



研究与开发

卫星遥感与 6G 通信遥感一体化

许文嘉, 王一旭, 彭木根

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 卫星遥感是人类实现高分辨率对地观测的重要手段, 已逐步成为支撑经济社会发展以及国防安全的重要组成部分。6G 追求通信遥感计算深度融合, 通信遥感一体化成为其重要的特征。回顾了国内外卫星遥感的发展历程, 概述了卫星遥感系统现有的体系结构和 6G 时代通信遥感一体化体系架构, 阐述了人工智能驱动的典型卫星遥感技术和最新研究进展。针对 6G 时代卫星通信遥感一体化的趋势, 探讨了实现“一星多用、多星组网、多网融合、智能服务”组合型发展的技术挑战和发展趋势。

关键词: 卫星遥感; 6G 通信; 通信遥感融合

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023089

Satellite remote sensing and the integration of 6G communication and remote sensing

XU Wenjia, WANG Yixu, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Satellite remote sensing is an important means for humans to achieve high-resolution earth observation, and it has gradually become an important component supporting economic and social development as well as national defense and security. 6G pursues deep integration of communication, perception, and computation, and communication and remote sensing integration has become an important feature of it. The development of satellite remote sensing at home and abroad were reviewed, the existing system architecture of satellite remote sensing systems and the integrated system architecture of communication and remote sensing in the 6G era were outlined, and the typical satellite remote sensing technologies and the latest research progress driven by artificial intelligence were elaborated on. In response to the trend of integrating satellite communication and remote sensing in the 6G era, the technical challenges and development trends of realizing the combination of “one satellite, multiple uses, multi-satellite networking, multi-network integration, and intelligent services” were discussed.

Key words: satellite remote sensing, 6G communication, integration of communication and remote sensing

收稿日期: 2023-01-15; 修回日期: 2023-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2021YFB2900200); 国家自然科学基金资助项目 (No.6192510, No.61831002, No.61921003); 北京市科技计划项目 (No.Z221100007722012, No.Z211100004421017)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2900200), The National Natural Science Foundation of China (No.61925101, No.61831002, No.61921003), The Beijing Municipal Science and Technology Project (No.Z221100007722012, No.Z211100004421017)

0 引言

现代遥感技术起源于20世纪60年代,1960年,美国成功发射了世界上第一颗气象卫星TIROS-1,并随后于1972年发射了第一颗地球资源技术卫星ERTS-1^[1]。随着众多国家的跟进研究,卫星的空间分辨率和时间分辨率得到不断提升,卫星遥感逐渐形成了百花齐放的繁荣局面:1986年法国发射的SPOT-1将空间分辨率提高到10 m;1999年美国发射的伊科诺斯(IKNOS)卫星将空间分辨率提高到1 m;我国自2013年开始发射的部分“高分”系列卫星更是将空间分辨率提高到亚米级。

卫星遥感实现了人类观测地物在距离和观测手段两个维度的延伸。卫星可以在数万千米外观测地球,从全局气象观测、地物变化检测,到局部目标的监测和地表植被、作物分类,卫星遥感实现了多层次对地观测能力。目前,常见的卫星遥感载荷主要有两类:可见光或红外光学载荷和合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)载荷。前者感知辐射源的电磁波并利用可见光成像系统和光电转换器进行处理得到光学图像。以合成孔径雷达为代表的主动成像载荷则通过发射电磁波作用于地物并接收回波信号,再对信号进行分析处理得到雷达图像,它能够最大限度地减少天气的干扰,形成全天时和全天候的探测能力。

随着人工智能技术的不断发展,遥感数据解译正在经历从人工处理到智能处理的转变。目前,深度学习等人工智能技术在卫星遥感领域被广泛采用,在目标检测、语义分割、三维建模、变化检测等领域能够提供更便捷的处理流程和更精确的处理效果,极大地提高了遥感数据解译的效率。然而,目前的智能遥感服务在实时性和可解释性上还存在欠缺^[2],而且对大规模、高质量数据集的依赖度也较高^[3]。

随着信息时代的到来,遥感技术逐渐从国防领域的军事侦察、预警等,拓展到了民用领域的基础测绘、国土调查、环境监测、灾害评估。且随着深度学习技术与卫星遥感技术的结合,遥感应用在未来能够在更多领域保护国家安全、助力国民经济发展。

卫星遥感技术逐渐突破学科之间的“壁垒”,与其他行业互相渗透。随着6G技术的深入发展,遥感将会与卫星通信技术相融合,构建通信遥感一体化架构,实现“即感即传,全球覆盖”的战略构想。此外,人工智能算法将被更多地应用到遥感技术中,提高遥感数据的处理效率,实现实时、大众化智能遥感服务的目标。最后,为响应国家“一星多用、多星组网、多网协同、智能服务”的战略目标,6G时代的高低轨遥感卫星协同对地观测系统的发展需求更加迫切,多星协同运作和6G高速信息传输将提高遥感系统完成复杂任务的能力,加快建设我国天基信息实时智能服务系统,实现空天地海一体化发展战略。

1 卫星遥感技术发展

时至今日,以对地观测为核心的卫星遥感技术已经应用到国防安全和国民经济行业的方方面面,成为国家经济水平、科技水平、国防军事水平的综合体现,也是大国科技博弈的主要赛道之一。本节分别梳理国外和国内的卫星遥感系统发展脉络,总结现有卫星遥感系统的结构和工作模式,并据此分析6G通信时代卫星遥感面临的问题和挑战。

1.1 国外卫星遥感系统发展

国外卫星遥感系统从20世纪60年代开始快速发展,随着时间的推移遥感卫星的数量不断增加,遥感卫星应用业务规模也在不断壮大。代表性卫星遥感系统主要有美国陆地卫星(Landsat)系统、法国地球观测(SPOT)系统、欧洲航天局



欧洲遥感卫星(ERS)、加拿大雷达卫星(Radarsat)和俄罗斯资源-DK(Resurs-DK)卫星等^[5], 国外代表性遥感卫星详细数据见表1。

美国的遥感卫星系统发展最早, 在轨运行时间最长。Landsat 系列卫星于1972年成功发射第一颗, 直至2013年共发射8颗卫星, 主要用于陆地资源和水资源的调查管理、测绘制图等。Landsat-8 卫星于2013年发射, 其上搭载的陆地成像仪(operationall and imager, OLI)和热红外传感器(thermalin frared sensor, TIS)的全色空间分辨率达到15 m、多光谱分辨率达到60 m。该卫星在轨期间, 为农业、地质学、森林检测、资源勘探等领域提供了大量有价值的遥感信息。

美国也是商业高分辨率遥感卫星发展较早的国家, 高分辨率商业卫星系统是美国民用遥感的重要组成部分。1999年IKONOS 卫星发射成功, 它是世界上第一颗提供高分辨率卫星影像的商业遥感卫星, 其分辨率达到1 m。2008年发射

的GeoEye-1 商业卫星, 不仅能以0.41 m 全色分辨率和1.65 m 多光谱分辨率搜集图像, 还能够以3 m 的定位精度精确确定目标位置^[6]。除此之外, OrbView、QuickBird、WorldView 等系列的商用卫星在分辨率指标上不断精进, 达到亚米级甚至厘米级, 为遥感对地观测提供了大量高质量的数据资源。除了美国, 欧盟开展卫星遥感研究也相对较早。如法国的地球观测(SPOT)卫星系统, 经过多代的发展迭代, 为制图和地球资源开发建立了一个全面的数据库。意大利Cosmo-Skymed(地中海周边观测小卫星星座系统)由4颗高分辨率雷达卫星组成, 主要载荷为SAR-2000 合成孔径雷达, 分辨率高达1 m。德国陆地合成孔径雷达卫星系统由X 频段陆地雷达卫星(TerraSAR-X)和X 频段串联卫星(TanDEM-X)组成, 是世界上首个高精度干涉SAR 卫星系统, 使雷达双星干涉测绘技术进入业务应用阶段。国外主要在轨遥感卫星类型统计如图1所示。

表1 国外代表性遥感卫星详细数据

卫星名称	应用领域	发射时间	分辨率/m	载荷	是否在役	所属国家
Landsat1	资源	1972 年	80	光学	否	美国
Landsat-8	资源、环境	2013 年	15 (全色) 60 (多光谱)	光学	否	美国
WorldView-4	测图、灾害、 海洋	2016 年	0.31 (全色) 1.24 (多光谱)	光学	是	美国
ALOS-2	环境	2014 年	1 (全色) 3 (多光谱)	合成孔径雷达	是	日本
SPOT-7	资源、制图	2014 年	1.5 (全色) 6 (多光谱)	光学	是	法国
Radarsat 星座	环境、资源、 军事	2019 年	0.7~100	合成孔径雷达	是	加拿大
Cartosat-3	规划、资源	2019 年	0.65 (全色) 2 (多光谱)	光学	是	印度
Resurs-P4	测绘、气象、 国防	2020 年	未知	高光谱	是	俄罗斯
Capella 3	地球观测	2021 年	0.5	合成孔径雷达	是	美国
StriX-1	地球观测	2022 年	1	合成孔径雷达	是	日本

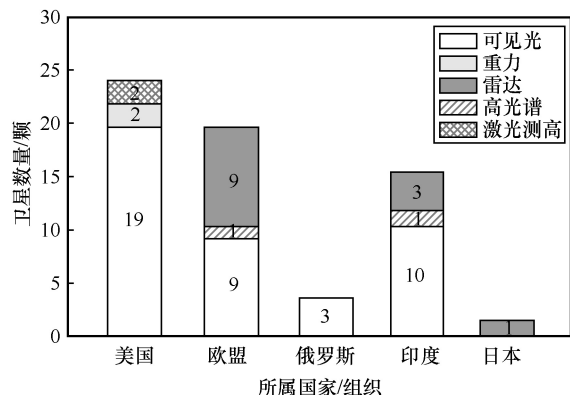


图1 国外主要在轨遥感卫星类型统计

1.2 国内卫星遥感系统发展

我国卫星遥感领域起步于20世纪80年代，经过40年的发展，我国的空间探测技术实现了弯道超车，目前处于国际先进水平。1999年，中巴地球资源卫星成功发射标志着我国陆地遥感系统的起步。在20余年的发展之后，我国已经成功构建了包括资源系列、环境系列、高分系列在内的多个对地观测系统，广泛应用于灾害检测、气象环境监测、国土资源规划等领域。2013年，我国的第一颗高分系列卫星“高分一号”发射成功，在单星上实现了大幅宽与高空间分辨率的结合，其全色空间分辨率达到2 m，是我国高分辨率卫星的里程碑。次年，“高分二号”在此基础上进一步提高空间分辨率，星下点分辨率达到0.8 m。在随后的几年，高分系列工程稳步推进，2016年发射

首颗搭载SAR的“高分三号”，2019年发射首颗载有激光测高仪的全色多光谱立体相机，2020年发射高分多模卫星，其全波段分辨率均可达到0.5 m，这是目前国内民用遥感卫星所能达到的最高分辨率。国内代表性遥感卫星见表2。

2 卫星遥感系统现状与展望

2.1 传统卫星遥感系统体系架构

传统卫星遥感系统通常由遥感卫星、测控系统、运控系统及数据处理系统组成，传统卫星遥感系统结构如图2所示。测控系统的主要作用是对卫星进行测量定轨、轨道维持和上注卫星控制指令，由测控中心和相关测控站组成。运控系统是地面系统的任务协调组织者，主要作用是接收遥感需求，对卫星观测资源、测控资源及接收资源进行统筹规划。数据处理系统对原始遥感数据进行预处理，并根据遥感用户提出的需求生成相应的数据产品，通过网络发送给遥感用户。虽然卫星遥感系统经过多年的发展，各方面的性能指标日趋完善，遥感卫星空间分辨率也已经达到亚米级甚至厘米级，但卫星遥感系统的时间分辨率依然以天为单位，无法实时更新遥感数据^[7]；遥感卫星普遍位于中高轨道，卫星重访周期较长。此外，遥感卫星获取的数据需要下注到地面进行处理，极大地限制了遥感卫星的实时响应能力。

表2 国内代表性遥感卫星

卫星名称	应用领域	发射时间	载荷	分辨率/m	是否在役
风云一号A星	气象	1988年	红外与可见光扫描辐射计	1 100	否
中巴地球资源卫星01星	资源	1999年	红外扫描仪 CCD相机	20	否
高分一号	资源	2013年	全色多光谱相机	2（全色） 8（多光谱）	是
高分三号	资源	2016年	合成孔径雷达	1	是
高分多模卫星	资源	2020年	高分辨率相机、大气同步校正仪	0.5（全色） 2（多光谱）	是
吉林一号高分03星	资源	2020年	光学	亚米级（全色） <4（多光谱）	是
海洋2C卫星	海洋	2020年	微波/激光测高仪	测高精度小于0.04	是
高分十一号04星	规划、防灾	2022年	光学	0.6	是

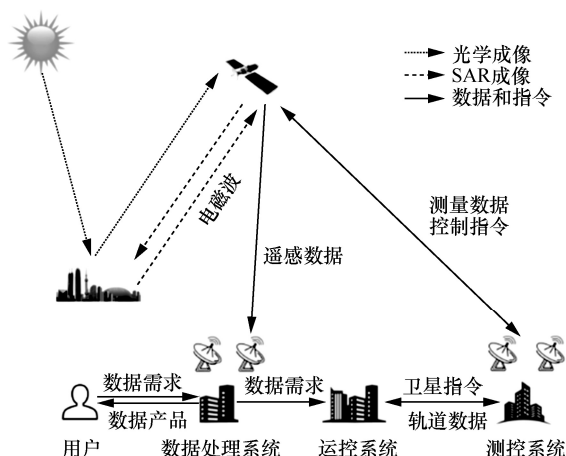


图2 传统卫星遥感系统结构

2.2 6G 通信遥感一体化体系架构设想

未来的6G技术会将卫星与地面通信深度融合，构建空天地一体化的全球全域网络，这个网络构建完成后，将形成一个对全球近地空间无缝覆盖的宽带网络，全球近地空间任意位置将可以采用无线方式快速接入网络进行数据传输。本文对6G通信遥感一体化体系架构的设想如图3所示。

其中地面部分可以将传统的地面站（数据处理系统、运控系统、测控系统等）整合为一个地

面遥感中心，其主要职能包括卫星测量控轨、卫星控制和任务指令生成与上注、原始遥感数据接收处理以及遥感信息分发。地基接入点是一些配备对空天线的基站，遥感卫星可以通过地面网络的空中接口接入。信关站主要由射频分系统、基带分系统组成，总体功能包括卫星馈电侧无线信号收发和射频信号处理、基带信号处理和空口协议处理等，卫星可以通过信关站进行星地传输。此外，地面重要用户节点可以通过搭载便携终端，实现卫星直连，完成用户端直接上注指令并获取遥感数据。

空中可搭建低轨遥感、通信一体化低轨卫星^[8]，在单颗星上搭载多种载荷，可同时进行通信与遥感任务，从而实现“一星多用”的设想。该卫星可利用单一传输信号进行通信与遥感，提高频谱的利用效率。通信遥感一体化卫星的设计需要考虑通信载荷和遥感载荷的设计。对于通信载荷，为了支撑遥感信息宽带传输的时效性要求，满足信关站、卫星和卫星终端之间的通信需求，至少需要提供20 Gbit/s以上的宽带通信保障。对于遥感载荷，不仅要实现较高的遥感空间分辨率，还

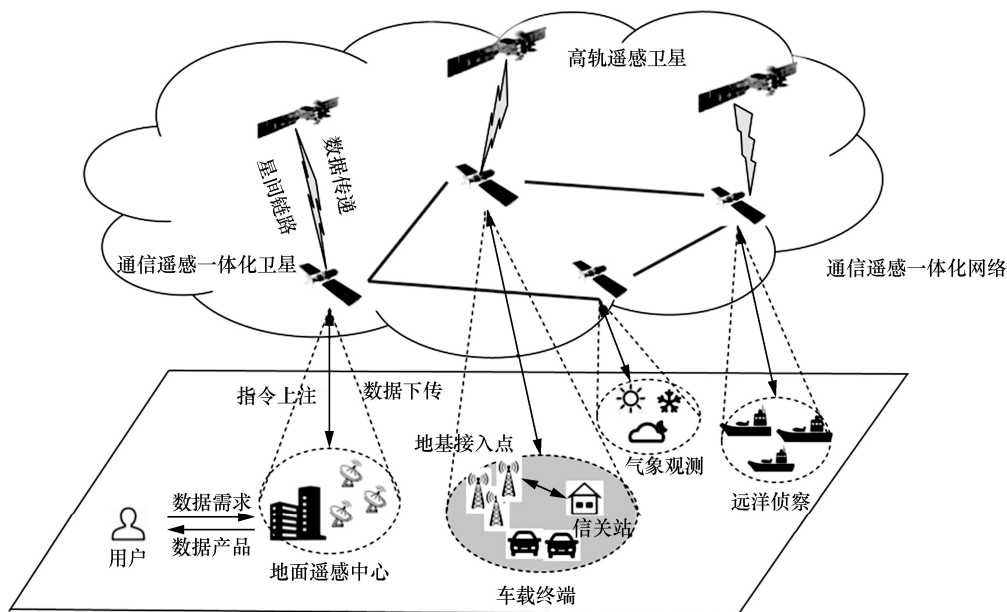


图3 本文对6G通信遥感一体化体系架构的设想

需要配备足量的存储和计算资源,能够实现星上数据存储与实时处理。

此外,该架构可联合多颗通信遥感一体化低轨卫星,以及已有的高轨遥感卫星建链组网,通过多颗卫星灵活组网、星间链路和星地链路高速信息传输,实现“多星组网、多网协同”的高效实时遥感服务。

在新的架构下,用户可以按照传统地面网络的通信方式,与地面遥感中心建立连接,发送数据需求并接收数据产品。遥感中心接收到用户的数据需求后,通过星地链路将需求上注到通信遥感一体化卫星,并通过星间链路将遥感需求分配给对应的遥感卫星,获取相应遥感资源。此外,地面终端用户也可实现卫星直连,上注观测指令,卫星接收指令后进行实时观测,在星上分析处理数据,并将数据结果返回用户。

6G 技术将连接地面无线网络与卫星通信网络,以超快的传输速度实现全球覆盖与空天地一体^[9]。6G 通信时代的卫星遥感系统或将摆脱对地面测控、运控和数据处理系统的依赖,能够实现即感即传的大众遥感服务。此外,构建通信遥感一体化卫星系统能够最大化利用卫星资源,实现应急业务快速响应。其中,遥感实时星上数据处理技术、通信遥感一体化技术、多星协作运控系统等技术亟待快速发展。

3 人工智能驱动的卫星遥感技术应用

随着人工智能(artificial intelligence, AI)和深度学习领域的快速发展,以及中央处理器(central processing unit, CPU)、图形处理器(graphics processing unit, GPU)等计算机硬件水平提高带来的算力增强,人工智能技术在目标检测、图像识别等任务上的表现已经超越人类。传统的遥感图像解译需要较高的学习成本和人力资源,且解译效率低下,难以满足大规模应用的实时解译需求。近年来,随着 AI 在许多领域的成功

应用,科学家们也开始尝试通过人工智能技术赋能遥感解译系统,将深度学习中的相关算法应用到遥感图像的目标检测、变化检测、三维建模、语义分割和场景分类等任务中,实现全面、精准、高效的遥感图像解译。人工智能技术在卫星遥感中的应用如图 4 所示。

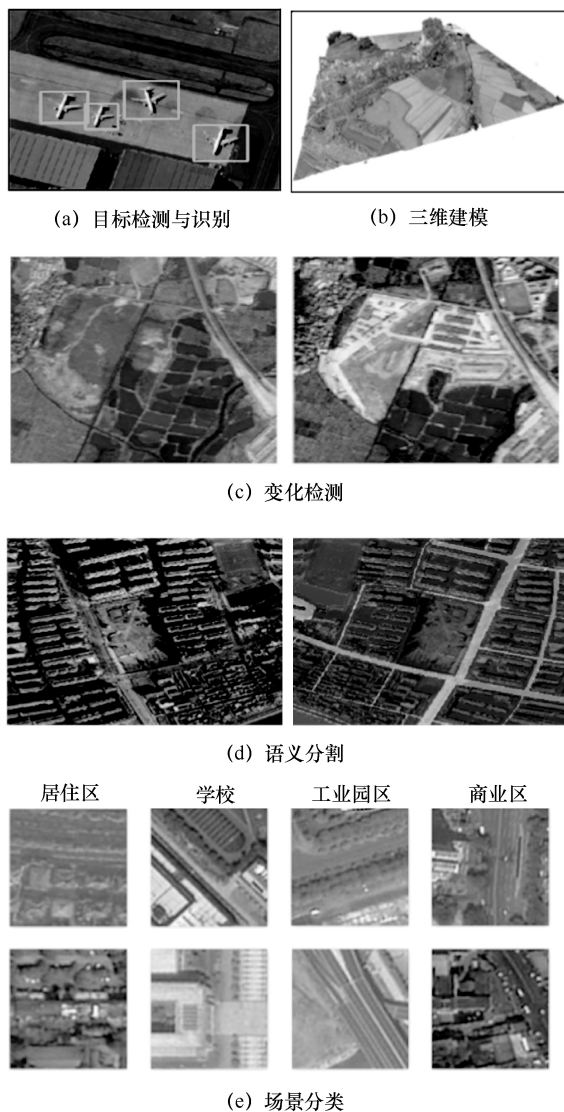


图 4 人工智能技术在卫星遥感中的应用

3.1 目标检测与识别

遥感图像目标检测与识别对遥感影像中的特定目标进行识别和定位,是空天地海一体化观测系统中的一项关键技术,广泛应用在侦察、监视、预警、搜救等领域。传统的目标检测算法大致分



为3步:选择区域、提取特征和构建分类器分类,该算法的弊端是时间复杂度较高。随着遥感成像系统分辨率的提高和数据量的扩大,使用传统的图像处理算法已经无法保障图像解译的实时性和准确性。基于深度学习的遥感图像目标检测与识别算法根据是否有候选区域生成,可分为两阶段检测方法^[10]与单阶段检测方法^[11]。这些方法的精确度和速度都远超传统算法,已经广泛地应用到遥感目标检测与识别中。此外,针对尺度跨度较大的数据集,可以构建多尺度的特征表达,包括基于图像金字塔的多尺度目标检测^[12]、基于网络内特征金字塔的多尺度目标检测^[13]等。

3.2 三维建模

遥感图像的三维建模在资源检测、自然地理研究、城市规划建设等诸多领域都有着十分重要的应用。根据数据处理、建模、渲染等关键方法的不同,业界将遥感图像三维模型生成分为表面模型生成方法、模式匹配生成方法和三维过程化内容生成(3D procedural content generation, 3D-PCG)方法3种。3种方法在不同的建模场景中各有优势:表面模型生成方法基于点云和过程化生成网络,主要应用于视觉场景的建模生成过程;模式匹配生成方法将遥感地图中的不同位置轮廓信息与数据库中已知的建筑结构相匹配,之后再将拆分的子结构组装起来形成建模仿真图;3D-PCG方法将三维建模中的建筑生成工作抽象为二维地表网络的结构化运算^[14],其建模能力更强、渲染效果更好。近年来,基于多源数据融合的三维建模成为主流研究方向,常见的融合建模方法主要结合航空摄影技术或地面近景摄影技术^[15]。

3.3 变化检测

遥感图像的变化检测利用卫星拍摄的遥感影像监测地表发生的变化,在定位变化区域的同时还能识别变化的类型。目前变化检测已经广泛应用于自然灾害评估、监测违章搭建等领域。传统的变化检测算法包括像素级和对象级的直接比较

法和分类后比较法等。

基于人工智能的遥感图像变化检测方法可以分为基于度量学习的方法和基于分类的方法。基于度量学习的方法借助深度神经网络产生不同时期遥感影像差值图,再设定合适的阈值进行分割^[16-17]。基于分类的方法将变化检测看作像素级的分类问题,如DeepLabv3和DeepLabv3+在全卷积网络(fully convolutional network, FCN)的基础上引入空洞金字塔池化模块增大感受野,并在神经网络末端引入条件随机场进行优化,提高了分类精度。近期,Fu等^[18]提出了一种H-BIT遥感影像变化检测方法,通过HRNet融合高分辨率和高语义信息,整合特征向量与语义特征输出强化特征,取得了很好的检测效果。

3.4 语义分割

遥感图像的语义分割就是为每个像素赋予类别标签,把不同类型的地物、物品提取出来的过程,广泛应用于城市规划、智能地图、智慧城市等领域。传统的语义分割方法有 k 均值(k -means)、支持向量机、随机森林、决策树等。基于深度学习的遥感图像语义分割方法大体可以概括为3类:基于全卷积神经网络、基于编码阶段与解码阶段的网络模型和基于DeepLab系列的网络模型。其中效果最好的是基于DeepLab系列的模型,该系列模型创新性地引入条件随机场对语义分割的结果进行处理,使得图像分割的边缘变得平滑,细节变得突出,输出效果相较前两种方法有了很大的提升。2022年,Su等^[19]提出通过深度多特征学习的方法对高分辨率遥感图像进行语义分割,在Potsdam数据集上的准确率达到91.91%。

3.5 场景分类

遥感图像的场景分类试图通过地面物体的空间排列和结构模式的变化,将给定的遥感图像进行正确的分类,在城市资源管理、农业监测、自然灾害检测和地理数据获取等领域发挥着重要的作用。

卷积神经网络(convolutional neural network,

CNN) 中的多层卷积层可以逐层深入地提取语义信息, 从本质上解决了基于手工特征做场景分类的缺点。其中比较具有代表性的方法有基于迁移学习的方法、基于注意力机制的方法、基于多尺度特征变换的方法等。2020 年 Sun 等^[20]使用门控双向网络聚合提取图像特征, 2021 年 Ma 等^[21]改进 CNN 骨架网络, 得到能够更好地抽取遥感图像特征的 SceneNet。这些方法不仅摆脱了对人工的依赖, 能够实现端到端的场景分类识别, 训练出的模型还具有更高的精确度和泛化能力, 人工智能已经成为该领域不可或缺的一部分。

3.6 其他应用

经过多年的发展, 卫星遥感与人工智能、大数据、云计算等前沿技术已经充分融合。智能遥感的应用不仅仅局限于能源勘测、环境监测、地质灾害监测等方面, 还成为气象、海洋、安防、城市规划建设等领域的基石, 为政府科学决策、科研院校研究和社会公众关注应用提供专业遥感信息服务。卫星遥感技术的应用如图 5 所示。例如, 2019 年年底的蝗灾从非洲蔓延到中南亚, 破坏性和扩散性极强, 为了提前做好防范, 估计损失, 我国利用遥感图像处理软件对蝗灾区及其周围的多光谱影像进行一系列预处理, 通过算法计算, 得到巴基斯坦不同地区遭受蝗灾之后的植被受损情况, 提醒当地居民提前做出防范举措。

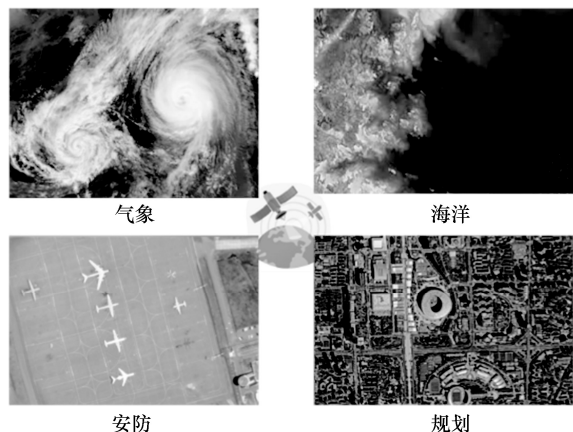


图5 卫星遥感技术的应用

地球海洋物产丰富, 但是随着海岸带资源的大幅开发, 海岸带资源环境面临严峻考验。通过卫星遥感技术, 可以将多时相遥感资料叠加对比, 明确变化的时间、程度和范围, 这为政府部门制定和修改相关法律法规提供了指导, 为海洋资源的科学开发利用提供了保障。

然而, 当前针对遥感图像解译的深度学习算法仍面临众多问题和挑战。当前越来越多的遥感应用对实时性提出了更高的要求, 但现有深度学习算法主要针对光学遥感图像解译展开, 而 SAR、高光谱等多源遥感数据因为其辐射特征、数据分布有较大差异, 难以使用统一的算法进行处理, 这要求研究者们根据数据特性提出有效算法。此外, 单一数据源开展目标信息解译存在一定的不可靠性和不准确性。

4 未来展望与技术挑战

遥感技术已经成为人类探索地球的重要手段, 极大地扩展了人们对地球的认知。随着 6G 通信时代的到来, 信息传递实现了超高带宽和极低时延, 融合 6G 的卫星遥感技术或能实现“一星多用、多星组网、多网融合、智能服务”的组合型发展^[22]。遥感技术与通信技术的结合将更加紧密, 通信遥感融合的发展方向引起了越来越多的关注^[23]; 多星协同遥感蓬勃发展, 多个星网星链完成构建。此外, 遥感技术还与人工智能技术紧密耦合, 越来越多的智能遥感服务出现在日常生活中。综合上述发展趋势, 本节围绕 6G 时代灵活的通信遥感一体化架构, 实时、大众化卫星遥感服务和高低轨遥感卫星协同探测感知 3 个主题展开介绍。

4.1 6G 时代灵活的通信遥感一体化架构

如今, 5G 技术已经融入日常生活中, 为国民经济和生活提供了很多便利, 而 6G 通信还处于发展初期, 卫星通信的研究进程也落后于地面通信^[24]。通信遥感一体化技术的重要发展方向之一是在部



署单一系统的同时进行通信与感知,有效提高频谱利用率、节约卫星轨道资源并降低系统维护成本^[25]。6G 能够将陆地无线通信技术和中高低轨的卫星移动通信技术及短距离直接通信技术融合在一起,助力通信遥感一体化架构的搭建。

目前 6G 的通信遥感一体化研究主要有以下 3 个研究热点和问题挑战:第一,6G 网络基于全频段,覆盖全场景,因此需要探索新型低频和高频通信技术,提高数据传输速率,满足海、陆、空各种服务环境;第二,虽然通信遥感融合卫星具有多种功能,但考虑卫星功耗以及处理能力限制,需要建立更加灵活的通感融合体系架构,对遥感、数据传输等任务在不同卫星间进行合理统一规划,以保证能够在对遥感需求快速响应的同时保持对地通信链路的稳定;第三,通信遥感一体化过程中数据融合处理与资源统筹调用标准尚未建立,系统如何进行时域、频域、空域、波束、功率等资源分配以权衡通信遥感的需求,是当前一体化系统的重要发展问题之一。

4.2 实时、大众化卫星遥感服务

随着社会的发展,越来越多的应用对遥感数据实时、大众化处理提出了更高的要求,如智能交通、灾害预警、空间安全等,这些应用对数据获取和处理的速度都提出了很高的要求。限制当前卫星遥感系统实时化、大众化发展的主要因素有以下几点:首先,高分辨率遥感卫星载荷的焦距长、口径大、分辨率高,卫星为了维持相关设备的正常运行,以及复杂人工智能模型的实时运转,会产生较高的功耗,这对卫星的续航能力提出很高的要求;其次,深度学习模型通常结构复杂、参数量大,难以直接在星上部署,通常需要将数据回传给地面数据处理站,这就导致图像智能解译无法满足在轨实时处理的需求。综上所述,面向实时化、大众化卫星遥感服务的发展方向有如下几个方面:一是实现遥感数据智能在轨处理,要求减少遥感数据智能处理解译所需的计算资源

和信息传递的时间开销,从而提高其实时性;二是构建通信遥感融合的天地一体化服务网络,深度耦合天基信息服务平台与地面通信网络,实现“一星多用、多星组网、多网融合、智能服务”的目标,提供大众化、智能化遥感服务^[26]。

被带宽、时延和计算资源限制的遥感应用痛点在 6G 时代或能得到有效解决。首先,6G 的综合性能预期将是 5G 的 10~100 倍,空口时延低于 0.1 ms,能够实现高速遥感信息传输。其次,得益于 6G 星上计算处理能力的提高和功耗的降低,以及地面终端直接接入 6G 通信网络,遥感信息无须回传到地面的数据处理系统,即可实现星上智能处理计算,这使得实时化、大众化、智能化的遥感服务和遥感产品更容易普及。此外,低轨通信遥感一体化卫星与高轨卫星组网,可以实现多源遥感协同观测,弥补单源信息系统的诸多不足。

4.3 高低轨遥感卫星协同探测感知

当前大多遥感卫星彼此独立,相互之间不能实现信息的共享与协调合作。工作于地球静止轨道的高轨遥感卫星能够实现全国定期覆盖,对全国领土实现广域监测,但其空间分辨率较低、响应时间长、任务规划复杂、针对应急响应的效率较低。工作于太阳同步轨道的低轨卫星具有空间分辨率高、成本低等优势,组成卫星星座后可以实现全球任意地点每日多次重访,具有较高的时间分辨率,近年来成为遥感领域的研究热点。吉林一号是我国目前最大的商业遥感低轨卫星星座,截至 2022 年 12 月 9 日,在轨卫星数量增至 83 颗,可对全球任意地点实现每天 28~30 次重访。高低轨遥感卫星协同对地观测系统能够综合高低轨卫星的优势,加快建设我国天基信息实时智能服务系统,实现空天地海一体化发展战略。该战略构想可由数百颗低轨高分辨率光学和雷达遥感卫星构成低轨卫星星座,协同高轨遥感卫星、导航卫星以及低轨通信卫星,并接入地面移动互联网^[27]。通过高轨遥感卫星实时监控热点区域,借助导航和通信卫星实现高速信息传输和资源

调度, 统筹低轨遥感卫星资源进行观测, 完成时间分辨率达到分钟级、空间分辨率优于分米级、数据处理时间优于分钟级的对地观测与空天信息服务。

面向高低轨遥感卫星协同探测感知的发展有如下几个方面: 一是加快实现多载荷、高分辨率的低轨卫星星座建设; 二是利用人工智能技术, 实现遥感信息在轨实时智能处理; 三是研究高低轨卫星协同资源调度系统, 实时高效响应遥感观测需求; 四是加强与通信、导航卫星以及 6G 通信系统的融合与对接, 为大众提供通信、导航、遥感一体化信息服务。

5 结束语

6G 通信技术能够连接地面无线网络与卫星通信网络, 以超快的传输速度实现全球覆盖与空天地一体^[28], 为卫星遥感实现“即感即传、全球实时覆盖”提供发展机遇。本文回顾了国内外卫星遥感系统的发展历程, 详述了卫星遥感技术的应用与挑战。最后分析了 6G 通信遥感一体化架构、发展实时大众化卫星遥感服务、开展高低轨卫星协同观测的空天信息智能服务的若干展望与技术挑战, 希望能助力我国天基信息实时智能服务系统建设和空天地海一体化的相关研究。

参考文献:

- [1] 周晓青, 彭明媛, 胡芬. 我国陆地遥感卫星发展现状与展望[J]. 卫星应用, 2022(9): 14-19.
ZHOU X Q, PENG M Y, HU F. Development status and prospect of land remote sensing satellites in China[J]. Satellite Application, 2022(9): 14-19.
- [2] 王成龙, 赵倩, 赵琰, 等. 基于深度可分离卷积的实时遥感目标检测算法[J]. 电光与控制, 2022, 29(8): 45-49.
WANG C L, ZHAO Q, ZHAO Y, et al. A real-time remote sensing target detection algorithm based on depth separable convolution[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(8): 45-49.
- [3] 李红光, 王玉峰, 杨丽春, 等. 基于元学习的小样本遥感图像目标检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2022: 10.13700/j.bh.10015965.2022.0637.
LI H G, WANG Y F, YANG L C, et al. Small sample remote sensing image target detection based on meta-learning[J]. Journal Beijing University of Aeronautics and Astronautics: 2022:10.13700/j.bh.10015965.2022.0637.
- [4] 吴珏人. 美商业遥感卫星军事应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
WU J R. Research on military application of commercial remote sensing satellites in the United States[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [5] GUPTA R P. Remote sensing geology[M]. Berlin: Springer, 2018.
- [6] 童庆禧, 孟庆岩, 杨杭. 遥感技术发展历程与未来展望[J]. 城市与减灾, 2018(6): 2-11.
TONG Q X, MENG Q Y, YANG H. Development course and future prospect of remote sensing technology[J]. City and Disaster Reduction, 2018(6): 2-11.
- [7] ZHANG B, WU Y F, ZHAO B Y, et al. Progress and challenges in intelligent remote sensing satellite systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 1814-1822.
- [8] 王密, 杨芳. 智能遥感卫星与遥感影像实时服务[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1586-1594.
WANG M, YANG F. Intelligent remote sensing satellite and remote sensing image real-time service[J]. Acta Geodaetica-Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1586-1594.
- [9] 彭会湘, 陈金勇, 杨斌, 等. 6G 通信时代的卫星遥感系统展望[J]. 无线电工程, 2020, 50(7): 523-529.
PENG H X, CHEN J Y, YANG B, et al. Prospect of satellite remote sensing system in 6G communication[J]. Radio Engineering, 2020, 50(7): 523-529.
- [10] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1440-1448.
- [11] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement[J]. arXiv preprint, 2018, arXiv:1804.02767.
- [12] TANG L B, TANG W, QU X, et al. A scale-aware pyramid network for multi-scale object detection in SAR images[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 973.
- [13] SHAO X T, WANG Q, YANG W, et al. Multi-scale feature pyramid network: a heavily occluded pedestrian detection network based on ResNet[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2021, 21(5): 1820.
- [14] MCQUIRE S. One map to rule them all? Google Maps as digital technical object[J]. Communication and the Public, 2019, 4(2): 150-165.
- [15] YU D W, JI S P, LIU J, et al. Automatic 3D building reconstruction from multi-view aerial images with deep learning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 171: 155-170.
- [16] BOVOLO F, BRUZZONE L. A novel theoretical framework for unsupervised change detection based on CVA in polar domain[C]//Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Piscataway: IEEE Press,



- 2007: 379-382.
- [17] JIA L, LI M, ZHANG P, et al. Remote-sensing image change detection with fusion of multiple wavelet kernels[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(8): 3405-3418.
- [18] 傅绘锦. 一种新的基于深度学习的遥感影像变化检测算法: H-BIT 方法的提出与应用[J]. 地理空间信息, 2023, 21(1): 53-57.
- FU H J. A new remote sensing image change detection algorithm based on deep learning—H-BIT method and its application[J]. Geospatial Information, 2023, 21(1): 53-57.
- [19] SU Y Z, CHENG J, BAI H W, et al. Semantic segmentation of very-high-resolution remote sensing images via deep multi-feature learning[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 533.
- [20] SUN H, LI S Y, ZHENG X T, et al. Remote sensing scene classification by gated bidirectional network[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(1): 82-96.
- [21] MA A L, WAN Y T, ZHONG Y F, et al. SceneNet: remote sensing scene classification deep learning network using multi-objective neural evolution architecture search[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 172: 171-188.
- [22] 李德仁, 王密. 高分辨率光学卫星测绘技术综述[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(2): 1-11.
- LI D R, WANG M. A review of high resolution optical satellite surveying and mapping technology[J]. Spacecraft Recovery&Remote Sensing, 2020, 41(2): 1-11.
- [23] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 1-11.
- YAN S, PENG M G, WANG W B. Integration of communication, sensing and computing: the vision and key technologies of 6G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(4): 1-11.
- [24] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 等. 面向 6G 的卫星通信网络架构展望[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 1-14.
- WU X W, JIAO Z F, LING X, et al. Out look on satellite communications network architecture for 6G[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 1-14.
- [25] 彭木根, 张世杰, 许宏涛, 等. 低轨卫星通信遥感融合: 架构、技术与试验[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 13-24.
- PENG M G, ZHANG S J, XU H T, et al. Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 13-24.
- [26] 李德仁, 丁霖, 邵振峰. 面向实时应用的遥感服务技术[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 15-24.
- LI D R, DING L, SHAO Z F. Application-oriented real-time remote sensing service technology[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 15-24.
- [27] 王静巧, 车航宇, 史小金, 等. 高低轨遥感卫星联合监测火灾模式分析[J]. 航天器工程, 2019, 28(6): 101-105.
- WANG J Q, CHE H Y, SHI X J, et al. Analysis of fire modes for joint monitoring of high and low orbit remote sensing satellites[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(6): 101-105.
- [28] 李德仁, 沈欣. 我国天基信息实时智能服务系统发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 138-143.
- LI D R, SHEN X. Research on the development strategy of RealTime and intelligent space-based information service system in China[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 138-143.

[作者简介]



许文嘉 (1994—), 女, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副研究员, 主要研究方向为空天遥感数据感知与解译。



王一旭 (2001—), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为遥感图像智能解译。



彭木根 (1978—), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院院长、教授, 网络与交换技术国家重点实验室副主任, IEEE Fellow, 主要研究方向为空间信息通信、通信感知计算融合、空天地海一体化网络等。