

LEO卫星网络中MEC服务管理与任务迁移优化方法

刘志慧¹, 尉欢², 殷杰¹, 王俊义², 金世超¹, 董涛¹

(1. 航天恒星科技有限公司天地一体化信息技术国家重点实验室, 北京 100095;

2. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星因具有传输时延短、部署成本低等优势, 在对地观测、广域覆盖的通信中发挥重要作用。由于LEO卫星平台体积和重量限制, 每个LEO卫星节点的功能相对单一, 需要多种功能的LEO卫星节点间高效协同, 形成功能分散、能力聚合的高性能卫星网络。这对网络的服务管理提出了一定的要求。针对遥感观测卫星向部署有移动边缘计算 (Mobile Edge Computing, MEC) 服务的LEO卫星星座迁移观测任务数据的协作场景, 研究LEO卫星网络中基于软件定义网络的MEC服务管理模型, 提出结合时间扩展图思想的跨时隙任务迁移优化方法。仿真结果表明该方法能有效地降低观测卫星处理任务的成本, 并可为部署MEC服务器的LEO卫星网络提供管理模型。

关键词: LEO卫星网络; MEC卫星; 任务迁移; 服务管理

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022034

Management of MEC Service and Optimization of Mission Migration in LEO Satellite Networks

LIU Zhihui¹, WEI Huan^{1,2}, YIN Jie¹, WANG Junyi², JIN Shichao¹, DONG Tao¹

1.State Key Laboratory of Space-Ground Integrated Information Technology, Space Star Technology Co., Ltd.,
Beijing 100095, China

2.School of Information and Communication, Guilin University of Electronic and Technology, Guilin 541004, China

Abstract: Low earth orbit (LEO) satellites play an important role in the communication of earth observation and wide area coverage because of their advantages of short transmission delay and low deployment cost. Due to limited size and weight of LEO satellite platform, the function of each LEO satellite node is relatively single, which requires efficient collaboration among various LEO satellite nodes to form a high-performance satellite network with decentralized functions and converged capabilities. It puts forward certain requirements for network service management. Aiming at the cooperative scenario that remote sensing satellites migrate observed task data to LEO satellite constellation with mobile edge computing (MEC) service deployed, the MEC service management model based on software defined network in LEO satellite networks was studied, a cross-slot task migration optimization method with the aid of time extended graph was proposed. The simulation results showed that the task migration optimization method could effectively reduced the cost of observation satellite processing tasks. And it could offered the management model for LEO satellite networks that deployed MEC servers.

Keywords: LEO satellite networks, MEC-enabled satellite, mission migration, network management

0 引言

随着航天与信息技术的飞速发展, 天基网络通过空间组网为陆、海、空各类移动和固定用户提供随遇接入的信息服务, 有望成为使信息通信业进入新一轮发展

期, 同时带动多个新兴产业的新的热门领域^[1]。在天基网络中, 低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星凭借低时延、低成本、快速更新换代等优势, 得到了快速的发展^[2]。LEO卫星网络的快速发展离不开高效自主管理等核

收稿日期: 2022-05-31; 修回日期: 2022-09-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2021YFB2900604)

Foundation Item: National Key Research and Development Program (No. 2021YFB2900604)

心能力的支撑。囿于LEO卫星平台的体积和重量,LEO卫星节点的资源严重受限,支持星上高密度计算是LEO卫星网络亟须提升的一大能力。

遥感观测卫星系统,作为其中的典型应用,在日益增长且多样化的观测任务执行中,面临着大量数据及时下传难、关键信息无法及时筛选等问题。传统的遥感观测卫星,由于高速运动特性,与地面站之间可链接的持续时间有限。因此,遥感观测卫星需要存储大量数据直到其与地面站再次建链,很容易造成占用大量星上存储资源的同时可能还无法满足对时延要求严格的任务需求。

移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)技术,后来被重新定义为多接入边缘计算(Multi-Access Edge Computing)技术,以弥补云计算集中式的数据存储、计算模式的不足以及应用的低时延需求为目标,自被提出以来,一直受到业界的广泛关注^[3-6]。现已有研究将MEC技术应用到天基网络中,将云端的计算和存储等资源下沉至网络边缘,让任务卸载到具有较大计算能力的MEC服务器上,从而使计算、存储、能量等资源受限的移动用户从需要大量计算容量的超负荷任务执行中解脱出来,同时降低任务执行时延和能耗等^[7-9]。

参考文献[8]分析了MEC服务器部署的卫星网络中网络的平均总时延和抖动受卸载率变化的动态情况,聚焦于数据在单个卫星上卸载与卸载到地面站的性能对比。参考文献[9]针对星上信号识别问题,提出在中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星部署全局边缘服务器、LEO卫星及高空平台作为终端设备场景下的联合降低传输时延和能量消耗的Q学习算法,聚焦于MEO向多个终端设备卸载中带宽与功耗的分配问题。参考文献[10]针对低地球轨道卫星部署MEC服务器的场景提出了一种联合服务请求调度和服务部署优化机制。在考虑存储资源和计算资源限制条件下可以获得良好的服务用户比例和平均跳数性能,聚焦于单时间片内低地球轨道卫星服务请求和服务部署联合优化,未涉及低地球轨道卫星网络动态拓扑所带来的影响。参考文献[11]针对卫星网络的动态特性提出了基于MEC的动态网络虚拟化方法和协同计算卸载模型,实现网络资源的整合和动态卫星网络中的并行计算,重点围绕动态网络虚拟技术,实现(远程)移动边缘计算服务,其优化目标为统计平均用户时延。参考文献[12]针对实时遥感图像的应用提出了基于地球同步轨道(Geosynchronous Orbit, GEO)卫星部署MEC对低地球轨道遥感卫星图像进行部分处理后传回地面的一种分布式资源管理算法。然而,针对GEO卫星资源不断紧张、低地球轨道遥感卫星数据传输处理的需求量和时延要求不断提高,将低地球轨道遥感卫星数据传输到低地球轨道卫

星星座的需求愈加明显,需综合考虑低地球轨道卫星网络动态拓扑下的快速遥感卫星数据卸载问题,目前尚缺乏相关卸载优化问题及相应管理模型的研究。

综上,本文结合时变扩展图的思想^[13],研究MEC服务器部署在低地球轨道通信卫星星座(星群)上,利用星间链路将遥感卫星的观测任务卸载到通信卫星星座(群)的跨时隙迁移优化问题,综合考虑了各LEO卫星节点资源相对较少和拓扑动态变化的特点;同时,研究了LEO卫星网络的MEC服务管理模型,支撑遥感卫星任务卸载到通信卫星星座的实施与执行,以实现遥感卫星与通信卫星高效协同。

1 LEO卫星网络MEC服务管理模型

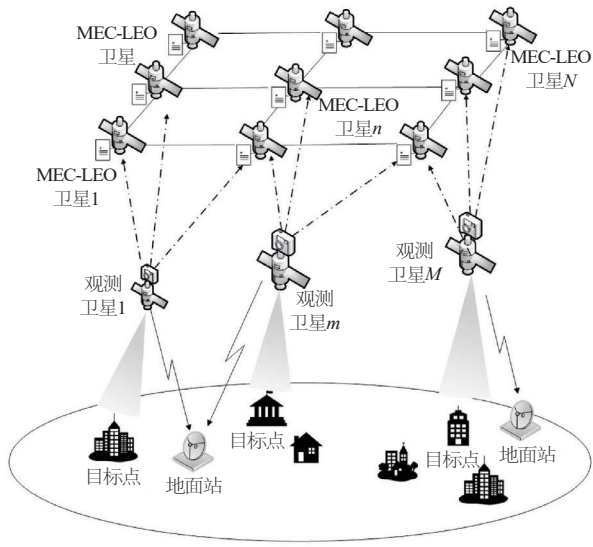
1.1 研究场景

本文所研究的场景如图1所示,主要包含 M 个观测卫星(即需要MEC服务的用户)、 N 个具有移动边缘计算服务的LEO卫星(简称MEC-LEO卫星),卫星之间建立星间链路(ISLs)。通过ISLs形成观测卫星与MEC-LEO卫星间的任务协作。其中,观测卫星将数据卸载到搭载有边缘计算服务器的MEC-LEO卫星上,即由MEC-LEO卫星构成的卫星群形成一个边缘计算平台,为星载资源受限的观测卫星提供计算、存储服务。相应地观测卫星获得服务,同时,需要付费给MEC-LEO卫星。

假设在执行任务协作中,观测卫星的任务输入是按比特独立的,也就是说任务可以在观测卫星和多个MEC服务器中并行执行,即允许部分卸载。针对支持部分卸载的计算任务模型,本文采用数据分区模型^[14],其中任务输入按比特独立且可以任意划分为不同的组。假设观测卫星的计算模块依赖的软硬件与MEC-LEO卫星的同构。此外,为了解决因不同过程或组件间依赖关系导致的执行效率问题,需进行执行顺序的控制。该控制过程将在MEC服务管理模型的控制器中完成。

1.2 LEO卫星网络MEC服务管理模型的建立

为了便于进行上述的LEO卫星网络任务协作,本文建立LEO卫星网络MEC服务管理模型,如图2所示。该模型主要由3部分组成:LEO卫星网络管控中心、MEC-LEO卫星节点集、遥感观测卫星节点集。其中,LEO卫星网络管控中心,除了提供应用程序、故障报告、服务授权、用户应用生命周期等基本功能之外,主要功能为根据网络拓扑信息、各遥感卫星节点的处理数据量,将MEC服务部署到LEO卫星星座的节点上,同时,负责分发任务迁移的决策参数。遥感观测卫星节点集,主要负责遥测数据的获取、本地计算和数据卸载。MEC服务部署于LEO卫星上,形成的MEC-LEO卫星节点集,为遥感观测卫星



图注：—— 星间链路 - - - - 计算任务卸载 → 下传任务

图1 研究场景

提供计算、存储和网络资源。这些组成部分相互协同，最终形成功能分布、逻辑集中的一体化网络。

在执行决策服务中，网络管控中心部署在信关站或者GEO卫星节点上，基于软件定义网络（Software-Defined Network, SDN）架构，控制中心具有全局视图，可执行MEC服务在LEO卫星星座中的部署以及观测卫星的任务迁移决策。

在本文的研究中，假设LEO卫星网络中MEC服务部署策略已知，在实施中有基于覆盖区域的定期部署更新、基于响应时延优化的动态和静态服务部署等部署策略^[15]。本文结合时间拓展图的思想，通过虚拟存储链路构建来表示遥感观测卫星上一时隙未卸载数据流转到下一时隙进行卸载或本地计算，研究LEO卫星网络中数据卸载迁移优化问题。由于优化问题会涉及跨时隙优化，随机动态的观测任务处理量和周期性运动的网络节点相互耦合，因此，LEO卫星网络MEC服务管理模型可选功能包含各遥感观测卫星处理数据量预测功能。此外，可选功能还包括簇头选举功能，分别用于选举遥感观测卫星节点集和MEC-LEO卫星节点集的代表，进行卸载协商以及策略参数调整。

以GEO卫星作为管控中心为例，基于SDN中央管理和控制的特点，控制器根据数据平面的信息反馈，形成用于数据卸载策略制定的基础支撑功能：

（1）更新网络拓扑信息，形成拓扑全局视图，以便进行拓扑管理；

（2）可选的，存储历史任务处理数据，通过智能大脑，分析任务处理量的到达规律及地理分布特性，以便

对处理数据量进行预测，应对突发业务及高动态卫星网络拓扑给数据卸载策略快速决策制定带来的压力；

（3）可选的，为遥感观测卫星节点代表和MEC-LEO卫星节点代表的选举，提供各卫星星历、覆盖等依据信息，所选出的簇头为数据卸载决策提供卸载策略协商和局部策略参数调整的分发，从而降低多个数据平面节点与控制器进行频繁交互所带来的信息交互量；

（4）控制中心根据收集到的全局信息，依据覆盖信息/响应时延要求，形成MEC服务器部署策略并下发给数据平面节点，为数据卸载提供良好的服务环境。

在这些基础之上，控制器进行计算数据卸载策略，主要包括卸载链路的选择、卸载率的计算。同时，为了支持局部卸载，控制器还需提供卸载计算任务执行顺序，并下发给数据平面。

数据平面的 M 个遥感观测卫星节点负责执行数据获取和数据卸载这两个主要功能，如遥感观测卫星节点1先获取目标点的数据信息，然后根据管控中心下发的策略将数据选择性地卸载到搭载有边缘计算服务器的某个或若干个MEC-LEO卫星节点；收到数据的MEC-LEO卫星节点为星载资源受限的遥感观测卫星节点1提供计算、存储服务，MEC-LEO卫星节点完成MEC服务的任务之后，反馈信息到管控中心。

通过以上过程，形成管控中心与数据平面间的闭环流程。LEO卫星网络MEC服务管理模型如图2所示。

2 LEO卫星网络中数据卸载迁移优化问题

2.1 LEO卫星网络模型

依据LEO卫星网络的时变性和可预测性，即卫星之间时断时续的连接关系，以及各卫星运动轨迹确定导致网络拓扑可预测，本文采用时间扩展图 $\mathcal{G}_{t,e} = \{\mathcal{T}, \mathcal{V}_t, \mathcal{L}, \mathcal{C}\}$ 来描述每个时段的LEO卫星网络快照，如图3所示。 T 为将给定时间段 $T = (t_0, t_n]$ 划分成 K 个时间间隔（简称时隙）的集合 $\{\tau_1, \dots, \tau_k, \dots, \tau_K\}$ ，其中，网络拓扑在时隙 $\tau_k = (t_{k-1}, t_k]$ ， $k=1, 2, \dots, K$ 内保持不变。

$\mathcal{V}_t = \{\mathcal{V}_{\tau_1}, \dots, \mathcal{V}_{\tau_k}, \dots, \mathcal{V}_{\tau_K}\}$ 为节点集合，由每个时隙中给定卫星节点的副本组成。 $\mathcal{V}_{\tau_k}$ 中包含LEO卫星网络的两类节点集合：遥感观测卫星集合 $\mathcal{V}_{\tau_k}^{\text{RS}} = \{m_{\tau_k}\}_{M \times K}$ 和MEC-LEO卫星的集合 $\mathcal{V}_{\tau_k}^{\text{MEC}} = \{n_{\tau_k}\}_{N \times K}$ 。其中， M 和 N 分别表示遥感观测卫星和MEC-LEO卫星的数量。观测卫星节点 m_{τ_k} 可能在 τ_k 时隙观测并将获取的数据存储下来，在 τ_k 时隙传输出去，例如传输给地面站，或者卸载给MEC-LEO卫星，其中 $k'=1, 2, \dots, K$ 且 $k' \neq k$ 。

$(m_{\tau_k}, m_{\tau_{k'}}), \forall m_{\tau_k} \in \mathcal{V}_{\tau_k}^{\text{RS}}, k=1, \dots, K-1$ 为同一个遥感观测卫星节点在连续两个时隙之间的边，又称为缓存

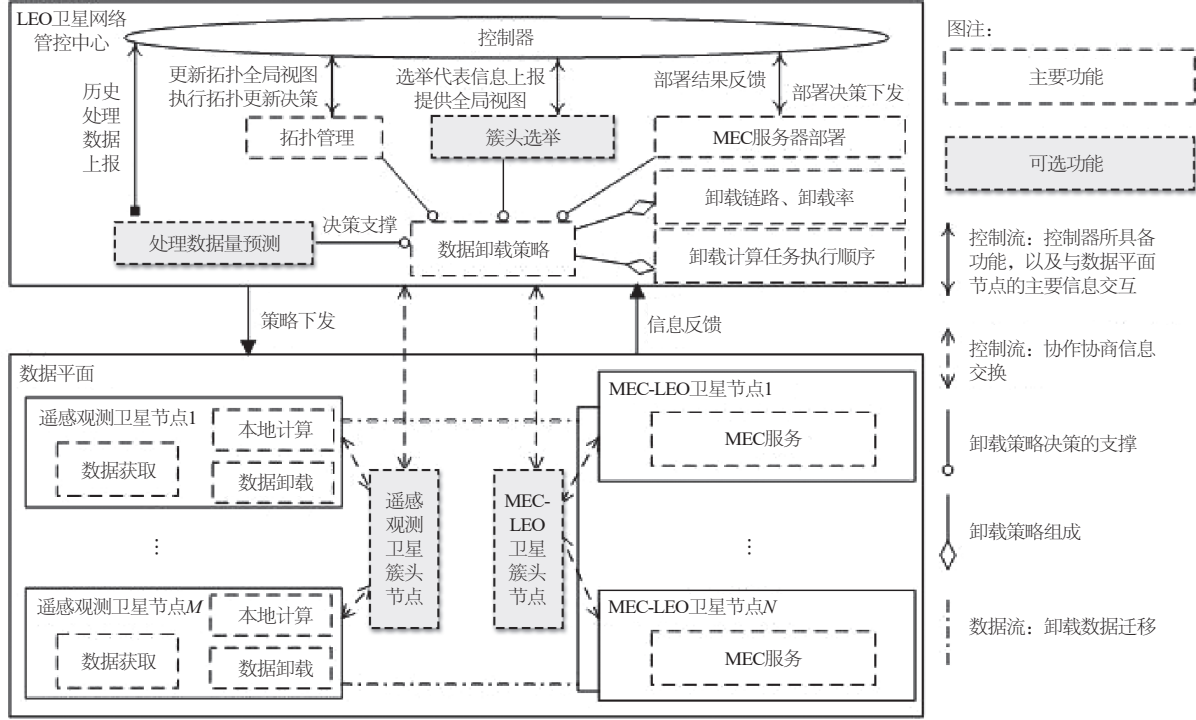


图2 LEO卫星网络MEC服务管理模型

链路，其链路容量 $C_{m_k, m_{k+1}}$ 为当前的卫星缓存大小。链路集合 $\mathcal{L}$ 除了包含此类链路，还包含MEC-LEO卫星缓存链路 (n_k, n_{k+1}) , $\forall n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}, k=1, \dots, K-1$ 以及遥感观测卫星节点到MEC-LEO卫星的传输链路 (m_k, n_k) , $\forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, \forall n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}, k=1, \dots, K-1$ 。

网络模型如图3所示，符号及其含义见表1。

2.2 遥感观测卫星上处理的本地计算能耗

假设CPU架构采用动态电压频率调节技术，其动态功率消耗与（电路供电电压的平方×遥感观测卫星 m 的CPU周期频率）成比例，即 $P_{m_k}^c \propto V_{\text{cir}}^2 f_m^c$ [16]。CPU芯片在低压限制下工作时，其时钟频率与供电电压近似成线性比例，即 $f_m^c \propto V_{\text{cir}}$ 。因此，遥感观测卫星 m 的本地功率消耗可表述为

$$P_{m_k}^c = \kappa_m^c (f_m^c)^3 \quad (1)$$

其中， κ_m^c 为与遥感观测卫星 m 的芯片架构相关功耗系数。

记遥感观测卫星 m 在 τ_k 时隙需处理的数据量为 d_{m_k} ，单位为比特，执行单位比特所需的CPU周期数为 λ_m^c ，则 τ_k 时隙遥感观测卫星 m 的计算能耗可表述为

$$E_{m_k}^c = \begin{cases} P_{m_k}^c d_{m_k} \lambda_m^c / f_m^c = \kappa_m^c (f_m^c)^2 d_{m_k} \lambda_m^c, & d_{m_k} \lambda_m^c / f_m^c \leq \tau \\ P_{m_k}^c \tau = \kappa_m^c (f_m^c)^3 \tau, & d_{m_k} \lambda_m^c / f_m^c > \tau \end{cases} \quad (2)$$

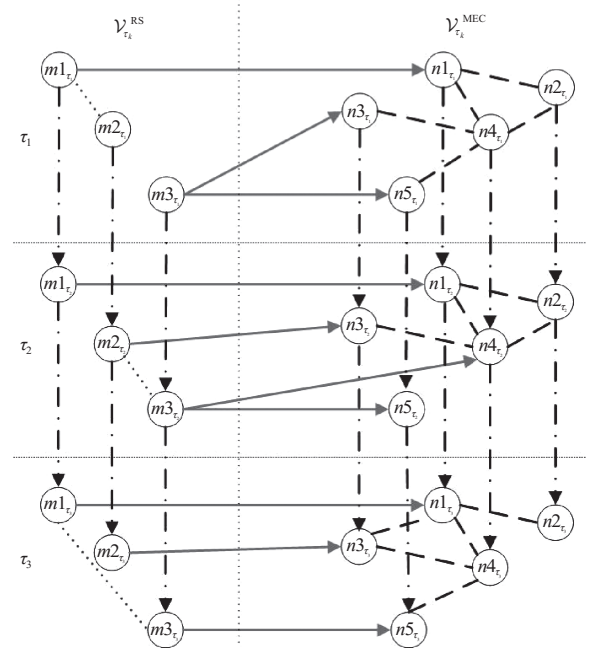


图3 网络模型

2.3 遥感观测卫星上处理的数据迁移能耗

定义卸载迁移率矩阵 $A = \{a_{m_k n_k}\}_{M \times N \times K}$ ，其中元素 $a_{m_k n_k} \in [0, 1]$ 表示 τ_k 时隙遥感观测卫星 m 卸载到MEC-LEO卫星 n 的数据量占遥感观测卫星 m 需处理数据量的比例。

表1 符号及其含义

符号	符号含义
M	观测用户的数目
N	MEC-LEO卫星数
K	所研究的总时隙数
τ_k	第 k 个时隙
$\mathcal{T}$	时隙集合 $\mathcal{T}=\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k, \dots, \tau_K\}$
d_{m_k}	τ_k 时隙内用户 m 需处理的数据量
$\mathbf{D}$	用户卸载数据集合 $\mathbf{D}=\{d_m^{\tau_k}\}_{M \times K}$
$\varphi_{m_k n_k}$	用户 m 卸载单位数据到LEO卫星 n 所需支付的成本
$a_{m_k n_k}$	用户 m 数据卸载到LEO卫星 n 的迁移率
$\mathbf{A}$	卸载迁移率矩阵 $\mathbf{A}=\{a_{m_k n_k}\}_{M \times N \times K}$
$l_{m_k n_k}$	时隙 τ_k 内用户 m 与LEO卫星 n 之间的距离
$\mathbf{L}$	距离集合 $\mathbf{L}=\{l_{m_k n_k}\}_{M \times N \times K}$
$L_{\max}$	遥感卫星 m 到LEO卫星 n 的最大可承受卸载链路距离
$w_{m_k n_k}$	遥感卫星 m 是否卸载数据到LEO卫星 n 的决策变量

那么, τ_k 时隙遥感观测卫星 m 卸载数据到MEC-LEO卫星 n 的数据量可表示为 $a_{m_k n_k} d_{m_k}$ 。

τ_k 时隙内, 遥感观测卫星 m 卸载数据到MEC-LEO卫星 n 的传输能耗为

$$E_{m_k n_k}^{\text{tr}} = P_{m_k n_k}^{\text{tr}} t_{m_k n_k}^{\text{tr}} = P_{m_k n_k}^{\text{tr}} a_{m_k n_k} d_{m_k} / r_{m_k n_k}^{\text{tr}} \quad (3)$$

其中, $t_{m_k n_k}^{\text{tr}}$ 和 $r_{m_k n_k}^{\text{tr}}$ 分别表示 τ_k 时隙内遥感观测卫星 m 卸载数据到MEC-LEO卫星 n 的传输时延和传输速率, 本文中约束 $t_{m_k n_k}^{\text{tr}} \leq \tau$, 即 $a_{m_k n_k} d_{m_k} \leq r_{m_k n_k}^{\text{tr}} \tau$ 。 $r_{m_k n_k}^{\text{tr}}$ 可表述如下

$$r_{m_k n_k}^{\text{tr}} = B \log_2(1 + \text{SNR}_{m_k n_k}) = B \log_2(1 + P_{m_k n_k} h_{m_k n_k} / (N_0 B)) = B \log_2\left(1 + P_{m_k n_k} \frac{G_{m_k n_k} g_{m_k n_k} / (l_{m_k n_k})^2}{(N_0 B)}\right) \quad (4)$$

其中, $G_{m_k n_k}$ 表示遥感观测卫星 m 到MEC-LEO卫星 n 的视距通信系数, $g_{m_k n_k}$ 表示遥感观测卫星 m 到MEC-LEO卫星 n 的单位距离的信道功率增益, $l_{m_k n_k}$ 、 $\text{SNR}_{m_k n_k}$ 、 $h_{m_k n_k}$ 分别表示 τ_k 时隙内遥感观测卫星 m 到MEC-LEO卫星 n 的距离、信噪比、信道增益。 $P_{m_k n_k}$ 是遥感观测卫星 m 到MEC-LEO卫星 n 的传输功率, 单位为W, N_0 是信道功率谱密度, 单位W/Hz。同时, 本文假设星间链路的信道带宽相等, 均为 B , 单位Hz。

τ_k 时隙内, 遥感观测卫星 m 卸载数据的总传输能耗为

$$E_{m_k}^{\text{tr}} = \sum_{n_k \in \mathcal{N}_{\text{MEC}}} E_{m_k n_k}^{\text{tr}} \quad (5)$$

记 τ_k 时隙内遥感观测卫星的能耗阈值为 $E_{m_k}^{\text{RS-max}}$, 则遥感观测卫星 m 的总能耗约束为

$$E_{m_k}^{\text{c}} \left(1 - \sum_{n_k \in \mathcal{N}_{\text{MEC}}} a_{m_k n_k}\right) + E_{m_k}^{\text{tr}} \leq E_{m_k}^{\text{RS-max}} \quad (6)$$

2.4 MEC-LEO卫星的边缘计算能耗

类似地, 假设MEC-LEO卫星 n 的CPU架构采用动态电压频率调节技术, 其CPU时钟频率为 f_n^{MEC} , 单位为cycle/s, 同时MEC-LEO卫星CPU芯片在低压限制下工作。MEC-LEO卫星 n 执行边缘计算的功率消耗可表述为

$$P_{n_k}^{\text{MEC}} = \mathcal{K}_n^{\text{MEC}} (f_n^{\text{MEC}})^3 \quad (7)$$

其中, $\mathcal{K}_n^{\text{MEC}}$ 为与MEC-LEO卫星的芯片架构相关的功耗系数。

依据每个遥感观测卫星 m 在 τ_k 时隙内需处理的数据量 d_{m_k} 和卸载迁移率 $a_{m_k n_k}$, MEC-LEO卫星 n 在 τ_k 时隙内执行边缘计算的能耗为

$$E_{n_k}^{\text{MEC}} = P_{n_k}^{\text{MEC}} \left(\sum_{m_k \in \mathcal{N}_{\text{RS}}} d_{m_k} a_{m_k n_k} \right) \lambda_n^{\text{MEC}} / f_n^{\text{MEC}} = \mathcal{K}_n^{\text{MEC}} (f_n^{\text{MEC}})^2 \left(\sum_{m_k \in \mathcal{N}_{\text{RS}}} d_{m_k} a_{m_k n_k} \right) \lambda_n^{\text{MEC}} \quad (8)$$

其中, λ_n^{MEC} 为MEC-LEO卫星 n 执行单位比特所需的CPU周期数。

记 τ_k 时隙内, MEC-LEO卫星 n 的能耗阈值为 $E_{n_k}^{\text{MEC-max}}$, 有 τ_k 时隙内MEC-LEO卫星 n 计算消耗的能量约束表达如下

$$E_{n_k}^{\text{MEC}} \leq E_{n_k}^{\text{MEC-max}} \quad (9)$$

2.5 遥感观测卫星的存储

假设在 τ_{k+1} 时隙新增的遥感数据量为 $\Delta d_{m_{k+1}}$, 考虑到上一时间片的未处理数据量, τ_{k+1} 时隙遥感观测卫星 m 需处理的数据总量和虚拟链路缓存约束分别建模如下

$$d_{m_{k+1}} = \Delta d_{m_{k+1}} + d_{m_k} \left(1 - \sum_{n_k \in \mathcal{N}_{\text{MEC}}} a_{m_k n_k}\right) / \delta^{\text{RS}} \quad (10)$$

$$d_{m_{k+1}} \leq C_{m_k m_{k+1}} \quad (11)$$

其中, δ^{RS} 为遥感观测卫星在本地对数据压缩计算的系数。

2.6 MEC-LEO卫星的存储

假设MEC-LEO卫星的内存容量为 $C_{n_k}^{\text{MEC-max}}$ 。令系数 $\delta^{\text{MEC}} > 1$ 表示MEC-LEO卫星对数据压缩计算的能力, τ_k 时隙内, 遥感观测卫星 m 将数据 d_{m_k} 卸载到MEC-LEO卫星系统经过MEC-LEO卫星计算后需占用的内存为 $d_{m_k} / \delta^{\text{MEC}}$ 。因此, 在执行数据卸载决策中, 关于MEC-LEO卫

星的存储约束数学建模如下

$$\sum_{m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}} d_{m_k} a_{m_k n_k} / \delta^{\text{MEC}} \leq C_{n_k}^{\text{MEC-max}} \quad (12)$$

3 LEO卫星网络中数据卸载迁移优化建模与求解

3.1 优化问题建模

以最小化遥感观测卫星的任务总成本为优化目标，包括未成功卸载的计算成本 $\sum_{k=1}^K \sum_{m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}} \psi_{m_k} d_{m_k} \left(1 - \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} a_{m_k n_k}\right)$ 以及卸载任务的成本 $\sum_{k=1}^K \sum_{m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}} \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} \varphi_{m_k n_k} d_{m_k} a_{m_k n_k}$ ，其中， ψ_{m_k} 、 $\varphi_{m_k n_k}$ 为价格因子。引入成本归一化因子 $\rho_{m_k n_k} = \varphi_{m_k n_k} / \psi_{m_k}$ ，优化目标表述如下

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}} d_{m_k} \left(1 - \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} a_{m_k n_k}\right) + \sum_{k=1}^K \sum_{m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}} \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} \rho_{m_k n_k} d_{m_k} a_{m_k n_k} \quad (13)$$

任务卸载决策问题可建模为

$$\begin{aligned} \text{OP: } \min_{a_{m_k n_k}, w_{m_k n_k}} & \sum_{k=1}^K \sum_{m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}} d_{m_k} \left(1 - \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} a_{m_k n_k}\right) + \sum_{k=1}^K \sum_{m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}} \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} \rho_{m_k n_k} d_{m_k} a_{m_k n_k} \\ \text{s.t. } & \text{C1: } 0 \leq a_{m_k n_k} \leq 1, \forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ & \text{C2: } \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} a_{m_k n_k} \leq 1, \forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ & \text{C3: } \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} I(a_{m_k n_k} \neq 0) \leq N_{\text{RS}}, \forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ & \text{C4: } w_{m_k n_k} = \begin{cases} 1, & m \text{ 与 } n \text{ 在 } \tau_k \text{ 时隙可见, 且 } l_{m_k n_k} \leq L_{\text{Max}}, \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ & \quad \forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ & \text{C5: } a_{m_k n_k} \leq w_{m_k n_k}, \forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ & \text{C6: } d_{m_k+1} = \Delta d_{m_k+1} + d_{m_k} \left(1 - \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} a_{m_k n_k}\right) / \delta^{\text{RS}}, \forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, k \in \{1, 2, \dots, K-1\} \\ & \text{C7: } d_{m_k+1} \leq C_{m_k+1}, \forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, k \in \{1, 2, \dots, K-1\} \\ & \text{C8: } E_{m_k}^{\text{c}} \left(1 - \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} a_{m_k n_k}\right) + E_{m_k}^{\text{tr}} \leq E_{m_k}^{\text{RS-max}}, \forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ & \text{C9: } \sum_{m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}} d_{m_k} a_{m_k n_k} / \delta^{\text{MEC}} \leq C_{n_k}^{\text{MEC-max}}, \forall n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ & \text{C10: } E_{n_k}^{\text{MEC}} \leq E_{n_k}^{\text{MEC-max}}, \forall n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ & \text{C11: } a_{m_k n_k} d_{m_k} \leq r_{m_k n_k}^{\text{tr}} \tau, \forall m_k \in \mathcal{V}_k^{\text{RS}}, n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \end{aligned} \quad (14)$$

任务卸载决策问题包括两类变量：卸载链路选择变量和数据卸载迁移率变量。优化问题OP中，C1、C2为数据卸载率约束，C3为遥感观测卫星用于星间传输数据的天线数量约束，C4为两类卫星间的星间链路约束，C5为卸载迁移量与链路适配的约束，C6、C7为遥感观测卫星的虚拟缓存链路约束，C8为遥感观测卫星的能量约束，C9、C10为MEC-LEO卫星的内存、能量约束，C11为卸载传输时间约束。

3.2 LEO卫星网络优化问题求解

上述任务卸载决策优化问题中，基于时间扩展图的思想，针对遥感观测卫星节点在不同时隙的内存资源流转情况展开了优化建模，形成了一个多约束的混合整数线性规划问题。这类问题目前已有分支定界法等较为成熟的求解算法。考虑到在更加复杂、完备的场景中，模型还需联合优化MEC-LEO卫星节点的内存资源跨时隙流转等情况。针对该问题的求解，首先，依据距离约束，对优化问题约束进行快速裁剪；其次，在时隙迭代优化中，依据虚拟缓存链路约束，按序对每个时隙需要处理的数据量进行界定，即

$$d_{m_k+1} = \min \left\{ \Delta d_{m_k+1} + d_{m_k} \left(1 - \sum_{n_k \in \mathcal{V}_k^{\text{MEC}}} a_{m_k n_k}\right) / \delta^{\text{RS}}, C_{m_k+1} \right\};$$

最后，采用MATLAB的工具包进行退化的线性规划问题求解。

假设场景中有 M 个用户（遥感观测卫星）， N 个MEC-LEO卫星，联合优化 K 个时间片，整个卫星网络的

表2 遥感观测卫星参数

遥感观测卫星序号	半长轴 / km	偏心率	轨道倾角	近地点角	升交点赤经	真近点角
1	7078	0	120°	0	0	0
2	7078	0	60°	0	60°	0
3	7078	0	0	0	120°	0

表3 卸载迁移模型参数

符号	含义	取值
$G_{m_k n_k}$	遥感观测卫星 m 到MEC-LEO卫星 n 的视距通信系数	2.2846
$g_{m_k n_k}$	星间单位距离下的信道功率增益	$1.42 \times 10^{-4} \text{ km}^2$
N_o	高斯白噪声功率谱密度	10^{-20} W/Hz
B	遥感观测卫星星间链路的信道带宽	300 MHz
$P_{m_k n_k}$	遥感观测卫星数据传输功率	1 W
$\kappa_m^{\text{c}}, \kappa_n^{\text{mcc}}$	遥感观测卫星 m 、MEC-LEO卫星 n 的CPU功耗系数	10^{-25}
$f_m^{\text{c}}, f_n^{\text{mcc}}$	遥感观测卫星 m 、MEC-LEO卫星 n 的CPU周期频率	$2 \times 10^9 \text{ cycle/s}$
$\lambda_m^{\text{c}}, \lambda_n^{\text{mcc}}$	遥感观测卫星 m 、MEC-LEO卫星 n 的执行数据与CPU周期需求量之间的关系系数	1000 cycle/bit
$\delta^{\text{RS}}, \delta^{\text{MEC}}$	遥感观测卫星、MEC-LEO卫星对数据压缩计算的系数	1、5
$C_{m_k+1}, C_{n_k}^{\text{MEC-max}}$	单位时间片内，遥感观测卫星虚拟链路缓存容量、MEC-LEO卫星内存容量	125 GB、512 GB
$E_{m_k}^{\text{RS-max}}, E_{n_k}^{\text{MEC-max}}$	单位时间片内，遥感观测卫星、MEC-LEO卫星的可用能量上限	$3 \times 10^{10} \text{ J}$
$\rho_{m_k n_k}$	成本归一化因子遥感观测卫星卸载单位数据所需费用	1
$\varphi_{m_k n_k}$	遥感观测卫星卸载单位数据所需费用	10^{-10}元/bit
N_{RS}	遥感观测卫星用于星间传输数据的天线数量	4幅

节点数为 $M+N$ ，极端情况下最多存在 $M \times N$ 条链路供卸载选择。算法的时间复杂度为 $O(M \times N \times K)$ 。

4 仿真分析

为了验证所提跨时隙优化模型及算法的性能，针对由3颗遥感观测卫星和9颗MEC-LEO卫星展开仿真实验。其中，3颗遥感观测卫星的轨道参数见表2。在由66颗卫星组成的卫星星座中选取相邻3个轨道面、每个轨道面3颗相邻卫星组成9颗MEC-LEO卫星。上述卫星星座轨道高度为780 km、轨道倾角为 86.4° ，共6个轨道面，每个轨道面11颗卫星均匀分布。

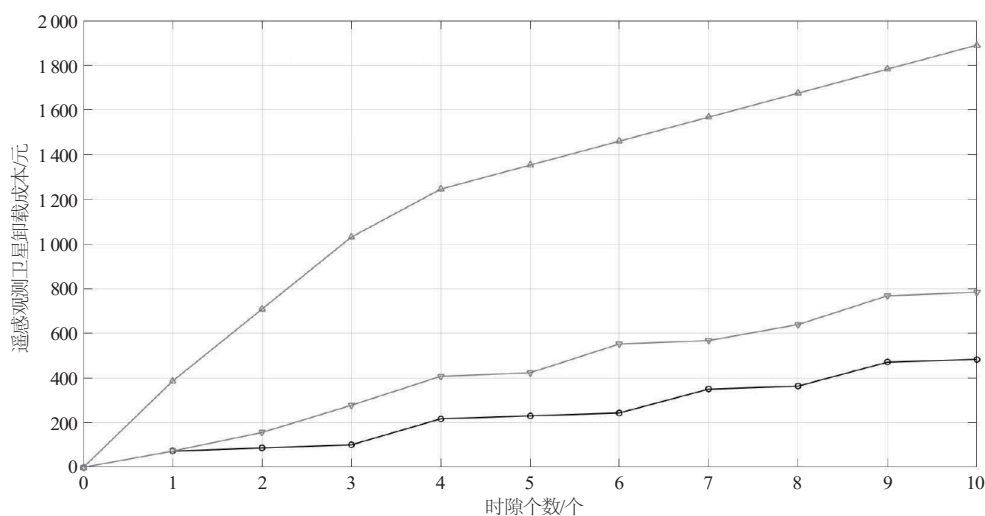
仿真的其他参数设置见表3。

本文所提方案与以下两种方案进行对比。

(1) 对比方案一：该方案与所提方案相同之处是，利用时间扩展图对遥感观测卫星上一时隙未卸载数据进行保存并等待下一时隙再卸载；不同之处是目标不考虑遥感观测卫星卸载任务的成本，只要满足链路连接约束、内存约束和能耗约束就尽量卸载。因此，对比方案一简称为“跨时隙尽力卸载”。

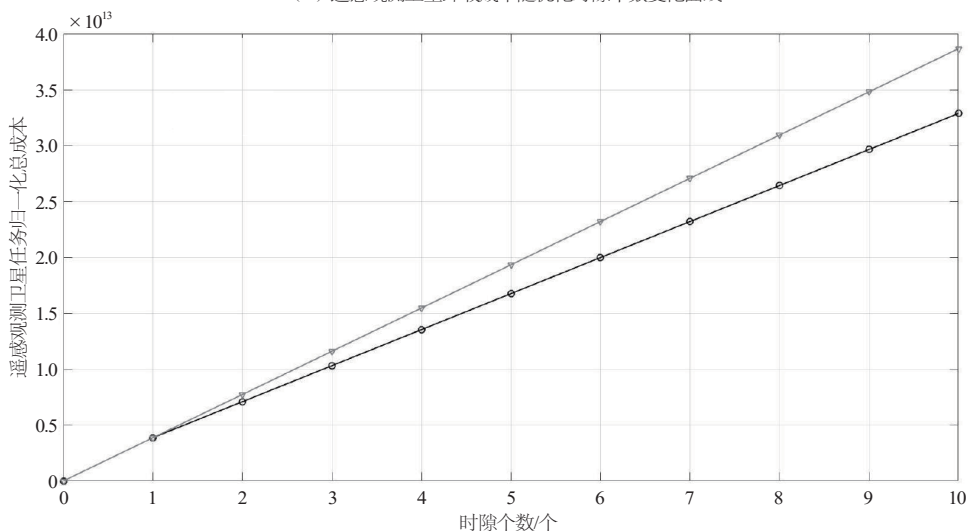
(2) 对比方案二：该方案与所提方案相同之处是，优化目标综合考虑遥感观测卫星卸载成本和未卸载数据的本地计算成本；不同之处是仅考虑单时隙的策略优化。因此，对比方案二简称为“单时隙综合优化”。

下面围绕所研究的方案在卫星跨时隙优化方面的性能进行仿真对比。设置每个时隙内遥感观测卫星需处理



图注：● 本文所提方案 ▲ 单时隙综合优化 ◆ 跨时隙尽力卸载

(a) 遥感观测卫星卸载成本随优化时隙个数变化曲线



图注：● 本文所提方案 ▲ 单时隙综合优化

(b) 遥感观测卫星任务归一化总成本随优化时隙个数变化曲线

图4 优化时隙个数变化下的方案对比

的数据量为150 GB,观测卫星到MEC-LEO卫星的最大卸载链路距离 $L_{\max}$ 为5 000 km。每60 s为1个时隙,取5个时隙进行联合优化。如图4所示,随着优化时隙的不断增长,遥感观测卫星卸载成本和任务归一化总成本均呈上升趋势。这是由于每个遥感观测卫星在每个时隙内均有数据需要处理,随着时隙的增加,需要进行卸载传输的数据量和未卸载的数据量不断增加,从而造成卸载成本和任务归一化总成本不断增加。不考虑遥感观测卫星卸载付费的“跨时隙尽力卸载”方案,卸载的数据量最多,相应的卸载成本也最多。本文所提方案相比于“单时隙综合优化”,通过跨时隙优化总的成本,从而降低了总的卸载成本,总花费最少,可见所提方案的优越性。

图4(b)中未对比方案一“跨时隙尽力卸载”,这是考虑到该方案中未考虑遥感观测卫星卸载任务的成本,在总归一化成本对比方面,没有可比性。

在上述的仿真实验中,假设每个时隙内遥感观测卫星需处理的数据量为150 GB,下面的仿真中设置每个时隙内遥感观测卫星需处理的数据量分别为30 GB、60 GB、90 GB、120 GB、150 GB,分别对应图5中业务1:30到业务5:150,可以发现,随着业务需处理数据量的增加,本文所提方案用户未卸载数据总量不断增加,但是增长趋势不断放缓,可见本文所提方案对高数据量业务具有较好的适应性。

5 结束语

本文构建的LEO卫星网络MEC服务管理模型,基

于软件定义网络架构实现具备资源全局视图的网络控制中心集中管理和分布快速任务执行及参数调整。所提的MEC服务管理模型主要包括管控中心的MEC服务器部署、数据卸载策略、拓扑管理功能,遥感观测节点集的数据获取、本地计算、数据卸载功能,以及部署有MEC服务器的LEO卫星节点集提供的MEC服务,可以实现功能分散、服务能力聚合的高效资源管理。

本文所提的任务迁移方法,针对LEO卫星网络动态场景下多个遥感观测卫星作为卸载用户与多个通信卫星搭载MEC服务器的协作问题,进行观测任务的跨时隙数据卸载优化。为了保证遥感观测卫星在存储资源紧张时卸载较多的数据至MEC-LEO的需求,通过将时间段分割成多个时间片实现静态化处理。基于时间扩展图的虚拟链路思想,将遥感观测卫星未卸载的数据通过虚拟存储链路保留至下一时刻处理。本文所提的优化方法兼顾了数据迁移成本与未卸载数据的代价。本文所提跨时隙迁移优化方法的仿真实验证明了该方案的有效性和优越性;本文所提方案相比于不考虑将未卸载数据保留跨时隙传递的策略可以降低数据处理总成本。

在实际的LEO卫星网络中,遥感卫星的观测任务处理量具有随机动态特性,在执行数据迁移中,与网络拓扑动态变化紧密耦合。因此,针对遥感卫星业务量的精准预测模型与时变拓扑网络的高效低维表征方法是本文所提LEO卫星网络中MEC服务管理与任务迁移优化方法进行实际应用的重要研究方向。

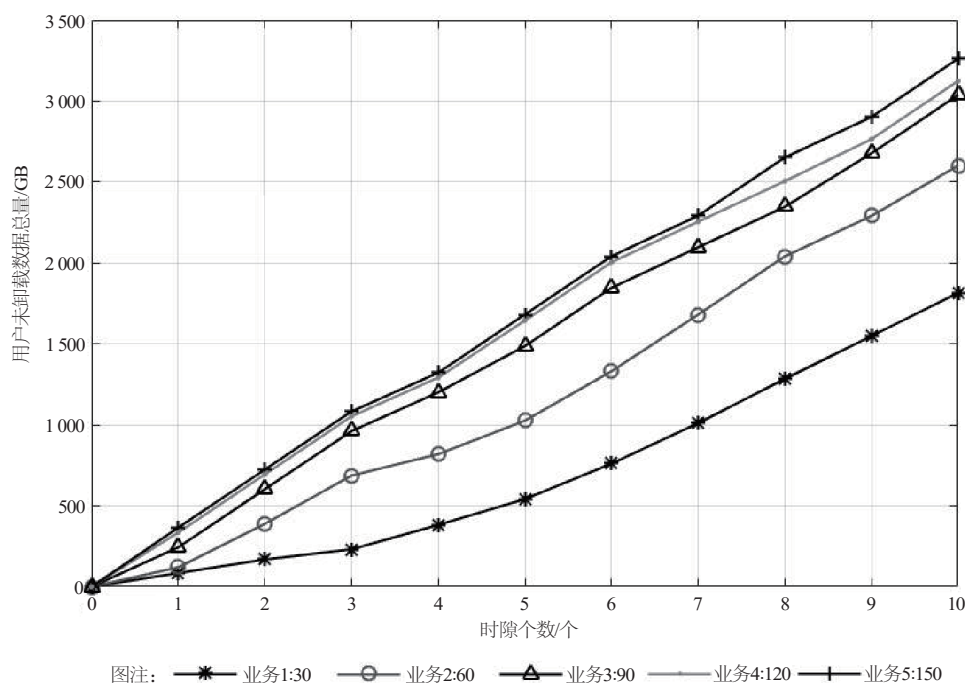


图5 本文所提方案在不同业务量下的对比

参考文献：

- [1] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
- WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [2] DI B Y, SONG L Y, LI Y H, et al. Ultra-dense LEO: integration of satellite access networks into 5G and beyond[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 62-69.
- [3] STRINATI E C, BARBAROSSA S, CHOI T, et al. 6G in the sky: On-demand intelligence at the edge of 3D networks (Invited paper)[J]. ETRI Journal, 2020, 42(5): 643-657.
- [4] ETSI. Mobile-edge computing: introductory technical white paper[R]. 2014.
- [5] CHENG N, HE J C, YIN Z S, et al. 6G service-oriented space-air-ground integrated network: a survey[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(9): 1-18.
- [6] ZHANG Z H, FENG J, PEI Q Q, et al. Integration of communication and computing in blockchain-enabled multi-access edge computing systems[J]. China Communications, 2021, 18(12): 297-314.
- [7] ZHANG Y, TANG Y, WANG W Y. Service deployment and service request optimization scheduling in MEC enabled LEO networks[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [8] KIM T, CHOI J P. Performance analysis of satellite server mobile edge computing architecture[C]//Proceedings of 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [9] JING Y, JIANG C X, GE N, et al. Resource optimization for signal recognition in satellite MEC with federated learning[C]//Proceedings of 2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [10] LI C C, ZHANG Y S, HAO X K, et al. Jointly optimized request dispatching and service placement for MEC in LEO network[J]. China Communications, 2020, 17(8): 199-208.
- [11] ZHANG Z J, ZHANG W Y, TSENG F H. Satellite mobile edge computing: improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 70-76.
- [12] XU X, ZHAO H, LIU C, et al. On the aggregated resource management for satellite edge computing[C]// ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [13] WANG P, ZHANG X S, ZHANG S, et al. Time-expanded graph-based resource allocation over the satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 360-363.
- [14] 王腾飞, 张瑞权, 李建宏, 等. 基于边缘计算的计算即服务模式[J]. 电子技术应用, 2019, 45(5): 74-77.
- WANG T F, ZHANG R Q, LI J H, et al. Computing as a service pattern based on edge computing[J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(5): 74-77.
- [15] YAN Z, COLA T D, ZHAO K, et al. Exploiting edge computing in internet of space things networks: dynamic and static server placement[C]//2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [16] MAO Y Y, YOU C S, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2322-2358.

[作者简介]



刘志慧（1989-），女，博士，高级工程师，主要研究方向为空间网络资源管控、认知无线网络资源配置、卫星任务规划。



尉欢（1996-），女，桂林电子科技大学信息与通信学院硕士生，主要研究方向为卫星网络资源优化、卫星任务规划。



殷杰（1983-），男，博士，研究员，主要研究方向为空间宽带网络、空间光通信、微波光子。



王俊义（1978-），男，博士，研究员，博士生导师，主要研究方向为移动边缘计算、网络资源管控、图信号处理。



金世超（1980-），男，博士，研究员，主要研究方向为空间通信与网络。



董涛（1975-），男，博士，研究员，博士生导师，主要研究方向为空间光通信与空间网络。