语义通信  (Sem‑Com)  与边缘计算在空间网络中的集成使得为数据密 集型应用优化分配稀缺的能源、计算和通信资源成为可能。我们将地球观测  (EO)   作为卫星的典型功能，并回顾其主要特征和挑战。我们确定了以低地球轨道  (LEO)   卫星星座为代表的空间部分作为分布式智能边缘层的潜力。在此基础上，提出了一 种支持语义和面向目标的图像重建和对象检测与定位应用的系统架构。模拟结果使 用真实数据集和最先进的  (SoA)  处理和通信参数显示了能源、时间和任务性能之 间的复杂权衡

，资源分配是卫星网络面临的一大挑战。一组属于数据 密集型的卫星应用是地球观测  (EO)，它为气候和环境监测、海上监视或灾害管理等提供关键 信息。收集的数据量巨大，连接地面段和空间段的馈线链路的接触时间和容量有限，使得实时   EO  无法进行强力数据传输。由于新技术推动因素的协同作用以及应用目标和要求的重新定义， 这种情况即将改变

以下三个应用的复杂程度不断增加，说明了应用目标和要求的重新定义。（i）图像重 建：地面用户希望从地球表面的给定区域获取图像。图像应以满足某些失真标准的方式 在空间中压缩。（ii）实时物体检测和定位：地面用户希望实时绘制物体图。卫星不发送 原始数据，而是对获取的图像运行物体检测和定位算法并对结果进行编码。（iii）通过 卫星闭环控制进行实时物体跟踪：地面监视器实时跟踪移动物体，其中远程闭环控制根 据网络、天气或跟踪的物理实体的状态决定数据采集的轨道/高度参数。

这些应用说明了需求从发送原始数据转变为发送根据其应用意义或目标压缩的一 小部分数据。这需要计算、人工智能和通信方面的技术推动者之间进行仔细的相互作 用，以在给定的时间、能源和准确性目标内实现应用目标。因此，所描述的应用属于语义 通信  (SemCom)  [2]  [3]  的范畴，将信息的含义和重要性纳入通信中 过程。 本文提倡在卫星计算和通信环境中使用  SemCom  框架。我们通过技术推动因素详 细阐述了基本概念及其实例。边缘计算对  SemCom  至关重要，因为它支持语义编码/ 解码过程，提供所需的计算和存储资源，同时遵守带宽限制。图  1  显示了  SemCom  如 何支持通用  EO  应用程序。EO  卫星捕捉受大气湍流影响的感兴趣区域的图片。这些   EO  卫星可能是  LEO  卫星星座的一部分，也可能是独立于  LEO  卫星星座的，后者充当 增强地面系统计算能力的边缘层。

覆盖的区域和图像的质量主要受以下因素的影响：（i）轨道高度；（ii）视场 （FOV），即决定摄像机传感器捕获的可观察区域范围的角宽度；（iii）地面采 样距离（GSD），即图像中两个相邻像素中心之间的实际地面距离，决定图像 的空间分辨率  [1]。 通常，较低的高度对应较小的  GSD  和  FOV  值。由于高图像清晰度需要较小的   GSD  值，因此  LEO  卫星是  EO  的普遍选择。随着捕获的帧进一步远离天底点 （远离卫星正下方的点），GSD  会增加，导致分辨率降低。因此，需要精确定义 卫星的覆盖范围，以确保以所需的质量捕获图像。为此，EO  卫星的姿态子系统 控制和调整航天器沿三个轴（滚动、俯仰和偏航）的方向，新一代  EO  敏捷遥感 卫星  [4]  能够自行调整轨道和覆盖区域。此外，可以使用全色锐化（将多光谱 帧与全色帧相结合）来降低  GSD  并提高图像质量。

可以使用各种压缩算法来处理和压缩获取的图像，这些算法包括  JPEG  等 传统方法以及为特定任务设计的高级  AI  算法。具体算法的选择取决于多种因 素，包括压缩系数、算法复杂度和任务准确性。压缩系数表示数据大小的减小， 这对于高效的数据存储和传输至关重要。算法复杂度会影响从数据捕获到信息 准备好传输所需的时间，以及处理过程中消耗的能量。更复杂的算法需要额外 的资源，但可以提供更好的性能。最后，任务准确性由特定的性能参数来衡量， 以确保满足预期结果。AI  算法可以在  EO  图像数据集上进行训练，这些数据集 通常包括在不同条件下捕获的图像，并且具有较小的  GSD，以实现高精度  [11]。 有几种性能指标可用于评估算法的优劣，其中支持的每秒帧数  (FPS)  对于 实时应用至关重要。准确率和召回率分别指正确检测到的对象在所有检测到的 对象和所有实际对象中所占的比例。此外，mAP（介于  0  和  1  之间）来自准确 率和召回率值。另一个指标是并集交集  (IoU)，它测量重叠度预测边界和真实物体边界之间 （即基本事实）。IoU  阈值是预定义的（典型的 值为  0.5  和  0.95） 来确定检测是否 是正确的。 数据融合提供了一种多功能的数据采集和处理解决方案，可以 整合不同类型的数据，从而 提高结果的准确性和可靠性[12]。此外，数据融合可以利用来自多个

卫星提供更全面的了解 降低功耗的同时观察到的现象 并尽量减少延迟。多模数据融合可以发生在 不同级别：观察级别的数据，对应于原始 传感器捕获的信息；特征级数据， 指的是向量嵌入表示；决策级， 指根据任务做出的最终裁决。 融合通过这些层次进行，复杂性和语义深度的增加，从而带来潜在的性能提升。虽然经典信号处理 主要侧重于单峰观察级融合 和决策级融合（参见[2]中的参考文献）， 由于固有的 合并不同数据类型的复杂性。在这方面，人工智能 已成为解决多模态融合的有前途的工具 在任何级别。也就是说，每个输入都由一个模型处理（例如， 神经网络），从而得到一个向量嵌入。然后，这些 表示被合并（例如附加），并进一步 由另一个  AI  模型处理。嵌入是否对应于输入本身、中间表示或 最终决定，架构可以包含多模式 任何级别的数据融合[13]。

语义层面：

如今，SemCom  一词涵盖了  Shannon  和  Weaver  [2]  最初定义的通信系统的语义 和有效性水平。有效性水平也称为目标或任务导向型通信。人们一直致力于准确定义   SemCom  是什么，并区分语义和目标导向这两个问题。然而，它们之间的相互作用使得 建立通用边界变得不切实际。相反，定义场景更具实用性并根据其语义或目标导向的相关程度对优化问题进行分类，并在此基础上选择适当的一 组需求、性能指标和优化方法。 例如，从介绍中定义的三个说明性应用来看，图像重建具有很强的语义成分，因为图像在 空间段进行语义压缩，然后在地面进行解释。另外两个，实时物体检测和跟踪，结合了两者 的元素：语义特征提取嵌入在面向目标的优化中，其目的是在目的地正确及时地监控/跟 踪物体，而不是单独的图像传输。

架构

接下来描述该架构的主要元素。 地面站：地面站由一个或几个地面站组成，连接终端用户和空间段，接收终端用户的请求， 接收边缘层的结果，并进行语义解释或推理。 地面站还具有强大的（云）计算能力，可用于非时间敏感信息和补充边缘容量。在通信方 面，连接地面站和边缘层的馈线链路通常是容量瓶颈。 地球观测卫星：地球观测卫星负责数据采集，其质量受大气湍流的影响。卫星摄像机拍摄 的画面覆盖了大面积区域，例如WorldView‑3  拍摄的画面覆盖了  617  公里高空的  170   平方公里以上区域。然后，画面被分割成较小的图像，并以  GSD  为特征。如果地球观测卫 星不属于边缘层，且计算和存储能力有限，则必须使用  ISL  将原始数据（图像）发送到边 缘层进行处理，然后转发到地面

边缘节点：  LEO  卫星星座为分布式处理和学习提供边缘计算能力。根据  SemCom  原 则，语义编码/解码利用知识库  (KB)，它代表与地面共享的知识。建立  KB  是一个复杂且 耗时的过程，在  GS  离线完成，涉及从感知环境（即从大型数据集）中学习。然后，将预先 训练的算法上传到机上。随着时间的推移，KB  会出现分歧，并可能导致错误的语义推断和 解释，因此需要  KB  对齐和持续学习。处理后的信息通过星座路由到  GS，这需要路由算 法。 大气、物理和语义噪声：整个系统受到各种噪声的影响。大气噪声或湍流会降低卫星图像 的质量，但其影响在一定程度上是可以容忍的。破坏  ISL  和馈线链路传输的物理噪声可 能会导致比特错误，但可以通过信道解码在很大程度上进行纠正。最后，由于源  KB  和目 标  KB  不匹配等原因，语义噪声会出现在消息解释过程中。

目标节点向源节点请求信息。具体来说，请求是让源节点感知环境（即拍照）并将更新的 信息传输到目标节点。查询可以是半静态的（“绘制区域  X  的  Y  个月地图”）或动态的 （“跟踪  ID  为  X  的船只”或“绘制喷发的火山  Y  周围的区域地图”）。查询必须转换 为对网络的技术请求，以能源、计算和通信资源的编排形式进行，通常在  GS  完成。这是一 个高度复杂的调度问题  [15]，旨在最大化解决特定任务并使用最少资源的观测利润。根 据查询的性质，编排也将更加静态或动态。此外，编排必须考虑当前的网络条件，例如天气 条件、可能的子系统故障以及资源的可用性。 EO  卫星获取数据并将其分发到边缘层进行语义并行处理。每个协作边缘卫星的结果都 会发送到  GS  进行数据收集和语义重建。如果由于时间限制，并非所有数据都在边缘层 处理，则其余原始数据将在云  GS  上处理。根据  GS  发送给最终用户的最终语义解释，可 以生成新的查询，从而关闭通信循环。 与传统通信系统不同，通信和网络协议（例如调制和编码、调度器和路由）的目标不仅是 提高可靠性（为此使用传统的链路和网络级指标（例如吞吐量、误码率、端到端延 迟）），而且要完成任务，该任务以语义指标（如下面定义的指标）参数化。

SemCom  的一个基本方面是找到一组相关且实用的指标来量化重新表述资源优化问题。关于这方面的文献很多（例如，参见[2]），但可以归类如下。 任务完成指标：这些指标旨在捕捉所传达信息对于预期任务的语义含义和实用性。处理 图像时，可以使用失真感知指标来评估通信系统保留图像相关特征以实现准确分类的效 果。所使用的具体失真指标取决于数据类型，通常涉及平方误差和汉明距离。然而，这些 指标不能充分捕捉语义内容。相反，关注数据感知质量的指标更为合适。例如，在图像处 理中，均方误差  (MSE)  可用作失真指标，而结构相似性指数测量  (SSIM)  可用作感知质量 指标。对于血管检测等任务，主要关注的是最大化召回率等分类指标。 时间指标：对于大多数应用，必须在指定的时间范围内接收信息，并允许最大延迟。延迟 通常定义为从图像捕获到地面站接收所经过的时间。时间性能至关重要，通常与任务完 成程度密切相关。尽管如此，我们仍将时间归为一个单独的类别，因为它在优化资源分配 方面发挥着核心作用。另一个考虑因素是存储和队列的容量有限。确保处理和通信队列 的稳定性对于保持系统高效运行而不出现拥塞至关重要。 如果每颗卫星处理和传输数据的速度都超过数据到达的速度，则系统被认为是稳定的。 否则，这个过程就不稳定，图像有被丢弃或无法获取的风险。在第二种情况下，我们需要 制定一些策略来降低卫星获取图像的速度。 能源指标：卫星可用的能源量是一个关键制约因素，因为卫星依靠太阳能电池板发电，并 将其储存在电池中，供日食期间使用。在  SemCom  优化中，重点是处理和通信子系统的 功耗。机载和机外算法的能耗受处理架构的影响很大，处理架构可以是基于中央处理单 元  (CPU)  或图形处理单元  (GPU)。GPU  具有强大的并行处理能力，而  CPU  具有针对通 用计算优化的更少、更复杂的处理单元。通过  ISL  和馈线链路传输数据的能耗取决于所 使用的技术，RF  或  FSO。

语义压缩可适应特定环境和任务，从而允许接收器对图像进行有效的语义解释。具体 而言，在我们的案例中，卫星和  GS  之间共享的  KB  用于实现比传统固定方法高出几个数 量级的压缩级别。性能可能会受到大气湍流和通信噪声的影响，应将其考虑在内纳入资源分配策略，优先考虑解码成功率较高的卫星和图像。对于实时物体跟踪，地面 站实时估计船只轨迹，资源分配考虑重建状态。基于特定任务的闭环通信和卫星控制 增加了资源分配的复杂性。考虑最终用户向  GS  发送查询的情况，请求地理坐标或船 只  ID  等信息。GS  将此查询转换为指示特定卫星捕获图像的指令。如果  GS  无法确定哪 些卫星覆盖了感兴趣的区域，则会向所有可用卫星发送一般查询以捕获新图像。然后将 请求路由到目标卫星，在那里闭环控制确定数据采集的轨道和姿态参数。该决定受网络 条件（例如天气、可用资源、子系统故障）和系统状态（例如跟踪的物体）的影响。

因此，在满足  EO  请求时，准确性、延迟和能耗之间存在微妙的平衡。 这些相互冲突的目标都必须在资源分配优化中考虑，其概念上可以表述如下：确定用于 图像捕获、语义提取、编码和地面路由的最佳  EO  和边缘卫星组，目的是在满足准确性和 时间限制的同时最大限度地降低能耗。 能耗主要受星上算法执行和数据传输的影响。因此，语义提取具有两个相反的影响：它增 加了由于处理而产生的能耗，但通过减少需要传输的数据量来降低能耗，因为处理后的 数据比原始数据小得多。此外，空间段必须考虑在捕获和处理下一帧之前执行和完成算 法的硬约束。如果做不到这一点，可能需要丢弃图像或不捕获图像以避免系统拥塞。如 果只能处理一部分数据，剩余数据将以原始形式传输到  GS，从而增加通信网络的负载 并延长传输时间。

语义通信（SemCom）和边缘计算在空间网络场景的结合，实现了稀缺能源、计算和通信的最佳分配。这使得在星地网络间运行数据密集型的应用程序成为可能。

本篇文章以地球观测（EO）作为卫星的标准功能，并且回顾了其主要特点和当下场景所面对的挑战。

作者提出了以低地球轨道卫星（LEO）星座为代表的空间段作为分布式智能边缘层的潜力，并在此基础上，提出了一种面向目标和语义支持的图像重建、目标检测和定位应用的系统架构。文章最后以能量、时间和任务性能作为trade-offs，使用真实数据集和最新方法做了仿真模拟。