

遥感卫星计算传输及其关键技术

呼延琅^{1,2}, 李映¹, 周 詮², 魏佳圆², 刘娟妮², 张 怡²

(1.西北工业大学计算机学院, 陕西 西安 710001;

2.中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710072)

摘要: 遥感数据的多样性及获取能力增加使得星上产生的数据量呈几何级增长, 这给遥感卫星数据传输系统造成了巨大压力, 导致遥感卫星数据传输系统无法满足实时传输的需求, 成为遥感数据应用的瓶颈。研究海量遥感卫星数据传输系统及技术是目前国际卫星信息网络科学技术的前沿领域之一。围绕遥感卫星高速数据传输瓶颈、遥感载荷利用率以及星上存储等关键问题, 将传统的卫星数据传输系统与星上智能处理相结合提出一种遥感卫星计算传输框架, 并分析其关键技术。

关键词: 计算传输; 星上智能处理; 智能遥感; 软硬件协同

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022022

Remote Satellites Computing transmission and Key Technologies

Hu Yanlang^{1,2}, Li Ying¹, Zhou Quan², Wei Jiayuan², Liu Juanni², Zhang Yi²

1. School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

2. Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, CAST Xi'an, Xi'an 710100, China

Abstract: The diversity of remote sensing data and the increase of acquisition ability make the amount of data generated on the satellite increase geometrically. This situation puts tremendous pressure on the remote satellite data transmission system. This makes the remote satellite data transmission system unable to meet the needs of real-time transmission and becomes the bottleneck of remote sensing data application. The research on massive remote satellite data transmission systems and technology is one of the frontier fields of international satellite information network science and technology. Focused on the critical problems of remote satellite real-time data transmission bottleneck, remote sensing data transmission timeliness, remote sensing load utilization, and onboard storage, combined with the traditional satellite data transmission system with onboard intelligent processing, a new remote satellite computing transmission framework was proposed, and its key technologies were analyzed.

Keywords: computing transmission, on board intelligent processing, intelligent remote sensing, hardware and software co-design

0 引言

随着我国航天技术的不断发展, 卫星互联网是未来通信网络的重要组成部分^[1]。由高轨卫星网络、中低轨卫星网络、临空网络、地面蜂窝网络等共同组成立体覆盖移动通信网络, 形成了全球无缝立体覆盖的卫星互联网。在这种态势下^[2], 实时高效遥感卫星数据传输尤为重要。

目前, 我国遥感卫星进入了快速发展阶段, 基本建成了完备的高分辨率对地观测系统, 迈入了高空间分辨

率、高时间分辨率、高光谱分辨率遥感时代^[3]。空间分辨率最高可达0.5 m。在时间分辨率方面, 高分四号卫星可实现每天“10秒级”实时观测我国及周边地区。在光谱分辨率方面, 高分五号02星上搭载的可见短波红外高光谱相机共有330个谱段, 光谱分辨率最高达到5 nm^[4]。高分辨率对地观测系统广泛应用在国土、农业、林业、气象、海洋等不同行业中。

随着我国遥感卫星不断发展, 时间分辨率、空间分

收稿日期: 2022-01-02; **修回日期:** 2022-03-10

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2020YFB1808003); 中国航天科技集团公司创新基金 (No. Y20-JTKJCX-02); 国家重点实验室基金 (No. 6142411432107)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1808003), The Innovation Foundation of CASC (No. Y20-JTKJCX-02),

The National Key Laboratory Foundation (No. 6142411432107)

分辨率和光谱分辨率不断提高,遥感卫星获取的数据量激增。遥感卫星获得的大容量遥感数据需要通过数据传输系统传回地面,这一需求给遥感卫星数据传输系统带来了极大的挑战。

在卫星遥感技术发展的带动下,卫星数据传输系统也在逐渐发展,数据传输速率从几十Mbit/s发展到几百Mbit/s,再到数Gbit/s^[5]。SPOT1~SPOT4的传输速率为50 Mbit/s, SPOT-5的传输速率为150 Mbit/s, landsat-7的传输速率达到280 Mbit/s。我国“资源一号”和“资源二号”的传输速率分别达到了113 Mbit/s和205 Mbit/s。IKONOS-2卫星的数据传输速率达到320 Mbit/s。法国和意大利联合研制的Pleiades光学相机码传输速率高达600 Mbit/s。

2014年发射的高分二号卫星是我国自主研制的首颗空间分辨率优于1 m的光学遥感卫星,空间分辨率可达0.8 m^[6],其载荷输出速率达到了6.8 Gbit/s,而数据传输带宽为900 Mbit/s。2020年发射的高分五号卫星是我国高分辨率对地观测系统重大专项中实现高光谱分辨率观测的卫星,卫星装载了多台高光谱分辨率有效载荷,输出码速率高达2.27 Gbit/s,而对地数据传输能力只有900 Mbit/s^[7,8]。2021年发射的高分七号卫星是一颗高精度测绘卫星。高分七号卫星装载的有效载荷系统产生8 Gbit/s的有效数据,接口速率达到11 Gbit/s。为了满足相机高速成像传输需求,卫星配置了高速数据处理与传输分系统,实现了双通道1.2 Gbit/s的对地传输能力^[9]。

从以上分析可以看出遥感卫星数据传输经过多年发展已经比较成熟,传输能力也有了很大的提升,从50 Mbit/s发展到150 Mbit/s、300 Mbit/s、600 Mbit/s,一直到1.2 Gbit/s。此外,有学者提出自适应卫星数据传输^[10]以及按需传输^[11],在传统数据传输框架下对速率和性能进行提升。

即便如此,遥感卫星数据量呈几何级增长带来以下几个问题:第一,卫星数据传输系统无法满足高速传输的需求,即使压缩后仍难以实时下传;第二,数据传输时效性难以满足,卫星获取数据经过星上存储及地面处理分发过程,从卫星获取数据到用户得到有效信息需要经过数小时,难以满足用户对信息获取的时效性需求;第三,载荷的利用率大大降低,由于无法实时传输所获得的数据,需要将所获得的数据在星上进行存储,星上的存储容量有限,所以只能在一段时间内获取数据,当星上存储超出容量之后将无法再获取数据;第四,数据存储困难,当无法将星上获得的大量数据实时传输到地面时,需要将数据存储在星上,而星上的存储空间难以支撑所获取的大容量数据。

人们对遥感卫星数据传输速率的需求在不断增加且

永无止境。对数据传输的需求呈现以下特点:时效性,如何高效快速地获取所需信息,尤其是在某些实时信息获取的应用中;精准性,希望得到感兴趣的信息;针对性,针对不同的用户传输不同的信息;智能化,根据用户的不同需求,自主进行信息挖掘、融合,形成具有应用价值的信息。

我们需要思考一个问题,遥感卫星数据传输的技术增长点究竟在哪儿? 1.2 Gbit/s之后数据传输速率提升将非常困难,即使采用激光进行星地之间数据传输,仍然难以满足人们对卫星数据传输的需求;再进一步,激光传输之后又是什么?

推动数据传输技术的发展需要突破目前数据传输的框架,从体系上进行创新。目前遥感图像传输是将整幅图像进行压缩或者将未压缩的图像传回地面,或分发到不同的用户。传统的传输过程并不关注图像内容,即图像所包含的信息。实际上在大多数情况下用户所关注的并不是图像本身,而是图像中所包含的信息,那么是否可以考虑在数据传输过程中仅传输信息或者有用信息加上部分图像,这是一个重点研究方向。

近年来随着人工智能技术的突破性进展以及芯片的运算能力提升。例如,目标识别率已经可在90%以上^[12-13],对场景理解及推断能力也在逐步提升。人工智能技术的发展以及芯片处理能力的提升^[14],使得推动遥感卫星数据传输方法的发展成为可能。

1 遥感卫星计算传输系统

卫星数据传输系统是遥感卫星的核心载荷,它负责将星上获取的数据经过编码、压缩、调制、传输(微波或激光)、解调、译码等一系列处理之后呈现给用户^[15]。

1.1 典型卫星传输系统

如图1所示,典型遥感卫星数据传输系统包含星上部分和地面部分^[16]。遥感卫星通过星载传感器获取的数据经过压缩或者星上预处理之后存储在星上存储系统中,等卫星过顶时通过发送端将遥感数据发送到地面。地面接收到数据后通过接收端解调、解码之后传输到用户端。用户端根据需求再进一步对接收到的数据进行处理,最后获得感兴趣的信息,如时间、位置、目标以及目标动向。

星上部分由星载传感器、数据压缩、星上存储系统、发送端等组成,各个部分功能如下所述。

星载传感器可以是红外相机、可见光相机、多光谱相机及合成孔径雷达等中的一种或多种。例如高分二号卫星搭载有两台高分辨率1米全色、4米多光谱相机作为星载传感器;高分五号搭载了6台遥感仪器,其中包括可

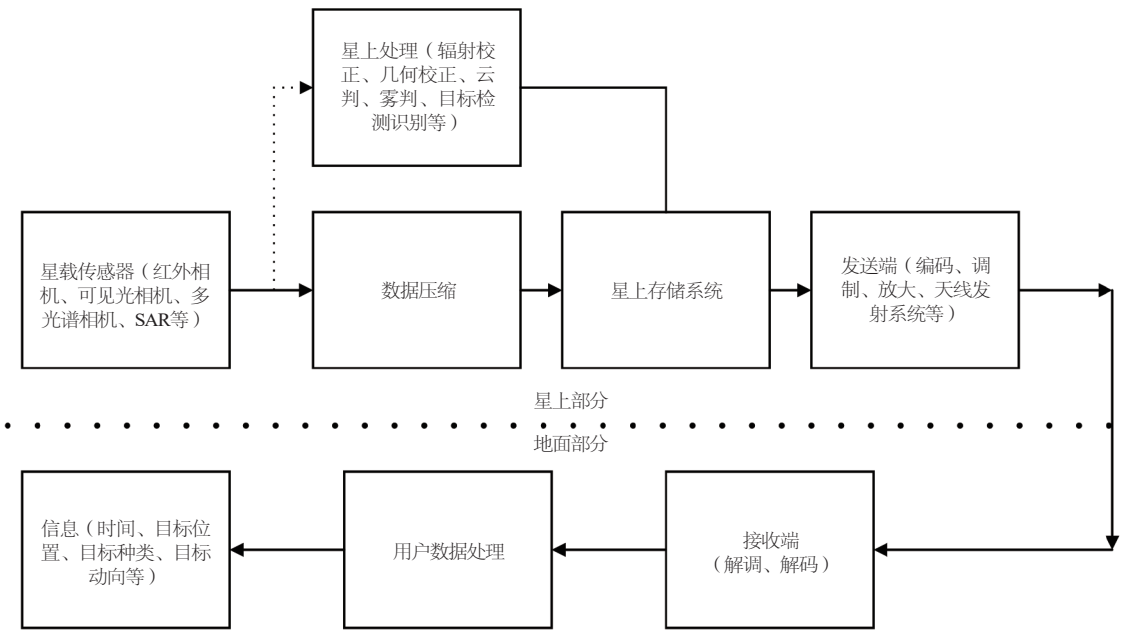


图1 典型卫星数据传输系统

见短波红外高光谱相机和红外甚高光谱分辨率探测仪实现环境、大气等数据的获取^[17]；高分七号搭载了双线性测绘相机，包括4台前视相机和3台后视相机，实现立体测绘、资源及环境遥感应用^[18]。

数据压缩是卫星数据传输系统中必不可少的一部分。星上获取的遥感数据量非常大，直接传输会浪费珍贵的数据传输带宽资源，降低传输效率。为了提高传输效率，在星上将获得的原始数据经过压缩之后再进行传输。标准的星上数据压缩有国际空间数据系统咨询委员会（CCSDS）的无损压缩、图像压缩、多光谱和高光谱图像压缩3种^[19]。也有采用JPEG2000及其变种的压缩算法，如高分七号采用了JPEG-LS压缩算法实现图像压缩^[20]。除此之外常见的星上压缩方法包括基于预测编码的压缩方法、基于矢量量化的压缩方法和基于张量分解的压缩方法。

星上存储系统是遥感卫星不可或缺的部分，遥感卫星可以获取全球范围的遥感目标，但是只有在卫星过境时才有机会将数据传输到地面站。一般在星上配置大容量固态存储设备，将星上获取的遥感数据存储在固态存储器中，在过境时从存储器中读出数据发送到地面站。星上存储系统一般具有数据记录、回放、删除及复位等功能。以高分七号为例，其主要通过国内卫星遥感地面站和北极卫星遥感地面站完成数据接收任务。国内卫星遥感地面站每天接收时间仅70 min左右；北极卫星遥感地面站每天接收时间约60 min，其配备的星上存储系统至少需要8 Gbit/s的存储速率和TB级的存储容量。

发送端包括信道编码、加扰、基带成形、调制、放大、通道滤波以及天线发射系统。除此之外，有些卫星在星上对数据进行预处理后再进行传输，主要包括辐射校正、几何校正、云判、雾判以及目标检测识别等。地面部分包括接收端、用户数据处理以及最终获得的信息。接收端通过接收天线获取微波信号，经过解调、解扰、解码等处理之后变成基带信号传输到用户端。地面站将接收到的数据解压缩之后进一步处理，例如提取有价值的信息（目标种类、目标位置以及场景理解等）。再将提取的信息发送到最终用户，用户根据接收到的信息做出相应的判断和决策。

由此可见传输过程并不关注图像本身，而是图像中所包含的信息。实际上在大多数情况下用户所关注的并不是数据本身，而是数据中所包含的信息。因此本文提出一种新的传输系统，在数据传输过程中仅传输信息或者有用信息加上部分图像。在本文中将该卫星数据传输系统称为卫星计算传输系统。

1.2 计算传输系统

遥感卫星计算传输是将传统的卫星数据传输方法与星上智能处理相结合，将硬件设计与软件计算能力有机结合，突破传统遥感卫星数据传输的局限性，增强或者扩展传统数据传输方法，有效利用有限传输带宽，实现信息传输的时效性、精准性和针对性，实现智能化传输。

卫星计算传输模型如图2所示，遥感卫星数据传输系

统同样包含星上部分和地面部分。通过星载传感器获得的数据直接进入计算发送端；计算发送端完成数据的处理、有效信息提取及存储，然后通过信道编码、加扰、放大、天线发射系统等将有效信息发送到地面站。

与经典卫星数据传输系统相比，其最突出的特点是通过计算终端完成了端到端的数据处理，实现了数据到信息的转化；星地之间的传输不再是压缩后的数据而是实现了星地之间“信息”的有效传输。

卫星计算传输地面部分通过计算接收端将接收到的信息转发给用户，或者通过数据复原以及可视化的手段将信息呈现给用户。

由此可见卫星计算传输的特点如下：

- 发送端具有计算能力，从而可以通过计算从原始图像中提取有效信息；
- 数据传输由透明传输变成处理传输，从数据中学习特征、挖掘信息；

- 传输具有多样性和针对性，针对具体应用设计具体算法；
- 传输具有智能性，设计智能算法从数据中获取有效信息。

1.3 卫星计算传输框架

卫星计算传输框架如图3所示，图像获取设备所获取的图像数据首先经过计算单元提取图像中有效信息，所采用算法包括目标识别算法、目标检测算法、场景理解算法、场景推断算法、目标跟踪算法等。通过智能算法获取用户感兴趣的有效信息。

卫星计算传输系统核心部分为计算发送端和计算接收端，计算发送端位于星上，计算接收端位于地面。本文将计算发送端和计算接收端统称为计算终端。计算发送端负责从数据中提取用户感兴趣信息，计算接收端负责从信息中复原数据。

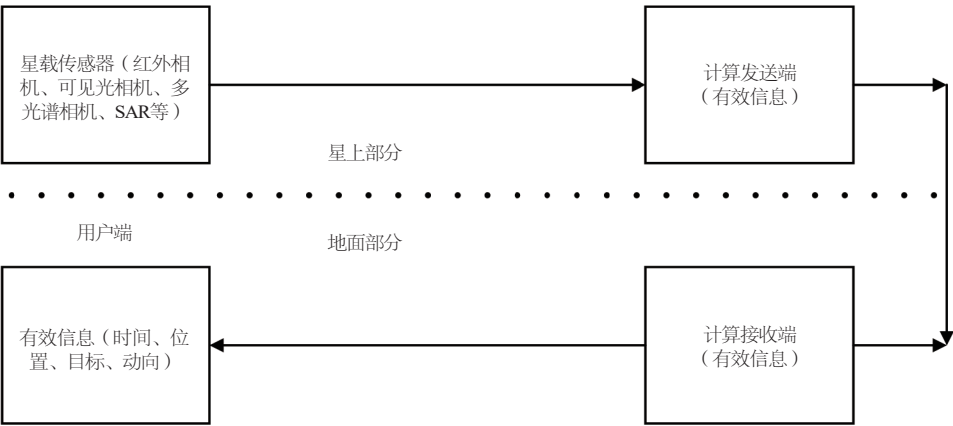


图2 卫星计算传输模型

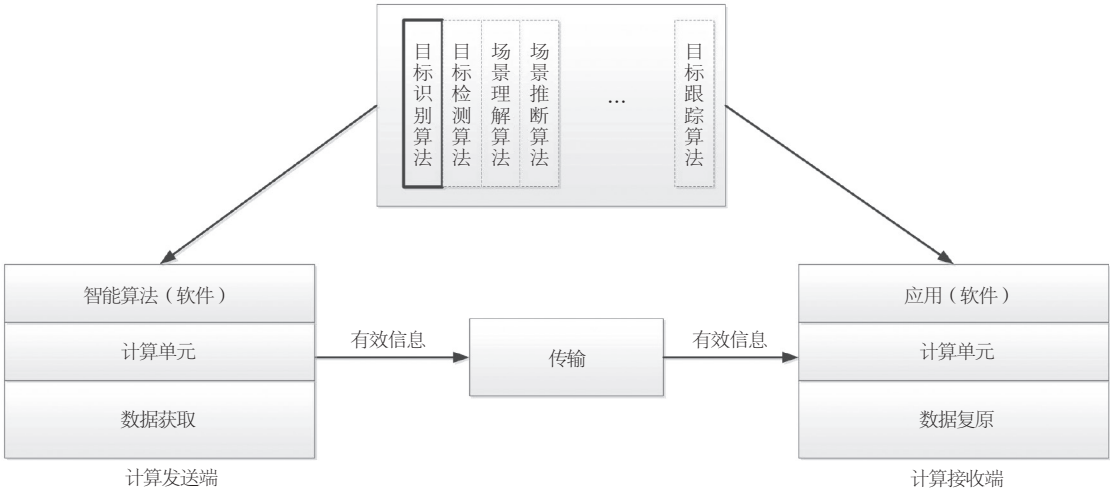


图3 卫星计算传输框架

计算终端模型如图4所示,星载计算终端由计算单元和运行在其上的智能处理算法构成,计算单元提供算法运行所需要的计算资源。智能处理算法完成有效信息提取。在计算终端中将计算单元和智能处理算法进行分层设计,尽量避免智能处理算法和计算单元之间的强耦合,便于智能处理算法和计算单元独立增加、删除及更新。



图4 计算终端模型

计算单元是实现卫星计算传输的基础。计算单元可以是星上能够使用的处理器件中的一种或者多种。例如CPU、FPGA、DSP单独使用,或者多种异构计算单元在星上采用分布式并行互联结构,该结构由多个异构处理单元相互连接,形成处理单元网络,为算法运行提供计算资源。

智能处理算法是实现计算传输的前提,其主要目的是通过多种智能处理算法提取遥感数据中用户感兴趣的信息。智能处理算法可以是星上目标检测算法、分割算法、目标跟踪算法或者场景理解算法。通过多种算法给出更加抽象的信息表达,实现智能遥感信息提取。

2 遥感卫星计算传输关键技术

星上智能处理算法及计算单元是实现遥感卫星计算传输的关键。遥感数据具有多样性,从不同传感器获得的数据其表现形式、纬度等具有很大差异。针对不同遥感数据,其处理方法和具体算法也相去甚远,难以用相同算法和技术处理。遥感图像是遥感数据中的典型代表,为了描述方便,以下用遥感图像智能处理来描述计算传输中智能处理技术,其他数据的处理根据具体应用采用不同的智能处理算法。

2.1 星上智能处理技术

星上智能处理包括遥感图像分类、识别、分割、跟踪、场景理解及语义理解等。这些智能处理算法根据其

智能程度可以进一步细分为低层次智能处理和高层次智能处理。其中分类、识别、分割算法可以认为是低层次智能处理,对于遥感图像分类、识别而言,又包括对目标分类和识别以及对场景分类和识别。

遥感图像分类是算法根据输入图像信息输出其所对应类别信息。比分类更进一步,遥感图像识别是算法根据输入图像信息输出对应目标类别信息和位置信息。遥感图像分割是像素级任务,可以将感兴趣的目标分割出来,例如遥感图像中云分割和雾分割。这些低层次智能处理算法最终输出的是类别信息和位置信息。其智能程度较低,没有挖掘出目标在具体场景中的语义信息以及目标之间的关系。

虽然低层次智能处理挖掘的信息有限,但是对于遥感图像计算传输具有很大的应用价值。例如,可以采用智能分割算法将遥感图像中的云、雾以及沙漠等部分去除,通过这种处理算法减少需要传输的数据量,但是通过分割算法能够减少的数据量有限,通过目标检测方法能够更加高效地减少传输的数据量。以星上舰船目标检测为例,通过星上智能目标检测算法可以在遥感图像中检测出舰船的具体类别,如潜艇、航母、油轮、货船及渔船等,并且能够给出目标在图像中的具体方位等信息。此时,遥感图像计算传输将遥感图像传输变成了图像中目标的类别信息和位置信息的传输。当地面站接收到目标位置信息和类别信息之后,可以根据目标类别信息和位置信息采用可视化技术将图像还原出来。通过这种方式可以成千上万倍地降低数据传输量。

遥感图像场景理解和遥感图像语义理解可以认为是高层次的智能处理。与遥感图像分类识别不同,高层次智能处理不仅考虑目标类别信息和位置信息,而且考虑了目标属性和空间关系。以人类能够理解的自然语言方式描述图像,遥感图像描述中不仅包含了目标,而且包含了目标之间的关系。将高层次的智能处理应用在计算传输中,此时遥感图像传输变成了文本传输,一幅遥感图像转换成了一段文本,可以根据文本内容实现针对性的传输。此时不仅大大减少了数据传输量,同时根据文本内容实现了针对性传输。

无论是低层次智能处理算法还是高层次智能处理算法,图像特征提取及表征与算法的性能密切相关。由于遥感数据的多样性,在提取图像特征时需要综合考虑其粒度、时相、方位及层次关系。遥感数据的特征计算方法应从光谱、纹理、结构等低层特征出发,抽取多元特征的本征表示^[21]。目前,深度卷积神经网络可以认为是一种遥感数据目标一体化表达模型。在遥感图像计算传输中具有很大的潜在应用价值。

星上智能处理技术虽然性能上达到了最优,但是其缺点也非常明显。其优异的性能是以高计算量为代价的。在星上资源受限的环境中实现智能处理算法的部署非常困难,甚至难以实现。可以从两方面着手解决智能处理算法在轨部署的问题。第一,考虑采用轻量化处理算法设计更加高效的智能处理算法模型,从而减少向上处理所消耗的计算量。这一类算法的典型代表为MobileNet^[22]、SqueezeNet^[23]、ShuffleNet^[24]以及DenseNet^[25]。第二,针对星上应用设计高效的处理器。在星上部署算法时需要考虑算法运算平台,地面上普遍采用GPU (Graphics Processing Units) 作为算法的运算平台。虽然GPU具有很强的算力,但是目前尚未有针对空间应用的型号,再加上其百瓦以上的功耗,难以在空间中应用。从目前来看,针对具体应用采用FPGA设计具体运算平台是一个较好的选择。

2.2 计算终端技术

基于神经网络的人工智能近年来取得了突破性进展,正在深刻改变人类的生产和生活方式,是世界各国争相发展的战略制高点。神经网络作为实现人工智能任务的有效算法之一,已经在各种应用场景获得广泛的应用。从云端到移动端,不同应用场景也对神经网络的计算能力提出了不同需求。神经网络的广泛应用离不开核心计算芯片。英特尔、谷歌、IBM等公司在竞相研发神经网络计算芯片。

虽然通过星上智能处理算法可以有效提取遥感图像中的有效信息,但是从目前来看星上智能处理算法消耗了大量的计算资源。如何在星上为智能处理算法提供计算资源是实现计算传输的又一关键技术。

目前,有多种处理器可以为星上智能处理算法提供计算资源,包括CPU、GPU、TPU、DSP、FPGA以及ASIC。星上CPU处理能力有限,无法支撑星载智能处理算法所需要的计算量。GPU是近年来深度学习算法兴起之后才用于对智能处理算法进行加速的,英伟达及AMD等主流GPU厂商都未推出空间环境中应用的GPU。目前,从公开资料中尚未有关于GPU在星上应用的先例。由于FPGA具有可编程特性,具有很大的灵活性,也有针对空间环境的器件,相对而言,FPGA是一个很好的选择。目前星上处理大量使用FPGA^[26],另外,单片多处理架构的芯片^[27]也被用来进行处理。

从以上分析可以看出目前主流通用计算平台包括CPU和GPU,但都无法在星上应用,而且存在能效较低的问题(能效即能量效率,是性能与功耗的比值)。为了在星上实现神经网络的应用,需要研究星上专用的

神经网络加速技术。然而,神经网络结构多样、数据量大、计算量大的特点,给加速带来了巨大挑战。因此,在设计面向神经网络的高性能、高能效硬件架构时,需要考虑以下几个方面的问题:第一,深度模型计算模式,深度模型由多层组成,有的模型还有分支,对于特定的智能处理算法需要确定采用逐层计算模式、流水线计算模式还是将其转换成矩阵乘法模式进行处理;第二,支持计算模式的架构,支持神经网络运算的架构有多核并行处理、运算阵列、矩阵运算等,针对具体的计算模式采用合理的计算模式架构;第三,已经实现的硬件架构,针对具体算法和应用需求,采用数据复用、模型压缩及降低精度的方式将算法匹配在硬件架构上。

2.3 算法加载与调度技术

智能算法一般包含训练和部署两个阶段。训练阶段需要耗费大量的计算资源,由于星上资源有限,难以支撑智能算法的星上训练。为了解决星上计算资源受限带来的问题,可以采用星地协同^[28]的方式来解决。将耗费大量算力的训练放在地面上,当算法训练完成之后再将其部署在星上。即使在算法的部署阶段也需要高效利用星上计算资源,如何在有限的计算单元实现多种算法的运算也是一个需要重点研究的问题。本文将该问题称为智能处理算法的加载与调度问题。

算法的加载与调度决定了计算单元运行效率。如图5所示,可以采用算法分片策略,将算法划分为适合在处理单元中进行处理的任务片;然后将不同的任务分配到不同的处理单元进行处理,处理完成之后再将各个处理单元的处理结果合并输出,从而提高处理单元的效率。

2.4 高效软硬件协同方法与技术

在学术研究中算法研究往往与其运行的硬件平台是割裂的,硬件平台的研究不考虑运行在之上的算法,算法也不考虑运行的硬件平台。算法与硬件的割裂使得算法与硬件平台均不能够发挥最佳性能,而在实际应用中要求算法与平台达到最佳匹配。针对特定的应用,同时考虑算法与硬件平台,采用软硬件协同技术实现最优性能。

主要研究包括以下几个方面。

第一,选择适合在星上应用的模型。不同的模型其规模和需要的运算量相差很大,在星上需要采用轻量化模型,以减少星上所需要的存储量和计算量。例如,VGG-16^[29]模型的参数量约138 M,而shuffNet V2^[30]模型参数量约1.4 M,二者相差近100倍。

第二,针对具体模型采用高效的压缩方法。目前针对模型压缩的方法有剪枝^[31]、量化^[32]、知识蒸馏^[33]及张量

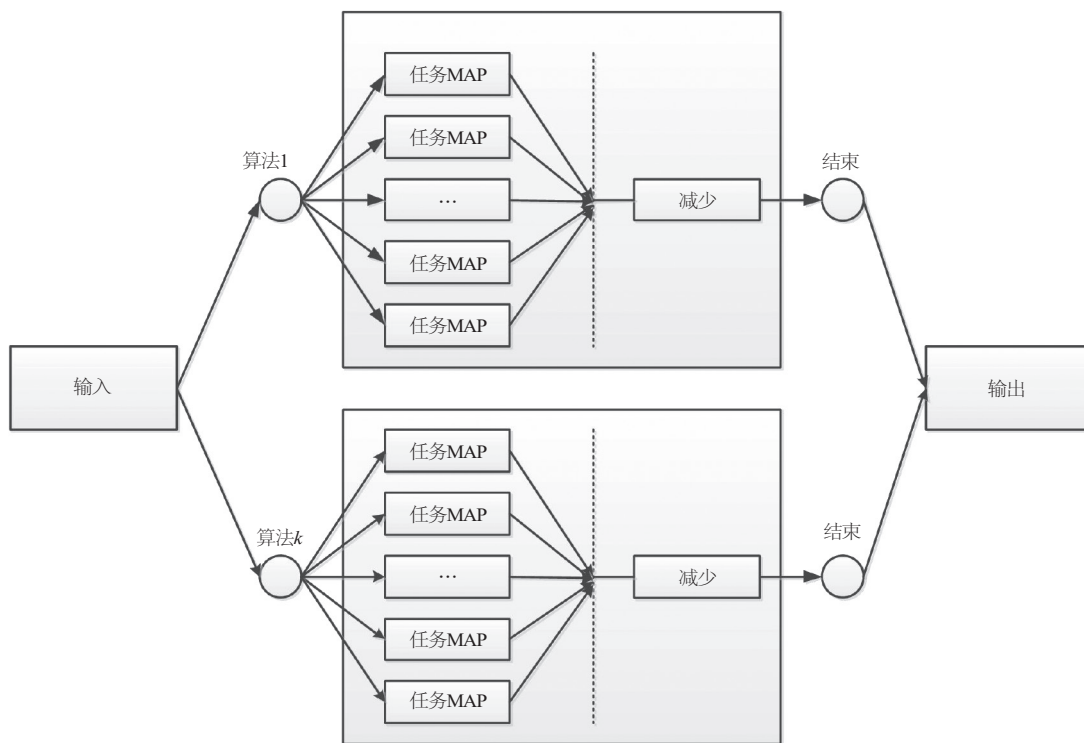


图5 算法加载与调度

分解^[34]等方法。模型在星上部署前，需要根据具体应用采用其中的一种或者多种方法进行压缩。

第三，采用合适的计算精度，模型在训练时一般采用全精度进行训练。训练完成之后可以采用低精度的模型在星上进行部署。例如采用32 bit的全精度在地面上训练，在星上部署时可以采用16 bit或者8 bit的精度，包括混合精度以及可变精度。降低计算精度的目的是减少存储和计算量，包括各种精度乘、加、读的能量消耗以及量化问题。

第四，协同设计时，考虑如何在性能和时延、时延和准确性、硬件成本和精度等方面做出平衡，既要保证主流智能处理算法的高效能，又要保证整个设计的灵活性和扩展性，以满足多种类型的计算需求。

3 结束语

本文提出的遥感卫星数据计算传输框架是在人工智能技术取得了突破性进展及广泛应用的背景下探索利用人工智能技术进行更加高效数据传输的思考。该框架并非要淘汰或者取代目前数据传输系统，而是一种有益的补充和扩展，为卫星互联网数据传输提供一种思路。该框架的进一步完善仍需要大量的实验和不断的实践，研究遥感数据高效传输框架具有重要的理论价值和工程意义。

参考文献：

- [1] 张晓凯, 郭道省, 张邦宁. 天地一体化信息网络研究现状与新技术的应用展望[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 19-26.
ZHANG X K, GUO D X, ZHANG B N. Research status of space-air-ground integrated network and application prospects of new technologies[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 19-26.
- [2] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 2-10.
XU H, MIAO D S, KANG S L, et al. Network architecture and key technologies for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 2-10.
- [3] 中华人民共和国国务院办公厅. 2021中国的航天[N]. 人民日报, 2022-01-29(005).
State Council Information Office of the People's Republic of China. 2021 China's Aerospace [N]. People's Daily, 2022-01-29(005).
- [4] 陈卫荣. 高分五号02星[J]. 卫星应用, 2021(10): 69.
CHEN W R. High Score Five 02 Stars[J]. Satellite Application, 2021(10): 69.
- [5] 陈世平. 高分辨率卫星遥感数据传输技术发展的若干问题[J].

- 空间电子技术, 2003(3): 1-5.
- CHEN S P. Several Problems in the Development of High Resolution Satellite Remote Sensing Data Transmission Technology [J]. Space Electronic Technology, 2003(3): 1-5.
- [6] 肖昶, 余晓敏, 韩逸飞. 高分二号卫星影像融合技术研究[J]. 地理空间信息, 2018, 16(6): 13-16.
- XIAO C, YU X M, HAN Y F. Research on image fusion technology of GF-2 satellite[J]. Geospatial Information, 2018, 16(6): 13-16.
- [7] 孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. “高分五号”卫星概况及应用前景展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 1-13.
- SUN Y Z, JIANG G W, LI Y D, et al. GF-5 satellite: overview and application prospects[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(3): 1-13.
- [8] 刘辉, 姜通, 郭强, 等. 高分五号卫星高效高速数据传输技术研究[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 30-36.
- LIU H, JIANG T, GUO Q, et al. Research on efficient high-speed data transmission technology for GF-5 satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 30-36.
- [9] 郑小松, 李立, 张雨, 等. 高分七号卫星数据处理与传输分系统设计与验证[J]. 航天器工程, 2020, 29(3): 74-81.
- ZHENG X S, LI L, ZHANG Y, et al. Design and verification of data processing and transmission subsystem on GF-7 satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(3): 74-81.
- [10] 杨新权, 李立, 靳凡, 等. 星载高速自适应传输技术研究[J]. 空间电子技术, 2014, 11(1): 20-23, 39.
- YANG X Q, LI L, JIN F, et al. Research on satellite-borne high-speed adaptive transmission technique[J]. Space Electronic Technology, 2014, 11(1): 20-23, 39.
- [11] 毕梦格, 徐伟琳, 侯蓉晖. 一种低轨遥感卫星按需数据传输机制[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(7): 1467-1473.
- BI M G, XU W L, HOU R H. An on-demand data transmission mechanism for LEO remote sensing satellite[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(7): 1467-1473.
- [12] LANG H Y, BAI Y P, LI Y, et al. A lightweight object detection framework for remote sensing images[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 683-687.
- [13] CHEN L Y, LI S B, BAI Q, et al. Review of image classification algorithms based on convolutional neural networks[J]. Remote Sensing, 2021, 13(22): 4712-4718.
- [14] RAPUANO E, MEONI G, PACINI T, et al. An FPGA-based hardware accelerator for CNNs inference on board satellites: benchmarking with myriad 2-based solution for the CloudScout case study[J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1518-1528.
- [15] 黄普明, 陈泓, 陈世平. 数据处理与传输系统的现状和发展趋势[J]. 空间电子技术, 2003(4): 4-8.
- HUANG P M, CHEN H, CHEN S P. Status quo and development trend of data processing and transmission system [J]. Space Electronic Technology, 2003(4): 4-8.
- [16] 周诤. 20世纪卫星数据传输技术现状和发展趋势[J]. 空间电子技术, 2002(1): 1-7, 38.
- ZHOU Q. Status quo and development trend of satellite data transmission technology in the 20th century[J]. Space Electronic Technology, 2002(1): 1-7, 38.
- [17] 王健, 崔天翔, 王一, 等. 高分五号可见短波红外高光谱影像云检测研究[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 239-246.
- WANG J, CUI T X, WANG Y, et al. Cloud detection for GF-5 visible-shortwave infrared advanced hyperspectral image[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 239-246.
- [18] 胡柳茹, 唐新明, 张智, 等. 高分七号卫星多源遥感数据精度优化与评估[J]. 红外与激光工程, 2022.
- HU L R, TANG X M, ZHANG Z, et al. Accuracy optimization and evaluation of multi-source remote sensing data of Gaofen-7 satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022.
- [19] 张乐. 遥感卫星数据处理与传输系统标准体系建设研究[J]. 空间电子技术, 2015, 12(6): 67-71, 79.
- ZHANG L. Study on the construction of standard system for remote sensing satellite data processing and transmission system[J]. Space Electronic Technology, 2015, 12(6): 67-71, 79.
- [20] 高卫斌, 冉承其. 遥感卫星数据传输技术发展分析[J]. 中国空间科学技术, 2005, 25(6): 30-36.
- GAO W B, RAN C Q. The analysis on technology development of data transmission in remote sensing satellites[J]. Chinese Space Science and Technology, 2005, 25(6): 30-36.
- [21] 李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1211-1216.
- LI D R, ZHANG L P, XIA G S. Automatic analysis and mining of remote sensing big data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(12): 1211-1216.
- [22] HOWARD A G, ZHU M L, CHEN B, et al. MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications[EB]. 2017.
- [23] IANDOLA F N, HAN S, MOSKEWICZ M W, et al. SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5MB model size[EB]. 2016.
- [24] ZHANG X Y, ZHOU X Y, LIN M X, et al. ShuffleNet: an extremely efficient convolutional neural network for mobile devices[C]//Proceedings of 2018 IEEE/CVF Conference on

- Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2018: 6848-6856.
- [25] HUANG G, LIU Z, VAN D M L, et al. Densely connected convolutional networks[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2261-2269.
- [26] 韩宇, 袁素春, 张建华, 等. 高分七号卫星图像压缩FPGA设计与实现技术[J]. 航天器工程, 2020, 29(3): 169-176.
HAN Y, YUAN S C, ZHANG J H, et al. Design and implementation technology of compression coder with FPGA on GF-7 satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(3): 169-176.
- [27] 王时雨, 张盛兵, 黄小平, 等. 星载SAR成像与智能处理的单片多处理架构[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(3): 510-520.
WANG S Y, ZHANG S B, HUANG X P, et al. Single-chip multi-processing architecture for spaceborne SAR imaging and intelligent processing[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(3): 510-520.
- [28] 薛武, 赵玲, 王鹏. 星地协同光学遥感影像目标识别技术验证研究[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(3): 128-137.
XUE W, ZHAO L, WANG P. Satellite-earth coordinated on-orbit intelligent target recognition of optical remote sensing images[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(3): 128-137.
- [29] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[EB]. 2014.
- [30] MA N N, ZHANG X Y, ZHENG H T, et al. ShuffleNet V2: practical guidelines for efficient CNN architecture design[C]//Computer Vision – ECCV 2018. [S.l.:s.n.], 2018: 116-131.
- [31] HE Y H, ZHANG X Y, SUN J. Channel pruning for accelerating very deep neural networks[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1398-1406.
- [32] GYSEL P, PIMENTEL J, MOTAMEDI M, et al. Ristretto: a framework for empirical study of resource-efficient inference in convolutional neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018.
- [33] HINTON G E, VINYALS O, DEAN J. Distilling the knowledge in a neural network[J]. CoRR, 2015, 2(7).
- [34] KIM T, LEE J, CHOE Y. Tensor train decomposition for efficient memory saving in perceptual feature-maps[C]//Proceedings of 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW). Piscataway: IEEE Press, 2019: 599-604.

[作者简介]



呼延焱（1981—），男，中国空间技术研究院西安分院研究员，主要研究方向为卫星高速数据传输与星上智能处理等。



李映（1969—），女，西北工业大学教授，主要研究方向为图像处理、数据挖掘、智能信息处理等。



周隼（1965—），男，中国空间技术研究院西安分院研究员，主要研究方向为卫星高速数据传输与处理，信息隐藏等。



魏佳圆（1988—），女，中国空间技术研究院西安分院工程师，主要研究方向为图像信息隐藏技术及图像目标检测技术。



刘娟妮（1985—），女，博士，中国空间技术研究院西安分院高级工程师，主要研究方向为图像处理、SAR数据处理等。



张怡（1981—），女，中国空间技术研究院西安分院高级工程师，主要研究方向卫星高速数据传输与处理等。