PASEOS 模拟操作多个航天器的环境

Pablo Gómez[1,2], Johan Östman[2], Vinutha Magal Shreenath[2], 和 Gabriele Meoni[2,3]

[1]欧洲航天局欧洲空间研究与技术中心（ESTEC）先进概念团队，Keplerlaan 1, 2201 AZ Noordwijk，荷兰（电子邮箱：pablo.gomez@esa.int）[2]瑞典人工智能中心，Lindholmspiren 11, 417 56 Göteborg，瑞典（电子邮箱：johan.ostman@ai.se, vinutha@ai.se）[3]Φ-实验室，欧洲航天局地球观测中心（ESRIN），Via Galileo Galilei 1, Frascati (00044), RM，意大利（电子邮箱：gabriele.meoni@esa.int）

通讯作者：Pablo Gómez（电子邮箱：pablo.gomez@esa.int）。

Johan Östman 的工作由瑞典创新局通过资助项目 2020-04825 提供支持，Vinutha Magal Shreenath 的工作则由瑞典创新局通过资助项目 2021-03643 提供支持。

arXiv:2302.02659v1 [cs.DC] 6 Feb 2023

摘要 新一代航天器有望支持多种新应用，涉及星载处理、机器学习和去中心化运行场景。尽管其中许多应用此前已被提出并评估，但现实任务场景中的运行约束往往未被考虑，或仅得到粗略考虑。

本文介绍一种名为 PASEOS 的开源 Python 模块，可对涉及单个或多个航天器的运行场景进行建模。该模块考虑了多种物理现象，包括热、功率、带宽和通信约束，以及辐射对航天器的影响。PASEOS 既可以作为面向高性能的数值仿真运行，也可以在边缘硬件上直接以实时模式运行。我们通过三个场景展示了这些功能：一个是在 Unibap iX-10 100卫星处理器上进行实时仿真；另一个是仿真整个星座在数小时内执行任务；第三个是在去中心化环境中训练机器学习模型。虽然我们展示的是地球轨道中的任务，但 PASEOS 在设计理念上也支持深空场景。

我们的结果表明，PASEOS 能够高效地对所描述的场景进行建模，从而为运行方面的考量提供参考。我们通过运行时间和开销，以及对星座的建模温度、电池状态和通信窗口的考察，展示了这一点。通过在实际卫星处理器上运行 PASEOS，我们展示了如何将 PASEOS 直接集成到面向未来任务的硬件演示平台中。

总而言之，我们提供了首个能够全面建模航天器在地球轨道及更远区域所面临物理约束的解决方案。PASEOS 模块以开源形式在线提供，并附有详尽的文档，帮助研究人员快速将其纳入研究。

索引词 计算建模、分布式计算、边缘计算、星载机器学习、航天器运行、卫星星座

I. 引言

在 HE 过去二十年间，航天器，尤其是地球轨道及更远区域的卫星，在可用性、类型和用途方面发生了显著变化 [1], [2]。微型化使得人们能够运行尺寸仅为数厘米、质量仅数千克的卫星 [3]。与此同时，卫星发射成本大幅下降，为私营和公共参与者开辟了各种新的应用[4]。此外，随着星座的兴起

随着地球观测和计算可用性的提高，我们需要能够处理太空中此类分布式系统的规模、复杂性和协调等问题的工具。

许多预期中的未来应用都与数据处理和传输有关 [1], [5]。事实上，随着人工智能方法在几乎所有领域兴起，下一代卫星很可能会配备新型工具和硬件 [6]，以支持机器学习方法及其他技术创——

新 [7]，例如星间链路（ISL） [7]。为此，越来越多的研究正在探索适用于这一新范式的新型应用，涵盖从《遥感》中的机器学习应用[8], [9] 到低地球轨道（LEO）星座中的联邦学习 [10], [11]。然而，低地球轨道卫星的操作存在一些基本约束，例如与地面站的通信窗口较短（导致延迟较大、可用性较差）[12], ，以及温度、辐射和功率预算方面的限制 [13]。除了恶劣环境外，其他挑战还包括硬件复杂性增加以及缺少通信网络 [14]。低地球轨道以外也存在类似约束。因此，为了制定稳健且切合实际的场景规划，有必要在算法设计和太空应用演示中就妥善考虑这些因素。针对许多星载操作方面，已有专门的仿真工具，例如通信 [15], [16] 或轨道动力学 [17], ，但目前仍缺乏对整体环境的仿真。

本文介绍了一种名为 PASEOS 的开源软件工具，专用于对太空严酷环境所造成的各种约束进行逼真建模。PASEOS 采用模块化设计，与离散事件和基于时间的仿真中的现有代码均兼容。它支持多种场景，涵盖从单颗卫星建模到大规模星座建模。该工具既可以像经典数值仿真一样运行，以缩短求解时间，也可以基于时钟以实时模式运行，例如使用硬件运行所依据的系统时钟。PASEOS 以 Python 实现，并且完全不依赖任何机器学习框架，例如 PyTorch [18] 或TensorFlow [19]，甚至不依赖具体应用。在本文中，我们介绍 PASEOS 的系统设计及其内部的数学建模。此外，我们通过三个应用展示其能力。首先，我们使用实际的卫星硬件（Unibap iX-10 100卫星处理器），演示利用单颗卫星对星载火山喷发探测进行实时建模。其次，我们对一个受热、功率和通信约束限制的大型低地球轨道星座的运行行为和约束进行建模。在最后一个示例中，我们展示了一个完全去中心化的机器学习应用：利用 PASEOS 对两颗卫星进行建模，并使用异构数据。

PASEOS 源代码是开源的，可在线获取。[1]我们希望通过让 PASEOS 具备模块化、易用且高效的特点，激发并推动广泛多样的后续研究。因此，本研究的贡献如下：

- 创建开源 Python 框架 PASEOS，用于模拟太空环境中各种约束的影响
- 展示该框架可用于多种场景，包括在实际卫星硬件上执行操作以进行实时实现、对星座进行建模，以及研究分布式机器学习方法
- 详细分析了在研究使用 Unibap iX-10 100 处理器探测火山喷发的场景中，PASEOS 模型的运行时间开销
- 展示了运行约束如何通过功率预算和通信窗口直接影响机器学习方法

II. 方法

本节介绍 PASEOS 中实现的物理模型以及部分设计考量。下文中，任何在 PASEOS 中建模的设备、航天器或类似对象，均称为参与者。

A. 航天器约束建模

操作航天器面临的挑战，与在地球[12], [20], [21]上操作任何类型的车辆或资产截然不同。下面，我们简要介绍 PASEOS 所考虑的约束及其建模方式。总体而言，PASEOS 力求在计算复杂度与物理保真度之间取得平衡，使其能够与其他操作（例如训练神经网络）并行运行，同时仍能考虑不同硬件设备（包括嵌入式系统）上的各种约束。

PASEOS 既能对热管理、通信链路可用性等物理约束建模，也能对任务中分配给各用户的时间片等运行约束建模。图 1 展示了所建模约束的概况。本节将大多数约束结合地球轨道进行说明。不过，这些约束也适用于其他情境，例如围绕其他天体运行的轨道或深空任务。

1) 天体动力学建模

以下许多约束取决于航天器及相关天体（例如太阳或航天器可能绕行的天体）的精确星历，即位置和速度。在 PASEOS 中，我们假设每个参与者都有一个与其引力束缚的中心天体，例如地球或太阳。在当前的 0.1.2 版本中，PASEOS 使用 pykep [22]对中心天体周围的开普勒轨道进行建模。我们使用 JPL低精度星历[2] 对地球和太阳的位置进行建模。尽管本文着重研究简单的开普勒轨道，但也可以采用更复杂的动力学模型

[1]https://github.com/aidotse/PASEOS

[2]https://esa.github.io/pykep/documentation/planets.html#pykep.planet.jpl_lp 访问日期：2023年1月31日

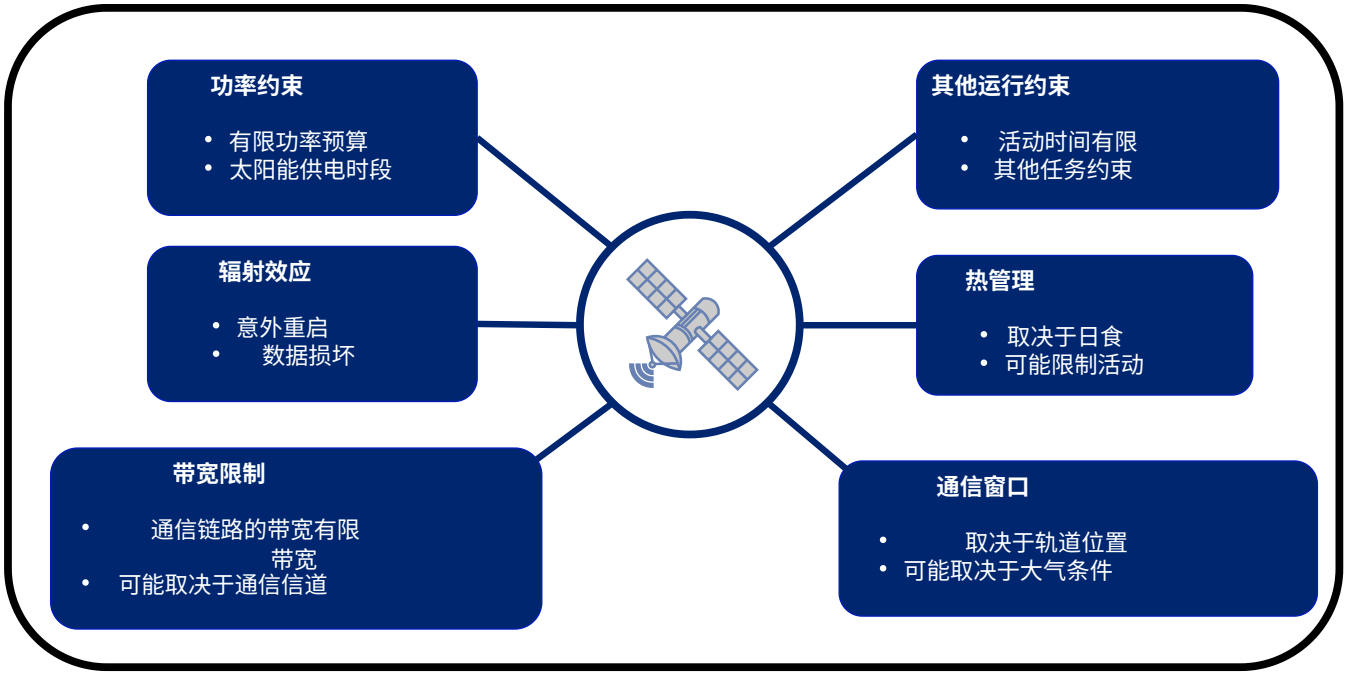


图 1. PASEOS 中建模的约束概述

从 SGP4 [23] 等传播器，到借助 orekit [17]进行高保真度建模。PASEOS 中的所有位置和速度均在中心天体的惯性参考系中建模。

2）通信窗口

航天器运行中的一项核心约束，尤其是在低地球轨道（LEO）中，是通信窗口。在这些窗口期间，航天器能够与地球上的地面站或其他航天器通信。实际上，这些窗口可能取决于多种因素，例如通信信道类型（如光通信、无线电通信）、环境因素（如大气条件）以及其他因素 [24]。

在 PASEOS 中，我们认为通信受可见性限制。为简化计算并提高效率，0.1.2 版本仅将这一约束用于航天器之间的通信。因此，系统会计算包围中心天体的球体是否会遮挡参与者之间的视线。对于航天器与地面站之间地面链路的可用性，我们使用 Skyfield Python 模块 [25] 计算航天器高于地平线的角度。此外，Skyfield 还用于考虑地球自转导致的地面站移动。目前尚不支持位于其他天体上的地面站。因此，基于这些假设，PASEOS 可用于计算参与者之间通信窗口的可用性和持续时间。

3）数据传输速率与通信信道

除了通信链路的可用性外，影响数据传输的第二个因素与通信信道的影响有关，这些影响会作用于用户可用的有效数据传输速率，并影响所传输数据的质量。尤其是，绕地球轨道运行的卫星与地面之间的光链路高度依赖大气条件[24]，[26]。类似地，日冕物质抛射或太阳耀斑等空间天气事件也可能影响向地球的传输 [27]。这些影响可能导致通信出错，进而需要重新传输数据包或增加数据冗余，从而影响用户可用的有效下行数据速率。此外，所采用的传输调制、信道编码策略以及是否需要导频同步等因素，也会显著影响用户的有效数据传输速率 [28]。

然而，对这些因素进行高保真度建模可能极其复杂，需要使用 ns-3 或 OMNeT++ [15]，[16] 等专用仿真软件。从长远来看，PASEOS 可能会为这些软件包提供接口。不过目前，用户需要手动指定平均数据传输速率，以便计算所需的传输时间。该速率被视为恒定值，在 PASEOS 中也独立于参与者之间的距离和通信链路。

4）功率预算

另一个与各种太空任务相关的约束是可用的功率预算和电力系统[12], [29]。

在靠近太阳和内行星的区域，航天器通常依靠太阳能和电池。在更远的区域，航天器则依靠放射性同位素热电发电机 [30]。火星车等地面资产通常也依靠这两种方式之一。

我们假设航天器配备容量固定的电池。为简化起见，我们将 PASEOS 中的太阳能发电建模为：当航天器未处于相对于太阳被中心天体遮挡的日食区时，电池的荷电状态（SoC）以恒定速率增加。对于地面主体，目前暂不考虑功率预算，因为我们主要关注以地球为基础的地面段。不过，如果对火星车操作等进行建模，地面资产的功率预算也可以采用与航天器类似的方式进行建模。

荷电状态（SoC）会因航天器活动而降低。在 PASEOS 的语境中，这些活动是用户定义的操作，会在操作期间以恒定速率消耗电量。

5）热管理

航天器能够执行的活动还受到另一项关键约束：航天器温度的管理，包括低温和高温。航天器硬件通常具有有限的工作温度范围和生存范围[13]。因此，在航天器执行任何操作时，都必须遵守这些约束。由于周围环境近真空，散热通常是一个主要问题。然而，低温也可能造成问题，尤其是在航天器处于中心天体的日食区或深空中时。因此，有必要依靠热模型来预测并防止违反这些约束。

在 PASEOS 中，我们采用了与 Martínez [31]所述方法类似的公式。我们将航天器温度T的变化建模为

$$\mathrm{mc}\frac{\Delta \mathrm{T}}{\Delta \mathrm{t}} = \delta_{\mathrm{a}}\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{solar}} + \delta_{\mathrm{a}}\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{albedo}} + \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{IR}} + \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{activity}} - \dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{diss}} \tag{1}$$

其中，m 为航天器质量，c 为其热容；$\delta_{\mathrm{a}} = 1$ 表示航天器处于日食区，否则为 0；$\dot{}$中的 Q 为热通量。具体而言，各项热通量表示为

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{solar}} = \alpha_{\mathrm{a}}\,\mathrm{E_s}\,\mathrm{A_{a,Sun}} \tag{2}$$

$\dot{}$其中，$\mathrm{Q_{solar}}$ 为太阳产生的辐射通量，$\alpha_{\mathrm{s}} \in [0,1]$ 为航天器的太阳吸收率，$\mathrm{A_{s,\ Sun}}$ 为朝向太阳的面积，$\mathrm{E_s}$ 为太阳辐照度。

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{albedo}} = 0.5\,\alpha_{\mathrm{a}}\,\rho_{\mathrm{b}}\,\mathrm{E_s}\,\mathrm{A_{a,albedo}} \tag{3}$$

$\dot{}$其中，$\mathrm{Q_{albedo}}$ 为地球反向散射产生的太阳热通量，$\mathrm{A_{a,\ albedo}}$ 为朝向反照率的面积，ρ_{b} 为中心天体的反射率。0.5这一系数源于简化处理：为了降低计算成本，我们目前不计算太阳、中心天体与航天器之间的夹角。

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{IR}} = \frac{\mathrm{r_b^2}\,\epsilon_{\mathrm{a}}\,\epsilon_{\mathrm{b}}\,\sigma\,\mathrm{T_b^4}\,\mathrm{A_{a,b}}}{\bar{\mathrm{r}}_{\mathrm{a}}^2} \tag{4}$$

$\dot{}$其中，$\mathrm{Q_{IR}}$ 是地球黑体辐射产生的辐射通量，$\mathrm{A_{a,\ b}}$ 是面向中心天体的航天器面积，$\bar{\mathrm{r}}_{\mathrm{a}}$ 是航天器到中心天体中心的距离，$\epsilon_{\mathrm{a}} \in [0,1]$ 是航天器的红外发射率（即吸收率），σ 是玻尔兹曼常数，而 $\mathrm{r_b}$、ϵ_{b} 和 $\mathrm{T_b}$ 分别是中心天体的半径、红外发射率和温度。此外，

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{activity}} = \kappa \mathrm{P_A} \tag{5}$$

$\dot{}$其中，$\mathrm{Q^{activity}}$ 是来自航天器硬件的热通量，$\mathrm{P_A}$ 是活动 A 的功耗率，κ 是用户定义的参数，用于描述转化为热量的速率。最后，

$$\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{diss}} = \epsilon_{\mathrm{b}}\,\mathrm{A_b}\,\sigma \mathrm{T}^4 \tag{6}$$

$\dot{}$其中，$\mathrm{Q_{diss}}$ 是航天器散发的热量。虽然 PASEOS 不强制要求考虑航天器温度（但不允许温度低于 0K），却允许用户查询当前温度并据此制定中止条件。

6) 辐射效应

另一个需要考虑的约束和物理因素是辐射的影响，尤其是在低地球轨道之外；在低地球轨道内，航天器仍受到地球磁场的相当程度保护 [32], [33]。实际上，这些事件可能导致数据损坏、软件故障或永久性硬件损坏 [6]。在 PASEOS 中，我们对单粒子效应（单粒子效应）[12]对操作造成的三种不同影响进行建模：

- 由单粒子翻转导致的数据损坏，其发生概率为一定值。为此，PASEOS 对比特翻转进行建模，其发生符合发生率为$\mathrm{r_d}$的泊松分布
- 意外的软件故障会导致活动随机中断，其发生符合发生率为 $\mathrm{r_i}$ 的泊松分布
- 设备故障遵循发生率为 $\mathrm{r_f}$ 的泊松分布，主要可归因于单粒子闩锁

鉴于这些速率取决于航天器特定的硬件和轨道，其定义由用户自行决定。

7）运行约束

最后，除了物理和太空环境施加的约束外，任务通常还有许多目标，而任何航天器 [34] 都涉及多个利益相关者。因此，任务概要通常会带来需要考虑的运行约束。PASEOS 允许用户定义基于任意参数的约束，并在活动期间对这些参数进行评估；如果不满足约束，就会中断活动。这样，用户便有了广泛的选择：既可以施加严格的硬件限制，例如要求荷电状态达到最低值或温度处于特定范围内，也可以设置时间限制或考虑 PASEOS 仿真之外的因素。

B. 软件设计

在接下来的章节中，我们将简要阐述 PASEOS 在用户交互和模型验证方面的设计理念。尽管本文已给出具体的应用结果，但 PASEOS 旨在支持多种未来应用，因此灵活且通用的设计至关重要。

1）主体

为了抽象地表示地面和太空中可用的各种资产，我们在 PASEOS 中将其模拟为所谓的参与者。我们主要区分地面主体和航天器主体。在当前版本中，前者的主要功能是对中心天体自转导致的位置变化进行建模。对于航天器主体，可以启用多种模型，以描述第 II-A 节所述的所有物理和运行方面。最初，只需定义参与者的类型、名称及其当前当地时间。根据所需的模型，还需指定其他参数，例如轨道的位置和速度。

2) 活动

活动是 PASEOS 中第二个核心抽象，用于描述用户希望建模的任何类型的操作。例如，我们可能希望让航天器参与者使用其中一个传感器采集数据并处理这些数据。PASEOS 允许指定一个（异步）函数，在后台执行，同时由 PASEOS 对物理约束进行建模。此外，还可以使用约束函数，在固定的时间步长下反复对其进行评估，从而中断某项活动。对于每项活动，都必须指定功耗，以便 PASEOS 对余热和电池荷电状态的变化进行建模。

用户可以让 PASEOS 异步运行操作，以模拟更新；也可以先运行操作，再推进 PASEOS 的仿真时间。

3) 离散事件与基于时间

PASEOS 面临的另一个挑战是，面向网络的仿真（例如 ns-3 [16] ）通常侧重于提供离散事件仿真，使用户能够直接跳转到下一个事件。然而，物理仿真中的常微分方程建模（例如公式 1 中的方程）通常采用离散时间步进方案，以基于时间的方式求解 [35]。在 PASEOS 中，这两种仿真范式交汇于此，因为 PASEOS 同时涵盖并处理这两类仿真。PASEOS 处于二者的交汇点：它既对物理过程进行数值仿真，也对通信窗口开放等离散事件进行建模。用户可以选择让 PASEOS 完全实时运行，此时它会在执行用户定义的活动时异步运行物理模型。或者，用户也可以手动要求 PASEOS 将仿真状态推进到指定时间；推进过程中可能会被用户感兴趣的事件打断。

4) 使用 PASEOS

介绍相关术语后，我们可以描述 PASEOS 的主要工作流程。图2概述了 PASEOS 的高级用法。其基本流程包含两个定义步骤：首先对参与者进行建模，然后定义已建模的操作。随后，可以通过离散事件或基于时间的方式反复执行操作。在仿真的任何时刻，用户都可以查看关于参与者状态和活动的详细输出日志（写入 *.csv 文件），和/或查看可视化内容。

5) 验证

鉴于 PASEOS 中包含大量物理模型，且异步运行的活动会产生复杂交互，对软件进行全面验证既至关重要，也颇具挑战。我们依靠一套全面的自动化测试来验证已实现模型的持续正确性。在许多情况下，测试基于现实场景，例如 Sentinel-2 的通信窗口。许多独立组件的设计采用了测试驱动开发；任何贡献在经过代码审查、配备适当测试并通过自动化测试之前，都不会被合并。模块化设计方法使得能够对各个组件进行测试，例如热模型或通信链路。此外，PASEOS 作为开源软件在线提供，任何人都可以提交反馈和报告错误。

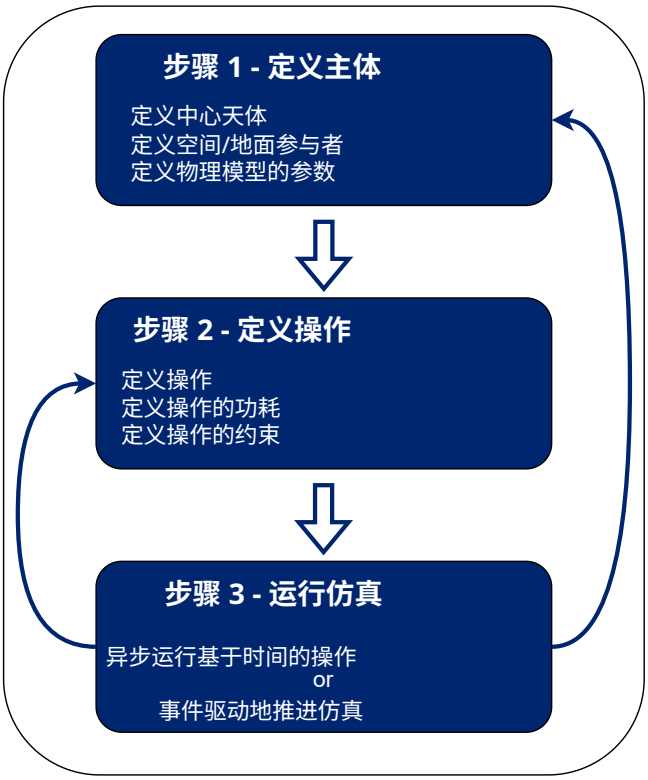


图2. 使用 PASEOS 的工作流程概览

C. 多个航天器之间异步操作的建模

PASEOS框架可用于模拟涉及多个参与者的操作，其中每个经过物理建模的参与者都包含一个 PASEOS 实例。请注意，这种设置要求视角从图 2 中单个关注主体转变为系统级视角，即对每个参与者进行建模。PASEOS 并不旨在支持协调、活动调度或建模应用特有的其他任务，而是旨在为用户提供模拟不同场景的能力，例如对其他参与者的间歇性了解，以及集中式（如联邦学习）和去中心化（如去中心化学习）操作。假设每个参与者独立运行，且有关其他参与者的任何信息都应在操作过程中获取。操作既可以独立执行，由用户负责手动推进 PASEOS 仿真的时间；也可以通过基于事件的活动以异步方式运行。

灵活性是 PASEOS 的重要设计目标，用户可以通过注册活动（见第 II-B2 节），为 PASEOS 实例配置任意能力。活动由待执行的操作、功耗以及必须满足的约束组成，以便执行该活动。活动的操作和约束函数都是协程，即异步函数，并依赖于 Python asyncio模块 [36]。执行活动时，其操作和约束函数会提交到事件循环中运行。与此同时，PASEOS 会监控并更新参与者的内部状态（例如温度和荷电状态），并推进时间。请注意，PASEOS 仅允许同时执行一个活动。然而，由于活动内部可以执行任意代码，用户仍可在一个活动中执行不同任务，例如根据参与者的状态执行任务。

为了仿真多个航天器，参与者之间的交互能力至关重要。在 PASEOS 中，通信通过将传输和接收封装为活动来实现。此类活动应设计为符合相应参与者的通信设备要求，参见第 II-A3 节，以便正确计算通信窗口。对于在单台机器上的仿真，只需在相应活动中加入延迟（和功耗），即可模拟通信。

若要在边缘设备（例如航天器硬件）上直接使用 PASEOS，可基于 gRPC 和 ZeroMQ 等软件包实现通信活动，从而支持通过网络交互。在边缘设备上工作时，参与者之间的时间同步对于正确操作至关重要。由于 PASEOS 中的参与者独立运行，因此必须主动让其他参与者知晓自身，例如按指定间隔发送心跳信号，其中包含参与者的 ID，以及可选的元数据（如位置和速度）。参与者也可能因荷电状态过低、无法建立视距连接或设备故障而不可用。收不到心跳信号意味着该参与者不可用，其他参与者可据此作出相应响应。PASEOS 不会自动发送心跳信号或检查这些因素，但提供应用程序接口，以便将参与者序列化以进行网络传输，并允许用户告知每个参与者其已知且可用的对等参与者。因此，可以施加任意简单或复杂的连接约束。

如果希望以同步的方式执行特定操作，就有必要通过例如为某项活动提供开始时间来实现参与者的时间同步。或者，也可以通过通信 [37]实现时间同步。例如，可以采用网络时间协议 [38]，该协议依赖于主时钟；也可以采用依赖于例如心跳信号 [39]的去中心化方法。

III. 结果

本节将演示 PASEOS 在三种不同建模场景中的用法：地球观测、星座设计和去中心化机器学习。其目的是展示借助

PASEOS。

A. 单个参与者：*Sentinel-2*上的星载火山探测

本实验展示了如何使用 PASEOS 进行实时仿真，以模拟实际太空硬件上的卫星星载处理场景。

1）设置

我们设计了一项实验，注册一项活动来处理卫星载荷数据，并使用约束函数检查是否有可用链路将数据传输到地面。在仿真过程中，我们在 Unibap iX-10 100卫星处理器 [6]上分析了代码，以评估 PASEOS 的开销，即更新物理模型所需的时间与检查约束和运行用户活动所需的时间之比。具体而言，我们考虑将火山喷发星载检测应用于哨兵-2号 L1-C：获取的数据直接在卫星上处理，以发现可能发生的火山喷发，并向地面发送早期预警 [40], [41]。

为了设置航天器主体的轨道，我们使用了哨兵-2B 号卫星在 2022年-10-27T12:30:00Z 的星历，该星历根据双行根数计算得出。因此，我们的参与者轨道为太阳同步轨道。为了设置地面站参与者的位置，我们使用了欧洲航天局位于大加那利岛马斯帕洛马斯的地面站（纬度 27.7629°，经度 -15.6338°，海拔 205.1 米）。当卫星位于地平线以上 5° 时，地面站链路可用。为了检查是否能够通信，我们使用了一个约束函数：当卫星与地面站之间处于视线（LOS）范围内时，该函数会中断用户活动（即火山喷发检测）。

为了确保有足够的能量在设备上处理数据，该参与者配备了一块 0.162 MJ 的电池，仿真开始时的荷电状态为 1.0。我们假设充电速率为 10 W。此外，为了增加 PASEOS 中物理模型更新带来的计算成本，并在最坏情况下测试系统，我们还为太空参与者配备了热模型和辐射模型，以测量它们对运行时间的影响。具体而言，为避免辐射影响，同时跟踪计算成本，我们将数据损坏率、重启率和设备故障率设为 0——这不会影响计算成本。

仿真数据由三份后处理产品组成，展示了埃特纳火山（2021-08-30）、拉帕尔马岛（2021-09-30）和马荣火山（2018-02-09）的火山喷发，由 Meoni等人 [42] 提供。每幅图像都是通过裁切和镶嵌多个影像瓦片中对应区域的 20 米波段 B8A（近红外）以及 B11 和 B12（短波红外）生成的；该区域与相应哨兵-2号 L0粒块的 B8A 波段区域一致 [43]。我们通过反复评估这些图像，人为延长了仿真时间，直至仿真中的图像总数达到 100 幅。此外，我们假设所有数据都已采集完毕并可供处理，以排除现实中可能出现的硬件相关延迟，因为我们此处着重于 PASEOS 性能分析。

我们使用 Python 模块 yappi [44]进行了代码性能分析。具体而言，我们测量了 iX-10 100 设备上的中央处理器（CPU）时间，测试了三个不同的 PASEOS 时间步长值（0.25 s、0.5 s、1 s）；PASEOS 时间步长即更新 PASEOS 及其物理模型并检查用户约束的时间间隔。每种 PASEOS 时间步长设置均运行三次。每次运行中，我们测量了用户活动所用的 CPU 时间、检查用户约束所用的时间（即检查与地面站之间的视线（LOS））、更新 PASEOS 整体所用的时间，以及更新辐射模型、热模型和电池充电模型分别所用的时间。每个测试用例的结果均取三次运行的平均值。所有测试均按顺序进行，并先以 1 s 的 PASEOS 时间步长运行两次预热。

2) 星载火山喷发探测

该探测基于对 [45],中提出的 [42],算法的简化实现，可生成一个包围检测到的火山喷发的边界框及其对应的地理坐标。由于这项活动旨在提供早期警报，以便及时通知并定位检测到的火山喷发，因此可能发送的警报消息会提供边界框中心点或左上角/右下角点的坐标。图 3 展示了拉帕尔马岛上检测到的一次火山喷发。

3) 性能分析结果

表 1 展示了在 iX-10 100 设备上运行仿真的结果。在每次测试中，活动在消耗约 29 秒中央处理器时间后中断，因为卫星被发现处于与地面站的视线范围内。事实上，无论 PASEOS 时间步长取何值，执行用户活动所需的时间都大致相同，而更新 PASEOS 状态和检查用户约束所需的时间则几乎呈线性增长。然而，即使在最小的 PASEOS 时间步长下，后两者所需时间也分别仅为 0.43 秒和 0.29 秒，相比之下，用户活动耗时 28.64 秒。总体而言，PASEOS 约占总运行时间的 1.45%。这表明 PASEOS 是一种轻量级解决方案，适用于嵌入式硬件上的星载处理应用场景。

如表 1 所示，对电池充电进行建模所需的时间与更新热模型所需的时间相同。这是因为更新功率模型和热模型都需要检查航天器主体是否处于日食中。对于这两个模型，该操作只执行一次，其运行时间

表 1。在 Unibap iX-10 100 设备上针对不同 PASEOS 时间步长的性能分析结果。每列报告用户定义活动、更新 PASEOS 的物理模型及其各自所耗时间的中央处理器时间（单位：秒）。括号中报告相对于总时间的百分比。最后一列给出检查视线所花费的时间。

均以 [秒](%) 计		PASEOS 时间步长		
Type		0.25	0.5	1.0
User-defined	User 活动	28.64 (97.47)	28.59 (98.66)	28.52 (99.27)
	LOS 约束	0.29 (0.98)	0.14 (0.50)	0.072 (0.25)
PASEOS State Update	SoC	0.11 (0.39)	0.062 (0.21)	0.034 (0.12)
	辐射	0.0086 (0.029)	0.0044 (0.015)	0.0024 (0.008)
	热	0.11 (0.39	0.062 (0.21)	0.034 (0.12)
	其他	0.19 (0.65)	0.10 (0.34)	0.056 (0.19)
	小计	0.43 (1.45)	0.23 (0.79)	0.13 (0.44)
总计		29.39	28.98	28.74

平均分配给热模型和功率模型。更新电池荷电状态和热模型的所有其他操作所需的时间可以忽略不计。

B. 多个主体：星座的通信建模

本测试案例展示了 PASEOS 对管理星座的运行约束进行建模的能力。文中给出了星座状态随时间变化的详细结果，并进行了简单的扩展性研究，以探究 PASEOS 的扩展能力。

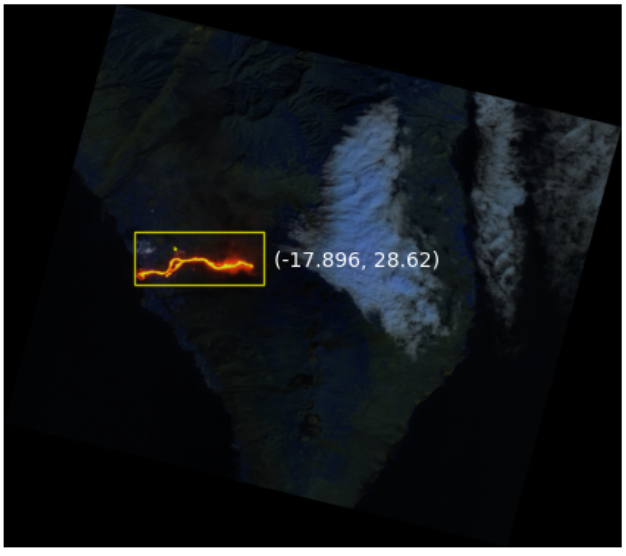


图 3. 2021-09-30在拉帕尔马岛（西班牙）检测到的火山喷发。所显示的坐标（经度、纬度）对应检测到的边界框中心。

以展示对大型星座进行建模的潜力。

1）设置

本文研究的场景为一个低地球轨道星座，由十六颗航天器组成，按 Walker星座构型 [46]分布在四个轨道面上，轨道高度为 550 km，倾角为 10°。星座的操作建模时长为八小时，相当于略多于五圈轨道运行。假设各卫星装备相同，均配有一块初始荷电状态（SoC）在 0.1 至 1.0 之间均匀随机取值的 1 MJ 电池。每颗卫星都配备以 50 W 功率充电的太阳能电池板。假设卫星质量为 50 kg，初始温度为 273.15 K，且对太阳光和红外光的吸收率均为 1.0。假设朝向太阳和地球的面积各为 2 m2，辐射面积为 4 m2。热容假设为 1000 $Jkg^{-1}K^{-1}$。我们假设卫星操作所消耗功率的一半转化为热量。地球温度假设为 288 K，红外发射率为 0.6，太阳反射率为 0.3。太阳辐照度估计为 1360 W。

卫星有两种运行模式：一种是称为待机的待机模式，在此模式下功耗仅为 2 W；另一种称为处理，功耗为 100 W。如果卫星电池的荷电状态低于 0.2，或温度高于 330 K，卫星就会自动切换到待机模式。

除星座外，我们还监测一颗名为 GeoSat、运行于地球同步轨道的卫星以及欧洲航天局位于大加那利岛马斯帕洛马斯的地面站的通信链路可用性。与单颗卫星场景一样，当卫星位于地平线以上 5° 时，地面站链路可用。马斯帕洛马斯地面站可以与这颗地球同步卫星通信。

在 PASEOS 中，我们对热模型和功率模型采用 1 s 的时间步长。卫星每隔 600 s 判断一次是否满足处理条件。如果在这 600 s 的时间间隔内违反了处理约束，它们就会在该时间间隔的剩余时间内切换到待机模式。

2）星座分析

我们从多个操作因素对该星座进行分析。首先是处理所用的时间。如图4所示，任意时刻约有一半卫星正在处理，而电池荷电状态和温度都会限制操作时段。由于该星座处于圆形低地球轨道，卫星有很长时间处于日食中，任意时刻处于日食中的星座成员占比为25%至50%。这也会影响卫星的操作温度——如图6所示——当大量卫星开始处理时，温度在初期会迅速升高；尤其在日食期间，温度会下降。

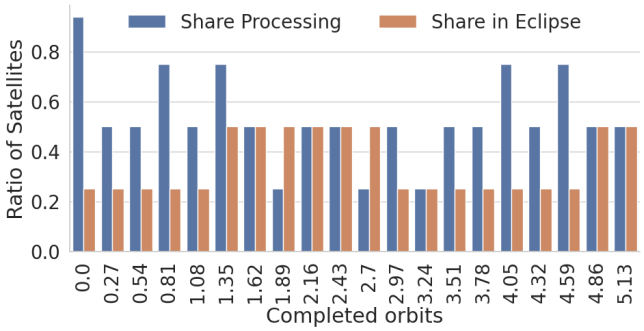


图4. 能够处理任务的卫星及处于日食中的卫星随时间变化的概况。

尽管目前 PASEOS 的荷电状态模型较为简单，但图5中可以观察到功率预算的复杂动力学。星座中的卫星荷电状态在0.2至1.0之间波动。待机活动的待机功耗较低，因此它们始终不会面临荷电状态降至临界水平的风险。总体而言，约经过一个轨道周期后，星座在卫星执行处理方面的行为，以及星座的温度和荷电状态，都会趋于稳定并呈现周期性变化。

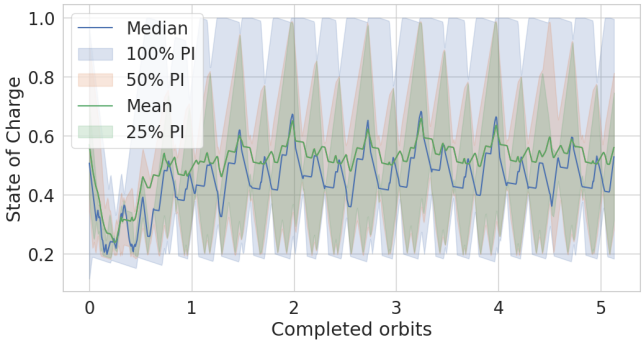


图5. 星座的电池荷电状态。不同颜色表示中位数附近的百分比区间。

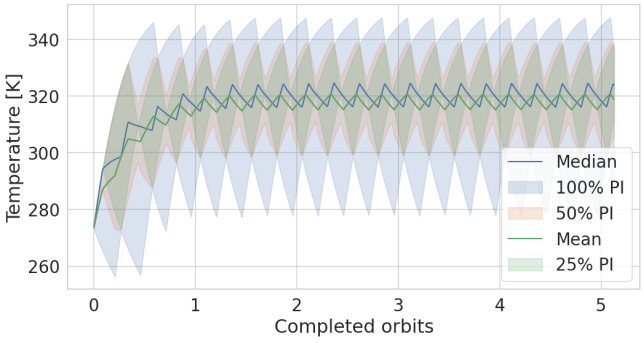


图6. 星座的温度。不同颜色表示中位数附近的百分比区间。

就通信状态而言，星座中有 50% 至 75% 的卫星与地面站或地球同步轨道上的卫星均不在视线范围内，如图 7 所示。由于马斯帕洛马斯可以与地球同步卫星建立通信，因此当地面站与星座卫星处于视线范围内时，地球同步卫星也处于该卫星的视线范围内。

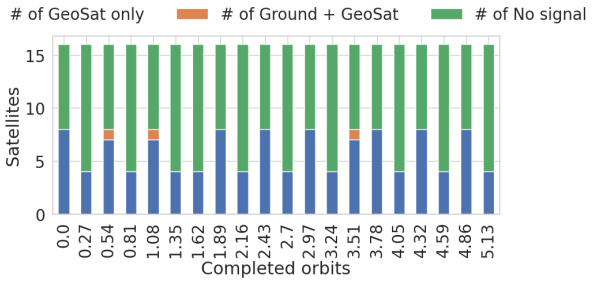


图7. 卫星通信状态随时间变化的概况。

3) 性能与扩展性

在单线程的 AMD Ryzen-5 消费级中央处理器上运行此场景大约需要 200 秒。时间几乎全部耗费在物理模型和视线检查上。对于 16 颗卫星，仿真时长为 600 秒的仿真需要 8.3 秒，即每颗卫星 0.52 秒。我们通过增加每个轨道面中的卫星数量，研究了扩展性。对于规模为 32 的星座，完成 600 秒的仿真需要 16.4 秒，即每颗卫星 0.51 秒。优于线性的扩展性可能是由于启动仿真时存在固定的初始化开销。对于 512 颗卫星，完成 600 秒的仿真需要 255.9 秒的计算时间，即每颗卫星 0.50 秒。因此，很明显，PASEOS 即使面对大量卫星也具有良好的扩展性。鉴于 PASEOS 完全异步的特性，这些仿真的并行化同样十分简单，无需担心类似的共享内存问题。

C. 轨道上的星载机器学习

这项测试展示了如何使用 PASEOS 对约束进行建模和监控，以便在去中心化环境中解决机器学习任务。测试在通信窗口有限、数据异构且存在功率约束的条件下，成功完成了一项分类任务。

1) 设置

本示例中的操作场景由两颗卫星组成，它们位于高度为 550 km 、倾角为 98.62° 的圆形低地球轨道上。它们朝相反方向运动，因此每个轨道周期内彼此之间只有两次短暂的通信窗口。两颗卫星均配备一块容量为 0.1 MJ 的电池，初始荷电状态在 0.6 至 0.8 之间随机选取。它们配备了太阳能电池板，在不处于日食期间时以 50 W 的功率为电池充电。它们还配备了星间链路，使其能够以每秒 1 Mbit 的速率相互传输数据。

当彼此处于视线范围内时，它们可以相互传输数据。假设这些卫星在前十个轨道周期内不进行通信。

这些卫星的任务是利用各自独有的数据，共同学习一个用于识别内圆和外圆的二元分类任务。所使用的数据集及其在卫星之间的分布如图8所示。值得注意的是，数据分布具有异质性：两颗卫星分别只能访问第一维数值大于 0.5 和小于 -0.5 的数据点。两颗卫星使用相同的测试数据集，且该数据集覆盖完整的特征空间。训练共使用 4166 个训练样本，测试数据集包含 3300 个样本。使用一个含 10 个神经元的两层全连接神经网络，并采用学习率为 0.1 的随机梯度下降法和二元交叉熵损失函数进行训练。训练过程模拟了共 30 个轨道周期。在每个周期中，如果条件允许，卫星会进行两次通信，并在两次通信之间的时间窗口内训练聚合模型。平均而言，卫星 1 在两个不同的时间窗口内分别可训练 42.3 和 11.6 个训练轮次，而卫星 2 分别可训练 4.1 和 50.5 个训练轮次。在操作过程中，卫星有三种不同的运行模式，并按优先级从高到低执行：

- 待机– 当荷电状态低于 0.5 时，卫星会进入待机状态，以节省电量并为电池充电。此模式的功耗为 2 W。
- 模型共享– 当卫星彼此处于视线范围内时，它们会以联邦平均的方式交换模型并进行聚合，功耗为 100W。
- 模型训练– 如果上述两种情况都未发生，卫星将执行一个训练周期，功耗为 100 W。

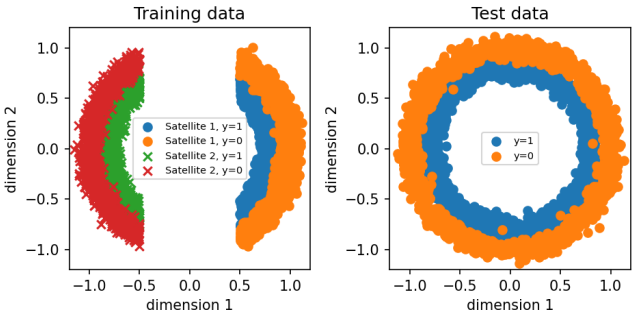


图8。 二元分类任务的训练数据和测试数据，以及它们在各卫星间的分布。请注意训练集中数据分布的异质性。$y = 0$和$y = 1$是该问题的类别。

2) 学习得到的模型和通信

总体而言，在两颗卫星上训练模型是成功的，两颗卫星的准确率均超过 91%；相比之下，随机猜测的准确率为 50%而独立训练所得的准确率低于 70%。图9展示了测试集准确率随时间的变化，并表明两颗卫星单独训练时都难以取得良好结果。然而，当它们交换模型时（以灰色竖线标示），准确率便显著提高。请注意，由于模型很小（仅 1312 位），模型传输几乎是瞬时完成的。

还可以看到，每经过一轮通信，每颗卫星都会受益，因为测试准确率迅速提高。然而，一旦卫星重新开始使用本地数据训练，性能便会因灾难性遗忘而下降 [47]。此外，两颗卫星的测试准确率存在显著差异。这是因为卫星 1 在每次模型交换后都能进行训练：一次交换后便开始充电，而下一次交换后卫星仍处于太阳的视线范围内。另一方面，卫星 2 在一次交换前正在充电，却在下一次交换期间停止充电。因此，卫星 2 在一次模型交换后可能没有足够的电量进行训练，导致其收敛速度较慢，如图9所示。

从图10所示的功耗来看，我们可以观察到，在电池充电、荷电状态快速振荡的时间段内，训练正在进行，因此训练得以运行。在日食期间，卫星会进入待机状态以节省电池荷电状态，且仅消耗2W。最后，当卫星朝向太阳时，荷电状态会迅速上升；由于荷电状态低于 0.5，此时不允许训练。

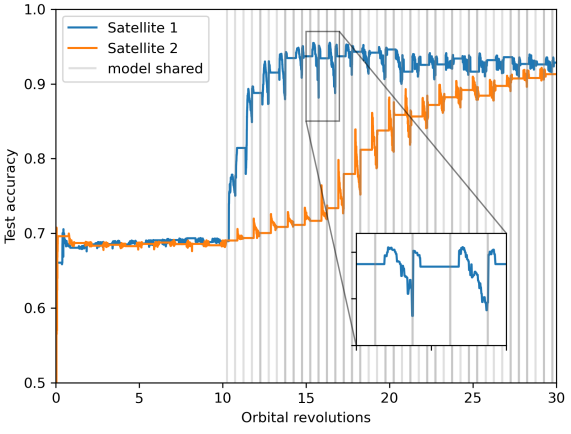


图9. 30个轨道周期内的测试准确率。垂直灰线表示卫星之间的通信。由于电池荷电状态低于0.5，准确率保持不变。

IV. 讨论

总体而言，第三节中的示例清楚地证明了 PASEOS 对所考虑的三种测试用例的适用性。通过在实际的卫星处理器上

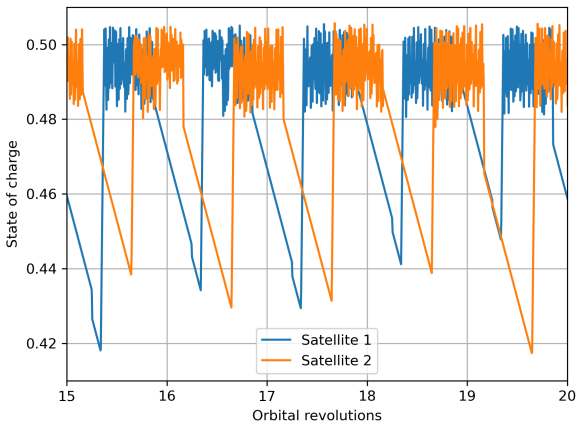


图 10. 第 15 至第 20 个轨道周期之间的荷电状态。

实时运行，我们还展示了使用 PASEOS 对场景进行建模，同时利用真实的、预期用于任务的硬件的可行性。对于低地球轨道星座，我们可以看到，PASEOS 也能够在更长的时间范围内对大型星座进行建模。最后，我们还展示了如何使用 PASEOS 对直接影响太空中机器学习模型训练的约束进行建模。不过，有些方面仍需进一步讨论和考量。

A. 星载约束对机器学习的影响

PASEOS 的目标之一是研究在轨应用机器学习方法时运行约束所产生的影响。尤其是在分布式学习和星载学习范式的背景下，这种影响究竟如何是一个至关重要的问题 [10]，[11]。正如我们在第 III-C 节的星载学习结果中所展示的，PASEOS 能够具体揭示轨道动力学和功耗等因素对运行的影响。如图9所示，通信窗口和日食的时间安排直接影响了分布式训练所达到的准确率。对于航天器运营人员而言，温度、电池荷电状态，或通信窗口相对于日食的时间安排等因素的重要性早已得到充分认识，但这些因素尚未在机器学习方法在轨应用的背景下得到研究。即使是诸如 Φ-Sat-1 [48]，这样的在轨演示，也未探讨这些系统在较长运行时段内持续操作这一主题；在此期间，PASEOS 所涵盖的许多约束都会发挥重要作用。据作者所知，对于星座中的推理和训练，目前仍缺乏像 PASEOS 所提供的那样对这些因素进行整体建模的方法。

B. 可扩展性与性能

如第 III-A 节中采用真实的太空级嵌入式硬件进行的单设备示例所示，PASEOS 是一款轻量级工具，可对太空环境和运行约束进行建模，同时将对用户活动造成的开销降至最低。第 III-A3 节所示结果表明，PASEOS 模型的计算复杂度随 PASEOS 时间步长呈线性增长；在 PASEOS 所研究的最高更新频率下，与用户活动相比，模型运行所需的中央处理器时间不到总时间的 1.5%。这得益于高效的物理模型，它们在适用于边缘设备的同时实现了恰当的权衡。这在一定程度上是以模型保真度为代价的；其主要局限和未来可能的改进将在第 IV-C 节和第 IV-D 节讨论。

从仿真范围的另一端来看，第 III-B 节中的低地球轨道星座示例表明，即使 PASEOS 能够处理多达数百颗卫星的大型星座，性能仍然是一个值得关注的问题。如果要对星座的长期可行性进行建模，包括轨道保持、光伏电池和电池的性能退化等方面以及类似影响（这些功能尚未在 PASEOS 中实现），计算时间可能会成为问题。在该示例采用的单线程、单核运行方式下，目前对于包含数百颗卫星、时间跨度为数月或数年的星座而言，运行时间已经难以接受。因此，未来有必要仔细研究 PASEOS 的并行化可能性。由于 PASEOS 采用完全异步的实现方式，因此可以轻松使用消息传递接口（MPI）等常用工具 [49] 来利用计算集群运行 PASEOS——在线示例之一展示了这一点。对此进行更详细的研究是有必要的。

C. 保真度考量

在保真度方面，一个需要考虑的关键因素是用户提供的规范。本文不对其进行详细研究，因为这超出了本初始版本的范围。不过，鉴于 PASEOS 的整体性和复杂的涌现行为——例如，图5展示了仅由简单的线性充电模型产生的复杂荷电状态曲线——输入参数的准确率和质量很可能成为影响 PASEOS 所生成结果保真度的关键因素。值得注意的是，如果启用所有物理模型，输入参数的数量就会相当庞大。事实上，仅热模型就需要八个参数，当前的功率模型需要三个参数，辐射模型还需要三个参数，轨道模型则需要七个参数，而且这些参数都需要针对 PASEOS 中的每一个参与者进行定义。因此，即使 PASEOS 中采用的是简化模型，也显而易见，使用 PASEOS 建模的星座场景已经相当复杂

的系统。未来，可能需要更详细地分析系统对特定参数的敏感性，以指导用户判断哪些参数尤为关键。也可以考虑在 PASEOS 的多种模型中加入噪声项，以反映这种敏感性。若将部分参数改为用分布而非标量参数描述，并由此纳入概率性的贝叶斯建模组件，以便考虑对所传入参数准确率的先验假设，还可以进一步提高代码的鲁棒性。

D. 局限性与未来扩展

目前，PASEOS 中模型的保真度以及所支持的场景存在一些固有局限。全面建模太空中的操作环境，以及能够在边缘设备上实时于后台运行 PASEOS，这两个目标要求在计算成本和物理保真度之间仔细权衡。未来，可以通过为 PASEOS 添加可选组件来弥补这一不足；当计算资源充足时，这些组件能够以更高保真度建模各种物理方面。不过，我们目前优先考虑涵盖更广泛的物理方面，而非提高单个方面的保真度。

就天体动力学建模而言，对于低精度的地球轨道，开普勒动力学是一个足够的起点，但不足以建模诸如小行星或彗星等不规则天体周围的轨道。同样，轨道保持和偶尔失去跟踪等现象也无法用这些动力学模型来建模。未来可考虑添加多面体引力模型[50]，或封装类似 orekit [17]的软件。

目前，PASEOS 中通信窗口的可用性仅取决于视线（LOS）是否被假定具有特定半径的球体遮挡。可以通过网格整合更复杂的几何形状。追踪是否成功、参与者之间的距离，以及光通信所处的大气条件等其他因素目前也尚未建模，但都是合理的扩展方向。同样，当前可用的通信带宽在现实中是一个更复杂且不断变化的量，取决于前面提到的许多因素，例如距离、链路条件，以及与传输链相关的其他参数（即信道编码、调制、是否额外使用同步导频等）。要考虑这些因素，需要进行更全面的信道建模。一种可行的方案是将 ns-3 或 OMNet++集成到 PASEOS [15], [16]中。

关于功率预算，也有一些可以考虑的改进，例如更严谨地对电池的荷电状态进行建模 [51], 更全面地模拟太阳能电池板的充电过程 [52]并考虑电池、设备和太阳能电池板的使用年限和温度等因素。

关于热模型，PASEOS 同样可以采用更复杂的模型，以考虑太阳能电池板、散热器及其他部件的热属性。至于辐射，目前 PASEOS 尚未实现总电离剂量效应，但对于时间跨度达数年的仿真，这些效应将变得重要 [12], 尤其是对于商用现成设备 [12], [20], [53]。

另一个改进方向是扩展参与者的能力。目前，地面主体是静止的，且仅支持地球上的场景。此外，太空主体无法执行机动（尽管可以手动更改轨道）。未来，这些能力可以支持更复杂的运行场景和活动。

总而言之，在提高保真度和扩展建模方面，潜在改进几乎没有止境。需要仔细分析哪些方面对实现真实的约束考量至关重要，哪些方面则可以像 PASEOS 当前所做的那样进行简化。不过，要开展这些比较，首先需要建立一个基线，而这正是我们在此提供的。

V. 结论

PASEOS 是一个软件包，可对星载环境进行整体建模，并考虑功率、热、辐射和动力学等因素。PASEOS 的通用性使其能够用于研究大量运行场景和硬件配置，也可与其他仿真工具配合使用。PASEOS 尤其适用于研究太空中的星座及新兴运行场景，例如边缘计算、边缘学习与去中心化学习，以及太空中的人工智能 [54]。

总而言之，我们已经证明，PASEOS 能够对航天器及其操作人员在轨运行时面临的各种约束进行建模。因此，我们可以在发射前更严谨地探索星载活动的可行性，和/或了解如何重新利用现有在役资产，或使其在未来发挥作用。得益于 PASEOS 的异步且灵活的设置，它支持从单个到多个航天器（包括地面主体）的广泛场景。该软件支持在边缘设备上实时执行，也支持在计算集群或类似基础设施上进行长期仿真。建模量的具体内容可以根据特定场景进行调整。

不过，这一过程当然也存在固有局限。目前，PASEOS 中的模型保真度相较于针对特定领域的模拟器（例如 ns-3 或 OMNeT++）较低，以便实现快速的后台执行。PASEOS 的模块化特性为扩展和封装更复杂的物理模型提供了天然的基础。

未来，我们将开展针对具体应用的研究，探索更复杂的模型，并演示如何在多个边缘设备上并行运行PASEOS，以解决现实世界中的任务。

致谢

作者谨向 Unibap AB 致谢，感谢其提供用于我们实验的 iX-10 100 设备。

参考文献

[1] Stijn Lemmens 和 Francesca Letizia。欧洲空间局年度空间环境报告。技术报告，技术报告 GEN-DB-LOG-00288-OPS-SD，欧洲航天局空间碎片办公室，2022年。[2] Hannah R Goldberg、Özgür Karatekin、Birgit Ritter、Alain Herique、Paolo Tortora、Claudiu Prioroc、Borja Garcia Gutierrez、Paolo Martino 和 Ian Carnelli。Juventas立方体卫星支持欧洲空间局赫拉任务前往双小行星。2019年。[3] J Douglas Liddle、Antony P Holt、Susan J Jason、Kathryn A O'Donnell 和 Edward J Stevens。利用立方体卫星和纳米卫星开展空间科学研究。《自然·天文学》，4(11)：1026–1030，2020年。[4] Harry Jones。航天发射成本的大幅下降。第48届环境系统国际会议，2018年。[5] Oltjon Kodheli、Eva Lagunas、Nicola Maturo、Shree Krishna Sharma、Bhavani Shankar、Jesus Fabian Mendoza Montoya、Juan Carlos Merlano Duncan、Danilo Spano、Symeon Chatzinotas、Steven Kisseleff 等。新太空时代的卫星通信：综述与未来挑战。IEEE通信综述与教程，23(1)：70–109，2020年。[6] Fredrik C Bruhn、Nandinbaatar Tsog、Fabian Kunkel、Oskar Flordal 和 Ian Troxel。实现太空中基于异构GPU的耐辐射星载数据处理。《CEAS航天期刊》，12(4)：551–564，2020年。[7]Gabriele Giorgi、Tobias D Schmidt、Christian Trainotti、Ramon Mata-Calvo、Christian Fuchs、Mohammed Mainul Hoque、Jens Berdermann、Johann Furthner、Christoph Günther、Thilo Schuldt 等。卫星导航与大地测量学的先进技术。《空间研究进展》，64(6)：1256–1273，2019年。[8] Pablo Gómez 和 Gabriele Meoni。Msmatch：少量标签下的半监督多光谱场景分类。《IEEE应用地球观测与遥感精选主题期刊》，14：11643–11654，2021年。[9] Dario Izzo 和 Pablo Gómez。利用神经密度场对不规则小天体进行大地测量。《通信工程》，1(1)：1–12，2022年。[10] Nasrin Razmi、Bho Matthiesen、Armin Dekorsy 和 Petar Popovski。面向密集低地球轨道星座的星载联邦学习。载于：2022年国际通信会议——IEEE国际通信会议，第4715–4720页。IEEE，2022年。[11] Bho Matthiesen、Nasrin Razmi、Israel Leyva-Mayorga、Armin Dekorsy 和 Petar Popovski。卫星星座中的联邦学习。arXiv预印本 arXiv:2206.00307，2022年。[12] Gianluca Furano、Gabriele Meoni、Aubrey Dunne、David Moloney、Veronique Ferlet-Cavrois、Antonis Tavoularis、Jonathan Byrne、Léonie Buckley、Mihalis Psarakis、Kay-Obbe Voss 等。推动在太空系统边缘应用人工智能：挑战与机遇。《IEEE航空航天与电子系统杂志》，35(12)：44–56，2020年。[13] James Richard Wertz、Wiley J Larson、Douglas Kirkpatrick 和 Donna Klungle。《空间任务分析与设计》，第8卷。Springer，1999年。[14] Giacomo Curzi、Dario Modenini 和 Paolo Tortora。小卫星大型星座：近期挑战与任务综述。《航空航天》，7(9)：133，2020年。

[15] András Varga 和 Rudolf Hornig。《omnet++仿真环境概述》。载于第1届国际ICST通信、网络与系统仿真工具与技术会议，2010年。[16] George F Riley 和 Thomas R Henderson。《ns-3网络模拟器》。载于《网络模拟建模与工具》，第15–34页。Springer，2010年。[17] Luc Maisonobe、Véronique Pommier 和 Pascal Parraud。《Orekit：面向运行飞行动力学应用的开源库》。载于第4届国际轨道动力学工具与技术会议，第3–6页，2010年。[18] Adam Paszke、Sam Gross、Francisco Massa、Adam Lerer、James Bradbury、Gregory Chanan、Trevor Killeen、Zeming Lin、Natalia Gimelshein、Luca Antiga、Alban Desmaison、Andreas Kopf、Edward Yang、Zachary DeVito、Martin Raison、Alykhan Tejani、Sasank Chilamkurthy、Benoit Steiner、Lu Fang、Junjie Bai 和 Soumith Chintala。《PyTorch：一种命令式风格的高性能深度学习库》。载于《神经信息处理系统进展》第32卷，第8024–8035页。Curran Associates, Inc.，2019年。[19] Martín Abadi 等。《TensorFlow：异构系统上的大规模机器学习》，2015年。软件可从 tensorflow.org 获取。[20] George Lentaris、Konstantinos Maragos、Ioannis Stratakos、Lazaros Papadopoulos、Odysseas Papanikolaou、Dimitrios Soudris、Manolis Lourakis、Xenophon Zabulis、David Gonzalez-Arjona 和 Gianluca Furano。《太空中的高性能嵌入式计算：基于视觉的导航平台评估》。《航空航天信息系统期刊》，15(4)：178–192，2018年。[21] Peter Fortescue、Graham Swinerd 和 John Stark。《航天器系统工程》。John Wiley & Sons，2011年。[22] Dario Izzo。《Pygmo 和 PyKEP：轨道动力学中的大规模并行优化开源工具（行星际轨迹优化案例）》。载于第五届国际轨道动力学工具与技术会议论文集，ICATT。sn，2012年。[23] David Vallado 和 Paul Crawford。《SGP4轨道确定》。载于AIAA/AAS轨道动力学专家会议暨展览会，第6770页，2008年。[24]Samir Ahmed Al-Gailani、Mohd Fadzli Mohd Salleh、Ali Ahmed Salem、Redhwan Qasem Shaddad、Usman Ullah Sheikh、Nasir Ahmed Algeelani 和 Tarik A. Almohamad。《自由空间光学（FSO）通信系统、链路与网络综述》。《IEEE Access》，9：7353–7373，2021年。[25] B Rhodes。《Skyfield：为恒星、行星、卫星和地球卫星生成高精度、研究级位置数据》，2020年。[26] Hemani Kaushal 和 Georges Kaddoum。《太空中的光通信：挑战与缓解技术》。《IEEE通信综述与教程》，19(1)：57–96，2016年。[27] Charles S Carrano、Christopher T Bridgwood 和 Keith M Groves。《2006年12月太阳射电暴对全球定位系统性能的影响》。《无线电科学》，44(01)：1–12，2009年。[28] Gabriele Meoni、Riccardo Cassettari、Matteo Bertolucci、Antonino Marino、Daniele Davalle、Marco Trafeli 和 Luca Fanucci。《CCSDS 131.2-B-1遥测发射机：RTG4现场可编程门阵列上的VHDL知识产权核与验证架构》。《航天学报》，176：484–493，2020年。[29]George Pitsis、Grigorios Tsagkatakis、Christos Kozanitis、Ioannis Kalomoiris、Aggelos Ioannou、Apostolos Dollas、Manolis G.H. Katevenis 和 Panagiotis Tsakalides。《面向空间数据分类的多FPGA平台高效卷积神经网络权重压缩》。载于ICASSP 2019——2019年IEEE国际声学、语音与信号处理会议（ICASSP），第3917–3921页，2019年。[30] Mukund R Patel。《航天器电源系统》。CRC出版社，2004年。[31] I Martinez。《航天器热建模与测试》，1995年。[32] Joseph R Srour 和 James M McGarrity。《太空微电子的辐射效应》。《IEEE会刊》，76(11)：1443–1469，1988年。[33] Yifan Lu、Qi Shao、Honghao Yue 和 Fei Yang。《不同轨道航天器所受太空环境效应综述》。《IEEE Access》，7：93473–93488，2019年。

[34] Olivier Grasset、MK Dougherty、A Coustenis、EJ Bunce、C Erd、D Titov、M Blanc、A Coates、P Drossart、LN Fletcher 等。《木星冰卫星探测器（JUICE）：欧洲空间局前往木卫三并研究木星系统的任务》。《行星与空间科学》，78：1–21，2013年。[35] Onur Özgün 和 Yaman Barlas。《离散仿真与连续仿真：何时会产生影响》。载于第27届系统动力学学会国际会议论文集，第6卷，第1–22页，2009年。[36] asyncio——异步输入/输出。在线获取地址：“https: // docs.python.org/3/library/asyncio.html”。最后访问日期：2023年1月30日。[37] Alex Arenas、Albert Díaz-Guilera、Jurgen Kurths、Yamir Moreno 和 Changsong Zhou。《复杂网络中的同步》。《物理学报告》，469(3)：93–153，2008年。[38] D.L. Mills。《互联网时间同步：网络时间协议》。《IEEE通信汇刊》，39(10)：1482–1493，1991年。[39] Ozalp Babaoglu、Toni Binci、Mark Jelasity 和 Alberto Montresor。《覆盖网络中的萤火虫启发式心跳同步*》。载于第一届自适应与自组织系统国际会议（SASO 2007），第77–86页，2007年。[40] Maria Pia Del Rosso、Alessandro Sebastianelli、Dario Spiller、Pierre Philippe Mathieu 和 Silvia Liberata Ullo。《通过卷积神经网络和卫星多光谱影像进行星载火山喷发检测》。《遥感》，13(17)：3479，2021年。[41] Pietro Di Stasio、Alessandro Sebastianelli、Gabriele Meoni 和 Silvia Liberata Ullo。《基于星载人工智能的火山喷发早期检测》。载于2022年IEEE扩展现实、人工智能与神经工程计量学国际会议（MetroXRAINE），第714–718页。IEEE，2022年。[42] Meoni Gabriele 等。《面向时间关键型应用的星载端到端深度神经网络模型设计》。2022年地球生命研讨会，2022年5月23–27日，德国波恩。在线获取地址：“https://lps22.ollyservices.com/fronten d/index.php@page_id=22743&additions_conferenceschedul e action=detail&additions conferenceschedule controlle r = =67289 =5673993 826 463 33 980 760015 5 66 29584 1 969 3207 3 7 09 paperList&pid &hash c bef c f a d c a b ac fb bd ff c.html”。[43] 《Sentinel-2产品规范文档》。在线获取地址：“ https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/sen tinel-2-products-specification-document”。最后访问日期：2023年1月21日。[44] 《又一个Python分析器》（yappi）。在线获取地址：“https://pypi.org/project/yappi/”。最后访问日期：2023年1月23日。[45] Francesco Massimetti、Diego Coppola、Marco Laiolo、Sébastien Valade、Corrado Cigolini 和 Maurizio Ripepe。《使用Sentinel-2进行火山热点检测：与MODIS–MIROVA热数据序列的比较》。《遥感》，12(5)：820，2020年。[46] John G Walker。《卫星星座》。《英国星际学会杂志》，37：559，1984年。[47] Neta Shoham、Tomer Avidor、Aviv Keren、Nadav Israel、Daniel Benditkis、Liron Mor-Yosef 和 Itai Zeitak。《克服联邦学习中非独立同分布数据导致的遗忘问题》，2019年。[48] Gianluca Giuffrida、Lorenzo Diana、Francesco de Gioia、Gionata Benelli、Gabriele Meoni、Massimiliano Donati 和 Luca Fanucci。《Cloudscout：用于高光谱图像星载云检测的深度神经网络》。《遥感》，12(14)：2205，2020年。[49] David W Walker 和 Jack J Dongarra。《MPI：一种标准消息传递接口》。《超级计算机》，12：56–68，1996年。[50] Dimitrios Tsoulis。《利用线积分解析计算均质任意形状多面体源的完整重力张量》。《地球物理学》，77(2)：F1–F11，2012年。[51] Xin Lai、Shuyu Wang、Shangde Ma、Jingying Xie 和 Yuejiu Zheng。《锂离子电池荷电状态等效电路模型的参数灵敏度分析与简化》。《电化学学报》，330：135239，2020年。[52] Angel Porras-Hermoso、Borja Cobo-Lopez、Javier Cubas 和 Santiago Pindado。航天器电力分配系统的简易太阳能电池板/电池建模。《航天学报》，179：345–358，2021年。[53] Windy S Slater、Nayana P Tiwari、Tyler M Lovelly 和 Jesse K Mee。英伟达 Jetson Nano 图形处理器的总电离剂量辐射测试。载于 2020年 IEEE高性能极限计算会议（HPEC），第 1–3 页。IEEE，2020年。[54] Jose Manuel Gaspar Sanchez、Nils Jorgensen 和 Martin Torngren。信息物理系统的边缘计算。《ACM 信息物理系统汇刊》，2022年。