

文章编号:1007-5321(2020)03-0083-09

DOI:10.13190/j.jbupt.2019-133

无人机辅助 5G 网络中基于合同的缓存租赁机制

王 敏, 张碧玲

(1. 北京邮电大学 网络教育学院, 北京 100876; 2. 西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 西安 710071)

摘要: 为了缓解回程链路的压力, 移动网络运营商(MNO)在其宏基站(MBS)覆盖范围内的热点地区上方灵活部署具有缓存能力的无人机(UAVs)作为空中基站. 此外, 多个内容提供商(CPs)渴望租用 MBS 和 UAVs 的缓存空间以主动缓存其流行视频, 从而降低订阅用户的服务时延. 但每个 CP 租赁缓存空间的意愿程度是私有的, 这导致 MNO 和 CPs 间的信息不对称. 为了解决此问题, 提出了基于合同理论的缓存资源租赁机制以最大化 MNO 的效用. 理论上推导出了合同的可行条件, 继而将目标优化问题放松为凸规划问题, 采用 KKT 条件求得缓存租赁的最优合同. 仿真结果验证了所提出的无人机辅助第 5 代移动通信系统(5G)网络缓存租用机制的有效性, 并讨论了 UAVs 的飞行高度对系统性能的影响.

关键词: 无人机; 缓存租赁; 信息不对称; 合同理论; 5G 网络

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

Contract-Based Cache Renting Mechanism in UAV-Assisted 5G Networks

WANG Min, ZHANG Bi-ling

(1. School of Network Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. The State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To alleviate the load of the backhaul link, a mobile network operator (MNO) temporarily deploys cache-enabled unmanned aerial vehicles(UAVs) as aerial base stations to offload the traffic from a macro base station (MBS). While several content providers (CPs) desire to rent the cache space at both the MBS and UAVs to proactively place their popular videos so that their subscribers can receive low-latency services. However, the willingness for cache renting is privately for each (CP), resulting in asymmetric information between the MNO and CPs. To overcome this problem, the contract theory is exploited to formulate the cache renting problem and to maximize the utility of MNO. The feasible conditions for the contract are derived, and the target optimization problem is relaxed to the convex programming problem. Finally, the KKT condition is utilized to solve the optimal contract for the cache renting. Experiments validate the effectiveness of the proposed cache renting mechanism in UAV-assisted the 5th generation of mobile communications system(5G) networks, and the influence of UAVs' flight altitude on system performance is discussed.

Key words: unmanned aerial vehicles; cache renting; asymmetric information; contract theory; 5G networks

收稿日期: 2019-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61501041); 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室开放课题项目(1SN19-19)

作者简介: 王 敏(1994—), 女, 硕士生.

通信作者: 张碧玲(1978—), 女, 副教授, 硕士生导师, E-mail: bilinzhang@bupt.edu.cn.

随着移动设备和社交多媒体业务的迅速发展,移动数据流量呈指数增长趋势。为了满足高度多样化在线数据流的需求,超密集小基站和边缘缓存的部署已成为第5代移动通信系统(5G, the 5th generation of mobile communications system)的2种前景技术^[1]。前者拉近基站和用户的距离,从而提高了频谱效率和网络容量。后者通过在本地铁站缓存流行视频以大幅减少视频传输时延,同时减轻了回程链路压力^[2]。

目前,主动缓存已经成为无线网络中的研究热点。Le等^[3]提出了一种新的无线网络切片缓存分区和定价机制。Guo等^[4]研究了完全合作的缓存情况,集中器协助所有基站进行缓存决策。然而,现有的研究工作大多数局限于地面固定基站中的缓存设计,对于涉及临时热点、移动用户以及突发数据需求的场景,上述工作可能不合适或者成本效率低。与传统的地面基站相比,无人机具有部署灵活性、移动性以及空对地良好的信道特性等优势^[5]。因此,灵活部署具有缓存能力的无人机是动态缓存流行视频并有效地为突发热点区域中的移动用户提供高质量服务的完美解决方案。此外,用户热点检测在无人机的部署中起着至关重要的作用^[6]。基于移动用户的实时位置信息,移动运营商可以根据检测的用户热点及时调整 UAV 的位置,以覆盖尽可能多的用户。当热点区域中的业务大幅度减少,无人机将被迅速召回。

考虑一个由多个内容提供商(CPs, content providers)和一个移动网络运营商(MNO, mobile network operator)组成的商业化缓存租赁市场。MNO拥有一个具有缓存能力的宏基站(MBS, macro base station),且在该MBS的覆盖范围内检测到的热点上方临时部署多个具有缓存使能的UAVs。因此CPs可以在MBS和UAVs处租用缓存空间以本地存储流行视频,然后通过为其订阅用户提供低延迟服务来获利,而MNO则通过将缓存空间租赁给CPs来获利。虽然缓存资源共享既能缓解回程链路的压力又能降低用户获取内容的时延,但MNO和CPs的自私性以及两方的利益冲突性,引发了缓存租赁市场中的作弊和竞争问题。此外,缓存空间租用的意愿对于每个CP是私有的,这导致MNO和CPs之间的信息不对称。实际上,理性的CPs拒绝透露他们的私有信息,并且倾向于欺骗MNO以更低的价格租用更大的缓存空间。

合同理论^[7]能够有效地设计非对称信息情景下经济参与者之间的激励机制。基于合同理论,Li等^[8-10]研究了无线通信网络架构下的经济缓存。然而,这些工作要么缺乏CPs类型的具体定义,要么忽略了不同CPs之间流行视频分布的差异,导致区分CPs之间缓存租用意愿的无效性,恶化了MNO的效用。此外,合同理论尚未应用于设计激励机制以促进无人机辅助网络中的缓存租用。

因此,提出了无人机辅助5G网络中MNO的缓存租用机制。利用具有噪声的基于密度的空间聚类(DBSCAN, density-based spatial clustering of applications with noise)算法^[6],MNO检测用户热点并实现缓存使能的UAV的准确部署。将缓存租用问题建模为合同制定模型,其中MNO针对每种类型的CP设计最优的缓存空间(MBS和UAVs)比例以及相应的租金以最大化其效用。特别地,将视频流行度分布和流量负载聚合为CPs类型的封闭表达式,且受个人理性(IR, individual rational)和激励相容(IC, incentive compatible)约束每个内容提供商将选择与其类型匹配的合同项。从理论上推导出了合同的可行条件,继而将目标优化问题放松为凸规划问题,最后采用KKT(Karush Kuhn Tucker)条件求得缓存租赁的最优合同。仿真结果验证了所提出的方案有效地提高了MNO的效用,并激励CPs选择与其类型匹配的合同,且在UAVs的最优飞行高度下,系统性能达到最优。

1 系统模型

缓存租赁网络系统如图1所示,包括一个MNO、 K 个CPs,以及MNO的某个MBS覆盖范围内的 U 个移动用户,且CPs集和用户集分别记作 \mathcal{K} 和 \mathcal{U} 。基于移动用户的位置信息,MNO通过DBSCAN算法^[6]检测到此MBS覆盖范围内存在 N 个热点区域。为减缓回程链路的压力,MNO灵活地在每个热点的中心上方部署一台具有缓存能力的UAV,并通过回程链路的核心网相连。假设部署的 N 台UAV均悬停在相同的合法高度 H ,并且MNO在下一个时段之初可以调整它们的水平位置,以服务尽可能多的移动用户。

假设所有视频文件的大小相同,均为 s bit。MBS和每个UAV分别具有 Q_M 和 Q_U 个视频文件的缓存容量。根据自身的视频流行度分布和流量负载,CPs与MNO协商在MBS和UAVs处租用一定比

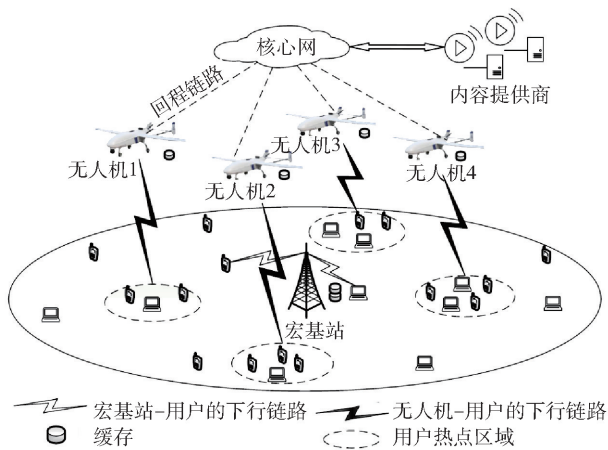


图1 缓存租赁网络系统

例的缓存空间以主动缓存流行视频,从而为其订阅用户提供低时延服务。此外,MNO通过设计最优合同 (φ, T) ,即(缓存比例,租金)合同集,旨在最大化每个时段内的收益。

1.1 信道模型

频谱资源很大程度上影响着无人机对热点地区的流量卸载性能。假设总的带宽资源为 B ,由 UAV 集 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 和 MBS 共享,且以正交的方式均匀分配给其关联用户。因此,每个 UAV 用户接收到的信号会受其他 UAV 和 MBS 的干扰,而 MBS 的用户接收到的信号会受所有 UAV 的干扰。

1.1.1 无人机与用户间的信道

无人机和移动用户之间的空对地无线通信信道主要由视距链路(LoS, line of sight)和非视距链路(NLoS, none-line of sight)两部分组成^[5],其中 LoS 链路的传播概率为

$$P_{\text{LoS}}(\delta) = \frac{1}{1 + a \exp(-b[\delta - a])} \quad (1)$$

其中: a 和 b 是由环境(如市区郊区等)的常数; $\delta = \frac{180}{\pi} \times \sin^{-1}\left(\frac{H}{d}\right)$ 为用户与 UAV 的仰角(以度为单位), d 为无人机与用户之间的距离, H 为无人机的飞行高度。那么,UAV 到用户的平均路径损耗可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{L}_U(d) &= P_{\text{LoS}}(\delta) L_{\text{LoS}}(d) + [1 - P_{\text{LoS}}(\delta)] L_{\text{NLoS}}(d) \\ L_{\text{LoS}}(d) &= (4\pi f d / c)^2 \eta_{\text{LoS}} \\ L_{\text{NLoS}}(d) &= (4\pi f d / c)^2 \eta_{\text{NLoS}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中: f 为信道载波频率, c 为光速; $L_{\text{LoS}}(d)$ 和 $L_{\text{NLoS}}(d)$ 分别是 LoS 和 NLoS 的链路损耗; η_{LoS} 和

η_{NLoS} 是取决于环境的平均附加损耗。

因此,用户 i 从 UAV n 处接收到的信干噪比(SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio)为

$$\gamma_U^{ni} = \frac{P_{r,U}^{ni}}{\sum_{n' \in \mathcal{N} \setminus n} P_{r,U}^{n'i} + P_{r,M}^i + \sigma^2} \quad (3)$$

其中: $P_{r,U}^{ni}$ 表示用户 i 从 UAV n 接收的信号功率, $\sum_{n' \in \mathcal{N} \setminus n} P_{r,U}^{n'i}$ 和 $P_{r,M}^i$ 分别表示用户 i 从其他 UAVs 处和 MBS 处接收的干扰信号功率, σ^2 为高斯噪声的方差。具体地, $P_{r,U}^{ni} = P_U / \bar{L}_U(d_{ni})$,这里 P_U 为 UAV 的发射功率且假设所有的 UAVs 的发射功率一致, $d_{ni}(n \in \mathcal{N})$ 为用户 i 与 UAV n 间的距离。

1.1.2 宏基站与用户间的信道

由于地面宏基站和用户之间存在高楼大厦等地面建筑物的遮挡,所以两者间的下行信道仅考虑 NLoS 链路。那么,用户 i 从 MBS 处接收到的 SINR 可以表示为

$$\gamma_M^i = \frac{P_{r,M}^i}{\sum_{n \in \mathcal{N}} P_{r,U}^{ni} + \sigma^2} \quad (4)$$

其中: $P_{r,M}^i$ 表示用户 i 从 MBS 接收到的信号功率, $\sum_{n \in \mathcal{N}} P_{r,U}^{ni}$ 为用户 i 从所有 UAVs 处接收到的干扰信号功率。具体地, $P_{r,M}^i = P_M / \bar{L}_M(d_{0i})$,其中 $\bar{L}_M(d_{0i}) = (4\pi f d_{0i} / c)^2 \eta_{\text{NLoS}}$ 表示 MBS 到用户的平均路径损耗, P_M 为 MBS 的传输功率, d_{0i} 表示用户 i 到 MBS 间的距离。

1.1.3 用户关联模型

假设每个用户可以在 MBS 和 N 台 UAVs 中自主选择接入以获得最佳的 SINR 通信服务。因此,有必要找出某个 UAV 在哪个区域能够提供比其他 UAVs 或 MBS 更好的 SINR,并且将某个 UAV 能提供最好 SINR 的区域记作该 UAV 的有效卸载区域。同时,将由 MBS 或 UAV n 服务的用户集分别记作 \mathcal{U}_0 和 $\mathcal{U}_n(n \in \mathcal{N})$,且满足 $\mathcal{U}_0 \cup_{n \in \mathcal{N}} \mathcal{U}_n = \mathcal{U}$ 。

根据式(3)、式(4),用户 i 接收到的数据速率为

$$R_{ni} = \frac{B}{|\mathcal{U}_n|} \log[1 + \gamma(d_{ni})] \quad (5)$$

其中: $n=0$ 表示用户 i 由 MBS 服务, $\gamma(d_{0i}) = \gamma_M^i$; $n \in \mathcal{N}$ 表示用户 i 由 UAV n 服务, $\gamma(d_{ni}) = \gamma_U^{ni}$ 。

1.2 内容提供商

CPs 租用缓存空间的意愿度主要取决于其视频流行分布和流量负载,这些信息是每个 CP 私有的,

MNO 不能轻易获取. 由于视频库、营销策略和推荐策略^[11]不同,不同 CPs 的视频流行度分布和用户负载(订阅用户数量)存在差异. 基于上述 2 种因素,CPs 对租用缓存空间有不同的激励水平.

1.2.1 视频的流行度

假设所有 CPs 有自己的视频库,且对于 CP_k , $\forall k \in \mathcal{K}$,其视频库由 L 个视频组成,按照流行度降序排列,记为 $\mathcal{V}_k = \{\nu_{1k}, \nu_{2k}, \dots, \nu_{Lk}\}$. 所有的视频有相同的大小. 通常,视频的请求频率越高,此视频就越受欢迎. 如文献[12]中所采用的,下面将视频的请求建模为齐夫分布,则 CP_k 的第 l 排名视频的流行度表示为

$$p_{kl} = \frac{l^{-\alpha_k}}{\sum_{j=1}^L j^{-\alpha_k}}, \forall l \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (6)$$

其中 $0 < \alpha_k < 1$ 反映了用户对 CP_k 的视频请求的集中程度, α_k 越大意味着视频请求更集中于高排名的视频. 根据齐夫定律,流行度越高的视频可以为 CP 带来更大的价值,因此可以定义 CP_k 的第 l 排名视频的潜在价值与其请求概率成正比,即

$$w_{kl} = \eta p_{kl} = \eta \frac{l^{-\alpha_k}}{\sum_{j=1}^L j^{-\alpha_k}}, \forall l \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (7)$$

其中 η 为常数. 则 CP_k 所有视频的期望价值为

$$\bar{w}_k = \sum_{l=1}^L w_{kl} p_{kl} = \sum_{l=1}^L \eta \left(\frac{l^{-\alpha_k}}{\sum_{j=1}^L j^{-\alpha_k}} \right)^2, \forall k \in \mathcal{K} \quad (8)$$

式(8)对 α_k 求导,得 $\bar{w}'(\alpha_k) > 0$,表明视频请求集中度越高(α_k 越大)的 CP,其视频的期望价值越高.

1.2.2 用户负载

由于 CPs 提供的视频质量、视频种类和收费标准不同,用户对 CPs 的偏好呈现出多样性. 因此,一些 CPs 比其他 CPs 拥有更多的订阅用户. 假设用户在 CPs 之间的订阅分布为 $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, \dots, q_K\}$,其中 $q_k, \forall k \in \mathcal{K}$,表示用户订阅 CP_k 的概率.

1.2.3 内容提供商类型

本研究提出对 CP 的类型进行具体定义,旨在充分刻画 CP 租用缓存空间的意愿度.

定义 1 根据视频流行度分布 α_k 和用户负载 q_k 确定 CP_k 的类型为

$$\theta_k = q_k \bar{w}_k = q_k \sum_{l=1}^L \eta \left(\frac{l^{-\alpha_k}}{\sum_{j=1}^L j^{-\alpha_k}} \right)^2 \quad (9)$$

注意,式(9)中的定义是合理的,并且表明较大的 CP 类型 θ_k ,也即较大的 α_k (更集中的视频请求)和较高的 q_k (更高的用户负载),代表着该 CP 更渴望从 MNO 租用更多的缓存空间,以本地化服务更多的用户并获得更多利润.

根据定义 1,集合 \mathcal{K} 中的每个 CP 都属于 K 类型之一,按降序排列: $\theta_1 > \dots > \theta_k > \dots > \theta_K, k \in \mathcal{K}$.

2 基于合同的缓存租赁问题建模

理性的 CPs 拒绝透露私人类型并趋向于欺骗 MNO 从而能够以更低的租金租赁到更多的缓存空间. 面对信息不对称问题, MNO 必须制定合同集 $\Phi = \{(\varphi_k, T_k), \forall k \in \mathcal{K}\}$,通过收取与其类型匹配的租金来激励 CP 真实地租用缓存空间. 具体地,合同项目 (φ_k, T_k) 为 θ_k 类型 CP 而制定,其中 φ_k 表示 MBS 和 N 个 UAVs 上租赁给该类型 CP 的缓存空间的比例, T_k 是相应的租金,且随着 φ_k 增大而增大.

2.1 CPs 的效用

通过租用 φ_k 比例的 MNO 缓存空间, θ_k 类型的 CP 可以分别在 MBS 和每个 UAV 上缓存 $\varphi_k Q_M$ 和 $\varphi_k Q_U$ 流行视频文件,继而为请求这些已缓存视频的用户提供本地化服务,降低服务时延. 因此,将 θ_k 类型 CP 的效用定义为

$$U_k = \sum_{n=0}^N \sum_{i \in \mathcal{U}_n} \theta_k \varphi_k Q_n R_{ni} - T_k \quad (10)$$

其中:第 1 个求和项代表 θ_k 类型的 CP 在 MBS ($n=0$) 和 N 个 UAV ($n \in \mathcal{N}$) 上租用缓存空间的价值评估函数,即 θ_k 类型的 CP 从本地服务用户的总速率中获得的期望效益,亦可反映降低传输时延获得的

收益. 简便地,记作 $Q = \sum_{n=0}^N \sum_{i \in \mathcal{U}_n} Q_n R_{ni}$,则式(10)中 θ_k 类型 CP 的效用可以被重写为

$$U_k = \theta_k \varphi_k Q - T_k \quad (11)$$

2.2 MNO 的效用

虽然 MNO 不清楚每个 CP 的具体类型,但对 CP 为 θ_k 类型的先验概率 π_k 掌握一定的统计信息,其中 $\pi_k \in [0, 1]$, $\sum_{k \in \mathcal{K}} \pi_k = 1$. 那么, MNO 的期望效用可以表示为

$$U_{\text{MNO}} = \sum_{k=1}^K \pi_k [T_k - C(\varphi_k)] \quad (12)$$

其中 $C(\varphi_k) = c(\varphi_k) + C_0$ 表示 MNO 为 θ_k 类型的 CP 提供服务所花费的运营成本, C_0 是部署 UAV 的固

定成本, $c(\varphi_k)$ 是一个非负的缓存成本并随着缓存比例 φ_k 递增. 进一步假设 $c(\varphi)$ 在缓存比例较高的情况下比在缓存比例较低的情况下增长更快, 即 $c''(\varphi) > 0$.

2.3 合同建模

为了激励 CPs 租用缓存空间, 合同条款应满足 IR 约束, 即每种类型的 CP 通过接受与其类型匹配的合同条款能够确保得非负效用, 即

$$\theta_k \varphi_k Q - T_k \geq 0, \forall k \in \mathcal{K} \quad (13)$$

此外, θ_k 类型的 CP 只有选择与自己类型匹配的合同项 (φ_k, T_k) 才能获得最大效用, 而不会选择为其他类型设计的合同项 $(\varphi_{k'}, T_{k'})$, 因此合同必须满足 IC 约束, 即

$$\theta_k \varphi_k Q - T_k \geq \theta_k \varphi_{k'} Q - T_{k'}, \forall k, k' \in \mathcal{K}, k \neq k' \quad (14)$$

除了 IR 和 IC 约束外, 合同条款还需满足租赁缓存空间大小的容量限制, 另外 MBS 和 UAV 缓存的视频个数应为整数, 即

$$\sum_{k=1}^K \pi_k \varphi_k \leq 1 \quad (15)$$

$$\varphi_k Q_n \in \mathbb{N}, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \{0 \cup \mathcal{N}\} \quad (16)$$

然后, 最优合同设计问题可表示为 MNO 的效用最大化问题, 即

$$\begin{aligned} & \max_{\{(\varphi_k, T_k), k \in \mathcal{K}\}} \sum_{k=1}^K \pi_k [T_k - C(\varphi_k)] \\ & \text{s. t. } (13), (14), (15), (16), 0 \leq \varphi_k \leq 1 \end{aligned} \quad (17)$$

3 最优合同求解

接下来, 在解决式(17)中的问题之前, 需要简化 K 个 IR 和 $K(K-1)$ 个 IC 约束. 因此, 研究缓存租用策略的性质, 并提出了以下引理.

引理 1 问题(17)中的 IR 和 IC 约束可以简化为

- 1) $\varphi_K < \dots < \varphi_1$,
- 2) $T_K \leq \theta_K \varphi_K Q$,
- 3) $\theta_{k-1}(\varphi_k - \varphi_{k-1})Q < T_k - T_{k-1} < \theta_k(\varphi_k - \varphi_{k-1})Q, \forall k \in \{2, \dots, K\}$.

证明见附录 A. 在引理 1 中, 1) 和 2) 是 IR 约束的充分必要条件, 而 1) 和 3) 是 IC 约束的充分必要条件.

1) 暗示 MNO 必须为具有更高类型的 CP 提供更多的缓存空间. 对于 1), 如果最低类型 θ_K 的 CP 可以从交易中获得非负效用, 则所有其他高类型 CP 的

IR 约束将自动保持, 因此得到 2). 3) 表示如果 IC 约束在第 k 类型和第 $(k-1)$ 类型的 CP 间成立, 则第 k 类型和所有其他类型的 CP 间亦成立.

根据引理 1, 问题(17)就可以重新表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\{(\varphi_k, T_k), k \in \mathcal{K}\}} \sum_{k=1}^K \pi_k [T_k - C(\varphi_k)] \\ & \text{s. t. } 1), 2), 3), (15), (16), 0 \leq \varphi_k \leq 1. \end{aligned} \quad (18)$$

为了得出 MNO 的最佳交易策略, 首先去除缓存空间比例 φ_k 的单调性约束, 接着验证所获得的解是否满足该约束. 因此, 如定理 1 中所示, 可以通过求解问题(18)来获得最优租金策略 $T_k^*, k \in \mathcal{K}$.

定理 1 给定分配给每种类型 CP 的缓存空间比例, 即 $\varphi_k, \forall k \in \mathcal{K}$, MNO 对 θ_k 类型 CP 的最优租金策略应该为

$$T_k^* = \begin{cases} T_{k+1}^* + \theta_k(\varphi_k - \varphi_{k+1})Q, & \text{若 } k=1, 2, \dots, K-1 \\ \theta_k \varphi_k Q, & \text{若 } k=K \end{cases} \quad (19)$$

证明见附录 B.

此外, 将 $T_k^*, k \in \mathcal{K}$ 代入式(19), 可以得到租赁给每种类型 CP 的缓存空间的佳比例, 即 $\varphi_k^*, k \in \mathcal{K}$, 如定理 2 中所述.

定理 2 MNO 租赁给 θ_k 类型 CP 的最佳缓存空间比例, 即 φ_k^* , 应为

$$\varphi_k^* = \begin{cases} \frac{\pi_k \hat{\varphi}_k^* + \pi_{k+1} \hat{\varphi}_{k+1}^*}{\pi_k + \pi_{k+1}}, & \text{若 } \hat{\varphi}_k^* < \hat{\varphi}_{k+1}^* \\ \hat{\varphi}_k^*, & \text{若 } \hat{\varphi}_k^* \geq \hat{\varphi}_{k+1}^* \end{cases} \quad (20)$$

证明见附录 C. 此处 $\hat{\varphi}_k^*, k \in \mathcal{K}$, 是式(21)的解.

$$\left. \begin{aligned} & Z'_k(\varphi_k) + \lambda \pi_k + \lambda_k = 0, \forall k \in \mathcal{K} \\ & \lambda_k \varphi_k = 0, \forall k \in \mathcal{K} \\ & \sum_{k=1}^K \pi_k \varphi_k = 1 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

其中: $Z'_k(\varphi_k)$ 是 $Z_k(\varphi_k) = \pi_k \theta_k \varphi_k Q + \Lambda_k \sum_{i=1}^{k-1} \pi_i - \pi_k C(\varphi_k)$ 的一阶导数, 当 $k \in \{2, \dots, K\}$ 时, $\Lambda_k = \varphi_k Q(\theta_k - \theta_{k-1})$; 当 $k=1$ 时, $\Lambda_k = 0$. λ 和 λ_k 均为拉格朗日乘数.

对于式(16)中的约束, 在 MNO 将最优合同集 $\Phi = \{(\varphi_k^*, T_k^*), \forall k \in \mathcal{K}\}$ 分发给所有 CPs 前, 向下取整函数将应用于 $\varphi_k^* Q_M$ 和 $\varphi_k^* Q_U$, 使得每种类型的 CP 在 MBS 和每个 UAV 中的最佳缓存视频数量为整数.

4 仿真结果

在仿真中,存在 $K = 10$ 种类型的 CPs,且这些 CPs 的视频请求集中度参数按降序排列为 $\alpha = (0.55, 0.5, 0.45, 0.4, 0.35, 0.3, 0.25, 0.2, 0.15, 0.1)$,相应的用户负载分布为 $q = (0.18, 0.16, 0.14, 0.12, 0.1, 0.08, 0.07, 0.06, 0.05, 0.04)$. 无人机辅助网络系统相关的其他仿真参数的值如表 1 所示. 结合泊松点过程 (PPP, passion point process) 与泊松簇过程 (PCP, passion cluster process) 模拟宏基站 MBS 覆盖范围内用户分布. 然后根据最大移动距离为 10 m 的随机游走获取下一个时段中的用户分布,且通过 DBSCAN 算法^[6]检测 $N = 4$ 个热点区域,MNO 灵活地在每个热点的中心上方高度 H 处部署一台具有缓存能力的 UAV,并通过回程链路与核心网相连.

表 1 仿真参数

参数	值
环境参数 α 和 b	12.08 和 0.11
额外路径损耗 $\eta_{\text{LoS}}, \eta_{\text{NLoS}}$	1.6 和 23
MBS 覆盖半径/m	500
传输功率 P_{M} 和 P_{U}/W	20 和 0.1
下行链路信道频率 f/GHz	2.4
无人机的高度 H/m	200 ~ 300
信道带宽 B/MHz	20
高斯噪声的方差 σ^2/W	10^{-13}
无人机台数 N	4
CPs 的类型数量 K	10
MBS 和 UAV 的缓存容量 Q_{M} 和 Q_{U}	200 和 100
每个库中的视频数量 L	30
部署无人机的固定成本 C_0	10^4

首先,为验证合同的可行性,将运算成本设定为 $C(\varphi_k) = c(\varphi_k) + C_0 = g\varphi_k^2 + C_0$,其中 g 是边际缓存成本参数. 图 2 显示了 10 种类型的 CP 各自选择不同合同条款后的期望效用,不难发现,CPs 选择与其类型匹配的合同条款会获得正效用和最大效用,如若选择其他的合同条款会遭受效用损失. 此外,高类型的 CPs 渴望租用更高比例的缓存空间,并获得更大的效用. 上述结论满足单调性以及 IC 约束,验证了所求合同的可行性.

然后,为了评估所提出的基于合同的缓存租赁机制的系统性能,将从 CPs 和 MNO 的效用层面与 2

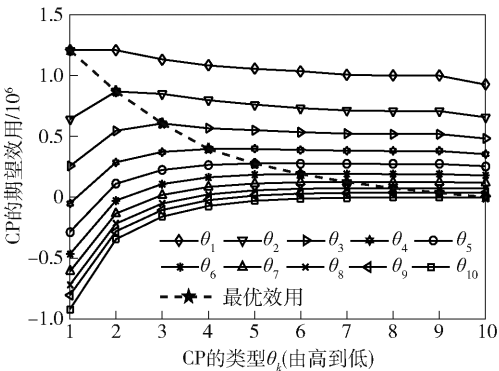
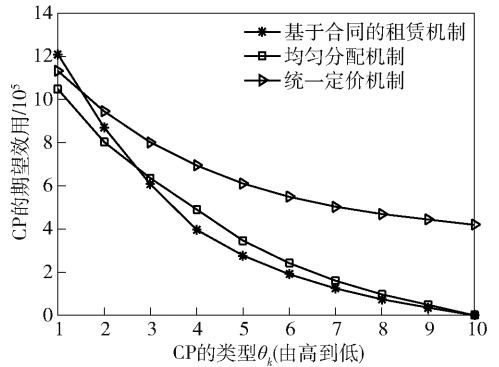
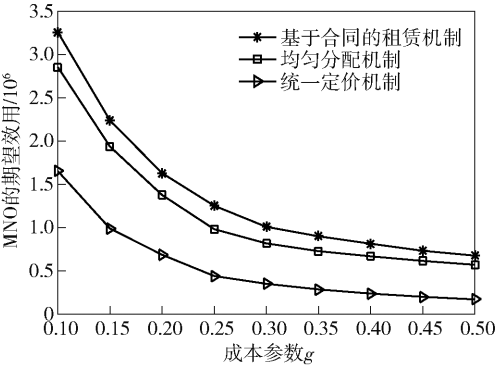


图 2 合同可行性验证 (CP 期望效用)

个基准机制进行比较,即均匀分配^[3]和统一定价分配^[13]. 其中,均匀分配机制指的是在 CPs 之间平均分配缓存空间,统一定价分配机制指的是以统一的单价租用缓存空间. 图 3(a)表明,提出的方案在高类型 CPs 处的期望效用优于 2 种基准方案,相比之下,在低类型 CPs 处的效用稍逊. 这是由于缓存容量的限制,并且在提出的机制中 MNO 倾向于租赁更多的缓存空间给更高类型的 CPs,以获取更多的收益. 同时,此现象也揭示了 CPs 之间缓存租用的相互依赖性. 具体地,当某个高类型的 CPs 租用的缓存空间增加,该类型 CPs 的期望效用增大,而留给



(a) 3种方案下CP的期望效用



(b) 不同成本参数下MNO的期望效用

图 3 对比仿真下的系统性能分析

其他低类型 CPs 的剩余缓存空间减少, 他们的期望效用会相应地减少. 由图 3(b) 可以发现, 对比 3 种方案, 在提出的方案中 MNO 的期望效用达到最高. 这是因为合同机制充分考虑了 CPs 的异构性, 能够区分不同 CPs 缓存空间租用的意愿度, 从而进一步优化 MNO 的效用. 此外, 当缓存成本参数 g 增加时, 边际缓存空间的开销越大, 迫使 CPs 减少租用的缓存空间, 所以 MNO 的期望效用降低.

最后, 探讨了 UAV 的飞行高度 H 对系统性能的影响. 由于 UAV 的高度会影响 LoS 链路的概率以及链路损耗, 从而对用户接收到的 SINR 产生影响, 进而影响 UAVs 对热点区域的有效卸载范围. 固定 UAV、MBS 的发射功率和其他参数. 图 4 (a) ~ (c) 显示, 当 UAV 的高度单调增加时, 这些 UAVs 的卸载范围首先扩展然后收缩. 如图 4(b) 所示, 当 $H = 251$ m 时, UAVs 达到最大卸载区域, 即覆盖最大数量的移动用户. 此外, 图 4(d) 展示了 UAV 的飞行高度 H 对 MNO 期望效用的影响, 随着 H 的增加, MNO 的期望效用先增加后减少, 此趋势与 UAV 的卸载区域大小的变化一致, 且 H 接近 250 m 时, MNO 能够实现最大期望效用. 因为当 UAV 飞行在最佳高度时, 卸载流量达到最大并实现 UAVs 和 MBS 间的负载均衡, 从而最高效率地利用 MBS 和 UAVs 的缓存和传输资源.

5 结束语

研究了 5G 网络中的缓存租赁问题, MNO 通过灵活地在热点区域部署具有缓存能力的 UAV, 以卸载 MBS 的部分流量. 结合视频流行度分布和用户负载量对异构 CPs 进行类型划分. 基于合同理论, 提出了缓存租用激励机制, 以激励 CPs 选择与自身类型匹配的合同项来缓存流行视频并获得最大的效用. 仿真结果验证了所提出的基于合同的缓存租赁机制的有效性, 讨论了 UAVs 的飞行高度对系统性能的影响, 且存在最优飞行高度使系统性能最佳.

附录 A 引理 1 的证明

注意, 1) 和 2) 是 IR 约束的充分必要条件, 而 1) 和 3) 是 IC 约束的充分必要条件.

1) 的证明. 假设类型 θ_k 和类型 θ_l 的 CP ($k \neq l$) 的合同项分别为 (φ_k, T_k) 和 (φ_l, T_l) . 根据 IC 约束:

$$\theta_k \varphi_k Q - T_k > \theta_k \varphi_l Q - T_l \quad (22)$$

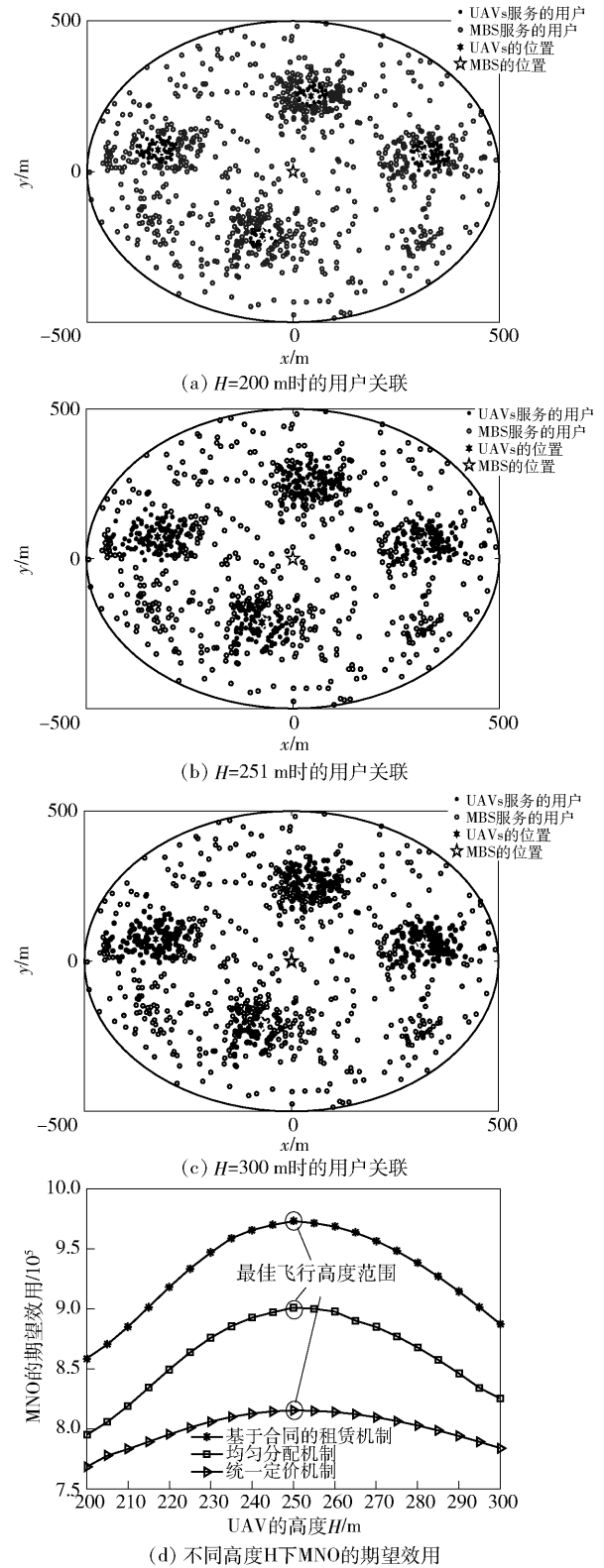


图 4 UAV 的飞行高度对系统性能的影响

以及

$$\theta_l \varphi_l Q - T_l > \theta_l \varphi_k Q - T_k \quad (23)$$

结合式(22)和式(23)得到 $(\theta_k - \theta_l)(\varphi_k - \varphi_l)Q >$

0, 因此 $\varphi_k > \varphi_l$ 当且仅当 $\theta_k > \theta_l$, 表明应该租赁更多的缓存空间给视频价值更高的 CP. 此外, 结合约束: $0 \leq \varphi_k \leq 1$, 对 $\theta_k < \dots < \theta_1$, 有 $0 \leq \varphi_K < \dots < \varphi_1 \leq 1$.

2) 的证明. 由于 $\theta_k > \theta_l$, 可以得到 $U_k = \theta_k \varphi_k Q - T_k > \theta_k \varphi_l Q - T_l > \theta_l \varphi_l Q - T_l = U_l$, 表示更高类型的 CP 通过租赁缓存得到的收益越大.

此外, 对于 $\theta_K < \dots < \theta_1$, 有 $U_1 > \dots > U_K$. 因此, 如果 $U_K \geq 0$, 则有 $U_k \geq 0, \forall k < K$; 在这种情况下, K 个类型 CP 的 IR 约束可以减少为 $U_K \geq 0$, 即 $T_K \leq \theta_K \varphi_K Q$.

3) 的证明. 邻下激励约束 (LDIC, local downward IC constraints): 对于 $\theta_k < \dots < \theta_1$, 如果 IC 约束在任何 k 类型和 $(k-1)$ 类型的 CP 之间成立, 则有 $U_k(\varphi_k, T_k) > U_k(\varphi_{k-1}, T_{k-1}), U_{k-1}(\varphi_{k-1}, T_{k-1}) > U_{k-1}(\varphi_{k-2}, T_{k-2})$, 即

$$\theta_k \varphi_k Q - T_k > \theta_k \varphi_{k-1} Q - T_{k-1} \quad (24)$$

以及

$$\theta_{k-1} \varphi_{k-1} Q - T_{k-1} > \theta_{k-1} \varphi_{k-2} Q - T_{k-2} \quad (25)$$

因为对 $\theta_{k-1} < \theta_{k-2}$, 有 $\varphi_{k-1} < \varphi_{k-2}$. 再结合 $\theta_k < \theta_{k-1}$ 和式(25), 可以得到

$$\theta_k(\varphi_{k-1} - \varphi_{k-2})Q > \theta_{k-1}(\varphi_{k-1} - \varphi_{k-2})Q > T_{k-1} - T_{k-2} \quad (26)$$

结合式(24)和式(26)得: $\theta_k \varphi_k Q - T_k > \theta_k \varphi_{k-2} Q - T_{k-2}$, 即 $U_k(\varphi_k, T_k) > U_k(\varphi_{k-2}, T_{k-2})$, 表明向下 IC 约束在 k 类型和 $(k-2)$ 类型的 CP 之间也成立. 通过归纳法, 可以得出结论: 如果在 k 类型和 $(k-1)$ 类型 CP 之间向下 IC 约束成立, 那么在 k 类型和所有 $(k-2), \dots, 1$ 类型之间也成立.

注意, 邻上激励约束 (LUIC, local upward IC constraints) 的证明过程和 LDIC 证明类似, 故省略.

附录 B 定理 1 的证明

首先, 式(19)满足 $T_k^* \leq T_{k+1}^* + \theta_k(\varphi_k - \varphi_{k+1})Q$, 也即满足引理 1 中的 IR 和 IC 约束. 接下来, 通过反证法证明式(19)中的租金最大化了式(18)中定义的 MNO 的效用. 给定缓存分配比例, 可知 MNO 的效用取决于 $\sum_{k=1}^K \pi_k T_k$. 假设相对于式(19)中的策略存在另一个可行租金策略 $\{\hat{T}_k, \forall k \in \mathcal{K}\}$ 可以使 MNO 的效用更大. 因此, 至少对于一个类型 θ_k 存在租金 $\hat{T}_k > T_k^*$. 如果 $k=K$, 那么 $\hat{T}_K > T_K^*$, 由于 $T_k^* = \theta_k \varphi_K Q$, 则 $\hat{T}_K > \theta_K \varphi_K Q$, 违背了类型 θ_K 的 IR 约束; 如果 $k < K$, 由于 $\{\hat{T}_k, \forall k \in \mathcal{K}\}$ 必须满足 IC 约束:

$\theta_k \varphi_k Q - \hat{T}_k > \theta_k \varphi_{k+1} Q - \hat{T}_{k+1}$ 或者是 $\hat{T}_k < \hat{T}_{k+1} + \theta_k(\varphi_k - \varphi_{k+1})Q$, 通过将 $T_k^* = T_{k+1}^* + \theta_k(\varphi_k - \varphi_{k+1})Q$ 代入 $\hat{T}_k > T_k^*$, 可以得到 $\hat{T}_{k+1} > T_{k+1}^*$, 通过归纳法得到 $\hat{T}_K > T_K^*$, 违背了类型 θ_K 的 IR 约束. 综上 $\{\hat{T}_k, \forall k \in \mathcal{K}\}$ 不存在.

附录 C 定理 2 的证明

式(19)中的租金可以重写为

$$T_k^* = T_K^* + \sum_{i=k}^K \Delta_i \quad (27)$$

其中: 当 $k=K$ 时, $\Delta_i = 0$; $\Delta_i = \theta_k(\varphi_k - \varphi_{k+1})Q$, 当 $0 < i < K$. 将式(27)代入并删除在 MBS 和 UAVs 缓存的视频的单调性条件和整数约束, 得到放松的优化问题, 即

$$\begin{aligned} \max_{\{\varphi_k, \forall k \in \mathcal{K}\}} \quad & \sum_{k=1}^K Z_k(\varphi_k) \\ \text{s. t.} \quad & (15), 0 \leq \varphi_k \leq 1 \end{aligned} \quad (28)$$

这里 $Z_k(\varphi_k) = \pi_k \theta_k \varphi_k Q + \Lambda_k \sum_{i=1}^{k-1} \pi_i - \pi_k C(\varphi_k)$, $\Lambda_k = \varphi_k Q(\theta_k - \theta_{k-1})$, $\forall k \in \{2, \dots, K\}$; $\Lambda_k = 0$, 当 $k=1$.

显然, 所有 $Z_k(\varphi_k)$, $\forall k \in \mathcal{K}$, 以及式(28)中的约束都是 φ_k 的凸函数. 则式(28)中的拉格朗日函数为

$$U = \sum_{k=1}^K Z_k(\varphi_k) + \lambda \left(\sum_{k=1}^K \pi_k \varphi_k - 1 \right) + \sum_{k=1}^K \lambda_k \varphi_k \quad (29)$$

其中 λ 和 λ_k 均为拉格朗日乘数. 将式(29)分别对 φ_k, λ 以及 $\lambda_k (\forall k \in \mathcal{K})$ 求一阶偏导数, 并将求得的偏导数置零, 可得到式(21)中的 KKT 方程, 然后解之可以求得式(28)的解, 即 $\hat{\varphi}_k^*, \forall k \in \mathcal{K}$.

注意, 如果 $\hat{\varphi}_k^*, \forall k \in \mathcal{K}$ 满足单调性约束, 那么它就是式(18)的解, 即 $\varphi_k^* = \hat{\varphi}_k^*, \forall k \in \mathcal{K}$; 否则, 应该找到 $\hat{\varphi}_k^*$ 中不可行的子序列, 例如: $\{\hat{\varphi}_i^*, \varphi_{i+1}^*, \dots, \varphi_j^*\}$, 如果 $\hat{\varphi}_i^* < \hat{\varphi}_{i+1}^* < \dots < \hat{\varphi}_j^*$. 根据文献[3]中的命题 1, 修正后的值应满足 $\varphi_i^* = \varphi_{i+1}^* = \dots = \varphi_j^*$. 此外, $\varphi_i^*, \varphi_{i+1}^*, \dots, \varphi_j^*$ 应保持缓存容量约束, 即 $\pi_i \varphi_i^* + \pi_{i+1} \varphi_{i+1}^* + \dots + \pi_j \varphi_j^* = \pi_i \hat{\varphi}_i^* + \pi_{i+1} \hat{\varphi}_{i+1}^* + \dots + \pi_j \hat{\varphi}_j^*$. 因此, 可得

$$\varphi_i^* = \varphi_{i+1}^* = \dots = \varphi_j^* = \frac{\pi_i \hat{\varphi}_i^* + \pi_{i+1} \hat{\varphi}_{i+1}^* + \dots + \pi_j \hat{\varphi}_j^*}{\pi_i + \pi_{i+1} + \dots + \pi_j}.$$

另一方面, 对于 $\{\hat{\varphi}_k^*\}$ 中遵循单调性约束的点, 直接设置 $\varphi_k^* = \hat{\varphi}_k^*$.

参考文献:

- [1] Goian H S, Al-Jarrah O Y, Muhaidat S, et al. Popularity-based video caching techniques for cache-enabled networks: a survey [J]. IEEE Access, 2019, 7: 27699-27719.
- [2] Bastug E, Bennis M, Debbah M. Living on the edge: the role of proactive caching in 5G wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(8): 82-89.
- [3] Le T H T, Tran N H, Vo P L, et al. Contract-based cache partitioning and pricing mechanism in wireless network slicing[C]//IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [4] Guo Yinghao, Duan Lingjie, Zhang Rui. Cooperative local caching under heterogeneous file preferences [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(1): 444-457.
- [5] Lyu Jiangbin, Zeng Yong, Zhang Rui. UAV-aided off-loading for cellular hotspot [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(6): 3988-4001.
- [6] Masdung F, Septriani, Meiriza A, et al. Spatio-temporal analysis of south Sumatera hotspot distribution[C]//International Conference on Electrical Engineering and Computer Science. Palembang: IEEE Press, 2017: 198-201.
- [7] Zhang Yanru, Han Zhu. Contract theory for wireless networks [M]. [S. l.]: Springer International Publishing, 2017: 1-121.
- [8] Li Jun, Chu Shunfeng, Shu Feng, et al. Contract-based small-cell caching for data disseminations in ultra-dense cellular networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(5): 1042-1053.
- [9] Hamidouche K, Saad W, Debbah M. Breaking the economic barrier of caching in cellular networks: incentives and contracts[C]//IEEE Global Communications Conference. Washington: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [10] Chu Shunfeng, Li Jun, Liu Tingting, et al. A contract-based incentive mechanism for data caching in ultra-dense small-cells networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. San Francisco: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [11] Li Chenyu, Liu Jun, Ouyang Shuxin. Analysis and prediction of content popularity for online video service: a Youku case study[J]. China Communications, 2016, 13(12): 216-233.
- [12] Li Qiang, Zhang Yuanmei, Pandharipande A, et al. D2D-assisted caching on truncated Zipf distribution [J]. IEEE Access, 2019, 7: 13411-13421.
- [13] Duan Lingjie, Gao Lin, Huang Jianwei. Cooperative spectrum sharing: a contract-based approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(1): 174-187.