

多源遥感图像融合发展现状与未来展望

李树涛, 李聪好, 康旭东

湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082

摘要: 近年来, 随着遥感技术的发展, 高光谱、红外、雷达等多源遥感成像手段在精准农业、资源调查、环境监测、军事国防等重要领域发挥着越来越重要的作用。同一场景多源遥感图像观测的地物对象相同, 但观测的维度不同, 图像的空间、光谱与时间分辨率存在差异, 提供的信息既具有冗余性, 又具有互补性和合作性。多源遥感图像融合能够综合利用不同来源获取的遥感图像信息, 实现更精准、更全面的对地观测, 是遥感对地观测领域的核心关键技术。本文从多源遥感图像的数据来源出发, 综述了多源遥感图像融合的研究现状与未来发展趋势: 首先介绍了国内外现有多源遥感图像的主要来源、图像特性与典型应用; 然后, 对不同类型多源遥感图像融合的研究现状和挑战性难题进行了归纳和总结; 最后, 对多源遥感图像融合的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 遥感图像, 图像融合, 多模态, 对地观测

引用格式: 李树涛, 李聪好, 康旭东. 2021. 多源遥感图像融合发展现状与未来展望. 遥感学报, 25(1): 148-166

Li S T, Li C Y and Kang X D. 2021. Development status and future prospects of multi-source remote sensing image fusion. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 148-166 [DOI: 10.11834/jrs.20210259]

1 引言

遥感对地观测是环境保护、资源调查、军事侦察等国家重大需求的核心关键技术, 被布局到《国家中长期科技发展规划纲要(2006—2020年)》等多个国家计划(童旭东, 2018)。随着多光谱、高光谱、红外、合成孔径雷达、夜光等遥感对地观测技术的发展, 遥感成像手段呈现多样化的趋势(孙伟伟等, 2020)。同一场景的多源遥感图像拍摄的地物对象相同, 但图像分辨率、视场和图像反映的目标特性存在差异, 提供的多源信息既具有冗余性, 又具有互补性和合作性。多源遥感图像融合能够综合利用不同传感器获取的图像信息, 实现更精准、更全面的遥感对地观测, 已成为遥感领域的研究热点(Mahyari和Yazdi, 2011; Yokoya等, 2012; Zhu和Bamler, 2013; Li等, 2013; Tuia等, 2017)。如图1所示, 本文检索了Web of Science(WOS)和中国知网(CNKI)遥感图像融合相关论文的发表情况, 检索条件为文献

关键词包含“遥感”与“融合”, 从近十年文献数量的变化趋势可以看出, 论文数量呈逐年上升的趋势, 多源遥感图像融合已成遥感领域的热点问题。

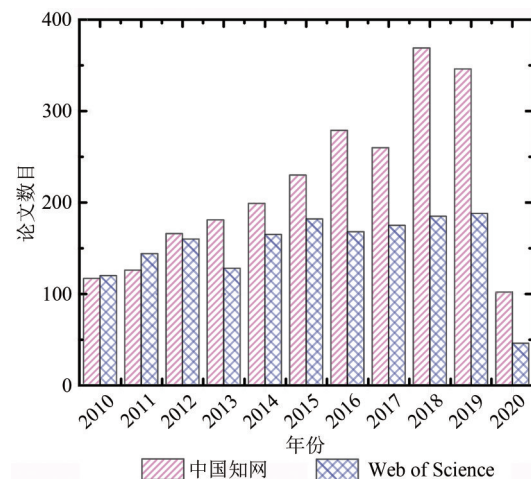


图1 近十年遥感图像融合相关文献数量统计图(来自WOS和CNKI检索数据)

Fig.1 Statistics of related literatures of remote sensing image fusion in recent ten years(Retrieve data from WOS and CNKI)

收稿日期: 2020-07-10; 预印本: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(编号:61890962,61871179,61801178);湖南省重点实验室项目(编号:2018TP1013)

第一作者简介: 李树涛, 1972年生, 男, 教授, 研究方向为图像处理、信息融合、稀疏表示、压缩感知、模式识别及机器学习。E-mail: shutao_li@hnu.edu.cn

通信作者简介: 康旭东, 1985年生, 男, 副教授, 研究方向为高光谱图像特征提取、高光谱图像分类、高光谱图像异常目标探测, 遥感图像融合。E-mail: xudong_kang@163.com

国内外学者已发表多篇综述，从不同角度介绍了现有的多源遥感图像融合方法。例如，武汉大学张良培和沈焕锋（2016）将遥感图像融合分为同质遥感数据融合、异质遥感数据融合、遥感一站点数据融合和遥感一非观测数据融合，并着重对时空谱融合的研究现状作了详细阐述。中国科学院遥地所张立福等（2019）通过对遥感图像融合领域的论文发表情况进行统计和梳理，将遥感图像融合概括为面向空间维提升的融合方法、面向光谱维提升的融合方法和面向时间维提升的融合方法。德国宇航局Schmit和Zhu（2016）将遥感图像融合归纳为像素级、特征级与决策级3类典型的融合框架，并通过遥感领域国际期刊上图像融合相关论文的发表数量、国际遥感数据融合竞赛结果分析了多源遥感图像融合的研究现状。Ghamisi等（2019）重点介绍了多分辨率图像融合、多时相图像融合、光学与激光雷达图像融合，以及遥感图像与社交媒体信息、地学信息等融合的研究现状。随着人工智能技术的兴起，深度学习在遥感图像融合领域引发了新一轮的研究热潮。Liu等（2018b）介绍了主流的深度学习图像融合方法，并将这些方法归纳为几类通用的深度学习图像融合框架。

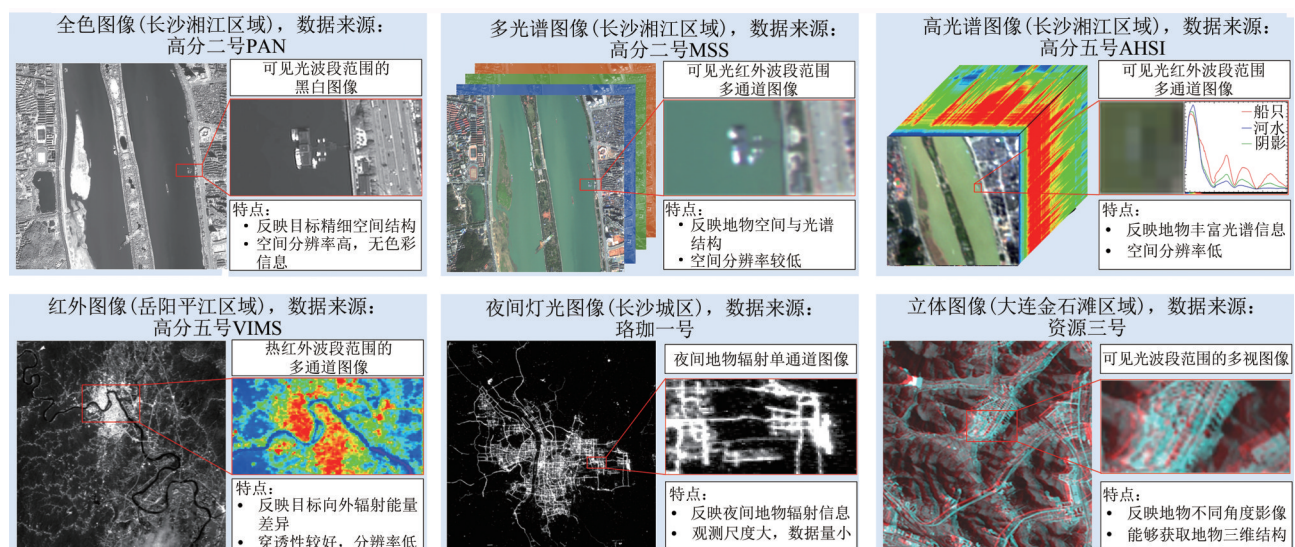
除上述综述性文章外，部分学者旨在通过多类融合方法的实验比较与分析，或是通过数学模型的对比分析阐明不同多源融合方法的优缺点和适用性。Garzelli等（2004）与Alparone等（2007）对当时性能最优的多光谱和全色图像融合方法的

融合性能进行了对比研究。Loncan等（2015）将传统全色与多光谱融合方法扩展应用于多光谱与高光谱图像融合，并在多个真实遥感数据集上通过评估不同方法的有效性和鲁棒性。Yokoya等（2017）在多个真实遥感数据集上对比了十种典型的图像融合方法，并详细介绍了不同方法的适用性。肖亮等（2020）从贝叶斯融合建模的角度分析了现有空谱融合方法的建模机理，阐明了遥感图像融合模型的发展趋势，指出了遥感图像空谱融合领域亟待突破的技术瓶颈。

与上述遥感图像融合综述不同。本文从多源遥感数据的源头出发，首先介绍了全色、多光谱、高光谱、红外、合成孔径雷达、激光雷达等9类典型多源遥感图像的获取方式、图像特性与典型应用；然后，阐明了不同类型多源遥感图像融合方法的研究现状与面临的挑战性难题；最后，对多源遥感图像融合的整体发展趋势与未来可能的研究方向进行了展望。

2 多源遥感图像

遥感是利用卫星、飞机等平台上的成像仪，采集地球表面或近地空间的电磁波，探测和识别地球资源和环境信息的技术（Gu和Tong，2015；Guo，2012；Guo等，2019）。如图2所示，不同来源获取的遥感图像其成像原理不同，图像的空间分辨率、观测尺度以及反映的目标特性也会存在差异。



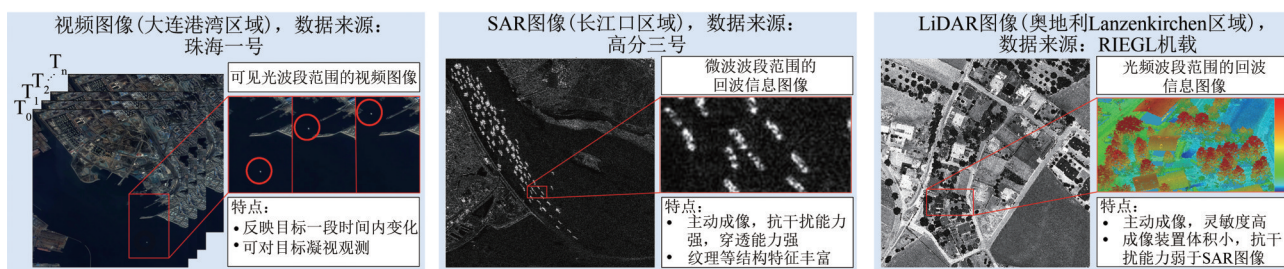


图2 典型多源遥感图像及其图像特点

Fig.2 Typical multi-source remote sensing images and their characteristics

全色、多光谱和高光谱图像均通过光学成像手段获取。光学成像时，光电感应装置将光信号转换为电信号，量化后的电脉冲信号记录为像素值。成像的过程是对电磁波能量的采样，在光谱维采样得到光谱信息，在空间维采样得到空间信息，受限于传感器的采样极限，成像系统不得不在空间和光谱信息上有所权衡。全色图像只有一个波段，波段范围在 $0.50\text{--}0.75\ \mu\text{m}$ 之间，图像显示为灰度图片，其空间分辨率高，包含地物细节信息丰富，能够获取地物精细的几何和纹理特征，但缺乏光谱信息（唐华俊等，2010）。

多光谱图像具有多个波段的光谱信息，其空间和光谱分辨率介于全色图像与高光谱图像之间，因此多光谱图像在融合过程中可为全色图像提供光谱信息，也可为高光谱图像提供空间信息。多光谱图像的光谱波段通常是经过严格设计的，按一定的顺序进行波段组合和数学运算，便可在图像上突出植被、水体、海岸线等特定的目标地物，例如，黄安等（2015）利用Landsat 8 OLI多光谱图像特定波段组合检测大尺度场景下的城市区域；罗代清等（2016）使用Landsat 5 TM多光谱图像的第3、4、5波段的组合，对湖北省麻城市杜鹃花的分布范围进行监测；李晓民等（2016）使用资源一号02C卫星多光谱图像的前3个波段进行组合，对西藏扎达地区的水文地质进行评估调查。

高光谱图像具有几十甚至上千个光谱波段，能够捕捉地物精细的光谱信息，光谱范围大，波段信息丰富，常用于地物的精细分类与识别，在城乡规划、精准农业、环境监测等领域有广泛的应用需求。例如，韦安娜等（2020）通过高分五号卫星获取的高光谱图像对鄱阳湖叶绿素浓度进行反演，以衡量该地区水体的富营养化程度。但更高的光谱分辨率意味着更低的空间分辨率，

在图像质量和空间分辨率上会有所受限（王建宇等，2010）。因此，在实际应用中，常常将高光谱图像与多光谱、全色和合成孔径雷达图像进行融合处理，以得到更高空间分辨率的高光谱图像。如Adiri等（2020）将EO-1卫星获取的高光谱图像与Landsat 8，Sentinel-2A卫星获取的多光谱图像进行融合，并成功应用于摩洛哥铜矿区的精细制图；Ren等（2020）以鄱阳湖、太湖和黄河口为研究区域，在高分五号（高光谱）、高分一号（全色）、高分二号（多光谱）、Sentinel-2（多光谱）数据上对比了9种图像融合方法的优劣。

热红外遥感图像反映了地物的温度分布。红外线IR（Infrared）在电磁波频谱中处于可见光与无线电波之间，自然界中一切温度高于绝对零度的物体会向外辐射红外线。成像系统接收到目标的红外辐射，在处理后将转换成红外热成像图。红外遥感成像一般应用于地表温度反演与热环境分析，已成功应用消防、地质等领域（姜荣，2016；谢苗苗等，2008；Raynolds等，2008）。例如，吴文渊等（2019）利用Landsat 8 OLI/TIRS获取的红外遥感图像反演地表温度，分析浙江省冬季地表热环境及其影响因子；独文惠等（2018）综述了热红外遥感在农业旱情监测中的应用进展，指出热红外遥感为实现实时动态农业旱情检测开辟了新途径，具有不可替代的作用。

夜间灯光NTL（Night Time Light）遥感图像可以捕获夜间地表微弱的灯光辐射，且具有大尺度对地观测的优势（李德仁和李熙，2015；陈颖彪等，2019）。目前常用的夜光数据，国外有国防气象卫星计划DMSP（Defense Meteorological Satellite Program）卫星上搭载的线性扫描业务系统（OLS）所获取的夜光数据，还有新一代的夜间灯光数据NPP/VIIRS（National Polar-Orbiting Partnership's

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)等(唐鹏飞等, 2020)。国内珞珈一号和吉林一号卫星是中国夜光遥感图像的重要来源。夜光遥感给人类活动的观测提供了重要的契机,在估算社会经济参数,城市化评估、监测灾难和地域冲突、渔业研究等方面发挥着不可或缺的作用(Levin等, 2020)。例如,张国亮等(2020)利用吉林一号夜光遥感图像,开展了城市发展情况及人类活动监测、住房空置率监测和耗电量监测研究;张宝军(2018)基于DMSP/OLS夜光数据,分析了2003年—2013年汶川地震极重灾区夜间灯光分布的范围和强度的变化,并与地区和社会经济因素相联系,探索灾区夜间灯光变化与灾害损失之间的相关关系。

立体遥感图像通常是靠空间体视效应实现三维深度信息的获取。人的双眼就是一种典型的体视仪器,遥感立体成像借鉴了人类的双目视觉感知功能,通过多个角度的遥感图像获取场景的三维深度信息(胡家升等, 1997)。目前常用的空间立体成像方案主要是在卫星载体上安装多台不同观测角度的光学相机,或者通过卫星在敏捷平台上变换姿态,获得地物目标在不同角度的图像,用于估计场景的三维信息。立体遥感图像一般用于生产和更新基础地理产品、进行国土资源调查与监测,因此,立体成像测绘卫星已发展为重要的战略资源,各国都将测绘卫星的发展作为其卫星与应用发展规划中的重中之重(郭连惠和喻夏琼, 2013)。中国第一颗民用立体测图卫星是资源三号测绘卫星,它的成功发射对中国测绘事业的发展具有革命性意义,实现了全国范围高分辨率立体图像长期稳定的获取(李德仁, 2012; 郭莉等, 2017)。中国2019-11成功发射的高分七号卫星,搭载的双线阵立体相机达到了0.8 m的空间分辨率,能更好的满足实际应用的需求(刘建军等, 2018; Tang等, 2020)。

视频遥感数据是近年来在遥感领域出现的新型对地观测数据。随着欧比特视频卫星1A、1B的成功发射,中国视频卫星遥感技术发展迅速。与传统的卫星数据相比,视频遥感数据最大的优势是对同一区域进行“凝视”观测,视频相比于图像可以展现目标或场景的动态变化信息,尤其适用于对目标进行连续观测和跟踪。因此,视频遥感数据在地质灾害监测、违规采矿监测、战场动态监控等应

用中具有重大应用前景(詹桓, 2017)。

合成孔径雷达SAR (Synthetic Aperture Radar)利用了多普勒频移理论和雷达相干原理,是一种主动成像方式。合成孔径雷达一般由天线阵列构成,各天线阵元之间相互干涉形成较窄波束,当星载或机载雷达沿着轨道飞行时,合成孔径雷达发出微波,由于地面目标与雷达间存在着相对运动,雷达将接收到的回波信号进行迭加,回波信号转换成电信号并记录成数字化像元,形成SAR图像(刘国祥, 2004)。合成孔径雷达记录的回波信号是地物的后向散射能量,能够反映地物的表面特性和介电性质。此外,得益于合成孔径成像机制,SAR在方位和距离上都能获得很高的几何分辨力,突破了经典雷达的分辨极限。使用主动微波成像,穿透作用较强,能够有效探测伪装目标,且成像不受光线、气候和云雾限制,故在军事侦察、地理测绘、灾害监测等领域具有很高的实际应用价值(崔麦会等, 2004)。此外,部分地物具有独特的微波反射特性,如金属、树林等地物的微波反射率远远高于其他地物,麦穗、砾石等大小与雷达波长相等的物体会与雷达波产生谐振,形成强烈回波。因此,SAR图像可以反映远小于图像分辨率的某些地物,如高压线、铁路等(何国金和李克鲁, 1997)。基于合成孔径雷达的工作特性,利用相位差获取地形高程数据的合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)已经得到工程化应用,并成为地表形变监测的重要手段。此外,电磁波的另一属性—极化,是除频率、相位和幅度之外的重要属性,极化SAR系统(PolSAR)已经成为一种比较成熟的技术,即接收和发送的电磁波以水平(H)和垂直(V)方向任意组合,常用极化方式有单极化、双极化和全极化。极化SAR图像的优势在于丰富了目标的散射信息,增加了目标观测和感知的维度,在农业、地质、水文和海冰监测方面都得到了广泛研究和应用。例如,郭兆明等(2019)使用美国Lacrosse-5 SAR数据对运动车辆进行监测;Chaturvedi等(2020)利用Sentinel-1极化SAR图像对沙特和科威特交界处拉斯海夫吉地区溢油区域进行监测。

激光雷达LiDAR (Light Detection And Ranging)也是一种主动成像方式,其成像原理与合成孔径雷达类似,是工作在红外至紫外区间的光频波段

雷达。激光雷达具有很好的单色性、方向性与相干性,激光能量集中,探测灵敏度和分辨率高,可以精确跟踪识别目标的运动状态和位置。与合成孔径雷达相比,激光雷达的激光束窄,故其被截获的概率很低,隐蔽性好。功能相似的情况下,激光雷达装置的体积比均合成孔径雷达要小(蔡悦, 2020),被成功应用于城市三维建图、气象监测、油气勘察、环境保护等领域。例如, Ma等(2020)基于红外探路者卫星(CALIPSO)获取的激光雷达数据分析了十年来北京、纽约、伦敦和新德里白天和夜间的大气颗粒物浓度; Jarron等(2020)利用机载激光雷达数据估算加拿大不列颠哥伦比亚省中部森林地冠层森林结构,为选择性伐木、火灾预防和野生动物栖息地保护提供技

术支撑;余柏菡等(2010)将机载LiDAR数据与高分辨率遥感图像结合,对美国休斯顿中心城区进行地物分类与制图。

表1概括了目前遥感领域9种不同来源的遥感图像及其对应的卫星与机载成像平台(孙伟伟等, 2020; Zhang等, 2014; Chaussard等, 2014; Liu等, 2018a; Park等, 2003; Thenkabail等, 2004)。如表1所示,遥感图像的获取方式呈现多样化的趋势,但发展并不十分均衡。多光谱与全色成像是最成熟的遥感成像手段。激光、立体、红外图像获取手段相对较少。值得注意的是合成孔径雷达卫星由于具有全天时、全天候的优势,在军事中应用十分广泛。本综述中统计的机载和星载合成孔径成像平台难以全面反映雷达成像技术的发展现状。

表1 多源遥感数据来源一览表(主流遥感卫星与机载成像平台)

Table 1 Multi-source remote sensing data sources(Mainstream remote sensing satellites and airplane platforms)

传感器类型	国内卫星/机载成像系统	国外卫星/机载成像系统
全色相机	资源一号02C;资源一号04;资源一号02D;高分一号;高分二号;高分六号;高分七号;实践九号A星;北京二号;天绘一号01;天绘一号02;天绘一号03;高景一号;吉林一号光学A星;吉林一号灵巧验证星;吉林一号高分03A星;吉林一号高分02A星;京师一号	Landsat-8; Pléiades-1; Pléiades-2; SPOT-5; SPOT-6; SPOT-7; WorldView-1; WorldView-2; WorldView-3; WorldView-4; GeoEye-1; QuickBird; ALOS-2; Kompsat-2; Kompsat-3; Kompsat-5; Terrasar-X; RESURS-P; IRS-P5; Orbview-3; EROS-A; EROS-B; IKONOS
彩色/多光谱相机	资源一号02C;资源一号04;资源一号02D;资源三号;高分一号;高分二号;高分四号;高分五号;高分六号;高分七号;环境一号A星;环境一号B星;实践九号A星;北京二号;天绘一号01;天绘一号02;天绘一号03;高景一号;吉林一号光学A星;吉林一号光谱01/02星;吉林一号高分03A星;吉林一号高分02A星;京师一号;风云三号B星;风云三号C星;风云三号D;风云二号E星;风云四号A星;海洋一号B星;海洋一号C星	Landsat 8; Pléiades-1; Pléiades-2; SPOT-5; SPOT-6; SPOT-7; Sentinel-2; Sentinel-3; Sentinel-4; Sentinel-5; Sentinel-5P; RESURS-P; WorldView-2; WorldView-3; WorldView-4; GeoEye-1; Terra; QuickBird; Rapideye; Kompsat-2; KH; IRS-P6; Orbview-2; Orbview-3; EO-1; Envisat; IKONOS; ALOS
高光谱相机	资源一号02D;高分五号;环境一号A星;珠海一号02组;珠海一号03组;风云三号D星;碳卫星;GaiaSky-mini, GaiaField-V10	EO-1; AVIRIS; ROSIS; HYDICE; DESIS; Headwall Micro E/Nano; AISA+; HYSIS; CMOS; GOSAT; HISUI; CASI-3
热红外相机	资源一号-04;高分四号;环境一号B星;实践九号B星;风云三号B星;风云三号C星;风云三号D星	Landsat 8; SPOT-5; Terra; KeyHole; EOS
夜光相机	珞珈一号01卫星;吉林一号视频03-08星	DMSP/OLS; NPP/VIIRS; SAC-C; SAC-D; EROS-B
立体相机	高分七号;资源三号-02;天绘一号01;天绘一号02;天绘一号03	ALOS-1; MOMS-02; IKONOS; Orbview-3; WorldView-1; WorldView-2; GeoEye-1; GeoEye-2; IRS-1C/1D; Bars-M
视频相机	珠海一号01组;珠海一号02组;珠海一号03组;吉林一号视频01-08星	Iris camera on-board the ISS(International Space Station)
合成孔径雷达	高分三号;环境一号C星	Sentinel-1; Sentinel-3; ALOS; Terrasar-X; Radarsat-2; Envisat; Lacrosse-5; COSMO-Skymed;
激光测量仪	高分七号;资源三号02	Leica ALS50-II; ALTM 3100EA; LiteMapper 5600, LMS-Q560; CALIPSO; TerraPointLLC

为有效评估多源遥感图像融合的整体发展趋势，图3展示了不同类型多源图像融合论文的发表情况，本文对WOS数据库和CNKI全库中的相关文献进行了检索、整理和分析。为尽量保证检索范围的准确性，WOS检索的布尔表达式为标题=（“数据来源1” AND “数据来源2”）AND 标题=“fusion” AND 主题=“remote sensing”。其中不同数据来源指“Panchromatic”、“multispectral”、“hyperspectral”、“Infrared”等。CNKI检索的布尔表达式为篇名=（“数据来源1”并含“数据来源2”）并且主题=（“融合”并含“遥感”）。为避免遗漏，其中不同数据来源指“全色”、“多光谱”、“高光谱”、“红外”等。如图3所示，无论是WOS还是CNKI库上的检索结果均显示：多光谱与全色图像融合的论文发表数量排名第一。此外，多光谱与高光谱图像融合、高光谱与激光雷达图像融合发表数量也较多，是图像融合领域新的热点问题。融合领域论文发表数量较少的主要包括：立体、视频以及夜光图像。究其原因，主要是因为3类图像均是近年新兴的遥感成像手段。图像数据来源较少。综上所述，可以得到如下主要结论：

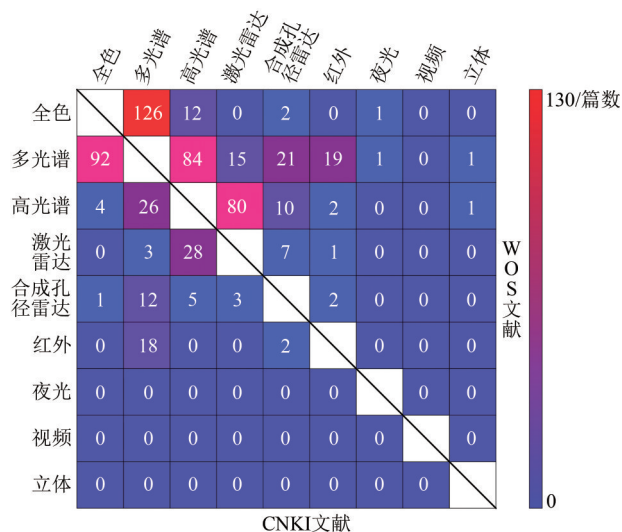


图3 多源遥感图像融合相关文献数量统计图(来自WOS和CNKI检索数据)

Fig.3 Statistics of related literatures of remote sensing image fusion in recent ten years (Retrieve data from WOS and CNKI)

(1) 多源数据的丰富性和可靠性促进了遥感图像融合技术的发展。全色与多光谱图像融合技术发展迅速，很大程度上得益于星载全色多光谱成像平台的发展。例如，国内高分一号、高分二号，

国外WorldView系列卫星等均同时搭载了全色相机与多光谱相机，为全色与多光谱图像融合提供了丰富的数据源。

(2) 不同来源遥感图像融合的发展并不十分均衡，一方面是由于不同来源图像的互补性较弱所导致。例如，合成孔径雷达与激光雷达互补性较弱，因此相关的研究也较少。另一方面是由于部分新兴的图像获取手段尚未引起学者们足够的关注。例如，夜间灯光图像、视频图像、立体图像和其他不同来源图像的融合。

因此，多源遥感图像融合未来的发展方向主要体现在两个方面。

一方面，现有研究主要集中在全色、多光谱、高光谱、SAR以及LiDAR图像的融合。夜光、视频、立体相机等新型成像手段的出现，为多模遥感图像融合技术的发展提供了新数据。因此，如何将夜光、视频、立体相机等数据和其他类型的遥感图像数据进行融合是未来新的发展方向。

另一方面，如何将图像融合与成像系统的设计相结合，构建多种探测手段合一的融合成像系统，是未来重要的研究方向之一。例如，长春理工大学姜会林等人联合国家海洋局、湖南大学、西安交通大学等多家单位联合承担了一项国家自然科学基金“海洋监测多维高分辨光学成像理论与方法”。该项目的核心是将遥感图像融合技术与光学成像系统的设计、海洋环境下光传输与反射的机理结合起来，建立一套集光谱、红外、偏振于一体的机载多维高分成像系统。北京信息科技大学邱均等人承担了一项国家自然科学基金重点基金“面向滨海湿地鸟类监测的多维协同全光计算成像技术”。这类研究旨在建立多维度的协同观测系统，图像融合技术在其中发挥了至关重要的作用。换言之，仅依靠现有的卫星遥感和机载数据开展图像融合研究存在诸多局限。将图像融合技术与成像系统设计、遥感应用问题相结合是多源遥感图像融合未来的发展趋势。

3 多源遥感图像融合方法

3.1 全色、多光谱、高光谱图像融合

受限于光学成像机理，遥感图像的空间与光谱分辨率相互制约，单一成像手段无法获取高空间高光谱分辨率的遥感图像。如图4所示，融合两

种不同空间、光谱分辨率的图像，是获取高空间高光谱分辨率图像的有效手段 (Licciardi 等, 2012)。通过融合高分辨率的全色图像与多光谱图像，可以将多光谱图像的空间分辨率提升数倍。类似地，融合高分辨率的多光谱图像与低分辨率的高光谱图像，可以极大提升高光谱图像的空间分辨率。这一类图像融合技术又被称作遥感图像空谱融合，由于能够突破成像系统空间与光谱分辨率之间的固有矛盾，空谱融合是遥感图像融合领域的热点问题。

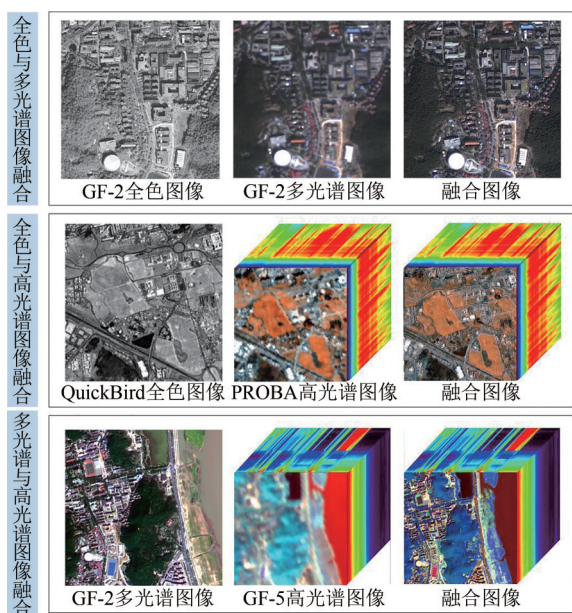


图4 全色、多光谱、高光谱图像融合示例

Fig.4 Fusion examples of panchromatic, multi-spectral, and hyperspectral images

现有的空谱融合对象主要是全色图像与多光谱图像、全色图像与高光谱图像、多光谱图像与高光谱图像。从波段数量来说，全色图像与多光谱或高光谱图像的融合属于“一对多”的融合，多光谱图像与高光谱图像的融合属于“多对多”的融合。在图像融合之前，一般都要对图像进行几何校正、正射校正等预处理，再对两幅待融合图像进行配准。

全色图像与多光谱图像融合的研究开始最早，发展时间最长，也被称为全色锐化 (Pansharpening)，现有方法可分为3类。第1类是空间信息注入法。这类方法通过空间变换、多尺度分析等手段提取高空间分辨率全色图像的空间信息，并将提取出来的空间信息尽可能无损的注入到低空间分辨率

的多光谱图像中。代表性方法有 Gram-Smidt 变换、Brovey 算法等 (Mura 等, 2015; Fusbender 等, 2008)。这类方法的优势是能够较好的保留光谱信息；缺点是由于提取的空间信息仅包含特定谱段范围内的空间结构，与低空间分辨率图像的空间结构并不完全匹配，因此容易产生空间结构失真。第2类是光谱信息注入法。代表性的方法有颜色空间变换法、主成分分析法等 (Zhang 和 Hong, 2005; Ghadjati 等, 2019)，这类方法通过线性或者非线性的图像变换将高光谱分辨率的图像变换到新的投影空间，分解为光谱成分和空间成分，并用全色图像去替换其空间成分，再经过逆变换获得融合图像。这类方法能较好的保留空间信息，但光谱信息会产生一定的失真。第3类是空谱采样建模法，其核心思想是将融合问题看作是一个逆向重建问题，通过建立源图像与融合结果之间的关系模型，优化求解得到融合结果。这类方法由于模型的严谨性，相比于前两类方法，能够更好的保持图像的空间与光谱信息。此外，为进一步优化融合效果，在融合过程中可引入概率统计和先验约束，但模型的求解会更加复杂。代表性方法有基于稀疏表示的方法 (Li 等, 2013; Jiang 等, 2012)、基于深度网络的方法 (Scarpa 等, 2018) 等。

全色与高光谱的融合与全色锐化较为相似，但是由于高光谱图像空间分辨率很低，像元之间会存在混淆 (Winter 和 Winter, 2002; Hardie 等, 2004)，学者们多采用模型优化求解的方法来解决这类融合问题。多光谱与高光谱的融合相比于全色与多光谱图像融合，更具有挑战性。多光谱与高光谱的融合方法可分为3类，基于全色锐化的方法、基于成像模型的方法和基于深度网络的方法。

基于全色锐化的方法即将多光谱与全色融合的方法扩展应用在多光谱与高光谱图像的融合中。在扩展应用全色锐化融合方法时，波段的对应性是必须要考虑的因素，如 Chen 等 (2014) 将高光谱图像的波段分组，通过传统的全色锐化方法对每个波段小组进行融合；Selva 等 (2015) 通过将高光谱波段与多光谱的波段建立分组关系，有效地将一些经典多尺度分析的方法应用于多光谱与高光谱图像的融合。

基于成像模型的方法主要包括基于混合像元

分解的方法和基于张量分解的方法 (Li 和 Yang, 2011; Dian 等, 2019)。基于混合像元分解的方法利用了光谱分解原理, 在传感器特性的约束或先验下, 分别从高光谱图像和多光谱图像中获取端元信息和高分辨率丰度矩阵, 来重建融合后图像, 其主要的性能影响因素在于光谱基的维度和矩阵系数的估计。基于张量分解的方法通过将高光谱图像表示成三维张量, 利用光谱字典、张量核去逼近高空间和光谱分辨率的融合结果, 其主要性能影响因素在于谱字典的构建和张量核的估计。此外, 研究人员还提出了基于耦合非负矩阵分解 (CNMF) 的多光谱、高光谱图像融合技术 (Yokoya 等, 2012)、基于低秩分解 (LRF) 的图像融合技术 (Zhang 等, 2017) 和基于耦合稀疏张量分解 (CSTF) 的图像融合技术 (Li 等, 2018) 等。

基于深度网络的方法将低分辨率图像作为深度网络的输入, 通过学习低、高分辨率图像之间端到端的映射, 输出高分辨率的图像 (Dong 等, 2016)。由于深度网络自身特点, 这类融合方法的性能提升点在于构造更加合理的损失函数、处理图像残差和使用更深层次的框架结构, 因此研究的重点也都偏向于这 3 个方面。如 Han 等 (2018) 提出的 PDCon-SSF 融合框架, 通过在多光谱图像与学习到的特征之间添加连接, 获得了显著的性能提升; Shi 等 (2019) 提出的色彩引导的深度残差注意力网络融合框架, 将注意机制集成到残差网络中, 充分利用了光谱和空间维度的相关性, 在图像融合过程中很好的保持了图像的空间与光谱信息 (Shoeiby 等, 2019)。

空谱融合的质量主要是体现在融合图像是否存在严重的空间失真和光谱失真。根据是否有标准的高分辨率的参考图像, 客观评价指标分为有参考评价指标和无参考评价指标。常用的有参考评价指标有均方根误差 (RMSE)、峰值信噪比 (PSNR)、结构相似度 (SSIM)、光谱角映射 (SAM)、相对全局误差 (ERGAS) 和全局图像质量指标 (UIQI) 等 (Wang 和 Bovik, 2002; Wang 等, 2004; Wald, 1999); 无参考评价指标有 QNR 参数 (Alparone 等, 2008)、JQM 参数 (Palubinskas, 2014) 等。

全色、多光谱与高光谱之间的融合在实际生活中应用中十分广泛, 如 Tiwari 等 (2010) 将 IKONOS 卫星的多光谱图像与 Hyperion 的高光谱图像融合, 用以提高道路检测的精度, 方法在印度

的台拉登城区域获得较好结果; 胡博和汪西原 (2016) 将资源三号的全色与多光谱图像融合, 用以提取耕地信息, 方法在宁夏平原区域获得了不错的效果。

全色、多光谱和高光谱图像都是光学传感器获取的图像, 它们之间的主要区别在于光谱分辨率和空间分辨率的不同, 空谱融合的目的是提升图像的光谱和空间分辨率。虽然空谱融合的研究已经发展多年, 但仍存在着诸多技术难题亟待解决。

(1) 当空谱融合的图像是不同卫星获取的数据时, 源图像之间的配准误差会对融合性能产生较大影响, 尤其是全色图像与高光谱图像、多光谱图像与高光谱图像的融合, 现有成像平台无法同时获取不同分辨率的多光谱与高光谱图像, 这类图像的配准难度更大, 是空谱融合亟需解决的难题。

(2) 不同成像手段光谱响应区间不一致时, 图像融合过程中易产生空间和光谱结构失真, 尤其是全色图像与高光谱图像的融合, 由于全色图像与高光谱图像的光谱响应区间存在很大差异, 融合过程中往往难以重构出真实的高分辨率空间信息。

(3) 不同成像手段间的空间分辨率和光谱分辨率差异越大, 空间与光谱信息的压缩比例就越大。这说明多分辨率图像融合存在性能极限, 当图像空间分辨率的比值超出某个范围时, 现有方法往往难以重构出高质量的高分辨率高光谱图像。

(4) 相比于其他图像融合方法, 基于成像模型的图像融合方法在融合过程中能够更好的保持图像的空间与光谱信息, 但这类方法通常要求解复杂的优化问题, 计算代价也会更大, 如何降低此类算法的计算代价是亟需解决的技术难题。

(5) 多光谱与全色图像融合的研究趋于瓶颈, 不同融合方法的性能差异在视觉上已经难以区分, 而全色与高光谱图像融合、多光谱与高光谱图像融合的研究仍有较大发展空间。尤其是实验中使用的全色与高光谱融合数据、多光谱与高光谱融合数据多是通过真实高光谱图像进行空间下采样或是光谱下采样的方式生成, 采用真实卫星获取的多光谱、高光谱图像进行数据融合的研究工作较少。

(6) 全色、多光谱和高光谱图像的融合研究

是领域内的热点,但如何将图像融合算法与实际应用问题相结合仍存在诸多问题。从应用的角度改进融合算法的性能和效率,增加融合算法的实用性,是多源遥感图像空谱融合的挑战难题,也是其未来的发展趋势。

3.2 全色/多光谱与合成孔径雷达图像融合

合成孔径雷达(SAR)是一种主动的微波遥感成像方式,能够全天时全天候工作。SAR图像能够反映地物的介电特性和几何特性,但由于其侧视相干成像方式,图像噪声污染较严重且目视效果不佳(Thompson, 2001)。全色图像能够提供地物精细的空间结构信息。多光谱图像光谱信息较丰富,但空间分辨率通常低于全色与SAR图像。因此,SAR图像与全色、多光谱图像的融合,综合利用了光学成像和主动成像的独特优势,能够生成更高质量的融合图像。如图5所示,将全色图像与SAR图像进行融合,融合图像既能够保留全色图像的空间结构信息,又能够保留SAR图像中目标的后向散射信息,能够更好地进行后续的图像分析与解译(Seo和Eo, 2020)。此外,将低分辨率多光谱图像与高分率SAR图像进行融合可有效提升多光谱图像的空间分辨(Chandrakanth等, 2011)。

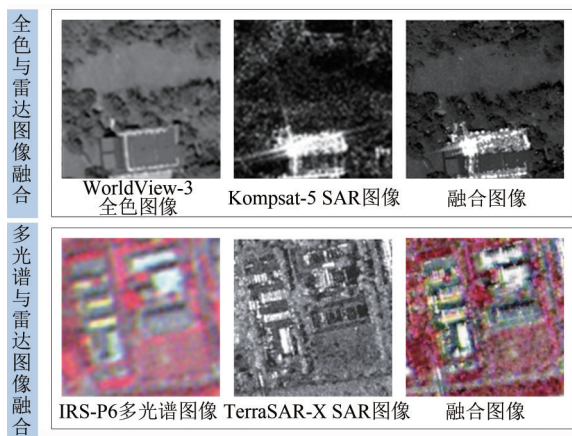


图5 全色、多光谱与合成孔径雷达图像融合示例

Fig.5 Fusion examples of panchromatic, multi-spectral, and SAR images

针对全色、多光谱与SAR图像的融合,国内外学者开展了大量研究。现有全色/多光谱与SAR图像融合方法可分为像素级、特征级和决策级融合3个层次(Kulkarni和Rege, 2020)。在进行融合之前,通常需对SAR图像进行去噪并对两幅源

图像进行配准。对于像素级融合,配准的精度直接影响图像融合的性能。而不同去噪方法对细节信息的保留程度不同,适用于不同层次的图像融合。因此,图像融合中SAR图像预处理方法的选择尤为重要(孙越等, 2019)。

像素级图像融合直接对图像中的像素进行融合,结果是一副包含更多场景信息的融合图像。像素级融合的优势是能够尽可能保留全色、多光谱与SAR图像的原始信息。Ghassemian(2016)将像素级融合方法归纳为成分替换法、多分辨率分析法与基于成像模型的方法。成分替换法对低空间分辨率的多光谱图像进行图像变换,将其分解为空间和光谱成分,再用高空间分辨率的SAR图像去替代其空间成分,最后进行逆变换得到融合图像。常用的方法有主成分分析法(PCA)、GS法(Gram-Schmidt)、IHS变换法(Intensity-Hue-Saturation)、Brovey变换法、高通滤波法(HPF)等(Gupta等, 2013; Chen等, 2010; Feng等, 2019)。这类方法原理简单,计算效率高,但容易产生光谱失真。多分辨率分析法通过拉普拉斯金字塔、小波分析等多分辨率分析方法,提取SAR图像或全色图像的空间信息,并通过不同图像多分辨表示系数的加权融合与重建得到融合图像。代表性的方法有基于拉普拉斯金字塔的方法、基于小波变换的方法、基于Shearlet变换的方法、基于Contourlet变换的方法等(郇建豪等, 2017; 易维等, 2018)。这类方法计算复杂度更高,在图像存在配准误差效果更佳鲁棒,但易产生空间失真。基于成像模型的方法主要包括基于变分模型和稀疏表示模型的融合方法。稀疏表示模型将图像融合问题视为图像复原问题,能够有效减少融合过程中产生的空间与光谱结构失真,但其字典学习与稀疏编码是两个挑战性的难题,算法的计算复杂度较高(Gahremani和Ghassemian, 2016)。除上述3种方法外,研究人员还提出将前3种方法进行集成,以综合利用不同类型像素级融合方法的优势,减少光谱和空间失真的同时,降低方法的计算复杂度。例如, IHS图像融合方法对空间细节保留较好,但是会引入光谱失真。多分辨率分析方法能够很好保留图像光谱信息,但易引入光谱失真。因此,研究人员们提出了IHS和多分辨率分析相结合的图像融合方法(Alparone等, 2004);为了降低稀疏表示模型的计算复杂度,也有学者

提出结合稀疏表示与IHS变换的图像融合方法(Liu等, 2016; Zhang等, 2016)。

特征级融合是从SAR与多光谱图像中提取显著特征,如边缘、角点、轮廓、纹理等,并将这些特征进行融合,得到辨识度更高的融合特征。例如,将SAR图像和多光谱图像中的边缘特征进行匹配与融合,可以得到地物更完整、更清晰的边缘特征图(李璟旭, 2009)。决策级的融合从某种意义上来说是多源图像深层语义信息的融合,它从预处理后的图像中提取地物要素信息,并对这些信息进行融合生成最终的地物分类结果(Waske等, 2007)。特征级和决策级图像融合都不会保留图像的原始像素信息,但在实际遥感应用中,特征级与决策级融合效率更高、融合结果往往能直接服务于具体的应用需求。

SAR图像与全色、多光谱图像融合的性能评估,根据融合的层次不同也会有所差异。像素级融合常用的评价指标包括SAM、ERGAS、RMSE、SSIM等,特征级与决策级的融合则根据融合前后,地物分类、变化检测或目标探测性能的差异来评估融合性能(Liu等, 2015)。

SAR图像与全色、多光谱图像的融合已成功应用于土地覆盖分类和地理环境监测等遥感应用问题(Bilgin等, 2015; Gianinetta等, 2015)。许璟等(2015)将Radasat卫星获取的SAR图像与Landsat卫星获取的多光谱图像进行融合,研究结果显示图像融合能够有效提升高原山区地形地势分析的精度。Halder和Patnaik等(2010)将Radarsat卫星获取的多时相SAR数据与星载多光谱图像进行融合,进行作物的种类识别并估算种植面积。Brunner等(2010)融合了QuickBird和WorldView-1获取的光学图像以及TerraSAR-X和COSMO-SkyMed获取的SAR图像,通过特征级的图像融合与分类,分析了汶川地震中映秀镇的灾后变化,并进行了灾害评估。Yuan等(2020)以北京为案例,融合Sentinel-1卫星获取的SAR图像和Landsat 8获取的多光谱图像,实验证明融合后地物分类精度更高,地物要素信息的提取更加准确。Seo等(2018)使用随机森林方法融合Kompsat-5 SAR图像的地表粗糙度特征与Landsat 8多光谱图像的地物光谱特征,有效提升了地物变化检测的精度。

总体来说,SAR与多光谱、高光谱图像的融

合主要存在如下挑战性难题:

(1) 由于成像的基本原理不同,相比于全色、多光谱、高光谱图像之间的融合,SAR图像与全色、多光谱图像的结构差异更大,导致像素级融合过程中,易产生严重的空间与光谱失真。

(2) SAR成像本身,不可避免会产生特有的斑点噪声,且SAR与多光谱、高光谱图像之间还存在不可避免的配准误差,这些因素均会对融合性能造成影响。

(3) 随着深度学习技术的兴起,近年来SAR与全色、多光谱图像的融合正朝着深层特征表示与语义信息融合的方向发展,探索新的跨模态特征与决策融合方法,是SAR图像与全色、多光谱图像融合热点问题,具有十分重要的意义(Idol等, 2015)。

3.3 多光谱/高光谱与激光雷达图像融合

激光雷达图像能够准确描述地物的3维空间结构,但难以获取地物精细的光谱信息。仅使用LiDAR图像这一单一数据源,往往难以实现地物的精确分类和识别。多光谱和高光谱遥感图像具有丰富的光谱信息,与LiDAR图像具有很好的互补性(乔纪纲等, 2011)。因此,综合利用LiDAR图像获取的3维结构信息与多光谱、高光谱图像获取的地物光谱信息,可极大提升遥感图像地物分类的精度和可信度,为地物的精确识别开辟了新途径。如图6所示,结合LiDAR图像的高程信息可以有效去除多光谱图像中的阴影;此外,将LiDAR图像和高光谱图像的分类结果进行融合,能够极大提高地物分类精度(Berger等, 2013; Rasti等, 2017)。

由于多光谱、高光谱图像与LiDAR图像属于异质传感器数据的融合,目前的研究多是通过特征级和决策级的方法来进行融合(张良培和沈焕锋, 2016),并逐渐形成了“特征提取—特征融合—图像分类—决策融合—分类后处理”的融合流程(曹琼等, 2019)。特征级融合与决策级融合具有各自的优势,特征级融合能针对图像的特点提取特征来进行融合,融合的灵活性更高;决策级融合可以避免不同数据特征的不一致性,融合的鲁棒性更强(童庆禧等, 2006)。也有学者研究如何将特征级和决策级融合的方法相结合,来兼顾两者的优势。曹琼等(2019)提出了多级融合的方法

法来综合利用高光谱图像与LiDAR图像进行城市地物的精细分类,具体流程是先提取两幅源图像的空间、光谱和高程信息,并对特征进行融合与分类,然后使用LiDAR图像生成的建筑物掩膜,进一步对分类结果进行优化,得到最终的地物分类结果。Zhong等(2017)将高光谱图像与LiDAR图像融合,并通过加权投票的决策融合策略得到分类结果;Chen等(2017)将Landsat 8、环境一号卫星和Terra卫星获取的多光谱、高光谱和激光雷达图像进行融合,结果表明融合多源遥感成像手段获取的光谱、高度、角度等信息,能够获得比单一来源遥感图像更高的分类精度。袁鹏飞等(2018)融合LiDAR图像的三维特征和多光谱图像的强度、密度、平坦度等特征,实现城市复杂环境下道路中心线的精确提取。吴孟凡等(2017)将Worldview-2获取的多光谱图像与机载LiDAR数据融合,估算城市不透水层分布情况,实验表明LiDAR图像的引入能够更好的区分植被阴影与不透水层,进而提高不透水层的估算精度。

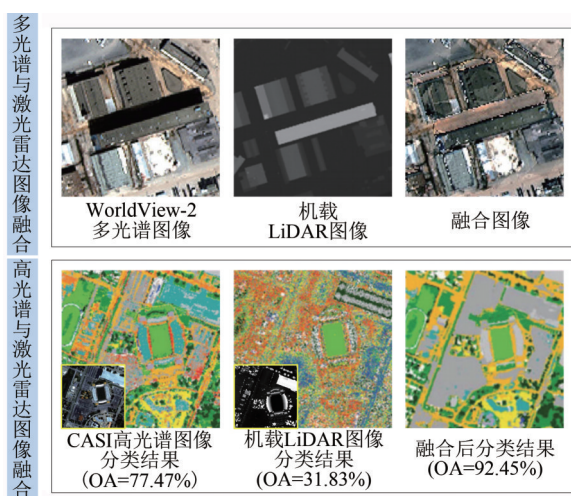


图6 多光谱、高光谱与激光雷达图像融合示例

Fig.6 Fusion examples of multi-spectral, hyper-spectral, and SAR images

LiDAR图像与多光谱、高光谱的融合是遥感图像融合领域近年来逐渐兴起的热点问题。总体来说, LiDAR图像与多光谱、高光谱图像融合主要存在如下挑战性难题:

(1) LiDAR图像与多光谱、高光谱图像的融合属于多模态图像融合,两种不同模态图像反映的目标特性存在很大差异,如何实现特性各异的信息的跨模态联合表示与提取是LiDAR与多光谱、

高光谱图像融合亟需解决的难题;

(2) LiDAR图像与多光谱、高光谱图像融合多是特征级或决策级的融合。特征提取的方法、分类器的设计在融合过程中发挥了重要作用。因此,设计最优的特征级、决策级或多级图像融合框架,充分发挥不同特征提取与分类方法的优势,是LiDAR图像与多光谱、高光谱图像融合的挑战性难题。

(3) LiDAR图像与多光谱、高光谱图像融合在城市制图、林业调查等领域取得了成功应用。在后续研究中,探索LiDAR图像与多光谱、高光谱图像融合新的应用问题,具有十分重要的意义。

3.4 其他类型的多源遥感图像融合

除上述国内外研究人员普遍关注的遥感图像融合问题外,近年来,热红外遥感图像、夜光遥感图像、视频遥感数据和立体遥感图像的融合逐渐兴起。其融合的目的同样是通过综合利用不同来源遥感图像的特点和优势,获得更高质量的融合图像,或是进一步提升后续目标探测与地物分类的精度(Zhan等, 2011; Huang和Song, 2012)。

如图7所示,热红外图像主要反映了地面的温度分布信息,但空间分辨率低;相比于热红外图像,全色与多光谱图像的空间分辨率更高,将热红外图像与全色图像或多光谱图像融合能够得到更高空间分辨率的地表温度数据。例如,姚为和韩敏(2010)通过神经网络方法将ETM+数据集中的多光谱图像与热红外图像融合,获得了扎龙湿地高空间分辨率的地表温度分布图像;Jin和Han(2017)提出基于稀疏表示的图像融合方法,将Landsat 7的热红外图像和全色图像进行融合,显著提升了地表温度分布图的空间分辨率。

除空间和光谱分辨率外,卫星的重访频率也是遥感图像的一个重要属性。一方面,卫星传感器在图像分辨率和重访频率之间必有折中,但作为研究地表特征时空特性的关键,遥感图像的时间和空间分辨率都至关重要;另一方面,多时相遥感影像中包含海量的时空信息,对数据中时空信息的挖掘,可极大地提高遥感数据的利用率(黄波和赵涌泉, 2017; Zhu等, 2016)。因而,不同时间与空间分辨率的遥感图像融合(时空融合)也是一种不可或缺的技术手段。近年来,多时间分辨率遥感图像融合已被成功应用于作物生长评估、城市变化监测等领域。例如, Gao等(2015)

将时间分辨率更高的MODIS多光谱图像和空间分辨率更高的Landsat多光谱图像融合,融合结果继承了Landsat的空间分辨率(30 m)和MODIS的重访频率(每天),被成功应用于农作物的长势分析和监测;张猛和曾永年(2018)以长株潭城市群核心区为例,将MODIS与Landsat融合后的高时空分辨率数据用于估算植被净生产力,结果与实测值保持了较好的一致性。

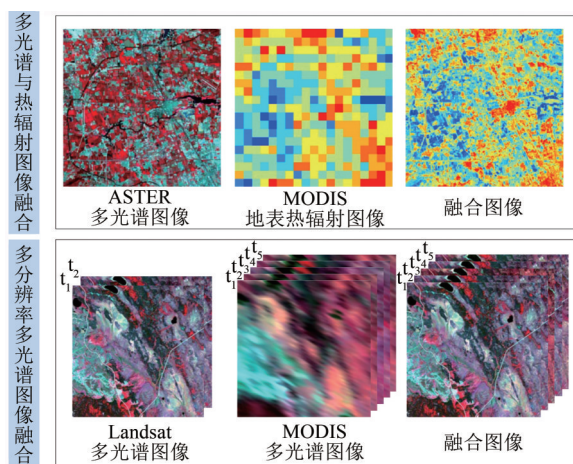


图7 其他多源图像融合示例

Fig.7 Fusion examples of other types of multi-source images

其他类型的多源遥感图像融合还包括夜间灯光数据、立体图像、视频数据的融合。例如,吴小语和张鹏林等(2015)以武汉市为研究对象,合DMSP夜间遥感数据和Landsat 7获取的多光谱图像来提升城市边界提取精度。张靖宇等(2015)以西沙群岛北岛为研究对象,采用WorldView-2 4波段立体图像数据和非遥感数据(水深点和潮汐表)进行决策级融合,实现了岛屿周边水深的精确反演。

为了鼓励和推动多源遥感数据融合的研究,IEEE地球科学与遥感学会IEEE GRSS(IEEE Geoscience and Remote Sensing Society)自2006年以来,每年都会举办多源遥感数据融合竞赛,近十年来,比赛主题不仅涉及空谱融合、时空融合、高光谱与LiDAR融合等领域,还包括多角度光学图像、视频数据、地图矢量数据等。近十年来,IEEE GRSS数据融合大赛的主题和数据信息如表2所示。从表中可以得出以下结论。

(1) 视频、立体等新型遥感数据已出现在2011年、2016年的数据融合竞赛中,随着这类搭载新型传感器的卫星和机载平台的发展,探索针对夜光、视频与立体图像的融合技术是未来的发展方向之一。

表2 近十年IEEE GRSS数据融合大赛信息
Table 2 Information of the IEEE GRSS Data Fusion Contest in the last ten years

年份	主题	数据
2011	多角度全色、多光谱图像融合	WorldView-2多角度全色多光谱图像(里约热内卢区域) QuickBird多光谱图像 WorldView-2多光谱图像
2012	多模态多时相数据融合	TerraSAR-X SAR图像 机载LiDAR数据(旧金山区域)
2013	高光谱和LiDAR图像融合分类	机载高光谱图像 机载LiDAR数据(休斯顿区域)
2014	高光谱和可见光图像融合分类	机载高光谱图像 机载可见光图像(Quebec区域)
2015	LiDAR和RGB图像融合分类	机载LiDAR数据 机载RGB图像(比利时港口区域)
2016	多时相高分辨率图像融合	Deimos-2全色图像 Deimos-2多光谱图像 Iris视频数据
2017	多模态图像融合土地利用分类	Landsat 8多光谱图像 Sentinel-2 SAR图像 OpenStreetMap矢量数据(9个城市区域)
2018	多传感器融合城市土地利用分类	机载多光谱-LiDAR数据 机载高光谱图像 机载可见光图像(休斯顿区域)
2019	城市3D几何模型重建和语义分割	星载可见光图像 星载多光谱图像 机载LiDAR数据
2020	全球土地覆盖弱监督分类	Sentinel-1 SAR图像, Sentinel-2多光谱图像, MODIS图像分类结果

(2) 现有图像融合方法的输入大多是两种不同不同来源的图像,两种以上不同来源图像如何高效融合仍是多源图像融合亟需解决的技术难题。

(3) 除遥感图像数据外,如何融合不同来源的地理信息数据、地面站点数据、不同来源的遥感图像数据是多源遥感图像融合技术进一步发展必须要考虑的问题。

(4) 近年来, 图像融合正在从像素级的融合往更深层次的特征级与决策级融合的方向发展, 地物分类精度等指标在图像融合性能评估中发挥越来越重要的作用。例如2013年—2020年的数据融合竞赛中, 均采用地物解译或者分类的精度来评价融合性能。换言之, 研究人员逐渐认识到遥感图像融合的最终目的是提高应用场景下地物的解译和识别能力。

4 结 语

多源遥感图像的融合能够综合不同种类遥感图像的优势, 在资源调查、精准农业、军事侦察等领域具有重大应用价值。国内外学者针对多源遥感图像融合开展了大量研究。本文深入分析了不同类型遥感图像的特点和优势, 总结了多源遥感图像融合的整体发展趋势。此外, 本文详细介绍了不同类型遥感图像融合面临的挑战性难题, 和未来的发展方向, 主要结论如下:

(1) 数据是图像融合的基础, 得益于搭载全色与多光谱相机的高分辨率卫星, 全色与多光谱图像技术的发展最为成熟。随着成像技术的发展, 夜光、视频、立体相机等新型遥感图像的融合是未来新的研究热点。

(2) 多模融合成像系统能够集多模成像装置与多模图像融合为一体, 既解决了数据获取的问题, 同时又能够结合硬件设计降低图像融合难度, 提升融合性能, 是多源图像融合技术的发展趋势。

(3) 多源遥感图像融合呈现出数据来源多样化、融合目标应用化、融合框架多样化的新趋势。不仅仅是遥感图像数据, 地理信息数据等其他类型的数据也可与多源遥感图像进行融合; 融合的目标不仅为了提升图像的质量或分辨率, 更多是为了解决遥感应用中的地物分类或参数定量反演问题; 仅适用于两种不同来源图像融合的传统融合框架已经难以满足实际应用需求, 研究新的多源图像融合框架是图像融合技术发展的新趋势。

参考文献(References)

Abdikan S, Bilgin G, Sanli F B, Uslu E and Ustuner M. 2015. Enhancing land use classification with fusing dual-polarized TerraSAR-X and multispectral RapidEye data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1): 096054 [DOI: 10.1117/1.JRS.9.096054]

Adiri Z, El Harti A, Jellouli A, Maacha L, Azmi M, Zouhair M and

Bachaoui E. 2020. Mapping copper mineralization using EO-1 Hyperion data fusion with Landsat 8 OLI and Sentinel-2A in Moroccan Anti-Atlas. *Geocarto International*, 35(7): 781-800 [DOI: 10.1080/10106049.2018.1544287]

Alparone L, Aiazzi B, Baronti S, Garzelli A, Nencini F and Selva M. 2008. Multispectral and panchromatic data fusion assessment without reference. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74(2): 193-200 [DOI: 10.14358/PERS.74.2.193]

Alparone L, Baronti S, Garzelli A and Nencini F. 2004. Landsat ETM+ and SAR image fusion based on generalized intensity modulation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(12): 2832-2839 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.838344]

Alparone L, Wald L, Chanussot J, Thomas C, Gamba P and Bruce L M. 2007. Comparison of pansharpening algorithms: outcome of the 2006 GRSS data-fusion contest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(10): 3012-3021 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.904923]

Berger C, Voltersen M, Eckardt R, Eberle J, Heyer T, Salepci N, Hese S, Schmullius C, Tao J Y, Auer S, Bamler R, Ewald K, Gartley M, Jacobson J, Buswell A, Du Q and Pacifici F. 2013. Multi-modal and multi-temporal data fusion: outcome of the 2012 GRSS data fusion contest. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3): 1324-1340 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2245860]

Brunner D, Lemoine G and Bruzzone L. 2010. Earthquake damage assessment of buildings using VHR optical and SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(5): 2403-2420 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2038274]

Cai Y. 2020. Application of airborne LiDAR in mountain topographic survey. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 43(3): 157-159, 164 (蔡悦. 2020. 机载激光LiDAR在密林山区测绘中的应用研究. *测绘与空间地理信息*, 43(3): 157-159, 164)

Cao Q, Ma A L, Zhong Y F, Zhao J, Zhao B and Zhang L P. 2019. Urban classification by multi-feature fusion of hyperspectral image and LiDAR data. *Journal of Remote Sensing*, 23(5): 892-903 (曹琼, 马爱龙, 钟燕飞, 赵济, 赵贝, 张良培. 2019. 高光谱-LiDAR多级融合城区地表覆盖分类. *遥感学报*, 23(5): 892-903) [DOI: 10.11834/jrs.20197512]

Chandrakanth R, Saibaba J, Varadan G and Raj P A. 2011. Feasibility of high resolution SAR and multispectral data fusion//Proceedings of 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver, Canada: IEEE, 356-359 [DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6048972]

Chaturvedi S K, Banerjee S and Lele S. 2020. An assessment of oil spill detection using Sentinel 1 SAR-C images. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(2): 116-135 [DOI: 10.1016/j.joes.2019.09.004]

Chaussard E, Wdowinski S, Cabral-Cano E and Amelung F. 2014. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140: 94-106 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.038]

Chen B, Huang B and Xu B. 2017. Multi-source remotely sensed data fusion for improving land cover classification. *ISPRS Journal of*

- Photogrammetry and Remote Sensing, 124: 27-39 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.12.008]
- Chen S H, Zhang R H, Su H B, Tian J and Xia J. 2010. SAR and multi-spectral image fusion using generalized IHS transform based on à trous wavelet and EMD decompositions. *IEEE Sensors Journal*, 10(3): 737-745 [DOI: 10.1109/JSEN.2009.2038661]
- Chen Y B, Zheng Z H, Wu Z F and Qian Q L. 2019. Review and prospect of application of nighttime light remote sensing data. *Progress in Geography*, 38(2): 205-223 (陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 千庆兰. 2019. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望. *地理科学进展*, 38(2): 205-223) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.02.005]
- Chen Z, Pu H Y, Wang B and Jiang G M. 2014. Fusion of hyperspectral and multispectral images: a novel framework based on generalization of pan-sharpening methods. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(8): 1418-1422 [DOI: 10.1109/LGRS.2013.2294476]
- Cui M H, Zhou J J and Chen C. 2004. The physical principle of synthetic aperture radar and its military application. *Technology Foundation of National Defence*, (4): 4-5, 18 (崔麦会, 周建军, 陈超. 2004. 合成孔径雷达的物理原理及其在军事上的应用. *国防技术基础*, (4): 4-5, 18)
- Dian R W, Li S T and Fang L Y. 2019. Learning a low tensor-train rank representation for hyperspectral image super-resolution. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 30(9): 2672-2683 [DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2885616]
- Dong C, Loy C C, He K M and Tang X O. 2016. Image super-resolution using deep convolutional networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38(2): 295-307 [DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2439281]
- Du W H, Qin Z H and Li Y. 2018. Advances in thermal infrared remote sensing and its application in agricultural drought monitoring. *China Agricultural Informatics*, 30(2): 24-41 (独文惠, 覃志豪, 黎业. 2018. 热红外遥感及其在农业旱情监测中的应用研究进展. *中国农业信息*, 30(2): 24-41) [DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20180203]
- Fasbender D, Radoux J and Bogaert P. 2008. Bayesian data fusion for adaptable image pansharpening. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(6): 1847-1857 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.917131]
- Feng P M, Lin Y T, Guan J, Dong Y, He G J, Xia Z H and Shi H F. 2019. Embranchment CNN based local climate zone classification using SAR and multispectral remote sensing data//*Proceedings of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Yokohama, Japan: IEEE: 6344-6347 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898703]
- Gao F, Hilker T, Zhu X L, Anderson M, Masek J, Wang P J and Yang Y. 2015. Fusing Landsat and MODIS data for vegetation monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(3): 47-60 [DOI: 10.1109/MGRS.2015.2434351]
- Garzelli A, Nencini F, Alparone L, Aiazzi B and Baronti S. 2004. Pansharpening of multispectral images: a critical review and comparison//*Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Anchorage, USA: IEEE: 84 [DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1368950]
- Ghadjati M, Moussaoui A and Boukharouba A. 2019. A novel iterative PCA-based pansharpening method. *Remote Sensing Letters*, 10(3): 264-273 [DOI: 10.1080/2150704X.2018.1547443]
- Ghahremani M and Ghassemian H. 2016. A compressed-sensing-based pan-sharpening method for spectral distortion reduction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4): 2194-2206 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2497309]
- Ghamisi P, Rasti B, Yokoya N, Wang Q M, Hofile B, Bruzzone L, Bovolo F, Chi M M, Anders K, Gloaguen R, Atkinson P M and Benediktsson J A. 2019. Multisource and multitemporal data fusion in remote sensing: a comprehensive review of the state of the art. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(1): 6-39 [DOI: 10.1109/MGRS.2018.2890023]
- Ghassemian H. 2016. A review of remote sensing image fusion methods. *Information Fusion*, 32: 75-89 [DOI: 10.1016/j.inffus.2016.03.003]
- Gianinetto M, Rusmini M, Marchesi A, Maianti P, Frassy F, Dalla Via G, Dini L and Nodari F R. 2015. Integration of COSMO-SkyMed and GeoEye-1 data with object-based image analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(5): 2282-2293 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2425211]
- Gu X F and Tong X D. 2015. Overview of China earth observation satellite programs [Space Agencies]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(3): 113-129 [DOI: 10.1109/MGRS.2015.2467172]
- Guo H D. 2012. China's Earth observing satellites for building a digital earth. *International Journal of Digital Earth*, 5(3): 185-188 [DOI: 10.1080/17538947.2012.669960]
- Guo H D, Fu W X and Liu G. 2019a. Chinese earth observation satellites//Guo H D, Fu W X and Liu G, eds. *Scientific Satellite and Moon-Based Earth Observation for Global Change*. Singapore: Springer: 189-243 [DOI: 10.1007/978-981-13-8031-0_6]
- Guo L, Dou X N, Wang X, Liu S H and Wang Y Y. 2017. On digital orthophoto generation by using data from ZY-3 surveying satellite. *Standardization of Surveying and Mapping*, 33(4): 28-30 (郭莉, 窦小楠, 王霞, 刘书含, 王洋洋. 2017. 基于资源三号测绘卫星数据制作数字正射影像图的研究. *测绘标准化*, 33(4): 28-30)
- Guo L H and Yu X Q. 2013. A survey of the development of foreign surveying and mapping satellites. *Geomatics Technology and Equipment*, 15(3): 86-88 (郭连惠, 喻夏琼. 2013. 国外测绘卫星发展综述. *测绘技术装备*, 15(3): 86-88) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-4950.2013.03.030]
- Guo Z M, Jiang Y and Bi S H. 2019. Real-time estimation of tropospheric delay with the use of multi-constellation signals. *Journal of Navigation and Positioning*, 7(3): 24-30 (郭兆明, 姜毅, 毕世华. 2019. 合成孔径雷达卫星车辆运动侦察概率探究. *导航定位学报*, 7(3): 24-30) [DOI: 10.16547/j.cnki.10-1096.20190305]
- Gupta V K, Neog A and Katiyar S K. 2013. Analysis of image fusion techniques over multispectral and microwave SAR images//*Proceedings of 2013 International Conference on Communication and Signal Processing*. Melmaruvathur, India: IEEE: 1037-1042 [DOI: 10.1109/iccsp.2013.6577214]
- Haldar D and Patnaik C. 2010. Synergistic use of multi-temporal Radarsat SAR and AWiFS data for *Rabi* rice identification. *Journal*

- of the Indian Society of Remote Sensing, 38(1): 153-160 [DOI: 10.1007/s12524-010-0006-x]
- Han X H, Shi B X and Zheng Y Q. 2018. SSF-CNN: spatial and spectral fusion with CNN for hyperspectral image super-resolution// Proceedings of the 2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Athens, Greece: IEEE: 2506-2510 [DOI: 10.1109/ICIP.2018.8451142]
- Hardie R C, Eismann M T and Wilson G L. 2004. MAP estimation for hyperspectral image resolution enhancement using an auxiliary sensor. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(9): 1174-1184 [DOI: 10.1109/TIP.2004.829779]
- He G J and Li K L. 1997. Spaceborne synthetic aperture radar remote sensing and multi-satellite remote sensing data fusion method. *Geological Science and Technology Information*, 16(S1): 30-35 (何国金, 李克鲁. 1997. 星载合成孔径雷达遥感及多卫星遥感数据融合方法. *地质科技情报*, 16(S1): 30-35)
- Hu B and Wang X Y. 2016. Study on fusion method of multi-spectral and panchromatic remote sensing image for farmland information extraction. *Ningxia Engineering Technology*, 15(4): 289-293 (胡博, 汪西原. 2016. 用于耕地信息提取的多光谱与全色遥感影像融合方法研究. *宁夏工程技术*, 15(4): 289-293) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-7244.2016.04.001]
- Hu J S, Ling W, Huang L Q, Gao Q F, Zhao B Q, Guo P J, Bai Y H, Liu B X, An R X and Hu C J. 1997. Stereo-imaging technology in remote sensing. *Acta Optica Sinica*, 17(2): 222-226 (胡家升, 凌伟, 黄廉卿, 高峰, 赵宝庆, 郭培基, 白雨虹, 刘伯翔, 安瑞霞, 胡存举. 1997. 遥感中的立体成像技术. *光学学报*, 17(2): 222-226)
- Huang A, Wang X H, Yang L A, Du T, Wang Y and Liu J H. 2015. Study on the suitability of Landsat8 OLI mage for fusion algorithms based on the township scale. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 46(4): 600-606 (黄安, 王旭红, 杨联安, 杜挺, 王元, 刘建红. 2015. 基于乡镇尺度 Landsat8 OLI 影像融合算法适应性研究. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 46(4): 600-606) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2015.04.025]
- Huang B and Song H H. 2012. Spatiotemporal reflectance fusion via sparse representation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(10): 3707-3716 [DOI: 10.1109/TGRS. 2012. 2186638]
- Huang B and Zhao Y Q. 2017. Research status and prospect of spatiotemporal fusion of multi-source satellite remote sensing imagery. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1492-1499 (黄波, 赵涌泉. 2017. 多源卫星遥感影像时空融合研究的现状及展望. *测绘学报*, 46(10): 1492-1499) [DOI: 10.11947/j. AGCS.2017. 20170376]
- Idol T, Haack B and Mahabir R. 2015. Comparison and integration of spaceborne optical and radar data for mapping in Sudan. *International Journal of Remote Sensing*, 36(6): 1551-1569 [DOI: 10. 1080/01431161.2015.1015659]
- Jarron L R, Coops N C, MacKenzie W H, Tompalski P and Dykstra P. 2020. Detection of sub-canopy forest structure using airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 244: 111770 [DOI: 10. 1016/j.rse.2020.111770]
- Jiang C, Zhang H Y, Shen H F and Zhang L P. 2012. A practical compressed sensing-based pan-sharpening method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4): 629-633 [DOI: 10.1109/LGRS. 2011.2177063]
- Jiang R. 2016. Spatial Temporal Variation Characteristics and Its Influencing Factors of Thermal Environment in the Urban Area of Shanghai. Shanghai: East China Normal University (姜荣. 2016. 上海市城区热环境时空变化特征及其影响因素研究. 上海: 华东师范大学)
- Jin H S and Han D. 2017. Multisensor fusion of Landsat images for high-resolution thermal infrared images using sparse representations. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017: 2048098 [DOI: 10.1155/2017/2048098]
- Kulkarni S C and Rege P P. 2020. Pixel level fusion techniques for SAR and optical images: a review. *Information Fusion*, 59: 13-29 [DOI: 10.1016/j.inffus.2020.01.003]
- Levin N, Kyba C C M, Zhang Q L, de Miguel A S, Roman M O, Li X, Portnov B A, Molthan A L, Jechow A, Miller S D, Wang Z S, Shrestha R M and Elvidge C D. 2020. Remote sensing of night lights: a review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111443 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111443]
- Li D R. 2012. China's First Civilian Three-line-array stereo mapping satellite: ZY-3. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 41(3): 317-322 (李德仁. 2012. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星—资源三号测绘卫星. *测绘学报*, 41(3): 317-322)
- Li D R and Li X. 2015. An overview on data mining of nighttime light remote sensing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 44(6): 591-601 (李德仁, 李熙. 2015. 论夜光遥感数据挖掘. *测绘学报*, 44(6): 591-601) [DOI: 10.11947/j. AGCS.2015.20150149]
- Li J X. 2009. Optical and SAR images' feature fusion. *Computer Engineering and Applications*, 45(24): 178-179 (李璟旭. 2009. 可见光与 SAR 图像的特征级融合. *计算机工程与应用*, 45(24): 178-179) [DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.24.053]
- Li S T and Yang B. 2011. A new pan-sharpening method using a compressed sensing technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(2): 738-746 [DOI: 10.1109/TGRS. 2010. 2067219]
- Li S T, Dian R W, Fang L Y and Bioucas-Dias J M. 2018. Fusing hyperspectral and multispectral images via coupled sparse tensor factorization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 27(8): 4118-4130 [DOI: 10.1109/TIP.2018.2836307]
- Li S T, Yin H T and Fang L Y. 2013. Remote sensing image fusion via sparse representations over learned dictionaries. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(9): 4779-4789 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2230332]
- Li X M, Yan Y P, Liu G, Li D L, Zhang X and Zhuang Y C. 2016. Application of ZY-102 C satellite data to hydrogeological investigation in Zanda area, Tibet. *Remote Sensing for Land and Resources*, 28(4): 141-148 (李晓民, 燕云鹏, 刘刚, 李冬玲, 张兴, 庄永成. 2016. ZY-102C 星数据在西藏札达地区水文地质调查中的应用. *国土资源遥感*, 28(4): 141-148) [DOI: 10.6046/gtzyyg. 2016.04.22]
- Licciardi G A, Khan M M and Chanussot J. 2012. Fusion of hyperspectral and panchromatic images: a hybrid use of induction and non-linear PCA//Proceedings of the 2012 19th IEEE International

- Conference on Image Processing. Orlando, USA: IEEE: 2133-2136 [DOI: 10.1109/ICIP.2012.6467314]
- Liu C H, Qi Y and Ding W R. 2016. Airborne SAR and optical image fusion based on IHS transform and joint non-negative sparse representation//Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China: IEEE: 7196-7199 [DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730877]
- Liu G X. 2004. Principles of imaging SAR and characteristics of SAR image. *Surveying and Mapping of Sichuan*, 27(3): 141-143 (刘国祥, 2004. SAR 成像原理与图像特征. *四川测绘*, 27(3): 141-143) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-5019.2004.03.013]
- Liu J, Huang J Y, Liu S G, Li H L, Zhou Q M and Liu J C. 2015. Human visual system consistent quality assessment for remote sensing image fusion. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105: 79-90 [DOI: 10.1016/j.isprsjrs.2014.12.018]
- Liu J J, Zhang J, Li Z, Zhang G, Du W, Zhao W H and Liu J W. 2018. Technical framework of 1: 10000 cartographic element extraction based on GF-7 satellite. *Geomatics World*, 25(6): 58-61, 67 (刘建军, 张俊, 李翌, 张刚, 杜维, 赵文豪, 刘剑炜, 2018. 基于 GF-7 卫星的 1: 10000 制图要素信息提取技术框架建设. *地理信息世界*, 25(6): 58-61, 67) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-1586.2018.06.011]
- Liu Q S, Huang C, Liu G H and Yu B W. 2018a. Comparison of CBERS-04, GF-1, and GF-2 satellite panchromatic images for mapping quasi-circular vegetation patches in the Yellow River delta, China. *Sensors*, 18(8): 2733 [DOI: 10.3390/s18082733]
- Liu Y, Chen X, Wang Z F, Wang Z J, Ward R K and Wang X S. 2018b. Deep learning for pixel-level image fusion: recent advances and future prospects. *Information Fusion*, 42: 158-173 [DOI: 10.1016/j.inffus.2017.10.007]
- Loncan L, de Almeida L B, Bioucas-Dias J M, Briottet X, Chanussot J, Dobigeon N, Fabre S, Liao W Z, Licciardi G A, Simoes M, Tourneret J Y, Veganzones M A, Vivone G, Wei Q and Yokoya N. 2015. Hyperspectral pansharpening: a review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(3): 27-46 [DOI: 10.1109/MGRS.2015.2440094]
- Luo D Q, Huang Y Q, Wang S Z, Fang Y P and Jin W B. 2016. Spectral signature analysis and band selection of Macheng rhododendron based on Landsat5 TM. *Hubei Agricultural Sciences*, 55(19): 4991-4994 (罗代清, 黄勇奇, 王书珍, 方元平, 金卫斌, 2016. 基于 Landsat5 TM 的麻城杜鹃花光谱分析与波段选择. *湖北农业科学*, 55(19): 4991-4994) [DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2016.19.023]
- Ma X J, Huang Z W, Qi S Q, Huang J P, Zhang S, Dong Q Q and Wang X. 2020. Ten-year global particulate mass concentration derived from space-borne CALIPSO lidar observations. *Science of the Total Environment*, 721: 137699 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137699]
- Mahyari A G and Yazdi M. 2011. Panchromatic and multispectral image fusion based on maximization of both spectral and spatial similarities. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6): 1976-1985 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2103944]
- Mura M D, Vivone G, Restaino R, Addesso P and Chanussot J. 2015. Global and local Gram-Schmidt methods for hyperspectral pansharpening//Proceedings of 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan, Italy: IEEE: 37-40 [DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7325691]
- Palubinskas G. 2014. Quality assessment of pan-sharpening methods//Proceedings of 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City, Canada: IEEE: 2526-2529 [DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6946987]
- Park J, Min K W, Lee J J, Kil H, Kim V P, Kim H J, Lee E and Lee D Y. 2003. Plasma blob events observed by KOMPSAT-1 and DMSP F15 in the low latitude nighttime upper ionosphere. *Geophysical Research Letters*, 30(21): 2114 [DOI: 10.1029/2003GL018249]
- Qiao J G, Liu X P and Zhang Y H. 2011. Land cover classification using LiDAR height texture and ANNs. *Journal of Remote Sensing*, 15(3): 539-553 (乔纪纲, 刘小平, 张亦汉, 2011. 基于 LIDAR 高度纹理和神经网络的物分类. *遥感学报*, 15(3): 539-553) [DOI: 10.11834/jrs.20119281]
- Rasti B, Ghamisi P and Gloaguen R. 2017. Hyperspectral and LiDAR fusion using extinction profiles and total variation component analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(7): 3997-4007 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2686450]
- Raynolds M K, Comiso J C, Walker D A and Verbyla D. 2008. Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1884-1894 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.09.008]
- Ren K, Sun W W, Meng X C, Yang G and Du Q. 2020. Fusing China GF-5 hyperspectral data with GF-1, GF-2 and Sentinel-2A multispectral data: which methods should be used? *Remote Sensing*, 12(5): 882 [DOI: 10.3390/rs12050882]
- Scarpa G, Vitale S and Cozzolino D. 2018. Target-adaptive CNN-based pansharpening. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(9): 5443-5457 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2817393]
- Schmitt M and Zhu X X. 2016. Data fusion and remote sensing: an ever-growing relationship. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(4): 6-23 [DOI: 10.1109/MGRS.2016.2561021]
- Selva M, Aiazzi B, Butera F, Chiarantini L and Baronti S. 2015. Hypersharpening: a first approach on SIMGA data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(6): 3008-3024 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2440092]
- Seo D K and Eo Y D. 2020. A learning-based image fusion for high-resolution SAR and panchromatic imagery. *Applied Sciences*, 10(9): 3298 [DOI: 10.3390/app10093298]
- Seo D K, Kim Y H, Eo Y D, Lee M H and Park W Y. 2018. Fusion of SAR and multispectral images using random forest regression for change detection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(10): 401 [DOI: 10.3390/ijgi7100401]
- Shi Z, Chen C, Xiong Z W, Liu D, Zha Z J and Wu F. 2019. Deep residual attention network for spectral image super-resolution//Proceedings of Computer Vision - ECCV 2018 Workshops. Munich, Germany: Springer: 214-229 [DOI: 10.1007/978-3-030-11021-5_14]
- Shoeiby M, Robles-Kelly A, Timofte R, Zhou R F, Lahoud F, Susstrunk S, Xiong Z W, Shi Z, Chen C, Liu D, Zha Z J, Wu F, Wei K X, Zhang T, Wang L Z, Fu Y, Nagasubramanian K, Singh

- A K, Singh A, Sarkar S and Ganapathysubramanian B. 2019. PIRM2018 challenge on spectral image super-resolution: methods and results//Proceedings of Computer Vision - ECCV 2018 Workshops. Munich, Germany: Springer: 356-371 [DOI: 10.1007/978-3-030-11021-5_22]
- Sun W W, Yang G, Chen C, Chang M H, Huang K, Meng X Z and Liu L Y. 2020. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites. *Journal of Remote Sensing*, 24(5): 479-510 (孙伟伟, 杨刚, 陈超, 常明会, 黄可, 孟祥珍, 刘良云. 2020. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析. *遥感学报*, 24(5): 479-510) [DOI: 10.11834/jrs.20209464]
- Sun Y, Huang G M, Zhao Z and Liu B Q. 2019. SAR and multi-spectral image fusion algorithms with different filtering methods. *Remote Sensing Information*, 34(4): 114-120 (孙越, 黄国满, 赵争, 刘本强. 2019. 不同滤波方法的SAR与多光谱图像融合算法. *遥感信息*, 34(4): 114-120) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2019.04.018]
- Tai J H, Pan B, Zhao S S and Zhao Y. 2017. SAR and multispectral remote sensing image fusion method using Shearlet transform. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(4): 468-474 (邵建豪, 潘斌, 赵珊珊, 赵园. 2007. 基于Shearlet变换的SAR与多光谱遥感影像融合. *武汉大学学报(信息科学版)*, 42(4): 468-474) [DOI: 10.13203/j.whugis20150768]
- Tang H J, Wu W B, Yang P, Zhou Q B and Chen Z X. 2010. Recent progresses in monitoring crop spatial patterns by using remote sensing technologies. *Scientia Agricultura Sinica*, 43(14): 2879-2888 (唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 周清波, 陈仲新. 2010. 农作物空间格局遥感监测研究进展. *中国农业科学*, 43(14): 2879-2888) [DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2010.14.006]
- Tang P F, Miao Z L, Lin C, Du P J and Guo S C. 2020. An automatic method for impervious surface area extraction by fusing high-resolution night light and Landsat OLI images. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 39(1): 128-136 (唐鹏飞, 苗则朗, 林聪, 杜培军, 郭山川. 2020. 融合高分夜光和Landsat OLI影像的不透水水面自动提取方法. *红外与毫米波学报*, 39(1): 128-136) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2020.01.017]
- Tang X M, Xie J F, Liu R, Huang G H, Zhao C G, Zhen Y, Tang H Z and Dou X H. 2020. Overview of the GF-7 laser altimeter system mission. *Earth and Space Science*, 7(1): e2019EA000777 [DOI: 10.1029/2019EA000777]
- Thenkabail P S, Enclona E A, Ashton M S, Legg C and De Dieu M J. 2004. Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. *Remote Sensing of Environment*, 90(1): 23-43 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.018]
- Thompson D R. 2001. The potential of SAR interferometry for oceanographic measurements: a review//Proceedings of 2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, Australia: IEEE: 573-574 [DOI: 10.1109/IGARSS.2001.976226]
- Tiwari P S, Pande H and Aye M N. 2010. Exploiting IKONOS and Hyperion data fusion for automated road extraction. *Geocarto International*, 25(2): 123-131 [DOI: 10.1080/10106040903180485]
- Tong Q X, Zhang B and Zheng L F. 2006. *Hyperspectral Remote Sensing*. Beijing: Higher Education Press (童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 2006. *高光谱遥感*. 北京: 高等教育出版社)
- Tong X D. 2018. Promote the implementation of high-score projects and help the construction of the "Belt and Road" initiative. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(4): 18-25 (童旭东. 2018. 扎实推进高分专项实施 助力“一带一路”建设. *航天返回与遥感*, 39(4): 18-25)
- Tuia D, Moser G, Le Saux B, Bechtel B and See L. 2017. The 2017 IEEE geoscience and remote sensing society data fusion contest: open data for global multimodal land use classification [Technical Committees]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(4): 110-114 [DOI: 10.1109/MGRS.2017.2760346]
- Wald L. 1999. Some terms of reference in data fusion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1190-1193 [DOI: 10.1109/36.763269]
- Wang J Y, Wang Y M and Li C L. 2010. Noise model of hyperspectral imaging system and influence on radiation sensitivity. *Journal of Remote Sensing*, 14(4): 607-620 (王建宇, 王跃明, 李春来. 2010. 高光谱成像系统的噪声模型和对辐射灵敏度的影响. *遥感学报*, 14(4): 607-620) [DOI: 10.11834/jrs.20100401]
- Wang Z and Bovik A C. 2002. A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, 9(3): 81-84. [DOI: 10.1109/97.995823]
- Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R and Simoncelli E P. 2004. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4): 600-612 [DOI: 10.1109/TIP.2003.819861]
- Waske B, Menz G and Benediktsson J A. 2007. Fusion of support vector machines for classifying SAR and multispectral imagery from agricultural areas//Proceedings of 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona, Spain: IEEE: 4842-4845 [DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423945]
- Wei A N, Tian L Q, Chen X L and Yu Y M. 2020. Retrieval and application of chlorophyll-A concentration in the Poyang Lake based on exhaustion method: a case study of Chinese Gaofen-5 Satellite AHSI data. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 54(3): 447-453 (韦安娜, 田礼乔, 陈晓玲, 余永明. 2020. 基于穷举法的鄱阳湖叶绿素a浓度高光谱反演模型与应用研究——以GF-5卫星AHSI数据为例. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 54(3): 447-453) [DOI: 10.19603/j.cnki.1000-1190.2020.03.019]
- Winter M E and Winter E M. 2002. Physics-based resolution enhancement of hyperspectral data//Proceedings of the SPIE 4725, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VIII. Orlando: SPIE: 580-587 [DOI: 10.1117/12.478792]
- Wu M F, Sun Z C, Li H, Yang B and Yu S S. 2017. Synergistic use of WorldView-2 imagery and airborne LiDAR data for urban impervious surface estimation. *Remote Sensing Information*, 32(2): 79-88 (吴孟凡, 孙中昶, 李慧, 杨波, 禹丝思. 2017. 融合WorldView-2与机载激光雷达数据估算城市不透水面. *遥感信息*, 32(2): 79-88) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2017.02.013]
- Wu W Y, Jin C, Pang Y W, Zhao L J, Song Y, Hu T G, Zhang D R and Xu J F. 2019. Distribution characteristics of surface thermal environment in Zhejiang province based on thermal infrared remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 23(4): 796-808 (吴文渊, 金城, 庞毓雯, 赵丽佳, 宋瑜, 胡潭高, 张登荣, 徐俊峰. 2019. 热红

- 外遥感浙江地表热环境分布研究. 遥感学报, 23(4): 796-808 [DOI: 10.11834/jrs.20197339]
- Wu X Y and Zhang P L. 2016. Urban boundary extraction by fusing of DMSP-OLS and Landsat images. Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 34(1): 67-74 (吴小语, 张鹏林). 2016. 融合 DMSP-OLS 和 Landsat 影像的城区边界提取. 应用科学学报, 34(1): 67-74 [DOI: 10.3969/j.issn.0255-8297.2016.01.008]
- Xiao L, Liu P F and Li H. 2020. Progress and challenges in the fusion of multisource spatial-spectral remote sensing images. Journal of Image and Graphics, 25(5): 851-863 (肖亮, 刘鹏飞, 李恒). 2020. 多源空一谱遥感图像融合方法进展与挑战. 中国图象图形学报, 25(5): 851-863 [DOI: 10.11834/jig.190620]
- Xie M M, Zhou W, Wang Y L and Chang Q. 2008. Research on the thermal environmental effects of urban land use: Taking Ningbo urban area as an example. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2008(05):815-821 (谢苗苗, 周伟, 王仰麟, 常青). 2008. 城市土地利用的热环境效应研究——以宁波城区为例. 北京大学学报(自然科学版), 2008(05):815-821 [DOI: 10.13209/j.0479-8023.2008.125]
- Xu J, An Y L, Liu S H and Wu S. 2015. Image fusion of Spaceborne SAR Data and multi spectral data for mountainous plateau: a case study on Bijie City, Guizhou Province, China. Earth and Environment, 43(4): 457-463 (许璟, 安裕伦, 刘绥华, 吴松). 2015. 高原山区星载合成孔径雷达数据与多光谱数据的图像融合探究——以贵州省毕节市为例. 地球与环境, 43(4): 457-463 [DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2015.04.012]
- Yao W and Han M. 2010. Fusion of thermal infrared and multispectral remote sensing images via neural network regression. Journal of Image and Graphics, 15(8): 1278-1284 (姚为, 韩敏). 2010. 热红外与多光谱遥感图像的神经网络回归融合方法研究. 中国图象图形学报, 15(8): 1278-1284 [DOI: 10.11834/jig.20100811]
- Yi W, Zeng Y and Yuan Z. 2018. Fusion of GF-3 SAR and optical images based on the nonsubsamped contourlet transform. Acta Optica Sinica, 38(11): 1110002 (易维, 曾湧, 原征). 2018. 基于 NSCT 变换的高分三号 SAR 与光学图像融合. 光学学报, 38(11): 1110002 [DOI: 10.3788/AOS201838.1110002]
- Yokoya N, Grohnfeldt C and Chanussot J. 2017. Hyperspectral and multispectral data fusion: a comparative review of the recent literature. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 5(2): 29-56 [DOI: 10.1109/MGRS.2016.2637824]
- Yokoya N, Yairi T and Iwasaki A. 2012. Coupled nonnegative matrix factorization unmixing for hyperspectral and multispectral data fusion. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(2): 528-537 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2161320]
- Yu B L, Liu H X and Wu J P. 2010. A method for urban vegetation classification using airborne LiDAR data and high resolution remote sensing images. Journal of Image and Graphics, 15(5): 782-789 (余柏菴, 刘红星, 吴健平). 2010. 一种应用机载 LiDAR 数据和高分辨率遥感影像提取城市绿地信息的方法. 中国图象图形学报, 15(5): 782-789 [DOI: 10.11834/jig.20100511]
- Yuan L, Zhu G B and Xu C J. 2020. Combining synthetic aperture radar and multispectral images for land cover classification: a case study of Beijing, China. Journal of Applied Remote Sensing, 14(2): 026510 [DOI: 10.1117/1.JRS.14.026510]
- Yuan P F, Huang R G, Hu P B and Yang B S. 2018. Road axis extraction method based on multispectral LiDAR data. Journal of Geoinformation Science, 20(4): 452-461 (袁鹏飞, 黄荣刚, 胡平波, 杨必胜). 2018. 基于多光谱 LiDAR 数据的道路中心线提取. 地球信息科学学报, 20(4): 452-461 [DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.170634]
- Zhan H. 2017. The first two satellites OVS-1A/1B of Zhuhai-1 Remote-sensing Micro/Nano satellites constellation launched successfully. Space International, (6): 14-15 (詹桓). 2017. 珠海-1 遥感微纳卫星星座首批星——欧比特视频卫星-1A、1B 成功发射. 国际太空, (6): 14-15
- Zhan W F, Chen Y H, Zhou J, Li J and Liu W Y. 2011. Sharpening thermal imageries: a generalized theoretical framework from an assimilation perspective. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(2): 773-789 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2060342]
- Zhang B J. 2018. Analysis of the inter-annual variation of nighttime lights in the most affected area of Wenchuan earthquake from 2003 to 2013. Journal of Catastrophology, 33(1): 12-18, 22 (张宝军). 2018. 2003-2013 年汶川地震极重灾区夜间灯光年际变化分析. 灾害学, 33(1): 12-18, 22 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.003]
- Zhang G L, Zhu R F, Du Y B, Qu C M and Li B B. 2020. Application of Jilin No. 1 high-resolution luminous remote sensing image in city monitoring. Satellite Application, (3): 27-33 (张国亮, 朱瑞飞, 杜一博, 曲春梅, 李贝贝). 2020. 吉林一号高分辨率夜光遥感影像在城市监测中的应用. 卫星应用, (3): 27-33
- Zhang H, Shen H F and Zhang L P. 2016. Fusion of multispectral and SAR images using sparse representation//Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing, China: IEEE: 7200-7203 [DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730878]
- Zhang J Y, Ma Y, Zhang Z and Liang J. 2015. Research on inversion method of deep stereoscopic perspective image of shallow sea water of islands and reefs based on decision fusion//Proceedings of Academic Papers of Chinese Ocean Society in 2015. Beijing: Chinese Society for Oceanography: 111-119 (张靖宇, 马毅, 张震, 梁建). 2015. 基于决策融合的海岛礁浅海水深立体遥感影像反演方法研究//“一带一路”战略与海洋科技创新——中国海洋学会 2015 年学术论文集. 北京: 中国海洋学会: 111-119
- Zhang K, Wang M and Yang S Y. 2017. Multispectral and hyperspectral image fusion based on group spectral embedding and low-rank factorization. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(3): 1363-1371 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2623626]
- Zhang L F, Peng M Y, Sun X J, Cen Y and Tong Q X. 2019. Progress and bibliometric analysis of remote sensing data fusion methods (1992—2018). Journal of Remote Sensing, 23(4): 603-619 (张立福, 彭明媛, 孙雪剑, 岑奕, 童庆禧). 2019. 遥感数据融合研究进展与文献定量分析(1992—2018). 遥感学报, 23(4): 603-619 [DOI: 10.11834/jrs.20199073]
- Zhang L P and Shen H F. 2016. Progress and future of remote sensing data fusion. Journal of Remote Sensing, 20(5): 1050-1061 (张良培, 沈焕锋). 2016. 遥感数据融合的进展与前瞻. 遥感学报, 20(5): 1050-1061 [DOI: 10.11834/jrs.20166243].

- Zhang M and Zeng Y N. 2018. Net primary production estimation by using fusion remote sensing data with high spatial and temporal resolution. *Journal of Remote Sensing*, 22(1): 143-152 (张猛, 曾永年. 2018. 融合高时空分辨率数据估算植被净初级生产力. *遥感学报*, 22(1): 143-152) [DOI: 10.11834/jrs.20186499]
- Zhang Y and Hong G. 2005. An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images. *Information Fusion*, 6(3): 225-234 [DOI: 10.1016/j.inffus.2004.06.009]
- Zhang Y J, Zheng M T, Xiong J X, Lu Y H and Xiong X D. 2014. On-Orbit geometric calibration of ZY-3 three-line array imagery with multistrip data sets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(1): 224-234 [DOI: 10.1109/TGRS. 2013. 2237781]
- Zhong Y F, Cao Q, Zhao J, Ma A L, Zhao B and Zhang L P. 2017. Optimal decision fusion for urban land-use/land-cover classification based on adaptive differential evolution using hyperspectral and LiDAR data. *Remote Sensing*, 9(8): 868 [DOI: 10.3390/rs9080868]
- Zhu X L, Helmer E H, Gao F, Liu D S, Chen J and Lefsky M A. 2016. A flexible spatiotemporal method for fusing satellite images with different resolutions. *Remote Sensing of Environment*, 172: 165-177 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.016]
- Zhu X X and Bamler R. 2013. A sparse image fusion algorithm with application to pan-sharpening. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5): 2827-2836 [DOI: 10.1109/TGRS. 2012.2213604]

Development status and future prospects of multi-source remote sensing image fusion

LI Shutao, LI Congyu, KANG Xudong

School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082

Abstract: The development of multispectral, hyperspectral, infrared, radar, and other sensing technologies in recent years has facilitated the use of remote sensing methods in precision agriculture, resource investigation, environmental monitoring, military defense, and other fields. Multi-source remote sensing images in the same scene can capture the same ground objects, while the dimensions of the observations are independent of each other. Therefore, the imaging scale, spatial resolution, time resolution, and target characteristics may be quite different in different observations. The information provided by massive multi-source remote sensing data is redundant, complementary, and cooperative. Multi-source remote sensing image fusion can utilize the complementary information obtained from different sources to achieve accurate and comprehensive Earth observations. Thus, it is one of the key technologies in remote sensing.

From the perspective of data sources, this review summarizes the research status and future development trends of multi-source remote sensing image fusion. In the introduction, the importance of multi-source image fusion and the motivation of this review are illustrated briefly. The second section outlines the main sources and image characteristics of nine typical remote sensing data: panchromatic images, multispectral images, hyperspectral images, infrared images, nighttime light images, stereo images, video images, Synthetic Aperture Radar (SAR) images, and light detection and ranging (LiDAR) images. The typical applications of these multi-source data are also briefly concluded while introducing the characteristics of these multi-source remote sensing images separately. Moreover, the development trend of multi-source remote sensing image fusion is evaluated according to the number of publications. In the third section, latest studies on multi-source remote sensing image fusion are introduced in detail in the order of optical image fusion, optical and SAR image fusion, optical and LiDAR image fusion, and other types of remote sensing image fusion. The third section also puts forward some challenging problems in remote sensing image fusion. For example, the registration problem of multi-source images, the application problem of fusion in specific domain, and the representation of features during cross-modal fusion are all important problems that need to be solved urgently. In the conclusion section, this review summarizes the research status of the multi-source remote sensing image fusion field. This also section prospects the future development trend of multi-source remote sensing image fusion.

First, the study of related fusion technologies for new types of remote sensing images will be a major future research. Second, the integration of data acquisition and image fusion techniques can reduce the difficulty and improve the performance of image fusion with the help of novel hardware designs. Therefore, multi-modal fusion-based computational imaging systems should be designed. Third, fusing multi-source images with other types of data, such as geographical, ground station, and web data, is an interesting research topic in addition to the fusion of remote sensing images. Finally, evaluating the performance of image fusion is an important problem. Image fusion aims to help better understand the land covers from different dimensions of Earth observations. Whether the fusion can help the understanding of the Earth is unclear. Therefore, the improvement in application performance, such as detection or classification accuracy, may be an important index compared with the enhancement in the quality of the fused image.

Key words: remote sensing image, image fusion, multi-modal, ground observation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61890962, 61871179, 61801178); Fund of Key Laboratory of Visual Perception and Artificial Intelligence of Hunan Province (No. 2018TP1013)