

无人机视频回传中的动态资源分配机制

贺超^{1,2} 谢智东^{1,2} 田畅¹

(陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)¹ (军事科学院国防科技创新研究院 北京 100071)²

摘要 无人机(Unmanned Aerial Vehicles,UAV)通过所携带的传感器实时获取图像和视频。特别地,多架无人机通过构成集群来协同工作,能够高效地完成侦察、感知、测绘等任务,在军事和民用领域都有广泛的应用。然而,无人机拍摄的视频均需要通过无线信道传输到地面站或控制中心,视频业务高清程度的不断提高和集群数量的不断增加,导致对无线信道传输速率的要求越来越高。因此,在有限的无线传输资源约束下,如何在无人机集群中分配资源,使得无人机集群回传视频的质量最大化,是亟需解决的问题。针对该问题,设计了一种分布式资源分配算法。首先,为了区分视频业务与普通数据业务,提出了一种面向用户体验质量的效用函数;然后,围绕该问题建立了势博弈模型,所有的用户仅基于很少的局部信息交互就可以不断独立更新其策略。该算法最终收敛于一组相关均衡,实现了无线资源在集群中的全局优化分配。从视频应用的角度出发,根据不同视频信号的特性,每个无人机用户能够智能地调整信道资源的使用,在有限的无线信道资源情况下,能够实现无人机集群总体效用的最大化。仿真结果表明,该算法能够同时为无线通信资源提供方和无人机视频用户带来便利。

关键词 无人机,视频业务,资源分配,势博弈,分布式算法

中图分类号 TN919 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/jsjxx.190500106

Dynamic Resource Allocation for UAV Video Uploading

HE Chao^{1,2} XIE Zhi-dong^{1,2} TIAN Chang¹

(College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)¹

(National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences of PLA, Beijing 100071, China)²

Abstract Unmanned Aerial Vehicles (UAV) can capture images and videos in real time by the sensors they carry. In particular, when a cluster of UAVs work together, they are able to efficiently complete reconnaissance, perception, mapping and other tasks, which make them widely used in both military and civil fields. However, all videos captured by UAVs need to be transmitted to the ground station or control center through wireless channels. The requirement of wireless channel transmission rate is higher and higher, along with video service definition unceasing enhancement and the cluster quantity continuous increase. Thus, under the constraint of limited wireless transmission resources, how to allocate them in the UAV cluster to maximize the uploading quality of videos has become an urgent problem to be solved. For this problem, a distributed algorithm was designed. In order to specify video from other data transmission, the QoE-oriented utility function is considered first. Then, around the problem, a potential game model is formulated and all the users can update their strategies with very little information exchange. The algorithm converges to a set of correlated equilibria and achieves the global optimal allocation of wireless resources in the cluster. This algorithm starts from the perspective of video application, and according to the properties of different video signals, each UAV can intelligently adjust the channel resource occupation. The highest total utility of the UAV cluster can be achieved under the limited wireless channel resources. Numeric simulation results indicate that it brings remarkable benefits to both resource providers and UAV video users.

Keywords UAV, Video service, Resource allocation, Potential game, Distributed algorithm

到稿日期:2019-05-20 返修日期:2019-07-28 本文受国家自然科学基金项目(91738201,61401507)资助。

贺超(1982—),女,博士生,助理研究员,主要研究方向为视频传输质量保证,E-mail:doryhc@126.com;谢智东(1984—),男,博士,副研究员,主要研究方向为人工智能,E-mail:xzd313@163.com(通信作者);田畅(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为数据链系统与信息感知。

1 引言

航空、新能源以及通信和人工智能技术的进步促进了无人机的飞速发展,无人机正变得更小、更轻、更智能,在民用和军用领域均有广泛的应用。无人机通过所携带的传感器实时获取图像和视频,并对其进行压缩和处理,最终通过无线网络进行传输交互。这种实时拍摄和传输方式,使得无人机在测绘、电商、个人航拍等民用领域发挥了巨大的作用。在军事应用方面,无人机已经渗透到作战的各个层面。军用无人机所带来的全景实时视频,颠覆了传统的抵近侦察、态势感知、火力评估等军事行动的模式。多架无人机通过协同工作构成无人机集群,这对军队获取战场制信息权有着举足轻重的意义^[1]。

尽管无人机视频为人们带来了很大的便利,但视频是一类极为占用资源的信息,无线信道对信息的承载能力有限。目前,视频压缩算法已经比较成熟,例如 H. 264/MPEG-4/AVC 和 H. 265/HEVC 等能够更加有效地去除视频信号中的冗余。然而,当无人机群体数量增大,且视频清晰度需求进一步提高时,无线网络就显得力不从心。因此,如何将有限的带宽资源在无人机之间进行有效的分配,成为了亟需解决的关键问题。

无线传输领域的一些研究较好地分析和解决了资源分配的问题,它们通常以提升系统的服务质量(Quality of Service, QoS)为目标,并且将资源分配建模为优化问题^[2-4]。同时,我们可以发现博弈论的相关方法在解决这一问题方面也得到了广泛的应用,并取得了良好的效果。文献[5]建立了一种双层博弈框架,演化博弈算法用于底层服务,差分博弈算法用于上层带宽选择。文献[6]以提升 QoS 为目标,同时考虑了系统的能量和带宽资源,首先基于拍卖算法进行信道分配,而后采用非合作博弈进行功率分配。文献[7]将资源竞争问题建模为复制动态过程,通过分布式算法解决下载过程中的资源分配问题。尽管这些研究在无线资源分配的问题上取得了一定的成就,但是其解决问题的切入点较少考虑应用层业务的特殊性。一些研究即便涉及应用层视频业务,也没有从用户的角度出发,无法体现出视频用户的体验质量(Quality of Experience, QoE)。另一方面,一些工作以追求 QoE 为目标,讨论了切换或者接口选择等过程中所面临的资源分配问题^[8-11]。然而,与博弈算法相比,它们往往遵循了传统的以优化为基础的方法。此外,还有一些研究同时考虑了上述两方面,例如文献[12]将该问题建模为博弈论中的合作谈判问题,并同时考虑了应用业务的 QoE 和系统的公平性。但是,该方法需要一个代理服务器用于带宽分配,因此系统的稳定性是建立在服务器不受攻击的前提下,其鲁棒性将受到影响。

本文正是着眼于无人机视频传输业务的特殊性,将所有无人机的总的体验质量作为优化目标,并且充分考虑了视频传输中所需付出的代价,构建了势博弈模型,提出了一种分布式资源分配框架。经过若干次迭代后,该算法能够迅速收敛于相关均衡,从而确保了每个无人机能够合理和智能地选择传输带宽,并保持一种稳定的视频传输速率,进而实现无线资源的合理分配。

2 系统模型

依托地面移动蜂窝网络或者卫星网络进行无人机信息传输,将大大拓展无人机的应用空间。目前人们已多次完成基于 5G 网络的无人机飞行试验,实现了高清视频的现场直播。5G 网络能够提供的大规模多人多出(Massive MIMO)技术,打破了传统的 2D-MIMO 的局限性,增加了垂直维度,更加切合了无人机通信网络的三维性质^[13]。本文考虑若干无人机飞行于地面蜂窝网络覆盖区域内获取及回传视频的场景。图 1 给出了本文需要讨论的典型场景,在网络中有 N 个无人机,假设它们都处于同一个无线接入点(Access Point, AP)的覆盖区域内,该 AP 归属于某一网络服务提供商(Network Service Provider, NSP)。

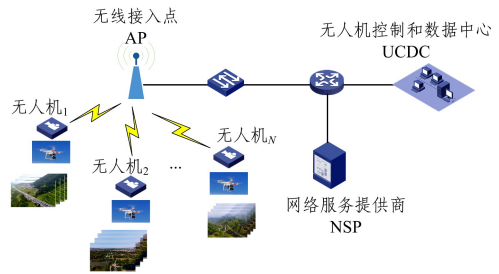


图 1 无人机视频传输网络

Fig. 1 UAV video transmission network

每个无人机上搭载着视频传感器和通信设备,用于拍摄视频,并将压缩处理后的视频通过无线网络进行回传。在这一过程中,无人机的飞行位置、速率可能不同,每个无人机所拍摄的角度和对象也会有所不同,这就造成了所得视频存在差异。从帧内差异的角度来看,若图像的背景杂乱,或目标众多,那么这样的视频在内容上较为复杂;从帧间差异的角度来看,若拍摄对象运动速率较快,或变化幅度较大,也会使得视频内容更为复杂。无人机采集到的视频最终被发送给无人机控制和数据中心(UAV Control and Data Center, UCDC)。UCDC 既是控制台,又是数据站,在操控无人机飞行速率和轨迹的同时,也对无人机所获取的视频场景和片段进行镜头整合和编辑处理。地面蜂窝网络的使用并不是没有代价的,本文中 UCDC 需要从 NSP 处为每一个无人机租赁无线信道,而租赁的费用与每段视频流所占用的实际信道速率相关。整个传输的最终目的是希望 UCDC 获得高质量的视频,使得经过它所汇总的视频能够满足用户在观看体验上的需求。任何情况的信道带宽受限或者不同无人机之间的资源分布不均衡,都会导致某些视频传输出现误码或者丢包,进而影响整体的观看体验,因此,需要对有限的带宽资源进行合理的分配。

假设 C_{band} 表示 AP 可以提供的总吞吐量。令 $r_i \in C_{band}$ 表示第 i 个无人机的视频(Video _{i})所占用的信道带宽,它的取值范围在最小值 R_i^{min} 和最大值 R_i^{max} 之间, $i = 1, 2, \dots, N$ 。 $\mathbf{R} = [r_1, r_2, \dots, r_N]$ 代表 N 个视频的传输速率矢量, $\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_N]$ 代表相应的效用函数矢量。为了能够回传高质量的视频,每一个无人机都期望将自身的效用函数最大化:

$$\begin{aligned} & \max u_i \\ & \text{s. t. } R_i^{\min} \leq r_i \leq R_i^{\max} \\ & 0 \leq \sum_{i=1}^N r_i \leq Cband \end{aligned} \quad (1)$$

3 面向 QoE 的效用函数

一般来说, QoS 是衡量网络质量的常用标准,它涵盖了对信息的吞吐量、时延、丢包率等方面的描述^[14]。在一般的数据传输中,效用函数也通常被建模为关于 QoS 的函数,例如 sigmoid 函数。然而,当应用层为多媒体业务时,这些指标并不能充分反映视频用户的满意程度,用户更加关注的是视频的体验质量 QoE,它综合了服务、用户和环境等多层面的影响,直接反映了用户对视频服务的认可程度^[15]。评估 QoE 往往比评估 QoS 更为复杂。由于本文重点讨论资源分配算法,而不是 QoE 的评估方法,因此这里将问题进一步简化。根据文献^[16-17]的研究成果,视频的峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和平均意见得分(Mean Opinion Score, MOS)之间存在一种线性映射关系:

$$\text{MOS} = \begin{cases} 4.5, & 40 < \text{PSNR} \\ 3.5 * \frac{\text{PSNR}}{20} - 2.5, & 20 < \text{PSNR} \leq 40 \\ 1, & 0 < \text{PSNR} \leq 20 \end{cases} \quad (2)$$

这种线性关系表明,有效的 PSNR 表达式可以更加合理地描述视频的主观 MOS 分值。因此,在考虑系统的效用函数时,本文采用了文献^[18]中关于 PSNR 的表达式。每个无人机所传输的视频效用函数可以表示为:

$$\begin{aligned} u_i &= \text{PSNR}(r_i) - P(r_i) \\ &= a + b \cdot \sqrt{\frac{r_i}{c}} \left(1 - \frac{c}{r_i}\right) - P(r_i) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $P(r_i) = \theta \cdot \frac{r_i}{Cband}$ 是 UCDC 对无人机 i 的无线信道租赁所支付的费用,常数 θ 是价格因子。我们认为, NSP 向每台无人机收取的租赁费用,是根据每段视频的实际传输速率与总带宽的比值来确定的,即视频传输速率越高,其占用资源越多,就应该负担更多的费用,该费用需要从视频传输的收益函数中扣除。根据式(2)中的映射关系,式(3)能够较为合理地表述视频用户的体验质量。

4 基于势博弈的资源分配模型

相对于传统的优化算法,博弈论是解决资源分配的另一种更为高效的方法。它与传统方法在理念上的最大差异在于,博弈论的方法是通过迭代来寻找纳什均衡;而传统优化算法是通过求解、优化表达式来找到最优解。本文采用博弈论的方法来求解无人机视频回传中的资源分配问题,即每个无人机都作为一个博弈的实体,在已知少量信息的情况下进行决策,同时与其他主体相互竞争,最终达到整体效用接近最优的均衡局面。

通常来说,博弈的方法可以划分为合作博弈和非合作博弈,而在讨论实际问题的过程中,两者之间并没有绝对的界限。从单个主体的角度看,每个无人机都希望将其获得的信道带宽最大化,以得到令人满意的视频 QoE。然而,由于运

营商能够提供的总带宽有限,无法允许个体过多地占用资源,并且最终无人机控制和数据中心需要提高所有视频的总体验质量。因此,在这一过程中,无人机之间在进行非合作的自私竞争的同时,也具有理性的合作趋势,所以可以采用势博弈(Potential Game, PG)的方法建立模型。在此基础上,本文认为博弈主体的行为并不是完全独立的,参与者选择博弈策略依赖于博弈过程之外的一种概率信息,博弈主体之间可以通过部分的合作来改变它们的策略。相对于完全独立且非合作的纳什均衡来说,我们更希望通过这种方式最终达到相关均衡,从而使算法性能得到进一步提升。

该博弈可以表述为 $G = [\Omega, \{\mathcal{R}_i\}_{i \in \mathcal{A}}, \{u_i\}_{i \in \mathcal{A}}]$, 其中 $\Omega = \{1, 2, \dots, N\}$ 为参与者集合, \mathcal{R}_i 代表第 i 个参与者的策略,即相应的视频传输速率, u_i 为对应的效用。我们希望通过较少的信息交互,使得每个主体都能够合理地选择策略,并且都不会打破均衡。我们以如下方式构建势函数: $I = \sum_{i=1}^N \text{PSNR}(r_i) - P(\sum_{i=1}^N r_i)$, 即势函数可以表示为 N 个无人机传输视频的效用和减去总的开支,其中 $P(\sum_{i=1}^N r_i) = \theta \cdot \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{Cband}$ 代表 UCDC 为 N 个无人机的信道租赁所支付的总费用。在同一 AP 覆盖范围内,带宽被占用得越多, UCDC 就要支付越多的费用,这也从另一个角度缩减了 UCDC 所获取的利益。同时, NSP 可以通过改变租赁价格来确保网络服务质量,并避免拥塞。该资源分配问题可以被进一步描述为:

$$\begin{aligned} \max I &= \sum_{i=1}^N \{a + b \cdot \sqrt{\frac{r_i}{c}} (1 - \frac{c}{r_i})\} - \theta \cdot \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{Cband} \\ \text{s. t. } & R_i^{\min} \leq r_i \leq R_i^{\max} \\ & 0 \leq \sum_{i=1}^N r_i \leq Cband \end{aligned} \quad (4)$$

定理 1 尽管作为博弈的参与者,每个无人机主体可以通过非合作的方式改变自身的视频传输速率策略,但整个博弈过程是以 UCDC 的总效用为目标的,该目标使得各主体之间进行理性的合作,因此,该博弈过程是完全的势博弈。

证明:对无人机 i 来说,我们假设它有另一个速率策略可供选择,表述为 r_i' 。通过上述势函数的表达式,并同时考虑式(3)中各个主体的效用函数,可以得到:

$$\begin{aligned} \Delta I &= I(r_i) - I(r_i') \\ &= \sum_{i=1}^N \{a + b \cdot \sqrt{\frac{r_i}{c}} (1 - \frac{c}{r_i})\} - \theta \cdot \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{Cband} - \sum_{i=1}^N \{a + b \cdot \sqrt{\frac{r_i'}{c}} (1 - \frac{c}{r_i'})\} - \theta \cdot \frac{\sum_{i=1}^N r_i'}{Cband} \\ &= b \cdot \sqrt{\frac{r_i}{c}} (1 - \frac{c}{r_i}) - b \cdot \sqrt{\frac{r_i'}{c}} (1 - \frac{c}{r_i'}) - \theta \cdot \frac{r_i - r_i'}{Cband} \\ &= u(r_i) - u(r_i') = \Delta u \end{aligned} \quad (5)$$

势函数的变化等于每个参与者效用函数的变化。根据文献^[19], 博弈过程 G 是完全势博弈,势函数 I 是完全势函数。通过定理 1 可以得知,在无人机视频回传的动态资源分配中,作为博弈的主体,无人机之间既相互竞争,又部分合作,因此采用势博弈模型求解该问题是合理的。

定理 2 在势博弈 $G = [\Omega, \{\mathcal{R}_i\}_{i \in \Omega}, \{Q_i\}_{i \in \Omega}]$ 中,若势函

数可以表述为 $I = \sum_{i=1}^N \{a + b \cdot \sqrt{\frac{r_i}{c}} (1 - \frac{c}{r_i})\} - \theta \cdot \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{Cband}$,那么该博弈的相关均衡存在且唯一。

证明:首先求解势函数的一阶偏导数,可得:

$$\frac{\partial I(r_i)}{\partial r_i} = \frac{b}{2\sqrt{cr_i}} + \frac{b\sqrt{c}}{2(\sqrt{r_i})^3} - \frac{\theta}{Cband} \quad (6)$$

显然,该一阶偏导数为策略空间上的连续函数,因此,势

函数 I 为连续可微的。由于 $\frac{b}{2\sqrt{cr_i}} + \frac{b\sqrt{c}}{2(\sqrt{r_i})^3} > 0$ 且 $\frac{\theta}{Cband} > 0$,因此必然存在极值点 $r_i = \tilde{r}_i$ 能够使得式(6)恒等于 0。接下来,可以在 $r_i = \tilde{r}_i$ 处求解式(4)的二阶偏导:

$$\frac{\partial^2 I(r_i)}{\partial r_i^2} \Big|_{r_i = \tilde{r}_i} = \frac{b}{4\sqrt{c}(\sqrt{\tilde{r}_i})^3} - \frac{3b\sqrt{c}}{4(\sqrt{\tilde{r}_i})^5} \quad (7)$$

由于 $\frac{b}{4\sqrt{c}(\sqrt{\tilde{r}_i})^3} > 0$ 且 $\frac{3b\sqrt{c}}{4(\sqrt{\tilde{r}_i})^5} > 0$,因此可以得到

$$\frac{\partial^2 I(r_i)}{\partial r_i^2} \Big|_{r_i = \tilde{r}_i} < 0。$$

上述结果表明,本文在势博弈 G 中所构造的势函数在策略空间上为连续可微的凸函数。根据文献[20],势博弈 G 存在相关均衡,且相关均衡是唯一的。从定理 2 能够判断,在无人机视频回传的动态资源分配中,无人机之间通过博弈竞争带宽,当每一个无人机的任何一种策略改变都无法带来总效用函数的增加时,所有无人机构成的集群系统的带宽分配就达到了稳定的均衡状态,而且这种状态是唯一的。此时,对于无人机 i 来说,极值速率策略 \tilde{r}_i 就是其最终带宽选择,任何一个无人机选择了除此以外的其他速率作为带宽都不会获得更高的总体效用。

5 博弈模型求解算法

博弈求解纳什均衡的过程,就是一个通过不断迭代寻求最优解的过程。常见的迭代算法包括高斯-塞尔德(Gauss-Seidel)迭代和雅可比(Jacobi)迭代。其中,雅可比迭代法属于较早期和简单的算法,其收敛速度较慢。高斯-塞尔德迭代则是对雅可比算法的一种改进,尽管它相对于雅可比迭代法提高了收敛速度,但仍不适用于实时业务的传输。在本文中,无人机之间既有竞争,又有部分的合作,为了能够以较快的收敛速度达到相关均衡的状态,本文参考文献[21]中的后悔匹配(Regret Matching)算法,设计了无人机资源分配博弈模型的分布式求解算法。采用该算法的总体思路是:某一无人机更改其策略的概率,与过去时刻该无人机未选择其他策略的后悔程度成正比。其具体实施步骤如下。

(1) 初始化

初始 $t=1$ 时,每一个参与者可以选择最小速率作为初始策略。同时,我们构建策略空间 $\{R_space\}$ 。事实上,初始策略可以是策略空间的速率范围内的任意值。

(2) 迭代更新过程

1) 策略更新

当 $t \geq 2$ 时,每个节点分别计算当前策略 r_i 的效用以及选

择另外一个策略 r_i' 时的效用,并计算这两种效用之间的平均差异值:

$$L_i^t(r_i, r_i') = \frac{\lambda}{t} L_i^{\lambda}(r_i, r_i') + \frac{1}{t} [u_i^t(r_i') - u_i^t(r_i)] \quad (8)$$

其中, λ 代表时间且 $\lambda \leq t$ 。接下来,取 $R_i^t(r_i, r_i') = \max\{L_i^t(r_i, r_i'), 0\}$,即为平均后悔因子。

2) 策略判决

假设在时隙 t ,第 i 个参与者选择了策略 r_i ,那么在 $t+1$ 时隙,参与者将重新考虑策略,并且其选择策略的依据将服从以下概率分布:

$$\begin{cases} \pi_i^{t+1}(r_i') = \frac{1}{\mu} R_i^t(r_i, r_i'), \forall r_i' \neq r_i \\ \pi_i^{t+1}(r_i) = 1 - \sum_{r_i' \neq r_i} \pi_i^{t+1}(r_i') \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\mu > 0$ 足够大。根据这一分布规律,可以在策略空间 $\{R_space\}$ 中为参与者 i 选择较高概率的策略。

经过多次迭代后,选择的结果将不再改变,算法收敛。若每个无人机都遵循上述分布式算法更新策略,那么整个势博弈将最终收敛于相关均衡。

6 仿真结果及讨论

基于 Matlab R2017a 平台进行仿真实验,以验证上述博弈模型和求解算法的有效性。假设在图 1 所示的场景中有 3 个无人机飞行于某一 AP 覆盖范围内,即 $N=3$,它们各自独立地拍摄视频,并将 3 段不同视频通过无线网络回传给 UC-DC。为了突出不同视频对信道速率的要求,选取 3 种特征不同且较有代表性的视频,这 3 段视频分别为 Carphone, Coastguard 和 Football,它们的速率取值范围及特征如表 1 所列。仿真过程中,根据表 1 的取值范围,构建不同视频所对应的不同的带宽策略空间 $\{R_space\}$ 。其中,Carphone 视频的运动速度中等且场景平缓,视频编码后的编码速率值相对较低;而中等速度的 Coastguard 场景的编码速率居中;Football 视频的运动场景和复杂背景,带来了视频帧内和帧间的较大差异,因此需要更大量的信息进行描述,其编码速率最高。本文假定该场景中无线 AP 能够提供的信道吞吐量可在 20 kbps 到 20 Mbps 之间变化,即每次仿真过程中,可以将该范围内的某个值赋予 $Cband$,以验证不同信道带宽条件下本文所提模型和算法的有效性。

表 1 不同视频的参数及特征

Table 1 Parameters and styles of different videos

	$R_i^{\min}/(\text{kb/s})$	$R_i^{\max}/(\text{kb/s})$	特征
Carphone	20.2554	322.0153	中速运动且场景较平缓
Coastguard	28.4987	878.8011	中速运动且场景较复杂
Football	286.311	1720	快速运动或场景复杂

我们分别在 20 Mbps 和 2 Mbps 两种不同的信道带宽速率下,得到了实时的视频速率以及效用函数曲线。当 $Cband = 20$ Mbps 时,信道带宽较为充足,从图 2(a)中可以看到,每个视频可以以其最高速率进行编码和传输,较复杂的视频占用了更多的资源。当 $Cband = 2$ Mbps 时,带宽不充足,在图 3(a)中,视频 Carphone 和 Coastguard 则相应地降低了速率,以使总效用函数仍然维持在合理的范围。在这两种情况下,

从总效用函数的角度来看,即在图 2(b)和图 3(b)中,本文利用分布式算法所得到的总效用与建立在全局信息交互基础上的最优分配总效用的性能接近。从图 2 和图 3 还可以发现,经过近 20 次的迭代后,所有曲线都变得平滑、稳定,这就意味着本文所提出的算法在很短的时间内就可以使系统收敛于均衡状态。

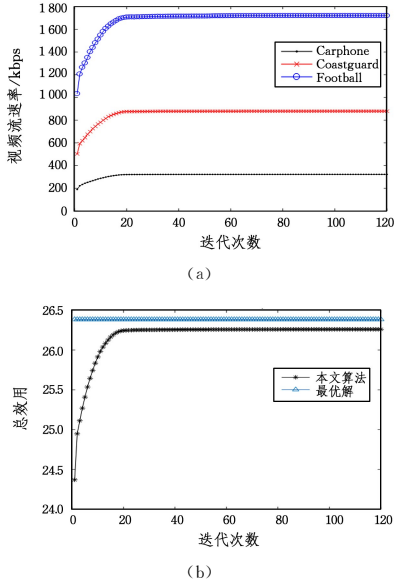


图 2 $C_{band}=20\text{Mbps}$ 时,视频流速率、总效用随迭代次数的收敛情况

Fig. 2 Convergence of video stream rate and total effectiveness with iteration number when $C_{band}=20\text{Mbps}$

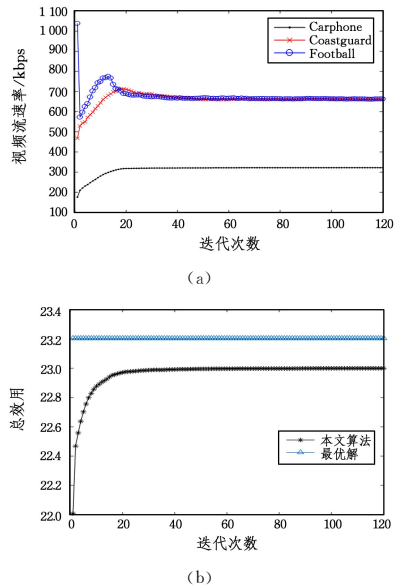


图 3 $C_{band}=2\text{Mbps}$ 时,视频流速率和总效用随迭代次数的收敛情况

Fig. 3 Convergence of video stream rate and total effectiveness with iteration number when $C_{band}=2\text{Mbps}$

从图 2 和图 3 的差异来看,若 NSP 为一个 AP 所提供的总带宽 C_{band} 不同,那么资源分配的结果也就明显不同。为了系统地描述这一参数所带来的影响,本文仿真了在不同信道带宽时,系统达到均衡后,每个无人机的不同视频所具有的

最终传输速率,如图 4(a)所示。系统带宽的不足将首先影响运动快速和复杂的视频,而对中速和平缓的视频影响相对较小。当信道环境恶劣到一定程度,例如低于 1Mbps 时,所有的视频都需要相应地降低其速率。在图 4(b)中,随着信道带宽的增加,总的效用值也相应增加。而在不同的系统带宽条件下,本文算法的效用值始终与最优解较为接近。

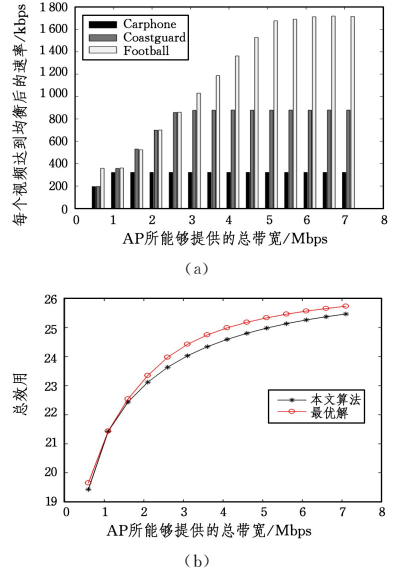


图 4 总信道带宽 C_{band} 对资源分配的影响

Fig. 4 Influence of total bandwidth C_{band} on resource allocation

不仅信道总带宽会影响资源分配的结果,价格因子 θ 也会对其造成影响。图 5 给出了 AP 提供的系统带宽值为 3Mbps 时,变化价格因子 θ 对资源分配的影响。当 θ 变大时,图 5(a)中 Football 视频分配的传输速率降低得最为明显。当 $\theta > 3.5$ 时,Coastguard 分配的传输速率也开始降低。在图 5(b)的总效用曲线中可以发现,随着 θ 的变大,总效用函数相应缩减。因此,NSP 作为资源提供商,可以通过调整价格参数有效控制带宽分配,这对于区分不同用户的服务等级以及维持整个网络的鲁棒性都具有重要作用。

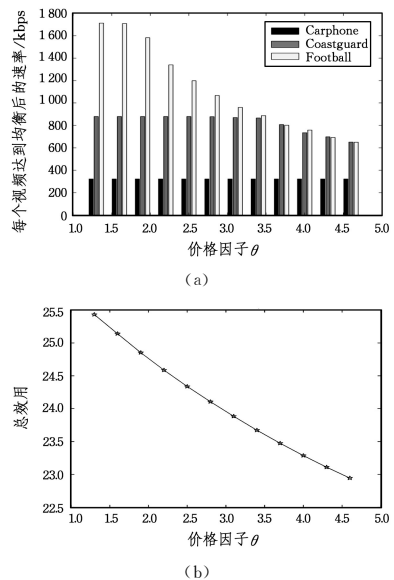


图 5 价格因子 θ 对资源分配的影响

Fig. 5 Influence of price parameter θ on resource allocation

结束语 本文针对无人机视频传输的信道资源分配问题,不仅考虑了面向视频 QoE 的效用函数,而且在博弈论的基础上建立分布式模型,使得系统的灵活性和鲁棒性进一步增强,证明了该模型收敛于相关均衡,并使用分布式后悔匹配算法求解实现了该模型。仿真结果表明,本文所提出的策略能够很好地解决无人机系统的资源分配问题。虽然本文的研究主要以无人机视频传输的带宽租赁价格为代价因子建立效用函数,但若将代价因子进行扩展,则可适用于能量消耗、异构网络选择等。以提高用户的体验质量和满意度为目的的军用、民用无人机系统在视频传输信道分配时,都可以采用这一模型。

参 考 文 献

- [1] 美国国防部. 陆军神目:美国陆军无人机系统 2010—2035 路线图[M]. 丁卫华,孟凡松,译. 沈阳:辽宁大学出版社,2011:1-3.
- [2] JIANG Q, LEUNG V CM, TANG H, et al. QoS-Guaranteed Adaptive Bandwidth Allocation for Mobile Multiuser Scalable Video Streaming [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 721-724.
- [3] ZHU L, ZHAN C, HU H. Transmission Rate Allocation for Reliable Video Transmission in Aerial Vehicle Networks [C] // 2018 14th International Wireless Communications Mobile Computing Conference (IWCMC). Limassol, 2018: 30-35.
- [4] BAI X, LI Q, TANG Y. A Low-Complexity Resource Allocation Algorithm for Indoor Visible Light Communication Ultra-Dense Networks [J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1391-1408.
- [5] ZHU K, NIYATO D, WANG P. Optimal Bandwidth Allocation with Dynamic Service Selection in Heterogeneous Wireless Networks [C] // IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010). Miami, 2010: 1-5.
- [6] LI F W, HUANG X, ZHANG H B, et al. Cluster-based Radio Resource Allocation Mechanism in D2D Networks [J]. Computer Science, 2018, 45(9): 123-128, 165. (in Chinese)
李方伟, 黄旭, 张海波, 等. D2D 网络中基于分簇的无线资源分配机制 [J]. 计算机科学, 2018, 45(9): 123-128, 165.
- [7] DONG C W, WEN W S. Joint optimization for task offloading in edge computing: An evolutionary game approach [J]. Sensors, 2019, 19(3): 740-763.
- [8] SARMA A, CHAKRABORTY S, NANDI S. Deciding Handover Points Based on Context-Aware Load Balancing in a Wi-Fi-WiMAX Heterogeneous Network Environment [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 348-357.
- [9] SENOUCI M A, SOUIHI S, HOCEINI S, et al. QoE-based network interface selection for heterogeneous wireless networks: A survey and e-Health case proposal [C] // 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Doha, 2016: 1-6.
- [10] DENG Z, LIU Y, LIU J, et al. QoE-Oriented Rate Allocation for Multipath High-Definition Video Streaming Over Heterogeneous Wireless Access Networks [J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(4): 2524-2535.
- [11] ELGABLIL A, ELGHARIANI A, AGGARWAL V, et al. QoE-Aware Resource Allocation for Small Cells [C] // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, 2018: 1-6.
- [12] YUAN H, WEI X, YANG F, et al. Cooperative Bargaining Game-Based Multiuser Bandwidth Allocation for Dynamic Adaptive Streaming Over HTTP [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(1): 183-197.
- [13] BIAN Y Y. 5G Communication technology promotes the development of military UAVs [J]. Military Abstract, 2019(7): 20-23. (in Chinese)
卞颖颖. 5G 通信技术促进军用无人机发展 [J]. 军事文摘, 2019(7): 20-23.
- [14] 谢希仁. 计算机网络(第 7 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 375.
- [15] XIONG L R, JIN X. QoE Evaluation Model of Mobile Streaming Media [J]. Computer Science, 2017, 44(S2): 110-114. (in Chinese)
熊丽荣, 金鑫. 移动流媒体用户 QoE 评估模型 [J]. 计算机科学, 2017, 44(S2): 110-114.
- [16] SHOAB K, SVETOSLAV D, ECKEHARD S, et al. MOS-Based Multiuser Multiapplication Cross-Layer Optimization for Mobile Multimedia Communication [J]. Advances in Multimedia, 2007, 2007: 1-11.
- [17] THAKOLSRI S, KELLERER W, STEINBACH E. QoE-Based Cross-Layer Optimization of Wireless Video with Unperceivable Temporal Video Quality Fluctuation [C] // 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kyoto, 2011: 1-6.
- [18] CHOI L U, IVRLAC M T, STEINBACH E, et al. Sequence-level models for distortion-rate behaviour of compressed video [C] // IEEE International Conference on Image Processing. Genova, 2005.
- [19] VOORNEVELD M. Best-response potential games [J]. Economics Letters, 2000, 66(3): 289-295.
- [20] SCUTARI G, BARBAROSSA S, PALOMAR D P. Potential Games: A Framework for Vector Power Control Problems With Coupled Constraints [C] // 2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings. Toulouse, 2006.
- [21] HART S, MAS-COLELL A. A Simple Adaptive Procedure Leading to Correlated Equilibrium [J]. Econometrica, 2000, 68(5): 1127-1150.