

引用格式:晏磊,廖小罕,周成虎,等.中国无人机遥感技术突破与产业发展综述[J].地球信息科学学报,2019,21(4):476-495. [Yan L, Liao X H, Zhou C H, et al. The impact of UAV remote sensing technology on the industrial development of China: A review[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(4):476-495.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180589

中国无人机遥感技术突破与产业发展综述

晏磊¹,廖小罕^{2,6,7*},周成虎²,樊邦奎³,龚健雅⁴,崔鹏²,郑玉权⁵,谭翔⁶

1. 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室(北京大学),北京 100871; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101; 3. 北京信息技术研究所,北京 100094; 4. 武汉大学遥感信息工程学院,武汉 430079; 5. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033; 6. 中国科学院无人机应用与管控研究中心,北京 100101; 7. 天津中科无人机应用研究院,天津 301800

The Impact of UAV Remote Sensing Technology on the Industrial Development of China: A Review

YAN Lei¹, LIAO Xiaohan^{2,6,7*}, ZHOU Chenghu², FAN Bangkui³, GONG Jianya⁴, CUI Peng², ZHENG Yuquan⁵, TAN Xiang⁶

1. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and 3S Application (Peking University), Beijing 100871, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Beijing Research Institute of Information Technology, Beijing 100094, China; 4. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 5. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 6. The Research Centre for UAV Application and Regulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 7. Institute of UAV Application Research, Tianjin and CAS, Tianjin 301800, China

Abstract: The drone is a data-driven air mobile agent in the future network environment, UAV remote sensing technology has become one of the leading industries for UAV applications. This paper introduces the development of UAV remote sensing technology within China and internationally, and there is a particular focus on the development of UAV remote sensing technology within China from the "10th Five-Year Plan" to the "13th Five-Year Plan" since the 21st century. It also focuses on the UAV remote sensing calibration field, the establishment of aerospace calibration field and application verification are also described, including the development of load and system technology of UAV remote sensing system. Secondly, it will introduce the industrial application of UAV remote sensing technology in the fields of national defense, land and ocean island

收稿日期:2018-11-16;修回日期:2018-12-28.

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0503003、2017YFB0503004);国家“863”计划重点项目(2013AA122100、2008AA121800);国家科技支撑计划项目(2011BAH12B00);国家发改委发改办高技([2005]1534);科技部科技型中小企业创新基金(02C26215200750)。[**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503003, 2017YFB0503004; National High-tech R&D Program of China (863 Program), No.2013AA122100, 2008AA121800; National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Sciences and Technology of China, No.2011BAH12B00; National Development and Reform Commission (NDRC) Development and Reform of High-tech Enterprises, No.[2005]1534; Ministry of Science and Technology Innovation Fund for Small and Medium-sized Technological Enterprises, No.02C26215200750.]

作者简介:晏磊(1956-),男,湖北武汉人,教授,研究方向为高分辨率成像与遥感定标。E-mail: lyang@pku.edu.cn

*通讯作者:廖小罕(1963-),男,贵州人,博士,研究员,主要从事空间信息科学、无人机遥感应用研究。

E-mail: liaoxh@igsrr.ac.cn

reef mapping, geological disaster monitoring, and emergency rescue. At last, China's advancement in UAV remote sensing technology with regards to intelligent control of networking, accuracy and real-time metric basis, self-organizing redundant fault tolerance of load platform, remote sensing big data cloud processing technology, and the practical application of UAV remote sensing networking will also be discussed. The overall goal of the future development of UAV remote sensing is to establish an unmanned aircraft network observation system with rapid information acquisition capability, to realize the unmanned aircraft networking technology from the project level to the remote sensing industry. At the same time, it also lays a foundation for Chinese national strategic leap in becoming a strong power in remote sensing field.

Key words: UAV; remote sensing; industrial development; technological breakthrough; intelligence network

***Corresponding author:** LIAO Xiaohan, E-mail: liaoxh@igsnnr.ac.cn

摘要:无人机是未来网络环境下一种数据驱动的空中移动智能体,而无人机遥感则是无人机应用最重要的引领性产业。本文首先以国内外无人机遥感发展现状为背景,重点概述了中国无人机遥感21世纪以来“十五”到“十三五”所获得的具有代表性的国家支持与推动的发展历程,阐述了无人机遥感定标场,航空航天定标场的建立以及应用验证,包括无人机遥感系统的载荷与系统技术发展;然后,进一步阐述了以遥感定标场、地物参量引导载荷性能、系统模型为代表的中国无人机遥感的相关技术跨越;接着,概略介绍了无人机遥感在国防反恐安全以及跨国应急救援,国土测绘与海洋岛礁测绘应用,地质灾害应用以及国家应急救援等领域的产业应用;最后,介绍了中国在无人航空遥感领域展开的跨越性的工作,包括组网智能控制、精度和实时性度量基础、载荷平台自组织冗余容错、遥感大数据云处理技术和无人机遥感组网实用化等内容。未来无人机遥感发展的总体目标是建立起具备迅捷信息获取能力的无人航空器组网观测系统,实现无人航空器组网技术由项目层面跨越到遥感领域,同时也为中国成为世界遥感强国的国家战略跨越奠定基础。

关键词:无人机;遥感;产业发展;技术突破;智能组网;发展综述

1 发展历程

1.1 国内外无人机遥感发展背景

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是一种由动力驱动、机上无人驾驶、依靠空气提供升力、可重复使用航空器的简称^[1]。1917年,世界上第一架无人驾驶飞机由英国皇家航空研究院研制成功。无人机早期主要用于辅助航空设计。从20世纪20年代到21世纪初期,无人机先后经过了无人靶机、控制无人侦察机和电子无人机、指令遥控无人侦察机和复合控制多用途无人机的发展,技术日趋成熟。

到20世纪末,各国制造的无人机达几百种,其性能和成本根据其用途差异甚大。以美国全球鹰为代表的长航时高空无人侦察机的实际使用发起了无人机研究的热潮^[2]。而此时无人机还是以军用为主,逐渐向民用领域扩展^[3-4]。在无人机的产业发展上,美国掌握核心技术并长期处于全球的领先地位,美军首次于越南战争中使用无人机进行监视侦察,并于海湾战争和科索沃战争中进行广泛的应用,有效减少美军人员伤亡。

无人机遥感系统是在无人机等相关技术发展成熟之后形成的一种新型的航空遥感系统。它利用无人机作为遥感平台,集成小型高性能的遥感传

感器和其它辅助设备,形成灵活机动、续航时间长、全天候作业的遥感数据获取和处理系统^[5-6]。无人机所能搭载的传感器也是多样的,澳大利亚利用美国研制出的“全球鹰”无人机搭载的光电(EO)/红外(IR)/SAR一体化集成载荷可应用于海洋监测等^[7]。美国航空航天局(NASA)也将多种无人机应用于海洋遥感(包括监测飓风和龙卷风)等研究项目。进入21世纪以后,无人机逐步进入民用领域并形成产业,美国能源部在大气辐射测量(ARM)计划中应用Altus无人机对大气对流层中的云层进行辐射和散射测量,以研究云层与来源于太阳和大地的辐射的相互作用,为准确预测二氧化碳引起的地表温室效应研究服务^[3-4]。

中国无人机的产业发展起步晚,在技术水平等各个方面跟发达国家相比有明显差距,但发展迅速。20世纪50年代中国正式开始研制无人机,60年代生产出了低速遥控靶机,70到80年代发展成功了“长虹”以及“长空1号”无人机。直到21世纪以后,中国的无人机工业才进入了飞速发展的阶段^[8],北京航空航天大学、南京航空航天大学、西安爱生技术集团、南京模拟技术研究所等科研院所和公司研制了各种类型的无人机,但其主要用途仍以军事侦察为主。20世纪90年代,中国测绘科学研究院开始民

用无人机的研制,较早应用于测绘领域^[9]。21世纪起,无人机遥感技术在中国起步并快速发展起来。

值得一提的是,2012年开始国内消费级无人机市场出现了爆炸性增长,深圳大疆创新科技有限公司将多旋翼的无人机飞行平台推向消费级市场,也将航拍变成了普通大众的一种爱好^[10]。

1.2 “十五”(2001–2005)期间科技部等开始支持民用无人机遥感系统技术

中国工业型无人机遥感系统研制始于2000年。2002年贵州盖克无人机有限公司在北京大学技术支持下获得的科技部科技型中小企业创新基金“空间遥感平台中的CMOS成像与信息处理系统”(02C26215200750),是国家早期支持民用无人机遥感载荷平台研制的重要代表^[11]。项目完成了无人机遥感原型系统的整体设计,由空中部分、地面部分和辅助部分组成。其中,空中部分包括遥感传感器子系统、空中遥感控制子系统、无人机遥感平台及其支持子系统。地面部分包括航迹规划子系统、无人机地面控制子系统、数据接收解压缩与实时显示子系统和遥感数据预处理子系统。辅助部分则包括定标系统、地面试验以及涉及无人机遥感的关键技术研究等^[12–13]。

在国家科技攻关计划项目“多用途无人机航空遥感系统研制”(2004BA104C)的支持下,贵州航空工业(集团)有限责任公司、北京大学、中国科学院遥感应用研究所于2005年8月8日在贵州省实现了我国大型多用途无人机遥感系统首次实际飞行试验(图1、图2),实现了系统的预期目标。国家多部委、教育部、航空总公司、科技部国家遥感中心、“863”计划有关专家组、国防科工局和多军兵种出席试飞活动。次日国家CCTV1新闻联播加以报道。飞行试验实现了对遥感设备的自动拍摄、遥感图像获取、快视图实时生成与传输、地面数据接收及显示等全部任务。遥感设备的控制和所有飞行试验内容通过预编程序实现自动控制,达到了无人机遥感原型系统的预期目标,验证了试验系统的可靠性。图3是首飞获取的遥感影像制作的效果图^[14]。

以此为基础,国家发改委于2005年在认定企业技术中心创新能力建设项目“无人驾驶空中对地观测系统研发平台能力建设”(国发改办高技[2005]1534号)的支撑下,实验完成了无人机航空遥感的自动化作业,解决了大型无人机平台、遥感载荷、空中遥感控制子系统以及地面数据接收等方面的关键技术,实现现在中雨、大风情况下经历了长航时遥



图1 2005年8月8日多功能无人机遥感系统首飞仪式
Fig.1 First flight ceremony of a multi-functional on Aug.8, 2005



图2 多功能无人机遥感系统首飞现场
Fig. 2 First flight of a multi-function UAV remote sensing system

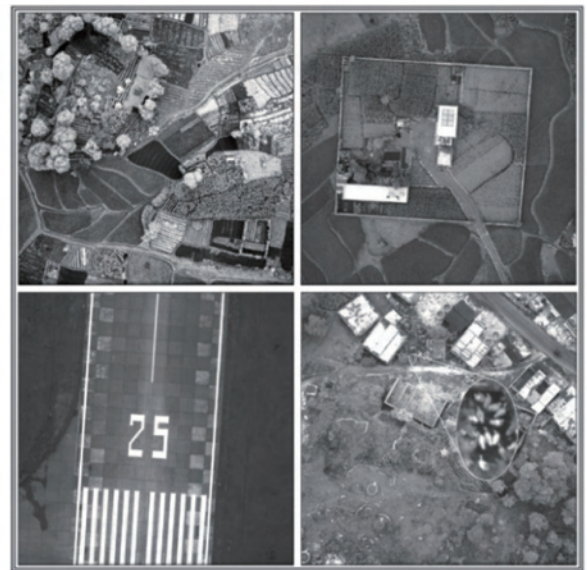


图3 分辨率2.25 cm的无人机航空遥感首飞遥感影像
Fig. 3 The UAV remote sensing image of the first flight (resolution of 2.25 cm)

感作业飞行,为中国无人机遥感系统的产业化研制和功能实现奠定了技术基础^[13,14],标志着我国高端无人机遥感系统产业化的开端,填补了我国工业型民用无人机遥感领域的空白。

1.3 国家支持的十一五到十三五(2006–2020)无人机遥感主要进展

2006–2010年第十一个“五年计划”期间,由中国科学院光电研究院、北京市信息技术研究所、贵航集团、北京航空航天大学、北京大学等国内研究机构共同合作,承担了国家“863”计划重点项目“无人机遥感载荷综合验证系统”(2008AA121800)。由此实现无人机民用遥感系统研制工程性技术的突破,建成了国内首个无人机遥感载荷北方(内蒙古包头)、南方(贵州安顺)综合验证场,推动了高分辨率无人机遥感应用走向系统化和定量化^[15]。同期,武汉大学和解放军信息工程大学联合建立起了我国首个航空航天定标场,为拓展无人机遥感与航天遥感结合奠定了基础。

2011–2015年第十二个“五年计划”期间,中国科学院光电研究院、中国测绘院、中电科技集团54所等开展了“863”计划重点项目“无人机遥感安全检测技术与网络示范体系研究”(2013AA122100),该项目在无人机遥感系统测控可靠性评估技术、遥感载荷性能与数据质量检测技术、无人机遥感系统安全检测标准与业务运行体系、基于北斗/GPRS/3G技术的无人机遥感网络体系关键技术、基于卫星中继技术的信息传递方面取得系统化成果;研制的小型化单Ka中继卫星机载终端设备,是我国首款基于中继卫星的无人机单Ka机载终端设备,实现无人机数据的高速异地实时传输,填补了国内空白,为无人机遥感组网应用示范迈出了坚实的一步。2011年,科技部航空数据获取产业联盟理事长单位北京星天地信息科技有限公司、武汉大学牵头组织的国家科技支撑计划项目“高性能航空遥感数据自动处理加工软件”(2011BAH12B00),建立起了机载传感器数据实时监测与监控系统,以及海量航空遥感正射产品自动化处理系统,实现了航空遥感数据自动处理与加工系统性能测试与验证,为无人机遥感软件应用奠定了工程基础。

2013年起,北京大学将“十一五”定标场地面验证技术移植应用,与武警警种学院共同建立起我国首个轻小型无人机遥感定标场,由此实现应急救援武警军兵种首个遥感定标场和培训基地,填补了国

内武警无人机应急救援的空白。该验证场后来成为国家遥感中心的应急救援部。

2014年,科技部国家遥感中心组建轻小型无人机遥感应用专家组,开始启动全国性无人机遥感资源规划布局研究。2015年,国家遥感中心批准依托中科院光电院在无人机遥感载荷北方(内蒙古包头)综合验证场的基础上挂牌国家高分辨率遥感综合定标场。

2016年至今的国家第十三个“五年计划”期间,国家科技部扩大了无人机遥感标志性领域和技术的支持。其中,代表性的有中国科学院地理科学与自然资源研究所牵头的重大研发计划项目“高频迅捷无人航空器区域组网遥感观测技术”(2017YFB0503000),面向需求,突破多元平台组网关键技术,研发集成组网观测硬件设备系统和规划调度与安全管控系统,实现资源优化、规划调度、产品和服务等协同一体的区域组网,构建融合国家野外科学观测台站为无人航空器空港的组网观测体系,具备常态化服务的能力。

表1是2016–2018年科技部“地球观测与导航领域”重点专项立项的项目有关统计。其中直接与无人机相关的项目有:全空间信息系统与智能设施管理,天空地协同遥感监测精准应急服务体系构建与示范,区域协同遥感监测与应急服务技术体系;高频次迅捷无人航空器区域组网遥感观测技术,重特大灾害空天地一体化协同监测应急响应关键技术研究及示范,国土资源与生态环境安全监测系统集成技术以及应急响应示范;城镇公共安全立体化网络构建及应急响应示范等。2016–2018年间接与无人机相关的项目有:广域航空安全监控技术以及应用;城市群经济区域建设与管理空间信息重点服务以及应用示范,城乡生态环境综合检测空间信息服务以及应用示范;全球综合观测成果管理以及共享服务系统关键技术研究等。

表1 2016–2018年国家重点研发计划“地球观测与导航”重点专项项目统计

Tab. 1 Key projects of earth observation and navigation within the national R&D program from 2016 to 2018 (个)

	2016年	2017年	2018年
项目总数	26	16	13
直接与无人机相关项目数	3	3	1
间接与无人机相关项目数	1	2	1

“十三五”期间,科技部其他重大专项、相关部

委科技立项也大量涉及无人机遥感。其根本目标就是要实现从有人航空遥感向无人航空遥感的跨越,为全国厘米级分辨率获取能力建设、从而为世界遥感强国的国家战略跨越奠定基础。

2 技术突破

无人机遥感的技术关键要点归结起来可以分为两点,即定量化和自动化。

要实现量化,应为无人机遥感做一个标尺,以实现“度量”。无人机定标场的建立为无人机航空遥感提供了精细标尺,为实现厘米级高分辨率应用提供技术突破;航空航天定标场的建立则在上述基础上,为实现无人机遥感数据与航空航天数据融合提供技术保障。同时,从根源上消除地面影像的上端光电仪器系统误差,实现地学与光电参量物理贯通。以地表指标牵引传感仪器产品发展,研制高空间信息品质的航空航天载荷,进一步保障无人机遥感的精确量化。

实现自动化,才能为实时化奠定基础。因此构建无人机遥感平台通用物理模型,将成像载荷多刚体拼接转变为单刚体成像方法,可以实现载荷简易自动控制;在此基础上构建一体化无人机遥感系统,实现自动化动态遥感控制观测。

2.1 无人机定标场建立与应用验证

为了保证无人机遥感应用的精准程度,需要对搭载的传感器进行几何、辐射、光谱定标。传统在轨定标使用软件进行模拟,即使传感器定标结果不如人意,也无法直接修复。无人机遥感以无人机为平台,搭载相应的传感器对地面进行成像,具有机动、灵活、高效等优点;且实飞定标误差可以在飞行后地面调整。同时,无人机成像与控制过程的自动化也是有人机难以具备的优势。

在童庆禧、李传荣、樊邦奎推动下,中国在“十一五”计划期间建设了首个无人机遥感定标场^[16](图4)。作为无人机遥感载荷定标的地面标尺,可用于载荷的精确几何、辐射和光谱定标,厘清了三者之间的交叉耦合关系和理论模型。发明车体移动硬靶标^[17],成为软体靶标退化的校正标尺。实验证明,此定标场实现了不确定度优于6%的光学载荷绝对定标,不确定度优于5%的光学载荷相对辐射定标和不确定度优于0.5 nm的光谱定标,ms量级的同步成像计量及曝光度量。经过精确定标的

传感器在农业遥感、测绘应用上也取得了多载荷最佳匹配效率的新方法。

2.2 航空航天定标场建立与应用验证

航空航天载荷定标是无人机遥感数据与航空航天遥感数据实现多源融合的基础工作。

嵩山定标场是国内首个航空航天载荷综合地面定标场,可以完成几何与辐射定标、卫星在轨测试等任务。几何定标的结果取决于地面检校场中控制点网的数量、分布、精度等要素^[18],地面辐射定标场的灰度标准及灰度梯度对航天器的辐射定标的结果精度也有较大影响^[19]。2007年经李德仁倡导,由龚健雅牵头武汉大学开始筹建该定标场。最终选定以河南登封市为基地,在武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室和的支持下,与解放军信息工程大学合作开始建设嵩山地面定标场^[20-21]。目前,嵩山遥感地面定标场主要包括航空检校场,航天几何定标场、固定靶标场等(图5),还可以进行辐射与光谱定标,以保证航空航天成像的辐射与光谱分辨率指标标定,实现了航空航天载荷观测的一体化度量。

由此,国家为开展无人机综合验证已陆续建立众多无人机航空试验场地,形成具有代表性的无人机综合验证场以及部分试飞场地,最主要的6个有:包头高分辨率遥感综合定标场、贵州安顺无人机载荷验证场、河南嵩山航空-航天定标场、河南安阳有人-无人机检校场、武警警种学院轻小型无人机综合验证场、天津宝坻京津新城无人机综合验证场。

2.3 载荷发展

伴随着轻小型无人机平台的发展,涌现了大量的轻小型无人机遥感载荷,如光学、红外谱段、激光雷达、成像光谱及合成孔径雷达、偏振载荷等,在抗震救灾、环境治理、农业植保等领域得到很好应用。由于其复杂程度降低,使开发成本较低,在我国有较大的应用需求,目前,轻小型无人机遥感载荷正朝着小型、多样、多功能、多组合方向发展。

(1) 轻小型无人机光学遥感载荷

在光学遥感载荷方面,国内外目前均使用数码相机代替胶片相机。2003年中国科学院遥感应用研究所自主研发集成了一套集宽视场、多光谱和立体成像等多种模态为一体的大面阵CCD数字航空相机系统MADC。在国家“863”计划期间,中国科学院成都光电研究所与解放军测绘学院联合设计了一种“3+1”大面阵CCD航测相机SPC-1。在轻小型无人机遥感光学载荷方面,则如雨后春笋般研

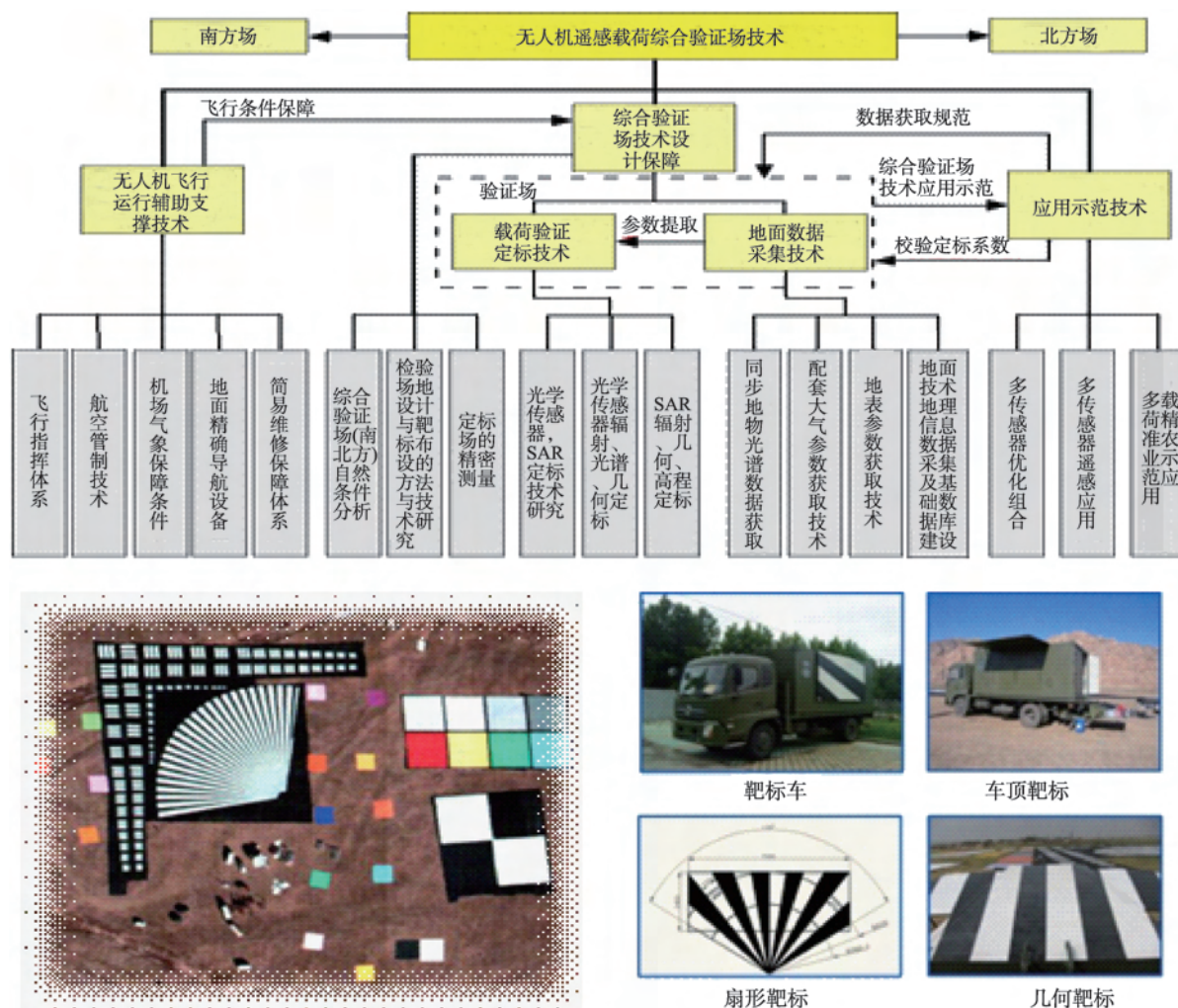


图4 无人机定标场设计、使用及各种靶标示意

Fig. 4 UAV calibration field design, use, and various target schematics

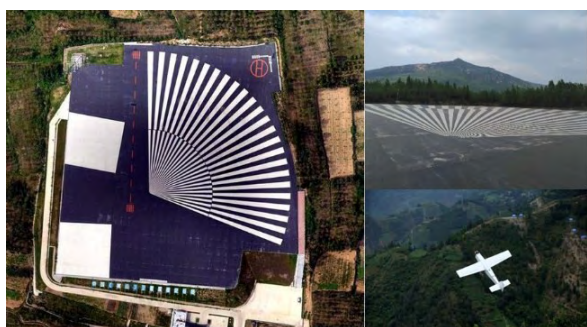


图5 嵩山定标场

Fig. 5 Songshan calibration field

制出各具特色的光学载荷,成为无人机遥感的基础标配。类似的还有视频微小成像载荷,用于实时监测各种姿态下的连续成像效果^[22]。

(2) 轻小型无人机红外谱段遥感载荷

在典型的红外载荷中,红外探测器和光学系统

是关键的重要组成部分,红外载荷的微小型化也主要体现在这两部分。红外探测器分为红外光量子探测和热探测两类,当前高性能红外焦平面探测器主要是量子效率较高的光伏型探测器。目前正在研发的第三代红外焦平面探测器,具有大规格、小型化、多色化、智能化和高温工作特点^[23]。红外光谱仪,特别是红外成像光谱仪是近些年航空遥感乃至无人机遥感载荷的发展重点。由于热红外面阵探测器、深低温光学系统等关键技术的限制,红外谱段的高光谱成像系统在国外以机载系统为主。近年来,随着焦平面探测器与制冷技术的发展,热红外高光谱成像仪的研制工作越来越受重视。

(3) 轻小型无人机激光雷达载荷

机载激光雷达是近年来快速发展的一项高分辨率对地观测技术,它突破了传统地面三维数据获取周期长、工作量大等问题,是继GPS技术之后测

绘界又一重大技术革命。目前,轻小型机载成像激光雷达基本延续了大中型机载激光雷达系统的工作特点:①一般采脉冲式光机扫描方式;②点云获取效率高;③扫描视场大。自20世纪90年代,中国科学院遥感应用研究所李树楷研究员等研制的机载三维成像激光雷达系统原理样机成功试飞以来,我国该方面工作飞速发展。中国科学院光电研究院研制了飞行相对高度为200~3500 m的机载激光雷达系统(AOE-LiDAR),并于2008年完成飞行实验,具备生产作业能力;2011年研制了飞行相对高度为50~1500 m的轻小型机载激光雷达(Lair-LiDAR),已于2012年完成了大量的外场飞行试验^[24]。中国科学院植物研究所郭庆华等开展以激光雷达为核心传感器、融合多源遥感信息批量提取以及反演植被三维结构和功能参数方面的数字生态领域相关研究,研发激光雷达技术的软硬件并将其应用在森林和城市生态学中^[25]。

(4)轻小型无人机成像光谱遥感载荷

近年来随着轻小型无人机的迅猛发展,成像光谱仪作为重要的对地观测载荷,也不断地走向轻小型化。国外累计已有数十款各种功能性能的机载成像光谱仪问世,如美国JPL实验室的AVIRIS,加拿大ITRES公司的CASI、SASI、MASI等。国外无人机成像光谱仪正朝着质量轻,自动化程度高,成本低,凝视成像的方向发展。目前,国内成像光谱仪产品主要适用于大飞机平台,轻小型化成像光谱仪的研制刚刚起步。2000年,上海技术物理研究所研制了OMIS机载成像光谱仪和宽视场PHI^[26]。长春光学精密机械与物理研究所先后承担了海洋水色CCD相机原型样机、高分辨率成像光谱仪实验样机等多项研究工作。

(5)轻小型无人机偏振遥感载荷

偏振遥感是近年来遥感技术领域发展起来的新方向,有着传统遥感无可比拟的优势。除了能获得光的强度信息,偏振遥感还能够获得地物的偏振度、偏振方位角等多维度信息,可用于天空偏振导航、图像去雾、岩石密度反演、海水污染检测、飞行器尾焰追踪等^[27-28]。目前国际上较为成熟的偏振卫星遥感有法国1996年开始的POLDER卫星,但实际上地物的偏振性质往往淹没在大气的偏振辐射中,而近地观测的无人机偏振遥感受大气的影 响较小,且有着较高的分辨率,是未来遥感发展的主要方向之一。2008年中国科学院安徽光

学精密机械研究所三路并行无人机载偏振CCD相机,主要针对像方远心和抗过载设计^[29];次年北京大学设计四路并行CCD相机偏振载荷,并进行系统集成及开展航空偏振遥感观测实验^[30]。未来偏振遥感载荷将向单相机镀膜分光的光场成像方式发展,能够大大降低载荷体积重量,提高成像的稳定性和精度。

(6)载荷室内外及外场定标

定标验证发现无人机遥感的系统误差主要来自载荷,即获取地面影像的上端光电仪器系统误差是高分辨率地学观测难以消除的最大误差源。由于传统辐射定标模型将成像系统视为黑箱,模型参数与成像系统本身的物理参数没有明确的对应关系,无法表达成像系统各部件的参数对成像过程的影响,不能为空间信息品质的提升提供物理基础。因此,为了从根本上提升空间信息品质,必须深入理解光学成像系统的物理过程以及其对输出图像DN值的影响,实现光电、地学参量物理贯通,从根源上消除偏差,颠覆空间传感器误差室内调整的开环静态模式^[31]。

光电参量分解是利用成像系统的光学和电子学参量来表达输出影像的DN值。由此通过连续调整成像传感器光电参量使地物影像观测误差最小化,实现了地学-光电参量的相互转换,以提升空间信息品质。具体是通过外场定标实验获得的影像DN值,利用地物 L 的校正模型 $DN=kL+g$,调整光电参量使真实拟合系数 k 逼近1和偏差 g 逼近0时,影像DN值接近地物真值 L ;进一步地,当 k 偏离1、 g 偏离0时,地物观测误差增大,说明仪器退化。根据光电参量分解方程可得到仪器退化的具体部件,用空间信息品质验证仪器品质并改进,实现成像光谱仪光学系统性能退化的监测,指标和结构的改进,以及光机电参量设计改型。

在此基础上,通过室内外偏振精密光学精密校正和外场定标方法,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的高光谱仪能够在5 nm带宽下达到0.1~0.3 nm的定标精度^[32]。外场定标发现,除了要考虑大气影响,传感器辐射及光谱定标参数(中心波长与带宽)的变化也会扭曲传感器接收的信号,降低空间信息品质。中心波长的改变会导致传感器入瞳光谱辐亮度测量的误差,进而影响到后续的反射率反演。同时,带宽变化也会影响传感器对光谱吸收特征的刻画^[29]。上述成果,经中国科学

院长长春光学精密机械与物理研究所仪器研制与试验验证有效,用于追踪仪器参数品质退化并改进;在中国科学院上海技术物理研究所和西安光学精密机械研究所新型宽谱段高光谱载荷实验中使用,为高品质航空航天载荷的研制提供了新的手段^[33]。图6是校标并完善光电参量的部分载荷系统。

2.4 无人机遥感系统性能飞行验证

基于遥感整机系统外场定标的地面验证技术,中国构建了无人机遥感地面验证系统。以此为依托,研制高性能无人机遥感设备系统,可以通过地面验证,极大提高无人机遥感整机系统的效率和可靠性,实现在飞行次数、保障人员、时间和安全性等方面的产业化效能数量级的提升,并推广实现生产成本降低20%,可靠性增加10%的直接效益,推动地面验证设备的工程化设计(表2)^[34]。

以此为基础研发的工业级无人机遥感系统的产业化成熟度得到了验证,正在成为航空遥感的主

要装备。例如,中航贵州飞机公司鹞鹰系列无人机的使用,创造了我国批量生产无人机安全飞行记录,证明了国内无人机在设计生产、飞行鉴定、培训使用和售后服务等产业化环节的产品技术与制造工艺基本成熟。为了展示国内工业级无人机系统的综合性能,中航贵飞公司组织鹞鹰无人机开展了金沙江“死亡河谷”特殊测绘飞行验证。此次飞行的海拔在3950~4550 m,高差达600 m,在35~78 m的峡谷底部实现单次飞行超10 h的壮举,并在贴近山巅蜿蜒曲折的百公里航线上往返飞行多条航线完成测绘及测图拼接。金沙江飞行验证了无人机系统耐候安全性能(图7),在视距限制区通过卫星中继的遥测遥控远程作业性能,机载系统优良的抗峡谷疾风突变的控制性能。鹞鹰无人机采用宽角测绘相机,解决了低空测绘兼顾效率的要求,证明无人机具备低空作业安全性优势且兼备测绘效率和质量的航测综合能力。



图6 经地表参数校标并完善光电参量的部分遥感载荷

Fig. 6 Calibration of surface parameters and development of photoelectric parameters of partial remote sensing loading

表2 无人机遥感系统飞行验证结果

Tab. 2 UAV remote sensing flight verification results

试验飞行条件		设备系统制作前	设备系统制作后	产业化效能
科学性 合理性	安全性	风险很大	有风险	安全可靠数量级提升
	飞行次数	几十次	十几次	飞行次数减少5~10倍
	保障人员	上百人	30人以下	参与人员减少5倍
	延续时间	1~2年	2月以内	时间减少5~10倍
	性能指标	缺乏量化验证依据,性能通过飞行改进	指标量化、明确,性能通过地面实验改进	指标改进有依据,性能显著提高
经济性		飞行实验成本为产品的1/4~1/3	飞行试验成本降低80%	产品成本降低20%以上



图7 金沙江峡谷影像以及高光谱航测影像(“863”专项成果)

Fig. 7 Jinsha river canyon image and hyperspectral aerial survey image

3 产业应用

自“十一五”计划实施以来,基于中国无人机遥感的技术突破,其产业在我国军事应用、国土安全上实现重大突破,在国防、地理与海洋监测、国土测绘与海洋岛礁测绘上引发巨大应用效益。在民生安全、社会发展上也带来技术变革,在地质灾害监测、应急救援及各行业普及层面具备不可替代的作用。

3.1 国防应用

无人机遥感在国防安全领域有着不可替代的应用潜力,随着高分辨率对地观测系统的发展,无人机遥感正在成为中国完整的空间对地观测基础设施体系的重要组成部分^[35]。

无人机可采用车载起飞、弹射起飞、滑降、伞降等起降方式,不需要专门的起降机场^[36],因此与航天遥感相比,无人机遥感的作业成本相对较低且高效灵活。同时,因无人机在运输和起降方面方便,可以实时快速地获取小面积零散区域的影像^[37],解决了卫星遥感和传统航空遥感存在的影像获取周期长、缺乏机动灵活性等问题。在维稳、反恐突击以及空中支援等多样化任务的情报侦测领域显示出了十分广阔的应用前景,其中军用无人机80%用于军事侦察与目标发现。

中国军用无人机的研制始于20世纪50年代末后期,先后研发了B-1/2靶标无人机,WZ-5高空照相侦察机和D-4小型遥控无人机,初步奠定了无人机的技术基础。而到了20世纪80年代,随着电子、通信和计算机技术的迅速发展,无人机经过了无人靶机、预编程序控制无人侦察机、指令遥控无人侦察机和复合控制多用途无人机的发展过程,无人机技术日趋成熟,在几次局部战争中发挥了重要作用,得到了较为广泛的应用。

20世纪90年代,由西北工业大学研制成功的ASN206无人机是该系列中的经典产品,该无人侦察机搭载了垂直相机和全景相机,红外探测设备,电视摄像机以及定位校正设备,可有效用于昼夜空中侦察,炮火定位以及空中摄影等任务;新世纪以来,中国无人机产业进入了蓬勃发展的时期,技术研究不断突破,现在已经跻身于美国、英国以及以色列等国家的一流梯队当中。2004年,中国航空气动力技术研究院自主研发的彩虹-3中程无人机

研制成功,该无人机安装有照相摄像设备,SAR雷达和通信设备,外侧的两个挂架上分别带有一枚轻型精确制导导弹,除了常规侦察外,可以实现对地面固定目标的精确打击。军用无人机的产业已经迅速崛起,尤其是尖端无人机平台的研制为提升军队战斗力发挥了重要作用。2006年开始的第十一个五年计划期间,是中国国防无人机快速发展的五年,贵航集团生产的多种型号先进无人机也率先用于国防军事领域;被称为“中国全球鹰”的BZK-005无人机于2006年的珠海航展首次出现在大众视野,它是一种具有隐身能力的高空远程无人侦察机系统飞行器,可以携带一个大型光电吊舱,包括昼夜电视摄像机、红外摄像机以及大型卫星接收天线,用于接收地面指令,同时传输侦察图片。

近10年,中国相继研发出“长鹰”系列高空远程长行时无人侦察机,“翔龙”高空高速无人侦察机以及“利剑”隐形无人机。其中最优良的平台既可在数百公里外实施远程广域侦察,又能对可疑区域实施抵近精细侦察。同时,续航能力达数十个小时,无论是载荷功能还是侦察能力都达到了国际领先水平。

总体来看,中国已经基本建成了远、中、近、超近程的军用无人机装备系统,先后参加了空中侦察、激光照射、毁伤评估、电子战、通讯中继等一系列大型军事活动,取得了重大的军事效益,为中国的国防安全提供了重要保障。

3.2 海洋监测、国土-岛礁测绘应用

无人机应用在国土和海洋岛礁测绘领域,主要是使用无人机快速大面积获得测区的高分辨率影像,获取图像的空间分辨率从cm级到m级不等,这与搭载在无人机上面的高精度数码成像设备(即传感器、相机参数)有关。适用于1:2000或更高例尺地形图测绘及正射影像制作,完全具有高分辨率遥感影像数据获取和处理能力。其在海洋岛礁测绘代表性的应用包括:

(1) 海岸带动态监测与管理

《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》将发展海洋经济和海洋科技提升到前所未有的战略高度,海洋产业更是成为培育和发展战略性新兴产业的重要领域^[7]。这为我国海岸带测绘提供高效、快速的技术装备与解决方案提供了重大需求和领域保障。

海岸带具有地物破碎、反差小、高动态、潮汐瞬变等特点,地表信息获取一直是个难题。海岸带蜿蜒曲折,待测区域往往面积较小、分布零散,人工测量登岛困难,在技术和装备上都给海岸地形测绘提出了新的需求。自2012年国家海洋局建立海域无人机基地以来,国家海洋环境监测中心、国家海洋技术中心、海南省海洋监测预报中心联合安翔动力、中测新图等公司利用多种型号的轻小型无人机先后完成了辽宁、天津、山东、江苏、广东、浙江、海南等沿海省市主要围填海项目动态监测工作。

(2) 岛礁的远距离动态监测

中国海岸周边遍布岛礁,面积大于500 m²的就超过6500个,多数岛礁远离大陆,登岛难,面积小,卫星或航空因分辨率难以获得岛上地物信息,轻小型无人机则可以从陆地起飞完成岛礁遥感任务。

2012年4月27日-5月27日,中国搭载双频GPS飞控,获得了钓鱼岛及其附属岛屿全覆盖的0.1 m分辨率遥感数据,通过稀少无控制测图技术,完成了1:2000大比例尺地形图测图,填补了钓鱼岛及其附属岛屿缺少大比例尺地形图的历史空白。成果供14个国家部委使用。进一步地,2014年7月28日遥感观测无人机从浙江省苍南县霞关镇起飞和回收,实际飞行870 km航程,持续飞行9 h,成功获取了钓鱼岛主岛和南北小岛(总面积约12 km²范围)0.05 m高分辨率遥感影像和POS数据(图8),为开展遥感无控制测图技术及对岛上人工地物的识别和定位技术研究奠定基础。

3.3 地质灾害应用

当前,应用无人机开展地质灾害调查、监测与应急救援已经在世界范围内广泛兴起^[38]。无人机技术

打开了野外获取地质灾害高分辨率、高精度和多时相数据的大门,无人机和相关测量技术已成为野外地质灾害调查不可或缺的重要手段^[39]。与传统测绘和灾害调查方法相比,无人机能快速、方便、安全地获取地质灾害区域的影像和地形数据^[40],能第一时间提供灾后的第一手灾情数据,为灾害应急救援和灾情评估提供有力的决策支持^[41],如2008年汶川地震、2008年唐家山堰塞湖、2009重庆武隆鸡尾山特大型山体滑坡、2010年甘肃舟曲特大泥石流等。无人机遥感在地质灾害领域的应用主要包括:

(1) 地质灾害基础调查与分析

无人机非接触测量新技术引入地质灾害调查,大大减轻了野外工作量^[42]。无人机可用于单体和区域地质灾害野外调查。无人机获取的高分辨率和高精度的影像以及地形数据为室内精细化的遥感解译和分析奠定了坚实基础。同时,无人机在地质灾害点位置提取、规模等级评估、潜在危险判识、承灾体提取、灾情评估等方面具有显著优势^[43]。通过无人机获取的数据,可以更好地开展地质灾害编目、灾害地形和几何特征参数提取、灾害点判识、数字地形分析、地貌演化等工作^[44]。

(2) 地质灾害应急测绘、救援与灾情评估

无人机以其灵活、轻巧的特点,可以迅速完成对受灾区域的测绘工作,可以实时传输影像和视频,帮助救援人员及时掌握灾区最新情况,为救灾指挥部制定救灾方案提供技术支撑^[45-46]。利用无人机获取地质灾害区域的高清影像和地形数据,与灾前谷歌影像、高分影像、快鸟影像、大比例尺地形图等对比,可以快速评估受灾区域范围、基础设施破坏、房屋损毁、农田淹没、植被破坏、河道堵塞、堆积物厚度与方量、潜在危险对象等情况,为灾情精准

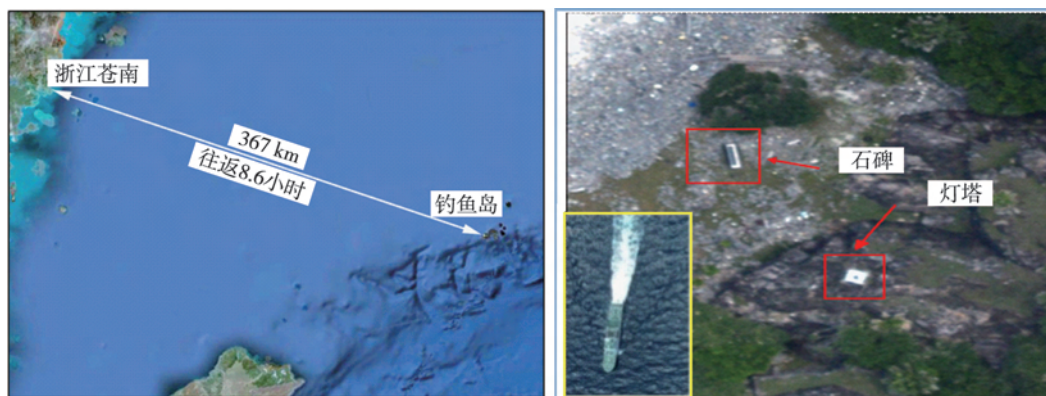


图8 钓鱼岛无人机监测飞行路线与影像成果

Fig. 8 Diaoyu islands drone monitoring flight route and image results

评估提供有力支持。

(3) 地质灾害地表形变监测与早期预警

利用无人机机载高光谱相机、高精度合成孔径雷达(InSAR)、激光雷达(LiDAR)、偏振高光谱、高分辨率相机可以生产高精度的地形、影像产品。通过多时相的无人机监测,能够分析出地质灾害区域位移、变形、沉降、纹理特征、运动过程等,为深入研究地质灾害动力学过程和机制提供监测数据支撑^[47-48],为地质灾害早期预警提供技术支持。

(4) 地质灾害场景三维重建

随着计算机视觉技术进步,基于运动的三维重建(Structure from Motion, SfM)技术已经能够将无人机正射和倾斜摄影拍摄的二维照片重建成三维场景模型,无人机和SfM技术的结合能够最大程度地还原和再现地质灾害区域三维立体场景。此外,无人机720°全景拍摄和建模技术,也可以让人们身临其境地体验地质灾害震撼场景。这些技术为地质灾害防灾减灾教育和科普提供了生动有趣的技术体验^[49-50]。

3.4 国家应急救援

无人机遥感在公共安全领域的应用主要是提

供了一种轻便、隐蔽、视角独特的工具,确保安全领域工作人员人身安全的同时能够得到最有价值的线索和情报,对时效性和图像分辨率要求较高,对无人机系统的出勤率要求较高。近10年来,无人机应急监测技术已经在跨国救援、侦察反恐等公共安全领域展开广泛应用^[51]。2015年1月13日,中国人民武装警察部队警种学院与科技部国家遥感中心签署战略合作协议,正式成立国家遥感中心应急救援部(图9)。

(1) 自然灾害应急救援

2014年8月3日16时30分,云南省昭通市鲁甸县发生6.5级大地震,武警部队历史上第一次全流程使用轻小型无人机应急侦测辅助决策,第一次实现了重大灾害下救援人员零死亡的良好成绩。鲁甸应急救援也是国家救援队第一次在重大应急中使用无人机实时传回高精度图片,现场实时指挥决策救援的应用,具有重大的里程碑意义,图10为救援现场航拍的无人机遥感影像图。

(2) 国际救援

2015年4月25日14时11分,尼泊尔中部发生8.1级特大地震。应尼泊尔紧急援助请求,经国务院、中央军委批准,武警部队紧急组建中国武警交



图9 武警部队与国家遥感中心签署战略合作协议及武警定标场

Fig. 9 Signing of a strategic cooperation agreement between the Armed Police Force and the National Remote Sensing Center and the joint construction of the armed police calibration field

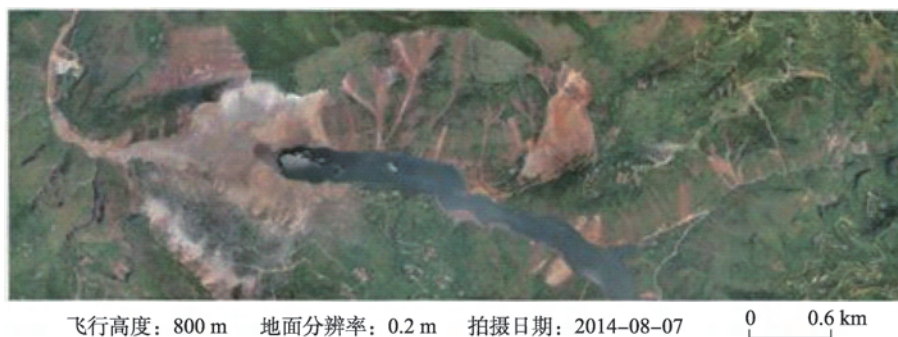


图10 鲁甸地震牛栏江堰塞湖震后无人机遥感影像

Fig. 10 Remote sensing image of UAV after the Ludian earthquake near the Niulanjiang River

通救援大队协6架无人机,执行中尼、吉加公路的抢通保通任务。这是中国国第一次官方授权军事力量在境外使用无人机开展应急侦测任务。此次灾害救援任务中使用的无人机能够在2000 m的高空航拍到较清晰的遥感图像,为后期的成图及灾害体量测提供诸多便利,为武警部队日后定标技术在无人机应急侦测领域应用奠定了基础。

(3) 边防领域反恐演习

2016年7月,武警部队使用无人机侦测系统第一次在中国、阿富汗、巴基斯坦、塔吉克斯坦四国交界的恐怖分子活跃区-瓦罕走廊开展了反恐实战作业,生成了世界上第一幅瓦罕走廊卫星/无人机融合影像图,实现比地面侦察缩短80%时间的快速精确侦察。

3.5 农田监测

遥感在农业遥感领域有着不可替代的作用,而其中农田遥感有明确客观的观测对象,即耕种的田地。农田是生产农作物的土地,生产的粮食是基础性的国家战略资源,因而农田监测则是保障粮食安全的根基所在。而利用遥感技术来监测作物生长,加强作物生长田间管理,是提高农作物产量的重要环节。

温度是影响农作物生长的关键因素,以农田温度监测为例,热红外遥感技术是获取农田温度的重要手段,而目前国际上已有的多种地表温度产品的空间尺度多为千米级,难以实现对我国广泛存在的行间播种模式的精确监测。而未来借助于无人机监测的手段,能够极大提高热红外数据的空间分辨率,通过合成卫星与无人机的影像数据,提供数米甚至厘米级别的农田温度产品,有利于研究更小尺度研究区域的农田生态系统,在农田的干旱监测,蒸散发估算以及作物估产等方面大有用处。

其次是作物的氮磷钾含量水平,通过无人机高光谱和偏振观测,可以得到氮磷钾的不同比率,为施加农肥提供指导。同时,中国化肥使用率约为1/3,比西方高水平农业化肥使用率低1到2成,这将导致更大的土地化学污染。利用无人机遥感监测,可以较大降低农业土地的化学污染。

3.6 公众安全与宣传

无人机在公共安全领域的应用主要是提供了一种轻便,隐蔽且高效的工具,在确保工作人员人身安全的同时,能够得到最有价值的线索和情报。

例如,针对大地震发生后城镇交通系统、通信系统破坏严重甚至中断,次生灾害多发等情况,无人机航拍可以获得有序高效的建筑物破坏等级、遇难或受伤或被困人员地点分布、滑坡体塌方、道路破坏分布等专题图件,为现场救援任务展开与决策提供技术支持。其次,可将无人机及时获取的灾情信息和救灾进展在第一时间向社会公布,产出无人机航拍路线及现场等图件,让社会公众及时了解灾情分布和救灾行动,安抚群众,消除谣言及猜测引发的不安。无人机也能根据社会公众的实际应用需求开展一些切合实际的工作,服务于社会公众。

中小型短程无人机特别适合公共安全领域的应用。例如,发生群体性事件时,小型无人机能发挥快速响应、空中机动灵活的优势。同时在加装空投装置后,小型无人机还可以进行特殊物品的投放,如播散传单、投放紧急物品等。无人机技术作为应急救援工作的新兴高科技手段,代表着中国灾情获取和损失评估的先进水平。它不仅可以为救灾工作服务,在减灾知识科普宣传方面也同样可以起到不可替代的作用。面向不同科普对象,通过对实际地震航拍的数据提取相关要素,进行归类分析建模,成为减灾知识科普宣传的新形式。

4 未来跨越

基于中国无人机遥感的技术突破与产业发展态势,以2017年立项的科技部重点研发计划项目“高频次迅捷无人航空器区域组网遥感观测技术”为重要依托,未来无人机遥感应具备3大特点:①融合5G低空通讯技术的低空覆盖与网络切片的组网智能控制;②智能感知、智能认知、智能行动一体化;③云计算、物联网、移动通讯、人工智能(AI)相结合的一体化。实现由单机向组网的跨越,由人为控制向实时化智能化的跨越,由区域局部观测向全球多层次观测的跨越。

4.1 组网智能控制体系

基于定时定点智能化管理的无人机灯光秀已成最为大众熟悉的无人机组网,展示了单个无人机通过组网可以释放出巨大的潜力^[52]。“十一五”期间单一无人航空器遥感系统特别是轻小型无人机遥感系统可以发挥的作用在许多领域已得到应用检验^[53]，“十二五”期间多无人机组网测绘也开展了初步试验^[54]。面向国家科技研发及重大应用的高效

率无人航空器组网遥感观测需要相互通信和任务协同智能计算。“十三五”期间国家安排的科研任务包括,围绕特定的应用区域,有中心自组织移动网覆盖范围内,解决多类别无人航空器高速高带宽蜂群自组网遥感任务协同关键技术。借助GIS技术和AI技术相结合,无人航空器将具备地理位置超精准定位、周边环境快速识别和智能组网任务协同的遥感能力。特别是无人航空器组网遥感应用技术研究既包括通信协议、通信制式、频谱资源等研究^[55],也包含无人航空器资源综合评估与调度、公共航路规划与构建^[56](如蚁群算法应用)、组网任务协同(如蜂群战术)等研究。低空作为无人航空器开发利用最频繁的空域,通过ICT技术、GIS技术和AI技术相结合,即将进入数字化低空网络时代^[57]。应该说除了专门的局域网,目前商业化运行的地面移动通信网在支持无人航空器发挥高频迅捷机动能力上面还有局限性。随着地面移动基站未来升级到5G,基站移动信号在低空的覆盖将从目前的离地面200~300 m左右拓展到1000 m左右,同时具备超高带宽和低延迟通讯能力。为充分利用5G带来的通信能力,产业界已经提出网联无人机的概念^[58]。卫星通信技术的进一步发展将使无人航空器在低空移动信号和卫星通信信号之间低成本无缝切换^[59]。融合空域技术发展将让无人航空器能够安全和高效率地进入中高空空域,极大地拓展无人航空器组网范围^[60]。由于无人航空器管理的规范化,法律要求所有无人航空器都需要登记注册^[61]和接入一定的云端管控系统并能实时飞行在线^[62],这为无人航空器遥感组网提供了制度保障。未来无人机遥感应用越来越具有大众化的趋势^[63],无人航空器拥有者和使用者量大面广,如何在科技上解决

个体之间组网协同和智能化运行,将成为未来无人航空器及其遥感应用研究的重要方向(图11)。

4.2 智能观测度量基准体系

无人机遥感最大的特点是高分辨率下的姿态迅捷“自动智能”的自适应变化,包括观测大角度、变角度和观测距离(矢径)的自动快速变化,同时也要求高效准实时处理。因此,一种适应于高分辨率无人机遥感影像快速迅捷自动处理的极坐标基准新体系^[64-65],是一种值得探讨的适应无人机“智能遥感”发展的智能处理坐标基准,实现从本质上降低对初始航空影像误差的敏感性,完成减少地面控制点的高精度影像定位,为复杂条件下的精准飞行提供角度和射线矢径变化并直接计算的灵活性。此基准以 (ϕ, θ) 表示方位角和高程角,确定特征点方向,等价于极角;以 ω 表示视差角,依据深度信息源于视差的特点,等价于极径(图12(a))。该观测度量基准用角度取代平面直角,形成平面与高程的不同量纲,与国际开源最好的直角坐标体系处理算法比较,极坐标数据处理体系的数据度量处理的效率、

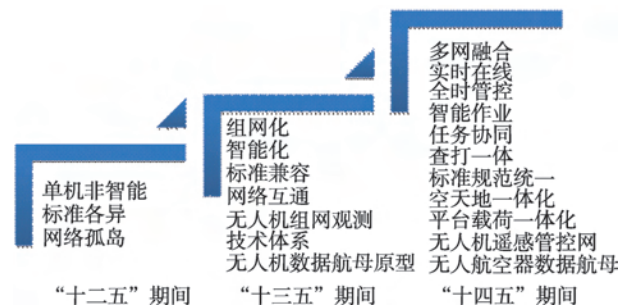


图11 无人航空器遥感系统组网智能化发展趋势

Fig. 11 Development trend of the unmanned aircraft remote sensing system network

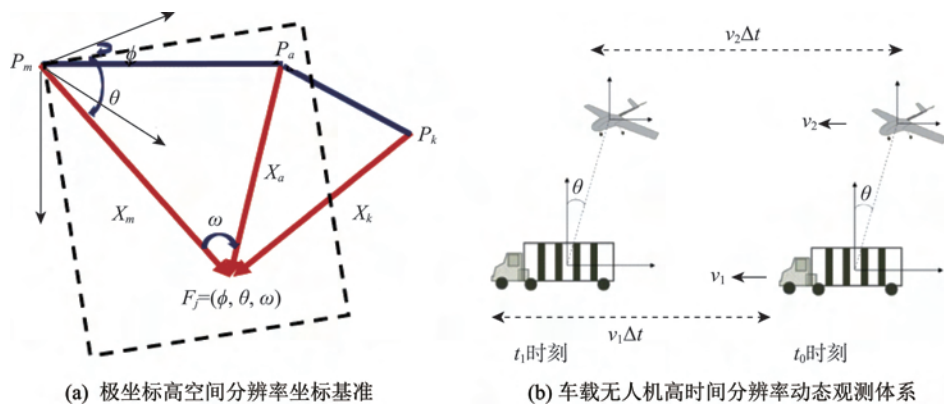


图12 无人机遥感极坐标高时空分辨率观测度量体系

Fig. 12 UAV remote sensing polar coordinates and spatial resolution observation and measurement system

精度、抗干扰能力显著提升^[66]。

其次,无人机遥感应应用要求动态化。基于车体和无人机相对运动计量成像时间分辨率标尺的新方法,可以实现时间分辨率精准度量(图12(b))。将车载无人机一体化定标方法移植武警军兵种和应急救援,实现鲁甸和尼泊尔数字化动态化决策灾害救援。将陆基定标延展至海基平台,将极坐标方法引至多角度海洋海事目标探测识别,形成基于无人平台的海陆一体化遥感定标和精度验证关键方法,并构建海上目标识别模型方法体系,形成高时间分辨率动态观测度量基准^[67]。

空间信息来自经纬亦应回归经纬。值得探讨的是,以无人机遥感为对象,探索极坐标体系下获取、处理分析、决策一体的处理方法,结合时间分辨率动态度量,避免或减少各个环节中的坐标变换,可以成为兼顾精度、效率的一种新的无人机遥感数学方法。随着公开发行的国军标《地球表面空间网格与编码》(GJB8896-2017),逐步确立了我国空间信息采用剖分经纬网格在数据组织管理上的统一性,其本质是以地心坐标系对地球表面格网进行多层级划分以满足不同分辨率信息的组织管理,更适合于极坐标体制。进一步地,基于经纬剖分格网理论的国家高分重大专项标准《高分卫星遥感信息组织参考框架技术规范》(GFB 30201-2018)为无人机组网遥感信息极坐标处理提供了便利。因此,探索无人机遥感数据极坐标处理与经纬剖分格网组织管理标准二者结合的数学表达,可望形成以极坐标经纬格网、时间分辨率度量为依托的无人机遥感空间信息一体化获取-组织-管理-存储-处理-分析-应用的动态分析应用新体系(图13)。

4.3 智能载荷平台自组织与冗余容错体系

无人航空器遥感载荷正遵循标准化和智能化发展。标准化本质上是模块化、通用化,在制造环

节降低成本并在应用环节中能够做到“高频、迅捷”。标准化、智能化载荷技术主要包括快速安装和插拔、智能识别和检校、智能感知和作业、数据智能预处理等^[68],将极大提高应用效率。目前遥感载荷作业定姿定位和曝光控制模块有与平台飞控结合的,也有不依靠平台飞控系统而是载荷自成一体的。未来智能化将是包容性的,并且可以按需切换和相互备份。遥感载荷和专业作业将更加智能化地融合在一起,特别是在精准、高效无(少)公害农业领域。如通过农情遥感获得病虫害处方图快速分析,确定病灶准确位置,再实施精确喷洒作业。这样的农情遥感和喷洒作业“查打一体”系统将成为未来重要发展方向^[69]。载荷智能化发展还将与平台智能化相向而行,并相互拓展到载荷平台一体化设计^[70],构建系统冗余容错体系,实现平台组合冗余,载荷组合冗余,以及两者交叉组合冗余,推动无人航空器智能感知、智能认知、智能行动的一体化协同发展。

基于无人机载荷、平台组合冗余的容错体系是未来智能控制环境下对地观测的必要系统模块。以飞艇、气球、大型无人机、多架轻小型无人机等多平台为依托,搭载多光谱、高光谱、偏振、红外以及激光雷达等多载荷,实现无人机群组网冗余智能观测,满足平台可替代,载荷可替代,组合工作流可替代,即满足冗余重构,达到提高整体观测保险系数的目的,避免在某一平台出现故障时系统崩溃或失效。图14是无人机群组的智能控制冗余容错对地观测系统的示例。

4.4 无人机遥感大数据云处理平台

未来无人机遥感数据的获取和处理基本可以实现按需定制,数据产品在时相、分辨率、类型和实时性上都可以极大地满足用户需求^[71]。与遥感卫星数据的集中获取、处理和对外服务方式不同,无

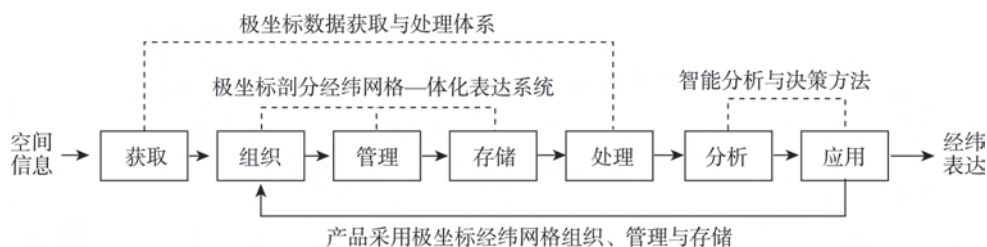


图13 无人机高分遥感空间信息链

Fig. 13 UAV high-resolution remote sensing spatial information chain

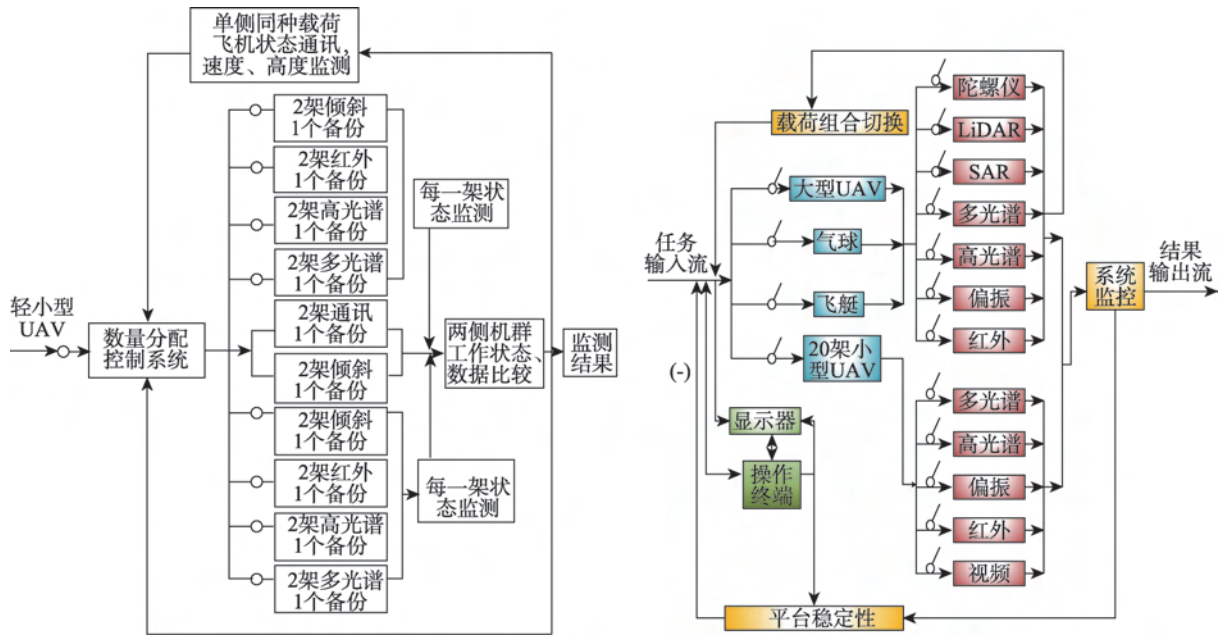


图 14 无人机群组冗余容错对地观测系统以及多传感器件的冗余容错系统

Fig. 14 Redundant fault-tolerant earth observation system of UAV group and the redundant fault tolerant system with multiple sensor components

人航空器遥感数据来源多样,质量参差不齐、时空基准不一致、数据标准不统一、传感器精度无法保证。建设网络化的无人机遥感数据获取、汇聚和分享体系,通过“滴水成海、汇流成川”的方式实现数据汇集,可以充分发挥其“聚变能”的重要作用。在这种体系下,存量数据可以高效利用、增量数据可按需获取、所有数据在线快速处理并按需供应;通过任务订单的方式激励用户参与广泛的数据获取任务,大区域甚至全国范围的覆盖、高频次、超高分辨率的无人机遥感数据的获取也不再困难。这种体系下的数据与服务具备更高的商业价值和几乎无限应用潜力。基本概念是,通过国家、行业或者社会力量建设全国无人机遥感数据汇聚和分享网络,构建无人机遥感数据互联网汇聚和交换枢纽超级平台-无人机遥感数据航母,使得单一的遥感无人机有一个或者多个数据“航母”停靠。通过公益性服务或者商业化运行,实现按需定制飞行区域,可快速实现全国范围的数据覆盖、突发事件的应急响应以及遥感数据应用价值的深度挖掘。公众可以从无人机数据航母中得到高分辨率的数据、产品及计算环境服务,数据拥有者可以利用航母平台向他人共享数据,也可以利用航母平台的数据和计算环境支撑自己拥有数据的深加工,研究者可以利用航母提供的数据和计算资源运算研究模

型。构建无人机遥感数据航母需要解决诸多关键技术,主要包括:① 可持续运行的无人机遥感网组织模式;② 无人机遥感组网观测关键技术和标准规范;③ 海量分布无人机遥感数据虚拟汇聚、储存与访问技术;④ 多源异构遥感数据的分布式高精度自动平差技术;⑤ 跨平台、跨遥感器的大量数据动态快速拼接、匀光匀色、自动滤波、镶嵌、拼接、融合、信息提取、专题分析及在线可视化技术;⑥ 基于云计算平台的高性能分布式计算技术;⑦ 数据知识产权保护技术等。

4.5 无人机组网遥感观测在国家对地观测体系中的重大作用

无人航空器组网遥感观测可以从以“天”为频率的生态环境监测常态化应用,到以“小时”为频率的自然灾害遥感评估,再到近实时的国土安全监测应用。高分辨率、迅捷机动、不受云覆盖限制是无人航空器的特点和优点,使其成为国家“空-天-地”一体的遥感监测体系中不可或缺的重要组成部分。与卫星不同,无人航空器遥感观测地域性较强,通常“远水解不了近渴”,任何业务化运行的无人航空器观测系统必须依靠就近部署的无人航空器遥感系统资源开展工作才能做到迅捷响应。依托遍布全国优化布局的无人航空器遥感网,建设全

国无人航空器组网观测高频迅捷响应体系,是国家自然资源调查、环境保护和国土安全日常管理和应急监测的明确需求,也是地球观测与导航技术领域未来的一个重要研究发展方向。

科技部重点研发计划项目“高频次迅捷无人航空器区域组网遥感观测技术”面向国家重大需求,依托全国无人航空器空港优化布局,构建无人航空器遥感网技术体系,围绕3项重大应用示范:①全国生态系统生产力、土壤水分、植被覆盖等监测,开展天频率重点区域生态环境监测应用示范;②典型区域洪涝灾害事件,快速监测水域面积和洪水影响范围,提取洪涝灾害特征,完成洪涝灾情快速评估,实现小时级洪涝灾害监测与灾情信息分析应用示范;③敏感区域实时观测并锁定重点目标进行精确定位,实现全天候不间断侦察,开展智能组网和厘米级遥感数据获取,数据汇聚到无人航空器遥感数据航母进行快速处理和信息提取,最终可以按需生成遥感产品和分析报告(原型系统参见图15)。项目的实施旨在为国家从基础设施建设角度最终建立业务化运行的全国无人航空器遥感组网观测系统打下坚实的技术基础,提供面向国家重大需求和各行业应用的可业务化运行的技术体系。

5 结语

本文介绍了中国无人机遥感本世纪以来“十五”到“十三五”所获得的有代表性意义成果。阐述了无人机遥感定标场,航空航天定标场的建立以及应用验证,包括无人机遥感系统的载荷与系统技术发展;讲述了无人机遥感在国防反恐安全以及跨国应急救援,国土测绘与海洋岛礁测绘应用,地质灾害应用以及国家应急救援等领域的产业应用;介绍了代表未来方向的无人机遥感组网集群技术的最新进展。

中国无人机产业的发展已经走过近60年的历程,而中国无人机遥感已经走过了20年的历程,未来无人机的发展方向呈现多样性,其中集群和组网化发展是无人机遥感释放潜力发挥作用的重要方向。从高分辨率对地观测体系建设来说,未来无人机遥感的跨越发展需要面向两个重大需求,第一是建立起满足区域和全国的生态环境资源监测、灾害应急响应监测以及国土安全突发事件监测的无人航空器组网技术;第二是在能开展上述监测的遥感应用业务网的基础上实现系统集成和有效验证。未来无人机遥感发展的总体目标就是建立起具备区域高频次迅捷信息获取能力的无人航空器组网



图15 中科天网无人航空器资源调度与组网遥感观测管控平台

Fig. 15 Zhongtian skynet unmanned aircraft resource scheduling and remote sensing observation and control network platform

观测系统,实现无人航空器组网技术由项目层面跨越到遥感领域实用并持续地发展,同时也为我国成为世界遥感强国的国家战略跨越奠定基础。

致谢:感谢童庆禧、刘先林、王家骥院士,曹健林、李传荣研究员的长期指点帮助。感谢岳焕印、罗祥勇、王剑、詹学丽、万志强等专家学者为本文提供资料和素材。

参考文献(References):

- [1] 樊邦奎,张瑞雨.无人机系统与人工智能[J].武汉大学学报·信息科学版,2017,42(11):1523-1529. [Fan B K, Zhang R Y. Unmanned aircraft system and artificial intelligence[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017,42(11):1523-1529.]
- [2] Stacy N J S, Craig D W, Staromlynska J, et al. The global Hawk UAV Australian deployment: Imaging radar sensor modifications and employment for maritime surveillance [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002(IGARSS'02), 2002,2:699-701.
- [3] Schroer R. UAVs: the future. [A century of powered flight: 1903- 2003]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 2003,18(7): 61-63.
- [4] 于黎明,王占林.军用无人机的发展趋势及其关键技术[J].航空科学技术,1999(1):9-10. [Yu L M, Wang Z L. Developing trends and key technologies of military uninhabited air vehicles[J]. Aeronautical Science & Technology, 1999(1):9-10.]
- [5] 吕书强.无人机遥感原型系统的集成、飞行试验及关键技术研究[D].北京:北京大学,2006. [Lv S Q. Research on integration, flight test and key technology of UAV remote sensing prototype system[D]. Beijing: Peking University, 2006.]
- [6] 王斌永,舒嵘,贾建军,等.无人机载小型多光谱成像仪的设计[J].光学与光电技术,2004(2):18-20. [Wang B Y, Shu R, Jia J J, et al. Design of compact multispectral imager for UAV[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004(2):18-20.]
- [7] 苏奋振,吴文周,平博,等.海洋地理信息系统研究进展[J].海洋通报,2014,33(4):361-370. [Su F Z, Wu W Z, Ping B, et al. Research progress of the marine geographic information system[J]. Marine Science Bulletin, 2014,33(4): 361-370.]
- [8] 孙小雷,齐乃明,董程,等.无人机任务分配与航迹规划协同控制方法[J].系统工程与电子技术,2015,37(12):2772-2776. [Sun X L, Qi N M, Dong C, et al. Cooperative control algorithm of task assignment and path planning for multiple UAVs[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015,37(12):2772-2776.]
- [9] 孙杰,林宗坚,崔红霞.无人机低空遥感监测系统[J].遥感信息,2003(1):49-50,27. [Sun J, Lin Z J, Cui H X. The application of remote sensing technology in land management of China[J]. Remote Sensing Information, 2003(1): 49-50,27.]
- [10] 樊邦奎.樊邦奎院士:六大方向,知悉无人机的未来[J].机器人产业,2017(1):59-64. [Fan B K. Academician Fan Bangkui: Six directions, knowing the future of drones[J]. Robot Industry, 2017(1):59-64.]
- [11] 晏磊,吕书强,赵红颖,等.无人机航空遥感系统关键技术研究[J].武汉大学学报·工学版,2004,37(6):67-70. [Yan L, Lv S Q, Zhao H Y, et al. Research on key techniques of aerial remote sensing system for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2004,37(6):67-70.]
- [12] 崔红霞,孙杰,林宗坚.无人机遥感设备的自动化控制系统[J].测绘科学,2004(1):47-49,6. [Cui H X, Sun J, Lin Z J. Automatic control system for UAV remote sensing equipment[J]. Science of Surveying and Mapping, 2004 (1):47-49,6.]
- [13] 刘团结,童庆禧,郑兰芬,等.一种航空多光谱数字相机系统的设计与实现[J].测绘通报,2003(1):7-10. [Liu T J, Tong Q X, Zhen L F, et al. Design and realization of an airborne multispectral digital camera system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2003(1):7-10.]
- [14] Deren Li, Jie Shan, Jianya Gong. Geospatial Technology for Earth Observation[M]. Springer, 2009:27-44.
- [15] 李传荣.高分辨遥感综合定标技术系统的研发助推我国遥感产业进入发展新阶段[J].科技促进发展,2016(3): 371-376. [Li C Y. The research and development of high-resolution remote sensing comprehensive calibration technology system promotes the new stage of China's remote sensing industry entering development[J]. Science & Technology for Development, 2016(3):371-376.]
- [16] 王涛.线阵CCD传感器实验场几何定标的理论与方法研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2012. [Wang T. Research on theory and method of geometric calibration of Linear CCD sensor experiment field[D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2012.]
- [17] 晏磊,段依妮,相云,等.空间相机几何与时相分辨率检测方法 及移动检测车[P].发明专利 ZL 201210018290.3 2012,1/19. [Yan L, Duan Y N, Xiang Y. Space camera geometry and time phase resolution detection method and mobile detection vehicle[P]. Patent, ZL 201210018290.3 2012,1/19.]
- [18] 许妙忠,尹粟,李明.用航线结构取代地面试验场的线阵航空传感器检校方法[J].测绘学报,2013,42(3):404-410. [Xu M Z, Yin L, Li M. Approach of the substitutability

- of the flight line structure for the testfield of linear array aerial sensor calibration[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013,42(3):404-410.]
- [19] 许妙忠,涂辛茹.基于定标场的ADS40系统几何检校[J]. *武汉大学学报·信息科学版*,2011,36(7):771-775. [Xu M Z, Tu X R. Geometric calibration of ADS40 system based on test field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011,36(7):771-775.]
- [20] 薛武,张永生,赵玲,等.增量式SFM与POS辅助光束法平差精度比较[J]. *测绘学报*,2017,46(2):198-207. [Xue W, Zhang Y S, Zhao L, et al. Compare the accuracy of incremental SFM with POS-aided bundle adjustment[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017,46(2):198-207.]
- [21] 龚健雅,耿晶,吴华意.地理空间知识服务概论[J]. *武汉大学学报·信息科学版*,2014,39(8):883-890. [Gong J Y, Geng J, Wu H Y. Geospatial knowledge service: A review [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014,39(8):883-890.]
- [22] Duan Y, Chen W, Wang M, et al. A relative radiometric correction method for airborne image using outdoor calibration and image statistics[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014,52(8):5164-5174.
- [23] 何力,胡晓宁,丁瑞军,等.第三代红外焦平面基础技术的研究进展[J]. *红外与激光工程*,2007,36(5):696-701. [He L, Hu X N, Ding R J, et al. Recent progress of the 3rd generation infrared FPAs[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007,36(5):696-701.]
- [24] 黎荆梅,周梅,李传荣.阵列推扫式机载激光雷达三维点云解算方法研究[J]. *遥感技术与应用*,2013,28(6):1033-1038. [Li J M, Zhou M, Li C Y. Research on points position cloud calculation method of airborne linear array push-broom LiDAR[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013,28(6):1033-1038.]
- [25] Su Y, Ma Q, Guo Q. Fine-resolution forest tree height estimation across the Sierra Nevada through the integration of spaceborneLiDAR, airborne LiDAR, and optical imagery [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2017,10(3):17.
- [26] 崔毅.推扫式宽视场CCD成像光谱技术研究[D].上海:中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2014. [Cui Y. Research on push-scan wide field CCD imaging spectroscopy[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.]
- [27] 杜嘉,赵云升,宋开山,等.偏振遥感中水面溢油偏振度随太阳天顶角的变化规律研究[J]. *海洋环境科学*,2008(5):418-421. [Du J, Zhao Y S, Song K S, et al. Study on changes of solar zenith angle and degree of polarization of oil spilled on water surface in polarized remote sensing [J]. *Marine Environmental Science*, 2008(5):418-421.]
- [28] 张朝阳,程海峰,陈朝辉,等.偏振遥感的研究现状及发展趋势[J]. *激光与红外*,2007,37(12):1237-1240. [Zhang C Y, Chen H F, Chen Z H, et al. Research status and development trend of polarization remote sensing[J]. *Laser & Infrared*, 2007,37(12):1237-1240.]
- [29] 杨伟锋,洪津,乔延利,等.无人机载偏振CCD相机光机系统设计[J]. *光学技术*,2008,34(3):469-472. [Yang W F, Hong J, Qiao Y L, et al. Optical-mechanical system design of unmanned aerial vehicle polarization CCD camera [J]. *Optical Technique*, 2008,34(3):469-472.]
- [30] 孙华波,晏磊,勾志阳,等.无人机偏振遥感载荷系统的设计与实现[J]. *计算机工程*,2009,35(20):10-12,15. [Sun H B, Yan L, Gou Z Y, et al. Design and implementation of polarization remote sensing payloads system for unmanned aerial vehicles[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(20):10-12,15.]
- [31] 王明志.光学遥感辐射定标模型的系统参量分解与成像控制[D].北京:北京大学,2014. [Wang M Z. System parameter decomposition and imaging control of optical remote sensing radiation calibration model[D]. Beijing: Peking University, 2014.]
- [32] 勾志阳,晏磊,陈伟,等.无人机高光谱成像仪场地绝对辐射定标及验证分析[J]. *光谱学与光谱分析*,2012,32(2):430-434. [Gou Z Y, Yan L, Chen W, et al. Absolute Radiation Calibration and Verification Analysis of UAV Hyperspectral Imager Site[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012,32(2):430-434.]
- [33] 陈伟,郑玉权,薛庆生.宽视场航空高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光子学报*,2014,43(10):150-155.
- [34] 晏磊,勾志阳,段依妮,等.遥感定标综合方法及定标设备[P].发明专利,ZL 201210046224.7, 2012,2/24. [Yan L, Gou Z Y, Duan Y N, et al. Remote sensing calibration method and calibration equipment vehicle[D]. Patent, ZL 201210046224.7, 2012,2/24.]
- [35] 童庆禧.关于我国空间对地观测系统发展战略的若干思考[J]. *中国测绘*,2005(4):46-49. [Tong Q X. Thoughts on the development strategy of space earth observation system in China[J]. *China Surveying and Mapping*, 2005(4): 46-49.]
- [36] 樊邦奎.智能无人机将改变产业模式[N]. *中国信息化周报*,2016- 11- 21(7). [Fan B K. Intelligent drones will change the industry model[N]. *China Information Weekly*, 2016-11-21(7).]
- [37] Fischler M, Bolles R. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with Application to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981,24(6):381-395.
- [38] Ventisette C D, Righini G, Moretti S, et al. Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis[J]. *International Journal of Applied Earth Obser-*

- vation and Geoinformation, 2014,30(1):238-246.
- [39] Pineux N, Lisein J, Swerts G, et al. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed?[J]. *Geomorphology*, 2017,280: 122-136.
- [40] 段福洲,宫辉力,李小娟,等.SWDC 数字航空摄影仪在特大地震灾害中的应用[J]. *自然灾害学报*,2009,18(5):36-40. [Duan F Z, Gong H L, Li X J, et al. Application of SWDC Digital Aerial Camera in Extraordinary Earthquake Disaster[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009,18(5):36-40.]
- [41] 陈思思.无人机航摄系统及其在地质灾害应急救援中的应用[J]. *资源与人居环境*,2015(5):18-20. [Chen S S. UAV aerial photography system and its application in geological disaster emergency rescue[J]. *Resources and Habitant Environment*, 2015(5):18-20.]
- [42] Hu S, Qiu H J, Wang X G, et al. Acquiring high-resolution topography and performing spatial analysis of loess landslides by using low-cost UAVs[J]. *Landslides*, 2018, 15:593-612.
- [43] 何敬,唐川,王帅永,等.无人机影像在地质灾害调查中的应用[J]. *测绘工程*,2017,26(5):40-45. [He J, Tang C, Wang S Y, et al. Application of UAV images to geological disaster investigation[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2017,26(5):40-45.]
- [44] 胡胜,邱海军,王新刚,等.基于高分辨地形的黄土滑坡特征参数提取及其应用意义[J]. *第四纪研究*,2018,38(2): 367-379. [Hu S, Qiu H J, Wang X G, et al. Extracting characteristic parameters of loess landslides based on high-resolution topography and its application prospect [J]. *Quaternary Sciences*, 2018,38(2):367-379.]
- [45] 韩文权,任幼蓉,赵少华.无人机遥感在应对地质灾害中的主要应用[J]. *地理空间信息*,2011,9(5):6-8,163. [Han W Q, Ren Y R, Zhao S H, et al. The main application of UAV remote sensing in dealing with geological disasters [J]. *Geospatial Information*, 2011,9(5):6-8,163.]
- [46] 刘先林.测绘科研工作回顾及展望[J]. *中国测绘*,1996(6): 18-20. [Liu X L. Review and prospect of surveying and mapping research work[J]. *China Surveying and Mapping*, 1996(6):18-20.]
- [47] Niethammer U, James M R, Rothmund S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: evaluation and results[J]. *Engineering Geology*, 2012,128(11):2-11.
- [48] Ouyang C, Zhao W, Xu Q, et al. Failure mechanisms and characteristics of the 2016 catastrophic rockslide at Su village, Lishui, China[J]. *Landslides*, 2018,15(7):1391-1400.
- [49] Cawood A J, Bond C E, Howell J A, et al. LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models[J]. *Journal of Structural Geology*, 2017,98:67-82.
- [50] Cook K L. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection[J]. *Geomorphology*, 2017,278:195-208.
- [51] 雷添杰,李长春,何孝莹.无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. *自然灾害学报*,2011,20(1):178-183. [Lei T J, Li C C, He X Y. Application of aerial remote sensing of pilotless aircraft to disaster emergency rescue [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011,20(1):178-183.]
- [52] Liao X, Zhang Y, Su F, et al. UAVs surpassing satellites and aircraft in remote sensing over China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018,39(21):1-16.
- [53] 廖小罕,周成虎.轻小型无人机遥感发展报告[M].北京: 科学出版社,2016. [Liao X H, Zhou C H. Light-small UAV remote sensing development report[M]. Beijing: Science Press, 2016.]
- [54] 薛艳丽,温奇,万幼川,等.基于北斗/GPRS/3G技术的无人机遥感网络体系关键技术研究[J]. *科技资讯*,2016,14(27):185-186. [Xue Y L, Wen Q, Wan Y C, et al. Research on key technologies and demonstration of UAV Remote Sensing Network System Based on big dipper navigation positioning system and GPRS/3G[J]. *Science & Technology Information*, 2016,14(27):185-186.]
- [55] 田桢榕,汪红艳,陈枫.无人机自组织网络中关键应用技术研究[C].第五届中国无人机大会论文集,2014:697-701. [Tian Z R, Wang H Y, Chen F. Research on key application technology in UAV self-organizing network[C]. *Proceedings of the 5th China UAV Conference*, 2014:697-701.]
- [56] 廖小罕,岳焕印,徐晨晨.无人机低空公共航路规划与构建研究[J]. *无人机*,2018. [Liao X H, Yue H Y, Xu C C. Research on Low-altitude Public Route Planning and Construction of UAV[J]. *Unmanned Aerial Vehicle*, 2018.]
- [57] <http://tech.163.com/17/1013/16/D0L1UVA100097U7R.html>.
- [58] 李子坤.“互联网+”引领无人机应用新趋势[J]. *装备制造*, 2016(5):94-96. [Li Z K. "Internet + " leads the new trend of drone application[J]. *China Equipment*, 2016(5):94-96.]
- [59] 于春雷.卫星通信在无人机监管中的应用[J]. *科技传播*, 2017,9(22):100-101,121. [Yu C L. Application of satellite communication in UAV supervision[J]. *Public Communication of Science & Technology*, 2017,9(22):100-101,121.]
- [60] 王鹏,马永青,汪宏异,等.无人机通信应用设想及关键技术[J]. *飞航导弹*,2011(5):53-56. [Wang P, Ma Y Q, Wang H Y, et al. UAV communication application ideas and key technologies[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2011(5): 53-56.]
- [61] 栾爽.民用无人机法律规制基本问题探讨[J]. *南京航空航天大学学报(社会科学版)*,2018,20(2):54-58. [Luan S. On Basic Problems of Civil UAV Legal Regulation[J].

- Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(Social Sciences), 2018,20(2):54-58.]
- [62] 邹磊.无人机飞行管控系统及其数据处理软件设计[D].长沙:中南大学,2013. [Zou L. Design of UAV flight control system and its data processing software[D]. Changsha: Central South University, 2013.]
- [63] 廖小罕,周成虎,苏奋振,等.无人机遥感众创时代[J].地球信息科学学报,2016,18(11):1439-1447. [Liao X H, Zhou C H, Su F Z, et al. The mass innovation era or UAV remote sensing[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(11):1439-1447.]
- [64] Zhao L, Huang S, Sun Y, et al. Parallaxba: Bundle adjustment using parallax angle feature parametrization[J]. The International Journal of Robotics Research, 2015,34(4-5): 493-516.
- [65] Sun Y, Zhao L, Huang S, et al. Line matching based on planar homography for stereo aerial images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 104:1-17.
- [66] 晏磊,陈瑞,孙岩标.极坐标数字摄影测量理论与空间信息坐标体系初探[J].测绘学报,2018,47(6):705-721. [Yan L, Chen R, Sun Y B. A preliminary study on the theory of polar coordinates digital photogrammetry and the coordinate system of spatial information[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018,47(6):705-721.]
- [67] 李颖,白春江,徐进,等.一种基于无人艇编队运动的海洋环境监测系统[P].发明专利,ZL201610048891.7, 2016,1/25. [Li Y, Bai C J, Xu J, et al. Marine environment monitoring system based on unmanned boat formation movement[P]. Patent, ZL201610048891.7, 2016,1/25.]
- [68] 颜丙新,王龙福,张宏.无人机系统产品化工程研究[J].航天标准化,2013(3):10-13,17. [Yan B X, Wang L F, Zhang H. Research on product engineering of UAV system[J]. Aerospace Standardization, 2013(3):10-13,17.]
- [69] 汪沛,罗锡文,周志艳,等.基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J].农业工程学报,2014,30(18):1-12. [Wang P, Luo X W, Zhou Z Y, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(18):1-12.]
- [70] 陶于金,李沛峰.无人机系统发展与关键技术综述[J].航空制造技术,2014,464(20):34-39. [Tao Y J, Li P F. Overview of development and key technologies of UAV systems[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014 (20):34-39.]
- [71] 李传荣,唐伶俐,贾媛媛,等.我国遥感技术标准体系框架研究[J].卫星应用,2014(11):36-39. [Li C R, Tang L L, Jia Y Y, et al. Research on the framework of China's remote sensing technology standard system[J]. Satellite Application, 2014(11):36-39.]