

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020. 03. 02

引用格式: 张朝忙,叶远智,邓轶,等. 我国自然资源监测技术装备发展综述[J]. 国土资源遥感,2020,32(3):8-14. (Zhang C M,Ye Y Z,Deng Y,et al. Review on the development of natural resources monitoring technology and equipment in China[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2020,32(3):8-14.)

我国自然资源监测技术装备发展综述

张朝忙¹, 叶远智¹, 邓 轶², 王建邦¹

(1. 浙江省测绘科学技术研究院,杭州 311100; 2. 浙江省自然资源厅信息中心,杭州 311100)

摘要: 技术装备建设是自然资源监测工作的重要内容,按照运载平台的不同,将自然资源监测技术装备分为星基、空基、地基 3 类并分别进行了具体介绍。简要分析了自然资源监测技术装备发展面临的问题和挑战。针对我国实际情况,提出了开展自然资源装备清查和评估工作、重视技术装备基础设施建设与资源整合、制定技术装备发展规划等发展建议。

关键词: 自然资源; 监测; 技术装备; 遥感

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)03-0008-07

0 引言

自然资源监测工作的开展能够帮助人们探索区域自然资源状态以及自然资源要素变动过程中的内在规律、相互作用机制以及变化趋势等,其中,对各类自然资源状态进行系统的观察、测定、记录、分析和评价都离不开技术装备的支持,特别是尖端技术装备目前已经处在了决定整个领域综合竞争力的战略地位。自然资源监测工作的创新发展,既受限于相关理论研究的水平,也在较大程度上受到技术装备的发展水平和应用情况的综合影响。当前,航空航天、图像处理、智能控制、量子等技术正不断与自然资源相关科技相融合,推动着自然资源监测技术装备的快速发展。在该领域我国已取得了一定的研究成果,但是在综合能力建设上,同技术发达国家相比仍有较大差距^[1-9]。了解我国自然资源监测技术装备的发展现状和监测能力,提高装备的自主研发能力,开展自然资源监测装备发展的清查、评估工作,制定科学的技术装备发展规划,形成天空地海多源协同的自然资源监测智能技术与装备体系显得尤为迫切。

1 我国自然资源监测技术装备综述

针对自然资源监测装备体系的编目分类研究相对较少,肖志辉等^[10]认为同一工作原理的设备在星

基(卫星、飞船、航天飞机等)、空基(飞机、热气球、无人机等)、地基等不同的运载平台使用时,存在不同的技术要求和作业难点,因此按照运载平台的不同对技术装备进行区别研究具有现实意义,本文沿用该观点,从星基、空基和地基角度分别进行介绍。

1.1 星基自然资源监测技术装备

星基装备作业离不开航天器和地面系统的支持。目前,我国星基监测装备主要依托人造卫星开展业务^[11-12]。我国现发射的全部航天器中对地观测卫星占一半左右^[13],其中专门或可以服务于自然资源监测工作的卫星主要包括地球资源卫星、海洋卫星、环境减灾卫星等,相应遥感载荷及能力见表 1。从成像机理上可将各类星基装备划分为被动遥感装备和主动遥感装备 2 类。被动遥感装备包括光学设备如框幅相机、多光谱相机等,光电设备包括 CCD 相机、CMOS 相机、成像光谱仪(光栅成像光谱仪、干涉成像光谱仪)和微波辐射计等。光学设备在功能上正从单用途、单光谱、单种类向多用途、多光谱及超光谱、多种类方向过渡,性能上逐步向大口径、长焦距、高分辨率、智能化等方向发展,并在主动光学波前探测技术、反射镜结构的轻量化设计、全光谱段航天光学成像遥感器和对天对地一体化结构等研究上取得了一定的进展^[7]。光电探测器主要有 CCD 相机和 CMOS 相机 2 类,目前 CCD 相机的研究和应用仍然最为广泛^[14-17],受微光遥感成像技术(微光像增强 CCD)的发展影响,CCD 类相机的宽光

表 1 我国主要的自然资源相关卫星及遥感载荷
Tab.1 Major natural resources satellite and their payloads of China

卫星系列		发射时间	遥感载荷与监测能力			
			传感器	光谱范围	分辨率/m	
地球资源卫星	资源一号	CBERS - 01	1999 年 10 月	CCD 相机	可见光、红外	19.5
		CBERS - 02	2003 年 10 月	宽视场成像仪	可见光、红外	258
				红外多光谱扫描仪	可见光、红外	78/156
				CCD 相机	可见光、红外	20
		CBERS - 02B	2007 年 9 月	高分辨率相机	可见光、红外	2.36
				宽视场成像仪	可见光、红外	258
		ZY - 1 02C	2011 年 12 月	全色多光谱相机	可见光、红外	5/10
				全色高分辨率相机	可见光、红外	2.36
				全色多光谱相机	可见光、红外	5/10
				多光谱相机	可见光、红外	20
	CBERS - 04	2014 年 12 月	红外相机	可见光、红外	40/80	
			宽视场成像仪	可见光、红外	73	
	资源三号			前视相机	可见光、红外	3.5/2.5
		ZY3 - 01	2012 年 1 月	后视相机	可见光、红外	3.5/2.5
		ZY3 - 02	2016 年 5 月	正视相机	可见光、红外	2.1/2.1
				多光谱相机	可见光、红外	5.8/5.8
	高分一号	2013 年 4 月	全色多光谱相机	可见光、红外	2/8	
			多光谱相机	可见光、红外	16	
	高分二号	2014 年 8 月	全色多光谱相机	可见光、红外	1/4	
	高分三号	2016 年 8 月	C - SAR 合成孔径雷达	微波	1	
	高分四号	2015 年 12 月	凝视相机	可见光、红外	50/400	
海洋卫星	海洋一号	HY - 1 A	2002 年 5 月	海洋水色水温扫描仪	可见光、红外	1 100
		HY - 1 B	2007 年 4 月	海岸带成像仪	可见光、红外	250
				海洋水色水温扫描仪	可见光、红外	—
		HY - 1 C	2018 年 7 月	海岸带成像仪	可见光、红外	50
			紫外成像仪	紫外	500	
	海洋二号	HY - 2	2011 年 8 月	微波散射计	微波	—
		HY - 2 B	2018 年 10 月	扫描微波辐射计	微波	—
				校正微波辐射计	微波	—
环境减灾卫星		HJ - 1 A	2008 年 9 月	CCD 相机	可见光、红外	30
	高光谱成像仪			可见光、红外	100	
	HJ - 1 B	2008 年 9 月	CCD 相机	可见光、红外	30	
			红外多光谱相机	红外	150	
	HJ - 1 C	2012 年 11 月	S - SAR 合成孔径雷达	微波	5(单视) 20(四视)	

谱响应、低噪声、高灵敏度、大动态范围和智能电子控制性能都得到了进一步提高^[18]。CMOS 相机得益于数字域时间延迟积分技术发展,以及 CMOS 在噪声、填充因子、成像幅宽等性能上的优化,装备占有率逐步提高。孙武等^[19]通过对航天遥感相机的光电探测器的研究认为 CMOS 大有取代 CCD 的趋势。成像光谱仪目前主要应用于高光谱遥感,我国是世界上第二个将高光谱载荷送上太空的国家,近年来我国已经研制和发射多台成像光谱仪,HJ-1A 所搭载的就是利用三角共光路横向剪切干涉的空间调制成像光谱仪,相关技术指标达到了国际先进水平^[3,20-21]。目前,我国正在研制的大孔径静态干涉成像、双通道曲面棱镜高光谱成像等技术^[22-23],能够进一步提升成像光谱仪的光通量、信噪比和稳定性。微波辐射计是目前最重要的微波无源遥感有效载荷^[2],具备云雨穿透性、全天候监测能力,在我国最

早也最广泛应用于气象领域,近年来在海洋和陆地资源领域也呈现出了蓬勃发展的态势。目前,我国在微波辐射计研究上已突破了圆锥扫描微波辐射计天线口面定标技术、静止轨道波束扫描、毫米波亚毫米波准光学馈电网络、接收、定标等关键技术,完成了全球首次静止轨道微波遥感技术验证和首次 425 GHz 频段探测。我国微波辐射计设备的灵敏度、探测精度指标已经与国际先进水平相当^[2]。

主动传感装备主要包括侧视雷达(真实孔径雷达(real aperture Radar,RAR)和合成孔径雷达(synthetic aperture Radar,SAR))和全景雷达等,能穿透一定厚度的植被和砂层,实现对光学影像和地面调查不可见的隐伏地质要素的探测和监测^[24],目前以 SAR 的研究和应用最为广泛。我国星载 SAR 技术处于国际先进水平,高分三号卫星是目前世界上成像模式最多的 SAR 卫星,具备了条带模式、扫描模

式、全极化模式、滑动聚束模式、方位向多通道模式等 12 种成像模式^[5]。我国新一代星载 SAR 一般具有多个极化通道,能够实现幅度和相位量化应用,在分辨率、波束模式、极化方式上都有了突破性改善,大大地推动了雷达遥感处理及技术的发展^[25]。在波段的选择上,新装备采用的微波波段都是对云层和地物穿透性更强的较长波段(C,S,L)代替较短的波段(Ka,K,Ku)。

整体来看,我国星基装备能够满足自然资源监测和自然灾害监测对高空间分辨率、高光谱分辨率、全天候、全天时以及定量监测的复杂需求,但在对自然资源要素细节表达上与真实自然场景信息仍有所差别,红外辐射定标技术、相机动态范围扩展技术等研究仍相对滞后^[19,26-29]。另一方面,我国服务于自然资源的卫星还相对有限,有待加快建设以形成具备全球及重点区域监测能力的自然资源业务卫星星座体系,增强长时间序列、高时间分辨率、统一技术指标的监测数据获取能力^[8,13,30-31]。

我国先后建立了国家遥感中心、国家卫星气象中心、中国资源卫星应用中心、卫星海洋应用中心和中国遥感卫星地面接收站等国家级遥感应用机构以及近 200 个省市级遥感应用机构,研究遥感领域高新技术发展及产业化发展状况和相关前沿课题,进行接收、记录、处理、分发等工作,具备了全球卫星数据的快速获取能力^[32-33],实现了从实验应用型向业务服务型转化,是自然资源监测装备应用的稳定保障。

1.2 空基自然资源监测技术装备

虽然星基装备是我国目前自然资源监测的主要手段,但星基装备受卫星重访周期、装备作业高度等诸多因素制约,相较空基装备在获取高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率、高温度分辨率数据上存在一定的劣势^[34-35]。空基装备的构成、分类与星基装备大致相同,亦可分为主、被动遥感装备 2 类,但技术发展水平存在差异,如我国星载三线阵 CCD 相机的几何处理和标定等技术已达到国际先进水平,但机载三线阵 CCD 相机的研制及几何标定技术的研究还相对滞后^[15]。整体上,空基装备较星基装备在发展方向上趋于轻小型、高精度和集成化,特别是在像元数、焦距、基高比等参数设计上有所侧重。

目前,我国已独立研制出了处于世界先进水平的机载超大规模面阵 CCD 摄影相机系统^[14,36]、高分辨率大视场三线阵立体航测相机^[15,37]以及多频段、多极化、多功能机载雷达系统^[38-40],在三维激光雷达系统总体和分项关键技术上实现了较大突破,研制出了各类高精度三维激光扫描设备^[41],部分装备已经广泛商用;在机载重轨干涉测量地面形变研

究方面取得了进展,研制出了机载双天线干涉雷达^[42],重点服务于地质灾害变形监测等领域。此外,我国在航空器高精度定位测姿系统的理论研究和研制上也已经跻身世界前列水平,能够为空基装备提供高精度位置、速度和姿态信息,并研制了超轻型飞机低空遥感平台、无人飞行器低空遥感系统、北斗导航(BeiDou navigation satellite system,BDS)/惯性测量单元(inertial measurement unit,IMU)辅助航空摄影测量等系统和技术,同时,在光纤陀螺技术以及系统集成等技术研究上也取得了长足发展,研制出了自主可控的国产系统^[43-44],为空基装备作业提供了保障。

综合来看,我国空基装备的工程化、适应性、易用性方面与国外装备仍有差距^[41],还需要我们不断加大在装备产业化及应用上的研究力度。

1.3 地基自然资源监测技术装备

地基装备种类繁多,除常见的多光谱相机、CCD 相机、成像光谱仪、微波辐射计还包括了激光雷达、激光扫描仪、热红外传感器以及各类采样、分析、预警设备等。根据其作业平台不同,常见装备均可以细分为车载装备、船载装备、固定式装备、便携式装备,但装备在不同作业平台上所采用的波段或作业原理略有不同。

从整体看,我国地基装备在理论研究、流程设计、产品形式、生产工艺、产品质量等方面都取得了长足的进步,在趋势上更多向处理自动化、分析实时化、信息在线化方向发展,有明显的多装备相协作、软硬件相结合、内外业一体化的特点。

目前我国自主研发的首个自然资源移动监测车即是通过 SSW 车载激光建模测量系统将激光扫描仪、IMU、BDS 及数码相机等传感器集成于一体来实现自然资源的快速采集和处理^[45]。船载装备主要包括红外摄像头、水下摄像机、雷达、光电平台、合成孔径声呐等,并在多波束全覆盖精密探测技术、重磁电探测技术等研究上保持了领先水平,较好地支撑了我国水下自然资源的探测和监测任务^[46]。固定式装备是能够对自然资源要素的物理性质、化学性质、生命质量、内部格局变化、外部因素威胁等信息进行长时间序列采集和监测的固定位置的装备,包括土壤墒情监测仪、观测浮(潜)标、地质灾害预警设备(裂缝计、倾角计、加速度计)等各类信息采集、分析、预警设备。便携式装备是相对固定式装备定义的,便于人员携带和移动的一类装备,包括激光测树仪、多参数水质监测仪等。固定式和便携式装备的技术门槛相对较低,在我国商业化发展和应用也较为成熟。目前,众源监测装备即依托互联网和用

户参与得到自然资源变化信息的设备也已经走上舞台,虽目前应用较少,但具有较大的应用潜力,可以快速发现短时期内剧烈变化的自然资源信息及其规律性特征,特别是在自然灾害监测、水资源监测中可以发挥重要作用^[47-49]。

地基装备的信号传输模式以移动通信为主,在通信信号差及无信号地区主要使用基于 BDS 短报文通信的方法。

地基装备可以独立发挥监测功能,或由一系列监测装备和人员组成复杂业务监测站点,再由若干个监测站点组成监测网络对大区域自然资源进行长时间序列监测。截至目前,我国共建设有国家基本海洋站(点)120 多个,各类水文测站 12.1 万处,地表水监测断面 2 767 个,土壤监测点位 4 万余个,森林固定样地 41.5 万个,为自然资源开发利用、保护与管理提供了大量可靠、详实的科学依据。另外,目前全国各类野外科学观测研究站约有 7 000 多个^[50],涉及农田、森林、草地、沼泽湿地、湖泊、海洋、沙漠等多种生态系统类型,建设形成了中国生态系统研究网络、土壤环境质量监测网络、国家地表水环境质量监测网络、全国环境空气质量监测网等一批台站系统,为综合研究国内自然资源和生态环境方面的重大问题,揭示自然资源要素的变化规律及其动因提供了支撑。

2 当前发展面临的问题和挑战

我国自然资源监测装备事业在不断赶超国际先进水平的发展过程中,还存在着诸多问题和挑战。

1)装备信息不透明。目前,除星基装备信息相对透明外,空基、地基装备分散于各部门,对这些装备的总体规模、组成特点、装备性能即使在国家层面都无法精确地把握,无法进行装备资源协调和统一管理,更无从谈起制定装备的宏观发展计划、指导产业发展等。

2)装备创新乏力。目前从事自然资源监测装备研发的多是精密机电人才,一般面向的是普遍需求,在装备的实用性和易用性方面存在不足,特别是由于缺乏对自然资源监测业务的理解,在装备创新上明显乏力。而另一方面自然资源监测领域装备人才的培养速度过慢,参与装备研发的深度不够,既懂装备又懂自然资源业务的人才队伍还没有建设起来。

3)装备的国际竞争力不足。我国目前具有战略意义和完全自主知识产权的尖端自然资源监测装备的总量还不足,产业相关的创新平台和高新技术发展还需要进一步争取国家政策的扶持,凝聚更多

力量融入监测装备发展事业,提高国产装备在国际上的竞争力。

4)“软装备”发展滞后。目前我国还没有建设自然资源监测装备研发的“支撑软件”,无法发挥和培育壮大领域内装备制造技术研究的群体优势。

3 对策与建议

3.1 开展自然资源监测装备编目、清查和评估工作

当前,我国自然资源监测装备的整体规模和整体水平还没有精确的统计信息,随着各级自然资源管理部门的整合,亟待开展自然资源监测装备的清查工作以及装备应用软实力的审定,查清所属装备类型、数量、性能以及应用程度、应用水平等信息,查清涉及自然资源监测工作的站点数量和分布情况,为科学和最大化挖掘装备价值提供基本信息。并在上述工作基础上建立区域装备信息数据库,精细化地保障自然资源监测工作开展;同时在区域内建立装备的共享目录和应急目录,科学地降低国家财政相关投入;基于数据库优化现有装备体系,加强部门间沟通,最终促进自然资源监测技术和监测水平的提高。

此外,要在加强装备体系建设的同时,及时开展行业或者区域的装备发展战略论证工作,同步开展自然资源监测装备体系贡献率评估工作,建立自然资源监测装备贡献率评估方法,服务于装备配置优化和装备采购立项等工作。

3.2 重视自然资源监测技术装备基础设施建设与资源整合

面向自然资源监测技术装备发展的基础设施及其应用服务体系仍有待国家加大投入和深入建设。自然资源监测工作目前的研究热度和政策倾向都没有达到空间规划体系建设、国土空间生态修复等工作的高度,这在一定程度上影响了技术装备发展,因此需要积极争取国家在自然资源监测技术装备上的投入,建立国家或者区域级别的自然资源监测技术装备科研和应用平台,推动相关科研项目的开展。另一方面,对现有监测装备的利用深度和各类监测资源的整合研究工作还有待加强。要重视现有监测技术装备利用的理论、方法、手段与实现路径的研究,通过制度建设和技术手段整合各主管部门的资源,形成天空地海一体化的自然资源监测技术与装备体系。

3.3 制定自然资源监测技术装备发展规划,推动相关产业发展

遵循自然资源保护、开发和利用规律,制定涵盖研发、生产、应用等内容的自然资源监测技术装备发

展规划,科学研判技术装备发展形势,提出行业发展指导方向,制定扶持和促进装备产业发展的政策体系,推动装备技术在自然资源监测评价体系的应用过程中发挥关键性作用。

同时,在产业发展上,要积极落实国家军民融合发展战略,提高监测装备自主研发能力,并在信息服务、咨询服务、技术指导等方面加强建设。同时,重点在深度学习平台研发、设备人工智能技术转换升级等方面开展工作,获取、掌握和运用长期、动态、精细化、多要素、多尺度的自然资源监测数据,为政府机构和社会提供服务。

4 结 论

近年来,量子成像技术正尝试应用于对地观测领域,以突破常规光学遥感和微波遥感的性能的局限;利用卫星导航信号的反射来监测海面风场的技术已经进入实用阶段。这些新理论和新方法正在不断推动着自然资源监测装备的发展。

数字地球概念提出 20 a 以来,相关建设更多地着眼于城市领域,而对自然资源数字化工作的重视程度和资金投入都严重不足;自然资源部的组建和相关政策的实施,将推动数字自然资源时代的到来,并为监测装备的应用提供广阔舞台。在这一背景下,更需要我们进一步加强国际交流与合作,以加快推进国内监测装备事业的发展。

参考文献(References):

- [1] Satellite Industry Association. The 2019 state of the satellite industry report[R]. Washington:Satellite 2019,2019.
- [2] 姚崇斌,徐红新,赵 锋,等.微波无源遥感有效载荷现状与发展[J].上海航天,2018,35(2):1-12.
Yao C B,Xu H X,Zhao F,et al. Current status and future development of microwave radiometer[J]. Aerospace Shanghai,2018,35(2):1-12.
- [3] 张淳民,穆廷魁,颜廷昱,等.高光谱遥感技术发展展望[J].航天返回与遥感,2018,39(3):104-114.
Zhang C M,Mu T K,Yan T Y,et al. Overview of hyperspectral remote sensing technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing,2018,39(3):104-114.
- [4] 刘 畅,白 强,唐 高,等.中国海洋遥感技术进展[J].船舶与海洋工程,2018,34(1):1-6.
Liu C,Bai Q,Tang G,et al. Development of marine remote sensing technology in China[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering,2018,34(1):1-6.
- [5] 张庆君,韩晓磊,刘 杰.星载合成孔径雷达遥感技术进展及发展趋势[J].航天器工程,2017,26(6):1-8.
Zhang Q J,Han X L,Liu J. Technology progress and development trend of spaceborne synthetic aperture Radar remote sensing[J]. Spacecraft Engineering,2017,26(6):1-8.
- [6] 李 硕,唐元贵,黄 琰,等.深海技术装备研制现状与展望[J].中国科学院院刊,2016,31(12):1316-1325.
Li S,Tang Y G,Huang Y,et al. Review and prospect for Chinese deep-sea technology and equipment[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences,2016,31(12):1316-1325.
- [7] 胡 君,王 栋,孙天宇.现代航天光学成像遥感器的应用与发展[J].中国光学与应用光学,2010,3(6):519-533.
Hu J,Wang D,Sun T Y. Application and development of recent space optical imaging remote sensors[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics,2010,3(6):519-533.
- [8] 李颖虹,王 凡,任小波.海洋观测能力建设的现状、趋势与对策思考[J].地球科学进展,2010,25(7):715-722.
Li Y H,Wang F,Ren X B. Development trend and strategy of ocean observing capability[J]. Advances in Earth Science,2010,25(7):715-722.
- [9] 李建平,张 柏,张 玲,等.湿地遥感监测研究现状与展望[J].地理科学进展,2007(1):33-43.
Li J P,Zhang B,Zhang L,et al. Current status and prospect of researches on wetland monitoring based on remote sensing[J]. Progress in Geography,2007(1):33-43.
- [10] 肖志辉,张祖荫,郭 伟.地基、空基、星基微波辐射计定标技术概览[J].遥感技术与应用,2000(2):113-120.
Xiao Z H,Zhang Z Y,Guo W. A review:The calibration of ground-based,airborne and satellite-borne microwave radiometers[J]. Remote Sensing Technology and Application,2000(2):113-120.
- [11] 曹海翊,高洪涛,赵晨光.我国陆地定量遥感卫星技术发展[J].航天器工程,2018,27(4):1-9.
Cao H Y,Gao H T,Zhao C G. Development of China land quantitative remote sensing satellite technology[J]. Spacecraft Engineering,2018,27(4):1-9.
- [12] 武佳丽,余 涛,顾行发,等.中国资源卫星现状与应用趋势概述[J].遥感信息,2008(6):96-101.
Wu J L,Yu T,Gu X F,et al. Status and application trend of Chinese earth resource satellites[J]. Remote Sensing Information,2008(6):96-101.
- [13] 岳 涛,黄宇民,刘品雄,等.未来中国卫星遥感器的发展分析[J].航天器工程,2008(4):77-82.
Yue T,Huang Y M,Liu P X,et al. Analysis of China's future satellite remote sensor development[J]. Spacecraft Engineering,2008(4):77-82.
- [14] 孙振亚.高集成度模块化 CCD 成像系统关键技术研究[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),2019.
Sun Z Y. Research on key technologies of high integration modular CCD imaging system[D]. Changchun:University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences),2019.
- [15] 王 涛,张 艳,张永生,等.国产机载大视场三线阵 CCD 相机 GNSS 偏心矢量和 IMU 视轴偏心角标定技术[J].测绘学报,2018,47(11):1474-1486.
Wang T,Zhang Y,Zhang Y S,et al. Investigation on GNSS lever arms and IMU boresight misalignment calibration of domestic airborne wide-field three CCD camera[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2018,47(11):1474-1486.
- [16] 王 密,杨 博,李德仁,等.资源三号全国无控制整体区域网平

- 差关键技术及应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(4):427-433.
- Wang M, Yang B, Li D R, et al. Technologies and applications of block adjustment without control for ZY-3 images covering China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(4):427-433.
- [17] 马文坡. 航天光学遥感技术[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2011.
- Ma W P. Space optical remote sensing technology[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2011.
- [18] 向世明,樊学武,何娜,等. 微光遥感成像技术研发动态评述[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(2):89-100.
- Xiang S M, Fan X W, He N, et al. Review on low light level remote sensing imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2):89-100.
- [19] 孙武. 推扫式航天遥感相机动态范围拓展方法研究[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),2018.
- Sun W. Dynamic range extending method for push-broom space remote sensing cameras[D]. Changchun:University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [20] 丁蕾,袁银麟,郑小兵,等. 高光谱传感器现场光谱定标精度验证方法研究[J]. 应用光学,2017,38(3):463-468.
- Ding L, Yuan Y L, Zheng X B, et al. Verification method of spectral calibration accuracy for hyperspectral remote sensors[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3):463-468.
- [21] 方煜. 成像光谱仪光学系统设计与像质评价研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2013.
- Fang Y. Optical design of imaging spectrometer and research on the assessment of image quality[D]. Xi'an:Chinese Academy of Sciences(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2013.
- [22] 冯蕾,魏立冬,杨雷,等. 双通道曲面棱镜高光谱成像系统设计[J]. 光学学报,2019,39(5):149-154.
- Feng L, Wei L D, Yang L, et al. Design of double-channel hyperspectral imaging system based on curved prism[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5):149-154.
- [23] 刘扬阳,吕群波,曾晓茹,等. 静态计算光谱成像仪图谱反演的关键数据处理技术[J]. 物理学报,2013,62(6):25-32.
- Liu Y Y, Lyu Q B, Zeng X R, et al. Critical data processing technology for spectral image inversion in a static computational spectral imager[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6):25-32.
- [24] 郑鸿瑞,徐志刚,甘乐,等. 合成孔径雷达遥感地质应用综述[J]. 国土资源遥感,2018,30(2):12-20. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.02.03.
- Zheng H R, Xu Z G, Gan L, et al. Synthetic aperture Radar remote sensing technology in geological application: A review[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(2):12-20. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.02.03.
- [25] 李晓芳,王娜,史德杰. 雷达卫星遥感的发展及应用现状[J]. 卫星应用,2013(5):44-50.
- Li X F, Wang N, Shi D J. Development and application of Radar satellite remote sensing[J]. Satellite Application, 2013(5):44-50.
- [26] 孙宏海,何舒文,吴培,等. 高动态科学级CMOS相机设计与成像分析[J]. 液晶与显示,2017,32(3):240-248.
- Sun H H, He S W, Wu P, et al. Design and imaging analysis of high dynamics scientific CMOS camera[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(3):240-248.
- [27] 曹旗磊,赵明,董丽丽,等. 航天遥感相机及参数优化方法[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(3):295-301.
- Cao Q L, Zhao M, D L L, et al. Optimization of remote sensing camera and its parameters[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3):295-301.
- [28] 龚学艺. 空间大面阵凝视成像若干关键技术研究[D]. 上海:中国科学院研究生院(上海技术物理研究所),2014.
- Gong X Y. The key technology research of space staring imaging with a large area array image sensor[D]. Shanghai:Chinese Academy of Sciences(Shanghai Institute of Technical Physics), 2014.
- [29] 杨秀彬,姜丽,金光. 数字域时间延迟积分时间CMOS相机高分“凝视”成像设计分析[J]. 光学学报,2012,32(9):103-109.
- Yang X B, Jiang L, Jin G. Design and analysis of CMOS camera based on TDI in digital domain to realize high-resolution staring imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9):103-109.
- [30] 曹松. 科学卫星引领颠覆性空间技术创新[J]. 中国光学, 2019, 12(3):421-424.
- Cao S. Space science satellites lead to disruptive space technologies innovation[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3):421-424.
- [31] 陈世平. 航天遥感科学技术的发展[J]. 航天器工程,2009,18(2):1-7.
- Chen S P. Development of space remote sensing science and technology[J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(2):1-7.
- [32] 张熠天,高伟,谭龙. 地球资源卫星产品服务质量管理体系设计[J]. 科研管理,2015(s1):528-536.
- Zhang Y T, Gao W, Tan L. A research on the evaluation index system for the products of earth resource satellites[J]. Science Research Management, 2015(s1):528-536.
- [33] 云菲. 中国遥感卫星地面站简介[J]. 卫星应用,2015(5):49-50.
- Yun F. Brief introduction of China remote sensing ground station[J]. Satellite Application, 2015(5):49-50.
- [34] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):505-513,540.
- Li D R, Li M. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5):505-513,540.
- [35] 郎城. 无人机在区域土地利用动态监测中的应用[D]. 西安:西安科技大学,2011.
- Lang C. Application of unmanned aerial vehicle(UAV) in the dynamic monitoring of regional land use[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2011.
- [36] 周前飞,刘晶红,李刚. 面阵CCD航空相机斜视图像几何畸变校正误差分析[J]. 仪器仪表学报,2014,35(s1):1-8.
- Zhou Q F, Liu J H, Li G. Error analysis of geometric distortion correction of oblique images for array CCD aerial cameras[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(s1):1-8.
- [37] 李德仁,赵双明,陆宇红,等. 机载三线阵传感器影像区域网联合平差[J]. 测绘学报,2007(3):245-250.
- Li D R, Zhao S M, Lu Y H, et al. Combined block adjustment for

- airborne three – line CCD scanner images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007(3): 245 – 250.
- [38] 陈敬业, 时尧成. 固态激光雷达研究进展[J]. *光电工程*, 2019, 46(7): 47 – 57.
- Chen J Y, Shi Y C. Research progress in solid – state LiDAR[J]. *Opto – Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 47 – 57.
- [39] 吴 诚, 邢文革, 夏凌昊. 光纤阵列编码成像激光雷达系统[J]. *现代雷达*, 2019, 41(1): 5 – 8.
- Wu C, Xing W G, Xia L H. Coded imaging LiDAR system based on fiber array[J]. *Modern Radar*, 2019, 41(1): 5 – 8.
- [40] 吴曼青. 数字阵列雷达及其进展[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2006(1): 11 – 16.
- Wu M Q. The development of digital array Radar[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2006(1): 11 – 16.
- [41] 桂德竹, 张成成, 洪志刚. 我国航空遥感发展现状及若干建议[J]. *遥感信息*, 2013, 28(1): 119 – 122, 48.
- Gui D Z, Zhang C C, Hong Z G. Development status and industrialization recommendation of aerial remote sensing technology in China[J]. *Remote Sensing Information*, 2013, 28(1): 119 – 122, 48.
- [42] 沈 汀, 耿俊杰, 孙瑞宝. 机载双天线 InSAR 基线的工程设计与验证技术研究[J]. *高技术通讯*, 2013, 23(8): 773 – 780.
- Shen T, Geng J J, Sun R B. Engineering design and verification of the baseline for airborne dual – antenna InSAR[J]. *High Technology Letters*, 2013, 23(8): 773 – 780.
- [43] 杨 博. 基于光子晶体光纤的谐振式陀螺关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- Yang B. Research on key technologies of photonic crystal fiber resonator optic gyroscope[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [44] 胡正伟. 分析航测遥感装备与技术的发展[J]. *江西建材*, 2014(1): 219 – 220.
- Hu Z W. Analysis of aerial survey and remote sensing equipment and technology development[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2014(1): 219 – 220.
- [45] 王红闯, 王 敏. 河南省引进首台自然资源移动监测车[J]. *资源导刊*, 2018(6): 37.
- Wang H C, Wang M. Introduction of the first natural resources mobile monitoring vehicle in Henan Province[J]. *Resources Herald*, 2018(6): 37.
- [46] 李忠强, 张洪欣, 马 龙. 海监技术装备保障支撑系统建设与管理[J]. *海洋开发与管理*, 2013, 30(5): 48 – 50.
- Li Z Q, Zhang H X, Ma L. Construction and management of support system for marine supervision technical equipment[J]. *Ocean Development and Management*, 2013, 30(5): 48 – 50.
- [47] 王占宏, 白 穆, 李宏建. 地理空间大数据服务自然资源调查监测的方向分析[J]. *地理信息世界*, 2019, 26(1): 1 – 5.
- Wang Z H, Bai M, Li H J. Direction analysis on service for natural resource investigation and monitoring using geospatial big data[J]. *Geomatics World*, 2019, 26(1): 1 – 5.
- [48] 张微微, 金 媛, 包吉明, 等. 中国海洋生态环境监测发展历程与思考[J]. *世界环境*, 2019(3): 30 – 32.
- Zhang W W, Jin Y, Bao J M, et al. The development history of and thinking on marine ecological environment monitoring in China[J]. *World Environment*, 2019(3): 30 – 32.
- [49] 张衍毓, 高秉博, 郭旭东, 等. 国土空间监测网络布局优化方法研究[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(1): 11 – 19.
- Zhang Y Y, Gao B B, Guo X D, et al. Spatial optimized distribution method for China land monitoring network[J]. *China Land Science*, 2018, 32(1): 11 – 19.
- [50] 高春东, 何洪林. 野外科学观测研究站发展潜力大应予高度重视[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(3): 344 – 348.
- Gao C D, He H L. Great importance should be attached to development potential of field scientific observation and research[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 344 – 348.

Review on the development of natural resources monitoring technology and equipment in China

ZHANG Chaomang¹, YE Yuanzhi¹, DENG Yi², WANG Jianbang¹

(1. *Zhejiang Academy of Surveying and Mapping, Hangzhou 311100, China*; 2. *Information Center, Department of Natural Resources of Zhejiang Province, Hangzhou 311100, China*)

Abstract: Technical equipment development is an important part of natural resources monitoring. According to the different delivery platforms, the monitoring technology and equipment of natural resources are classified into three categories: satellite – borne, airborne and ground – based, and their details are described in this paper. The authors briefly analyzed the problems and challenges faced by the current development and, at the same time, put forward some suggestions for development which is based on the actual situation of China: To carry out inventory and assessment of natural resources and equipment; to emphasize the importance of infrastructure construction and resource integration of technological equipment, to make technical equipment development plan, and to adopt some other measures.

Keywords: natural resources; monitoring; technical equipment; remote sensing

(责任编辑: 李 瑜)