

红树林湿地空地一体化监测体系构建初探

李梓民, 桑海涛*, 曾纪浩

岭南师范学院, 广东 湛江

收稿日期: 2023年1月15日; 录用日期: 2023年2月15日; 发布日期: 2023年2月22日

摘要

碳中和战略是全球气候治理和构建人类命运共同体的重大需求。红树林正是地球上高效的碳汇, 作为湿地生态系统的重要组成部分, 构建红树林湿地完善的监测体系, 对于精确掌握红树林动态和提高红树林动态管理、保护和修复水平至关重要。本文针对红树林湿地管理的现状, 系统分析红树林湿地监测中存在的问题, 构建空地一体化红树林湿地监测体系, 阐述监测方法和监测数据的管理方式, 以期能更有效地保护红树林湿地, 确保海岸带生态安全。

关键词

红树林湿地, 监测体系, 空地一体化

A Preliminary Study on the Construction of Air-Ground Integrated Monitoring System for Mangrove Wetland

Zimin Li, Haitao Sang*, Jihao Zeng

Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

Received: Jan. 15th, 2023; accepted: Feb. 15th, 2023; published: Feb. 22nd, 2023

Abstract

The carbon neutrality strategy is a major need for global climate governance and the construction of a community with a shared future for mankind. As an important part of the wetland ecosystem, mangroves are an important part of the wetland ecosystem, and building a sound monitoring system for mangrove wetlands is essential to accurately grasp the dynamics of mangroves and improve the dynamic management, protection and restoration of mangroves. According to the cur-

*通讯作者。

rent situation of mangrove wetland management, this paper systematically analyzes the existing problems in mangrove wetland monitoring, constructs an air-ground integrated monitoring system for mangrove wetland, and explains the monitoring methods and monitoring data management methods, so as to more effectively protect mangrove wetlands and ensure coastal ecological security.

Keywords

Mangrove Wetlands, Monitoring System, Air-Ground Integration

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳中和战略不仅是全球气候治理和构建人类命运共同体的重大需求,也是生态文明建设的内在需求。增加自然生态系统的碳汇功能,是实现碳中和的两条根本路径之一。红树林正是地球上高效的碳汇,它是热带和亚热带滨海湿地生态系统的重要组成部分,具有很高的生态和社会经济价值,它们被认为是沿海气候和环境变化的重要指标。然而,在二十世纪九十年代前后,由于病虫害、物种入侵和海平面上升,以及农业开垦、水产养殖、城市化发展等人为干扰的影响,世界红树林遭到严重破坏,面积迅速减少,引发了一系列生态问题。我国红树林主要分布在南方沿海省份,在上世纪末也经历了急剧减少。此后各国政府推出了一系列恢复和种植计划,以保护红树林生态系统。红树林监测是红树林湿地恢复保护的基础性工作,我国自然保护区内的红树林虽已构建基础的监测体系,但在选取技术以及监测数据广度、精度仍然存在体系不完善的问题。随着国家对红树林生态保护的日益重视,结合目前政策、生态、技术等各类的因素,本文提出空地一体化红树林监测体系与监测网络的构建。

2. 国内外研究现状

在过去的几十年里,学者们利用各种遥感数据和技术对红树林进行监测,包括多光谱图像、高空间分辨率图像、合成孔径雷达图像和高光谱遥感图像[1]。然而,由于红树林物种多样性高、时空异质性强、群落结构复杂,红树林物种的精细分类和绘图仍然是一项具有挑战性的工作。光谱特征有限的多光谱图像不足以获取复杂森林的精细尺度红树林信息,高光谱遥感图像提供了丰富的光谱信息,通常受到低空间分辨率或数据采集的潜在高成本的限制[2]。最近,新兴的无人机和轻型高光谱传感器使得同时满足高光谱和空间分辨率遥感数据的需求成为可能。基于无人机的高光谱数据已被精确应用在农业和植被监测,并且能有效地监测光谱复杂环境中的湿地植被组成[3]。然而,到目前为止,很少有人探索基于无人机高光谱在红树林物种分类中的应用。由于物种的高度多样性和冠层结构的影响,即使具有高光谱和空间分辨率的遥感数据,红树林物种的准确分类和制图仍然很困难。新一代主动遥感技术光探测与测距已被证明是捕获复杂森林三维结构信息的有效手段,并在最近的红树林研究中成为焦点。有学者发现红树林冠层高度结合空间光谱特征预测树种分类准确性更高[4]。还有学者证明了植被高度、累积强度和点密度等结构特征可以提高温带混交林树种制图的准确性[5]。这些研究表明,高光谱和激光雷达数据提供的互补光谱结构信息可以有效提高树种分类精度。针对现有红树林监测范围小、监测手段单一等不足,本文开展空地一体化红树林智能监测技术研究,不同于前人突破基于机载高光谱的广域监测、基于多源感知的生长环境监测等关键技术,构建空地一体化红树林智能监测平台,实现红树林空中、地面及水下的立体

监测，为红树林保护提供重要的技术与数据支撑。

3. 监测体系构建

广东省是我国拥有红树林面积最大的省份，其中广东湛江国家级红树林自然保护区是我国现存红树林面积最大的一个自然保护区，作为中国红树林湿地生态系统的重要组成部分，湛江红树林滨海湿地生态系统的监测具有重要的典型性和代表性，如图 1 所示。红树林的监测指标一般划分为：红树林面积和景观格局监测；红树林生物多样性监测；红树林生态环境监测；红树林遥感监测；红树林保护恢复成效监测；红树林生物地球化学监测；红树林生态效益监测；红树林灾害灾情监测；红树林生理生态监测，九大监测要素，如图 2 所示。

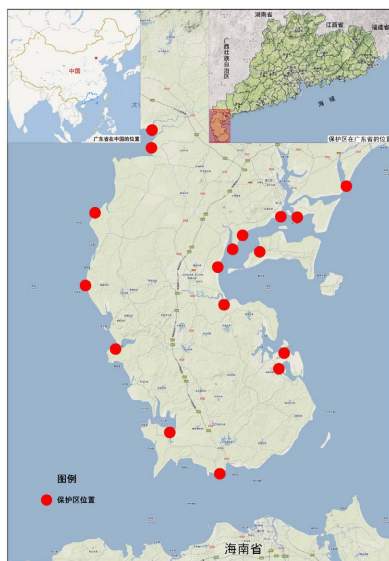


Figure 1. Location map of Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve, Guangdong

图 1. 广东湛江红树林国家级自然保护区位置示意图



Figure 2. Schematic map of mangrove resource distribution in Zhanjiang City

图 2. 湛江市红树林资源分布示意图

针对红树林监测的九大监测要素，提出一种空地一体化红树林监测体系，如图 3 所示。空地一体化监测网络存在节点异质异构、通信链路交错、拓扑动态变化的特点；存在随遇接入、按需分配的接入需求；存在扩展性、可伸缩性以及鲁棒性的需求。在构建监测网络的过程中，将技术需求分为体系结构、组织模型、功能模型三大方面，并提出分层多域，随遇接入、自愈重构；分域管理角色和任务划分、策略管理功能划分和内容定义三大对应的解决方案，如图 4 所示。

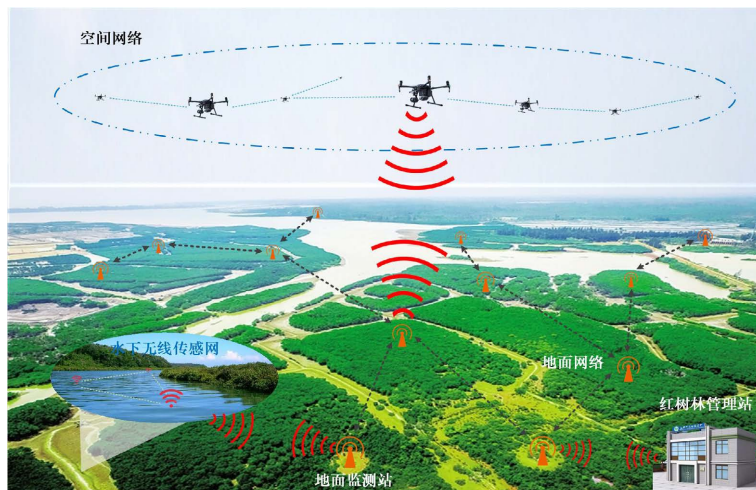


Figure 3. Space-ground integrated mangrove monitoring map
图 3. 空地一体化红树林监测图

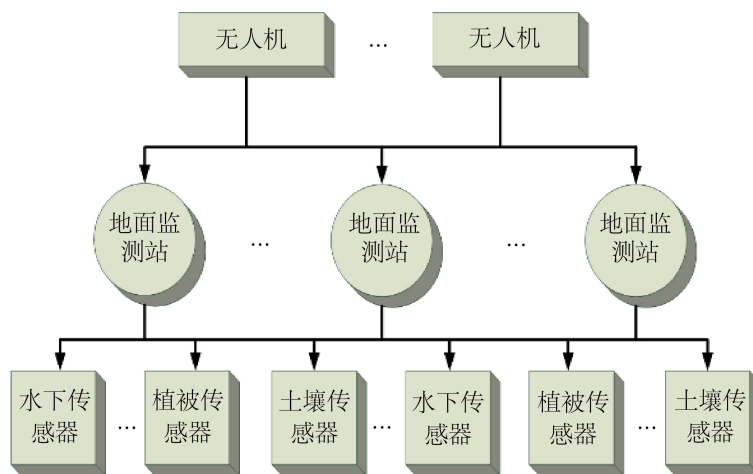


Figure 4. Framework diagram of mangrove monitoring system
图 4. 红树林监测体系框架图

空地一体化分层多域监测体系由空间尺度和时间尺度架构而成，空间尺度由基层的在样地进行实验室光谱研究、底层的林地架构传感器网络收集样本数据、中层的航空遥感将林地分为各个区块收集数据、上层的卫星遥感收集通常大范围尺度的红树林数据；时间尺度则根据红树林各个时期的生长状态、红树林湿地在不同季节发生的不同生态状况指定出不同的监测指标以及监测标准，如图 5 所示。

基于分域的体系结构组织模型如图 6 所示，将红树林划分为各个区间域，再在各个域间布置相关的监控节点进行数据采集，并对现存问题进行分析，确定主要问题；确立项目目标、选择干预途径与计划；

执行干预计划，采取适当的干预方法，有效地利用当地的资源，合理实施有效的干预；可靠性评估，对干预活动与措施进行监测与评估，了解干预效果，及时调整干预策略。该体系可起到分域监测、分域制宜，降低数据处理分析的难度。

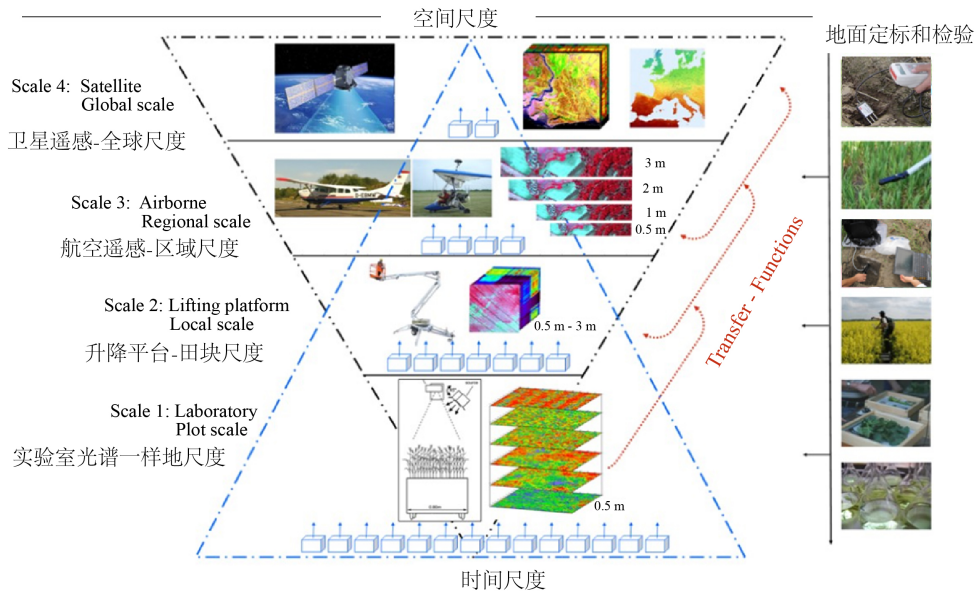


Figure 5. Framework diagram of mangrove monitoring system
图 5. 红树林监测体系框架图

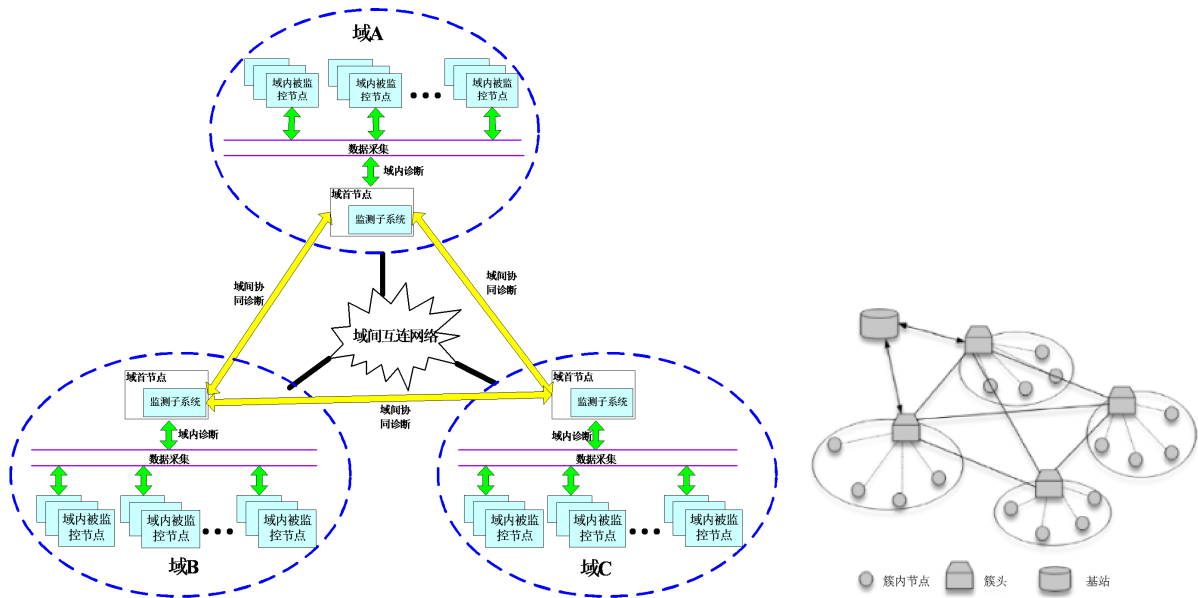


Figure 6. Domain-based architecture organization model
图 6. 基于分域的体系结构组织模型

基于策略的体系结构功能模型如图 7 所示，在整体系统转载的策略组件中，输入事件由：以安全管理组件输入系统软故障；网络服务监控组件装载 QoS 业务，管控数据流优先级；网络元素监控组件发布

传输网络通知，三类组件共同构成。在输出事件中，由监测终端对故障事件、配置管理、安全管理、QoS 四类进行数据以及指令的输出。

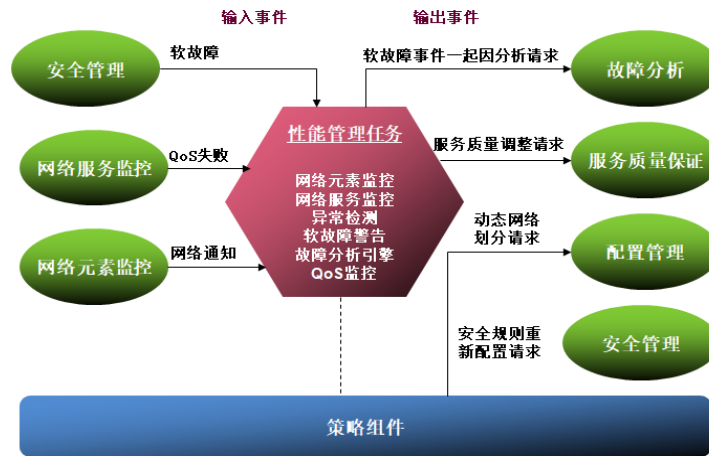


Figure 7. Policy-based architecture functional model
图 7. 基于策略的体系结构功能模型

4. 监测方法

本文红树林湿地监测方法和手段主要包括 3 个步骤：1) 高光谱信息复原，将无人机提取到的影像采用基于深度学习的影像去噪方法进行信息复原，提高影像数据的视觉质量以及利用效率；2) 多源空谱遥感图像融合，将已完成高光谱信息复原的红树林光谱影像，进行多源空谱遥感图像融合，获取高空间分辨率的高光谱图像，减少影像的光谱失真；3) 特征提取，基于本征分解高光谱图像进行光谱特征的提取。

红树林湿地的光谱数据以及整体生态数据，是研究红树林生长状态和湿地生物多样性等生态功能的重要指标，本研究采取下列空地一体化体系的监测方法，对数据进行梳理比整合出影响效果的关键因素减少数据误差，提升数据精确度(表 1)。

Table 1. Mangrove wetland monitoring methods
表 1. 红树林湿地监测方法

监测方法	处理手段	影响效果的因素
无人机光谱影像捕获及筛选	通过挂载高空无人机光谱分析仪，捕获提取红树林光谱图像，并且进行质量分析	自然因素、设备因素
高光谱信息复原	对红树林图像进行噪声分析，再采用间光谱梯度网络针对不同类型的噪声进行同步去噪处理	图像处理，迭代次数
多源空谱遥感图像融合	将低分辨率高光谱与高分辨率多光谱的红树林图像进行融合，提取更精确，最终生成具有新的空间、波谱、时间特征的合成图像	融合过程光谱失真
光谱图像特征捕获	基于本征分解，将高光谱影像分解为亮度特征与纯净的光谱反射特征，消除多种不利因素对红树林影像光谱反射值的影响	模型运算精度
地面传感器网络采集生态数据	基于分域的体系结构，进行广而精的地面生态数据持续接收	传感器采集数据丢包

4.1. 基于深度学习的去噪方法实现高光谱信息复原

由于无人机通过直接摄影记录的图像会存在图像噪声的主观问题，以及噪声会造成影像质量的大幅

下降, 导致数据难以得到后续应用或降低后续定量产品反演的精度的客观影响。因此, 设计基于深度学习的高光谱遥感影像的去噪方法, 提高影像数据的视觉质量和利用效率, 是一项基础且不可或缺的重要任务。近十年以来, 深度学习的快速发展对解决各类图像问题提供了一种新的思路。对于普通的自然图像而言, 基于深度学习的方法在降噪方面的效果要比基于数学模型的去噪方法更好, 同时也为高光谱遥感影像的去噪问题带来了启发。为了去除混合噪声, 提出了一种空间光谱梯度网络(SSGN), 采用空间光谱梯度学习策略, 并且基于完全级联的多尺度卷积网络, SSGN 可以使用同一模型同时处理不同的高光谱影像或光谱波段中不同类型的噪声。

在体系架构方案中, 首先通过采用无人机对红树林高光谱影像进行直接的摄影捕获, 接着对捕获的图像信息按照初步图像质量进行筛查以及噪声分析, 具体噪声模型包括: 椒盐噪声、随机噪声、高斯噪声; 接着采用间光谱梯度网络(SSGN)方案, 进行空间光谱梯度学习, 最后针对不同类型的噪声进行同步去噪处理, 方案包含各类的均值滤波、中值滤波以及高斯滤波; 最后基于不同方法对高光谱影像高斯噪声的去噪效果如图 8 所示。

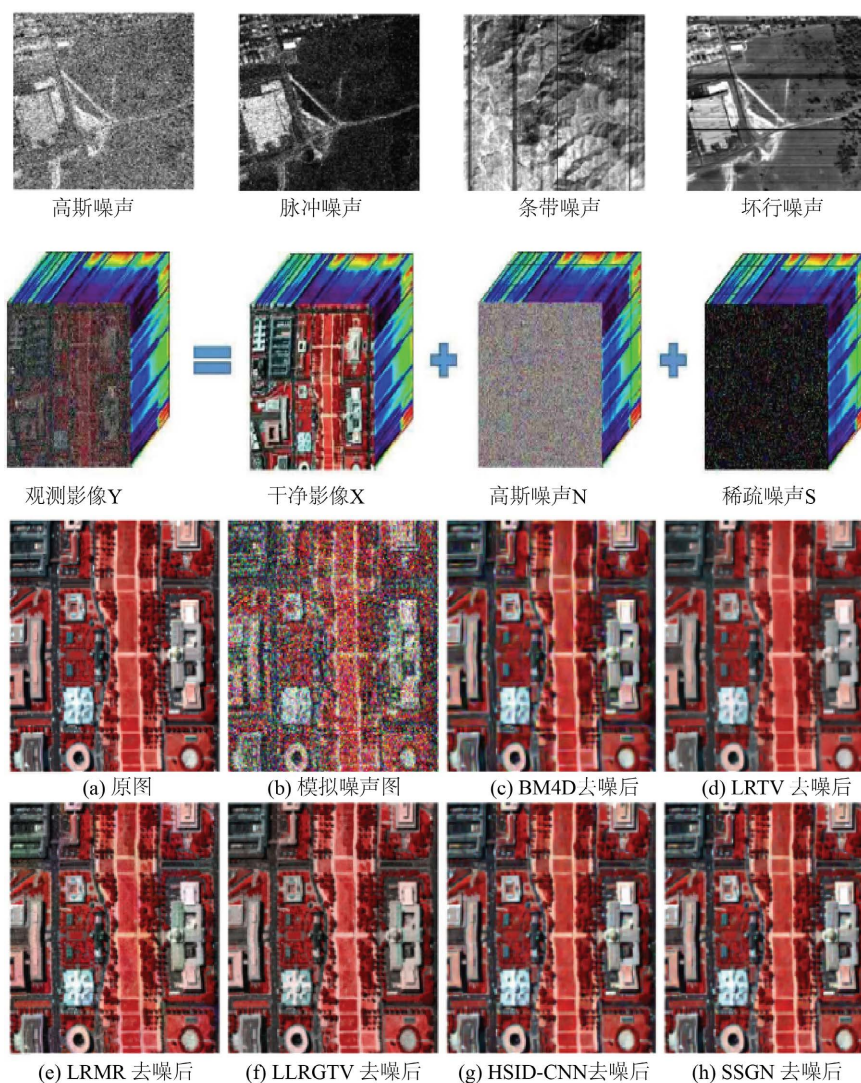


Figure 8. Denoising comparison plot simulating Gaussian noise 100
图 8. 模拟高斯噪声 100 的去噪对比图

4.2. 多源空谱遥感图像融合

在体系架构方案中,采用多源空谱遥感图像融合的技术方案,针对无人机在同一场景中,拍摄到的不同分辨率和不同空谱性质的图像在经过上述图像去噪后,接着进行低分辨率高光谱(HS)与高分辨率多光谱(MS)图像的融合,提取更精确,更丰富的信息,最终生成具有新的空间、波谱、时间特征的合成图像。

这种方法要比低分辨率多光谱图像与高分辨率全色图像融合和低分辨率高光谱与高分辨率全色图像融合定量化更精细,而影响效果的关键因素是在融合的过程中需要尽可能融合高分辨率 MS 图像结构细节,提升 HS 空间分辨率的同时尽可能减小光谱失真。HS + MS 的主源 HIS (高光谱图像)和辅助源 MSI (多光谱图像)都是多波段图像,HSI 空间分辨率低但波段数高,MSI 空间分辨率高但波段较少。MSI 的每个波段是较宽带宽光谱信息成像,一些波段可能覆盖 HSI 特定数量的细分波段,一些可能和 HSI 波段没有任何重叠,三类典型的空谱融合如图 9 所示。

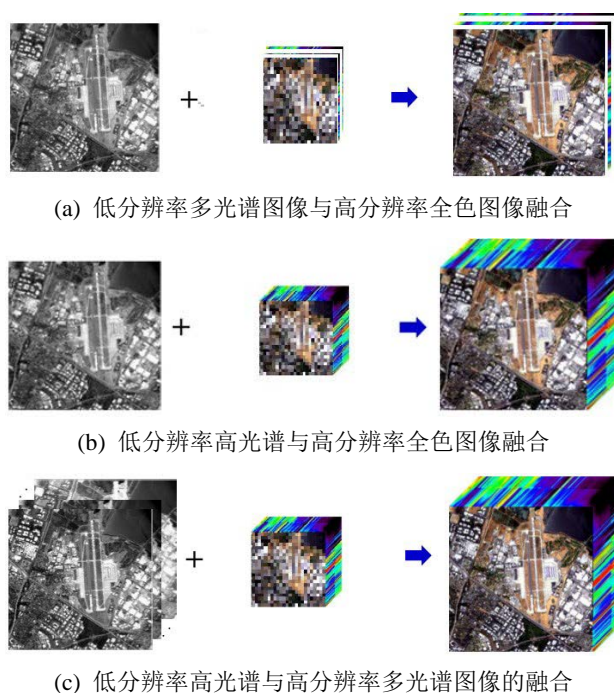


Figure 9. Three typical types of spatial spectral fusion problems
图 9. 三类典型的空谱融合问题

4.3. 基于本征分解的高光谱图像光谱特征提取

在传统图像本征分解模型中,亮度图被认为是一幅固定的灰度图像。图像在不同波长上的亮度成分被认为是固定的。与可见光图像的本征分解不同,高光谱遥感图像往往是通过被动的光学成像方式采集得到,获取的信息主要来自地面目标对太阳光的反射信息。高光谱图像的亮度图会受到太阳光谱的影响,在不同波长上存在差异。高光谱图像的本征分解模型可以表示为公式(1):

$$I^{\lambda}(x, y) = R^{\lambda}(x, y) \times S^{\lambda}(x, y) \quad (1)$$

其中 λ 代表了高光谱图像的波长。 R^{λ} 和 S^{λ} 分别表示不同谱段的反射率图和亮度图。与传统图像本征分解相比,高光谱图像本征分解模型的未知数更多。对于一个包含 n 个通道的高光谱图像,公式(1)包含了 n

个已知量和 $2n$ 个未知量。因此高光谱图像本征分解的问题存在更多的不确定性,需要更多的约束条件才能够求解。

地物光谱反射率反映了地物的材质,然而受到传感器成像机理、拍摄环境以及气候条件等因素的影响,遥感高光谱图像中的光谱反射值往往并不纯净,甚至可能包含严重的失真与畸变。传统的光谱特征提取方法,波段选择法和主成分分析法均未考虑到场景光照、噪声等因素对地物光谱的影响。通过高光谱本征分解,可以有效地将光照、噪声等因素导致的地物光谱变化作为亮度图从原始图像中分离出来,剩下的光谱反射率图实际上就是地物纯净的光谱反射率特征,有望实现地物纯净光谱的准确表征。

针对这一问题,本体系架构提出采用基于本征图像分解的高光谱图像特征提取算法。该算法将高光谱影像分解为亮度特征与纯净的光谱反射特征,并将纯净的光谱反射特征用于地物分类。结果表明,高光谱图像的本征分解能够有效消除多种不利因素(如场景光照、阴影以及成像噪声等)对影像光谱反射值的影响,提供了更高的地物分类精度。

图 10 是基于本征分解的高光谱图像光谱特征提取示例。原始高光谱图像是采用可见光与红外机载式光谱成像仪器(AVIRIS)获取的粤西农场农作物场景的高光谱图像。图像中包含了 12 种不同类型的农作物。如图 10 所示,通过高光谱图像本征分解,可以有效去除受场景光照和地物三维形状影响的亮度成分,提取地物纯净的光谱反射率特征。算法对原始高光谱图像和光谱反射率特征进行二维可视化,并将属于不同类别地物标签的特征标注为不同颜色。可以看出,相比于原始高光谱图像,高光谱图像的本征光谱反射率成分具备更高的可分性,能够更好地区分不同地物。

而在本体系架构中,采用上述本征分解的高光谱图像光谱特征提取技术,对已完成捕获,筛选,去噪复原,图像融合的图像信息进行高光谱特征提取,消除多种不利因素对红树林影像光谱反射值的影响。

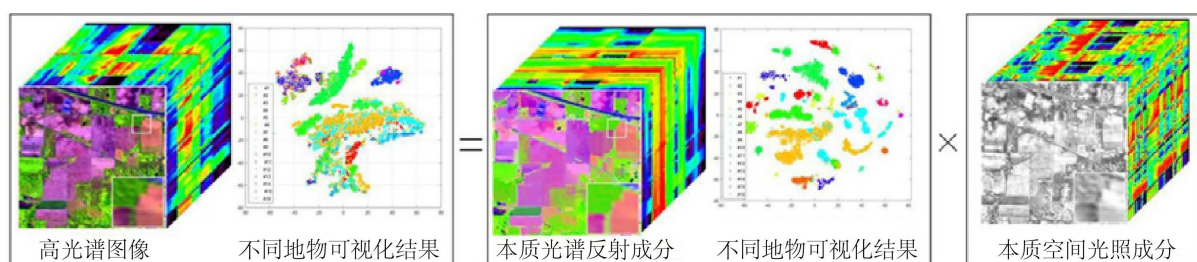


Figure 10. Pure spectral feature extraction of hyperspectral images based on image intrinsic decomposition

图 10. 基于图像本征分解的高光谱图像纯净光谱特征提取

5. 结语

本文提出了红树林湿地空地一体化监测体系的构建方法。结果发现,与单独使用卫星或无人机遥感相比,从空地系统导出的数据可以进一步提高分类精度,图像信息对红树林物种的分类有效。但仍存在一些不足,需要在之后的工作中改进。高分辨率影像虽然具有较高的空间分辨率,但仍无法避免混合像元的影响。在可预见的将来,空地连续动态监测将成为常态,红树林湿地空地一体化监测体系可以为红树林资源的保护和修复提供重要的决策依据。

基金项目

岭南师范学院红树林研究院开放课题资助(YBXM04); 岭南师范学院校级重点项目资助(LZ2202)。

参考文献

- [1] Aasen, H., Burkart, A., Bolten, A. and Bareth, G. (2015) Generating 3D Hyperspectral Information with Lightweight

- UAV Snapshot Cameras for Vegetation Monitoring: From Camera Calibration to Quality Assurance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **108**, 245-259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002>
- [2] Dan, X.Q., Liao, B.W., Wu, Z.B., Wu, H.J., Bao, D.M., Dan, W.Y. and Liu, S.H. (2016) Resources, Conservation Status and Main Threats of Mangrove Wetlands in China. *Ecology and Environmental Sciences*, **25**, 1237-1243.
- [3] Jia, M., Wang, Z., Wang, C., Mao, D. and Zhang, Y. (2019) A New Vegetation Index to Detect Periodically Submerged Mangrove Forest Using Single-Tide Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, **11**, Article No. 2043. <https://doi.org/10.3390/rs11172043>
- [4] Li, J., Hu, B. and Noland, T.L. (2013) Classification of Tree Species Based on Structural Features Derived from High Density LiDAR Data. *Agricultural and Forest Meteorology*, **171-172**, 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.012>
- [5] 贾凯, 陈水森, 蒋卫国. 粤港澳大湾区红树林长时间序列遥感监测[J]. 遥感学报, 2022, 26(6): 1096-1111.