



专题：卫星互联网

遥感卫星随遇接入互联网星座和在轨智能处理

常晓宇^{1,2}, 张伟嘉¹, 李旭东¹, 张晓男^{1,2}, 王港^{1,2}, 贾钢¹

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;

2. 中国电子科技集团公司航天信息应用技术重点实验室, 河北 石家庄 050081)

摘要: 低轨互联网星座是当前全球研究和发展的热点, 互联网星座支持随遇接入遥感卫星和信息在轨直接处理的应用前景备受期待, 但由于轨道高度不同会产生双向高动态异构星座的接入互联问题。首先, 通过设定低轨卫星互联网星座在不同轨道特性、不同卫星数量情况下的随遇接入仿真场景, 重点探讨了时空非连续可视性和多普勒频移问题对遥感卫星接入性能的影响; 其次, 基于遥感卫星随遇接入互联网星座场景的特点, 分析了不同时延性在轨处理任务的流程及其星地功能分配; 最后, 对当前在轨智能处理算法存在的问题和未来研究重点进行阐述, 为未来低轨互联网星座及遥感卫星的发展和联合组网应用提供可靠的理论支撑。

关键词: 低轨卫星互联网星座; 遥感卫星; 随遇接入; 非连续覆盖; 在轨智能处理

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022075

Study on remote sensing satellites random access to internet constellation and on-orbit intelligent processing

CHANG Xiaoyu^{1,2}, ZHANG Weijia¹, LI Xudong¹, ZHANG Xiaonan^{1,2}, WANG Gang^{1,2}, JIA Gang¹

1. The 54th Research Institution of CETC, Shijiazhuang 050081, China

2. CETC Key Laboratory of Aerospace Information Applications, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: The low earth orbit (LEO) satellite Internet constellation is a hot spot in current global research. And it is highly anticipated that the LEO satellite Internet constellation supports random access to remote sensing satellites and direct on-orbit information processing. However, due to the different orbital heights, the difficult access problems of the bidirectional highly dynamic heterogeneous constellation will be caused. Firstly, the random access scenario under different orbit characteristics and satellite numbers of LEO satellite Internet constellation was set up, and the impact of the spatiotemporal discontinuous visibility and Doppler frequency shift on the remote sensing satellite access performance was focused on. Secondly, based on the characteristics of the random access scenario, the process of on-orbit processing tasks with different delays and the allocation of satellite-ground functions were analyzed. Finally, the problems existing in the current on-orbit intelligent processing algorithm and the focus of future research were

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-04-10

通信作者: 常晓宇, lightraincxy@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U20B2064)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U20B2064)



expounded, so as to provide reliable theoretical support for the development and applications of LEO satellite Internet constellation and remote sensing satellites in the future.

Key words: LEO satellite internet constellation, remote sensing satellite, random access, coverage discontinuity, on-orbit intelligent processing

0 引言

当前,低轨卫星互联网成为全球发展的热点,星链、一网和我国的“星网”3个不同特点的系统正在推进^[1]。目前,星链以高密、多层、链状等星座特点,拟达到与地面互联网应用可以比拟的程度^[2],甚至在速率、时延、覆盖等多方面超过地面互联网用户体验的性能^[3];一网系统以透明、低成本等星座特点,支持对高轨宽带卫星通信的补充^[4];“星网”则以数量少、全互联为特点。从遥感卫星接入的需求看,在随时接入、随时数传或随时分发方面存在巨大应用价值,星间全互联星座因此成为最好的选择。

传统上由位于静止轨道的中继卫星支持遥感卫星随遇接入^[5],但是由于中继卫星数量有限,对于高频段(如Ka频段)、高速率数据传输而言,单颗中继卫星支持的航天器数量也非常有限,很多中继卫星同时只能支持一个遥感卫星的用户接入。随着遥感卫星数量的增加,静止轨道中继卫星支持能力明显不足,因此,使用低轨卫星互联网星座,支持遥感卫星随遇接入的需求十分迫切。但是由于低轨卫星互联网卫星和遥感卫星均高速运动^[6],且位于不同的星座体系^[7],针对这种双向高动态异构星座间的接入互联,目前全球没有成熟应用案例。美军“太空七层”的传输层,正在开展相关试验,有望2024年形成能力,其零阶段的20颗传输层卫星即将发射,尽管可以给人们一些参考,但是由于星座特点不同、频段不同,需要解决的关键技术问题也会有差异。

另一方面,遥感信息在轨智能处理水平,也影响着应用模式确定和能力形成。近年来,以神经网络为代表的深度学习算法在遥感图像处理智

能化方面展现出巨大潜力^[8-10],Girshick等^[11]基于卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)提出目标检测法R-CNN。之后,衍生出Fast R-CNN^[12]、Faster R-CNN^[13]、Mask R-CNN^[14]等方法,该类方法目标检测精度高,但体积较大、效率较低^[15-16],难以用于星上处理平台。Redmon等^[17-18]提出基于回归的目标检测算法YOLO(you only look once)。之后,为进一步轻量化网络模型及平衡检测精度与效率,又有SSD(single shot multibox detector)^[19]、YOLO系列(YOLOv2-YOLOv4)^[20-22]等方法被提出。例如,王玺坤等^[23]提出了一种基于YOLO的遥感图像舰船目标检测方法,取得了较好的检测效果。王晓青等^[24]提出了一种基于YOLOv3的轻量目标检测模型,可部署在嵌入式平台实现遥感目标的快速检测。农元君等^[25]基于YOLOv3-tiny提出了一种轻量化遥感图像目标实时检测方法,可实现嵌入式端遥感目标实时检测,并达到较高的检测精度。

在星载处理平台方面,美国HPE(Hewlett Packard Enterprise)与美国航空航天局合作,为国际空间站设计了加固图形处理器(graphic processing unit, GPU)服务器,可提供1 TFLOPS的在轨计算能力^[26]。为提升可重构性,NASA将商用型FPGA(field programmable gate array)与辐射加固器件相结合,设计了星载AI处理器SpaceCube^[27-28]。我国的珠海欧比特公司面向民用航天应用,研制了64 GFLOPS算力的航天级AI处理器“玉龙810”^[29]。美国NEMO卫星可在轨处理与分析卫星光谱数据^[30]。美国EO-1卫星可对感兴趣区域进行在轨识别和变化检测^[31]智能处理。德国BIRD卫星可在轨检测遥感图像中亚像元级热点。法国Pleiade-HR卫星可完成遥

感图像在轨辐射校正、几何校正和目标特征提取等操作^[30]。我国的“天智一号”卫星搭载了小型低功耗的云计算平台，可用于卫星数据在轨处理^[32]。“吉林一号”星群利用多核数字信号处理（digital signal processing, DSP）和 GPU 在轨处理遥感图像，可在轨识别森林火点和海面舰船^[33]。

低轨卫星互联网星座和在轨智能处理技术的发展，为互联网星座支持随遇接入遥感卫星和信息在轨智能处理提供了新的契机。针对随遇接入过程中存在的卫星双向高动态接入和在轨处理可执行任务的星地功能配置问题，本文首先通过设定不同轨道的互联网星座和遥感卫星随遇接入场景，重点分析了时空非连续可视性和多普勒频移的影响；其次，基于遥感卫星接入互联网星座场景的特点，重点介绍了不同时延性在轨处理任务的流程，并对在轨信息智能处理星地可执行算法及生产产品的差异进行分析；最后，对当前在轨智能处理算法存在的问题和未来研究重点进行阐述。

1 遥感卫星和低轨星座通信卫星双向高动态接入问题研究

1.1 问题分析

以光学遥感卫星为例，通常情况下，卫星轨

道高度为 500~700 km，而低轨互联网卫星星座的轨道高度大概为 1 000 km^[34]，二者处于不同的星座体系和轨道高度，再加上两类卫星的高动态性，这使得接入问题变得比较复杂。而无论是遥感卫星在轨智能预处理，还是遥感卫星信息直接中继到地面进行处理，都需要分析解决遥感卫星随时随地接入低轨卫星互联网星座的问题，也称为随遇接入问题，或称为双向高动态接入问题。该问题具体可分为 3 个方面：一是非连续可视性问题，二是高多普勒频移影响问题，三是接入协议问题。接入协议可以与低轨卫星互联网的承载网路由和接入网协议一并讨论，本文重点讨论前两个问题。

1.2 非连续可视性分析

（1）场景想定

对位于 1 000 km 左右的极轨或者倾斜轨道低轨互联网星座和位于 500 km 左右的遥感卫星通常场景进行分析。低轨卫星互联网星座对遥感卫星的覆盖场景如图 1 所示，对地连续覆盖的低轨卫星互联网星座对 500 km 遥感卫星所在空域的覆盖显然是不连续的。

低轨卫星互联网星座由于距离地面近，再加上 Ka 频段频率高，其波束覆盖面积很小（凝视波束直径只有几十千米），因此通常采用相控阵波

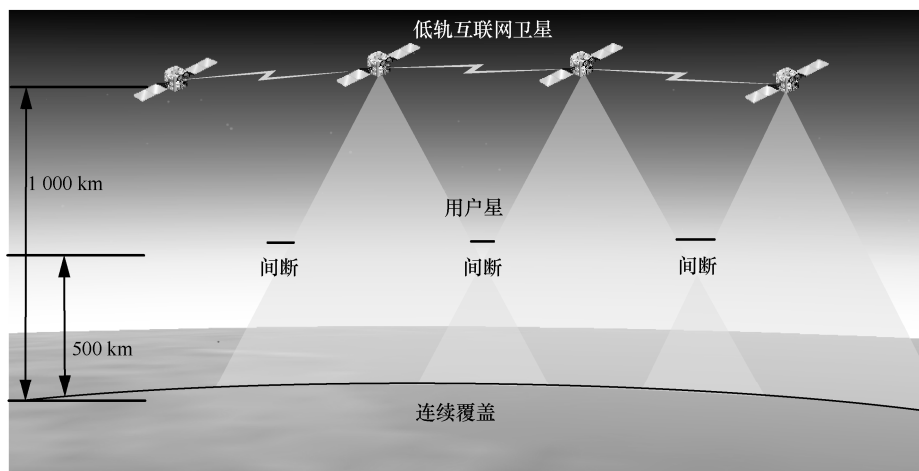


图 1 低轨卫星互联网星座对遥感卫星的覆盖场景



束，如果要对准高动态的遥感卫星，需要利用相控阵的波束扫描功能，扫描到目标后，再凝视跟踪。以下给出了低轨卫星互联网星座在不同轨道特性、不同卫星数量的情况下，对遥感卫星非连续可视情况的仿真。

仿真场景参数见表 1，给出了不同轨道和卫星数量的低轨卫星互联网星座和接入遥感卫星的仿真场景参数，低轨卫星互联网星座的卫星高度为 1 100 km，星座对地波束扫描范围 $\pm 55^\circ$ ；遥感卫星轨道选取为 500 km，倾角分别取 45° 、 60° 和 98° （太阳同步轨道），最小接入时长设定为 120 s，接入时长指遥感星与低轨卫星互联网星座单星最短可见时间。

表 1 仿真场景参数

场景	参数			
	轨道	极轨	极轨	倾斜轨道
低轨卫星互联网星座参数	卫星数量	72 颗	144 颗	216 颗
	卫星倾角	86.5°	86.5°	50°
	卫星高度	1 100 km		
	卫星对地波束	$\pm 55^\circ$ 扫描		
遥感卫星（用户星）参数	卫星最小通信仰角	25.90°		
	卫星高度	500 km		
	轨道倾角	45° 、 60° 、 98° （太阳同步轨道）		
	最小接入时长	120 s		

（2）非连续覆盖性分析

图 2、图 3、图 4 分别给出了极轨 72 颗、极轨 144 颗、倾斜轨道 216 颗卫星互联网星座对 500 km

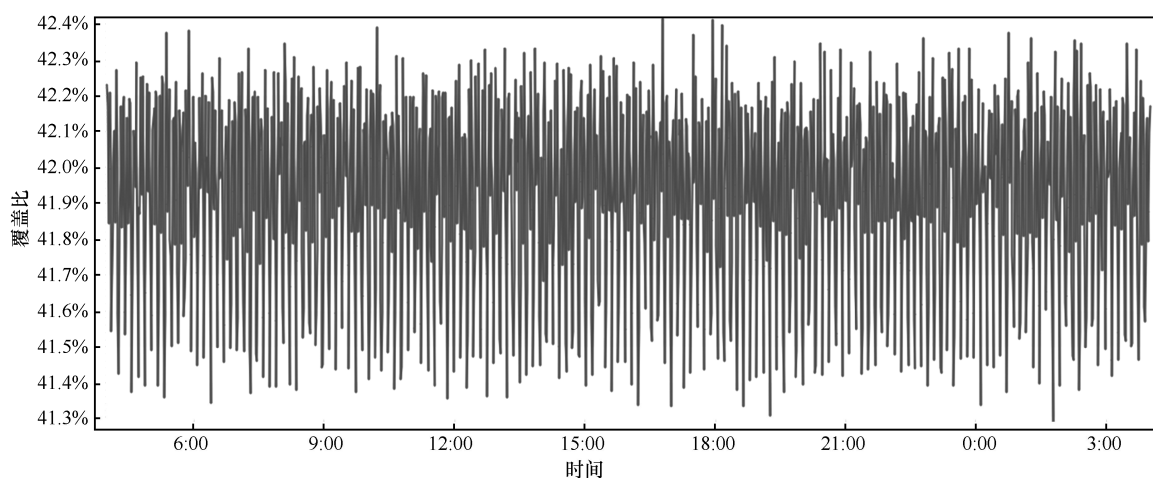


图 2 极轨 72 颗卫星互联网星座对 500 km 高度空域的覆盖性仿真结果

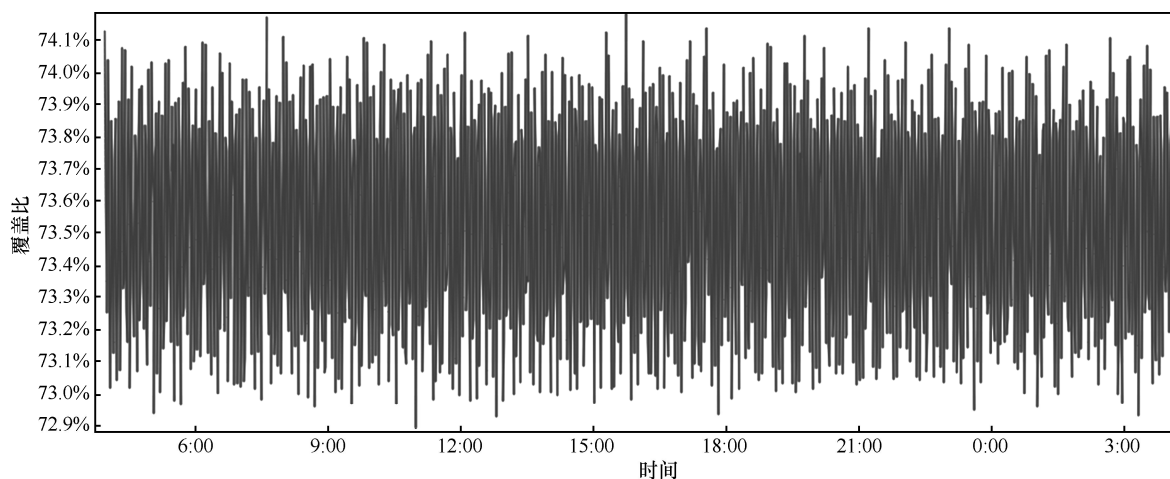


图 3 极轨 144 颗卫星互联网星座对 500 km 高度空域的覆盖性仿真结果

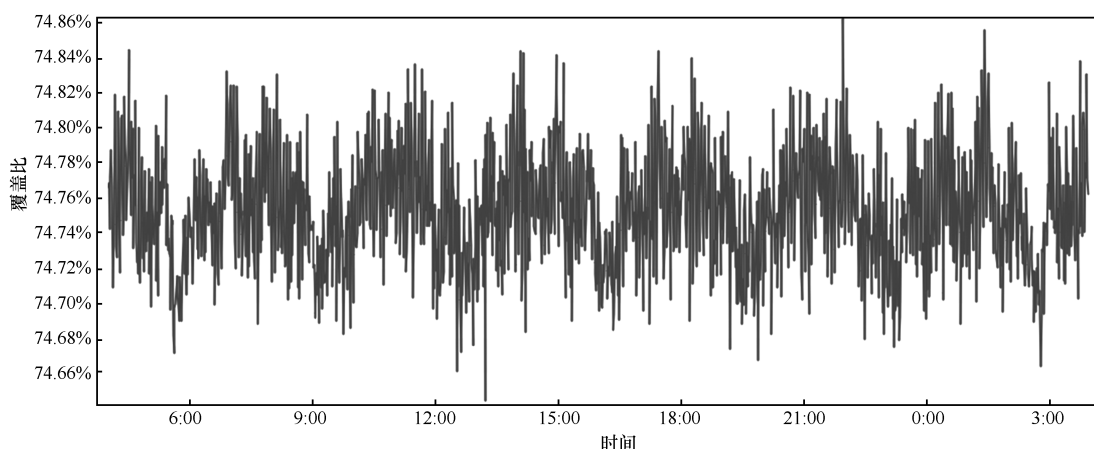


图4 倾斜轨道 216 颗卫星互联网星座对 500 km 高空的覆盖性仿真结果

高空的覆盖性仿真结果。图中横坐标为仿真时间（一天），纵坐标为低轨卫星互联网星座对 500 km 高空的覆盖比，可以看出，3 种不同星座参数情况下的覆盖比分别在 41.3%~42.4%、72.9%~74.1%、74.66%~74.80%。

受卫星轨道倾角的影响，极轨卫星对两极高纬度区域基本能够实现实时覆盖，对中低纬度区域能够实现可达覆盖。倾斜轨道星座主要满足对中低纬度区域的覆盖需求，而无法实现对两极地区的覆盖。在单重覆盖需求下，采用极轨星座能够用更少的卫星数量达到与倾斜轨道星座同样的覆盖比。

（3）非连续时间性分析

表 2、表 3、表 4 分别给出了遥感星对极轨 72 颗、极轨 144 颗、倾斜轨道 216 颗卫星互联网星座的非连续时间性仿真结果。可看出 3 种不同星座参数情况下的一天内中断次数分别为 147 次、238 次、131 次，接入总时长占比分别为 30.94%~45.75%、61.42%~70.66%、53.75%~88.29%，接入总时长占比是指遥感星与卫星互联网星座一天内的总可见时长与一天内总时间比。

对比 72 星与 144 星极轨互联网星座下的非连续时间性仿真结果可知：互联网星座数量越多，遥感星的接入性能越好；对比 216 颗倾斜轨道低轨互联网星座下不同倾角遥感卫星的非连续时间性仿真结果可知：同样卫星数量条件下，接入性能与低轨互

联网卫星轨道倾角有关，当遥感星与低轨互联网卫星的轨道倾角越接近，遥感星的接入性能越好。

表 2 遥感星对极轨 72 颗卫星互联网星座的非连续时间性仿真结果

对比项	航天器轨道类型		
	45°倾角	60°倾角	太阳同步轨道
中断次数	132 次	144 次	147 次
最长可见时长	429 s	686 s	2 233 s
一天总可见时长	7 h 25 min	8 h 33 min	10 h 59 min
接入总时长占比	30.94%	35.65%	45.75%

表 3 遥感星对极轨 144 颗卫星互联网星座的非连续时间性仿真结果

对比项	航天器轨道类型		
	45°倾角	60°倾角	太阳同步轨道
中断次数	238 次	187 次	168 次
最长可见时长	913 s	1 879 s	3 068 s
一天总可见时长	14 h 44 min	16 h 20 min	16 h 58 min
接入总时长占比	61.42%	68.06%	70.66%

表 4 遥感星对倾斜轨道 216 颗卫星互联网星座的非连续时间性仿真结果

对比项	航天器轨道类型		
	45°倾角	60°倾角	太阳同步轨道
中断次数	79 次	99 次	131 次
最长可见时长	4 755 s	2 474 s	1 068 s
一天总可见时长	21 h 11 min	18 h 2 min	12 h 54 min
接入总时长占比	88.29%	75.15%	53.75%

1.3 多普勒频移分析

低轨互联网卫星与遥感卫星轨道存在相对速



度,当低轨互联网卫星与遥感星方向相反时,多普勒频移最大。仿真场景设定遥感星飞过低轨互联网卫星的星下点,两者运行方向相反。下行频率设定为 20 GHz,上行频率设定为 30 GHz,其多普勒频移及变化率如图 5、图 6 所示。在 20 GHz 频率下,多普勒频移为 $-850.807\sim 853.342$ kHz,变化率为 $-21.85\sim -2.79$ kHz/s;在 30 GHz 频率下,多普勒频移为 $-1\,276.213\sim 1\,280.011$ kHz,变化率为 $-32.78\sim -4.185$ kHz/s。当遥感卫星和卫星互联网星座之间的传输速率不小于 10 Mbit/s 时,目前的解调器水平可纠正该频偏影响。如果依据星历参数的先验知识,可以进一步降低多普勒影响。

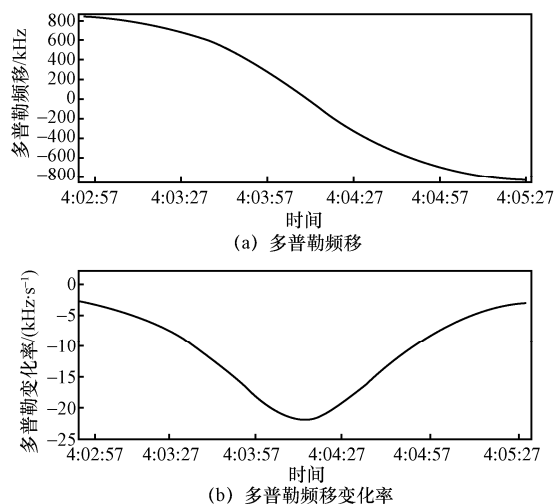


图 5 下行链路为 20 GHz 时多普勒频移及变化率

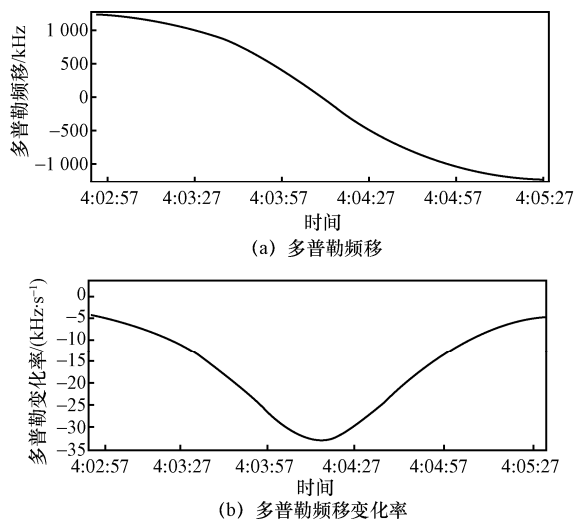


图 6 上行链路为 30 GHz 时多普勒频移及变化率

2 随遇接入场景在轨智能处理任务及星地功能分配

2.1 适合的任务特点

遥感卫星随遇接入场景下,低轨互联网卫星星座节点搭载星载智能处理单元,具备在轨处理能力;遥感卫星搭载遥感载荷和星载智能处理单元,具备遥感信息获取和在轨处理能力。该场景具备的特点是:(1)遥感卫星轨道低,可以获取较高空间分辨率的遥感影像,目标信息丰富;(2)与互联网卫星星座相比,遥感卫星的视场较小,且星座未搭载任何载荷,使得整个场景适合于小范围重点区域的执行任务;(3)遥感卫星和低轨互联网卫星星座分别独立运行,整个低轨互联网星座可接入的遥感卫星具有多样性和灵活性,如可接入可见光卫星、红外卫星、合成孔径雷达(synthetic aperture rada, SAR)卫星和高光谱卫星等,具备多种观测手段协同执行任务的能力。其优点是具备对重点区域多种手段、多方位的侦察能力,可实现精细目标信息的快速获取与产品生成,随遇接入场景分析及不同应用模式功能介绍如图 7 所示。

当面对不同时效性要求和计算密集型任务时,遥感卫星、低轨互联网星座、地面数据中心所扮演的角色和执行的工作内容有所差异。

2.2 低时延容忍任务在轨处理分析

针对时延容忍较低、目标种类多、分辨率要求高的重点区域任务,多类型遥感卫星执行任务规划指令,快速获取区域目标影像信息,并及时完成相应的预处理工作(包括辐射校正、几何校正和正射校正),然后将遥感影像上传到低轨互联网卫星星座,星座依据任务指令调用不同类别的推理模型,实现对重点区域目标的多手段检测,并将结果融合形成最终目标产品和关键信息产品,最后通过互联网星座下发至机动用户和固定用户。该任务模式下,地面数据中心主要负责轻量化模型的训练以及更新,并接收目标产品和关

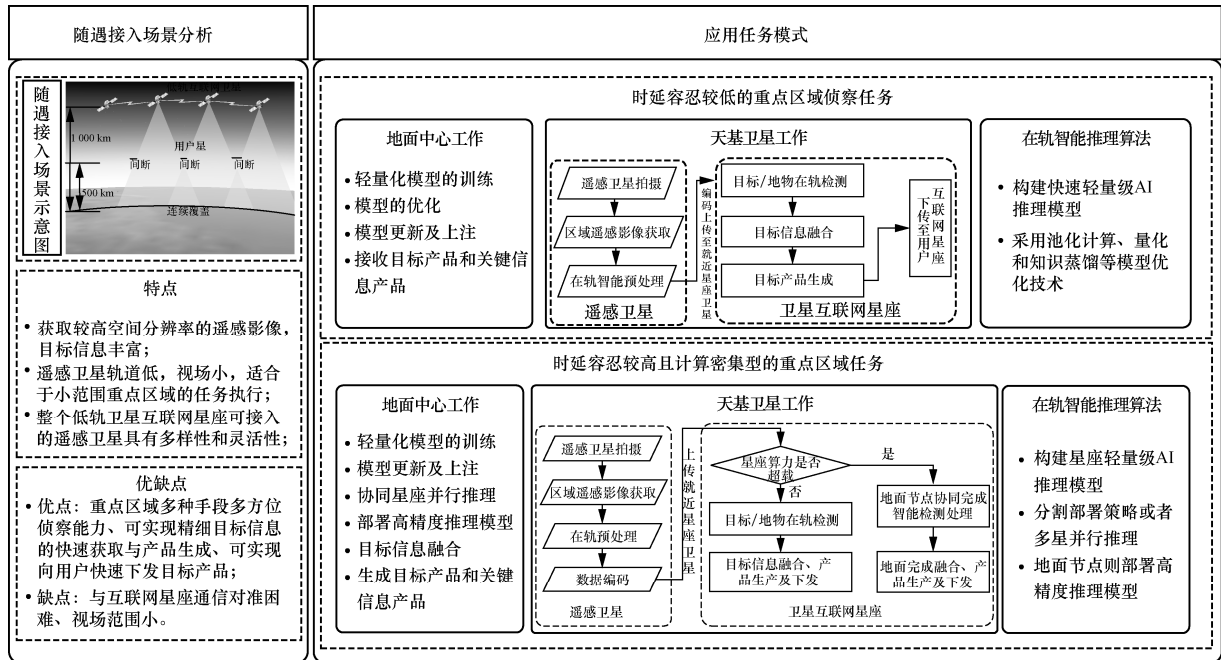


图7 随遇接入场景分析及不同应用模式功能介绍

键信息产品。为了减少模型推理时间、提高任务执行的时效性, 对需要构建的轻量级 AI 推理模型实现模型优化 (如采用池化计算、量化和知识蒸馏等技术), 缓减卫星星座边缘计算的压力。时延容忍较低的重点区域在轨处理任务流程如图 8 所示。

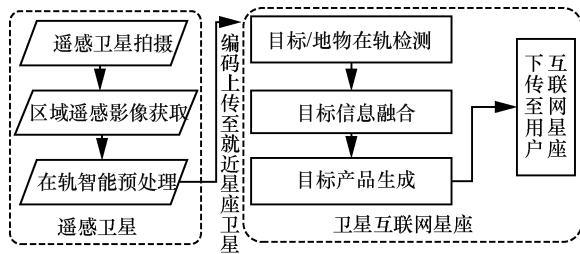


图8 时延容忍较低的重点区域在轨处理任务流程

2.3 高时延容忍任务在轨处理分析

针对需要定期进行广域精细目标检测、地震灾区复建情况查看、汛期河湖面积隔日核算等时延容忍度较高、计算密集型的关键区域任务, 需要遥感卫星持续对大范围区域进行拍摄, 获取广域范围内目标集的时序信息。在此任务模式下, 多类型遥感卫星仅负责目标信息获取、在轨预处

理、数据编码以及数据传输工作, 而低轨卫星互联网星座则负责对数据进行有效信息提取, 并进行数据融合处理, 当进行信息提取及数据融合或者需要非常精细化的信息获取时, 任务执行算力资源以及缓存资源开销超过当前星座可提供的资源能力, 可以将在地智能处理任务卸载至地面数据中心协同完成任务。由于该任务模式下提取目标的信息准确度较高, 要求的在轨智能算法模型结构比较复杂, 模型参数比较多, 消耗计算资源大, 因此, 智能推理模型大部分部署于地面节点。在低轨卫星互联网星座执行智能处理时, 需要对模型进行合理分割部署策略或者多星并行推理, 可将深度学习模型根据当前的低轨互联网星座网络状况进行分割, 将中间数据发送到地面数据中心继续完成剩余网络层的推理, 再由地面数据中心完成最终产品的生产。此任务模式下, 时延容忍较高且计算密集型的关键区域任务的流程如图 9 所示。

2.4 在轨智能信息处理星地功能分配

在基于在轨智能处理的遥感影像产品生产的

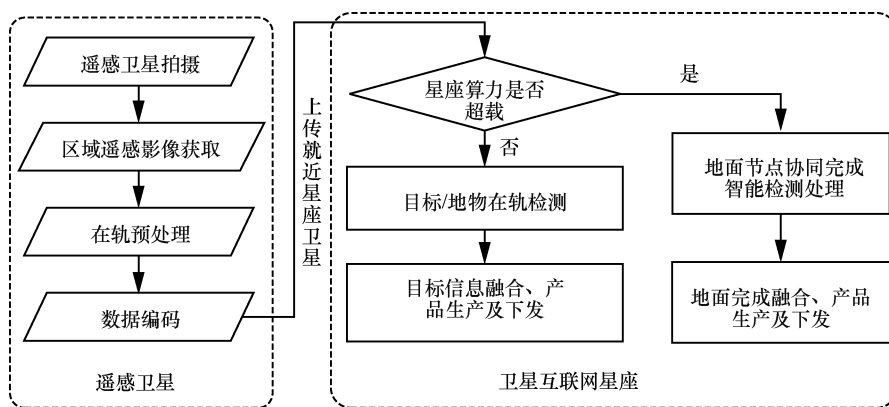


图9 时延容忍较高且计算密集型的关键区域任务的流程

全流程中，星地算法分配以及产品生产至关重要。卫星传感器拍摄影像后，需要经过数据解析、辐射校正、系统几何校正、正射校正、图像分景、图像瓦片化、智能处理、目标产品生产及目标关键信息生产等流程，完成在轨处理任务。通常情况下，遥感影像智能处理应用主要分为目标检测、语义分割和地物变化检测，目标检测和语义分割算法较为成熟，且其应用于嵌入式平台的轻量化模型大小均在 100 MB 以下，其全流程均可在星上实现，目标检测可应用的主流算法有 YOLOv3-tiny、YOLOv4-tiny、YOLOS、YOLOP、mobilenet_ssd、MobileNet 和 NanoDet 等；语义分割可应用的主流算法有轻量级 Deeplab-v3、LU-Net、CBR-ENet、SKASNet、LRUNet 和 MUNet 等。遥感影像地物变化检测是当前研究的热点和难点，虽然已经有 SECDNet、ESCNet、DTCDSN 和 STANet 等算法可应用于地物变化检测，但由这些算法构建的深度模型结构复杂、参数多、容量大；同时，算法对输入数据的要求严格，必须实现准确的地理位置配准，在轨几何校正以及辐射校正难以满足算法对位置精度的要求，因此，尚需对星上地物变化检测算法进行进一步研究，目前主要在地面完成地物变化检测任务。同时，对于高精度的检测识别任务，地面数据中心可完成高精度的几何校正和正射校正，以提取高准确率的目标信息和地物语义信息。

卫星在轨智能处理产生 5 类产品：L1 级产品、L2 级产品、目标结果产品、关键信息产品以及精确专题产品。其中，L1 级产品指经过系统几何校正和辐射校正的数据，L2 级产品指 L1 级产品经过正射校正后的数据，目标结果产品包括结果图像数据、目标位置信息、矢量信息及属性，关键信息产品则仅包含目标位置信息、矢量信息及属性，精确专题产品是经过精确地理位置确认、信息融合以及精度校验后，形成对某一类或某几类要素专题化描述的产品。对于时效性要求高、精度要求低的任务，L1 级产品、L2 级产品、目标结果产品、关键信息产品可由星上完成，并直接下传或者通过互联网星座下传地面数据中心及用户；对于精度要求高的任务，L2 级产品、目标结果产品、关键信息产品需要下传地面数据中心完成生产。精确专题产品属于高精度的综合性产品，任何情况下均由地面中心数据完成生产。卫星在轨处理算法及产品生产星地分配见表 5。

3 存在的问题及下一步研究重点

在轨处理智能算法主要存在两个方面的不足。一是在轨智能处理算法鲁棒性不高。当目标所处场景与训练场景差异较大时，算法难以适应；目标检测与识别任务中，当出现相似目标时，检测识别结果容易出现虚警。受大气和传感器噪声的影响，获取的图像质量较差，算法难以适应低

表 5 卫星在轨处理算法及产品生产星地分配表

在轨算法	结果产品
遥感卫星及互联网星座 • 预处理算法：辐射校正、系统几何校正、粗正射校正、图像切片 • 目标检测：YOLOv3-tiny、YOLOv4-tiny、YOLOS、mobilenet_ssd、MobileNet、NanoDet 等轻量化模型 • 语义分割：轻量级 Deeplab-v3、LU-Net、CBR-ENet、SKASNet、LRUNet、MUNet 等轻量化模型 • 后处理：图像拼接算法、栅格矢量转化算法	时效性要求高、精度要求低的任务：L1 级产品、L2 级产品、目标结果产品、关键信息产品
地面中心 • 预处理算法：精确几何校正、精确正射校正、影像相对配准、图像切片 • 目标检测：YOLOv4、YOLOv5、FasterR-CNN、SSD 等模型 • 语义分割：Deeplab-v3、HRNetv3、UNet、PSPNet、RefineNet 等模型 • 变化检测：SECDNet、ESCNet、DTCDSN、STANet 等模型 • 后处理：图像拼接算法、栅格矢量转化算法	精度要求高的任务：L2 级产品、目标结果产品、关键信息产品、精确专题产品

质量的遥感图像。二是在轨智能处理算法精度难以满足实际需求，现有检测识别算法在小目标检测识别邻域还有较大的提升空间。

后续的研究重点包括多元数据在轨融合算法和深度学习算法的深化两个方面。

(1) 多元数据在轨融合算法。包括电侦、可见光、多光谱、高光谱、SAR 等多种传感器，如何利用这些多源异构数据之间的互补信息对目标、地物进行更加精准化的信息提取是未来发展的重要趋势，未来需要重点研究多源信息融合技术和多模态深度学习技术等。

(2) 深度学习算法深化。目前的深度学习技术使用的卷积神经网络模型参数量巨大，使得模型类似于黑盒，研究者们无法对模型内部进行细微控制和逻辑改造，需要研究深度学习系统功能的全局解释技术、模型运作的局部解释技术等。同时需要研究面向在轨处理模型的剪枝技术、知识蒸馏技术，构建足够轻量化的智能处理算法模型，节省星上存储空间，降低算法运行功耗，减少星座网络传输带宽占用，同时控制算法模型的精度损失。

4 结束语

随着低轨卫星互联网星座和在轨智能处理技

术的发展，互联网星座支持随遇接入遥感卫星和信息在轨处理分发的应用前景备受期待，但会面临双向高动态异构星座的接入互联问题。本文重点分析了随意接入场景下时空非连续可视性和多普勒频移问题，面向低轨卫星互联网星座在不同轨道特性、不同卫星数量情况下，构建遥感卫星非连续可视情况的仿真场景，结果显示极轨星座能够采用更少的卫星数量实现与倾斜轨道星座同样的覆盖比，且当遥感星与低轨互联网卫星的轨道倾角越接近时，遥感星的接入性能越好；当星间传输速率不小于 10 Mbit/s 时，目前的解调器水平可纠正多普勒频偏影响。此外，通过分析随遇接入场景的特点，并结合遥感产品在轨智能生产全流程，低时延任务适合在遥感星及星座上完成预处理和在轨检测，而计算密集型的高时延任务在星座能力超载的情况下需星地协同完成数据管理和产品生产，且地面主要负责高精度的数据处理，并负责综合性专题产品生产。

本研究重点分析低轨互联网星座支持随遇接入遥感卫星情况下，不同轨道特性、不同卫星数量、多普勒频移对遥感卫星接入效果的影响，并分析了随遇接入场景下不同时效在轨处理任务的流程及星地功能分配，为未来低轨互联网星座及遥感卫星的发展和联合组网应用提供可靠的理论支撑。



参考文献:

- [1] 李新桐, 张亚生. 一种适用于低轨卫星的SDN网络人工智能路由方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(22): 109-114.
LI X T, ZHANG Y S. Artificial intelligence routing method for SDN network suitable for LEO satellites[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(22): 109-114.
- [2] 肖永伟, 孙晨华, 赵伟松. 低轨通信星座发展的思考[J]. 国际太空, 2018(11): 24-32.
XIAO Y W, SUN C H, ZHAO W S. Discussion on the problem of LEO communication constellation system design[J]. Space International, 2018(11): 24-32.
- [3] LORETI P, LUGLIO M, KAPOOR R, et al. Throughput and delay performance of mobile internet applications using LEO satellite access[C]//Proceedings of International Symposium on 3G Infrastructure & Services. [S.l.:s.n.], 2001.
- [4] 孙晨华, 肖永伟, 赵伟松, 等. 天地一体化信息网络低轨移动及宽带通信星座发展设想[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 43-52.
SUN C H, XIAO Y W, ZHAO W S, et al. Development conception of space-ground integrated information network LEO mobile and broadband Internet constellation[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(12): 43-52.
- [5] EDWARDS B L, ISRAEL D, WILSON K E, et al. An optical communications pathfinder for the next generation tracking and data relay satellite[C]//Proceedings of SpaceOps 2014 Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2014.
- [6] SUN C, YIN B, LI X D, et al. Adaptability analysis of IP routing protocol in broadband LEO constellation systems[J]. ZTE Communications, 2020.
- [7] 孙晨华. 天基传输网络和天地一体化信息网络发展现状与问题思考[J]. 无线电工程, 2017, 47(1): 1-6.
SUN C H. Research status and problems for space-based transmission network and space-ground integrated information network[J]. Radio Engineering, 2017, 47(1): 1-6.
- [8] 吴雪, 宋晓茹, 高嵩, 等. 基于深度学习的目标检测算法综述[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(2): 4-7, 18.
WU X, SONG X R, GAO S, et al. Review of target detection algorithms based on deep learning[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(2): 4-7, 18.
- [9] 朱均安. 基于深度学习的视觉目标跟踪算法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
ZHU J A. Research on visual object tracking algorithm based on deep learning[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [10] 姚群力, 胡显, 雷宏. 基于多尺度卷积神经网络的遥感目标检测研究[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1128002.
YAO Q L, HU X, LEI H. Object detection in remote sensing images using multiscale convolutional neural networks[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1128002.
- [11] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2014: 580-587.
- [12] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1440-1448.
- [13] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [14] HE K M, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al. Mask R-CNN[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2980-2988.
- [15] DAI J F, LI Y, HE K M, et al. R-FCN: object detection via region-based fully convolutional networks[EB]. 2016: arXiv: 1605.06409[cs.CV].
- [16] LIU L, OUYANG W L, WANG X G, et al. Deep learning for generic object detection: a survey[J]. International Journal of Computer Vision, 2020, 128(2): 261-318.
- [17] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 779-788.
- [18] 赵会盼, 乔任重, 张学军. 一种基于嵌入式平台的轻量化目标检测识别方法[J]. 计算机与网络, 2021, 47(15): 55-60.
ZHAO H P, QIAO R Z, ZHANG X J. A lightweight object detection method based on embedded platform[J]. Computer & Network, 2021, 47(15): 55-60.
- [19] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Singshott multibox detector[C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision. [S.l.:s.n.], 2016.
- [20] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 6517-6525.
- [21] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement[EB]. 2018: arXiv: 1804.02767[cs.CV].
- [22] 公明, 刘妍妍, 李国宁. 改进YOLO-v3的遥感图像舰船检测方法[J]. 电光与控制, 2020, 27(5): 102-107.
GONG M, LIU Y Y, LI G N. A ship detection method for remote-sensing images based on improved YOLO-v3[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(5): 102-107.
- [23] 王玺坤, 姜宏旭, 林珂玉. 基于改进型YOLO算法的遥感图像舰船检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1184-1191.

- WANG X K, JIANG H X, LIN K Y. Remote sensing image ship detection based on modified YOLO algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1184-1191.
- [24] 王晓青, 王向军. 应用于嵌入式图形处理器的实时目标检测方法[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0315005.
- WANG X Q, WANG X J. Real-time target detection method applied to embedded graphic processing unit[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0315005.
- [25] 农元君, 王俊杰. 基于嵌入式的遥感目标实时检测方法[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1028001.
- NONG Y J, WANG J J. Real-time object detection in remote sensing images based on embedded system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1028001.
- [26] HPE. HPE spaceborne computer[EB]. 2022.
- [27] PETRICK D, GEIST A, ALBAIJES D, et al. SpaceCube v2.0 space flight hybrid reconfigurable data processing system[C]//Proceedings of 2014 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-20.
- [28] GEIST A, BREWER C, DAVIS M, et al. Spacecube v3. 0 NASA next-generation high-performance processor for science applications[C]//Proceedings of Small Satellite Conference. [S.l.:s.n.], 2019.
- [29] 颜军, 唐芳福, 张志国, 等. 异构多核人工智能 SoC 芯片的低功耗设计[J]. 航天控制, 2020, 38(2): 62-68.
- YAN J, TANG F F, ZHANG Z G, et al. Low-power design for heterogeneous multi-core AI SoC chip[J]. Aerospace Control, 2020, 38(2): 62-68.
- [30] 何友, 姚力波, 李刚, 等. 多源卫星信息在轨融合处理分析与展望[J]. 宇航学报, 2021, 42(1): 1-10.
- HE Y, YAO L B, LI G, et al. Summary and future development of on-board information fusion for multi-satellite collaborative observation[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(1): 1-10.
- [31] 刘晓敏, 孙进, 张帅, 等. 遥感卫星智能操控技术发展研究[J]. 航天器工程, 2021, 30(4): 107-116.
- LIU X M, SUN J, ZHANG S, et al. Research on development of remote sensing satellite intelligent manipulation Technology[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(4): 107-116.
- [32] 赵军锁, 李丹, 潘晏涛, 等. 天智星云应用开发者平台设计与实现[C]//软件定义卫星高峰论坛论文集. 2018.
- ZHAO J S, LI D, PAN Y T, et al. The design and implementation of developers' platform TianZhiXingYun for smart satellite[C]//Proceedings of the Forum of Software-defined Satellite. 2018.
- [33] 于野. 基于人工智能的光学遥感在轨船舶检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- YU Y. Research on on-orbit ship detection technology of optical satellite based on artificial intelligence[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [34] 何辞, 张亚生, 孙晨华, 等. 低轨星座组网及地面 IP 路由技术适应性分析[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 36-41.
- HE C, ZHANG Y S, SUN C H, et al. Analysis on low-earth-orbit constellation networking and adaptability of ground IP routing technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 36-41.

[作者简介]



常晓宇 (1994-), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所助理工程师, 主要研究方向为遥感信息智能提取及应用。

张伟嘉 (1994-), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所助理工程师, 主要研究方向为人工智能和天基网络。

李旭东 (1991-), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所助理工程师, 主要研究方向为卫星通信。

张晓男 (1993-), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师, 主要研究方向为遥感智能处理。

王港 (1990-), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师, 遥感智能处理领域院级专家, 主要研究方向为卫星地面应用和遥感信息应用。

贾钢 (1984-), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师, 主要研究方向为卫星通信。