

无人机无线网络中基于队列稳定的无线与计算资源分配优化

党甜, 王鹏, 赵海舜, 王禹, 杜龙海

(中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081)

摘要: 无人机(UAV)无线网络中, UAV承载基站设备,可灵活提供无线通信服务,支持在高质量的无线信道状态下进行数据传输;另一方面,将边缘计算服务器部署到基站侧,计算资源更靠近用户,通过任务卸载,能够直接在基站侧进行计算处理,缓解无线网络的去程链路压力;但是,考虑到能耗受限问题,如何通过资源优化来降低网络能耗并保证用户到基站的数据传输和任务处理的稳定性依然是研究的难题;针对UAV无线网络中用户向UAV基站发送数据并卸载计算任务的场景,研究了在数据传输和任务处理稳定性约束下进行无线与计算资源优化的能耗最小化问题,构建数据队列与任务队列,采用李雅普诺夫优化理论对问题进行转化和分解,获得能耗与队列的折中关系,并通过仿真分析评估了所提解决方案的有效性。

关键词: 资源分配; 队列稳定; 能耗优化; 无人机无线网络; 计算卸载; 李雅普诺夫优化理论; 折中关系

Queue Stability-based Radio and Computing Resource Allocation Optimization in UAV-enabled Wireless Networks

DANG Tian, WANG Peng, ZHAO Haishun, WANG Yu, DU Longhai

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In unmanned aerial vehicle (UAV)-enabled wireless networks, UAVs carry the base station (BS) to flexibly provide wireless communication services, supporting data transmission in high-quality wireless channel conditions. Meanwhile, deploying the mobile edge computing server on the UAV brings the computing resource closer to users. The computing server is implemented in the mobile edge by offloading tasks, the tasks can be processed directly on the BS, alleviating the pressure on the fronthaul link. However, with the consideration of the constrained energy consumption, it is a challenge how to reduce the energy consumption and ensure the stability of data transmission and task processing from users to the BS. Aimed at the scene that users send the data and offload the computing tasks to the BS in the UAV-enabled wireless networks, the energy consumption minimization problem is researched with allocating the radio and computing resources, with the stability constraints of the data transmission queues and task processing queues, the data queues and task queues are constructed, the Lyapunov optimization theory is utilized to transform and decompose the optimization problem, and obtain the tradeoff between the energy consumption and the queue length. The effectiveness of the proposed solution is evaluated through the simulation analyses.

Keywords: resource allocation; queue stability; energy consumption optimization; UAV-enabled wireless networks; computation offloading; Lyapunov optimization theory; tradeoff

0 引言

无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)无线网络通过将基站部署到UAV上,提高信道环境质量,为用户提供无线通信服务,具备快速部署和灵活机动的优势^[1]。同时,在UAV无线网络中,将边缘计算服务器部署在更靠近用户的UAV基站处^[2],有助于充分利用边缘计算资源,降低服务响应时间,减少网络中基站与核心网间的流量负载。

在边缘计算网络中,边缘计算服务器支持具有计算需求的通信应用,能够降低网络时延和能耗。文献[3]将边缘计算网络中常见的计算任务模型划分为二进制计算卸载和部分计算卸载,从计算时延和能耗方面介绍了边缘计算网络的边缘计算功能,总结了无线和计算资源联合管理对系统性能的增益。文献[4]着重介绍了边缘计算系统的计算卸载问题,综合调研了已有工作对计算卸载决策、计算

收稿日期:2023-08-09; 修回日期:2023-09-11。

基金项目:国防基础科研计划(JCKY2020210B021)。

作者简介:党甜(1994-),女,博士研究生,工程师。

引用格式:党甜,王鹏,赵海舜,等.无人机无线网络中基于队列稳定的无线与计算资源分配优化[J].计算机测量与控制,2024,32(3):280-285.

资源分配和移动性管理的研究。边缘计算网络中的资源调配优化是提高网络性能的关键技术,已有研究主要从计算资源和通信资源方面展开。在计算资源调配方面,文献[5]构建了基于边缘计算卸载的车联网架构,其中行驶车辆根据预测将计算任务提前卸载到行驶方向前方的边缘计算服务器或直接卸载到临近边缘计算服务器,分析了各种卸载方式对成本和时延的影响,并在时延约束下提出了传输和计算成本最小化的预测组合模式卸载方案;为了最小化系统时延和能耗,文献[6]研究了任务分配决策和终端中央处理器频率优化问题,验证了终端中央处理器频率对任务分配决策有明显影响;文献[7]研究了以最小化能耗为目标的任务卸载决策优化问题,针对时分多址的边缘计算卸载场景推导了最优的基于本地计算能量和信道增益的卸载优先级函数,针对正交频分多址的边缘计算卸载场景设计了低复杂度的局部最优算法。在联合无线与计算资源调配方面,文献[8]针对移动设备可获取能量的边缘计算系统,研究了以优化执行时延和丢包成本为目标的任务卸载、计算频率、传输功率和能量采集速率分配问题,设计了一种低复杂度的基于李雅普诺夫优化的动态计算卸载算法。

将计算任务卸载到更靠近网络边缘的计算服务器上,有利于提高计算处理的响应时间,其中计算资源的分配和调度是任务处理效率的关键技术。文献[9]提出一种基于模拟退火思想的改进遗传算法,将虚拟计算资源上任务分配数的标准差作为选择个体的依据来实现节点的负载均衡,降低任务完成时间,提高资源利用率。文献[10]研究了云计算环境中的资源调度问题,针对蚁群优化算法在处理大规模组合优化问题时易陷入搜索速度慢和局部最优解的缺陷,提出了一种实现云计算负载均衡的双向蚁群优化算法,具有较短的总任务完成时间和较好的寻优能力。文献[11]提出一种虚拟机资源高效分配策略,旨在以最低限度的资源损耗成功执行任务,可以大幅节约能源消耗。文献[12]研究了联合通信与计算资源优化问题,考虑缓存容量与计算能耗限制,将问题建模为以优化时延为目标的缓存内容放置与计算任务卸载问题,旨在降低业务服务延迟。

在 UAV 无线网络中, UAV 作为空中基站并配置边缘计算资源,为用户终端提供通信服务和计算任务处理,已引起广泛的关注和研究。文献[13]在空天地综合网络中利用 UAV 为终端提供边缘计算,研究了计算资源分配和任务调度方法,设计了基于机器学习的计算卸载算法,有效降低了网络时延。文献[14]构建了多个 UAV 协同的边缘计算模型,其中 UAV 之间相互分担计算任务,利用差分进化算法确定 UAV 位置,设计协同贪婪算法进行任务卸载和计算资源分配,有效降低了网络能耗和 UAV 数量。文献[15]为 UAV 配置边缘计算服务器,提出了利用 UAV 作为计算和中继节点来降低用户时延,研究了 UAV 位置部署、用户关联、回程链路时间和计算资源分配优化问题。文献[16]利用正交或非正交多址方案实现

频分双工,在此基础上通过地面设备与 UAV 的上下行通信完成任务卸载,联合优化比特分配和 UAV 轨迹,有效降低了 UAV 能源消耗。文献[17]利用 UAV 为地面用户提供边缘计算业务并传输能量,针对任务部分卸载模型推导出最优计算频率、卸载时间和传输功率表达式,针对二进制卸载模型设计了最优的计算任务卸载方案。文献[18]研究了 UAV 无线网络的 UAV 轨迹与资源优化,提出了基于能耗感知的以最小化时延为目标的联合轨迹、传输功率和处理频率分配的交替优化算法,实现了时延与能耗之间可控的折中关系。

在 UAV 无线网络中,用户可以向 UAV 传输数据并卸载计算任务,然而 UAV 的处理能耗和用户的传输能耗资源受限,这影响了网络中数据传输和计算任务处理服务的稳定性。因此,在 UAV 无线网络中,需在保证数据传输及任务处理的稳定性下,研究以最小化能耗为目标的资源分配优化问题,并考虑传输功率和处理资源等约束条件。

针对 UAV 无线网络中用户向 UAV 基站发送数据并卸载计算任务的场景,构建了数据队列和计算任务队列,在保证队列稳定的前提下,解决以最小化平均能耗为目标的无线与计算资源分配优化问题,获得能耗和队列之间可控的折中关系,并利用数据仿真验证所提方案的有效性。

1 系统模型

1.1 网络模型

考虑 UAV 无线网络:在升空 UAV 上配置基站设备和边缘计算服务器,假设 UAV 是可在空中悬停的旋翼 UAV,为地面用户提供接入和任务卸载服务;地面用户向 UAV 基站传输数据并卸载计算任务,如图 1 所示。其中,假设 UAV 将计算任务处理后只需要将指令信息返回给用户,此过程的功耗可忽略不计。假设每个用户向 UAV 传输数据时,分别占用带宽为 W (MHz) 的正交信道,则用户间的无线数据传输无干扰。

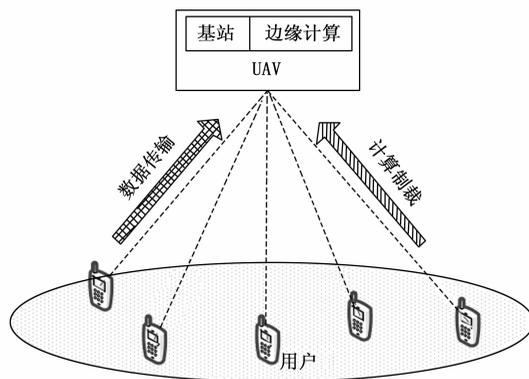


图1 UAV无线网络数据传输和计算卸载模型

将连续时间划分为 T 个时隙,每个时隙的时长为 τ ,假设网络中有 N 个用户向 UAV 基站传输数据并卸载计算任务。在每个时隙 t 上,用户 n 需向 UAV 传输的数据量可以被表示为 $A_n(t)$,用户的数据传输速率是 $R_n(t)$,其数学

表达式为

$$R_n(t) = W \log_2 \left(1 + \frac{p_n(t)h_n(t)}{\sigma^2} \right) \quad (1)$$

其中: $p_n(t)$ 是发射功率, $h_n(t)$ 是信道增益, σ^2 表示噪声功率。每个时隙上各用户的传输功耗的计算公式为传输功率与传输时间的乘积, 即 $p_n(t)\tau$ 。另外, 用户到 UAV 基站的信道采用概率视距模型^[19], 同时考虑视距信道和非视距信道, 其中每个时隙上 UAV 基站与用户之间构建的概率与通信环境以及 UAV 到用户的距离有关, 可在仿真中确定 UAV 和用户的部署位置后再进行计算确定。

假设用户向 UAV 基站卸载的计算任务量与数据量 $A_n(t)$ 呈正比关系, 记为 $\gamma A_n(t)$, γ 表示处理 1 比特数据所需要的 CPU 转数, 则计算任务量的含义是处理 $A_n(t)$ 数据量的任务所需的 CPU 总转数。假设 UAV 基站承载的边缘计算服务器中 CPU 计算资源总量为 C_{\max} , 表示 CPU 处理频率, 即每秒的 CPU 转数。在每个时隙上分配给各用户的计算资源用 $C_n(t)$ 表示, 每个时隙上 UAV 处理每个用户计算任务的功耗的数学表达式为 $\gamma A_n(t)kC_n(t)^2$, 其中 k 表示 CPU 的能量效率。

因此, 每个时隙上的能耗包括所有用户的传输能耗和 UAV 的处理能耗, 其表达式为

$$e(t) = \sum_{n=1}^N p_n(t)\tau + \sum_{n=1}^N \gamma A_n(t)kC_n(t)^2 \quad (2)$$

所有时隙上平均能耗的表达式为

$$\bar{e} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} e(t) \quad (3)$$

其中: $e(0) = 0$, 表示初始时刻的能耗。

1.2 队列模型

针对用户到 UAV 基站的数据传输和计算任务卸载场景, 对数据队列和任务队列建模。

1) 数据队列:

用 $Q_n(t)$ 表示每个用户在每个时隙上的数据队列长度, 其含义可以理解为用户上待传输的数据量, 其中 $Q_n(0) = 0$, 表示初始时刻的队列长度。在每个时隙上, 到达的数据量为 $A_n(t)$, 离开的数据量为 $R_n(t)\tau$ 。因此, 相邻两个时隙上数据队列长度的动态性可以表示为:

$$Q_n(t+1) = [Q_n(t) - R_n(t)\tau]^+ + A_n(t) \quad (4)$$

其中: 运算符 $[\]^+$ 表示取正, 当括号内数值为负数时, 计算结果为 0, 当括号内数值为非负数时, 计算结果等于括号内的数值。

2) 任务队列:

用 $H_n(t)$ 表示每个用户在每个时隙上的任务队列长度, 其含义可以理解为用户所对应的待处理的计算量, 其中 $H_n(0) = 0$, 表示初始时刻的队列长度。在每个时隙上, 到达的任务计算量为 $\gamma A_n(t)$, 离开的任务计算量为 $C_n(t)\tau$ 。因此, 相邻两个时隙上任务队列长度的动态性可以表示为:

$$H_n(t+1) = [H_n(t) - C_n(t)\tau]^+ + \gamma A_n(t) \quad (5)$$

从 (4) 和 (5) 中可以看出, $Q_n(t)$ 和 $H_n(t)$ 是动态队

列, 随着时间、每个时隙上的队列到达量和队列离开量变化而变化。当数据队列长度过大时, 易导致用户缓冲区数据堆积, 数据丢包; 当任务队列长度过大时, 易导致 UAV 基站上卸载的计算任务堆积, 边缘计算服务器的负载过大。为了避免数据队列和任务队列过长, 需要在数据传输和计算任务处理的过程中, 要求 $Q_n(t)$ 和 $H_n(t)$ 均满足队列的稳定性^[20], 即

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[Q_n(t)] \leq +\infty \quad (6)$$

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[H_n(t)] \leq +\infty \quad (7)$$

2 问题建立与求解

接下来, 在队列稳定性约束下, 考虑传输功率和处理资源的限制, 构建以最小化平均能耗为目标的联合无线和计算资源分配优化问题, 如下所示:

$$\min_{(p_n(t), C_n(t))} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} e(t)$$

s. t.

$$C1: \sum_{n=1}^N C_n(t) \leq C_{\max}$$

$$C2: R_n(t) \geq R_{\min}$$

$$C3: p_n(t) \leq p_{\max}$$

$$C4: \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[Q_n(t)] \leq +\infty$$

$$C5: \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[H_n(t)] \leq +\infty \quad (8)$$

其中: 约束条件 C1 表示所有用户分配到的计算资源不超过 UAV 上配置的边缘计算服务器的总计算资源, C2 为用户传输速率约束, R_{\min} 表示用户的最小传输速率, C3 为用户传输功率约束, p_{\max} 表示用户的最大传输功率, C4 和 C5 表示数据队列和任务队列满足稳定性约束。

解决上述能耗优化问题, 需要在已知所有时隙上队列状态的情况下, 求解所有时隙的传输功率和计算资源分配结果, 这是很难获取到的。为了解决该问题, 可以利用李雅普诺夫优化理论^[20], 将其转化, 从全部时隙上的平均能耗最小化问题转化为单个时隙的优化问题, 每个时隙上的问题求解只需获取过去和当前时隙的能耗和资源分配信息。

首先定义 $\Theta(t) = [Q_n(t), H_n(t)]$ 表示每个时隙上的所有数据队列与任务队列的状态, 接着构建李雅普诺夫函数 $J(\Theta(t))$ 作为度量队列拥塞的标量, 其数学表达式为

$$J(\Theta(t)) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N Q_n(t)^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N H_n(t)^2 \quad (9)$$

可以看出, $J(\Theta(t))$ 取值越小, 数据队列与任务队列的长度就越短, 在此基础上, 能保证所有队列是稳定的。为了在所有时隙上保证数据队列和任务队列稳定, 在任意相邻时隙上需控制李雅普诺夫函数的取值变化保持在较小的范围, 这也是保证队列稳定的充分条件^[20]。

根据李雅普诺夫优化理论, 定义李雅普诺夫偏差函数,

表示相邻两个时隙间李雅普诺夫函数的数值变化,即队列拥塞的变化:

$$\Delta(\Theta(t)) = E[J(\Theta(t+1)) - J(\Theta(t)) | \Theta(t)] \quad (10)$$

每个时隙上,构建偏差加罚函数,表达式为偏差函数和能耗的加权和,即

$$\Delta(\Theta(t)) + VE[e(t) | \Theta(t)] \quad (11)$$

其中:常数 $V \geq 0$ 是李雅普诺夫控制参数,表示能耗部分的权重,用来平衡偏差函数与能耗间的折中关系。具体而言,当参数 V 的取值变大时,式(11)中能耗部分占比变大,偏差加罚函数更加偏向于能耗,否则偏差函数部分占比变大,偏差加罚函数更加偏向于数据队列和任务队列。

根据文献[20]中的定理4.2,在任意时隙上,对于所有队列,存在非负常数 $D \geq 0$ 、 $V \geq 0$ 、 $\epsilon \geq 0$,满足下列不等式

$$\Delta(\Theta(t)) + VE[e(t) | \Theta(t)] \leq D + Ve^* - \epsilon \sum_{n=1}^N (Q_n(t) + H_n(t)) \quad (12)$$

其中: e^* 表示优化问题(8)对应的理论最小能耗。当 $V > 0$ 和 $\epsilon > 0$ 时,还可以得到

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[e(t)] \leq e^* + \frac{D}{V} \quad (13)$$

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E \left[\sum_{n=1}^N (Q_n(t) + H_n(t)) \right] \leq \frac{D + V(e^* - e_{\min})}{\epsilon} \quad (14)$$

其中: e_{\min} 是期望能耗的下界,即 $E[e(t)] \geq e_{\min}$ 。

将数据队列和任务队列的计算公式(4)和(5)代入到李雅普诺夫偏差加罚函数(11)中,通过化简,可以得到一个李雅普诺夫偏差加罚函数的上界:

$$\Delta(\Theta(t)) + VE[e(t) | \Theta(t)] \leq B + VE[e(t) | \Theta(t)] - E \left[\sum_{n=1}^N Q_n(t) R_n(t) \tau | \Theta(t) \right] - E \left[\sum_{n=1}^N H_n(t) C_n(t) \tau | \Theta(t) \right] \quad (15)$$

其中: B 为数值有限的常数。

通过最小化偏差加罚函数,可以得到在队列稳定下,最小化能耗的资源分配结果。此时,相比于在每个时隙上最小化偏差加罚函数,可直接将问题转化为在每个时隙上最小化偏差加罚函数的上界^[20],即不等式(15)的右侧。

在此基础上,将传输功率和计算资源分配变量解耦,转化后的优化问题还可以被分解为两个子问题,分别可以表示为:

$$\min_{\{C_n(t)\}} V \sum_{n=1}^N \gamma A_n(t) k C_n(t)^2 - \sum_{n=1}^N H_n(t) C_n(t) \tau \quad (16)$$

s. t. C1

$$\min_{\{p_n(t)\}} V \sum_{n=1}^N p_n(t) \tau - \sum_{n=1}^N Q_n(t) R_n(t) \tau \quad (17)$$

s. t. C2, C3

经分析可得,两个子问题的目标函数都是优化变量的凸函数,约束条件都可以表示为变量的线性函数。因此,

两个子问题都是凸规划问题,可以利用凸优化算法进行求解,也可以通过 Matlab 数学仿真平台中的凸规划(CVX, convex programming)工具包^[21]进行求解。最后总结求解能耗优化问题的流程,如图2所示。CVX工具箱采用一种规则化的编程语言来描述数学优化问题^[22]。通过将凸优化问题构建为满足 CVX 格式要求的标准形式,可以利用简洁的 CVX 语言实现求解的 Matlab 编程,简化求解过程^[23]。

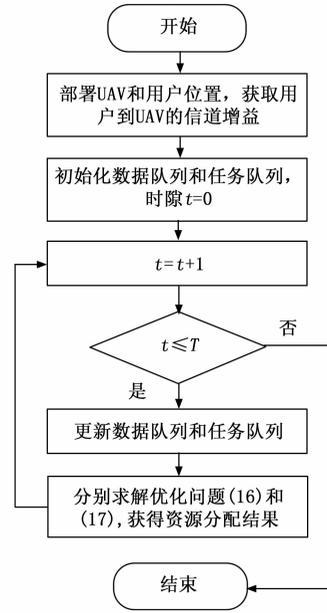


图2 流程图

下面利用 CVX 工具箱分别对两个子优化问题进行求解。针对计算资源分配优化问题(16),利用 CVX 工具箱对计算资源分配变量的求解过程如图3所示。

```

1 cvx_begin
2 variable c_ue(N)
3 minimize sum(V*gamma*k*A(:,t).*c_ue.^2
               -tau*H(:,t).*c_ue)
4 subject to
5 sum(c_ue) <= C_max
6 c_ue >= 0
7 cvx_end
    
```

图3 利用 CVX 工具箱求解计算资源分配问题

为了简洁性,图中省略了对优化问题中其他参数的初始化步骤。图3中的第一列数字为行号,以便对各行进行解释。图3中各行代码的具体含义如下:

1) CVX 开始标识,从 Matlab 运行程序模式切换到 CVX 优化问题求解模式。

2) 定义优化变量,其中 $c_ue(N)$ 是优化目标向量, N 表示阵元数量。优化问题求解结束后, $c_ue(N)$ 将被替换为最优解。

3) 最小化目标函数,将计算资源分配问题(16)的优化目标函数代入。

4) 约束条件的开始标识,接下来将描述优化问题中的约束条件。

5) 设置不等式约束, 所有用户分配到的计算资源的总和不超过 UAV 中的总计算资源。

6) 设置不等式约束, 每个用户分配到的计算资源不小于 0。

7) CVX 结束标识, 优化问题描述完成, CVX 工具箱开始求解上述优化问题。

同样, 针对功率分配问题 (17), 利用 CVX 工具箱的求解过程如图 4 所示。

```

1 cvx_begin
2 variable p_ue(N)
3 minimize sum(V*tau*p_ue-tau*W*Q(:,t)
   .* (log(1+p_ue.*h'/sigma2)/log(2)))
4 subject to
5 p_ue <= p_max
6 p_ue >= (2^(R_min/W)-1)*sigma2./h'
7 p_ue >= 0
8 cvx_end
    
```

图 4 利用 CVX 工具箱求解功率分配问题

图 4 中 CVX 工具箱求解步骤与图 3 内容相似, 在此只对不同的步骤做出解释。图 4 中的第 3 行通过将功率分配问题 (17) 的优化目标函数代入得到最小化目标函数, 第 5 行是每个用户传输功率的最大值约束, 第 6 行根据每个用户传输速率的最小值约束得到, 第 7 行要求每个用户的传输功率不小于 0。

3 仿真结果与分析

最后, 利用仿真数值结果验证所提方案的有效性。在仿真场景中, 假设考虑 300 个时隙, 每个时隙的时间长度为 0.5 秒。具体仿真参数设置如下: 每个用户的通信带宽为 0.15 MHz, 噪声功率为 10^{-14} W。每个用户的最大传输功率为 0.05 W, 最小传输速率为 2 Mbps, UAV 上总计算资源为 1 GHz, 假设处理 1 bit 数据所需的 CPU 转数为 0.1, UAV 上边缘计算处理器的处理能量效率为 10^{-32} 。每个时隙上, 用户需传输的数据量服从均匀分布 $U(0.5 \times 10^6, 1.5 \times 10^6)$ 。

利用 Matlab 工具进行仿真时, 首先将所有用户通过随机撒点放置到以 (0, 0) 为圆心, 以 80 m 为半径的圆形平面中, 每个用户的高度为 0。将 UAV 的水平位置固定为圆心坐标, 飞行高度为 80 m。基于概率视距模型^[19], 可以计算得到用户到 UAV 基站的信道增益为 $h_n(t) = 10^{-PL_n(t)/10}$, 其中 $PL_n(t)$ 表示链路的平均路径损耗, 是视距信道和非视距信道路径损耗的概率均值。

考虑无人机无线网络中有 12 个用户, 图 5 验证了队列的稳定性, 展示了不同李雅普诺夫控制参数下队列长度随时隙的变化情况。其中, 纵坐标队列长度为 $Q_n(t)$ 和 $H_n(t)$ 队列长度的总和, 两类队列长度分别表示用户向 UAV 传输数据时等待被传输的数据量以及 UAV 上对各用户的计算任务进行处理时等待被处理的业务量, 单位分别是比特和转数。由于两类队列长度的单位不同, 所以仅在此做出解释, 在图中纵坐标处未标明单位。从图 5 中可以看出, 对于不

同的控制参数, 队列长度均随着时隙的增加而增大, 然后逐渐趋于稳定。另外, 从图 5 中还可以看出, 当控制参数取值增大时, 队列长度随之变大, 这是因为控制参数的取值影响了队列与能耗的折中关系, 在以增大队列为代价下可以进一步降低能耗。

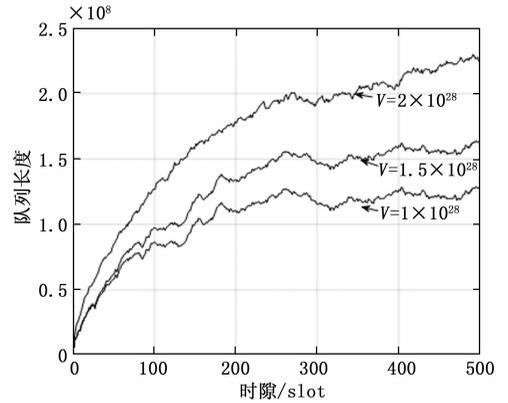


图 5 队列长度随时隙增大而逐渐稳定

图 6 和图 7 展示了不同李雅普诺夫控制参数下的平均能耗和平均队列长度, 验证了能耗与队列长度之间存在折中关系。其中, 图 6 和图 7 中横坐标是李雅普诺夫控制参数, 是没有量纲的常量。图 6 中纵坐标是平均能耗, 单位是焦耳每时隙 (J/slot), 图 7 中纵坐标是平均队列长度, 跟图 5 纵坐标情况类似, 因此未在图中标明坐标。

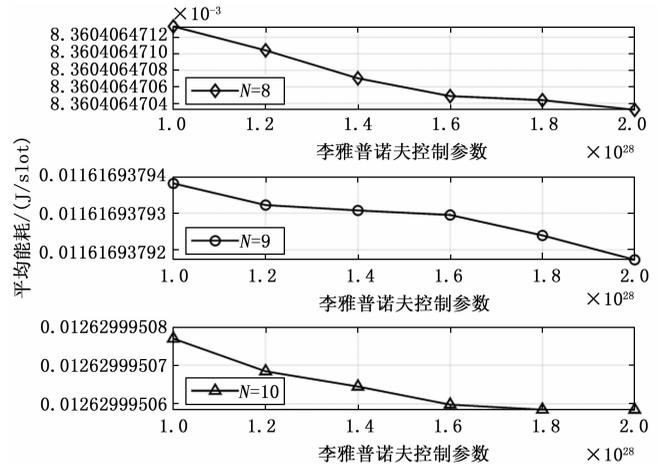


图 6 平均能耗随 V 的变化

从图 6 中可以看出, 平均能耗随控制参数的增大而减小。这是因为控制参数取值增大, 导致李雅普诺夫偏差加罚函数中能耗的比重增大, 在优化过程中能获得更低的能耗。同时, 当用户数量增加时, 能耗随之增大。

从图 7 中可以看出, 平均队列长度随控制参数的增大而增大。这是因为控制参数取值增大, 李雅普诺夫偏差加罚函数中队列的比重相对降低, 在求解优化问题的过程中导致队列长度变大。同时, 用户数量增加时, 平均队列长度随之增大, 这是因为在有限的资源下, 用户数量增大造

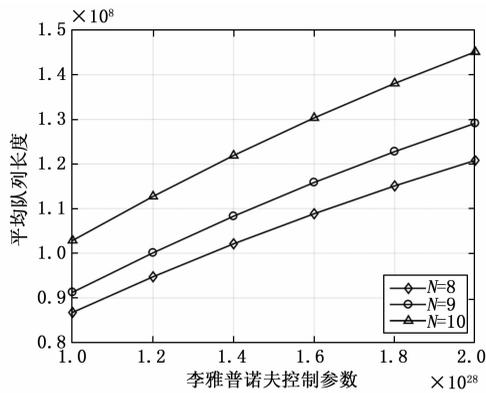


图7 平均队列长度随V的变化

成每个用户获取的资源变少,导致队列变大。

4 结束语

在无人机无线网络场景中,对最小化能耗的无线与计算资源分配问题进行研究,考虑数据队列与任务队列的稳定性约束,利用李雅普诺夫优化理论对问题进行转换,并分解为凸优化问题进行求解。仿真结果表明,利用所提方案,能够保证队列的稳定性,并分析了能耗和队列长度之间可控的折中关系,通过调整李雅普诺夫参数V的数值大小,可以按需降低能耗或者降低队列长度。

参考文献:

- [1] LI B, FEI Z, ZHANG Y UAV. Communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6 (2): 2241 - 2263.
- [2] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: The communication perspective [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19 (4): 2322 - 2358.
- [3] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: The communication perspective [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19 (4): 2322 - 2358.
- [4] MACH P, BECVAR Z. Mobile edge computing: a survey on architecture and computation offloading [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19 (3): 1628 - 1656.
- [5] ZHANG K, MAO Y, LENG S, et al. Mobile-edge computing for vehicular networks [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2017, 12 (2): 36 - 44.
- [6] DINH T Q, TANG J, LA Q D, et al. Offloading in mobile edge computing: task allocation and computational frequency scaling [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65 (8): 3571 - 3584.
- [7] YOU C, HUANG K, CHAE H, et al. Energy-efficient resource allocation for mobile-edge computation offloading [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16 (3): 1397 - 1411.
- [8] MAO Y, ZHANG J, LETAIEF K B. Dynamic computation offloading for mobile-edge computing with energy harvesting devices [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,

2016, 34 (12): 3590 - 3605.

- [9] 刘峰, 毕利, 杨军. 一种用于云计算资源调度的改进遗传算法 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (5): 202 - 206.
- [10] 王常芳, 徐文忠. 一种用于云计算资源调度的双向蚁群优化算法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2861 - 2863.
- [11] 余国清, 周兰蓉. 大数据云中心虚拟机资源高效分配应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (8): 272 - 274.
- [12] DANG T, PENG M. Joint radio communication, caching, and computing design for mobile virtual reality delivery in fog radio access networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37 (7): 1594 - 1607.
- [13] CHENG N, LYU F, QUAN W, et al. Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: A learning-based approach [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37 (5): 1117 - 1129.
- [14] WANG Y, WANG H, WEI X. Energy-efficient UAV deployment and task scheduling in multi-UAV edge computing [A] // Proc of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP) [C], IEEE Press, 2020: 1147 - 1152.
- [15] ZHANG L, ANSARI N. Latency-aware IoT service provisioning in UAV-aided mobile-edge computing networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7 (10): 10573 - 10580.
- [16] JEONG S, SIMEONE O, KANG J. Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: optimization of bit allocation and path planning [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 (3): 2049 - 2063.
- [17] ZHOU F, WU Y, HU R Q, et al. Computation rate maximization in UAV-enabled wireless-powered mobile-edge computing systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36 (9): 1927 - 1941.
- [18] DANG T, LIU, C, PENG M. Low-Latency mobile virtual reality content delivery for unmanned aerial vehicle-enabled wireless networks with energy constraints [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72 (2): 2189 - 2201.
- [19] Al-Hourani A, Kandeepan S, Lardner S optimal LAP altitude for maximum coverage [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3 (6): 569 - 572.
- [20] NEELY M J. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems [M]. Morgan and Claypool Publishers, Synthesis Lectures on Communication Networks, 2010.
- [21] GRANT M C, BOYD S P. The CVX users' guide [R]. 2020: 1 - 89.
- [22] 王芳, 陈勇, 叶志清, 等. 基于 CVX 工具箱的自适应波束形成实验. 电气电子教学学报 [J], 2016, 38 (2): 136 - 139.
- [23] 李玮, 邓维波. CVX 凸优化工具箱在阵列天线分析与综合课程中的应用与实践. 中国电子教育 [J], 2016, 5 (2): 25 - 29.