

多体制遥感卫星成像数据高精度处理新方法

付琨^{1,2,3,4}, 仇晓兰^{1,3}, 韩冰^{1,3}, 孙显^{2,3}

1. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院网络信息体系技术重点实验室, 北京 100190;

3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 光学和SAR等对地观测卫星需要经过成像、辐射/几何校正等处理和不断的时序积累, 才能为计算机解译提供精度高、稳定性好、时间持续的数据和特征。传统中低分辨率对地观测卫星通常基于地理网格内地物目标电磁波散射特性简化为理想点目标的假设, 进行逐像素处理。然而, 高分宽幅、大斜视、多通道等新体制卫星的工作模式更加复杂, 其数据处理对星地全链路各环节产生的误差非常敏感, 对成像参数标定或估计的精度提出了更高要求, 此时基于理想点目标假设来进行参数估计、成像及校正处理的方式已难以满足处理精度要求。并且, 近年来多体制卫星组网式协同和融合应用的新发展, 也使得当前的理想点目标假设难以表征和建模多源多时相数据特征。为此, 本文提出了多体制遥感卫星成像数据高精度处理的新方法, 首先创新提出了“超像素”的概念和表征理论框架, 建立了基于超像素的精确成像模型, 然后通过挖掘超像素稳定特征并借鉴生成对抗学习机制, 实现了星地全链路高耦合成像参数的高精度估计和持续精化, 有效提升了多体制遥感卫星成像数据产品的精度, 为计算机解译提供了好的数据产品输入。

关键词: 遥感卫星, 超像素, 成像处理, 辐射校正, 几何校正, 深度学习

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 付琨, 仇晓兰, 韩冰, 孙显. 2023. 多体制遥感卫星成像数据高精度处理新方法. 遥感学报, 27(7): 1511–1522

Fu K, Qiu X L, Han B and Sun X. 2023. A new method for high precision processing of multi-system Earth observation satellite data. National Remote Sensing Bulletin, 27(7): 1511–1522 [DOI: 10.11834/jrs.20233181]

1 引言

中国遥感对地观测卫星系统技术经过40多年的发展取得了巨大的进步, 目前已发射遥感卫星200余颗, 形成陆地、海洋、气象3大卫星遥感系统, 以及资源、高分、风云、海洋、测绘等系列 (Li等, 2022; <https://www.163.com/dy/article/ATRFZUKI05119RIN.html> [2023-05-31])。遥感卫星已由单一传统观测载荷、观测模式向新体制载荷、多星组网等方向发展。在当前新形势下, 遥感卫星成像数据获取主要呈现“体制新、尺度多、维度多、时相多”的特点, 如表1所示为近年来的代表性遥感卫星。

“体制新”是指当前遥感卫星技术体制不断创新和突破。如光学卫星为了空间精细化观测和多

角度立体观测等能力, 不仅在常规单线阵/面阵推扫模式基础上, 实现了三线阵和双线阵 (Li和Wang, 2020; Li等, 2021), 还发展了多角度、超宽幅、多星在轨协同以及基于通导遥一体化的新一代智能光学遥感卫星等复杂体制。合成孔径雷达 (SAR) 卫星不仅实现了亚米级分辨率和大幅宽, 还实现了多角度、多通道、多极化、分布式组网干涉等复杂新体制 (Deng等, 2020, 2012)。遥感卫星数据和信息获取能力极大加强。

“尺度多”是指当前遥感卫星已建成详查、普查等完整的体系, 可以根据不同应用需求实现不同空间分辨率数据的获取, 构成不同空间尺度的基础数据, 实现大尺度遥感和精细成像的多层次对地观测 (Li等, 2022; Yan等, 2023; Sun等, 2022)。

收稿日期: 2023-05-31; 预印本: 2023-06-29

基金项目: 科技创新2030——“新一代人工智能”重大项目 (编号: 2022ZD0118402)

第一作者简介: 付琨, 研究方向为空天遥感数据处理与应用。E-mail: fukun@aircas.ac.cn

表 1 代表性遥感卫星数据获取能力特点
Table 1 Characteristics of data acquisition capabilities of representative remote sensing satellites

代表性卫星	空间分辨率范围/m	波长范围	观测角度范围	体制模式
陆探一号	3—300	0.245—0.230 m	10°—50°	条带/扫描/双基地干涉/全极化
环境减灾二号	3—20	0.0954—0.0919 m	20°—50°	条带/扫描/多极化
高分三号	1—500	0.0565—0.0545 m	10°—60°	条带/扫描/聚束/双通道/全极化
泰景四号	0.5—2	0.0322—0.0303 m	20°—40°	条带/聚束
齐鲁一号	0.5—2	0.0183—0.0176 m	18.5°—44.5°	条带/聚束
高分二号	1	0.45—0.9 μm	1.33°	线阵推扫
	4	0.45—0.52 μm		
		0.52—0.59 μm		
		0.63—0.69 μm		
		0.77—0.89 μm		
高分四号	50	0.45—0.9 μm	−35°—+35°	面阵凝视
		0.45—0.52 μm		
		0.52—0.60 μm		
		0.63—0.69 μm		
	400	0.76—0.9 μm		
高分五号	30	0.39—1.03 μm	−50°—+50°	线阵推扫/多条带/临边观测等
	30	1.0—2.5 μm		
		0.45—0.52 μm		
		0.52—0.60 μm		
	20	0.62—0.68 μm		
		0.76—0.86 μm		
		1.55—1.75 μm		
		2.08—2.35 μm		
	40	3.50—3.90 μm		
		4.85—5.05 μm		
		8.01—8.39 μm		
		8.42—8.83 μm		
		10.3—11.3 μm		
		11.4—12.5 μm		
		0.45—0.9 μm		
高分七号	0.65—0.8	0.45—0.52 μm	−5°—26°	双线阵立体成像
	0.65	0.52—0.59 μm		
		0.63—0.69 μm		
		0.77—0.89 μm		
		0.77—0.89 μm		

“维度多”是指当前遥感卫星类型丰富，覆盖了微波、远红外、近红外、高光谱、可见光等很宽的电磁波谱段，观测的角度范围极大拓展，并且实现了全极化数据采集，能够实现对地物目标的多维度特征获取 (Li 等, 2013; Wu, 2013)。

“时相多”是指当前遥感卫星的全球重访频率不断提升，已经能够实现 16 m 分辨率卫星数据 1 d 全球覆盖，光学 2 m 分辨率数据全球 1 d 重访，1 m 分辨率合成孔径雷达卫星对全球任意地区重访时间为 5 h (https://mp.weixin.qq.com/s/016259_GtMPVtx

8-VumFIW [2023-05-31])。不同天时、不同天候的数据大量积累，不断提升具备即时性和持续性的多时序对地观测能力 (Sun 等, 2023)。

在这样的数据条件下，遥感卫星成像数据处理也从单次观测、单次处理、单次使用的传统模式向多次连续观测、多次协同处理、持续信息挖掘的新处理体系发展；遥感卫星成像数据的应用范围也由单一物理量反演扩展至多参数融合应用，全场景立体解算，以及深层次场景信息挖掘等，同时推动着遥感学基础理论和处理方法的不断进步。

从遥感卫星数据成像处理来讲,传统处理方法大都以理想点目标模型为理论基础。进行逐像素处理,将被探测目标在分辨单元内的对电磁波的散射(雷达)、反射(可见光)或发射(红外)等效于一个点,这种方法的优势在于计算简单、效率高。例如光学,图像辐射校正通常很少考虑地物像素网格之间的耦合,在进行参数标定时主要是基于理想点或者标准朗伯体;SAR成像也是依据理想点目标假设,较少考虑像素之间的关联,并且几何和辐射定标主要是基于符合理想点目标模型的定标器来进行的(Fu等, 2021)。

然而,理想点目标仅为理论目标,其本身尚不足以描述地物本身的复杂性以及地物与观测环境之间的耦合性。因此,理想点目标模型无法表达复杂观测对象与观测条件之间的耦合关系,同时也不能描述相同地物的不同观测数据在空、时、谱等多个维度上的内在依存关系。对前者而言,不论是光学还是微波遥感,由于电磁波传播难以避免的干涉、多径等效应,遥感成像存在地物网格和图像像素之间的“多对多”映射耦合的问题,像元内电磁特征耦合大大增加了遥感图像解译难度。如图1所示齐鲁一号SAR载荷对某飞机的成像结果和该飞机对应的光学影像,可以看到由于SAR图像中多次散射和发动机结构复杂散射现象的存在,使得飞机目标和图像像素存在典型的“多对多”现象。如图2所示为GF-3卫星双通道模式海面场景成像结果,船只目标运动使得多通道虚假目标和方位模糊严重,出现了地物目标与图像像素的“一对多”现象。再有,由于观测环境时空异质性以及载荷可探测性,某一观测条件(时间、空间、谱段等)下,无论SAR还是光学载荷,其获得的地物属性不是精确的绝对值,而是落在属性包络内的一次采样,存在难以避免的误差。随着遥感卫星数量以及不同载荷协同观测能力的发展,海量遥感数据内部的属性关联亟待挖掘,以提升对地物目标精确属性的获取能力。

为了进一步增强遥感成像处理能力,表征海量遥感数据内在逻辑,实现遥感对地探测应用效能提升,就必须突破传统成像处理方法的局限所在,提出一套多体制遥感卫星成像数据高精度处理的新方法。在此方面,李小文院士提出,普适遥感机理模型在特定地点的个性化处理不足以满足遥感对地探测解译需求,建议提出一个方法框

架解决遥感“尺度效应”问题(Li等, 2013)。吴一戎院士阐述了SAR在极化、频率、角度和时空空间内开展多维度下多样本联合观测的必要性及发展趋势(Wu, 2013)。

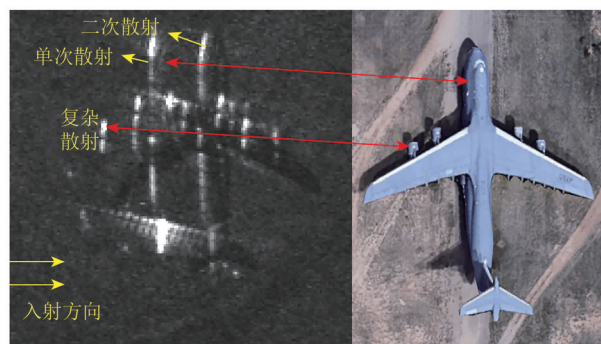


图1 齐鲁一号SAR飞机图像和光学图像

Fig. 1 QiLu-1 SAR image and corresponding optical image of an airplane

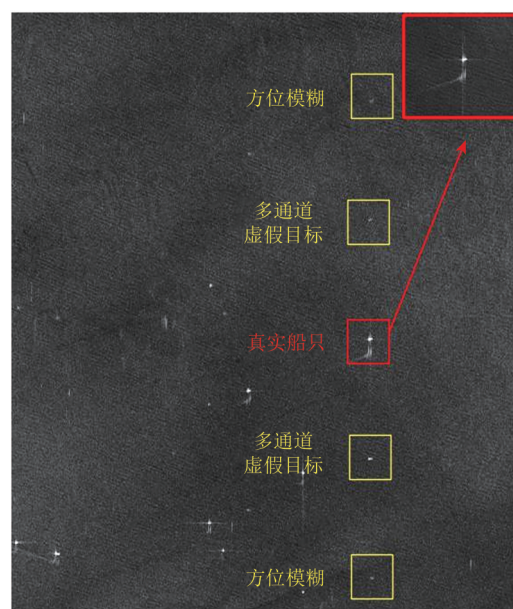


图2 GF-3卫星双通道模式海面场景图像

Fig. 2 GF-3 dual-channel image of a marine scenario

本文提出了遥感卫星超像素表征模型和处理框架,以实现光学/SAR星地全链路高耦合成像校正参数的高精度自主估计和持续精化,有效提升多体制卫星数据产品的精度。

2 理想点目标模型及其存在的问题

2.1 理想点目标逐像素处理模型

理想点目标假设下,遥感卫星的成像模型如下式所示:

$s(i, j) = \gamma(x, y, z) \otimes H(k, \tau, \Theta; x, y, z) + n(i, j)$ (1)

式中， $\gamma(x, y, z)$ 为理想点目标表征模型， (x, y, z) 表示目标在真实三维空间中的位置坐标， $\gamma(x, y, z)$ 表征与空间位置 (x, y, z) 对应的像素分辨单元网格中地物目标反射或散射电磁波能量的能力。对于SAR而言， $\gamma(x, y, z)$ 就是 (x, y, z) 所对应的像素分辨单元网格中地物目标的雷达后向散射截面积（RCS）；对于光学卫星而言，就是地物目标的反射率或发射率； $s(i, j)$ 为遥感卫星接收到的观测区域地物目标散射或反射电磁波能量的信号， (i, j) 表示二维图像的网格坐标，其中 i 表示沿轨方向采样的坐标，通常称为方位向坐标， j 表示交轨方向采样的坐标，通常称为俯仰向或者距离向坐标； $n(i, j)$ 为噪声； $H(k, \tau, \Theta; x, y, z)$ 为对地观测卫星系统传递函数， k 为表征电磁波传播方向的参数， τ 为表征电磁波传播时间的参数，通常称为“快时间”， Θ 为卫星系统星地全链路涉及的各种参数，包括平台、载荷、大气传输等参数， \otimes 为卷积符号。

因此，遥感卫星数据的成像处理过程，从原理上可以简化表达为基于卫星接收信号求解分辨单元网格中地物目标电磁波散射/反射/发射能力的反卷积过程，如下式所示：

$\tilde{\gamma}(x, y, z) = (s(i, j) - n(i, j)) \otimes H^{-1}(k, \tau, \Theta; x, y, z)$ (2)

在上述成像模型中， $\tilde{\gamma}(x, y, z)$ 是利用观测信号和系统传递函数得到的对地物目标 $\gamma(x, y, z)$ 的估计。

式（1）和（2）的成像模型被称之为基于“理想点目标”假设的成像模型。其中， $\gamma(x, y, z)$ 是一个既定空间尺度的量，尺度是分辨单元，每个分辨单元网格内 $\gamma(x, y, z)$ 认为是独立的、互不相关的，其也无法表征地物目标反射/散射特性随波长、角度、时间等的变化规律。式（2）中，由于 $H^{-1}(k, \tau, \Theta; x, y, z)$ 不可能完全消除系统传递函数的影响，故而严格来说， $\tilde{\gamma}(x, y, z)$ 与 $\gamma(x, y, z)$ 并不是点对点的一一对应关系。例如，在SAR成像中， $\tilde{\gamma}(x, y, z)$ 通常被表达为 $\gamma(x, y, z)$ 与一个二维 sinc 函数的卷积，sinc 函数有旁瓣，也即会受到 $\gamma(x, y, z)$ 邻域的影响，但通常来说，其主瓣展宽有限、旁瓣能量较弱，相互影响的邻域范围很小且影响也较小。因

此，通常仍然将式（2）称为“理想点目标”成像模型。在该模型下，对于 $\tilde{\gamma}(x, y, z)$ 的求解没有其他额外约束，也不考虑不同位置 $\tilde{\gamma}(x, y, z)$ 之间的关联性，式（2）的求解可以认为是一种逐像素的遍历性求解。

2.2 存在的问题

在式（2）的成像模型中，卫星系统传递函数的求逆运算往往是个病态问题，而卫星系统星地全链路参数 Θ 存在很多误差因素，尤其对于高分宽幅、大斜视、多通道等新体制卫星而言，其对星地全链路各环节产生的误差更加敏感，从而导致微小的误差就会引起较大的成像误差，使得 $\tilde{\gamma}(x, y, z)$ 对 $\gamma(x, y, z)$ 的估计在位置、强度等方面存在很大的偏差，影响后续应用。因此，为了能够得到高精度的图像数据产品，往往需要通过大量已知 $\gamma(x, y, z)$ 的目标（如定标场布设的人工定标器）来对 Θ 进行标定，如表2所示，这需要付出大量的时间和人力物力成本，且随着卫星的增多，成像模式、波位的丰富，对 Θ 的标定已成为制约卫星快速交付和形成能力的瓶颈。

表 2 不同类型遥感卫星通常需要标定的系统参数
Table 2 The system parameters that usually need to be calibrated for different types of remote sensing satellites

卫星类型	体制模型	需要标定的系统参数
SAR	传统单通道/单极化	姿态角、天线方向图、辐射定标常数、系统延迟等
	多通道	通道幅度相位不平衡
	多极化	极化幅相不平衡 极化串扰
	多基地干涉	基线矢量 同步时间/相位误差
可见光	线阵推扫/线阵摆扫/面阵	相机内/外方位元素、片间辐射补偿参数等
红外	线阵推扫/线阵摆扫/面阵	摆扫机构安装偏置角 黑体相对辐射定标 全光路绝对辐射
高光谱	色散分光/干涉成像	光谱定标参数 光程差

地学第一定律指出“任何事物都相关，只是相近的事物关联更紧密”，遥感应用的本质为挖掘遥感图像的目标和环境特征，以及地物发展规律。上述理想点目标表征模型和逐像素求解方法在一定程度上丢失了部分信息，主要包括：

- （1）空间尺度关联信息缺失。尺度是地学的

本质概念, 遥感数据是地学的重要数据源, 同样应反映出电磁散射/辐射过程多尺度问题。从单一目标小尺度特征到宏观目标大尺度特征, 并不是大尺度内包含的小尺度像素的简单叠加, 空间上地物尺度的变化必然引起电磁散射/辐射的变化。图像分辨率变化只是体现地物场景描述需求和系统能力的变化, 其背后应该是电磁过程的精细描述, 而理想点目标模型难以表征这种电磁物理过程随尺度的变化和关联特性。

(2) 电磁波谱延续性信息缺失。遥感卫星接收的电磁波通常都占据一定的谱段, 并且多源传感器协同能够获得宽谱范围内多个谱段的信息。然而, 理想点目标表征模型缺少对电磁波谱特性的深刻描述, 将一段具有延续性的谱段抽象为一个典型频点进行表征, 导致无法从处理得到的图像中还原地物真实连续波谱特征。

(3) 时相动态信息缺失。尽管目前遥感卫星单次观测主要是瞬时或短时间成像, 但不代表同一地物在该时间内其散射/辐射特征是稳态的, 尤其是在目标本身具有运动属性时。此外, 随着重访频率的提升, 目标的运动特性以及地物目标受气候、环境变化影响导致的动态变化特性得以更好地获取。然而, 传统理想点目标表征模型无法建模上述动态变化信息。

因此, 上述理想点目标表征模型的信息缺失使得成像处理及信息提取遭遇精度瓶颈。

3 超像素表征与处理模型

针对上述理想点目标处理模型遭遇的精度瓶颈问题, 本文基于地学第一定律, 提出了多体制遥感卫星成像数据处理的“超像素”(Hyper-Pixel) 表征模型和成像处理模型。本文“超像素”(Hyper-Pixel) 并非传统图像处理领域的“超像素”(Super-Pixel), 下面进行详细介绍。

3.1 超像素表征模型

为了更加全面地表征地物目标对电磁波的反射/辐射能力, 同时更加有利于高精度成像处理和图像应用, 本文提出了“超像素”(Hyper-Pixel) 表征模型以取代传统的理想点目标模型, 如式 (3) 所示:

$$\gamma(x, y, z) \rightarrow \gamma(P, \lambda, T) \quad (3)$$

式中, P , λ , T 分别表示空间相关、频谱相关、

时间相关的参数集合, 有:

空间相关参数集合 $P = \{x, y, z, s, \theta, \varphi\}$, x, y, z 表示位置, s 表示尺度, θ, φ 表示方位向和俯仰向的角度;

频谱相关参数集合 $\gamma(\lambda) = \{\sigma(\lambda_{i1} \sim \lambda_{i2}), I(\lambda_{j1} \sim \lambda_{j2}), L(\lambda_{k1} \sim \lambda_{k2}), \dots\}$, λ 表示波长, σ, I, L 分别表示雷达散射强度、光谱反射率、红外发射率等物理量, 表征的是某个时刻静态的散射/辐射/发射物理量。

时相相关参数集合 $T = \{\mu(t), \Psi(t), \dots\}$, 包括地物目标自身物理参数随时间的变化 $\mu(t)$, 地物目标参数随天候的变化 $\Psi(t)$, 等等, 此处 t 是对应于地物目标变化的时间量, 通常称为“慢时间”。

上述表征模型从空间、频谱、时相3个维度全面描述了地物目标的散射/辐射/发射特征, 对于成像处理而言, 需要挖掘地物目标呈现稳定性的特征或规律, 而去除噪声、干扰等的影响。因此, 本文提出的“超像素”是指在空/谱/时多维空间中表现出统计稳定性规律、具有关联约束关系的像素特征集合。

需要说明的是, $\gamma(P, \lambda, T)$ 这一超像素概念与图像处理领域的超像素有区别也有联系。图像处理领域的超像素, 是指具有相似纹理、颜色、亮度等特征的相邻像素构成的有一定视觉意义的不规则像素块, 也即是把一些具有相似特性的相邻像素“聚合”起来形成的一个像素集合。本文中的超像素既包含了传统超像素在空间尺度上拓展的含义, 也进一步拓展了像素在时间维度和辐射多维空间中的尺度。并且, 在空间、时间和辐射多维空间中的尺度拓展, 并不局限于像素具有“相似特性”, 只要其存在稳定的关联规律即可。这种稳定的关联规律, 需要通过理论推导、经验模型和大数据挖掘的方式来获得。也即, 本文构建的超像素表征模型, 是基于一定先验知识而构建的。

3.2 基于超像素的处理模型

以此超像素表征模型为基础, 遥感卫星成像模型可以表示如式 (4):

$$\tilde{\gamma}(x, y, z) \Big|_i = (S(n) - N(n)) \otimes H^{-1}(k, \tau, \Theta; \gamma(P, \lambda, T)) \quad (4)$$

式中, $\tilde{\gamma}(x, y, z)|_i$ 是某个时刻某个特定状态 i 下地物目标 $\gamma_i(P_i, \lambda_i, T_i)$ 的估计, 这里的状态 i 可以根据实际情况和需求确定一个状态空间, 得到不同状态的结果; 此处 $\tilde{\gamma}(x, y, z)|_i$ 与式 (2) 中的 $\tilde{\gamma}(x, y, z)$ 在图像表达上是一致的, 也是一种按像素遍历的表达, 从而适合作为人眼和机器解译的输入; $S(n)$ 为遥感卫星接收的数据, n 包括了距离、方位、谱段、极化、时间等维度的坐标, 如在多波段多极化多时相 SAR 中, $n = (i, j, k_\lambda, l_q, m_t)$, 其中 k_λ, l_q, m_t 分别为波段、极化、时间维度的坐标; $N(n)$ 为观测噪声; $H^{-1}(k, \tau, \Theta; \gamma(P, \lambda, T))$ 为遥感卫星的系统传递函数的求逆, k 为波数, τ 为时间, Θ 为系统参数, $\gamma(P, \lambda, T)$ 为超像素稳定特征。

式 (4) 与式 (2) 的区别在于, 系统的观测维度变多了, 传递函数的求逆不是基于逐个像素对应分辨网格位置, 而是基于超像素稳定特征。

在式 (4) 的成像模型下, 我们可以利用多个观测 $S_1(n), S_2(n), \dots, S_i(n), \dots$ 在超像素

$\gamma(P, \lambda, T)$ 的约束下对地物目标的某一时刻某个观测条件下的散射或辐射值进行联合求解。在这样的联合求解模型下, 通过引入超像素稳定特性和关联约束, 卫星对地观测的观测量将大于超像素表征模型参数待求量, 传统成像逆问题求解的病态性得到大大改善, 因此能够从理论上突破传统“理想点目标”成像的精度瓶颈; 甚至还可以利用超像素的稳定关联特性来实现系统参数 Θ 的求解, 也即实现无场化自主定标。因此, 基于超像素模型的成像处理核心问题包括: (1) 如何建模或挖掘得到地物目标电磁特性在空间、时间、波谱多维空间中的稳定关联特性; (2) 如何基于超像素稳定特征求解得到准确的系统参数 Θ ; (3) 如何在得到观测数据后快速得到高精度图像产品, 也即求解得到当前某时刻某特定状态下的 $\tilde{\gamma}(x, y, z)|_i$ 。

基于式 (4) 的超像素成像模型, 多体制遥感卫星高精度成像处理新的框架如图 3 所示。该处理框架包括离线和在线两个部分, 如图 3 所示。

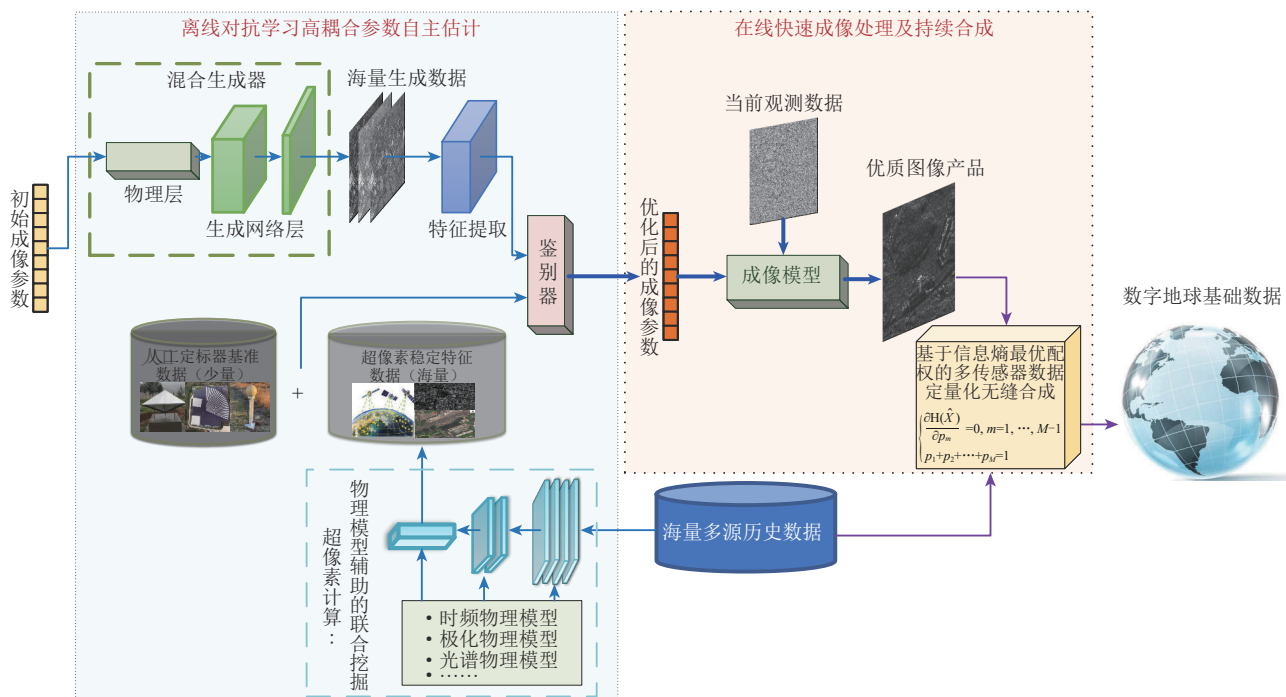


图3 基于超像素模型的成像处理框架

Fig. 3 The imaging processing framework based on the hyper-pixel model

离线部分包括从海量历史数据中, 通过物理模型辅助的海量多源数据联合挖掘, 得到超像素稳定特征; 并基于超像素稳定特征和少量的人工

定标器基准数据, 采用生成对抗学习等方法实现全链路高耦合成像参数的端到端估计 (Niu 等, 2020; Niu 等, 2021)。该离线过程对处理时效性

要求不高,可以在后台利用系统闲暇时间和余量资源开展,随着历史数据的增多,成像参数的准确性将持续提升。

在线快速处理部分主要负责利用离线学习得到的高精度成像参数,对当前观测数据实现基于成像物理模型的快速成像处理,得到高精度的图像数据产品。该部分对处理时效性要求很高,通常要达到1:1的实时率,本处理框架下,成像参数已经事先学习准备好,因此相比以往需要在线估计参数的方式具有更好的时效性。进而,在高精度图像数据产品基础上,与历史数据库中的多传感器数据产品进行基于信息熵最优配权的定量化无缝合成,实现数字地球高精度定量化基础数据的持续更新。

4 基于超像素的成像处理进展

上一小节中超像素成像模型是高度抽象的,但其可以指导多体制遥感卫星数据的高精度处理,包括成像处理、辐射校正、几何校正,都可以在同一套模型框架下一体化处理;同时其也可以指导多卫星数据的一致性校正与合成。本节介绍团队在这一成像模型和思路的指导下取得的阶段性进展。

4.1 单星高精度处理

在基于超像素成像模型提高单颗遥感卫星数据处理精度方面,我们重点结合新体制和复杂场景的问题提出有效处理方法。

在SAR成像领域,基于超像素的成像处理的基本单元由方位—距离网格内的孤立物理像素点,变为了在空间尺度和时间维度都可跨越多个单元的“超像素”。超像素内部的时空相关性,成为了基于超像素的成像处理和目标表征中需要考虑的重要信息。

为提升人造目标和自然地物分布目标共存场景(如海岛、港口等区域)中人造目标的空间分辨性能以及与自然地物目标的辐射分辨性能,我们提出了基于超像素空间关联正则化的成像算法和基于超像素的稀疏展开网络成像算法(Liu等, 2009; Xu等, 2022),其中超像素是指像素散射强度的空间梯度具有相似特征的非邻域像素集合。通过在SAR稀疏成像方法的基础上引入非凸—非

局域全变差范数联合正则化(MC-NLTV),使得非凸稀疏约束的计算不再局限于物理像素点本身,而扩大到非局部邻域窗口(Liu等, 2009),从而具备更优的空间相关性表征能力,可以更好地描述复杂场景。如图4给出了一景包含岛屿和舰船目标的GF-3实测数据的成像结果,比较可见,提出的MC-NLTV方法可有效抑制图像中的相干斑噪声,并避免传统稀疏重构的有偏效应,和传统稀疏方法相比,MC-NLTV方法对孤立点目标的散射强度估计准确度可提升约5 dB,对分布式目标散射系数的估计准确度可提升约2 dB(Xu等, 2022)。

在上述MC-NLTV成像过程中,有两个权值参数通常需要以经验进行估计,且运算量较大。为解决传统稀疏微波成像迭代求解算法中成像参数估计困难的问题,我们提出将基于该迭代求解过程展开成神经网络形式,形成基于超像素的稀疏深度展开成像网络,网络参数以数据驱动的方式通过最小化误差函数自适应训练得到,如图5所示。通过不同场景海量数据的训练,可以得到相比于经验值更优的参数,应用这些自适应于场景的网络参数,可以实现快速高质量的SAR成像(Zhou等, 2023)。

在海面复杂运动舰船成像方面,团队提出了一种基于自适应动量估计优化器与空变最小熵准则的SAR图像舰船目标自聚焦算法。该算法对图像进行分块,形成一组超像素,这些超像素指空间邻域像素集合,其稳定关联约束是指在邻域内像素存在的相位误差具有相似性,随后以加权叠加后的超像素图像熵最小为准则,结合图像熵函数关于相位误差系数梯度的一阶矩和二阶矩,采用自适应动量估计优化器实现了运动空变舰船的自聚焦,图像熵减小约13%,运行速度相比于现有算法提升8倍以上(Zhou等, 2023)。

面向多通道SAR新体制面临的通道相位误差估计难题,基于像素在通道维的关联性,提出了一种基于误差反向传播训练优化的通道相位误差估计方法。其用到的超像素是指位置较相近、散射强度大于一定信噪比门限的像素集合,其维度包括方位、距离和通道维,其稳定关联约束是指这些目标在通道维的相位误差具有一致性。该方法根据多通道SAR回波生成的物理过程,构建含有通

道间相位误差待估计参数的观测矩阵，通过初始化的通道误差和初始化的目标散射系数参数生成初始化的SAR回波，并计算该回波与多通道SAR实测回波之间的误差，通过深度学习中常用的误差反向传播的方法，不断训练优化上述参数，最终获得通

道间相位误差的估计值，同时也得到了对目标散射系数的估计。该方法基于误差反向传播，在稀疏假设下同时完成了相位估计和成像，为多通道SAR误差估计提供了一种新的思路（Cui等，2020）。

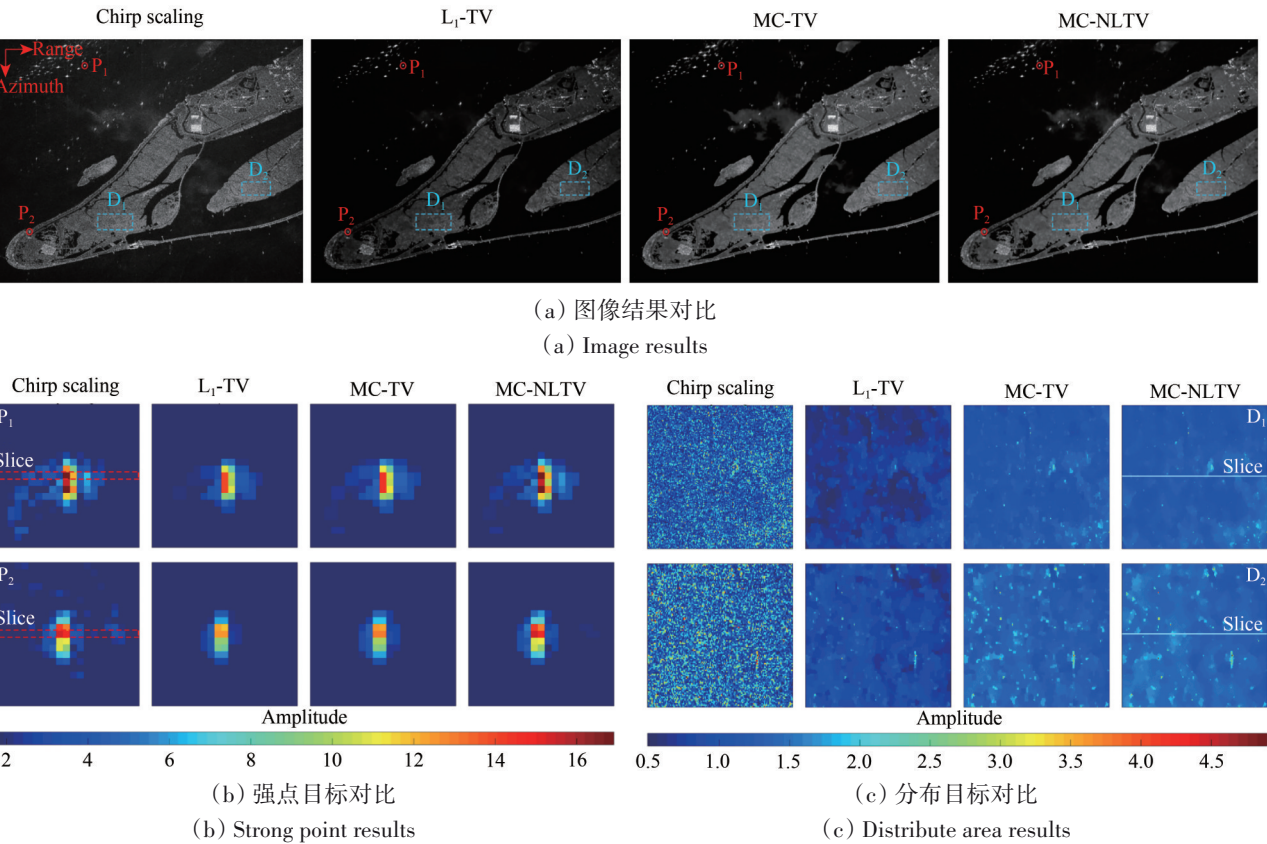


图4 基于超像素模型的稀疏成像处理结果对比
Fig. 4 The sparse microwave imaging result based on hyper-pixel model

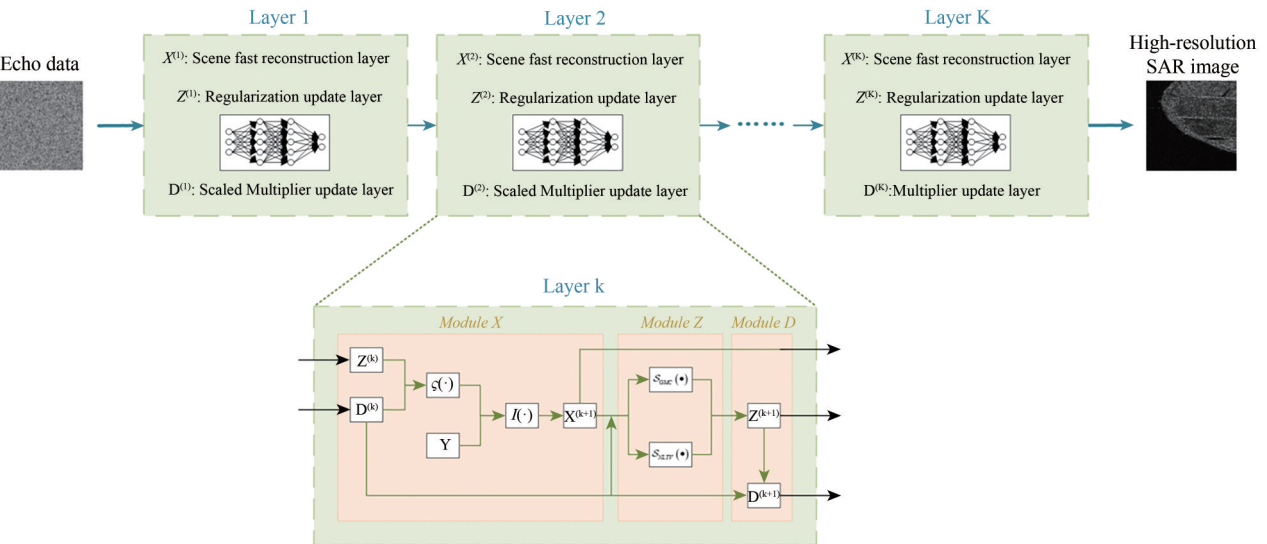


图5 超像素稀疏展开成像网络
Fig. 5 Hyper-pixel high-resolution SAR imaging network

针对光学卫星自主辐射定标和校正问题, 提出一种基于空间—光谱联合稳定“超像素”的交叉定标方法, 其中“超像素”是传统像素在空间维和光谱维的拓展, 其稳定关联约束是依据空间—光谱共同影响交叉分析的理念, 构建多方向差分因子实现空间关联与光谱变化的联合表征; 同时, 考虑到受传感器响应函数, 不同波段以及相应反射率产品处理算法差异影响, 不同卫星平台获取的反射率产品也存在极大不同问题, 利用主成分分析法相关系数计算交叉参考基准相对待定标图像主成分谱段的灰度变化量, 并以计算结果设计多方向差分因子在不同波段不同观测角度的权重; 并通过联合 CNN-RNN 深度学习网络结构, 构建以 CNN 封装时间—空间—光谱的多方向差分关联特性, 以 RNN 预测时间依赖特性为反馈信息的稳定不变特征点自动获取方法, 进而完成基于超像素集合的交叉定标。该方法相较于传统采用基于像素的稳定不变特征点获取方法, 具备对噪声、阴影所造成的“伪变化”不敏感, 鲁棒性高的特点, 具备同步表征空间邻域关系、波段变化差异性与互补性的特点, 同时使用深度学习方法自动探测不变性特点, 可大大减少人为选择不不变特征以及线性假定造成的误差, 更适配于非线性的实际光学图像数据获取大气环境与差异性的载荷状态, 为多角度和宽幅新体制下高精度光学图像地表辐射产品处理提供了一种新的手段。

针对多角度复杂场景下, 高精度大气参数难以实时准确获取而造成的光学地物反射率/发射率辐射特性产品精度普遍不高问题, 提出了一种大气地形一体化的光学辐射校正方法 (CPBAC) (Yu 等, 2016)。其基于超像素概念, 挖掘得到了同类地物像素辐射值在不同地形下的变化具有稳定规律, 从而利用地形信息约束, 提取光学遥感图像的辐射条件耦合参数, 进而实现图像的快速大气与地形辐射校正, 建立了光学遥感图像大气、地形辐射校正的新模式。

4.2 多星一致性校正

多星图像数据若要在空间、时间和和波谱维度上定量化无缝合成, 以作为供后续应用的基础数据, 需要进一步进行一致性校正。

为解决同波段的多星多时相数据在辐射和极化定量化精度方面的不一致性, 我们基于全球地

物分类基础数据、海量光学影像数据和海量 SAR 数据, 采用深度神经网络进行挖掘, 发现海量城市住宅区地物的散射系数中值具有良好的统计稳定性, 可以作为超像素特征用于辐射一致性校正 (Fu 等, 2012; Yang 等, 2018)。进一步联合双极化数据挖掘辐射稳定的城区目标超像素, 其辐射基准稳定度可以达到 0.2 dB (1σ) (Shangguan 等, 2019), 并由此可以分析城区等典型地物散射随四季变化的规律 (Shangguan 等, 2023)。同时, 基于物理模型先验和神经网络的挖掘还发现, 植被分布目标超像素具备稳定的极化通道间相关特性, 并基于此实现了全极化 SAR 常态化的极化失真监测和自主极化校正, 该技术应用于 GF-3 条带数据得到稳定的极化失真监测结果 (Shangguan 等, 2020)。对于双极化 SAR, 仅依靠分布目标超像素稳定特性尚不足以计算全部的极化失真参数, 故基于物理模型先验, 挖掘出海量城区二面角超像素具有统计稳定的极化特征, 提出了基于城区二面角超像素的双极化 SAR 系统接收端相位不平衡自主计算, 保证了双极化模式的极化质量与全极化 SAR 图像质量间的一致性 (Shangguan 等, 2022)。

针对多时相海量光学遥感图像的自动化辐射一致性校正问题, 提出了一种基于稠密卷积神经网络的方法, 在先验知识约束下, 利用较少的参数来学习得到复杂的模型, 在高分二号的数据集上超过传统卷积神经网络的结果, 且显著优于传统的经验统计法, 无需对场景的先验信息, 也不依赖于参考图像 (Zhu 等, 2019)。针对海量高光谱数据反射率反演一致性精度提升问题, 提出了一种基于机器学习挖掘超像素稳定特性用于自动反演的方法, 其中超像素稳定特征是指某些空间纹理特征的像素的光谱统计量有稳定规律, 从而利用地物的光谱特征以及空间纹理特征, 使用 SVM 来估计图像中典型地物的反射率, 在完成训练后, 可以快速地对全新图像进行反射率反演, 且在绝对辐射校正精度不高的情况下也可以正常运行 (Zhu 等, 2019; Xu 等, 2018)。

为了解决不同卫星图像数据在几何方面的一致性问題, 我们提出了基于超像素基准特征库的几何一致性处理方法, 提高多星组网影像几何一致性和几何处理精度、处理系统的资源利用率和自动化运行水平, 其中超像素是指符合特定纹理

特征条件的光学、SAR等不同卫星图像像素集合。该方法基于异源影像自动配准找到稳定鲁棒的几何超像素，构建超像素基准特征，并联合多源多角度影像三维解算获取其准确的三维空间位置。其中，针对光学和SAR载荷获取影像图像表征方面的差异，研究提出了一种一致性基准特征提取算法，以超像素作为匹配处理单元构建基准特征描述符，通过将异源影像映射到一致性基准特征空间以降低其显著差异，对超像素单元进行匹配可有效降低异源影像之间显著的辐射几何差异，获取均匀准确的匹配点结果（Fu等，2012；Wang等，2012；Xiang等，2018）。进一步，对多源多角度SAR观测数据构建了更鲁棒的统一量纲距离多普勒N-RD（Normalized RD）定位模型和基于RD方程残差的多角度SAR优化配权方法（Luo等，2021），结果表明所提方法能够显著提升多源多角度SAR三维定位精度和稳定性。针对光学-SAR多源多角度观测数据，提出了基于多源多角度数据提取得到稳定几何超像素后，构建多源超像素联合处理模型并进行差异化配权的方法（Jiao等，2020a，2020b），在吉林一号光学卫星和高分三号SAR卫星多源多角度数据的实验结果表明本方法可将平面精度提升至3.19 m，高程精度提升至2.21 m，如表3所示（Jiao等，2020b）。

表3 多源联合定位处理结果

Table 3 Multi-source joint positioning processing results

方法	吉林一号				高分三号			
	X	Y	平面	高程	X	Y	平面	高程
联合前	174.5	127.8	216.4	168.2	13.4	2.36	13.9	10.16
处理后	2.72	1.68	3.19	2.21	2.24	1.33	2.61	2.02

5 结 语

本文提出了基于“超像素”表征模型的多体制遥感卫星成像数据高精度处理新方法。首先提出了“超像素”的概念和表征模型，能够更加完整地表征地物目标对电磁波的散射/辐射/发射能力，建立了基于超像素的精确成像模型，在先验知识引导下基于多体制遥感卫星海量观测数据充分挖掘超像素稳定特征，然后借鉴生成对抗学习的机制，实现成像、辐射和几何校正处理参数的高精度估计和持续精化，有效提升多体制遥感卫星图像产品的精度。同时，提出的超像素稳定特

征可以作为计算机解译的输入，有利于提升图像解译应用的精度和效率。

目前，我们构建了基于“超像素”的处理框架，并进行了一定的实践探索。后续工作中还将进一步发展该处理理论模型和处理体系，在物理模型辅助的超像素稳定特征挖掘、处理参数的学习优化方法，以及基于超像素的成像处理和多体制卫星数据信息提取等方面开展进一步研究。特别地，在信息提取领域，我们将针对如何有效挖掘和提取超像素稳定特征来设计相应的深度学习网络模型结构，实现复杂遥感场景下多要素多目标的电磁/视觉特征的高效降维融合，提升地物目标识别算法的泛化性能。

参考文献(References)

- Cui L, Qiu X L, Guo J Y, Wen X J, Yang J Y and Fu K. 2020. A multi-channel phase error estimation method based on an error back-propagation algorithm for a multichannel SAR. *Journal of Radars*, 9(5): 878-885 (崔磊, 仇晓兰, 郭嘉逸, 温雪娇, 杨俊莹, 付琨. 2020. 一种基于误差反向传播优化的多通道SAR相位误差估计方法. *雷达学报*, 9(5): 878-885) [DOI: 10.12000/JR20096]
- Deng Y K, Yu W D, Zhang H, Wang W, Liu D C and Wang Y. 2020. Forthcoming spaceborne SAR development. *Journal of Radars*, 9(1): 1-33 (邓云凯, 禹卫东, 张衡, 王伟, 刘大成, 王宇. 2020. 未来星载SAR技术发展趋势. *雷达学报*, 9(1): 1-33) [DOI: 10.12000/JR20008]
- Deng Y K, Zhao F J and Wang Y. 2012. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR. *Journal of Radars*, 1(1): 1-10 (邓云凯, 赵凤军, 王宇. 2012. 星载SAR技术的发展趋势及应用浅析. *雷达学报*, 1(1): 1-10) [DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20015]
- Freeman A. 1992. SAR calibration: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(6): 1107-1121 [DOI: 10.1109/36.193786]
- Fu K, Sun X, Qiu X L, Diao W H, Yan Z Y, Huang L J and Yu H F. 2021. Multi-satellite integrated processing and analysis method under remote sensing big data. *Journal of Remote Sensing*, 25(3): 691-707 (付琨, 孙显, 仇晓兰, 刁文辉, 闫志远, 黄丽佳, 于泓峰. 2021. 遥感大数据条件下多星一体化处理与分析. *遥感学报*, 25(3): 691-707) [DOI: 10.11834/JRS.20211058]
- Fu K, You H J and Hu Y F. 2007. Fine registration technology of multi-temporal spaceborne SAR image. *Remote Sensing Technology and Application*, 22(5): 637-641 (付琨, 尤红建, 胡岩峰. 2007. 多时相星载SAR图像精配准技术研究. *遥感技术与应用*, 22(5): 637-641) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-0323.2007.05.012]
- Fu X Y, You H J and Fu K. 2012. A statistical approach to detect edges in SAR images based on square successive difference of averages. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(6): 1094-1098

- [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2190378]
- Fu X Y, You H J and Fu K. 2012. Building segmentation from high-resolution sar images based on improved markov random field. *Acta Electronica Sinica*, 40(6): 1141-1147 (傅兴玉, 尤红建, 付琨). 2012. 基于改进 Markov 随机场的高分辨率 SAR 图像建筑物分割算法. *电子学报*, 40(6): 1141-1147 [DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.012]
- Han B, Zhang Y J, Hu D H and Huang L J. 2011. Research on mending of space-borne sliding spotlight SAR imaging model error. *Journal of Electronics and Information Technology*, 33(7): 1694-1699 (韩冰, 张永军, 胡东辉, 黄丽佳). 2011. 星载滑动聚束 SAR 成像模型误差校正方法研究. *电子与信息学报*, 33(7): 1694-1699 [DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01259]
- Jiao N G, Wang F and You H J. 2020a. A new RD-RFM stereo geolocation model for 3D geo-information reconstruction of SAR-optical satellite image pairs. *IEEE Access*, 8: 94654-94664 [DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991199]
- Jiao N G, Wang F, You J, Liu J Y and Qiu X L. 2020b. A generic framework for improving the geopositioning accuracy of multi-source optical and SAR imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169: 377-388 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.09.017]
- Li D R and Wang M. 2020. A review of high resolution optical satellite surveying and mapping technology. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 41(2): 1-11 (李德仁, 王密). 2020. 高分辨率光学卫星测绘技术综述. *航天返回与遥感*, 41(2): 1-11 [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2020.02.001]
- Li D R, Wang M and Jiang J. 2021. China's high resolution optical remote sensing satellites and their mapping applications. *Geo-Spatial Information Science*, 24(1): 85-94 [DOI: 10.1080/10095020.2020.1838957]
- Li J D. 2022. Advances in high-resolution earth observation satellite remote sensing technologies in China. *Science and Technology Foresight*, 1(1): 112-125 (李劲东). 2022. 中国高分辨率对地观测卫星遥感技术进展. *前瞻科技*, 1(1): 112-125 [DOI: 10.3981/j.issn.2097-0781.2022.01.010]
- Li X W and Wang Y T. 2013. Prospects on future developments of quantitative remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 68(9): 1163-1169 (李小文, 王伟婷). 2013. 定量遥感尺度效应当议. *地理学报*, 68(9): 1163-1169 [DOI: 10.11821/flxb201309001]
- Li Z Y, Guo J Y, Zhang Y T, Huang L J, Li J and Wu Y R. 2022. A novel autofocus algorithm for ship targets in SAR images based on the adaptive momentum estimation optimizer and space-variant minimum entropy criteria. *Journal of Radars*, 11(1): 83-94 (李志远, 郭嘉逸, 张月婷, 黄丽佳, 李洁, 吴一戎). 2022. 基于自适应动量估计优化器与空变最小熵准则的 SAR 图像船舶目标自聚焦算法. *雷达学报*, 11(1): 83-94 [DOI: 10.12000/JR21159]
- Liu A P, Liu Z, Fu K and You H J. 2009. High resolution SAR images multi-layer segmentation based on graph partitioning[C]//2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science. Wuhan: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/ICIECS.2009.5365016]
- Luo Y T, Qiu X L, Dong Q and Fu K. 2021. A robust stereo positioning solution for multiview spaceborne SAR images based on the range - Doppler model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 4008705 [DOI: 10.1109/LGRS.2020.3048731]
- Niu S R, Qiu X L, Lei B, Ding C B and Fu K. 2020. Parameter extraction based on deep neural network for SAR target simulation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(7): 4901-4914 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2968493]
- Niu S R, Qiu X L, Lei B and Fu K. 2021. A SAR target image simulation method with DNN embedded to calculate electromagnetic reflection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 2593-2610 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3056920]
- Shangguan S T, Qiu X L and Fu K. 2023. Research on a special hyper-pixel for SAR radiometric monitoring. *Remote Sensing*, 15(8): 2175 [DOI: 10.3390/rs15082175]
- Shangguan S T, Qiu X L, Fu K, Lei B and Hong W. 2020. GF-3 polarimetric data quality assessment based on automatic extraction of distributed targets. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 4282-4294 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3012151]
- Shangguan S T, Qiu X L, Han B, Liu W J and Fu K. 2022. A novel polarimetric channel imbalance phase estimation method based on the rotated double-bounce backscatters in urban areas. *Remote Sensing*, 14(13): 3177 [DOI: 10.3390/rs14133177]
- Shangguan S T, Qiu X L, Yang J T, Lei B and Din C B. 2019. Extraction and analysis of the scattering stability in urban areas based on dual-polarization SAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(3): 427-431 [DOI: 10.1109/LGRS.2018.2873624]
- Sun X, Tian Y, Lu W X, Wang P J, Niu R G, Yu H F and Fu K. 2023. From single- to multi-modal remote sensing imagery interpretation: a survey and taxonomy. *Science China Information Sciences*, 66(4): 140301 [DOI: 10.1007/s11432-022-3588-0]
- Sun X, Wang P J, Lu W X, Zhu Z C, Lu X N, He Q B, Li J X, Rong X E, Yang Z J, Chang H, He Q L, Yang G, Wang R P, Lu J W and Fu K. 2022. RingMo: a remote sensing foundation model with masked image modeling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 5612822 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3194732]
- Wang S H, You H J and Fu K. 2012. BFSIFT: a novel method to find feature matches for SAR image registration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4): 649-653 [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2177437]
- Wu Y R. 2013. Concept on multidimensional space joint-observation SAR. *Journal of Radars*, 2(2): 135-142 (吴一戎). 2013. 多维度合成孔径雷达成像概念. *雷达学报*, 2(2): 135-142 [DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.13047]
- Xiang Y M, Wang F, and You H J. 2018. OS-SIFT: a robust SIFT-like algorithm for high-resolution optical-to-SAR image registration in suburban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(6): 3078-3090 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2790483]
- Xu K F, Lei B and Zhang Y T. 2018. Retrieval of land surface emissivity using spectral and texture features based on neural network. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 35(1): 102-108 (徐开发, 雷斌, 张月婷). 2018. 基于光谱纹理特征融合

- 和神经网络的地表发射率获取方法. 中国科学院大学学报, 35(1): 102-108 [DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2018.01.014]
- Xu Z Q, Zhang B C, Zhang Z, Wang M Z and Wu Y R. 2022. Nonconvex-nonlocal total variation regularization-based joint feature-enhanced sparse SAR imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 4515705 [DOI: 10.1109/LGRS.2022.3222185]
- Yan Z Y, Wang P J, Xu F, Sun X and Diao W H. 2023. AIR-PV: a benchmark dataset for photovoltaic panels extraction in optical remote sensing imagery. *Science China Information Sciences*, 66(4): 140307 [DOI: 10.1007/s11432-022-3663-1]
- Yang J T, Qiu X L, Ding C B and Lei B. 2018. Identification of stable backscattering features, suitable for maintaining absolute synthetic aperture radar (SAR) radiometric calibration of sentinel-1. *Remote Sensing*, 10(7): 1010 [DOI: 10.3390/rs10071010]
- Yu K, Liu S H and Zhao Y C. 2016. CPBAC: a quick atmospheric correction method using the topographic information. *Remote Sensing of Environment*, 186: 262-274 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.08.010]
- Zhang A D, Wu M Q, Wang D P, Cao J R and Jia W H. 2014. *The Basis and Application of Remote Sensing Technology*. Beijing: Science Press (张安定, 吴孟泉, 王大鹏, 曹建荣, 贾维花. 2014. 遥感技术基础与应用. 北京: 科学出版社)
- Zhou G R, Xu Z Q, Fan Y Z, Zhang Z, Qiu X L, Zhang B C, Fu K and Wu Y R. 2023. HPHR-SAR-Net: Hyper high-resolution SAR imaging network based on nonlocal total variation. *arXiv preprint arXiv: 2304.04428* [DOI: 10.48550/arXiv.2304.04428]
- Zhu S J, Lei B and Wu Y R. 2018. Retrieval of hyperspectral surface reflectance based on machine learning. *Remote Sensing*, 10(2): 323 [DOI: 10.3390/rs10020323]
- Zhu S J, Lei B and Wu Y R. 2019. Automatic color correction for remote sensing optical image based on dense convolutional networks. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 36(1): 93-100 (朱思捷, 雷斌, 吴一戎. 2019. 基于稠密卷积神经网络的遥感图像自动色彩校正. 中国科学院大学学报, 36(1): 93-100) [DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2019.01.013]

A new method for high precision processing of multi-system Earth observation satellite data

FU Kun^{1,2,3,4}, QIU Xiaolan^{1,3}, HAN Bing^{1,3}, SUN Xian^{2,3}

1. Key Laboratory of Geo-information Processing and Application System (GIPAS), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Key Laboratory of Network Information System Technology (NIST), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Earth observation satellites, such as optical and SAR satellites, require processing such as imaging, radiometric/geometric correction, and continuous accumulation in order to provide high-precision, stable, and time continuous data and features for computer interpretation. Traditional medium and low resolution Earth observation satellites typically perform pixel-by-pixel processing based on the assumption of ideal point targets, which means that the ground object grid has a invariant time-frequency characteristic. However, the working modes of advanced satellite systems, such as high-resolution, wide-swath, large squint angle, and multi-channel, are more complex, and their data processing is very sensitive to the errors generated in the whole chain of the satellite to ground, which puts higher requirements on the accuracy of imaging parameter calibration or estimation. Hence, the method of assuming sensor pixels as ideal point targets for parameter estimation, imaging, and correction processing is no longer able to meet the processing accuracy requirements. Moreover, in recent years, the new development of multi-system satellite network collaboration and fusion applications has made it difficult to characterize and model the features of multi-source and multi-temporal data based on the current ideal point target assumption. To this end, this article proposes a new method for high-precision processing of multi-system remote sensing satellite imaging data. Firstly, the concept and characterization theory of "Hyper-pixel" are proposed, and an accurate imaging model based on hyper-pixels is established. Then, by mining stable features of hyper-pixels, and inspired by generative adversarial learning mechanisms, high-precision estimation and continuous refinement of high coupling imaging parameters are achieved. This effectively improves the accuracy of multi-system remote sensing satellite imaging data products, and provides better data input for computer interpretation.

Key words: remote sensing satellite, hyper-pixel, imaging processing, radiometric correction, geometric correction, deep learning

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022ZD0118402)