

面向低地球轨道卫星的高能效RoI分片拍摄任务调度方案

高培泽, 田厉锋, 李跃鹏, 曾德泽, 钟梁, 龚文引

引用本文

高培泽, 田厉锋, 李跃鹏, 曾德泽, 钟梁, 龚文引. 面向低地球轨道卫星的高能效RoI分片拍摄任务调度方案[J]. 计算机科学, 2026, 53(2): 416-422.

GAO Peize, TIAN Lifeng, LI Yuepeng, ZENG Deze, ZHONG Liang, GONG Wenyin. Energy-efficiency RoI Slicing Capturing Task Scheduling Scheme for LEO Satellites [J]. Computer Science, 2026, 53(2): 416-422.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于最长时延加权带宽的Was m与容器混合函数部署优化方法](#)

Joint Function Deployment Optimization Method for WebAssembly and Containers Based on Longest Latency-Weighted Bandwidth

计算机科学, 2025, 52(9): 170-177. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.250300031>

[面向能源感知的虚拟机深度强化学习调度算法研究](#)

Study on Deep Reinforcement Learning for Energy-aware Virtual Machine Scheduling

计算机科学, 2024, 51(2): 293-299. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230100031>

[基于强化学习的高能效基站动态调度方法](#)

Reinforcement Learning Based Dynamic Basestation Orchestration for High Energy Efficiency

计算机科学, 2021, 48(11): 363-371. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201000008>

[基于ns2的LEO卫星网络路由算法模拟](#)

计算机科学, 2007, 34(1): 57-60.

[面向LEO卫星网的轻量级按需QoS源路由算法](#)

Lightweight On-demand QoS Source Routing for LEO Satellite Network

计算机科学, 2012, 39(7): 64-68.

面向低地球轨道卫星的高能效 RoI 分片拍摄任务调度方案

高培泽¹ 田厉锋² 李跃鹏² 曾德泽^{1,2} 钟梁³ 龚文引²

1 中国地质大学(武汉)未来技术学院 武汉 430078

2 中国地质大学(武汉)计算机科学与技术学院 武汉 430078

3 中国地质大学(武汉)机械与电子学院 武汉 430078

(2542143508@qq.com)

摘要 随着低地球轨道(Low Earth Orbit,LEO)卫星技术的快速发展,搭载高分辨率可旋转相机的 LEO 卫星在执行复杂的地球观测任务(Earth Observation Missions,EOMs)中发挥重要作用,这些任务通常需要对许多感兴趣区域(Region of Interest,RoI)进行多卫星协同拍摄。然而,不同于传统单颗卫星拍摄时仅需要考虑拍摄能耗,为保证任务要求的 RoI 区域能够被完全覆盖,需要卫星频繁调整摄像头角度,从而引发高昂的相机旋转功耗。不合理的 RoI 分片拍摄任务分配难以权衡在多星协同拍摄时所产生的相机拍摄能耗与相机旋转能耗。为此,研究了 RoI 分片拍摄任务分配问题,通过综合考虑卫星的轨道方向、星载相机旋转能耗与拍摄能耗的均衡,在确保区域完全覆盖的同时,实现拍摄任务总能耗降至最低。接着,提出了一种面向异构 LEO 卫星的高能效 RoI 分片拍摄任务分配(Energy-efficiency RoI Slicing Capturing Task Scheduling,ERSCTS)算法。最后,通过与经典的卫星拍摄任务分配算法进行全面的对比实验,验证了 ERSCTS 算法在降低卫星能量开销上的有效性。实验结果证明,在保证 RoI 区域全覆盖拍摄的条件下,ERSCTS 算法可以将拍摄任务总能耗平均降低 24.5%。

关键词:LEO 卫星;多星协作;卫星能量管理;星载相机**中图分类号** TP391

Energy-efficiency RoI Slicing Capturing Task Scheduling Scheme for LEO Satellites

GAO Peize¹, TIAN Lifeng², LI Yuepeng², ZENG Deze^{1,2}, ZHONG Liang³ and GONG Wenyin²

1 School of Future Technology,China University of Geosciences(Wuhan),Wuhan 430078,China

2 School of Computer Science,China University of Geosciences(Wuhan),Wuhan 430078,China

3 School of Mechanical Engineering and Electronic Information,China University of Geosciences(Wuhan),Wuhan 430078,China

Abstract With the rapid advancement of LEO satellite technology,LEO satellites equipped with high-resolution,adjustable cameras have become essential for complex EOMs. These missions often require multi-satellite collaboration to capture multiple RoI. Unlike traditional single-satellite capture methods,which focus solely on the energy consumption of image capturing multi-satellite collaboration involves frequent camera angle adjustments to ensure complete RoI coverage,leading to significant energy consumption for camera rotations. The allocation of RoI slicing capturing tasks is challenging,as it must balance the energy consumption of both camera rotation and image capturing. This paper addresses the RoI slicing capturing task allocation problem by considering the orbital directions of satellites and the trade-off between energy consumption from camera rotation and capturing. The objective is to achieve full RoI coverage while minimizing the total energy consumption of the capturing tasks. To this end, this paper proposes ERSCTS,an Energy-efficient RoI Slicing Capturing Task Scheduling algorithm tailored for heterogeneous LEO satellites. Through comprehensive comparative experiments with traditional satellite task scheduling algorithms,it demonstrates that the ERSCTS algorithm significantly reduces satellite energy expenditure. Experimental results show that ERSCTS achieves an average energy consumption reduction of 24.5% while ensuring complete RoI coverage.

Keywords Low Earth Orbit satellites,Multi-satellite collaboration,Satellite energy management,Onboard camera

1 引言

近年来,地球观测(EOMs)技术被广泛地应用到城市

管理、灾害应急和环境监测等领域^[1]。特别是随着相关业务需求变得愈发复杂,对卫星遥感图像数据的需求也迅速增涨,这直接导致了卫星所需要观测的数据呈现指数级上升^[2]。而

到稿日期:2025-02-13 返修日期:2025-05-15

基金项目:国家自然科学基金(62172375,62371429,62432015)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62172375,62371429,62432015).

通信作者:曾德泽(deze@cug.edu.cn)

传统的地球观测技术多使用中、高轨遥感卫星,且大都仅使用单个卫星执行遥感观测任务,其观测范围相对有限、观测效率相对较低,难以满足目前应用日益增长的观测需求^[3]。为此,多星协同观测技术被提出,以弥补单星观测技术的不足。多星协同观测技术利用多颗低地球轨道(LEO)卫星对感兴趣目标区域(RoI)进行协同遥感拍摄,从而扩大观测范围,提升工作效率。

目前多星协同执行地球观测任务的技术已被业内广泛应用,且已有大量的相关研究^[4]关注如何合理地分配卫星拍摄任务以优化相机拍摄能耗。然而,当前研究发现,星载相机能耗过高^[5]是影响卫星拍摄任务能耗的重要因素^[6],其中,相机拍摄功耗最低约为 10 J^[7],而相机的旋转功耗最低约为 12 J^[8],高于相机拍摄功耗。传统的 RoI 拍摄任务分配策略为了优化相机拍摄能耗,会对相机进行频繁的旋转调整,以使用最低能耗完成对目标区域的覆盖式拍摄。然而,这种频繁的旋转调整反而导致相机旋转能耗显著增加。如图 1 所示,多星协同观测 RoI 区域时,卫星运行轨道通常可以分为上升轨道和下降轨道,每个卫星的星载相机的可视宽度有限且固定^[9-10],其伴随卫星轨道绕地运行将持续拍摄地表形成条带,卫星的拍摄条带交错切割,可以将 RoI 区域划分为分片。同时,星载相机旋转可使其观测轨道的左右区域形成该卫星的两条可观测条带,以扩大拍摄范围。当卫星需要执行 RoI 分片的拍摄任务时,其必须提前转动星载相机将条带覆盖在目标区域上。若不考虑相机旋转能耗,则图中红色 RoI 分片的拍摄任务将会分配给下降的卫星,而相机需要旋转来执行对红色 RoI 区域的拍摄任务,相机的旋转能耗上升,最终导致整个任务的能耗增大。

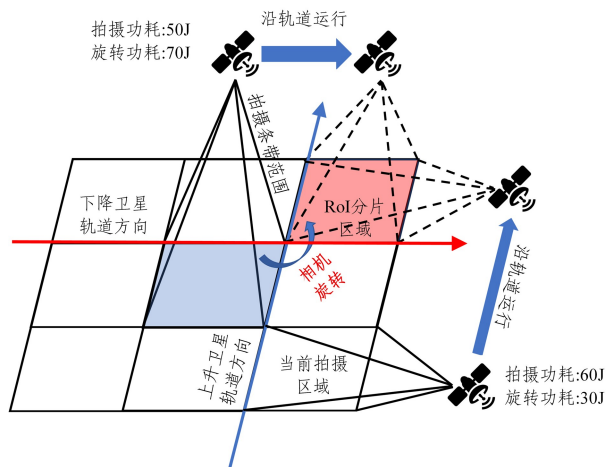


图 1 拍摄细节说明图(电子版为彩图)

Fig. 1 Illustration of capturing detail

此外,由于不同的星载相机的硬件设计、运行原理均不一样,星载相机旋转功耗、拍摄功耗各不相同。如果仅关注优化相机拍摄能耗,将造成更多的相机旋转能耗,抵消拍摄能耗降低带来的能效增益;同时,仅关注相机旋转能耗的优化也可能使得相机拍摄能耗过高,造成任务能耗的提升。显然,卫星在执行 RoI 分片拍摄任务时的相机拍摄能耗和相机旋转能耗的相互权衡,使得多星的 RoI 区域分片拍摄任务调度规划面临两难困境。由于 LEO 卫星体积较小,搭载的电池能量较低,

以上高能耗问题可能迫使卫星终止观测任务,降低工作效率。因此,本文提出在 LEO 卫星的有限能源下,针对 RoI 区域分片的拍摄任务调度问题,目标是最小化多星协同观测任务的整体能耗。

本文的主要贡献如下:

1)提出一种 RoI 区域分片的拍摄任务调度问题,并对 RoI 区域分片拍摄任务调度问题进行正式的描述。本文将该问题表述为一个二次整数规划(Quadratic Integer Programming, QIP)问题,并进一步线性化以简化求解。

2)设计了一种高能效的 RoI 分片拍摄任务分配(ERSCTS)算法,开发了一种基于能耗的拍摄任务调度机制,在保证 RoI 区域全覆盖的前提下,更好地平衡卫星拍摄任务的相机拍摄能耗与相机旋转能耗。

3)通过 ERSCTS 算法和当前先进的卫星拍摄任务分配算法的对比实验,验证了本文算法在以最小化能耗为目标的任务分配问题上有更高性能。结果表明,ERSCTS 算法的能耗比其他算法平均低 24.5%。

2 相关工作

2.1 卫星 EOM 任务中的观测方法优化研究

EOM 任务中观测方法的优化对于提升卫星工作效率至关重要,当前已有一些研究积极探索了卫星观测任务的优化方法。例如:Deng 等^[11]提出了一种通过分析卫星运动轨迹,规划相机观测 RoI 区域的方法;Moretti 等^[12]提出了卫星移动边缘计算框架,通过图像压缩减少数据大小,降低传输能耗;Wang 等^[13]构建了一个观测和传输调度的联合优化框架,以最大化成功调度的观测任务的优先级;Mayorga 等^[7]结合卫星机载相机的特性,提出分布式博弈调度策略,旨在最小化拍摄图像的整体大小,同时确保对 RoI 的完整观测覆盖;Lyu 等^[14]提出了一种综合性的解决方案,精确建模了单颗 LEO 卫星的观测服务,并将多个地球观测任务合理分配给一组 LEO 卫星。以上研究成果虽然有效缓解了卫星运行轨道重叠产生重复拍摄工作的额外能耗,但是未能考虑星载相机旋转产生的显著能耗。

2.2 卫星 EOM 任务中的能源管理研究

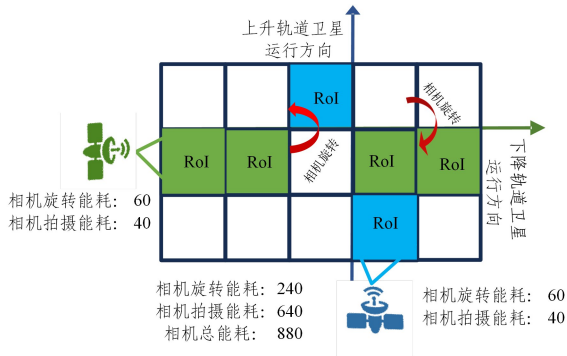
能源管理是 LEO 卫星维持在轨长效工作的关键挑战。当前已有一些研究聚焦于优化卫星在执行 EOM 观测任务时的能耗管理。例如:Mostert 等^[15]通过消除信息量低的图像(如云层覆盖或无目标图像),减少了向地面传输的数据量,从而降低了观测数据传输过程中的能耗;Jiang 等^[16]提出了一种新型压缩算法,减少了卫星通信的能量开销。当前研究主要聚焦于 EOM 观测任务的全流程能量消耗优化,忽视了异构卫星间存在不同的星载相机拍摄和旋转功耗,这给能量管理带来了严重挑战。

综上所述,当前已有研究尚未考虑星载相机的旋转功耗、拍摄功耗的差异给 RoI 分片拍摄任务能耗带来的显著影响。为了解决以上问题,本文综合考虑了星载相机旋转功耗、拍摄功耗,对 RoI 分片拍摄任务分配方案进行了全面的研究。

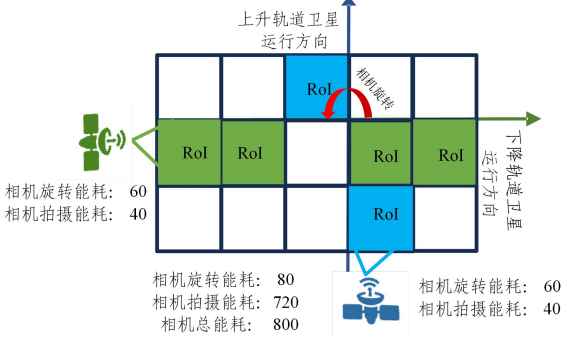
3 动机与问题表述

3.1 动机

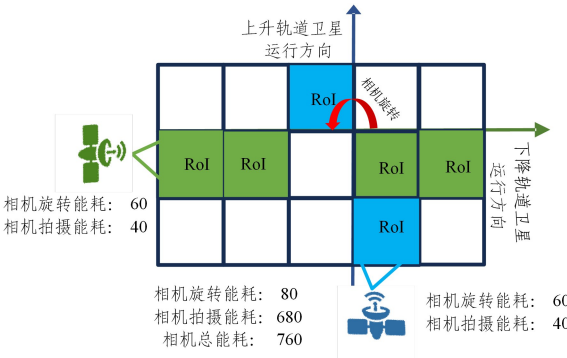
为了探讨拍摄区域时相机拍摄能耗与相机旋转能耗对 LEO 卫星执行观测任务能量消耗带来的影响,本文给出了一个简单的示例。如图 2 所示,分析了一个典型的卫星观测任务场景,该任务要求 2 颗卫星拍摄划分为多个分片的 RoI 区域。图 2 中,绿色 LEO 卫星运行在下降轨道,其拍摄功耗为 40,旋转功耗为 60;蓝色 LEO 卫星运行在上升轨道,其拍摄功耗为 60,旋转功耗为 40。每颗卫星的相机一次只能选择拍摄其运行轨道的左右区域中的一个区域和其中的分片。绿色、蓝色矩形分别表示绿色、蓝色下行轨道卫星被分配观测任务的分片。本文设置星载相机单次旋转以及单次拍摄的耗时为 2。



(a) 示例 1: 只考虑相机拍摄能耗



(b) 示例 2: 只考虑相机旋转能耗



(c) 示例 3: 综合考虑相机拍摄能耗和相机旋转能耗

图 2 不同分配策略对观测任务能耗影响的示例(电子版为彩图)

Fig. 2 Examples of the impact of different strategies on the energy consumption of tasks

摄能耗显著降低至 640,但因此带来的相机旋转能耗达到 240。示例 2 专注于减少相机旋转能耗,使得相机旋转能耗降低至 80,但相机拍摄能耗却上升到了 720。示例 3 采用了更全面的任务分配策略,兼顾拍摄任务的相机拍摄能耗和相机旋转能耗,不仅使相机拍摄能耗降低为 680,而且使相机旋转能耗降低为 80,实现了更优的能效表现。

基于以上示例,发现兼顾相机拍摄能耗和相机旋转能耗的观测任务分配策略,可以显著降低能耗并提升任务执行效率。因此,需要仔细进行 RoI 区域分片的任务分配决策,以权衡拍摄任务的相机拍摄能耗和相机旋转能耗,最小化 RoI 区域拍摄任务的整体能耗。

3.2 系统模型

本文所提到的场景中包含了一组 LEO 卫星,并使用集合 $N = \{1, 2, \dots, N\}$ 来表示。这组 LEO 卫星协作执行 RoI 区域分片的观测任务场景,且每颗 LEO 卫星仅运行在上升或者下降轨道中。为了方便描述 LEO 所处的轨道,本文引入二元常量 β_{rise}^n 和 β_{dec}^n 来表示卫星 n 运行在上升轨道(即 $\beta_{rise}^n = 1$)和下降轨道(即 $\beta_{dec}^n = 1$)。同时,本文使用二维坐标来描述 RoI 区域分片的具体位置,分片坐标集合表示为 $M = \{(i, j), \dots, (i', j')\}$,其中 $i, \dots, i' \in I, j, \dots, j' \in J$ 。在该场景中,由于 LEO 卫星镜头与其运行轨道的限制,每颗 LEO 卫星一次只能观测其轨道附近的 RoI 分片,因此,为了描述 LEO 卫星的观测限制,本文使用二元常量 $\alpha_{(i,j)}^n = \{0, 1\}$ 来表示卫星 n 是否能观测到分片 (i, j) ,其中 $\alpha_{(i,j)}^n = 1$ 表示卫星 n 能够观测到分片 (i, j) , $\alpha_{(i,j)}^n = 0$ 则表示卫星 n 无法观测到分片 (i, j) 。对于任一 LEO 卫星 $n \in N$,拍摄图像和转动相机均需要消耗能量,在本文中,使用 $E_{(i,j)}^n$ 和 E_n^r 分别表示卫星 n 拍摄分片 (i, j) 所需的能量以及卫星 n 的星载相机单次旋转所需要的能耗。

3.3 问题表述

根据卫星执行 RoI 区域分片拍摄任务的调度分配流程,对本文问题进行了正式的描述。首先,为保证 LEO 卫星 n 仅遵循在上行或下降轨道中的一种运行模式,要求二元常量 β_{rise}^n 和 β_{dec}^n 满足以下约束条件:

$$\beta_{rise}^n + \beta_{dec}^n = 1, \forall n \in N \quad (1)$$

在观测任务分配决策中,由于每个 RoI 区域的分片可能存在有多颗卫星相机的观测区域覆盖分片,因此,本文引入二元决策变量 $x_{(i,j)}^n = \{0, 1\}$ 来表示分片 $(i, j) \in M$ 是否分配到卫星 n 上, $x_{(i,j)}^n = 1$ 表示 (i, j) 分配给了卫星 n 拍摄,反之则未分配。

此外,由于 LEO 卫星上,星载相机只能覆盖其运行轨道左右两侧的区域,且一次只能对一侧进行拍摄,因此该约束可以表示为:

$$\sum_{i \in I} x_{(i,j)}^n \leq 1, \forall j \in J, \beta_{rise}^n = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{(i,j)}^n \leq 1, \forall i \in I, \beta_{dec}^n = 1 \quad (3)$$

其中,式(2)表示上升轨道卫星的任务分配约束,式(3)表示下降轨道卫星的任务分配约束。

在 RoI 区域分片拍摄任务的分配问题中,为保证每个分片至少会有一颗卫星分配观测任务,应满足以下约束条件:

$$x_{(i,j)}^n \leq \alpha_{(i,j)}^n, \forall n \in N, (i, j) \in M \quad (4)$$

示例 1 仅考虑最小化卫星拍摄任务的拍摄能耗。尽管拍

同时,为了保证所有卫星的观测区域对 RoI 区域的完全覆盖,必须满足以下约束:

$$\sum_{n \in N} x_{(i,j)}^n = 1, \forall (i,j) \in M \quad (5)$$

星载相机所产生的总能量开销包括星载相机的旋转能耗以及星载相机的拍摄能耗,本文通过星载相机拍摄的分片坐标来计算相机旋转能耗,对于卫星 n ,其星载相机旋转产生的能耗可以表示为:

$$\gamma_n = (\beta_{\text{rise}}^n \sum_{(i,j) \in M} \sum_{(i',j') \in \text{suc}((i,j))} x_{(i,j)}^n x_{(i',j')}^n |i-i'| + \beta_{\text{dec}}^n \sum_{(i,j) \in M} \sum_{(i',j') \in \text{suc}((i,j))} x_{(i,j)}^n x_{(i',j')}^n |j-j'|) E_n^n \quad (6)$$

其中, E_n^n 表示 LEO 卫星 n 的星载相机单次旋转所需能量, $\text{suc}((i,j))$, $(i,j) \in M$ 表示卫星 n 在结束拍摄分片 (i,j) 之后,下一个观测任务的目标分片的坐标。

对于卫星 n ,其星载相机的总能耗可以表示为:

$$\theta_n = \sum_{(i,j) \in M} x_{(i,j)}^n E_{(i,j)}^n + \gamma_n \quad (7)$$

本文的目标是最小化 RoI 区域的分片观测任务的相机总能量消耗。结合上面讨论的约束,该分片拍摄任务调度问题可表述为二次整数规划问题 (Quadratic Integer Programming, QIP):

$$\min \sum_{n \in N} \theta_n \quad (8)$$

s. t. 式(2)–式(6)

通过对式(6)线性化,该 QIP 问题可转换为等价的整数线性规划 (Integer Linear Programming, ILP) 问题。

3.4 问题线性化

本文引入二元变量 $\bar{x}_{i,j,i',j'}^n$ 表示卫星 n 是否捕获了坐标信息为 (i,j) 和 (i',j') 的分片,即:

$$\bar{x}_{i,j,i',j'}^n = x_{(i,j)}^n x_{(i',j')}^n \quad (9)$$

为了确保 $\bar{x}_{i,j,i',j'}^n$ 取值的合理性,需满足以下线性约束:

$$\bar{x}_{i,j,i',j'}^n \leq x_{(i,j)}^n, \forall (i,j), (i',j') \in M, n \in N \quad (10)$$

$$\bar{x}_{i,j,i',j'}^n \leq x_{(i',j')}^n, \forall (i,j), (i',j') \in M, n \in N \quad (11)$$

$$\bar{x}_{i,j,i',j'}^n \geq x_{(i,j)}^n + x_{(i',j')}^n - 1, \forall (i,j), (i',j') \in M, n \in N \quad (12)$$

因此,式(6)线性化后可表示为:

$$\gamma_n = (\beta_{\text{rise}}^n \sum_{(i,j) \in M} \sum_{(i',j') \in \text{suc}((i,j))} \bar{x}_{i,j,i',j'}^n |i-i'| + \beta_{\text{dec}}^n \sum_{(i,j) \in M} \sum_{(i',j') \in \text{suc}((i,j))} \bar{x}_{i,j,i',j'}^n |j-j'|) E_n^n \quad (13)$$

同时,分片拍摄任务调度问题表述(见式(8)),可表示为 ILP 形式:

$$\min \sum_{n \in N} \theta_n \quad (14)$$

s. t. 式(2)–式(5),式(9)–式(13)

定理 1 RoI 区域分片的拍摄任务调度问题是 NP-hard^[17] 问题。

证明 该分片拍摄任务调度问题的 NP-hard 性质可以通过归约法得到证明。具体来说,可以将本文问题与经典的集合覆盖问题进行类比。在该问题中,目标是在保证对 RoI 区域全覆盖的前提下,最小化 RoI 区域的分片观测任务的星载相机能量消耗。通过将任务调度问题中的分片映射为集合覆盖问题中的元素,LEO 卫星映射为子集,用作 RoI 区域分片的观测任务,可以将每个分片的拍摄任务映射为一个元素的覆盖问题。其目标是在保证 RoI 区域覆盖的前提下,最小化

分片观测任务的星载相机能量消耗。由于集合覆盖问题已知为 NP-hard 问题,且分片拍摄任务调度问题能够在多项式时间内转换为等价的集合覆盖问题,因此分片拍摄任务调度问题是 NP-hard 的。

4 算法设计

为了解决上述分片拍摄任务调度问题的计算复杂性,本文提出了一种高能效的 RoI 分片拍摄任务分配 (Energy-efficiency RoI Slicing Capturing Task Scheduling, ERSCTS) 算法。此类算法多部署在地面控制站中,以充足算力支撑 ERSCTS 算法执行。该算法充分考虑每个 RoI 区域分片任务的分配可能,并将拍摄任务需求和任务分配规划一同上传至所有参与 RoI 拍摄任务的卫星。该算法流程如算法 1 所示。

算法 1 高能效的 RoI 分片拍摄任务分配 (ERSCTS) 算法

输入: $\alpha_{(i,j)}^n, \beta_{\text{rise}}^n, \beta_{\text{dec}}^n, E_{(i,j)}^n$

输出: $X_{(i,j)}^n$

1. rows, columns 分别表示地图的行数与列数

2. for $i=1$ to $\max(\text{rows}, \text{columns})$:

3. if $i \leq \text{columns}$:

4. for $j=1$ to columns :

5. if $x_{(j,i)}^n = 0, \forall n \in N$:

6. 计算 $\theta_n, \forall n \in N$ and $\alpha_{(j,i)}^n = 1$ and $\beta_{\text{rise}}^n = 1$

7. if θ_n 均已知, $\forall n \in N$ and $\alpha_{(j,i)}^n = 1$:

8. 选择 θ_n 最小的卫星 n , 令 $X_{(j,i)}^n = 1$,

9. if $\beta_{\text{dec}}^n = 1$:

10. $i=j$, 令 $x_{(i,j)}^n = 0$, 其中, $i|l > i$ or $j|l > i, \forall n \in N$

11. end if

12. end if

13. end if

14. end for

15. end if

16. if $i \leq \text{rows}$:

17. for $j=1$ to rows :

18. if $x_{(i,j)}^n = 0, \forall n \in N$:

19. 计算 $\theta_n, \forall n \in N$ and $\alpha_{(i,j)}^n = 1$ and $\beta_{\text{dec}}^n = 1$

20. if θ_n 均已知, $\forall n \in N$ and $\alpha_{(i,j)}^n = 1$:

21. 选择 θ_n 最小的卫星 n , 令 $X_{(i,j)}^n = 1$,

22. if $\beta_{\text{rise}}^n = 1$:

23. $i=j$, 令 $x_{(i,j)}^n = 0$, 其中, $i|l > i$ or $j|l > i, \forall n \in N$

24. end if

25. end if

26. end if

27. end for

28. end if

29. end for

在第 1 行,本文算法首先计算出整个 RoI 区域的行数与列数,随后,根据卫星运行轨道(上升轨道和下降轨道)以及星载相机拍摄可覆盖区域,对每个 RoI 区域分片,同时执行上升轨道卫星的逐行遍历和下降轨道卫星的逐列遍历的操作。在完成一行的扫描后,立即进行该列的扫描。通过这种遍历方式,最终为每个 RoI 分片拍摄任务选取能耗最低的 LEO 卫星。

在逐列遍历中,首先判断该 RoI 分片拍摄任务是否已经分配给了某颗 LEO 卫星(第 5 行),如果未分配,则接着计算上升轨道上 LEO 卫星拍摄该 RoI 分片的能耗(第 6 行)。此时,若不存在合适的下降轨道卫星可供选择,算法将直接选择能耗最低的卫星来执行任务;若存在其他选择,则暂时保留该任务,等待后续更优分配(第 7-8 行)。接着,如果将 RoI 分片拍摄任务分配给下降轨道卫星,则需回溯到下降轨道卫星拍摄该 RoI 分片时的位置,并撤销这一过程中 RoI 分片拍摄任务分配的结果(第 9-11 行)。

与此同时,在逐行遍历中,算法首先确认当前 RoI 分片的拍摄任务是否已被分配(第 18 行)。若未分配,则计算下降轨道上 LEO 卫星拍摄该分片的能耗(第 19 行)。若不存在更优的上升轨道卫星,算法将选择当前能耗最低的卫星执行任务;否则,任务将保持未分配状态,等待后续更优决策(第 20-21 行)。若任务分配给上升轨道卫星,算法将回溯至卫星拍摄该分片时的位置,并撤销这一过程中所有相关任务分配的结果(第 22-23 行)。

上述算法中,当所有卫星均运行于同一轨道类型,且各卫星的覆盖区域互不重叠时,每个 RoI 分片的拍摄任务有且仅有单颗卫星执行。该情况下,算法第 6 行和第 19 行的局部能耗最小化等同于全局最优选择,从而保证算法能够得到最优解。然而,对于实际的 RoI 分片拍摄任务而言,绝大多数卫星间存在拍摄区域重叠。当卫星的覆盖区域存在交集时,算法第 6 行和第 19 行的局部能耗最小化不再等同于全局最优选择。这是因为对于某颗 LEO 卫星而言,其在前期 RoI 分片拍摄任务中的最优分配方案可能会导致后续任务的能耗增加,从而影响整体最优性。因此,在此情况下,该算法获得的是近似解。

5 评估与分析

5.1 实验设置

本节基于 Starlink 数据集与现实香港地区地图构建了一个 LEO 卫星协作执行的 RoI 区域分片的观测任务场景,以验证 ERSCTS 算法在实际场景中的性能。该场景中使用了 20 个近地轨道的 Starlink 星座^[18],LEO 卫星均匀分布在运行轨道上,并且协同执行对于香港本岛不同 RoI 区域的观测任务,该 RoI 区域划分为 21 个分片。根据 Starlink 星座 LEO 卫星的星载相机性能参数^[18],本文规定相机能够在其轨道两侧的 $\pm 15^\circ$ 范围内旋转。其次,将本文 ERSCTS 算法与目前领域内先进算法进行比较,对比算法如下。

CPO^[7]:CPO 算法在确保对 RoI 区域全覆盖的前提下,最小化星载相机拍摄能耗。

REO:REO 算法在确保对 RoI 区域全覆盖的前提下,最小化星载相机旋转能耗。

为全面评估 ERSCTS 算法性能,本文从星载相机拍摄功耗、旋转功耗以及卫星数量 3 个不同要素进行对比实验分析。

5.2 相机拍摄功耗的调整对任务能量开销的影响

星载相机的拍摄功耗是影响任务能量开销的关键因素,而异构卫星的相机功耗各不相同,对观测任务总能耗产生复杂影响。因此,本实验选取两个 RoI 区域以及本岛全域作为

实验观测任务目标。然后,依据实验要求和 RoI 区域尺寸,从 Starlink 星座中选取了多组不同拍摄功耗的卫星,其平均功耗从 30J 逐渐提升至 80J,并设置所有相机的单次旋转功耗为 55J,测试不同任务分配算法的观测总能耗。该实验结果如图 3 所示。

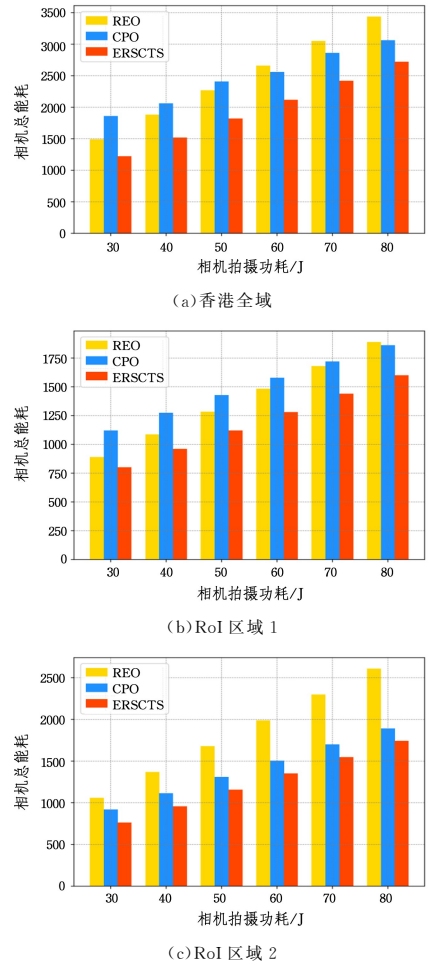


图 3 不同的星载相机拍摄功耗下的总能耗

Fig. 3 Total power consumption under different power consumption of onboard cameras

首先可以观察到,ERSCTS 算法权衡了星载相机执行任务的相机旋转能耗与相机拍摄能耗,面对不同相机拍摄功耗和多种 RoI 区域,ERSCTS 算法都获得了最低的拍摄任务总能耗,体现出本文算法的良好性能。

在图 3(a)中,ERSCTS 算法产生的相机总能耗相比 CPO 算法和 REO 算法分别平均降低了 22.7% 和 22.9%。可以看到,当相机功耗从 30J 提升到 50J 时,REO 算法略优于 CPO 算法,平均节约了 11.5% 的相机总能耗;然而当功耗从 60J 提升至 80J 时,REO 算法的平均能耗则落后 CPO 算法约 9.5%。这是因为随着星载相机拍摄功耗的提升,相机旋转的能耗在任务总功耗中的比重逐渐减少。

通过对比图 3(b)和图 3(c)可以发现,在不同 RoI 区域中,ERSCTS 算法的性能始终保持在较好水平,相比其他算法产生的总能耗最少。如图 3(b)所示,当相机拍摄功耗从 30J 提升至 70J 时,CPO 算法产生的总能耗均高于 REO 算法。这是卫星为了保证拍摄完全覆盖区域,致使相机发生了频繁

的旋转,因此 REO 算法更有优势。如图 3(c)所示,CPO 算法的能耗远低于 REO 算法。这是因为区域 2 的分片数量多且分布均匀,星载相机完成覆盖拍摄几乎不需要旋转,因此,CPO 算法相比 REO 算法更具优势。

5.3 相机旋转功耗的调整对任务能量开销的影响

除了星载相机的拍摄功耗,相机的旋转功耗也会对 RoI 区域分片的观测任务分配产生重要影响。相机旋转功耗会显著影响相机旋转能耗在相机总能耗中的占比,异构的卫星旋转功耗各不相同,为不同分配策略带来不同的能耗表现。本实验各星的初始轨道参数和坐标与之前实验保持一致,设置相机拍摄功耗固定为 60J,目标 RoI 区域与 5.2 节保持相同,并保证对 RoI 区域全覆盖的条件下执行观测任务。图 4 展示了该实验结果。

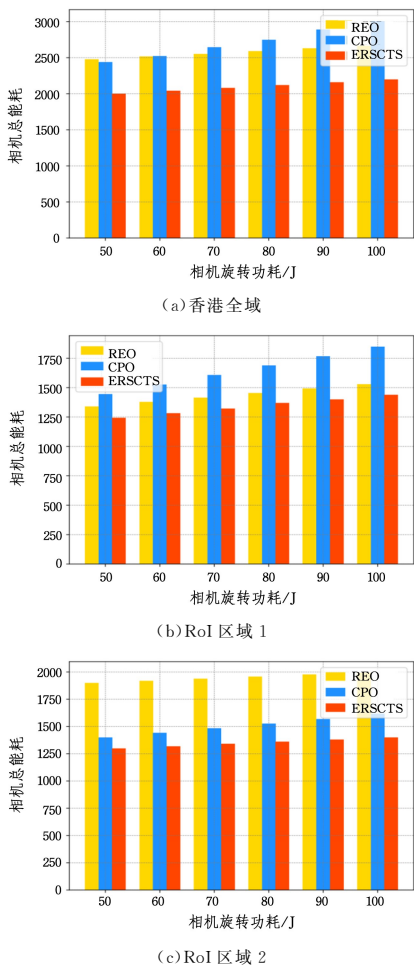


图 4 不同的星载相机旋转功耗下的总能耗

Fig. 4 Total power consumption under different rotation power consumption of onboard cameras

总的来看,ERSCTS 算法产生的相机能耗始终低于其他两种算法,并且其优势随着相机旋转功耗的增加而逐渐提升,当相机旋转功耗为 100J 时,相比 REO 算法和 CPO 算法,ERSCTS 算法可使能耗降低 25% 和 30%。

如图 4(a)所示,ERSCTS 算法在能耗上始终保持优势。随着相机旋转功耗增大到 60J,CPO 算法成为最耗能的算法,这是因为在 CPO 算法中,相机为了实现对 RoI 区域的全覆盖,进行了大量的相机旋转,产生了大量的旋转能耗,并伴随

旋转功耗提升愈加严重。在图 4(b)中,3 种算法的能耗增长趋势与图 4(a)类似,这是因为卫星为了拍摄全域,对 RoI 区域 1 与香港全域所进行的相机旋转次数相近。如图 4(c)所示,在 RoI 区域 2 的拍摄任务中,随着相机旋转功耗的不断上升,ERSCTS 算法在能耗方面的优化更加明显,相比 REO 算法和 CPO 算法,ERSCTS 算法可使能耗平均降低 45.5% 和 7.6%。其中,REO 算法所产生的相机总能耗始终是最高的,这是因为区域 2 的分片数量多且均匀,星载相机拍摄期间的旋转次数较少,降低了旋转功耗对总功耗的影响。

5.4 卫星数量对任务能量开销的影响

最后,LEO 卫星数量对 RoI 区域分片的观测任务能耗的影响同样重要。例如,对同一区域进行卫星观测任务,如果分配的卫星数量逐渐减少,为保证 RoI 区域的全覆盖,每颗卫星必须承担更多的拍摄任务,从而进行更频繁的相机旋转与拍摄。本实验将卫星的初始轨道参数和坐标保持一致,从 Starlink 星座中选取 8 个不同的 LEO 卫星作为拍摄卫星,并且星载相机的拍摄功耗与旋转功耗各不相同。拍摄任务区域与 5.2 节相同,不同区域由于分片数量不同,分配的卫星数量各不相同。图 5 展示了该实验结果,可以看出,在 3 个区域执行拍摄任务时,ERSCTS 算法始终在能耗上保持优势。相比 REO 算法和 CPO 算法,ERSCTS 算法可使能耗平均降低 25.7% 和 12.3%。

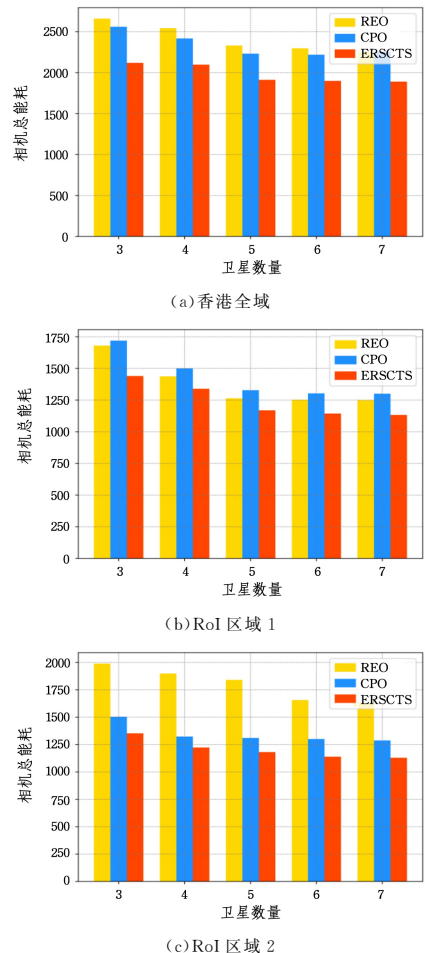


图 5 不同的卫星数量下的总能耗

Fig. 5 Total energy consumption under different numbers of satellites

如图 5(a)所示,ERSCTS 算法在能耗上大幅领先于其他两种算法。当卫星数量从 4 颗提升至 6 颗时,3 种算法产生的拍摄任务总能耗不断降低。但是,当卫星数量增加至 6 颗后,能耗下降的趋势趋于平缓,这是因为当前卫星已高能效地完成 RoI 区域分片任务,新增卫星对分配策略的影响有限。在图 5(b)中,CPO 算法所产生的总能耗比 ERSCTS 算法和 REO 算法平均高出 15.1% 和 5%,这是因为 CPO 算法侧重优化相机拍摄耗能,而忽视了相机旋转造成的能耗,所以总能耗升高。同理,REO 算法保证了较低的相机旋转耗能,但忽视了拍摄能耗,因此也造成了更高的总能耗。同样地,如图 5(c)所示,ERSCTS 算法通过权衡拍摄能耗与旋转能耗,将分片拍摄任务分配给耗能最小的 LEO 卫星,有效降低了任务的总能耗。REO 算法和 CPO 算法产生的相机总能耗相比 ERSCTS 算法平均高出了 32.6% 和 31.1%。

结束语 本文探讨了 LEO 卫星在 RoI 区域分片的拍摄任务中的调度优化问题。通过对星载相机的拍摄能耗和旋转能耗的相互权衡,最小化卫星观测任务的能耗。接着将该问题线性化并提出了 ERSCTS 算法,该算法在确保 RoI 区域完全覆盖的前提下,有效降低了星载相机的总能耗。通过全面的对比实验,证明了该算法有出色的能效表现,为 LEO 卫星在地球观测任务分配调度提供了高效的解决方案。

参考文献

- [1] HARRIS M. Tech giants race to build orbital internet [news] [J]. IEEE Spectrum, 2018, 55(6): 10-11.
- [2] SAJJA D, HAROO N, KUMAR P. Future challenges and perspective of remote sensing technology [M] // Applications and Challenges of Geospatial Technology. Cham: Springer, 2018: 275-277.
- [3] GIOFRE R, CABRIA L, LEBLANC R, et al. A gan-based solid state power amplifier for satellite communications [C] // 2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. IEEE, 2023: 591-594.
- [4] DENBY B, LUCIA B. Orbital edge computing: Nanosatellite constellations as a new class of computer system [C] // Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. 2020: 939-954.
- [5] FAN C, ZHANG Y. Key techniques for virtual imaging model construction and correction of rotating imaging satellite [C] // Advanced Optical Imaging Technologies VI. SPIE, 2023: 46-52.
- [6] SINHA S, SHARMA A, SHARMA S K, et al. A review on assessment of camera sensors and data acquisitions using satellite imaging for remote sensing [J]. International Journal of Space Science and Engineering, 2021, 6(3): 209-226.
- [7] LEYVA-MAYORGA I, GOST M M, MORETTI M, et al. Satellite edge computing for real-time and very-high resolution Earth observation [J]. arXiv: 2212. 12912, 2022.
- [8] STEPANOVA D, PRIYANICHNIKOV V, KHANDORIN S, et al. Developing a Highly Accurate Pointing System for Free [J]. Journal of Communications, 2019, 14: 1127-1133.
- [9] GOST M M, LEYVA-MAYORGA I, PEREZ-NEIRA A, et al.

Edge computing and communication for energy-efficient earth surveillance with leo satellites [C] // 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2022: 556-561.

- [10] GABREL V, MOULET A, MURAT C, et al. A new single model and derived algorithms for the satellite shot planning problem using graph theory concepts [J]. Annals of Operations Research, 1997, 69: 115-134.
- [11] DENG S, ZHAO H, XIANG Z, et al. Dependent function embedding for distributed serverless edge computing [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2021, 33(10): 2346-2357.
- [12] MORETTI M, LEYVA-MAYORGA I, MARTINZ-GOST M, et al. Satellite edge computing for real-time and very-high resolution earth observation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(10): 6180-6194.
- [13] WANG Y, SHENG M, ZHUANG W, et al. Multi-resource coordinate scheduling for earth observation in space information networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 268-279.
- [14] LYU M, PENG X, XIE W, et al. Task allocation for real-time earth observation service with leo satellites [C] // 2022 IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS). IEEE, 2022: 14-26.
- [15] MOSTERT S, KRIEGLER E. Implementing an image processing system for the next generation Earth observation sensors for the SUNSAT 2 micro-satellite programme [J]. Acta Astronautica, 2005, 56(1/2): 171-174.
- [16] JIANG W, ZHAN Y, XI S, et al. Compressive sensing-based 3-d rain field tomographic reconstruction using simulated satellite signals [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-13.
- [17] MOSHKOVITZ D. The projection games conjecture and the NP-hardness of $\ln n$ -approximating set-cover [C] // International Workshop on Approximation Algorithms for Combinatorial Optimization. Berlin: Springer, 2012.
- [18] FANG Q, ZHAI Z, YU S, et al. Olive branch learning: A topology-aware federated learning framework for space-air-ground integrated network [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(7): 4534-4551.



GAO Peize, born in 1999, postgraduate. His main research interest is satellite edge computing.



ZENG Deze, born in 1984, Ph.D, professor. His main research interests include edge computing and future networking technology.