang Wei, Jiang Tao, *et al.* Incentive mechanism for cooperative scalable video coding (SVC) multicast based on contract theory [J]. *IEEE Trans on Multimedia*, 2019, 22(2): 445-458.
- [12] Mahdi M, Anja K. Decentralized video streaming in multi-hop wireless networks: incentive mechanism and energy efficiency [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 51329-51345.
- [13] Wu Honghai, Liu Liang, Zhang Xi, *et al.* Vbargain: a market-driven quality oriented incentive for mobile video offloading [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2019, 18(9): 2203-2216.
- [14] Wu Dapeng, Yan Junjie, Wang Honggang, *et al.* Social attribute aware incentive mechanism for device-to-device video distribution [J]. *IEEE Trans on Multimedia*, 2017, 19(8): 1908-1920.
- [15] Androuraki E, Chor S G, Bellovin S M, *et al.* Reputation systems for anonymous network [C]//Proc of the 8th International Symposium on Privacy Enhancing Technologies. Berlin: Springer, 2008: 202-218.
- [16] Lu Rongxing, Heung K, Lashkari A H, *et al.* A lightweight privacy-preserving data aggregation scheme for fog computing-enhanced IoT [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 3302-3312.
- [17] Ma Xu, Chen Xiaofeng, Zhang Xiaoyu. Non-interactive privacy-preserving neural network prediction [J]. *Information Sciences*, 2019, 481: 507-519.
- [18] 吴桦, 王凌, 程光. 基于 DASH 视频的 TCP 拥塞控制算法优化 [J]. *计算机研究与发展*, 2019, 56(9): 1965-1976. (Wu Hua, Wang Ling, Cheng Guang. Optimization of TCP congestion control algorithm in dynamic adaptive streaming over HTTP [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2019, 56(9): 1965-1976.)
- [19] 钱志鸿, 王雪. 面向 5G 通信网的 D2D 技术综述 [J]. *通信学报*, 2016, 37(7): 1-14. (Qian Zhihong, Wang Xue. Reviews of D2D technology for 5G communication networks [J]. *Journal on Communication*, 2016, 37(7): 1-14.)
- [20] Li Mingfu, Chen Hanlin. Energy-Efficient traffic regulation and scheduling for video streaming services over LTE-A networks [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2019, 18(2): 334-347.
- [21] Zou Junni, Li Chenglin. Joint pricing and cache placement for video caching: a game theoretic approach [J]. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2019, 37(7): 1566-1583.
- [22] 叶青青, 孟小峰, 朱敏杰, 等. 本地化差分隐私研究综述 [J]. *软件学报*, 2018, 29(7): 1981-2005. (Ye Qingqing, Meng Xiaofeng, Zhu Minjie, *et al.* Survey on local differential privacy [J]. *Journal of Software*, 2018, 29(7): 1981-2005.)
- [23] 郑臻哲, 吴帆, 陈贵海. 多维度防策略性云带宽预留拍卖机制设计 [J]. *计算机学报*, 2019, 42(4): 701-720. (Zheng Zhenzhe, Wu Fan, Chen Guihai. On designing multi-dimensional strategy-proof auctions for distributed cloud bandwidth reservation [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2019, 42(4): 701-720.)
- [24] 崔景妹, 孙玉娥, 黄河, 等. 众包系统中基于双向拍卖的诚实多任务分配机制 [J]. *软件学报*, 2018, 29(1): 105-114. (Cui Jingmei, Sun Yu'e, Huang He, *et al.* Double auction based truthful multi-unit task allocation mechanism for crowdsourcing systems [J]. *Journal of Software*, 2018, 29(1): 105-114.)
- [25] Han Kai, Liu Huan, Tang Shaojie, *et al.* Differentially private mechanisms for budget limited mobile crowdsourcing [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2019, 18(4): 934-946.
- [26] Wang Zhibo, Li Jingxin, Hu Jiahui, *et al.* Towards privacy-preserving incentive for mobile crowdsensing under an untrusted platform [C]//Proc of the 38th IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2019: 2053-2061.
- [27] Esther D, Rina AS, Sarit K. Bidding in sealed-bid and English multi-attribute auctions [J]. *Decision Support Systems*, 2006: 572-556.
- [28] Harold W K. The Hungarian method for the assignment problem [J]. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1955, 2(1): 83-97.
- [29] Best TV. BestTV home page [EB/OL]. (2016). <http://www.bestv.com.cn/>.
- [30] Microsoft Research Asia. Geolife trajectories [DB/OL]. (2012). <http://www.microsoft.com/>.
- [31] CRAWDAD Community. The ilesansfil/wifidog dataset [DB/OL]. (2015-11-06). <https://crawdad.org/ilesansfil/wifidog/20151106/>.
- [32] CRAWDAD Community. The Cambridge/haggle dataset [DB/OL]. (2009-05-29). <https://crawdad.org/cambridge/haggle/20090529/>.
- [33] Abbas M, Matti S, Antti Y. Edge computing assisted adaptive mobile video streaming [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2019, 18(4): 787-800.