



研究与开发

视频流可扩展反馈卸载的渐进二次博弈机制

葛茜倩

(浙江工商职业技术学院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 提出一种视频流可扩展反馈卸载的渐进二次价格博弈机制。首先, 通过有效地将所有视频流服务中的部分视频流量卸载到 Wi-Fi 网络来缓解蜂窝网络拥塞, 从而提供无缝的视频流服务, 并以经济高效的方式整合了多个物理路径, 压缩视频数据的喷泉编码符号通过长期演进 (LTE) 和 Wi-Fi 网络同时传输, 以灵活控制通过 Wi-Fi 网络的视频流量, 并减轻无线信道错误导致的视频质量下降。其次, 采用渐进式二次价格拍卖机制, 将有限的 LTE 资源分配给多个用户设备, 以最大限度地提高社会福利, 同时达到 Nash 均衡, 并从理论角度验证了该系统的可扩展性和收敛性; 最后, 通过实验仿真验证了所提算法在视频流传输质量和能量消耗上的性能优势。

关键词: 视频流; 可扩展; 反馈机制; 应用卸载; 博弈算法

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020022

Asymptotic quadratic price game mechanism for video stream extensible feedback unloading

GE Qianqian

Zhejiang Business Techonology Institute, Ningbo 315000, China

Abstract: A progressive quadratic price game mechanism with scalable feedback offloading of video streams was proposed. Firstly, the congestion of cellular network could be alleviated by effectively uninstalling some video traffic from all video streaming services to Wi-Fi network, thus providing seamless video streaming services. Several physical paths were integrated in an economical and efficient way. The fountain coded symbols of compressed video data were transmitted simultaneously through LTE and Wi-Fi network to flexibly control the viewing through Wi-Fi network and reduce the video quality degradation caused by wireless channel errors. Secondly, a progressive secondary price auction mechanism was used to allocate limited LTE resources to multiple user devices to maximize social welfare and achieve Nash equilibrium. The scalability and convergence of the system were verified theoretically. Finally, the performance advantages of the proposed algorithm in video streaming transmission quality and energy consumption were verified by experimental simulation.

Key words: video stream, scalability, feedback mechanism, application unloading, game algorithm

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2020-01-09

基金项目: 浙江省公益技术应用研究项目 (No.2015C33079)

Foundation Item: Zhejiang Public Welfare Technology Application Foundation (No.2015C33079)



1 引言

根据思科视觉网络指数, 全球移动数据流量快速增长, 从 2016 年到 2021 年, 整体移动数据流量预计将以 47% 的年增长率增长, 到 2021 年达每月 49 EB, 这意味着比 2016 年增长了近 7 倍^[1-2]。移动数据流量呈指数级增长的主要原因是智能手机、平板电脑、笔记本电脑和高级多媒体应用程序 (如 YouTube 和 Netflix) 的爆炸性增长。Cisco 估计, 在 2016—2021 年期间, 移动视频流量将以每年 54% 的复合年增长率增长, 并在 2021 年占移动数据流量的 78% 以上^[3-4]。不幸的是, 移动视频流量的激增对有限的蜂窝网络容量造成了前所未有的压力, 并最终降低了用户感知的视频质量。为移动网络中爆炸性的流量增长提供支持是非常具有挑战性的, 最直接的解决方案是通过添加基站或将蜂窝网络升级到下一代高级网络, 如长期演进 (LTE)^[3]、LTE 高级 (LTE-A)^[5] 和全球微波接入互操作性 (WiMAX) 版本 (IEEE 802.16m), 来增加蜂窝网络容量。然而, 仅增加蜂窝网络容量并不总是经济的。即使在第四代移动通信网络 (4G) 中, 由于用户对高级多媒体应用程序的需求快速增长, 带宽仍然是有限的资源。此外, 这些方法需大量资本和运营支出。

移动数据卸载是指使用 Wi-Fi 和 Femtocell 等补充网络来交付最初计划在蜂窝网络上传输的移动数据流量。在参考文献[6]中, 思科估计到 2021 年, 全球移动数据流量的 63% 将被卸载到 Wi-Fi 或小蜂窝网络。近年来, AT&T、T-Mobile、Orange 和中国移动通信集团有限公司等全球网络运营商在商场、市场或咖啡馆等高密度用户场所部署了运营商级接入点 (APS), 以增加卸载流量。Wi-Fi 卸载正在成为运营商适应移动数据流量巨大增长的一种经济高效的解决方案, 因为安装新的 Wi-Fi AP 比升级蜂窝网络设备便宜得多。在将移动数据流量卸载到 Wi-Fi 网络时, 运营商面临一些实际

问题^[7-8], 例如 Wi-Fi 体验的质量、Wi-Fi 规划工具的限制、Wi-Fi 热点的部署、手动卸载和定价。移动数据卸载的首要挑战是用户体验。服务提供商必须确保一致的用户体验和服务连续性。然而, 在执行 Wi-Fi 卸载时, 要保持视频流服务的体验质量 (QoE) 并不容易。拍卖理论是博弈论的一个分支, 它为分析相互依赖的理性参与者 (即买卖双方) 之间的复杂互动提供了有用的数学工具。由于拍卖适用于大规模的分散和竞争环境, 因此它被广泛用于提供移动数据卸载解决方案。参考文献[9]提出了一种基于反向拍卖的激励机制, 激励用户设备 (UE) 以协助移动数据卸载, 在这种情况下, 蜂窝运营商提供对 UE 的激励, 以换取延迟, 在此期间, 数据不会通过蜂窝网络接收。在迭代的双重拍卖机制中, 买家 (移动运营商) 和卖家 (AP 所有者) 向经纪人提交出价, 以最大化他们的回报, 然后经纪人返回拍卖结果, 以最大化社会福利 (即玩家资源估值的总和)。在参考文献[10]中, 为了提高车辆用户的效用, 增加移动网络运营商的收入, 建议在车辆环境中采用基于拍卖的 Wi-Fi 卸载。在参考文献[11]中, 机会主义决策算法的设计目的是最大限度地提高车辆用户的满意度, 并将其建模为下载成本和下载时延。然而, 之前的大多数研究都时是在不考虑视频质量对用户实际利益的情况下分配资源的。因此, 这些研究不适用于随时间变化的无线网络中的多媒体资源分配方案。

本文提出了一种基于博弈论的异构无线网络视频流服务可扩展卸载系统。主要贡献总结如下: 提出了可扩展的视频流卸载系统, 它可以很好地控制通过 LTE 和 Wi-Fi 网络传输的流量, 从而提供无缝的视频流服务并缓解蜂窝网络拥塞。当使用具有不同时延的多个物理路径进行建议的可扩展卸载时, 数据分组可能会无序到达接收器。将可扩展的卸载问题定义为一个渐进式二价 (PSP) 拍卖博弈问题, 其中 LTE 资源在多个 UE 之间共

享。更重要的是, 基于编码视频序列的速率失真模型定义了一个特定于应用的资源评估函数。设计了一种基于反馈的低通信开销和计算开销的 UE 投标决策算法, 以提高收敛到平衡点的速度。此外, 从理论和实验两方面验证了该算法的可扩展性。

2 问题描述

2.1 喷泉码

图 1 提供了视频流服务的 LT 代码部署方案的示例。对于喷泉编码, 数据流应该划分为源块。每个源块被划分成预先定义大小的源符号。如图 1 所示, 编码符号根据度分布概率映射到某些源符号。每个编码符号都是通过对选定的源符号执行位异或操作生成的。重复此过程, 直到创建最后一个编码符号^[12-13]。

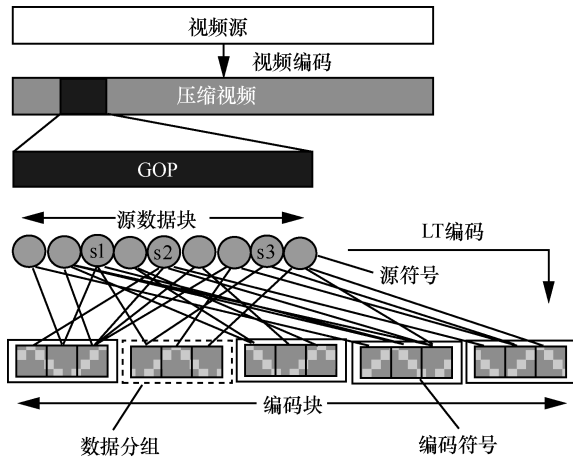


图 1 LT 代码部署方案

通常, 喷泉解码成功所需的编码符号 (k') 的数量通过式 (1) 计算:

$$k' = (1 + \delta)k \quad (1)$$

其中, k 是源符号的个数, δ 是符号开销中的一个非常小的实数。式 (1) 意味着接收到的编码符号的数量必须略大于 k , 才能成功地重建源符号。喷泉代码可以从给定的有限数量的源符号 (无速率代码) 无限地生成编码符号, 即:

$$c = k/n \quad (2)$$

其中, c 是码率, n 是编码符号的数目。因此, 如果有足够数量的编码符号可用, 那么即使某些数据分组丢失或不正常, 接收器也可以重建所有源符号。

2.2 渐进式二次价格拍卖机制

假设网络资源总量为 R , 参与拍卖的玩家有 M 个, 索引为 $i \in I = \{1, 2, \dots, M\}$ 。玩家按顺序提交一个出价, 并修改他们的出价, 作为对其他人提交的出价的回复, 并收取出价更改费 ε 。第 i 个玩家的出价定义为: $b_i = (q_i, p_i) \in B_i (= [0, R] \times [0, \infty))$, 其中 q_i 是所需的资源量, p_i 是每单位的报价, b_i 是一组可能的投标操作。投标资料是 $b = \{b_1, \dots, b_M\} = (b_i, b_{-i}) \in B$, 其中 $b_{-i} = \{b_1, \dots, b_{i-1}, b_{i+1}, \dots, b_M\} \in B_{-i}$ 表示第 i 个玩家的对手的出价情况, 且有 $B = \prod_{i \in I} B_i$ 。拍卖人在收取竞买后, 执行两个功能: 资源分配和支付计算。第 i 个玩家分配规则定义为: $s_i(b) = (a_i(b), \tau_i(b)) \in B_i$, 其中 $a_i(b)$ 是分配给第 i 个播放器的资源, $\tau_i(b)$ 表示 $a_i(b)$ 的付款。请注意, p_i 是单位价格, $\tau_i(b)$ 是总成本。如果满足以下条件, 则分配规则可行:

$$\begin{cases} \sum_{i \in I} a_i(b) \leq R, \forall b \in B \\ 0 \leq a_i(b) \leq q_i, \forall i \in I \\ 0 \leq \tau_i(b) \leq q_i \cdot p_i, \forall i \in I \end{cases} \quad (3)$$

满足式 (3) 的分配规则如图 2 所示。

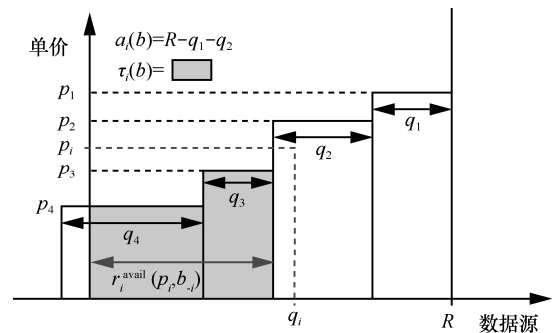


图 2 基于 PSP 拍卖的资源分配机制

当第 i 名玩家以投标价格 p_i 参与拍卖时, 可



分配给第 i 名玩家的可用资源量为:

$$r_i^{\text{avail}}(p_i, b_{-i}) = [R - \sum_{k \in L_{-i}, p_k \geq p_i} q_k]^+ \quad (4)$$

其中, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。然后, $a_i(b)$ 可计算为:

$$a_i(b) = \min\{q_i, r_i^{\text{avail}}(p_i, b_{-i})\} \quad (5)$$

支付 $\tau_i(b)$ 是根据玩家通过其参与向他人施加的外部性因素计算的:

$$\tau_i(b) = \sum_{k \in L_{-i}} p_k \cdot [a_k(0, b_{-i}) - a_k(b_i, b_{-i})] \quad (6)$$

在博弈论中, Nash 均衡是一种博弈者策略的配置, 任何人都不能通过单方面改变策略来提高自己的效用。在 PSP 中, ε -Nash 平衡的形式定义如下:

$$B_i^\varepsilon(b_{-i}^*) = \{b_i^* \in B_i : u_i(b_i^*, b_{-i}^*) \geq u_i(b_i, b_{-i}^*) - \varepsilon, \forall b_i \in B_i \text{ \& } \forall i \in I\} \quad (7)$$

其中, $u_i(\cdot)$ 表示第 i 个播放器的实用程序, b_i^* 是第 i 个玩家对 b_{-i}^* 的最佳回答, ε ($\varepsilon > 0$) 是每次玩家提交出价时的出价费用。一个 ε -Nash 平衡是:

$$B^\varepsilon(b) = \prod_{i \in I} B_i^\varepsilon(b_{-i}^*) \quad (8)$$

2.3 系统框架

所考虑的系统架构如图 3 所示, 拟议系统包括 3 个主要实体: ANDSF、PGW 和 UE。此外, 它与媒体服务器紧密耦合, 以容纳各种移动用户。

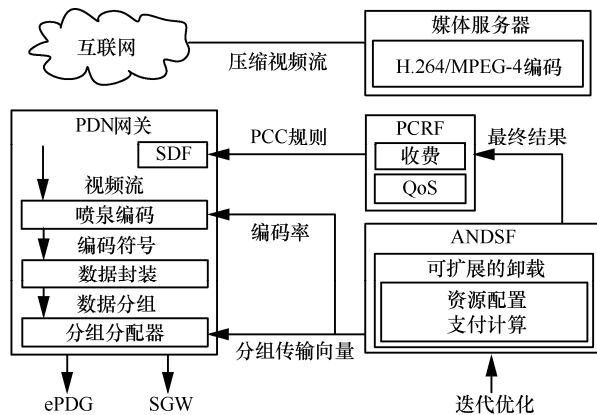


图 3 系统架构

具体来说, 媒体服务器执行实时转码, 以无缝地提供与最终用户设备兼容的视频流, 并满足

用户资源分配所施加的带宽限制。假设移动设备配备 LTE 和 Wi-Fi 网络接口。为了有效地利用路径多样性, 必须识别每个物理路径的特征。本文采用路径 pathChirp 算法来估计每个物理路径的可用带宽。分别利用每个报文头中的时间戳和索引号, 得到传输时延和分组丢失率。根据路径监控信息, 由 UE 控制单元确定喷泉码率、分组传输向量 (即通过 LTE 和 Wi-Fi 网络传输的分组数) 和目标视频编码率等参数, 同时满足延迟和喷泉解码失败率约束, 支持无缝 video 流媒体。

3 博弈论视频流可扩展卸载系统

该系统的目标是通过灵活规模的 Wi-Fi 网络卸载部分视频流量, 同时通过有效分配有限的 LTE 资源以低成本提高所有 UE 的视频质量, 从而缓解 LTE 网络拥塞^[14-15]。本文假设无线接入点由蜂窝网络运营商部署。当目前的 LTE 网络容量难以支持 UES 时, 蜂窝网络运营商可以通过打开其接入点来有效地减少移动流量。

3.1 PSP 拍卖兼容系统模型

一旦当前的流量需求超过可用的 LTE 资源 R , 蜂窝网络运营商就会宣布共享 LTE 资源的拍卖, 并从 UES 收集投标。在从 UES 收集投标后, 蜂窝网络运营商根据由 $s_i(b) = (q_i^{\text{LTE}}(b), \tau_i(b))$ 定义 PSP 规则计算最优资源分配, 并将反馈发送给相应的 UE。使用者等待拍卖公告, 然后决定是否出价。虽然 LTE 网络很拥挤, 但有些用户可能不想参与竞标以获得 LTE 资源, 因为他们能感知到良好的 Wi-Fi 通道。在这种情况下, 视频流服务仅通过 Wi-Fi 单网络提供。如果 UE 决定参加拍卖, 则提交投标书 $b_i = (q_i^{\text{LTE}}, p_i)$, 并等待临时拍卖结果。当临时拍卖结果公布后, UES 根据反馈信息更新其出价, 以实现更好的效用。重复这个资源协商过程, 直到所有的 UE 投标都收敛到 ε -Nash 均衡, 以同时满足 UE 和蜂窝网络运营商的目标。

可将 UE 问题改为与 PSP 拍卖机制兼容, 如

下所示, 使用给定的 $q_i^{\text{Wi-Fi}}$ 确定 $\forall i \in I$ 的 $b_i = (q_i^{\text{LTE}}, p_i)$, 以最大化以下实用功能:

$$\begin{aligned} u_i(b_i, b_{-i})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} &= \\ &= \theta_i(a_i^{\text{LTE}}(b_i, b_{-i}))|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} - \tau_i(b_i, b_{-i}) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $q_i^{\text{LTE}} \leq Q_i^{\text{LTE}}$. $\theta_i(\cdot)$ 表示第 i 个 UE 的资源评估, 其定义为:

$$\begin{aligned} \theta_i(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} &= \\ \text{PSNR}(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} - \text{PSNR}(0)|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\text{PSNR}(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}}$ 是峰值信号比 (PSNR), 由 $10 \cdot \ln(255^2 / \tilde{d}_{\text{gop}}(r_{\text{gop}}(q_i^{\text{LTE}})))|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}}$ 定义, $\tau_i(b_i, b_{-i})$ 是对分配给第 i 个 UE 的资源支付。

3.2 效用和资源评估功能验证

在本节中, 通过确认 PSP 拍卖的要求, 验证了式 (9) 中效用和资源评估功能的可行性, 描述了在给定对手配置文件的前提下, 根据分配的资源量 (a_i^{LTE}) 的效用和付款。对角线区域和矩形分别表示第 i 个 UE 的效用值和支付值。当式 (9) 中的效用函数为凹函数时, 基于 PSP 拍卖的资源分配机制保证了社会福利 $\sum_{i \in I} \theta_i(a_i^{\text{LTE}})$ 在 ε -Nash 均衡下最大化, 同时满足式 (1) 中给定的约束条件。式 (9) 的第二项, 即 $\tau_i(b)$, 是相对于 a_i^{LTE} 的非递减凸函数, 因为 $\tau_i(b)$ 的第一个推导表示为阶梯函数。因此, 为了保证 ε -Nash 均衡的存在, 资源估值函数必须是单调的、非递减的、凹的。

定理 1 式 (10) 中的资源估价 $\theta_i(\cdot)$ 是可微的, $\theta_i(0) = 0$, 随资源增加单调不递减, 且呈凹形。

证明: 通过组合式 (2) 和式 (16), $\theta_i(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}}$ 可以表示如下:

$$\begin{aligned} \theta_i(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} &= \text{PSNR}(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} - \\ &\text{PSNR}(0)|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} = 10 \cdot \beta \cdot \end{aligned} \quad (11)$$

$$\left[\ln \frac{Q_i^{\text{Wi-Fi}}}{q_i^{\text{Wi-Fi}} + Q_i^{\text{Wi-Fi}}} - \ln c_i^{\text{opt}}(q_i^{\text{LTE}}) + \ln c_i^{\text{opt}}(0) \right]$$

由于很难将 $\tilde{c}_i^{\text{opt}}(\cdot)$ 表示为闭合形式, 因此采用曲线拟合方法, 从经验上推导了估算模型 $\tilde{c}_i^{\text{opt}}(\cdot)$:

$$\tilde{c}_i^{\text{opt}}(\cdot)|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} = \gamma (q_i^{\text{Wi-Fi}} + Q_i^{\text{Wi-Fi}})^{\kappa} \quad (12)$$

其中, γ 和 κ 是模型参数。 $\theta_i(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}}$ 可近似表示为:

$$\begin{aligned} \theta_i(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} &\approx 10 \cdot \beta \cdot \left[\ln \frac{Q_i^{\text{Wi-Fi}}}{q_i^{\text{LTE}} + Q_i^{\text{Wi-Fi}}} - \right. \\ &\left. \ln(\gamma (q_i^{\text{Wi-Fi}} + Q_i^{\text{Wi-Fi}})^{\kappa}) + \ln(\gamma (q_i^{\text{Wi-Fi}} + Q_i^{\text{Wi-Fi}})^{\kappa}) \right] \\ &= 10 \cdot \beta \cdot (1 + \kappa) \cdot \left(\lg \frac{Q_i^{\text{Wi-Fi}}}{q_i^{\text{LTE}} + Q_i^{\text{Wi-Fi}}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

第一个导数 $\theta'_i(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}}$ 可计算为:

$$\begin{aligned} \theta'_i(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} &= \\ &= -\frac{10 \cdot \beta \cdot (1 + \kappa)}{\ln 10} \cdot \frac{1}{(q_i^{\text{LTE}} + Q_i^{\text{Wi-Fi}})} \end{aligned} \quad (14)$$

因为 β 为负, κ 为正, 所以在 $q_i^{\text{LTE}} \geq 0$ 中 $\theta'_i(q_i^{\text{LTE}}) > 0$ 。接下来, 通过以下方法获得 $\theta_i(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}}$ 的第二个导数:

$$\begin{aligned} \theta''_i(q_i^{\text{LTE}})|_{q_i^{\text{Wi-Fi}}=Q_i^{\text{Wi-Fi}}} &= \\ &= \frac{10 \cdot \beta \cdot (1 + \kappa)}{\ln 10} \cdot \frac{1}{(q_i^{\text{LTE}} + Q_i^{\text{Wi-Fi}})^2} \end{aligned} \quad (15)$$

同理, 在 $q_i^{\text{LTE}} \geq 0$ 中 $\theta''_i(q_i^{\text{LTE}}) < 0$ 。因此, 资源评估 $\theta_i(\cdot)$ 相对于分配的资源是可微的、单调的、不递减的、凹的。此外, $\theta_i(0) = 0$ 。

3.3 基于反馈的投标决策算法

为了确定第 i 轮的投标, 需要两种形式的反馈信息: $q_i^{\text{LTE}}[t-1]$, 表示第 1 轮请求的资源量; $a_i^{\text{LTE}}(b[(t-1)])$, 这是第 $t-1$ 轮分配的资源量。

假设所有参与者都是理性的和自私的, 以便根据以下规则最大化他们自己的效用。



规则 1 如果上一轮请求的资源被完全分配 (即 $q_i^{\text{LTE}}(b) = q_i^{\text{LTE}}$), 则 UE 不会在下一轮中减少请求的资源量。

规则 2 如果上一轮请求的资源没有完全分配 (即 $a_i^{\text{LTE}}(b) = q_i^{\text{LTE}}$), 则 UE 不会在下一轮增加请求的资源量。

规则 3 UE 提交了真实的投标书, 反映了个体的真实估价 (即 $p_i = \theta'_i(q_i^{\text{LTE}})$), 这是 PSP 主导策略。

规则 1 和规则 2 很容易利用矛盾原理进行证实。基于上述特性设计了该算法, 具体描述如下。

步骤 1 初始化系统参数 $T_{\text{blk}}^{\text{max}}$ 、 $\Pi_{\text{blk}}^{\text{max}}$ 、 ε 和 $b[0] = \emptyset$ 。

步骤 2 在第 $t=1$ 轮, 每个 UE 初始化投标 $b_i[1] = (q_i^{\text{LTE}}[1], \theta'_i(q_i^{\text{LTE}}[1]))$, 其中 $q_i^{\text{LTE}}[1]$ 设定为 Q_i^{LTE} 。根据规则 3, p_i 可设定为 $\theta'_i(q_i^{\text{LTE}})$, 并跳转到步骤 4。

步骤 3 在第 $t \in \{2, 3, \dots\}$ 轮, 每个用户单元根据反馈信息更新其投标。如果请求的资源在第 $t-1$ 轮中完全分配 (即 $a_i^{\text{LTE}}(b[(t-1)]) = q_i^{\text{LTE}}[t-1]$), 则转到步骤 3-1。否则, 转到步骤 3-2。

步骤 3-1 根据规则 1, UE 不会减少请求的资源量。第 t 轮中的投标 $b_i[t] = (q_i^{\text{LTE}}[t], \theta'_i(q_i^{\text{LTE}}[t]))$ 由 $q_i^{\text{LTE}}[t] = q_i^{\text{LTE}}[t-1]$ 确定。这意味着 UE 连续使用上一轮投标, 而不产生投标费用。然后转到步骤 4。

步骤 3-2 根据规则 2, UE 不会增加请求的资源量。第 t 轮的投标 $b_i[t] = (q_i^{\text{LTE}}[t], \theta'_i(q_i^{\text{LTE}}[t]))$ 可利用式 (16) 确定:

$$q_i^{\text{LTE}}[t] = \begin{cases} q_i^{\text{new}}, \theta_i(q_i^{\text{new}}) - \theta_i(q_i^{\text{LTE}}(b[t-1])) > \varepsilon \\ q_i^{\text{LTE}}[t-1], \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} q_i^{\text{new}} &= a_i^{\text{LTE}}(b[(t-1)]) + \\ &\omega_i \cdot (q_i^{\text{LTE}}[t-1] - a_i^{\text{LTE}}(b[t-1])) \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\omega_i (0 \leq \omega_i \leq 1)$ 是加权因子。用户将发送一个出价, 只要它提高了目前的效用。

步骤 4 如果 UE 当前的所有投标文件与之前的投标文件相同 (即 $b[(t)] = b[(t-1)]$), 则在达到 ε -Nash 平衡的前提下终止该过程。否则, ANDSF 会计算出发送给 UE 的 $a_i^{\text{LTE}}(b[t])$ 。更新反馈信息后, 转到步骤 3 继续下一轮拍卖。

3.4 收敛性分析

本节将从理论上分析该算法的收敛性, 即所有参与方都达成一致。如果博弈过程在分歧点结束, 部分 UE 会收到不公平的资源分配, 这可能导致严重的 QoE 下降。因此, 收敛性是拍卖博弈中最重要的因素之一。现在证明, 投标资料 b 在有限数量的谈判回合中收敛。

定理 2 在所提基于反馈的投标决策算法中, 投标文件 b 在 $O(\sum_{i \in I} Q_i^{\text{LTE}} - R/\theta_i^{-1}(\varepsilon))$ 轮中收敛。

证明: 在博弈过程中, 请求的资源量可以分为两种情况: $\sum_{i \in I} q_i^{\text{LTE}}[t-1] \leq R$; $\sum_{i \in I} q_i^{\text{LTE}}[t-1] > R$ 。在所提出的算法中, 每种情况下的 UE 在第 t 轮中确定其出价, 如下所示。

(1) $\sum_{i \in I} q_i^{\text{LTE}}[t-1] < R$: 从所有 UE 请求的数据分组数已完全分配, 此时等式 $q_i^{\text{LTE}}[t] = q_i^{\text{LTE}}[t-1]$ 成立, 算法被终止。

(2) $\sum_{i \in I} q_i^{\text{LTE}}[t-1] > R$: 至少存在一个 UE, 其中部分分配了请求的数据分组数。此时 $q_i^{\text{LTE}}[t]$ 可计算为:

- 若条件等式 $a_i^{\text{LTE}}(b[t-1]) = q_i^{\text{LTE}}[t-1]$ 成立, 则 $q_i^{\text{LTE}}[t] = q_i^{\text{LTE}}[t-1]$;
- 若条件等式 $a_i^{\text{LTE}}(b[t-1]) < q_i^{\text{LTE}}[t-1]$ 成立, 则 $q_i^{\text{LTE}}[t] \leq q_i^{\text{LTE}}[t-1]$ 。

那么如果 $a_i^{\text{LTE}}(b[t-1]) < q_i^{\text{LTE}}[t-1]$, 如果能通过 ε 提高当前的效用, 则 UE 会减少 $q_i^{\text{LTE}}[t]$ 。在每一轮中, 必须至少存在一个 UE, 以便 $q_i^{\text{LTE}}[t] \leq q_i^{\text{LTE}}[t-1]$ 成立。因此, 从第 t 轮中的所有 UE 请求的数据分组数总是小于第 $t-1$ 轮中的数

据分组数。进而可得, 序列 $\{\sum_{i \in I} q_i^{\text{LTE}}[t]: t \geq 1\}$ 逐渐减小, 从而在 $O((\sum_{i \in I} Q_i^{\text{LTE}} - R)/\theta_i^{-1}(\varepsilon))$ 轮中收敛。

4 实验分析

4.1 实验设置

本节实验中设置的实验环境主要是采用 MPEG-DASH 标准所构建的, 利用手机作为模拟节点进行数据视频流传输实验, 平台的搭建环境是 C/C++ 语言, 利用无线网从基础层面构建独立运行的并行存在的 TCP 会话线程, 用于算法模拟。MPD 内嵌有视频流数据的失真参数, 使用的实验模拟数据是 DASH 测试集。为了保证实验质量, 本文在实验过程中选取的是全高清的高品质测试视频, 同时允许观众可以同一时刻观看多组不同的视频。每个视频测试对象的总时长是 93 s, 播放测试时间设定成 3 s。实验参数设定见表 1。

表 1 实验参数

参数	取值
视频流压缩方法	H.264/MPEG-4 AVC
分辨参数	1 920×1 080
比特参数	1/2/3/5/8 Mbit/s
模式	1-Pass
速率	24 fps
后缀	.mp4

在应用端, 设定视频缓冲的最大时间参数是 $T_{\text{buf}}^{\text{max}} = 15 \text{ s}$, 同时设定算法运行开始过程的视频缓冲时间参数是 $N_{\text{seg}}^{\text{max}} = 4 \text{ s}$ 。视频流缓冲过程的数据分组规模是 $S_{\text{pkt}} = 1460 \text{ byte}$, 缓冲参数 χ 取值为 0.8。视频播放过程中损耗的通信网络的传输成本是 $\text{MC}_{\text{mnt}}^{\text{max}} = 187.5 \text{ KRW/min}$ 。另外, 给出如下参数设定: $N_{\text{net}} = 2$, $N_{\text{qit}} = 5$, $k = 0.125$, $\chi = 0.9$, $T_{\text{seg}} = 2$ 。

实验平台模型如图 4 示, 实验模型中设定了两条视频流传输路径, 分别是采用 WLAN 传输的路径 1 和采用 LTE 传输的路径 2。实验手机选取

华为荣耀 Note10, 电池电量总值是 5 000 mAh。为了实时对手机电池电量的测量, 采用图 4 所示的检测器模块进行检测, 该模块的生产厂商是美国的 Monsoon Solutions 公司。荣耀 Note10 手机的 LTE-A 网络模式无法接收非连续的视频流数据。为了验证所提算法的性能, 选取 4 种对比算法进行实验结果对比验证。

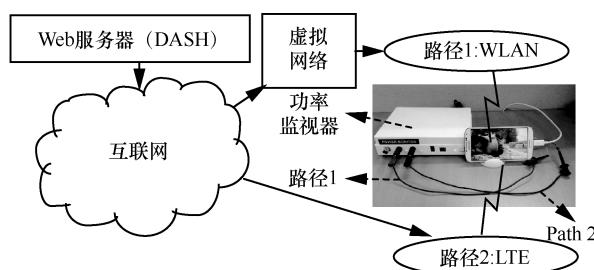


图 4 测试平台

(1) 视频流的均等投影策略 (OP-PEA): 基于 π 、 t 和 s 优化策略, 并结合所提视频流优化算法对播放器视频流分布和时间参数 t 迭代优化。

(2) 考虑随机分布视频流的均等投影方法 (RP-PEA): 该方法对于手机位置设定采用随机设定, 任何 n 个服务器被选取用于传输和处理文件, 并且这些服务器选取的概率相等。同时, 对于选取的视频流处理服务器, 令 $t_i = 0.01$, $\forall i$ 和 $j \in \mathcal{S}_i$, 同时设定 $\pi_{i,j} = k/n$ 。最后, 基于所提视频流优化分配算法对对象服务器的视频流传输处理时间 t 进行优化。

(3) 服务速率布局优化方法 (OP-PSP): 基于联合调度方式对连接的视频流的服务速率指标进行确定, 即 $\pi_{i,j} = k_i \mu_j / \sum_j \mu_j$ 。通过设定的接入概率指标取值, 可实现在 t 以及布局指标 $\mathcal{S}$ 上, 对持续失速时间及其尾概率指标的定义优化。

(4) 采取随机分布的 PSP 策略 (RP-PSP): 同前面的 OP-PSP 视频流分布策略相比, RP-PSP 视频流分布策略将视频块均匀存放在服务器中, 并通过辅助指标 t 进行失速持续时间尾概率指标



的优化计算。

4.2 失速时间优化

设置 $\theta=1$ 的目的是实现视频流传输的停顿时间最小化,可忽略停顿时间尾概率指标参数。对本文算法和选取的集中对比算法进行实验对比,结果如图 5 所示。

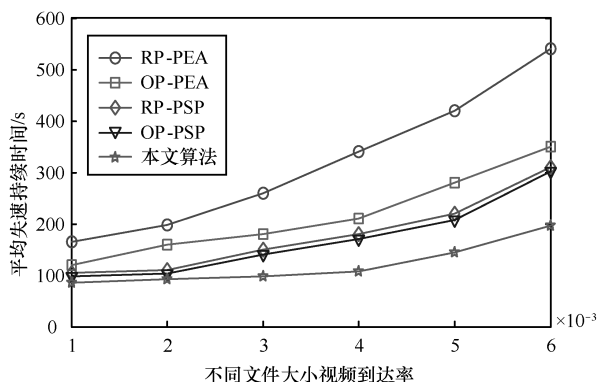


图5 失速持续时间实验对比

从图 5 所示实验结果看,失速持续时间对于观众的视频观看质量具有直接表征作用,本文算法在保证观众观看视频感官质量上要显著的优于选取的对比算法。同时,从实验结果看,几种算法的失速持续时间指标均随着视频到达率指标的增加而增加,这表明此时的视频观看质量是显著降低的。在视频到达率达到设定最大值时,本文算法相对于选取的对比算法失速持续时间指标降低了 260~680 s,视频观看质量提升幅度明显。

4.3 失速尾概率实验分析

设置 $\theta=0$ 的目的是实现视频流传输的失速持续最小化,即 $P(\Gamma^{(i)} \geq x)$ 最小化。图 6 所示是考虑时间衰减问题的失速时间指标评价情况。同时为了更加清晰的对比不同策略之间的优劣,采取对数刻度对失速时间评价指标差异进行放大。

根据图 6 所示失速持续尾概率指标实验对比结果,同选取的对比算法相比,本文算法在失速持续尾概率指标上具有较为显著的优势,特别是随着时间指标的增加,本文的优势逐渐增大,体现出了较强的算法性能优势。同时随着时间的增

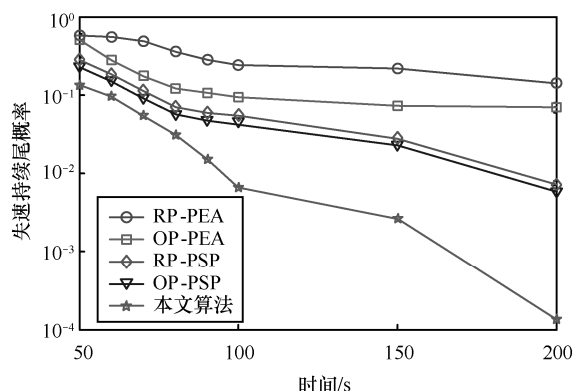


图6 失速持续尾概率指标实验对比

加失速持续尾概率指标呈现出逐渐降低的趋势,这表明网络自身具有一定的自我修复能力,可逐步改善视频流的观看质量。

4.4 能耗实验

实验过程中,采用的是手机模拟用户节点的方式,具有一定的电池电量限制,为了评价这种电量消耗的速度,这里对实验过程进行设计,分别设定 1~12 h 区间内每 3 个小时为一个测试点,对手机电池的消耗比例进行记录,实验对比结果见表 2。

表2 能耗对比

播放时间	本文算法	OP-PEA	RP-PEA	OP-PSP	RP-PSP
1 h	9.3%	10.6%	11.2%	13.2%	15.2%
3 h	30.2%	33.5%	34.6%	36.7%	46.5%
6 h	55.7%	58.9%	59.7%	62.3%	72.9%
9 h	80.2%	84.3%	86.4%	89.7%	95.3%
12 h	93.2%	95.9%	98.7%	99.2%	100%

根据表 2 所示能耗实验结果,随着播放时间的增加集中算法的剩余电池电量均单调下降,但是在电量的消耗速度上,本文算法的电池电量剩余比例要高于选取的几种对比算法,这表明本文算法在节省电池电量上具有较为显著的优势,采用本文算法的手机模拟节点可实现更长时间的续航。

假设每个噪声或信道系数分布为 $\mathcal{CN}(0,1)$ 。选取参考文献[16]算法以及 OP-PEA 算法作为对比

算法, 评估指标选取数据传输速率与信号发射功率之间的比值, 参考文献[16]算法参数设置参见相关参考文献。实验对比结果如图7所示。

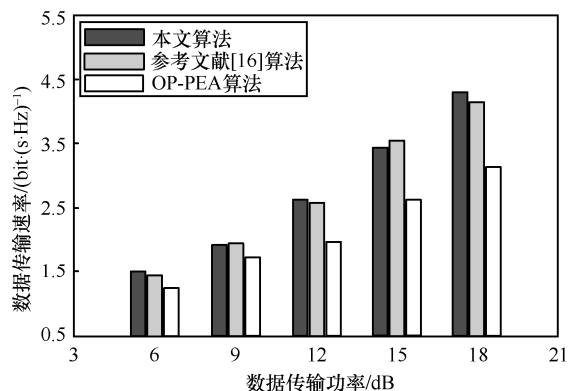


图7 数据传输能耗效率对比

根据图7所示结果, 在数据传输能耗效率对比上, 本文算法相对于参考文献[16]算法略有差距, 但是两者相差不大, 两者相对于OP-PEA算法在数据传输速率与信号发射功率之间的比值具有显著的优势, 这表明两种算法的数据传输能耗效率更高。参考文献[16]算法是一种有效的处理算法, 这也从侧面验证了所提算法在数据传输能耗效率上的优势。

5 结束语

本文提出了一个博弈理论的可扩展卸载的LTE和Wi-Fi网络视频流服务。该系统的一个重要特点是, 通过LTE和Wi-Fi网络实现视频流流量的可扩展卸载, 而不会出现任何明显的视频质量下降。采用了PSP拍卖机制, 有效地将有限的LTE资源分配给UE。此外, 由于喷泉码可以灵活地调整卸载流量, 解决易出错的异构无线网络中的分组重排序和分组丢失问题, 因此部署喷泉码可以同时通过不同特性的LTE和Wi-Fi网络传输视频流量。与现有的投标决策算法相比, 本文提出的基于反馈的投标决策算法在实现真实的Nash均衡的同时, 具有较快的收敛性。仿真结果表明, 该系统通过Wi-Fi网络可扩展的卸载, 有效地缓

解了LTE的流量拥塞, 并提供了比现有系统更高质量的视频流服务。

最近, 一种基于软件定义网络(SDN)的5G蜂窝网络体系结构被提出, 以开发一种可编程的移动蜂窝网络, 使其在管理和配置方面具有更大的灵活性, 从而克服了传统无线网络的缺点。通过部署新兴的SDN技术, 大部分LTE EPC功能实体可以迁移到控制器的应用层。此外, 新的应用程序或高级功能将很容易在没有特定硬件支持的软件中实现。在支持SDN的无线环境下, 我们将构建视频流的移动数据卸载问题, 以优化网络利用率和应用程序性能, 并增强用户体验。因为本文算法采用的是博弈协同机制, 主要研究对象是长期演进(LTE)和Wi-Fi网络同时传输的数据协同问题, 其与协作通信具有一定的机理相似性, 本文算法可拓展到该研究领域, 这是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 吴冀衍, 程渤, 南国顺, 等. 面向异构无线网移动视频传输的联合信源信道编码方式[J]. 计算机学报, 2015, 38(2): 439-454.
WU J Y, CHENG B, NAN G S, et al. A novel joint source-channel coding scheme for mobile video delivery in heterogeneous wireless network[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(2): 439-454.
- [2] STAELENS N, MEULENAERE J D, CLAEYS M, et al. Subjective quality assessment of longer duration video sequences delivered over http adaptive streaming to tablet devices[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2014, 60(4): 707-714.
- [3] VISWANATHAN H, VLEESCHAUWER D D, BECK A, et al. Mobile video optimization at the base station: adaptive guaranteed bit rate for HTTP adaptive streaming[J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 18(2): 159-174.
- [4] CHEN C, CHOI L K, VECIANA G D, et al. Modeling the time-varying subjective quality of HTTP video streams with rate adaptations[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(5): 2206-2221.
- [5] ESSAILI A E, SCHROEDER D, STEINBACH E, et al. QoE-based traffic and resource management for adaptive HTTP video delivery in LTE[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 25(6): 988-1001.



- [6] LI Z, ZHU X Q, GAHM J S, et al. Probe and adapt: rate adaptation for HTTP video streaming at scale[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(4): 719-733.
- [7] XIAHOU J B, LIN F, HUANG Q H, et al. Multi-datacenter cloud storage service selection strategy based on AHP and backward cloud generator model[J]. Neural Computing and Applications, 2018, 29(1): 71-85.
- [8] HOVHANNISYAN H, QI W, LU K J, et al. Whispers in the cloud storage: a novel cross-user deduplication-based covert channel design[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2018, 11(2): 277-286.
- [9] JUNG K D, MOON S J, KIM J M. Data access control method for multimedia content data sharing and security based on XMDR-DAI in mobile cloud storage[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(19): 19983-19999.
- [10] MUTHURAJKUMAR S, VIJAYALAKSHMI M, KANNAN A. Secured data storage and retrieval algorithm using map reduce techniques and chaining encryption in cloud databases[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(4): 5621-5633.
- [11] SHIN Y J, KOO D Y, HUR J B, et al. Secure proof of storage with deduplication for cloud storage systems[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(19): 19363-19378.
- [12] LI C T, LEE C W, SHEN J J. An extended chaotic maps-based keyword search scheme over encrypted data resist outside and inside keyword guessing attacks in cloud storage services[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80(3): 1601-1611.
- [13] LI C G, YANG H J, SUN F, et al. Adaptive overhearing in two-way multi-antenna relay channels[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(1): 117-120.
- [14] 马思伟, 罗法蕾, 黄铁军. AVS2 视频编码标准技术特色及应用[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 3-15.
- MA S W, LUO F L, HUANG T J. Kernel technologies and applications of AVS2 video coding standard[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 3-15.
- [15] 董振江, 张东卓, 黄成, 等. 虚拟现实视频处理与传输技术[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 45-52.
- DONG Z J, ZHANG D Z, HUANG C, et al. Technology of virtual reality video processing and streaming[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 45-52.
- [16] 周建同, 杨海涛, 刘东, 等. 视频编码的技术基础及发展方向[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 16-25.
- ZHOU J T, YANG H T, LIU D, et al. Trends and technologies of video coding[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 16-25.

[作者简介]



葛茜倩(1982—),女,浙江工商职业技术学院副教授,主要研究方向为视频编码、Wi-Fi 室内定位。