



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
6G Requirements, Vision, and Enabling Technologies—Article

6G 广域时延敏感物联网——移动边缘计算使能的非地面网络设计

刘承骁^{a,b}, 冯伟^{a,b,*}, 陶晓明^{a,b}, 葛宁^{a,b}

^a Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^b Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 December 2020

Revised 11 June 2021

Accepted 29 August 2021

Available online 16 November 2021

关键词

无蜂窝

移动边缘计算

非地面网络

第六代移动通信技术

广域时延敏感物联网

摘要

在即将到来的第六代移动通信技术(6G)时代,广域时延敏感物联网(IoT)需求不断增加。由于传统蜂窝技术难以直接用于广域时延敏感IoT,因此使用非地面基础设施,包括卫星和无人机(UAV)等,基于无蜂窝网络架构构建非地面网络(NTN)亟待研究。考虑到时延敏感业务需求和IoT设备分布不均的特点,NTN可使用移动边缘计算(MEC)来增强业务支持能力,并提供“沙漠绿洲”状(oasis-oriented)的按需覆盖。然而,在MEC使能的NTN中,通信和MEC系统相互耦合,带来通信与计算资源协同编排难题。本文提出一种面向过程的优化框架,在更大时间尺度上设计通信和MEC系统。在这个框架中,本研究采用大尺度信道状态信息(CSI)刻画复杂传播环境,构建通信与计算资源联合编排的时延最小化问题;给出该优化问题的近似问题,并将其分解为多个子问题;然后,提出迭代算法来求解这些子问题。仿真结果表明,与现有算法相比,所提出的面向过程的方案可以降低任务总时延。这为无人机载荷部署提供了依据,也显示了在广域时延敏感IoT中NTN与MEC协同设计的潜力。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

在未来基于第六代移动通信技术(6G)构建的网络中,前沿技术的关注重点将从人类转向智能机器[1]。与人类不同的是,这些机器通常分布在偏远地区[1],而在这些地区建设机器的目的是为了完成对时延十分敏感的工业生产任务[2-3]。因此,在即将到来的6G时代,在广域构建时延敏感物联网(IoT)的需求正在不断增加[1-3]。

然而,事实上地面基础设施难以在偏远地区部署[4-6],因而地面蜂窝网络在覆盖能力方面将会存在盲区[7]。

因此,很难使用传统的第四代移动通信技术(4G)和第五代移动通信技术(5G)为偏远地区的机器提供服务。考虑到这一挑战,采用包括卫星和无人机(UAV)的非地面基础设施,来进行广域时延敏感IoT的设计是有益的,因此需要建立一个非地面网络(NTN)。特别是,需要一个具有特定覆盖模式的NTN为机器提供按需覆盖,以适应机器在偏远地区“沙漠绿洲”状(oasis-oriented)的不均匀分布。上述分析表明,NTN应在无蜂窝的网络架构下进行设计[8]。此外,由于机器对时延敏感业务的需求,来自机器的数据必须尽快由NTN完成处理。为了实现这一功能,动中通天线和边缘服务器可以一起被放在

* Corresponding author.

E-mail address: fengwei@tsinghua.edu.cn (W. Feng).

无人机上, 以便NTN既能在卫星和UAV之间建立高速通信链路[9], 也能在UAV上使用移动边缘计算(MEC)[10]快速处理数据。基于这种网络设计方法, 我们可以在无蜂窝架构下构建MEC使能的NTN。然而, 通信和MEC在NTN中会相互耦合, 同时也会有复杂的传播环境影响, 这些因素为NTN的设计带来了新的挑战。首先, 由于偏远地区的复杂传播环境, 在无蜂窝架构下实现“沙漠绿洲”状的按需覆盖设计是一项挑战[8]。此外, 由于通信和MEC系统相互耦合, 资源的协同编排设计方法也会更加复杂[10]。因此, 我们需要研究MEC使能的NTN的具体设计方法, 使这种网络能够进一步被用于广域时延敏感IoT。

2. 文献综述

对于广域IoT, 窄带物联网(NB-IoT)是在传统蜂窝结构下设计的一种使能技术[11], 而远程无线电(LoRa)技术的提出进一步扩大了IoT的覆盖范围[12]。此外, 时延敏感网络(TSN)的提出在世界范围内引起了广泛关注, 这种网络能够服务于时延敏感型的机器通信, 其中工业自动化是主要的应用场景[13-15]。Lo Bello等[13]概述了TSN对各种工业系统的适用性。Liang等[14]对无线工业-工厂自动化(WIA-FA)技术及其应用场景进行了全面的调研。Luvisotto等[15]评估了无线高性能(WirelessHP)技术用于工业无线网络的可行性。这些研究促进了第三代合作伙伴计划(3GPP)构建的5G高可靠低时延通信(URLLC)[16]和工业IoT[17]的标准化。

由于地面蜂窝网络的覆盖盲区, NTN可能在6G中有一定的优势, 其中NTN的标准化已在3GPP标准的第16版(R16)中启动[18]。未来, 支持广域时延敏感IoT的NTN设计将在3GPP标准的第17版(R17)[19]中讨论。在现有研究中, 基于卫星的IoT已被广泛讨论, 因为它可以为广域IoT提供无处不在的覆盖[20-22]。De Sancrics等[20]研究了基于卫星的超远距离IoT的协议和体系结构。Cioni等[21]研究了卫星支持的大规模机器型通信(MMTC)的机遇和挑战。Zhen等[22]提出了一种优化的导频信号设计方法, 该方法能够适应基于卫星的MMTC的以组为单位的随机接入模式。然而, 基于卫星的IoT系统存在高时延和低效率等问题[20-22], 这些问题导致基于卫星的IoT难以满足智能机器的通信要求[1]。

此外, UAV有潜力为广域时延敏感IoT提供按需服务[23-26]。在参考文献[23]中, 针对基于UAV的IoT, 论文

提出了一种低时延路由算法, 该算法使用无人机群设计了一种层次化的网络架构。参考文献[24]中提出了基于UAV的IoT设计方法, 目的是支持实时的远程虚拟现实。参考文献[25]对IoT设备的上行链路(UL)功率进行了优化, 以设计基于UAV的URLLC网络。在这篇文献中提出了基于UAV的全方位信任评估系统的设计方法, 旨在从IoT设备可靠地收集数据[26]。为了进一步提高时延性能, 现有研究进一步考察将基于UAV的IoT与MEC紧密融合[27-32]。参考文献[27]对UAV的三维部署进行了优化, 以支持对时延敏感的IoT, 其中UAV以云的形式进行组织。如参考文献[28]所述, 作者提出的算法能够使基于UAV的MEC网络中的用户平均时延最小化。在参考文献[29]中, 作者提出的方法面向智能IoT社区对无人机的轨迹进行了优化, 其中也讨论了基于增强现实的案例分析。参考文献[30]考虑到严格的时延要求, 提出了一种节能的多维度资源分配方案。在参考文献[31]中, 作者提出了一种安装在UAV上的在线MEC服务器调度方案, 该方案通过有效的资源利用机制保证了用户之间的时延公平性。此外, 这篇文献还建立了一个基于多UAV的任务卸载系统, 这一系统能够以可靠的方式让数据从IoT设备传输到MEC服务器上[32]。然而, 基于UAV的网络通常缺乏持久性和稳定性[33], 这些缺点在设计广域时延敏感IoT时将不可避免地成为使用UAV作为基站时的限制因素。

因此, 将卫星和UAV与MEC联合使用有利于设计广域时延敏感IoT[10,34-35]。在参考文献[34]中, Liu等人提出了一种面向IoT的空-天-地-海一体化网络以任务为中心的智能体系结构。Cheng等[10]研究了面向IoT的空-天-地协同网络计算资源分配和任务卸载策略的联合设计, 这一方案考虑了严格的时延约束, 同时使用了一种基于学习的算法。Cao等[35]讨论了在风的影响下卫星UAV协同网络中UAV航迹和任务卸载策略的耦合问题。尽管现有研究已取得了上述进展, 但在网络的无蜂窝架构下, 当NTN与MEC需要进行一体化设计时, 我们将遇到新的挑战。首先, 由于复杂的传播环境, NTN无法完美地获取信道状态信息(CSI), 这一问题导致在实现面向“沙漠绿洲”状分布的机器的按需覆盖时, 网络设计方法十分复杂。其次, 由于通信系统和MEC系统相互耦合, 因此在MEC使能的NTN中无法以简单的方式实现通信和计算资源的协同编排。在之前的研究[8]中, 我们讨论了卫星UAV协同网络的无蜂窝覆盖模式。在本研究中, 我们继续针对广域时延敏感IoT的特点, 讨论MEC使能的NTN的设计方法。表1[11-12,14-17,20-22]总结了现有技术 with 相应研究领域之间的关系。

表1 现有技术和本文关注的研究领域

Specific area	Latency requirement	Coverage pattern	Technology	Refs.
Wide-area IoT	Large latency allowed	Cellular-based	NB-IoT	[11]
		Expanded cellular	LoRa	[12]
		Ubiquitous	Satellite-based IoT	[20-22]
TSN	Sensitive to latency	Indoor	WIA-FA	[14]
			WirelessHP	[15]
		Cellular-based	3GPP 5G URLLC	[16]
			3GPP Industrial IoT	[17]
Wide-area time-sensitive IoT		Oasis-oriented under a cell-free architecture	MEC-empowered NTN	

3. 研究贡献

本研究提出了一种用于广域时延敏感IoT的MEC使能的NTN的设计方法。特别地，本文专注于NTN的设计，这一网络拟由卫星和UAV通过层次化协同的方式组成，同时考虑总的通信和计算时延作为网络时延性能的量度。本研究中的MEC使能的NTN将以时分方式在面向过程的优化框架下进行设计[8]，以满足广域时延敏感IoT的服务需求，其中将基于大尺度CSI来建立使时延最小化的优化问题。随后，本文提出了一种面向过程的联合资源编排方案来求解上述时延最小化问题。本研究的主要贡献总结如下：

(1) 针对MEC使能的NTN，本文提出了一个面向过程的优化框架。该框架可以以时分方式为层次化集成的卫星和UAV联合设计通信和MEC系统。随后，本文提出了一个总通信和计算时延最小化问题，其中在建模时使用大尺度CSI以可承受的代价刻画复杂的传播环境。

(2) 由于本研究考虑的时延最小化问题是一个非凸的随机优化问题，本文首先证明了原问题可以转化为一个简化形式。随后，提出了一个对简化后问题的近似方法，这使得近似后的问题可以根据总通信和计算效率函数的性质进一步分解为多个子问题。

(3) 本研究提出了一种联合功率分配和数据流调度方案来分别求解多个子问题，其中应用了块坐标下降和逐次凸近似技术。提出的方案以迭代的形式给出了面向过程的多维度资源联合编排方案。

本文的其余部分组织如下：第4节介绍系统模型和面向过程的优化框架；第5节介绍时延最小化问题的解决方案，其中引入了联合功率分配和数据流调度方案；仿真结果和讨论见第6节；结论见第7节。

4. 系统模型

图1展示了由层次化协同的卫星和UAV组成的MEC

使能的NTN，其具有 U 个单天线IoT设备以及配备MEC服务器和 M 个天线的 K 个组成集群的UAV，同时有一个可通过网关将数据发送回云服务器的卫星。假设无人机沿着预定的圆形轨道围绕IoT设备飞行。这种模式可以在保证稳定性的情况下节约能源[36]。为了适应广域时延敏感IoT中的设备分布，本系统在无蜂窝架构下设计了层次化的NTN[8]，其中可以观察到“沙漠绿洲”状的覆盖模式。基于这种覆盖模式，可以预先确定IoT设备和UAV之间的关联关系。为了简化数学分析，用户关联的指标集被表示为 $z = \{z_{u,k}\}$ ，其中 $z_{u,k} = 1$ 表示第 u 个设备和第 k 个UAV相互关联。

在实际系统中，每个IoT设备的计算能力通常较弱，因此，IoT设备必须向卫星或UAV上传数据，以完成计算密集但时延敏感的任务[10]。在这一系统中，当云服务器成功接收到来自设备的所有数据后，我们认为整个通信和计算的过程结束[37-38]。我们假设第 u 个设备要上传的数据量为 D_u 。假设通信和计算过程在面向过程的框架下设计，这种设计框架能够管理UAV的移动性对数据传输的影响，从而降低优化整个过程的复杂程度[8]。如图2所示，在提出的框架下整个过程被划分为 N_T 段。MEC使能的NTN的参数在每个时间段开始时更新，并假设在每个时间段期间这些参数是恒定不变的，并在不同的时间段中这些参数可能彼此不同。系统参数的更新间隔可表示为 δ_T ，总通信和计算时延在数学上可以表示为 $T_{\text{total}} = N_T \delta_T + \epsilon_a$ ，其中 ϵ_a 是电磁波的总传播时间。特别地，在第 t 个时间段中，第 u 个设备可以直接向卫星发送占总数据量比率为 $\eta_{u,t}^t$ 的数据，也可以通过设备-UAV和UAV-卫星链路向卫星发送 $\eta_{u,t}^s$ 比率的数据，以及通过设备-UAV链路向机载MEC服务器发送 $\eta_{u,t}^c$ 比率的数据以进行边缘计算。因此，有式(1)和式(2)作为对这些比率的实际约束条件。MEC服务器在完成数据计算后，计算结果通过UAV-卫星链路从MEC服务器传输到卫星。为了简化数学分析，假设输出数据大小与MEC服务器的输入数据大小成正比

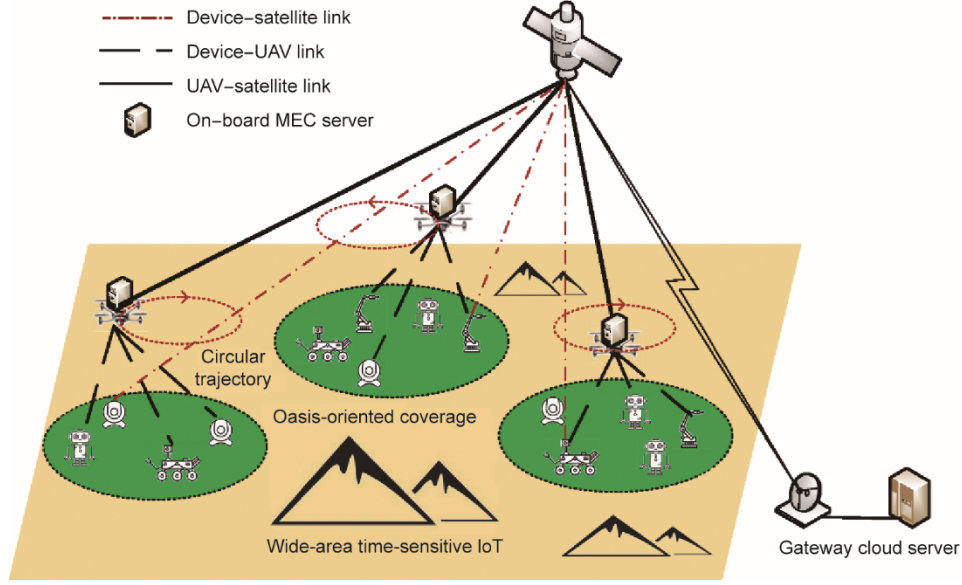


图1. 面向广域时延敏感IoT的MEC使能的层次化NTN示意图。

[39-40], 其中来自第 u 个设备的数据被压缩后占原数据量的比例可表示为 ζ_u 。

$$\eta_t^L + \eta_{u,t}^S + \eta_{u,t}^C = 1, \quad \forall u, t \quad (1)$$

$$0 \leq \eta_t^L, \eta_{u,t}^S, \eta_{u,t}^C \leq 1, \quad \forall u, t \quad (2)$$

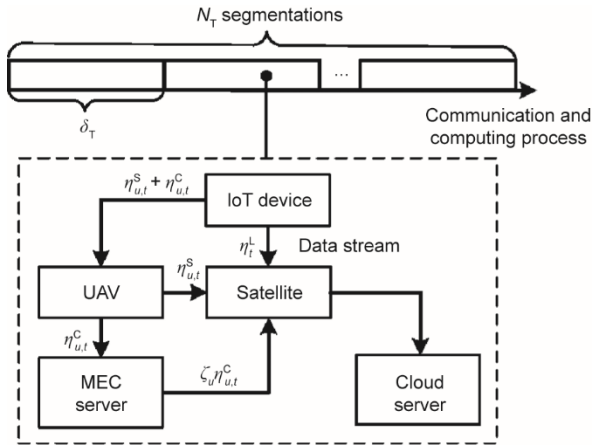


图2. 在MEC使能的NTN中的面向过程的优化框架示意图。

在过程的每个时间段中, 来自IoT设备的数据首先将传输到卫星或UAV上。在无蜂窝架构下, 假设所有设备共享相同的频带[8], 其中假设带宽为 B 。当IoT设备直接连接到卫星时, 假设设备和卫星之间的UL速率为常数[41], 即 R^L 。此外, 当IoT设备与UAV连接时, 这些设备和UAV共同组成用于数据传输的多用户多输入多输出(MU-MIMO) UL系统。因此, 第 t 个时间段中来自第 k 个UAV的第 u 个用户的接收信号公式可表示如下:

$$\mathbf{y}_{u,k,t} = \mathbf{h}_{u,k,t} x_{u,t} + \sum_{v=1, v \neq u}^U \mathbf{h}_{v,k,t} x_{v,t} + \mathbf{n}_{u,k,t} \quad (3)$$

式中, $x_{u,t}$ 和 $x_{v,t}$ 是发送符号; $\mathbf{n}_{u,k,t}$ 是加性高斯白噪声(AWGN)矢量, 并满足 $\mathbf{n}_{u,k,t} \sim N(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$, 其中 σ^2 是噪声方差, \mathbf{I}_M 表示 M 维的单位矩阵, $\mathbf{h}_{u,k,t}$ 是信道矢量, 可表示为:

$$\mathbf{h}_{u,k,t} = s_{u,k,t} l_{u,k} \mathbf{a}_{u,k} \quad (4)$$

式中, $s_{u,k,t}$ 表示快速变化的小尺度信道参数, 相互之间独立同分布并服从 $[0, 2\pi]$ 之间的均匀分布, 同时它们的幅度均服从Nakagami- m 分布[36], 其概率分布密度函数为:

$$f_{|s|}(z) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} z^{2m-1} e^{-\frac{mz^2}{\Omega}} \quad (5)$$

式中, m 和 Ω 均为Nakagami- m 分布的参数; $\Gamma(m)$ 表示以 m 为自变量的gamma函数。对于上述小尺度参数, 均假设当 u, k 和 t 不同时, 这些参数相互之间独立[42]。除此之外, $l_{u,k}$ 表示UAV信道缓慢变化的信道衰减参数, 可表示如下[36]:

$$l_{u,k} = 10^{-\frac{L_{u,k}}{20}} \quad (6)$$

$$L_{u,k} = \frac{A_0}{1 + a e^{-b(\theta_{u,k} - a)}} + B_0 \quad (7)$$

式中, $A_0 = \eta_{\text{LOS}} - \eta_{\text{NLOS}}$; $B_0 = 20 \lg(d_{u,k}) + 20 \lg\left(\frac{4\pi f}{c}\right) + \eta_{\text{NLOS}}$; f 是载波频率; c 表示光速; η_{LOS} 、 η_{NLOS} 、 a 和 b 均为与传播环境有关的常数; $d_{u,k}$ 为IoT设备和UAV之间的距离; $\theta_{u,k} = \frac{180}{\pi} \arcsin\left(\frac{h_k}{d_{u,k}}\right)$ 表示设备-UAV链路与水平面的夹角; h_k 表示第 k 个UAV离地面的高度; $\mathbf{a}_{u,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 是接收天线阵列的阵列流形矢量。我们假设UAV能够搭载均匀线型天线阵列(UA), 从而有如下表达式[43]:

$$\mathbf{a}_{u,k} = \left[\mathbf{1}, \mathbf{e}^{j \frac{2\pi d_0}{c} \cos(\theta_{u,k})}, \dots, \mathbf{e}^{j \frac{2\pi d_0}{c} (M-1) \cos(\theta_{u,k})} \right]^T \quad (8)$$

式中, j 是虚数单位; T 是矩阵转置符号; d_0 表示相邻天线的间距。

在本系统中, 从设备到 UAV 的数据传输过程是在 UAV 起飞之前设计的, 其时间尺度远远大于信道相干时间。因此, 使用导频符号, UAV 可以在信道相干时间内准确地估计式 (4) 中的 UL CSI; 然而, 考虑到整个过程相对更大的时间尺度, 在 UAV 起飞之前无法完全获得准确的 CSI。因此, 在设计数据传输过程时很难使用完美的 CSI。特别地, 我们将位置相关参数, 即 $l_{u,k}$ 和 $\mathbf{a}_{u,k}$ 视为缓慢变化的大尺度信道参数。同时, 在实际系统中, 我们也可以使用电磁地图准确地获取这些参数[5], 因此可假设这些大尺度参数在整个过程中保持不变。相比之下, 由于 UAV 的运动, $s_{u,k,t}$ 变化迅速, 因而只有其分布可认为是已知的。在这些假设下, 可以使用遍历速率来评估过程每个时间段中的数据传输效率[8]。此外, 也可以合理地假设在接收机处系统使用最小均方误差 (MMSE) 检测方法[37], 其中第 t 个时间段中第 k 个 UAV 处的第 u 个设备的检测向量可表示为 $\mathbf{w}_{u,k,t}$ [44]。因此, 第 t 个时间段中的第 k 个 UAV 上的第 u 个设备的 UL 遍历速率可由如下公式表示[45]:

$$R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) = (1 - \gamma_{\text{UL}}) \mathbf{B} \mathbf{E} \times \left\{ \log_2 \left[1 + \frac{p_{u,t} |\mathbf{w}_{u,k,t}^H \mathbf{h}_{u,k,t}|^2}{\sum_{v=1, v \neq u}^U p_{v,t} |\mathbf{w}_{u,k,t}^H \mathbf{h}_{v,k,t}|^2 + \|\mathbf{w}_{u,k,t}\|^2 \sigma^2} \right] \right\} \quad (9)$$

式中, \mathbf{E} 表示数学期望符号; \mathbf{H} 是矩阵的共轭转置符号; γ_{UL} 表示参考信号量占总信号量的比例。因此, $R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P})$ 可被认为是净可达速率[46]; $\mathbf{P} = (p_{u,t}) \in \mathbb{R}^{U \times N_t}$ 表示功率矩阵; $p_{u,t} = \mathbf{E}\{x_{u,t}^H x_{u,t}\}$ 表示信号功率。

在 UAV 从设备接收到数据流后, 这些数据流被进一步调度用于通信和计算。为了保证系统稳定性, 假设该系统在非阻塞模式下工作[39], 其中数据流中的任何数据包都可以从设备传输到云服务器, 而无需经过任何等待时间。因此, 数据流的约束可表示如下[39]:

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^C z_{u,k} R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^C, \quad \forall k, t \quad (10)$$

$$\sum_{u=1}^U (\eta_{u,t}^S + \zeta_u \eta_{u,t}^C) z_{u,k} R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^S, \quad \forall k, t \quad (11)$$

式中, R_k^C 表示 MEC 服务器的平均计算效率; R_k^S 表示

UAV-卫星链路的数据传输速率。这些均可认为是第 k 个 UAV 的预先设定的参数。除此之外, 对于第 t 个时间段的第 u 个设备, 计算和通信的总体平均效率有如下表示:

如果只有卫星被用于通信, 则

$$R_{u,t}^a = R^L \quad (12a)$$

如果 UAV 只被用于通信, 其上的 MEC 服务器不被用于计算, 则

$$R_{u,t}^a = \left(\frac{\eta_t^L}{R^L} + \frac{\eta_{u,t}^S}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P})} + \frac{\eta_{u,t}^S}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^S} \right)^{-1} \quad (12b)$$

如果 UAV 及其上的 MEC 服务器同时被用于通信和计算, 则

$$R_{u,t}^a = \left(\frac{\eta_t^L}{R^L} + \frac{\eta_{u,t}^S + \eta_{u,t}^C}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P})} + \frac{\eta_{u,t}^S + \zeta_u \eta_{u,t}^C}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^S} + \frac{\eta_{u,t}^C}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^C} \right)^{-1} \quad (12c)$$

如式 (12a) ~ (12c) 所示, $R_{u,t}^a$ 在不同情况下具有不同的值。其原因是, 在实际系统中, 数据以连续数据包的形式从设备传输到卫星和 UAV。在这一过程中, 系统参数的更新间隔应大于数据包传输时间, 以保持系统稳定。如图 2 所示, 通过设备-UAV 链路和 UAV-卫星链路的卫星发送数据需要至少 $2\epsilon_0$ 的包传输时间 (假设 ϵ_0 为一个数据包的传输或处理时间), 而通过设备-UAV 链路、MEC 服务器和 UAV-卫星链路的卫星发送数据需要至少 $3\epsilon_0$ 的包传输时间。因此, UAV 和 MEC 服务器只能在更新间隔足够大时才能同时用于通信和计算, 因而会导致 $R_{u,t}^a$ 的值在不同情况下有所变化。

基于式 (1) ~ (12), 本研究关注的时延最小化问题可表示为如下形式:

$$\min_{\mathbf{P}, \eta, \delta_T} N_T \delta_T \quad (13a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=1}^{N_T} R_{u,t}^a \delta_T \geq D_u, \quad \forall u \quad (13b)$$

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^C z_{u,k} R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^C, \quad \forall k, t \quad (13c)$$

$$\sum_{u=1}^U (\eta_{u,t}^S + \zeta_u \eta_{u,t}^C) z_{u,k} R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^S, \quad \forall k, t \quad (13d)$$

$$0 \leq p_{u,t} \leq P_{\max}, \quad \forall u, t \quad (13e)$$

$$\eta_t^L + \eta_{u,t}^S + \eta_{u,t}^C = 1, \quad \forall u, t \quad (13f)$$

$$0 \leq \eta_t^L, \eta_{u,t}^S, \eta_{u,t}^C \leq 1, \quad \forall u, t \quad (13g)$$

式中, $\eta = \{\eta_t^L, \eta_{u,t}^S, \eta_{u,t}^C\} (\forall u, t)$ 表示变量集合; N_T 是预先确定的参数; δ_T 在问题的求解过程中被优化以寻找最小的总

传输时延。式 (13b) 能够保证所有设备的服务需求均能够被满足；式 (13c) 和式 (13d) 均为对数据流的速率约束；式 (13e) 表示对设备的功率约束, 其中 P_{\max} 表示最大传输功率；式 (13f) 表示对数据流调度的实际系统约束；式 (13g) 表示变量的取值范围。

5. 面向过程的优化框架下的功率分配和数据流规划联合设计方法

5.1. 问题分解

通过观察式 (13a) ~ (13d) 可以发现, 式 (13) 是一个非凸随机优化问题, 难以使用现有工具直接求解。为进一步简化公式 (13), 给出 $R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P})$ 的如下近似表示 [45,47]:

$$\hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) = (1 - \gamma_{\text{UL}}) B \log_2 \left(1 + \frac{p_{u,t} \theta_{u,u,k}}{\sum_{v=1, v \neq u}^U p_{v,t} \theta_{u,v,k} + \sigma^2} \right) \quad (14)$$

式中,

$$\theta_{u,v,k} = \mathbf{E} \left\{ \frac{|\mathbf{w}_{u,k,t}^H \mathbf{h}_{v,k,t}|^2}{\|\mathbf{w}_{u,k,t}\|^2} \right\} \quad (15)$$

根据式 (14) 和式 (15), $\theta = \{\theta_{u,v,k}\} (\forall u, v, k)$ 是在资源编排算法运行之前计算的, θ 中的参数可视为确定性参数。这表明式 (14) 中的期望运算符可以被消除。图3表明, 对于随机生成的信道向量和传输功率, 本文提出的容量近似值是足够准确的, 而这种近似的合理性在理论上也可以利用中心极限定理和 Jensen 不等式进行初步验证[48]。

基于式 (14) 和式 (15), 式 (13b) ~ (13d) 中的 $R_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P})$ 可被 $\hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P})$ 代替。随后, 式 (13) 中的问题基于 $R_{u,t}^{\text{a}}$ 的分段特性, 可以进一步分解为三个子问题, 如下所示:

$$\min_{\mathbf{P}, \eta, \delta_{\text{T}}} \delta_{\text{T}} \quad (16a)$$

$$\text{s.t. } N_{\text{T}} \delta_{\text{T}} R^{\text{L}} \geq D_u, \forall u \quad (16b)$$

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^{\text{C}} z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^{\text{C}}, \forall k, t \quad (16c)$$

$$\sum_{u=1}^U (\eta_{u,t}^{\text{S}} + \zeta_u \eta_{u,t}^{\text{C}}) z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^{\text{S}}, \forall k, t \quad (16d)$$

$$0 \leq p_{u,t} \leq P_{\max}, \forall u, t \quad (16e)$$

$$\eta_t^{\text{L}} + \eta_{u,t}^{\text{S}} + \eta_{u,t}^{\text{C}} = 1, \forall u, t \quad (16f)$$

$$0 \leq \eta_t^{\text{L}}, \eta_{u,t}^{\text{S}}, \eta_{u,t}^{\text{C}} \leq 1, \forall u, t \quad (16g)$$

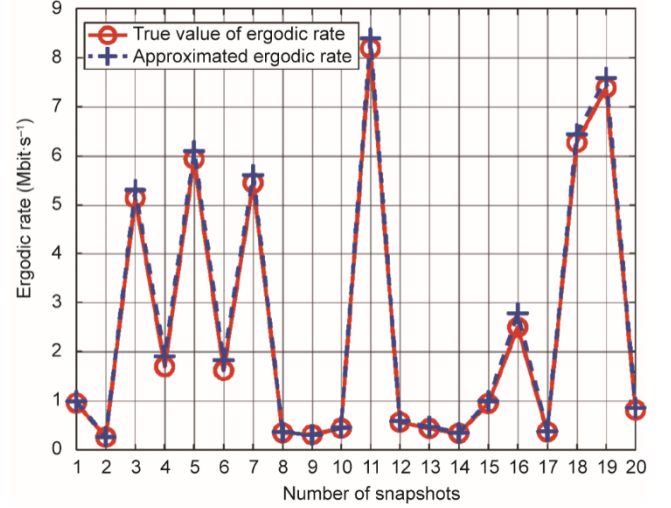


图3. 利用数值计算方法评估近似遍历速率的准确度。

$$\delta_{\text{T}} \geq \epsilon_0 \quad (16h)$$

$$\min_{\mathbf{P}, \eta, \delta_{\text{T}}} \delta_{\text{T}} \quad (17a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} \delta_{\text{T}} \left(\frac{\eta_t^{\text{L}}}{R^{\text{L}}} + \frac{\eta_{u,t}^{\text{S}} + \eta_{u,t}^{\text{C}}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P})} + \frac{\eta_{u,t}^{\text{S}} + \zeta_u \eta_{u,t}^{\text{C}}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^{\text{S}}} + \frac{\eta_{u,t}^{\text{C}}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^{\text{C}}} \right)^{-1} \geq D_u, \forall u \quad (17b)$$

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^{\text{C}} z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^{\text{C}}, \forall k, t \quad (17c)$$

$$\sum_{u=1}^U (\eta_{u,t}^{\text{S}} + \zeta_u \eta_{u,t}^{\text{C}}) z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^{\text{S}}, \forall k, t \quad (17d)$$

$$0 \leq p_{u,t} \leq P_{\max}, \forall u, t \quad (17e)$$

$$\eta_t^{\text{L}} + \eta_{u,t}^{\text{S}} + \eta_{u,t}^{\text{C}} = 1, \forall u, t \quad (17f)$$

$$0 \leq \eta_t^{\text{L}}, \eta_{u,t}^{\text{S}}, \eta_{u,t}^{\text{C}} \leq 1, \forall u, t \quad (17g)$$

$$\delta_{\text{T}} \geq 3\epsilon_0 \quad (17h)$$

$$\min_{\mathbf{P}, \eta, \delta_{\text{T}}} \delta_{\text{T}} \quad (18a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} \delta_{\text{T}} \left(\frac{\eta_t^{\text{L}}}{R^{\text{L}}} + \frac{\eta_{u,t}^{\text{S}}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P})} + \frac{\eta_{u,t}^{\text{S}}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^{\text{S}}} \right)^{-1} \geq D_u, \forall u \quad (18b)$$

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^{\text{C}} z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^{\text{C}}, \forall k, t \quad (18c)$$

$$\sum_{u=1}^U (\eta_{u,t}^{\text{S}} + \zeta_u \eta_{u,t}^{\text{C}}) z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}) \leq R_k^{\text{S}}, \forall k, t \quad (18d)$$

$$0 \leq p_{u,t} \leq P_{\max}, \forall u, t \quad (18e)$$

$$\eta_t^L + \eta_{u,t}^S + \eta_{u,t}^C = 1, \forall u, t \quad (18f)$$

$$0 \leq \eta_t^L, \eta_{u,t}^S, \eta_{u,t}^C \leq 1, \forall u, t \quad (18g)$$

$$\delta_T \geq 2\epsilon_0 \quad (18h)$$

不难证明子问题式 (16) ~ (18) 相互独立。为了简单起见, 如果将 (\mathbf{P}, η) 作为式 (16)、式 (17) 或式 (18) 的解, 相应的目标函数可表示为 $\delta_T(\mathbf{P}, \eta)$ 。之后, 可以分别讨论这些子问题的求解方法。

5.2. 式(16)的求解方法

根据式 (16) 中的约束条件, 我们发现: 式 (16c) ~ (16g) 对式 (16a) 中的目标函数没有影响。因此, 式 (16) 可以等效地转换为:

$$\min_{\mathbf{P}, \eta, \delta_T} \delta_T \quad (19a)$$

$$\text{s.t. } N_T \delta_T R^L \geq D_u, \forall u \quad (19b)$$

$$\delta_T \geq \epsilon_0 \quad (19c)$$

其中这一问题的解可以直接表示为:

$$\eta_t^L = 1, \eta_{u,t}^S = \eta_{u,t}^C = 0, p_{u,t} = P_{\max} \quad (20)$$

此时系统参数的最小更新间隔可表示为:

$$\delta_T = \max \left\{ \epsilon_0, \frac{D_u}{N_T R^L} \right\}, \forall u \quad (21)$$

备注 1: 当仅使用卫星传输数据时, 式 (16) 的解给出了联合资源编排方案。直观地说, 我们证明了当 D_u 足够小时, 该策略可以实现系统的最小总时延。这是因为如果只使用卫星进行数据传输, 总时延可能小于 $2\epsilon_0$; 然而, 如果在通信时使用无人机, 时延至少为 $2\epsilon_0$, 如式 (16h)、式 (17h) 和式 (18h) 所示。本文后一部分的仿真结果进一步验证了上述的直觉性判断。

5.3. 式(17)的求解方法

由于式 (17b) ~ (17d) 中 \mathbf{P} 和 η 的耦合, 式 (17) 是非凸的, 很难直接求解。为了解决这个问题, 使用块坐标下降技术将式 (17) 分解为两个子问题[8], 其表达式如下:

$$\min_{\mathbf{P}^i, \delta_T} \delta_T \quad (22a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{t=1}^{N_T} \delta_T \left[\frac{\eta_t^{L,i-1}}{R^L} + \frac{\eta_{u,t}^{S,i-1} + \eta_{u,t}^{C,i-1}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i)} + \frac{\eta_{u,t}^{S,i-1} + \zeta_u \eta_{u,t}^{C,i-1}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^S} + \frac{\eta_{u,t}^{C,i-1}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^C} \right]^{-1} \geq D_u, \forall u \quad (22b)$$

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^{C,i-1} z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i) \leq R_k^C, \forall k, t \quad (22c)$$

$$\sum_{u=1}^U (\eta_{u,t}^{S,i-1} + \zeta_u \eta_{u,t}^{C,i-1}) z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i) \leq R_k^S, \forall k, t \quad (22d)$$

$$0 \leq p_{u,t}^i \leq P_{\max}, \forall u, t \quad (22e)$$

$$\delta_T \geq 3\epsilon_0 \quad (22f)$$

$$\min_{\eta^i, \delta_T} \delta_T \quad (23a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{t=1}^{N_T} \delta_T \left[\frac{\eta_t^{L,i}}{R^L} + \frac{\eta_{u,t}^{S,i} + \eta_{u,t}^{C,i}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i)} + \frac{\eta_{u,t}^{S,i} + \zeta_u \eta_{u,t}^{C,i}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^S} + \frac{\eta_{u,t}^{C,i}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^C} \right]^{-1} \geq D_u, \forall u \quad (23b)$$

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^{C,i} z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i) \leq R_k^C, \forall k, t \quad (23c)$$

$$\sum_{u=1}^U (\eta_{u,t}^{S,i} + \zeta_u \eta_{u,t}^{C,i}) z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i) \leq R_k^S, \forall k, t \quad (23d)$$

$$\eta_t^{L,i} + \eta_{u,t}^{S,i} + \eta_{u,t}^{C,i} = 1, \forall u, t \quad (23e)$$

$$0 \leq \eta_t^{L,i}, \eta_{u,t}^{S,i}, \eta_{u,t}^{C,i} \leq 1, \forall u, t \quad (23f)$$

$$\delta_T \geq 3\epsilon_0 \quad (23g)$$

式中, i 为迭代索引。式 (22) 为功率分配子问题, 式 (23) 表示数据流调度子问题。在下一部分, 我们讨论式 (22) 和式 (23) 的求解方法。

5.4. 式(22)的求解方法

不难证明式 (22) 是非凸的。根据文献[48]中的定理 1, 在将泰勒展开式应用于式 (22b)、式 (22c) 和式 (22d) 之后, 可以使用逐次凸近似技术迭代求解式 (22) 中的问题[49]。将迭代指数表示为 j , 式 (22) 中的问题可转化为:

$$\min_{\mathbf{P}^{i,j}, \delta_T} \delta_T \quad (24a)$$

$$\text{s.t. } \frac{D_u}{\delta_T} - \sum_{t=1}^{N_T} \frac{\bar{R}_{u,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^{i,j} | \mathbf{P}^{i,j-1})}{F_{u,t}(\eta^{i-1}) \bar{R}_{u,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^{i,j} | \mathbf{P}^{i,j-1}) + 1 - \eta_t^{L,i-1}} \leq 0, \forall u \quad (24b)$$

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^{C,i-1} z_{u,k} \tilde{R}_{u,k}^{\text{UL}}(p_{u,t}^{i,j}, J_{u,k}(\bar{\mathbf{p}}_{u,t}^{i,j}) | p_{u,t}^{i,j-1}, J_{u,k}(\bar{\mathbf{p}}_{u,t}^{i,j-1})) \leq R_k^C, \forall k, t \quad (24c)$$

$$\sum_{u=1}^U (\eta_{u,t}^{S,i-1} + \zeta_u \eta_{u,t}^{C,i-1}) z_{u,k} \tilde{R}_{u,k}^{\text{UL}}(p_{u,t}^{i,j}, J_{u,k}(\bar{\mathbf{p}}_{u,t}^{i,j}) | p_{u,t}^{i,j-1}, J_{u,k}(\bar{\mathbf{p}}_{u,t}^{i,j-1})) \leq R_k^S, \forall k, t \quad (24d)$$

$$0 \leq p_{u,t}^{i,j} \leq P_{\max}, \forall u, t \quad (24e)$$

$$\delta_{\tau} \geq 3\epsilon_0 \quad (24f)$$

式中

$$F_{u,t}(\eta^{i-1}) = \frac{\eta_t^{L,i-1}}{R^L} + \frac{\eta_{u,t}^{S,i-1} + \zeta_u \eta_{u,t}^{C,i-1}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^S} + \frac{\eta_{u,t}^{C,i-1}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^C} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{u,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^{i,j} | \mathbf{P}^{i,j-1}) = \\ (1 - \gamma_{\text{UL}}) B \sum_{k=1}^K z_{u,k} \bar{R}_{u,k}^{\text{UL}}(p_{u,t}^{i,j}, J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}^{i,j}) | p_{u,t}^{i,j-1}, J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}^{i,j-1})) \end{aligned} \quad (26)$$

$$J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}) = \sum_{v=1, v \neq u}^U p_{v,t} \theta_{u,v,k}, \bar{\mathbf{P}}_{u,t} = \{p_{v,t}\}, v \neq u \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{u,k}^{\text{UL}}(p_{u,t}, J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}) | p_{u,t}^0, J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}^0)) \\ = \log_2(p_{u,t} \theta_{u,u,k} + J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}) + \sigma^2) - \log_2(J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}^0) + \sigma^2) - \\ \frac{1}{\ln 2 (J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}^0) + \sigma^2)} (J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}) - J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}^0)) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{u,k}^{\text{UL}}(p_{u,t}, J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}) | p_{u,t}^0, J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}^0)) \\ = \log_2(p_{u,t} \theta_{u,u,k} + J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}) + \sigma^2) - \frac{1}{\ln 2 (p_{u,t}^0 \theta_{u,u,k} + J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}^0) + \sigma^2)} \times \\ (p_{u,t} \theta_{u,u,k} - p_{u,t}^0 \theta_{u,u,k} + J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}) - J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}^0)) - \log_2(J_{u,k}(\bar{p}_{u,t}) + \sigma^2) \end{aligned} \quad (29)$$

随后, 可根据以下性质给出式 (24) 的解。

性质 1: 式 (24) 中的优化问题是凸的, 其最优解是式 (22) 的一个可行解。

证明: 见附录 A。

性质 1 表明, 可以使用传统的凸优化工具[46]求解式 (24), 这也表明可以使用式 (24) 的解迭代推导式 (22) 的解。算法 1 给出了该迭代方法的详细步骤。

5.5. 式(23)的求解方法

可以看到式 (23) 中的问题是非凸的, 这是因为式

(23b) 相对于 η^i 来说是凹的。此外, 这一问题的求解可以使用泰勒展开和逐次凸近似技术[49]。设 j 为迭代指数, 式 (23) 可重新表述如下:

$$\min_{\eta^{i,j}, \delta_{\tau}} \delta_{\tau} \quad (30a)$$

$$\text{s.t.} \frac{D_u}{\delta_{\tau}} - \sum_{i=1}^{N_{\tau}} \left\{ \frac{1}{F_{u,t}(\eta^{i,j-1}) + \frac{1 - \eta_t^{L,i,j-1}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i)} - \frac{F_{u,t}(\eta^{i,j}) - F_{u,t}(\eta^{i,j-1}) - \frac{\eta_t^{L,i,j} - \eta_t^{L,i,j-1}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i)}}{\left[F_{u,t}(\eta^{i,j-1}) + \frac{1 - \eta_t^{L,i,j-1}}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i)} \right]^2} \right\} \leq 0, \forall u \quad (30b)$$

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^{C,i,j} z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i) \leq R_k^C, \forall k, t \quad (30c)$$

$$\sum_{u=1}^U (\eta_{u,t}^{S,i,j} + \zeta_u \eta_{u,t}^{C,i,j}) z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{\text{UL}}(\mathbf{P}^i) \leq R_k^S, \forall k, t \quad (30d)$$

$$\eta_t^{L,i,j} + \eta_{u,t}^{S,i,j} + \eta_{u,t}^{C,i,j} = 1, \forall u, t \quad (30e)$$

$$0 \leq \eta_t^{L,i,j}, \eta_{u,t}^{S,i,j}, \eta_{u,t}^{C,i,j} \leq 1, \forall u, t \quad (30f)$$

$$\delta_{\tau} \geq 3\epsilon_0 \quad (30g)$$

我们发现式 (30) 是一个关于 δ_{τ} 和 $\eta^{i,j}$ 的凸优化问题, 可以使用传统的凸优化工具求解[50]。此外, 将式 (30) 的最优解表示为 $(\delta_{\tau}^*, \eta^*)$, 不难证明 $(\delta_{\tau}^*, \eta^*)$ 也属于式 (23) 的可行域。因此, 如算法 2 所示, 可以基于式 (30) 的解迭代地导出式 (23) 的解。

在式 (22) 和式 (23) 中的问题得到求解后, 根据块

算法 1. 用于求解式(22)的功率分配算法

输入:

$$K, M, U, R^L, \{R_k^S, R_k^C\} \forall k, \theta, z, \{D_u\} \forall u, N_{\tau}, \epsilon_0, P_{\max}, \gamma_{\text{UL}}, B, \eta^{i-1}, \mathbf{P}^{i-1}$$

1: 初始化: $\mathbf{P}^{i,0} = \mathbf{P}^{i-1}, \epsilon = 1 \times 10^{-2}, j = 1$

2: 求解式(24), 设最优解为 $(\delta_{\tau}^*, \mathbf{P}^*)$, 令 $\mathbf{P}^{i,j} = \mathbf{P}^*, \delta_{\tau}(\mathbf{P}^{i,j}, \eta^{i-1}) = \delta_{\tau}^*$

3: 当 $\left| 1 - \frac{\delta_{\tau}(\mathbf{P}^{i,j-1}, \eta^{i-1})}{\delta_{\tau}(\mathbf{P}^{i,j}, \eta^{i-1})} \right| > \epsilon$ 时

4: $j = j + 1$

5: 求解式(24), 设最优解为 $(\delta_{\tau}^*, \mathbf{P}^*)$, 令 $\mathbf{P}^{i,j} = \mathbf{P}^*, \delta_{\tau}(\mathbf{P}^{i,j}, \eta^{i-1}) = \delta_{\tau}^*$

输出: $\mathbf{P}^{i,j}, \delta_{\tau}(\mathbf{P}^{i,j}, \eta^{i-1})$

算法 2. 用于求解式(23)的数据流调度算法

输入:

$$K, M, U, R^L, \{R_k^S, R_k^C\} \forall k, \theta, z, \{D_u\} \forall u, N_{\tau}, \epsilon_0, P_{\max}, \gamma_{\text{UL}}, B, \eta^{i-1}, \mathbf{P}^i$$

1: 初始化: $\eta^{i,0} = \eta^{i-1}, \epsilon = 1 \times 10^{-2}, j = 1$

2: 求解式(30), 设最优解为 $(\delta_{\tau}^*, \eta^*)$, 令 $\eta^{i,j} = \eta^*, \delta_{\tau}(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j}) = \delta_{\tau}^*$

3: 当 $\left| 1 - \frac{\delta_{\tau}(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j})}{\delta_{\tau}(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j-1})} \right| > \epsilon$ 时

4: $j = j + 1$

5: 求解式(30), 设最优解为 $(\delta_{\tau}^*, \eta^*)$, 令 $\eta^{i,j} = \eta^*, \delta_{\tau}(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j}) = \delta_{\tau}^*$

输出: $\eta^{i,j}, \delta_{\tau}(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j})$

坐标下降技术[8], 可通过联合使用算法1和算法2迭代得出式(17)的解。算法3总结了所提出的联合资源编排方案的详细步骤。

算法3 用于求解式(17)的联合资源编排算法

- 输入:** $K, M, U, R^L, \{R_k^S, R_k^C\} \forall k, \theta, z, \{D_u\} \forall u, N_T, \epsilon_0, P_{\max}, \gamma_{UL}, B$
- 1: 初始化: $\mathbf{P} = 1 \times 10^{-3} \mathbf{U}_{U \times N_T}$, 其中 $\mathbf{U}_{U \times N_T}$ 中的元素是在 $[0, 1]$ 区间内服从均匀分布的随机变量, $\epsilon = 1 \times 10^{-3}, i = 1$
 - 2: 使用算法2求解式(23), 设最优解为 (δ_T^*, η^*) , 令 $\eta^0 = \eta^*, \delta_T(\mathbf{P}^0, \eta^0) = \delta_T^*$
 - 3: 当 $\left| 1 - \frac{\delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j})}{\delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j-1})} \right| > \epsilon$ 时
 - 4: 使用**算法2**求解式(23), 设最优解为 (δ_T^*, η^*) , 令 $\eta^i = \eta^*, \delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^i) = \delta_T^*$
 - 5: 当 $\left| 1 - \frac{\delta_T(\mathbf{P}^{i-1}, \eta^{i-1})}{\delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^i)} \right| > \epsilon$ 时
 - 6: $i = i + 1$
 - 7: 使用**算法1**求解式(22), 设最优解为 $(\delta_T^*, \mathbf{P}^*)$, 令 $\mathbf{P}^i = \mathbf{P}^*, \delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^{i-1}) = \delta_T^*$
 - 8: 使用**算法2**求解式(23), 设最优解为 (δ_T^*, η^*) , 令 $\eta^i = \eta^*, \delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^i) = \delta_T^*$
- 输出:** $\mathbf{P}^i, \eta^i, \delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^i)$
-

5.6. 式(18)的求解方法

将式(18b)与式(17b)进行比较, 我们可以得到以下性质:

性质2: 式(18)的最优解必须满足 $\eta_{u,t}^C = 0, \forall u, t$ 。

证明: 观察到式(18b)与 $\eta_{u,t}^C$ 不相关, 因此 $\eta_{u,t}^C$ 的值不会影响式(18b)中 δ_T 的值。此外, 如果将 $\eta_{u,t}^C = 0$ 代入式(18), 则式(18)中的所有约束, 即式(18h)可以被满足。因此, 对于任何 u 和 t , $\eta_{u,t}^C = 0$ 始终属于式(18)的可行域。

使用**性质2**, 式(18)可被化简为:

$$\min_{\mathbf{P}, \eta, \delta_T} \delta_T \quad (31a)$$

$$\sum_{t=1}^{N_T} \delta_T \left(\frac{\eta_t^L}{R^L} + \frac{\eta_{u,t}^S}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{UL}(\mathbf{P})} + \frac{\eta_{u,t}^S}{\sum_{k=1}^K z_{u,k} R_k^S} \right)^{-1} \geq D_u, \forall u \quad (31b)$$

$$\sum_{u=1}^U \eta_{u,t}^S z_{u,k} \hat{R}_{u,k,t}^{UL}(\mathbf{P}) \leq R_k^S, \forall k, t \quad (31c)$$

$$0 \leq p_{u,t} \leq P_{\max}, \forall u, t \quad (31d)$$

$$\eta_t^L + \eta_{u,t}^S = 1, \forall u, t \quad (31e)$$

$$0 \leq \eta_t^L, \eta_{u,t}^S \leq 1, \forall u, t \quad (31f)$$

$$\delta_T \geq 2\epsilon_0 \quad (31g)$$

上述问题可在 $\eta_{u,t}^C = 0, \forall u, t$ 的条件下使用算法1~3来求解。

备注2: 式(17)和式(18)的解之间最重要的区别在于是否具备使用MEC进行计算的可能性。与备注1中的讨论类似, 当 D_u 较小时, 通信和计算过程可在一个时间段内完成, 此时如果不使用MEC, 则可实现相对更低的总通信和计算时延。出现这种现象的原因在于, 如果不使用MEC, 总时延可能低于 $3\epsilon_0$; 但是, 如果使用MEC, 时延必须至少为 $3\epsilon_0$, 如式(17h)和式(18h)所示。上述现象也可在仿真结果的部分被观察到。

在算法1~3的基础上, 我们提出了一种面向过程的联合资源编排方案, 用于求解式(13)。方案的具体设计如算法4所述。从结果的角度看, 使用算法4可以使系统获得最小的总通信和计算时延。

算法4. 提出的面向过程的联合资源编排算法

输入:

$$K, M, U, R^L, \{R_k^S, R_k^C\} \forall k, \theta, z, \{D_u\} \forall u, N_T^S, N_T^C, N_T^S, \epsilon_0, \epsilon_a, P_{\max}, \gamma_{UL}, B$$

- 1: 在 $N_T = N_T^S$ 的条件下求解式(16); 之后, 可以通过使用式(20)得到 $(\mathbf{P}^{S_1}, \eta^{S_1})$ 并使用式(21)得到 $\delta_T^{S_1}$;
- 2: 在 $N_T = N_T^S$ 的条件下使用**算法1-3**求解式(17)。假设得到的解为 $(\mathbf{P}^{S_2}, \eta^{S_2})$; 然后我们可以得到 $\delta_T^{S_2}$;
- 3: 在 $N_T = N_T^S$ 的条件下使用**算法1-3**求解式(18)。假设得到的解为 $(\mathbf{P}^{S_3}, \eta^{S_3})$; 然后我们可以得到 $\delta_T^{S_3}$;
- 4: 计算 $T_{\min} = \min \{N_T^S \delta_T^{S_1}, N_T^S \delta_T^{S_2}, N_T^S \delta_T^{S_3}\} + \epsilon_a$, 其中最小值对应的 (\mathbf{P}^*, η^*) 可作为提出的联合功率分配和数据流调度设计方案。

输出: $T_{\min}, \mathbf{P}^*, \eta^*$

5.7. 收敛性分析

这里, 分析算法1~3的收敛性。对于式(24)中的问题, 在第 j 个迭代步骤中, 有

$$\delta_T(\mathbf{P}^{i,j}, \eta^{i-1}) \leq \delta_T(\mathbf{P}^{i,j-1}, \eta^{i-1}) \quad (32)$$

因为根据**性质1**, $\mathbf{P}^{i,j}$ 和 $\mathbf{P}^{i,j-1}$ 都是式(24)的可行解, δ_T 的最小值由 $\mathbf{P}^{i,j}$ 实现。因此, 根据参考文献[49], 算法1可以保证收敛, 其中我们可以导出 $\mathbf{P}^{i,*}$ 作为满足以下条件的局部最优解:

$$\delta_T(\mathbf{P}^{i,*}, \eta^{i-1}) \leq \delta_T(\mathbf{P}^{i,j-1}, \eta^{i-1}), \mathbf{P}^{i,j} \rightarrow \mathbf{P}^{i,*}, j \rightarrow \infty \quad (33)$$

类似地, 对于在第 j 个迭代步骤中式(30)中的问题, 有

$$\delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j}) \leq \delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j-1}) \quad (34)$$

以上公式表明算法2可以保证收敛。因此, $\eta^{i,*}$ 可看作局部最优解, 并满足以下条件:

$$\delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^{i*}) \leq \delta_T(\mathbf{P}^i, \eta^{i,j}), \eta^{i,j} \rightarrow \eta^{i*}, j \rightarrow \infty \quad (35)$$

根据式 (32) ~ (35), 可以得到:

$$\delta_T(\mathbf{P}^{i*}, \eta^{i*}) \leq \delta_T(\mathbf{P}^{i*}, \eta^{i-1,*}) \leq \delta_T(\mathbf{P}^{i-1,*}, \eta^{i-1,*}) \quad (36)$$

这表明式 (17a) 中的目标函数随着 i 的增加而继续减小。由于式 (17h) 中的限制, 目标函数一定存在一个下限。因此, 以上分析证明了算法3的收敛性, 并且证明了这一算法可以导出式 (17) 的局部最优解。

6. 仿真结果与讨论

本文使用数值仿真来评估所提出算法的性能。NTN的参数设置为 $K=7$ 、 $M=8$ 以及 $U=56$, 其中 U 个 IoT 设备分为 K 个用户组, 每个设备与最近的 UAV 关联。根据参考文献[51]中的讨论生成设备和 UAV 的位置, 其中用户聚集度设置为 $\beta=0.5$ 。任意两个无人机之间的最小距离设置为 $d_{\text{UAV}}=30$ km, 无人机群的高度设置为 $h_k=3$ km, $\forall k$ 。假设所有设备的数据量大小都相同, 表示为 $D_u=D$, 其中设置 $D=1$ Gb, $\forall u$, 同时每个设备的最大传输功率设置为 $P_{\text{max}}=2$ W [52]。对于卫星系统, 设备-卫星链路的数据速率设置为 $R^l=9.6$ kb \cdot s $^{-1}$ [41], UAV-卫星链路的最大速率设置为 $R_k^s=2$ Mb \cdot s $^{-1}$, $\forall k$ [53], 并且电磁波的总传播时间设置为 $\epsilon_a=240$ ms [54]。对于 UAV 信道参数, 设置 $m=4.02$ 、 $\Omega=25 \times 10^{-3}$ 、 $\eta_{\text{LOS}}=0.1$ 、 $\eta_{\text{NLOS}}=21$ 、 $f=5.8$ GHz、 $c=3 \times 10^8$ m \cdot s $^{-1}$ 、 $\lambda=c/f$ 、 $d_0=\lambda/2$ 、 $a=5.0188$ 、 $b=0.3511$ [36,42]。对于通信和 MEC 协同系统, 设置 $\zeta_u=0.01$, $\forall u$ [40], $\gamma_{\text{UL}}=0.1$, $B=1$ MHz, $N_T^{s_1}=N_T^{s_2}=N_T^{s_3}=8$, $\sigma^2=-114$ dBm [45], 以及 $\epsilon_0=500$ ms [54] (除非特殊说明, 上述提到的所有参数在仿真中均可看作预先设定好的常数)。

首先, 本研究通过数值仿真来评估所提出算法的收敛性能, 其中设置 $R_k^c=10$ Mb \cdot s $^{-1}$, $\forall k$ [38]。根据图4显示, 算法1在大约5次迭代之后收敛, 而算法2只需要2次迭代就收敛, 这表明数据流调度子问题几乎是一个凸问题。此外, 由于算法3比其他算法要求更高的精度, 该算法需要更多的迭代次数才能收敛。因此, 所提出的面向过程的方案具有在实际系统中应用的巨大潜力。

随后, 将提出的算法与其他方案进行了性能比较。首先, 考虑一个简单的方案, 即仅使用卫星进行通信。此外, 还考虑了以下三个方案:

• **方案1:** 使用参考文献[37]中提出的带宽分配方法在多个设备之间分配总带宽, 其中使用最大传输功率并应用贪婪的数据流调度策略, 这一策略的实现可参考文献[10]中的方法。

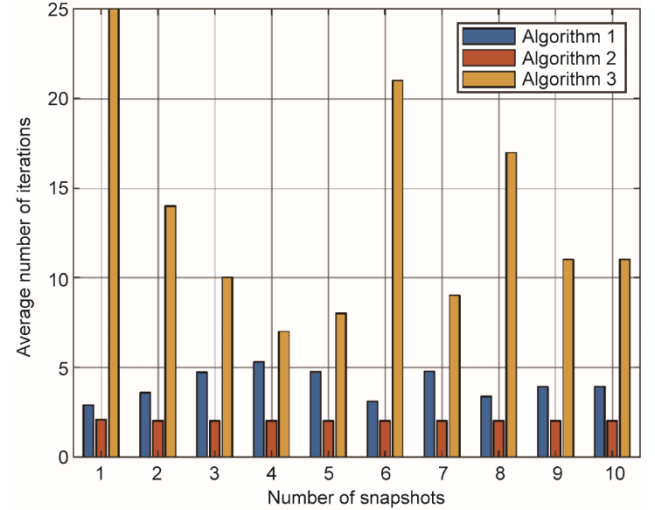


图4. 提出的算法的收敛性能。

• **方案2:** 将每个设备的传输功率设置为相等[8], 其中为了满足数据流的约束, 使用了功率回退的策略。同时, 应用贪婪的数据流调度策略, 这一策略的实现可参考文献[10]中的方法。

• **方案3:** 使用所提出算法的简化版本, 其中假设 $N_T^{s_1}=N_T^{s_2}=N_T^{s_3}=1$, 这一参数设置始终保持不变。

在仿真中, 设置 $R_k^c=6$ Mb \cdot s $^{-1}$, $\forall k$, 并在数据量不同时, 对不同算法的性能进行评估。根据图5和图6中的曲线, 与其他算法相比, 所提出的算法表现出具有最好的性能; 不过性能增益会随数据量大小的不同而发生变化。图5展示了当 D 小于 1 Mb 时, 所提出的算法的性能与方案3的性能十分接近。这是因为当数据量相对较小时, 只利用一个时间段即可完成整个通信和计算过程。此外, 当使用提出的算法时, 可以观察到总时延会呈现出分段变化的模式, 这是因为提出的算法的设计可以适应数据量的不断变化。上述现象表明了联合设计功率分配和数据流调度方案的优势。此外, 图6中的曲线表明, 使用所提出的算法可以获得约30%的性能增益, 这是因为提出的算法可以使用算法1~4适当地设计 N_T 和 δ_T 的值。表2中给出了总通信和计算时延的一些典型值, 以进一步阐明提出方案的特征, 在表中考虑的数据大小和更新间隔不同。在传输不同数据量时的系统最小总时延以粗体突出显示, 以证明备注1和备注2中预测的现象。同时这些数据也从另一方面证明了所提出的算法具有适应不同数据量的能力。因此, 在具有 MEC 的层次化 NTN 中使用所提出的面向过程的方案是有益的。

图7中的曲线用于评估当过程使用不同的时间段数时, 由所提出算法优化得到的最小总时延, 其中设置 $R_k^c=$

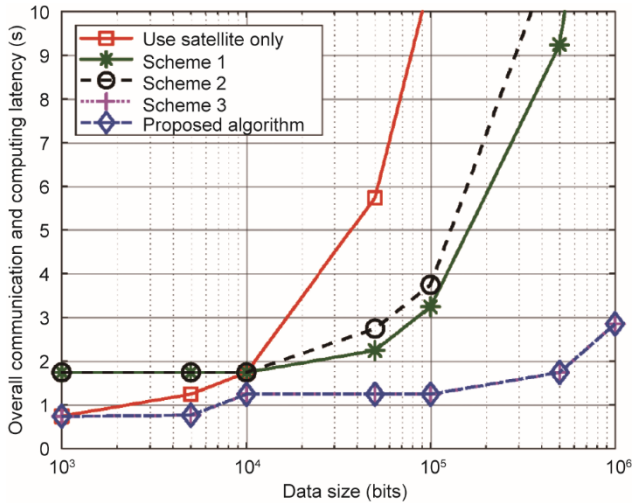
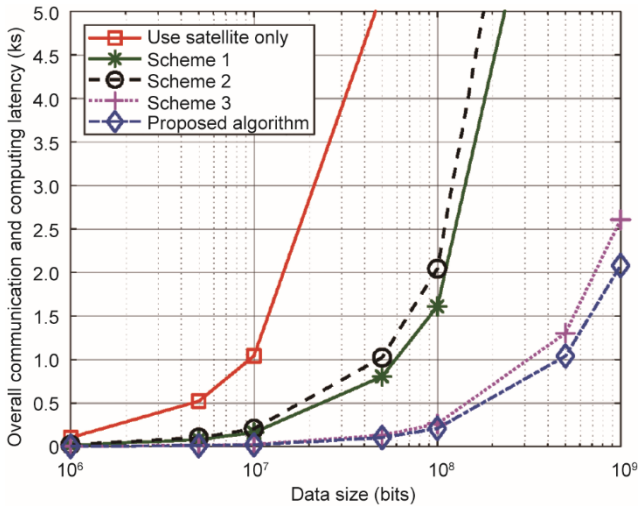
图5. 当 D 较小时不同算法之间的对比。图6. 当 D 较大时不同算法之间的对比。

表2 在数据量不同的总计算与通信时延

Data size	Overall communication and computing latency derived by using the proposed scheme		
	Only use satellite for communication (s)	Use satellite and UAVs for communication without MEC (s)	Use satellite and UAVs for communication with MEC (s)
1 kbit	0.74	1.24	1.74
10 kbit	1.74	1.24	1.74
100 kbit	10.74	1.24	1.74
1 Mbit	104.74	5.24	3.24
10 Mbit	1.04×10^3	46.24	22.74
100 Mbit	1.04×10^4	451.24	213.24
1 Gbit	1.04×10^5	4.50×10^3	2.12×10^3

$6 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$, $\forall k$ 和 $N_T^{s_1} = N_T^{s_2} = N_T^{s_3} = N_T$ 作为时间段数。可以观察到, 通过将过程划分为更多的时间段, 可以提高系统的时延性能。此外, 算法的计算复杂度会随着时间段数的增

加而增加; 在这种情况下, 尽管提升时间段数能够获得增益, 但性能增益会降低。因此, 为了平衡算法的计算复杂度和性能, 应适当选择时间段数的具体数值。

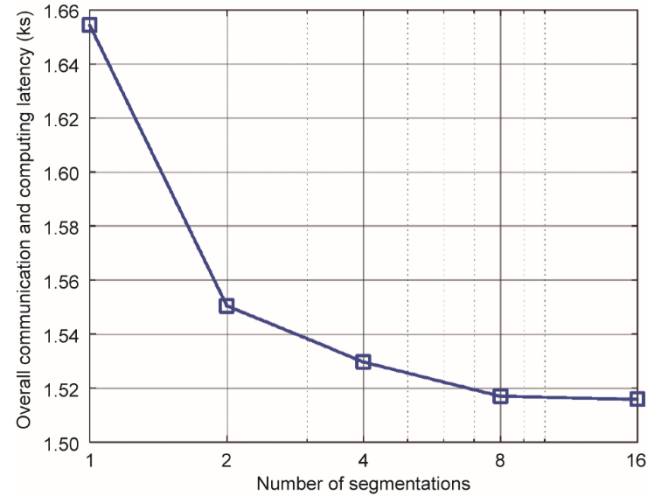


图7. 总计算和通信时延与时间段数之间的变化关系。

图8中的曲线用于研究UAV的有效载荷对所提出算法的时延性能的影响, 其中MEC服务器的平均吞吐量和UAV-卫星链路的最大数据传输速率不同。在这个仿真中, 设置 $R_k^s = R^s$ 和 $R_k^c = R^c, \forall k$ 。图8显示, 当 R^c 小于 R^s 时, 总时延相对 R^s 将会保持恒定, 因为大多数数据通过算法规划后会经过UAV-卫星链路发送回卫星。此外, 不能通过增加 R^c 无限地减少时延, 因为在这种情况下, 设备-UAV链路的数据速率有限可能会成为瓶颈问题。这些现象意味着UAV的有效载荷部署应在通信和计算过程之前进行适当设计, 因为这种适当的设计可以提高层次化NTN中通信和MEC的资源消耗效率。

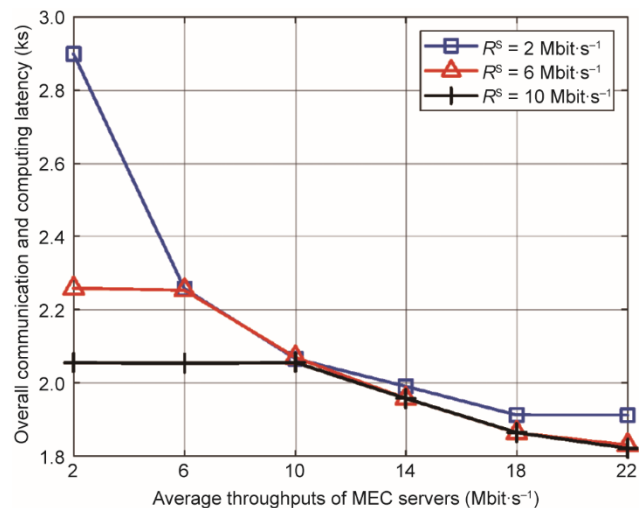


图8. 在UAV-卫星链路的最大数据速率变化的条件下, 总计算和通信时延与MEC服务器的平均吞吐量的关系。

图9用于讨论用户分布对系统时延性能的影响，其中考虑MEC服务器的平均吞吐量的变化。在仿真中，设置 $R_k^c = R^c, \forall k$ 。曲线显示，当 β 增加时，系统时延会下降。这是因为所提出的面向过程的方案可以略微减少相邻设备之间的干扰。这进一步表明在面向过程的框架下，时间分集效应得到了充分利用。特别是当 $\beta \geq 0.7$ 和 $R^c = 2 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，改变聚合度不会影响系统时延性能，因为在这种情况下，MEC的吞吐量有限是时延性能难以提升的主要瓶颈问题。此外，当 R^c 继续增加时，曲线之间的间隙将会进一步减小，如图8所示。

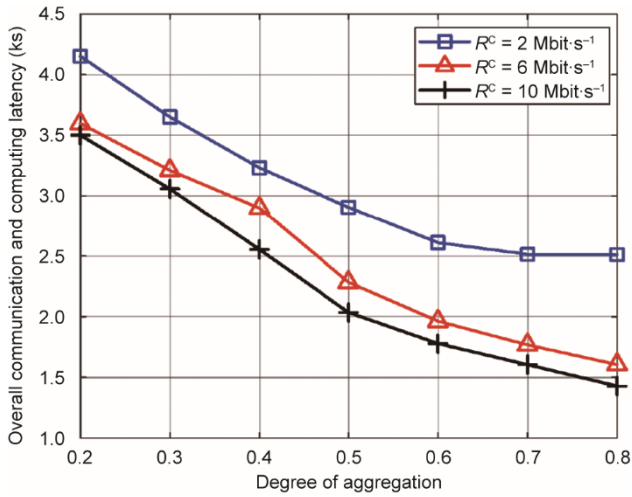


图9. 在MEC服务器的平均吞吐量不同时，总计算和通信时延与用户聚合度的关系。

此外，我们评估了使用不同数量的IoT设备时网络时延性能的变化，如图10所示。在仿真中，设置 $R_k^c = 6 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $\forall k$ 和 $M = 16$ 。据观察，当使用更多IoT设备时，由于通信和MEC资源受限于数量过大的设备，因此总时延更大。此外，由于在这种情况下IoT设备之间的干扰有可能变大，因此用户聚合度对设备数量较多时的网络时延性能有更大的影响。因此，MEC使能的NTN的时延性能对用户分布非常敏感，特别是当该网络中的IoT设备数量较大时，用户分布对时延性能的影响更大。

图11中的曲线用于探索UAV位置和系统时延性能之间的关系，其中设置 $R_k^c = 10 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}, \forall k$ 。我们发现，系统总时延并不总是随无人机群高度的增加单调增加。这是因为，尽管UAV越高会导致路径损耗越大，但多个设备之间的干扰可能会减少。这一现象说明UAV的高度变高可能会对系统的时延性能产生积极影响。因此，应在层次化的NTN中适当设计UAV集群的位置和高度，以提高系统的时延性能。

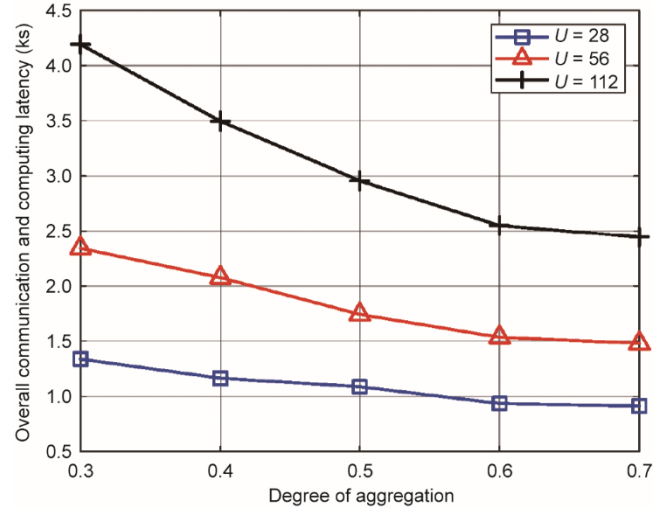


图10. 在IoT设备数量不同的条件下，总计算和通信时延与用户聚合度之间的关系。

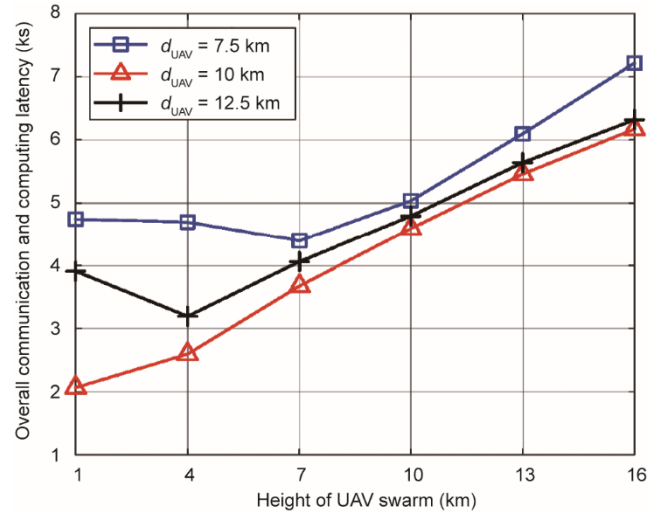


图11. 总计算和通信时延与UAV集群高度间的关系，其中不同UAV间的距离也在变化。

7. 结论

在本研究中，我们讨论了用于广域时延敏感IoT的MEC使能的NTN的设计方法。为了联合设计层次化集成的卫星和UAV的通信及MEC系统，本文以时分方式提出了一个面向过程的优化框架。在此框架下，本文利用大尺度CSI提出了一个时延最小化问题。随后，将问题转化为简化形式，并进一步导出简化问题的近似问题。根据总通信和计算效率函数的性质，将近似问题分解为多个子问题。此外，通过联合使用块坐标下降和逐次凸逼近技术，本文提出了一种迭代算法来解决这些子问题。利用子问题的解，本文为MEC使能的NTN提出了一种面向过程的联合资源编排方案。仿真结果表明，与其他比较算法相比，

本文提出的算法具有更高的性能。此外，仿真结果表明，所提出的面向过程的方案能够灵活地适应不同的数据量。结果显示，在实际系统实现时应适当预先设计 UAV 的有效载荷部署，以提高 MEC 使能的 NTN 的资源使用效率。最后，本文得到的结果表明，对于广域时延敏感 IoT，将 NTN 与 MEC 相结合是能获得足够的增益的。

致谢

本研究由国家重点研发计划(2018YFA0701601和2020YFA0711301)、国家自然科学基金(61771286、61941104和61922049)、清华大学-中国移动通信集团联合研究院等项目部分资助。

Compliance with ethics guidelines

Chengxiao Liu, Wei Feng, Xiaoming Tao, and Ning Ge declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.11.002>.

References

- [1] Saarnisaari H, Dixit S, Alouini MS, Chaoub A, Giordani M, Kliks A, et al. A 6G white paper on connectivity for remote areas. 2020. arXiv: 2004.14699.
- [2] Huang C, Huang G, Liu W, Wang R, Xie M. A parallel joint optimized relay selection protocol for wake-up radio enabled WSNs. *Phys Commun* 2021;47: 101320.
- [3] FG-NET-2030. Network 2030: a blueprint of technology, applications and market drivers towards the year 2030 and beyond. Geneva: ITU; 2019.
- [4] Wei T, Feng W, Chen Y, Wang CX, Ge N, Lu J. Hybrid satellite-terrestrial communication networks for the maritime Internet of Things: key technologies, opportunities, and challenges. *IEEE Internet Things J* 2021;8(11):8910–34.
- [5] Li X, Feng W, Wang J, Chen Y, Ge N, Wang CX. Enabling 5G on the ocean: a hybrid satellite-UAV-terrestrial network solution. *IEEE Wirel Commun* 2020;27(6):116–21.
- [6] Wang Y, Feng W, Wang J, Quek TQS. Hybrid satellite-UAV-terrestrial networks for 6G ubiquitous coverage: a maritime communications perspective. *IEEE J Sel Areas Comm* 2021;39(11):3475–90.
- [7] Onireti O, Qadir J, Imran MA, Sathiaseelan A. Will 5G see its blind side? Evolving 5G for universal Internet access. In: Proceedings of the 2016 workshop on Global Access to the Internet for All; 2016 Aug; Florianopolis, Brazil. New York: Association for Computing Machinery; 2016. p. 1–6.
- [8] Liu C, Feng W, Chen Y, Wang CX, Ge N. Cell-free satellite-UAV networks for 6G wide-area Internet of Things. *IEEE J Sel Areas Comm* 2021;39(4):1116–31.
- [9] Zhao J, Gao F, Wu Q, Jin S, Wu Y, Jia W. Beam tracking for UAV mounted SatCom on-the-move with massive antenna array. *IEEE J Sel Areas Comm* 2018;36(2):363–75.
- [10] Cheng N, Lyu F, Quan W, Zhou C, He H, Shi W, et al. Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: a learning-based approach. *IEEE J Sel Areas Comm* 2019;37(5):1117–29.
- [11] Raza U, Kulkarni P, Sooriyabandara M. Low power wide area networks: an overview. *IEEE Comm Surv and Tutor* 2017;19(2):855–73.
- [12] Centenaro M, Vangelista L, Zanella A, Zorzi M. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wirel Commun* 2016;23(5):60–7.
- [13] Lo Bello L, Steiner W. A perspective on IEEE time-sensitive networking for industrial communication and automation systems. *Proc IEEE* 2019; 107(6): 1094–120.
- [14] Liang W, Zheng M, Zhang J, Shi H, Yu H, Yang Y, et al. WIA-FA and its applications to digital factory: a wireless network solution for factory automation. *Proc IEEE* 2019;107(6):1053–73.
- [15] Luvisotto M, Pang Z, Dzung D. High-performance wireless networks for industrial control applications: new targets and feasibility. *Proc IEEE* 2019;107(6):1074–93.
- [16] TR 38.824: Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case (URLLC). 3GPP standard. France: 3GPP; 2019.
- [17] TR 38.825: Study on NR industrial Internet of Things (IoT). 3GPP standard. France: 3GPP; 2019.
- [18] TR 38.821: Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN). 3GPP standard. France: 3GPP; 2020.
- [19] Ghosh A, Maeder A, Baker M, Chandramouli D. 5G evolution: a view on 5G cellular technology beyond 3GPP Release 15. *IEEE Access* 2019;7:127639–51.
- [20] De Sanctis M, Cianca E, Araniti G, Bisio I, Prasad R. Satellite communications supporting internet of remote things. *IEEE Internet Things J* 2016;3(1):113–23.
- [21] Cioni S, De Gaudenzi R, Del Rio Herrero O, Girault N. On the satellite role in the era of 5G massive machine type communications. *IEEE Netw* 2018;32(5): 54–61.
- [22] Zhen L, Qin H, Zhang Q, Chu Z, Lu G, Jiang J, et al. Optimal preamble design in spatial group-based random access for satellite-M2M communications. *IEEE Wirel Commun Lett* 2019;8(3):953–6.
- [23] Zhang Q, Jiang M, Feng Z, Li W, Zhang W, Pan M. IoT enabled UAV: network architecture and routing algorithm. *IEEE Internet Things J* 2019;6(2):3727–42.
- [24] Chakareski J. UAV-IoT for next generation virtual reality. *IEEE Trans Image Process* 2019;28(12):5977–90.
- [25] Ranjha A, Kaddoum G. Quasi-optimization of uplink power for enabling green URLLC in mobile UAV-assisted IoT networks: a perturbation-based approach. *IEEE Internet Things J* 2020;8(3):1674–86.
- [26] Huang M, Liu A, Xiong NN, Wu J. A UAV-assisted ubiquitous trust communication system in 5G and beyond networks. *IEEE J Sel Areas Comm* 2021;1.
- [27] Islambouli R, Sharafeddine S. Optimized 3D deployment of UAV-mounted cloudlets to support latency-sensitive services in IoT networks. *IEEE Access* 2019;7:172860–70.
- [28] Zhang L, Ansari N. Latency-aware IoT service provisioning in UAV-aided mobile-edge computing networks. *IEEE Internet Things J* 2020; 7(10): 10573–80.
- [29] Tan Z, Qu H, Zhao J, Zhou S, Wang W. UAV-aided edge/fog computing in smart IoT community for social augmented reality. *IEEE Internet Things J* 2020;7(6):4872–84.
- [30] Tun YK, Park YM, Tran NH, Saad W, Pandey SR, Hong CS. Energy-efficient resource management in UAV-assisted mobile edge computing. *IEEE Commun Lett* 2020;25(1):249–53.
- [31] Wang J, Liu K, Pan J. Online UAV-mounted edge server dispatching for mobile-to-mobile edge computing. *IEEE Internet Things J* 2020;7(2):1375–86.
- [32] Guo J, Huang G, Li Q, Xiong NN, Zhang S, Wang T. STMT0: a smart and trust multi-UAV task offloading system. *Inf Sci* 2021;573:519–40.
- [33] Zeng Y, Wu Q, Zhang R. Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond. *Proc IEEE* 2019;107(12):2327–75.
- [34] Liu J, Du X, Cui J, Pan M, Wei D. Task-oriented intelligent networking architecture for the space-air-ground-aqua integrated network. *IEEE Internet Things J* 2020;7(6):5345–58.
- [35] Cao P, Liu Y, Yang C, Xie S, Xie K. MEC-driven UAV-enabled routine inspection scheme in wind farm under wind influence. *IEEE Access* 2019; 7: 179252–65.
- [36] Chen Y, Feng W, Zheng G. Optimum placement of UAV as relays. *IEEE Commun Lett* 2018;22(2):248–51.
- [37] Pan Y, Jiang H, Zhu H, Wang J. Latency minimization for task offloading in hierarchical fog-computing C-RAN networks. In: Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications; 2020 Jun 7–11; Dublin, Ireland.

- IEEE; 2020. p. 1–6.
- [38] Wang JB, Yang H, Cheng M, Wang JY, Lin M, Wang J. Joint optimization of offloading and resources allocation in secure mobile edge computing systems. *IEEE Trans Vehicular Technol* 2020;69(8):8843–54.
- [39] Wang P, Yao C, Zheng Z, Sun G, Song L. Joint task assignment, transmission, and computing resource allocation in multilayer mobile edge computing systems. *IEEE Internet Things J* 2019;6(2):2872–84.
- [40] Sharma J, Choudhury T, Satapathy SC, Sabitha AS. Study on H.265/HEVC against VP9 and H.264: on space and time complexity for codecs. In: *Proceedings of 2018 International Conference on Communication, Computing and Internet of Things*; 2018 Feb 17–19; Chennai, India. 2018. p. 106–10.
- [41] Dymond A, Billowes C, Lopianowski M. Trends and potential for the use of satellites for rural telecommunications in developing countries. In: *Proceedings of International Conference on Rural Telecommunications*; 1988 May 23–25; London, UK. IET; 1988. p. 126–9.
- [42] Khuwaja AA, Chen Y, Zhao N, Alouini MS, Dobbins P. A survey of channel modeling for UAV communications. *IEEE Comm Surv and Tutor* 2018;20(4):2804–21.
- [43] Du J, Xu W, Deng Y, Nallanathan A, Vandendorpe L. Energy-saving UAV-assisted multi-user communications with massive MIMO hybrid beamforming. *IEEE Commun Lett* 2020;24(5):1100–4.
- [44] Ammari ML, Fortier P. Low complexity ZF and MMSE detectors for the uplink MU-MIMO systems with a time-varying number of active users. *IEEE Trans Vehicular Technol* 2017;66(7):6586–90.
- [45] Cao P, Liu W, Thompson JS, Yang C, Jorswieck EA. Semidynamic green resource management in downlink heterogeneous networks by group sparse power control. *IEEE J Sel Areas Comm* 2016;34(5):1250–66.
- [46] Rost P. Achievable net-rates in multi-user OFDMA with partial CSI and finite channel coherence. In: *Proceedings of 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*; 2012 Sept 3–6; Quebec, QC, Canada. IEEE; 2012. p. 1–5.
- [47] Khoshnevis B, Yu W, Lohan Y. Two-stage channel quantization for scheduling and beamforming in network MIMO systems: feedback design and scaling laws. *IEEE J Sel Areas Comm* 2013;31(10):2028–42.
- [48] Liu C, Feng W, Tao X, Ge N. MEC-empowered non-terrestrial networks for 6G wide-area time-sensitive Internet of Things. 2021. arXiv: 1103.21907.
- [49] Sun Y, Babu P, Palomar DP. Majorization-minimization algorithms in signal processing, communications, and machine learning. *IEEE Trans Signal Process* 2017;65(3):794–816.
- [50] Boyd S, Vandenberghe L. *Convex optimization*. Cambridge: Cambridge University Press; 2004.
- [51] Mirahsan M, Schoenen R, Yanikomeroglu H. Hethetnets: heterogeneous traffic distribution in heterogeneous wireless cellular networks. *IEEE J Sel Areas Comm* 2015;33(10):2252–65.
- [52] Zhao B, Ren G, Dong X, Zhang H. Spatial group based optimal uplink power control for random access in satellite networks. *IEEE Trans Vehicular Technol* 2020;69(7):7354–65.
- [53] Peng F, Cardona AS, Shafiq K, Leung VCM. TCP performance evaluation over GEO and LEO satellite links between performance enhancement proxies. In: *Proceedings of 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*; 2012 Sept 3–6; Quebec, QC, Canada. IEEE; 2012. p. 1–5.
- [54] Luglio M, Roseti C, Zampognaro F. Transport layer optimization for cloud computing applications via satellite: TCP Noordwijk+. *China Commun* 2014;11(12):105–19.