

陆地观测卫星遥感产品真实性检验场网建设的思考与实践

马灵玲, 周翔, 王宁, 陶醉, 赵永光, 朱小华, 高彩霞, 杨健,
高海亮, 杨宏, 肖青, 李强子, 吕婷婷, 张凤丽, 臧文乾

中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要: 遥感产品真实性检验作为衔接遥感数据产品与应用服务的重要过程, 是遥感数据产品高质量应用的必要保证。多年来, 国内外建设了不少面向陆地遥感产品的真实性检验站点, 但由于陆表过程和观测目标的高度复杂性、遥感卫星载荷产品的多样性、陆地遥感产品演变的动态性, 在典型特性表征—要素测量—样本优化—弹性服务全过程中的理论运用与技术实现仍显不足, 规模化基础设施有待进一步发挥可持续运行的服务价值。本文分析了真实性检验地面观测场网、地面参考真值获取技术、遥感产品综合检验服务的国内外现状与发展趋势, 进而从理论方法体系化着手, 提出在地统计学的空间变异理论、计量学的不确定性理论、运筹学的最优化理论等基础之上, 研究真实性检验场网空间代表性表征、测量基准不确定性度量及传递、多途径检验结果综合定权合成、样本集与待检产品的最优匹配等方法, 发展形成陆地观测卫星真实性检验场网方法体系框架。对标国家空间基础设施重大工程建设和关键共性产品的应用需求, 综合考虑整体布局、产品覆盖完备性、时空基准一致性和可追溯性等因素, 统筹建设完善真实性检验站网、航空协同真实性检验系统、基准参考构建及传递系统以及高精度检验服务系统, 形成符合中国实际的陆地观测卫星遥感产品真实性检验技术方案。文章对于完善真实性检验场网理论方法体系, “用足”、“用好” 国产陆地观测卫星遥感数据, 提升量化应用水平具有重要意义。

关键词: 陆地观测卫星, 遥感产品, 真实性检验, 基准参考测量, 服务系统, 理论方法体系

中图分类号: P2

引用格式: 马灵玲, 周翔, 王宁, 陶醉, 赵永光, 朱小华, 高彩霞, 杨健, 高海亮, 杨宏, 肖青, 李强子, 吕婷婷, 张凤丽, 臧文乾. 2024. 陆地观测卫星遥感产品真实性检验场网建设的思考与实践. 遥感学报, 28(4): 805-824

Ma L L, Zhou X, Wang N, Tao Z, Zhao Y G, Zhu X H, Gao C X, Yang J, Gao H L, Yang H, Xiao Q, Li Q Z, Lyu T T, Zhang F L and Zang W Q. 2024. Practice and reflection on the construction of remote sensing products validation network for the land observation satellite. National Remote Sensing Bulletin, 28(4): 805-824 [DOI: 10.11834/jrs.20244100]

1 引言

遥感器直接获取的信号是观测区域内地面场景、环境、大气等信息耦合的综合表征, 准确获得反映目标物理量信息的遥感产品需要剥离产品链路中的各种影响, 因此, 遥感产品自身必然蕴含一定程度的误差 (Friedl 等, 1995)。遥感产品真实性检验将遥感产品量值与地面基准关联起来, 通过评价遥感产品的精度和准确性 (Justice 等, 2000), 保证遥感产品精准可靠、连续一致, 是遥

感产品量化应用效果的必要保证。近年来, 作为国家民用空间基础设施的重要组成部分, 中国陆地、气象、海洋系列卫星围绕遥感产品的真实性检验开展了系统的工作, 为提升遥感产品可靠性和适用性, 改善遥感产品质量发挥了重要作用。对于其中的陆地观测卫星而言, 陆表过程和观测目标的高度复杂性、遥感卫星平台载荷的多样性、陆地遥感产品演变的动态性均对数据产品的高质量应用带来了巨大的挑战, 急需对标国家空间基础设施重大工程建设和关键共性产品的应用需求,

收稿日期: 2024-02-27; 预印本: 2024-03-15

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2022YFB3903000); 国家自然科学基金(编号:42371396)

第一作者简介: 马灵玲, 研究方向为遥感在轨定标与产品真实性检验。E-mail: mall@aircas.ac.cn

通信作者简介: 周翔, 研究方向为遥感信息分析与计算, 遥感试验验证, 环境遥感等。E-mail: zhouxiang@aircas.ac.cn

解决遥感数据“用足”、“用好”的问题，提升遥感产品的定量水平和应用效益。

为了实施遥感产品真实性检验，世界主要国家在全球范围内选取和建设了多个具备地理/生态环境代表性的遥感卫星真实性检验场，国际卫星对地观测委员会（CEOS）定标与真实性检验工作组（WGCV）专门成立陆表产品真实性检验LPV（Land Product Validation）技术组，致力于组织和协调卫星产品的定量检验技术与国际合作。中国自2018年开始，先后启动了国家民用空间基础设施陆地卫星真实性检验场网（空基真实性检验场网）和高分卫星真实性检验站网（高分真实性检验站网）建设（高海亮等，2023；闻建光等，2023）。至今已建成由48个站点组成的空基场网，具备了24种空基陆地卫星遥感共性产品验证的能力；由42个站点组成的高分站网，具备45种高分系列卫星共性产品的检验验证能力。2018年和2020年发布了遥感产品真实性检验导则国家标准（GB/T 36296-2018）（国家市场监督管理总局和国家标准化委员会，2018）和陆地定量遥感产品真实性检验通用方法（GB/T 39468-2020）（国家市场监督管理总局和国家标准化委员会，2020），叶面积指数、植被指数、光合有效辐射、地表发射率、地表温度等多项遥感产品真实性检验国家标准（GB/T 40033-2021；GB/T 40034-2021；GB/T 40038-2021；GB/T 40039-2021；GB/T 41279-2022；GB/T 41281-2022；GB/T 41282-2022；GB/T 41534-2022；GB/T 41535-2022；GB/T 41536-2022；GB/T 41537-2022；GB/T 41538-2022；GB/T 41540-2022）（国家市场监督管理总局和国家标准化委员会，2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2022a, 2022b, 2022c, 2022d, 2022e, 2022f, 2022g, 2022h）相继制定和发布。然而，面向日益增长的高质量应用需求和国家航天投入效益最大化的持续要求，真实性检验场网的发展在理论方法和规模化基础设施可持续运行服务方面还存在以下问题：

（1）复杂异质地表的空基代表性。遥感产品真实性检验需要利用具有代表性地物场景的真实性检验场地为载体，构建符合导则（GB/T 36296-2018）要求的时空代表性验证对象集合。以往地面检验场地大多集中于北部中纬度地区，难以完整覆盖全球代表性地物场景类型，如在FLUXNET

中作物类型被过度表达而草地类型代表性欠缺（Baret等，2006）。此外，随着陆地观测卫星空间分辨率的不断提升，地物场景目标自身所呈现的空间变异及波动细节也越来越精细，使得以往适用于中低分辨率遥感产品检验的地物目标异质性特征显著增加，更难以使用有限场站实现全面的地物场景表征。如何在现有网络布局和高动态全球观测的背景下，基于集约视角设计甄选和合理补充真实性检验场站，是遥感产品真实性检验场网观测能力提升的根本。

（2）像元尺度地面参考真值的精准一致测量。遥感产品真实性检验一般在卫星过境时，同步开展场地参考目标特性同步测量作为与卫星产品对比的基准。受测量设备固有能力、星地观测尺度差异、大气环境变化等制约，单场单次检验精度难以持续提升。根据计量理论，多点独立测量能够降低单点不确定度（Joint Committee for Guides in Metrology, 2008）。但由于不同场地的观测目标、观测设备、测量方法等多个环节差异，不同场地、不同时间的参考基准缺乏可比性，难以发挥网络化地基验证的优势，降低综合检验不确定度。欧洲航天局于2013年提出“基准参考测量FRM（Fiducial Reference Measurements）”（Donlon等，2013），致力于在“对地观测质量保证框架”（QA4EO）下建立一套独立、完整、可溯源的测量与评价体系。CEOS对FRM进行了强制性特征描述，包括可追溯性、独立性、不确定度量化、标准化文档协议、可访问性、代表性、不确定度的适当性、实用性等（Goryl等，2023），以保证不同场地不同时间参考真值的可比性。进一步地，由于遥感产品真实性检验涉及诸多关联要素影响和测量非独立性，如何核算瞬变关联要素影响的多次观测等效量值，如何评估非独立观测等效量值的综合不确定度，都是像元尺度真值获取需要重点考虑的问题。

（3）多场景综合的产品检验服务优化。随着遥感探测时一空一频一谱分辨率的不断提升，遥感产品的应用广度和深度不断增加，使得当前及未来的遥感产品真实性检验的场景需求差异化愈发显著。优化多要素协同的最优化检验模型，生成最优化真实性检验方案，既是真实性检验的难点问题，也是实施产品质量追溯和提升的重要保障。近年来，国内外在提供检验数据共享服务的

基础上, 逐渐出现了基于差异化场景的检验服务模式, 例如欧洲航天局 (ESA) 的多源卫星土壤湿度产品检验平台 (<https://qa4sm.eu/ui/home>[2024-1-31])、GEE (Google Earth Engine) 等, 一定程度上实现遥感产品的用户自定义在线精度评价, 但其检验样本集资源不够充分, 可选择或定义的检验模式仍然有限。在统筹多类型检验样本集的基础上, 面向差异化的检验场景, 提供多样化可定义的检验模式与服务, 仍是当前亟待完善的工作。

总的来说, 大遥感时代民用卫星、商业卫星定量化、高精度的产品生产及质量追溯需求迫切, 如何充分发挥真实性检验场网设施的价值, 为中国陆地观测卫星的高质量发展提供更有力的支撑, 急需从理论方法体系化创新着手, 构建符合中国实际的陆地观测卫星遥感产品真实性检验技术方案, 形成整体布局合理、产品覆盖完备性强、时空基准一致性好和可追溯性高, 并接轨国际的新型网络架构。

2 国内外发展现状与趋势

2.1 真实性检验地面观测场网

对于面向全球范围、长期性的遥感产品而言, 建设覆盖所有地形地貌、生态功能、气候类型等场景要素的地面观测场, 获取具有时空代表性的验证集合, 是开展遥感产品真实性检验的基础 (方红亮等, 2021)。代表性是指在一个特定的时空维度上测量的数据, 能够多大程度反映相同或者不同时空尺度上的真实情况 (Nappo等, 1982)。理想状态下, 地面测量全时全域覆盖遥感成像范围才能实现对遥感产品的完美检验, 但由于遥感观测和地面测量的能力悬殊, 地面观测无法做到完备的全域信息收集 (Jia等, 2012; 徐保东等, 2015)。中心极限定理指出, 当样本量大于30个时可认为测量结果已大致符合正态分布, 基本呈现了目标地物的全部特性, 能够有效满足遥感产品真实性检验对于目标地物特征完备性获取需求 (李子奈和潘文卿, 2010)。CEOS WGCV LPV 技术组在其发布的遥感产品验证等级中 (<https://lpvs.gsfc.nasa.gov/index.html>[2024-1-31]), 也将检验数据集大于30个定义为具有代表性的验证集合, 目前仅有反照率、温度、叶面积指数等少量遥感产品达到了该级别要求的验证水平。

多年来, 国内外通过专门建设、借助专题性野外台站网络等途径, 形成了可用于遥感产品真实性检验的多个地面观测场网。以MODIS陆地产品为例, NASA自1997年开始就在全球部署检验站点, 最终确立32个核心站点 (EOS Land Validation Core Sites), 用于收集苔原、沙漠和热带雨林等不同地表类型的地面观测数据 (Morissette等, 1999)。1999年, NASA发起BigFoot计划, 在北美地区开展补充观测以支持MOD Land系列产品的真实性检验 (Campbell等, 1999)。生态观测网CERN、地基辐射观测网BSRN、通量观测网FLUXNET、气溶胶观测网AERONET、土壤水分观测网ISMN、大气成分观测网TCCON等专题性野外台站网也被广泛地用于遥感产品真实性检验 (黄铁青和牛栋, 2005; 杨萍等, 2020)。由于部分站点单点测量数据覆盖范围有限, 观测代表性不足, 且站点密度偏低, 难以有效匹配卫星遥感产品足迹 (Colliander等, 2017; Kerr等, 2016), 甚至特定气候和土地覆盖类型只有单一站点 (Wu等, 2019)。此外, 随着陆表气候变化、土地利用方式的演变, 其站点观测的空间代表性逐渐变弱, 例如在从FLUXNET和CERN中选取的38个叶面积指数 (LAI) 观测站点中, 只有4.5%的站点具有稳定的空间代表性 (Xu等, 2018)。

为了提升地面站点网络的完备性, Baret等 (2006) 提出构建CEOS-BELMANIP网络以增强全球陆地生态参数检验代表性, 也为后续在地带性/非地带性原则上, 结合专题需求构建代表性网络提供了重要借鉴参考; 美国国家生态观测网NEON (The National Ecological Observatory Network), 基于多元地理聚类方法构建了全国代表性完备的生态监测网络分布格局, 实现了覆盖不同地形地貌、气候类型等多场景的生态要素全时空观测 (<https://www.neonscience.org>[2024-1-31])。近年来, 中国科学院空天信息创新研究院在中国已有部分生态站点和野外台站基础上, 经过地理区划的分析和选址, 建立了专门针对遥感产品检验的空基真实性检验场网, 其涵盖全国8个地理区划、48个地面观测站点, 可对24种遥感共性产品进行检验。以上地面数据观测站网虽具备了单域内地面真值获取和产品检验能力, 但总的来说, 仍以国内分布的定点离散测量为主, 且部分典型地理生态区划站点分布不足甚至缺失、获取数据时空代表性

参差不齐, 难以满足多尺度卫星产品不断增长的验证需求。

伴随着高分辨率对地观测技术的发展, 遥感产品更加真实地呈现陆表细节信息, 使得中低分辨率下相对均匀的地物目标场景异质性加剧, 这为获取具有时空代表性的验证集开展遥感产品真实性检验带来了新的挑战。张仁华等(2010)指出, 进行目标测量时, 如果所观测地物在公认的特征精度下相对均匀, 可以直接用标准仪器采集, 如果所观测地物在公认的特征精度下不均匀, 在评估遥感产品精准性时需要开展地毯式采集。开展航空飞行试验获取高分辨率影像, 为地面观测值升尺度为卫星遥感像元尺度“真值”提供转换桥梁, 已成为近年来陆地定量遥感产品真实性检验的研究热点(晋锐等, 2017)。目前国内外已形成多个用于航空飞行的检验场地, 位于西班牙的Barrax检验场是国外具有代表性且多次用于航空飞行数据采集的检验场地(Moreno等, 2004); 国内以包头场为代表, 具备获取星—机—地同步测量的真实性检验能力(李传荣等, 2021)。空基真实性检验场网初步构建东北、西北、华北、西南、华中、华中6个综合实验场, 开展了20余次大型综合实验, 积累了中国多类型、多尺度、多要素耦合的“天空地一体化”综合验证数据集。

数字化检验场是一种虚拟的地面观测场。欧美选取或者建设的针对SPOT、IKONOS等卫星的全球几何检验场(Breton等, 2002; Dial等, 2003)以及以伪不变场(PICS)为代表的辐射场(Chander等, 2010), 均可视为数字化场的早期代表。部分反映地球系统趋势变化的模式模拟数据以及再分析资料已用于产品的验证过程中, 如NCEP提供的海表温度数据和ECMWF提供的大气剖面数据被用于红外数据产品真实性检验(Gube等, 1996)。近年来, Bauer等(2021)指出在解决地球科学研究中观测与模型融合的问题中, 以机器学习、数字孪生等技术展现出了强大的能力, 相关技术已开始用于遥感数字实验场研究。中国高分、资源、环境系列卫星已具备相当的全球覆盖成像能力, 亟需在定点观测和航空飞行实测的基础上, 综合利用国际大气/地表通量/海洋/植被生态等多要素验证场网数据、全球高分辨率影像资源, 形成面向全球覆盖遥感产品的数字检验场能力。

2.2 地面参考真值获取技术

准确获取卫星像元尺度地面参考真值是实现遥感产品真实性检验的关键。由于测量设备、测量手段和处理方法等差异, 像元尺度地面参考真值不确定性来源也有很大不同, 不仅直接影响遥感产品真实性检验结果的一致性与可靠性, 也限制了不同来源地面参考真值的综合使用。

要提高地面参考真值的精准性, 需对站点选择、仪器标定、数据质量控制等各个环节进行规范, 降低测量数据获取各环节的不确定度并合成统一质量标准的地面参考真值不确定度。国际上对于站点测量普遍考虑场景非均匀性特点设计优化采样策略, 如在欧洲航天局VALERI项目中, 提出基于基本采样单元(ESU)的升尺度技术, 通过参考数据和统计规则优化采样两种方式进行地面样点分布设计(Jimenez-Berni等, 2018)。为了提高地面测量与卫星观测之间的时间同步性从而降低不确定度, 近年来逐渐引入自动化观测设备获取时间连续的测量数据, 如空基真实性检验场网部署了系列站点自动化观测设备(包括反射率、叶面积指数等参数), 而国际上以包含中国包头场在内的全球自主辐射定标网(RadCalNet)为代表(Bouvet等, 2019), 利用自动化观测设备获取时间连续的地表反射率和大气参数, 并建立野外光谱仪温度校正模型, 消除实验室与野外工况环境的温度差异影响, 降低环境、时间匹配等差异引起的像元尺度地表真值不确定度(Ma等, 2020)。然而, 受到自动化测量方式下地面采样点数量的限制, 一定程度上加剧了地面场景空间非均匀性对像元尺度真值精度的影响。

基于航空飞行的参考真值获取方式可以对非均匀地面场景进行地毯式采集, 规避空间非均匀性对像元尺度真值精度的影响, 近年来获得了快速发展。例如, 在FRM4VEG计划第二阶段工作中, ESA、USGS、ASI、DLR、Geoscience Australia和CSIRO等多家机构联合于2022年在西班牙Barrax地区开展了SRIX4Veg试验, 利用无人机获取地表反射率的FRM数据集, 进行植被产品的验证工作。利用航空手段获取地面参考真值能够降低空间非均匀性影响, 但是从航空飞行数据转换到地面参考真值过程中需要反演地面参数, 因此相机定标和反演模型精度将是制约航空手段获取

高精度地面参考真值的主要因素。

地面测量与航空测量手段在获取像元尺度真值时的不确定度来源不同，如何保证参考真值获取的一致性，进而发挥真实性检验场网的多点观测优势，提高综合检验精度，可以引入计量学的不确定度传递思想。通过构建实验室计量基准→外场测量数据获取→像元尺度真值的传递链路，得到最终的像元尺度真值及其不确定度，这与基准参考观测 FRM 倡导的可溯源性、可比性以及可代表性思路一致 (Brown 等, 2021)。欧洲航天局于 2016 年开始在 FRM 计划中先后立项了一系列 FRM 参考真值获取项目 (表 1)。以 FRM4VEG

为例 ([https://frm4veg.org/\[2024-2-20\]](https://frm4veg.org/[2024-2-20]))，其主要目标是制定可追溯的植被相关参数原位测量规范，设计实地测量选址、仪器校准与测量抽样方案，要求逐一记录实测数据的可追溯性步骤，遵循不确定度传播规律，确保所有测量结果附带相应不确定性和质量标识。其中，除标记参考真值不确定度外，质量标识还包括测量设备及标定状态、测量时天空云覆盖情况以及地面场景状态等影响地面真值获取的状态信息，而严格的不确定度传递链路可保证地面真值追溯到国际单位 SI (Origo 等, 2020)。

表 1 欧洲航天局 FRM 计划相关项目信息汇总

Table 1 Summary of project information related to the ESA's FRM program

所属领域	项目名称	针对参数	牵头/参加机构	启动时间
大气观测	FRM4GHG	地面红外温室气体观测	ESA/Uni Bremen, BIRA-IASB, FMI, KIT, RUG, RAL, UOW	2016-08
	FRM4DOAS	地面 DOAS 空气质量观测	BIRA-IASB/ IUP-UB, KNMI, UHEID, MPIC, BKS, INTA, AUTH, NIWA	2016-07
	FRM4RADAR	微波辐射计和云雷达	Uni-koeln/ INOE, SMHI, FMI	2021-05
陆地观测	FRM4STS	卫星地表温度验证	DMI/ DML, ESA, KIT, NPL, PTB, RAL, UNI-Southampton	2016-04
	FRM4ALT	测高基准参考测量	IUGG/ESA, EUMETSAT	2016-03
	FRM4SAR	合成孔径雷达基准参考测量	Geoscience Australia, DLR, ESA	2018-08
	FRM4SM	土壤湿度	AWST/ TU Wien	2021-07
	St3TART	Sentinel-3 地表形貌任务	NOVELTIS/CNES, DTU, NPL, vortex.io, LEGOS, Ocean Next, CLS, LOCEAN, IGE, SERTIT, GIS, CNR-IRPI, NPL, DT/INSU, IRD, M2C, SYRTE	2021-12
	FRM4VEG	地表反射率	NPL/ EOLAB, UNI-Southampton	2018-03
海洋观测	FRM4SOC	水色遥感	Uni-TARTU/ NPL, EUMETSAT, PML, ACRI-ST	2017-02
	FRM4SST	海面温度	NPL, UNI-Southampton, RAL, DMI	2016-10

总的来说，真实性检验中获取高精度地面参考真值的核心在于链路的完整可回溯，各环节自身所引入的不确定度要尽可能的低。面向未来高精度地面参考真值获取需求，一方面需要建设面向真实性检验网外场设备标定的计量检验设施，保障不同来源地面参考真值的一致性；另一方面，需要开展真实性检验全流程不确定度分析和质量追溯，对地面真值及产品检验结果的不确定度进行分析和标记，这对提高真实性检验结果的可信度和一致性至关重要。

2.3 遥感产品综合检验服务

长期以来，国内外地面观测场站网大多提供直接的地面测量数据共享服务，通过专用的门户网站向注册用户各类检验或专题数据集，必

然存在不同用户检验方法不统一、检验结果难以有效比对等问题。为了保障共享服务效能，AERONET、RadCalNet 等数据平台还配备有数据质量控制或不确定度相关信息，并提供相应的技术报告。随着 FRM 框架的逐步完善，其倡导对基准参考测量进行全链路溯源及不确定度量化，并在 FRM 数据集中附带不确定度及质量标识，将进一步推动各平台发布观测数据的质量信息。

在线检验是近年来真实性检验服务平台的发展热点。2018 年，ESA 在 FRM4SM 项目支持下，首次建立了卫星土壤湿度产品在线验证服务平台。该平台集成了 C3S SM、ESA CCI SM、GLDAS Noah、H-SAF ASCAT SSM CDR 和 SMAP SPL3SMP 等多种检验数据集，允许用户对于多源卫星土壤湿度产品或上传的遥感土壤湿度产品进行在线检验，支

持自定义筛选地理区域、时间范围等参数,并提供土壤湿度产品检验结果发布及下载功能。国内方面,依托国家空间基础设施真实性检验场网和高分真实性检验站网,各自建设了陆地光学和微波观测卫星产品在线检验服务平台,对于多行业主用户的应用需求提供遥感产品真实性检验服务。但现有平台普遍存在采用以订单为主的固定模板检验模式,检验服务的多样性、灵活性等仍受到一定程度的制约。

除了上述在线检验平台面向注册用户检验服务的模式之外,还有卫星数据服务商定期发布产品检验报告的服务模式。典型代表为EROS定标检验卓越中心(ECCOE)负责的Landsat卫星定标与真实性检验,其自2021年二季度开始,逐季度公布Landsat 7/8/9卫星数据的辐射几何性能以及地表反射率产品的检验报告([https://www.usgs.gov/calval/landsat-calibration-and-validation\[2024-2-20\]](https://www.usgs.gov/calval/landsat-calibration-and-validation[2024-2-20])),便于用户及时跟踪并发现卫星数据产品的质量变化与趋势。

随着检验样本数据集的来源越来越丰富,在很多检验过程中会综合应用到包括地面观测、同类遥感产品以及再分析资料等数据源,并且跨越不同的地理/生态/气候环境区域,样本数据之间的不确定度可能存在较大差异,增加了最终检验结果的解释难度。在这个问题上,计量领域给出了全面系统的测量不确定度评定和合成规范(Joint Committee for Guides in Metrology, 2008),为综合利用多场站测量数据降低总体不确定度提供了借鉴。Gao等(2020)利用截断不确定度对多站点验证所需像元尺度参考真值进行约束,在此基础上利用多点地面真值对Sentinel-2A TOA反射率进行验证,将5%的单点验证结果不确定度降低至2%。

当前,定量遥感应用范畴不断扩展、应用领域不断细分、时空尺度范围不断拓宽,迫切需要构建覆盖中国及全球重点区域、具有明晰不确定度及尺度代表性并涵盖多类遥感产品的检验样本数据集,并在此基础上建设糅合验证数据服务、用户定制化检验、业务化定期检验等多种模式的综合检验服务体系,推动解决用户对遥感产品“不敢用、不会用、不能用”的痛点。

3 陆地观测卫星真实性检验场网理论方法体系

陆地观测卫星真实性检验的高质量开展需要重点关注以下3个方面的科学问题:

(1) 复杂异质地表的时空代表性:地球作为复杂巨系统,地表、大气、海洋等多圈层相互耦合,且地表覆盖、大气环境等呈现巨大的空间分布差异和时间变化特征。陆地观测卫星遥感产品的真实性检验,需要考虑覆盖不同地理环境下遥感参数的时空变化,同时验证结果要能尽可能地表征实际环境条件下的产品精度与不确定度,由此带来了复杂异质地表的时空代表性问题。

(2) 像元尺度地面真值的精准测量:地表非均匀性、复杂性以及环境参数的时间波动无处不在,像元尺度的真值测量无法做到实验室级的重复观测来获取真值,实际观测过程中设备、地表、环境等要素复合导致的不确定度如何评估,要素间是否有关联影响,这些都是保证测量的精准性的难点。

(3) 多场景遥感产品的最优评估:遥感产品的检验与评估既是科学技术问题,同时也与用户需求与应用场景密切相关。而在既有规模的真实性检验场网体系约束下,从产品检验及服务角度出发,如何有效汇集更优质的资源,以实现高适应度下不同应用场景的最优评估,是满足用户的多样化需求时面临的核心问题。

从解决场网时空代表性、像元尺度地面真值精准性、多场景遥感产品评估最优化等科学问题入手,在地统计学空间变异理论、测量不确定性理论、运筹学最优化理论为核心的指导下,形成如图1所示的陆地观测卫星真实性检验场网理论方法体系架构。

3.1 真实性检验场网理论基础

3.1.1 地统计学的空间变异理论

地统计学是统计学的进一步发展,地统计学所研究的变量在时间和空间上是相互关联的(张仁铎, 2005),正如地理区域一样,由于地理地带性/非地带性规律,地理区域间存在内在的相似性或差异性。严格来说,没有两个区域具有完全相同的地理环境或完全独立的地理特征。在面向真

真实性检验进行样本选取和测量时,除了关注样本自身的数值特性(均值、方差等统计量),还要计算样本的空间变异性,以说明样本的可靠性和可信度。

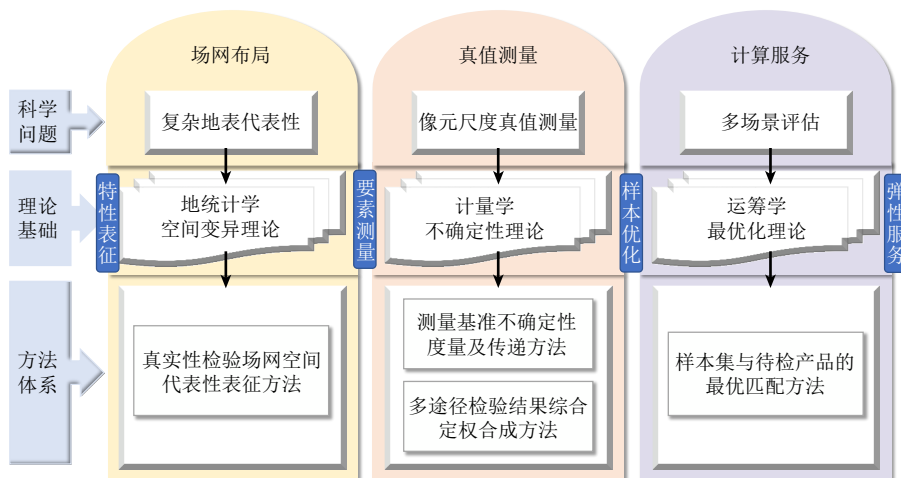


图1 真实性检验场网理论方法体系架构

Fig. 1 The architecture of theoretical system and methodology of the validation network for remote sensing

在野外进行样本数据测量时,近距离的测量值之间相较于远距离的测量值之间具有更高的相关关系。这些空间的关联性或连续性是自然界的重要特性,地统计学通过变异函数将这一现象数值化。定义 $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ 是某一站点测量参数的随机变量, x_i 为测量样本点的位置,对于代表性高或者均匀性高的站点而言,随机变量的均值存在且不取决于 x ,即

$$E(Z(x)) = m \quad (1)$$

$$E(Z(x+h) - Z(x)) = 0 \quad (2)$$

对于特征距离 h ,变量 $(Z(x+h) - Z(x))$ 具有一个有限的方差,此方差也不取决于 x ,对于 x 和 h ,以下公式成立:

$$\begin{aligned} \text{Var}(Z(x+h) - Z(x)) &= E\left(\left((Z(x+h) - Z(x)) - E(Z(x+h) - Z(x))\right)^2\right) = E\left((Z(x+h) - Z(x))^2\right) = 2\gamma(h) \end{aligned} \quad (3)$$

$\gamma(h)$ 即为(半)变异函数,变异函数可以用来表征真实性检验站点测量参数的空间代表性。

3.1.2 计量学的不确定性理论

计量学将科学和工业中的实际测量与国际标准联系起来,特别是国际单位制SI(Système International d'Unités),其基本要求是建立“一串不曾中断的文档记录或一条不曾中断的测量链路,以及与它们有关的不确定性”(Tansock等,

2015)。按照计量学的不确定性理论,遥感数据产品实现真正计量意义上的可追溯性依赖于3个原则:(1)产品和数据可以通过一个不断裂的链路追溯到SI;(2)分析整个传递链路中各因素的不确定性,计算数据和产品的总不确定性;(3)通过比对来验证数据和产品的不确定性(Mittaz等,2019)。

不确定性分析的目的是估计测量过程中与测量值相关的不确定性。测量值涉及控制、设置或测量的多个不同参数过程以及计算的结果。不确定度通过测量过程传播,为了准确获得不确定性的估计值,必须将过程中影响最终结果的每个因素产生的不确定性结合起来(Woolliams等,2015)。利用式(4)表征的测量模型,那么GUM计量规范定义的不确定度传播规律LPU(Law of Propagation of Uncertainty)可以由式(5)表示:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots) \quad (4)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (5)$$

式中, f 为测量模型, X_i 为测量模型的输入变量, Y 表示测量值, x_i 为变量 X_i 的一个估计值,其不确定度为 $u(x_i)$, $u_c^2(y)$ 为测量值 y 的标准不确定度(即概率分布的标准差)的平方,其受多个不同因素 x_i 影响,其不确定度由这些因素的不确定度合成得到。

根据不确定度传播原理,上式由两部分组成,

第一项为独立变量标准不确定度 $u(x_i)$ 乘以敏感系数 (偏微分部分) $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 的平方和, 第二项表征相关变量的协方差, 其表征两个因素影响测量值的关联程度。

3.1.3 运筹学的最优化理论

运筹学利用统计学、数学模型和算法等方法, 去寻找复杂问题中的最佳或近似最佳的解答 (胡晓东等, 2012)。作为现代管理学的重要基础, 其主要目的是在决策时为管理人员提供科学依据, 应用于数学和形式科学的跨领域研究。

对于真实性检验场网, 如何对既有场网资源进行统筹, 为用户提供更为多样化、高质量的服务, 就属于运筹学的范畴。其中, 组合最优化是较为适合解决此类问题的数学工具。组合最优化是通过数学方法的研究去寻找处理离散事件的最优编排、分组、次序或筛选等问题的优化方法, 能够从有限离散状态中选取最好的状态。这种优化问题一般可以描述为

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g(x) \geq 0 \\ x \in D \end{cases} \quad (6)$$

式中, $f(x)$ 是目标函数, $g(x) \geq 0$ 是约束条件, D 是定义域。

真实性检验场网所能提供的检验样本数据集资源是有限的, 其与日益增长的用户需求之间存在矛盾。采用运筹学理论平衡检验样本资源与用户需求, 可解决两个方面的具体问题: 一是在既定的场网规模下, 如何最大化发挥检验样本数据集资源的效益, 提升用户的服务满意度; 二是在不断服务用户的过程中, 对已有的场网能力进行优化, 例如在更多用户关注的区域加密观测等, 为用户需求导向的样本资源匹配与优化奠定科学基础。

3.2 陆地观测卫星真实性检验场网方法体系

3.2.1 真实性检验场网空间代表性表征方法

基于地统计学的空间变异理论, 结合特定空间结构下的真实性检验地面观测场网布局, 常采用空间聚类和变异函数相结合的方法进行不同站点空间代表性表征 (Matheron, 1963; 李志林等, 2017)。

(1) 基于聚类分析的代表性区域选取。对于 m 个指标描述的样本可以看成是 R^m 空间中的一个点, 基于闵氏 (Minkowski) 距离计算, 可知:

$$dis_q(x, y) = \left(\sum_{j=1}^m |x_j - y_j|^q \right)^{\frac{1}{q}} \quad (7)$$

式中, $dis_q(x, y)$ 为空间目标对象 x 与代表区域 (聚类中心) y 的闵氏距离, m 为待选目标的特征维度, 包括气温、降雨等气候特征, 草地、作物、森林等地表覆盖特征, 日照、辐射等光照条件特征, 以及生态环境规划、区域地理发展等人文经济特征, x_j 和 y_j 分别为 x 和 y 的第 j 个特征属性归一化值。

随机选取 K 个对象, 作为初始的代表区域 (聚类中心), 计算待分析目标样本点到各个聚类中心的距离, 并逐个分配到距离其最近的簇中。当空间内所有对象分配完成后, 更新 K 个聚类中心位置, 聚类中心定义为簇内所有对象在各个维度的均值, 并与前一次计算得到的 K 个聚类中心比较。如果聚类中心发生变化, 则重复计算当前每个样本到新聚类中心的距离并重新进行分配, 否则视当前结果为最优聚类分析结果, 输出目标对象所属区域, 完成代表区域选择。

(2) 基于变异函数的典型站点代表性分析。陆表空间均匀性是相对的, 异质性是绝对存在的。Román 等 (2013) 首次引入地统计工具, 即变异函数模型 $\gamma(h)$, 其通过一定距离内参数值的变异性表征, 用于评估站点测量的空间代表性。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (8)$$

式中, $Z(x_i)$ 是像素位置 x_i 的值; $Z(x_i + h)$ 是滞后距离 h 内另一个像素的值, $N(h)$ 是距离为 h 的样本数量。利用数学模型对变异函数进行拟合, 如图 2 所示, 模型参数包括变程 (range)、基台值 (sill) 和块金 (nugget) 等。

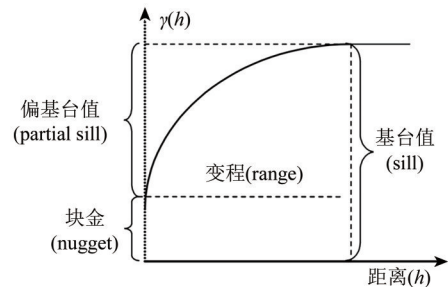


图2 变异函数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of variance function

基台值描述最大的半方差，表征陆表空间异质性，较小的基台值意味着更均匀的地表空间。通常情况下，当站点观测满足以下3种情况时，可认为该站点具有区域范围的空间代表性，即（1）变异函数模型的基台值足够小，使得陆面可以被视为完全均匀；（2）地面仪器的足迹接近或大于变异函数模型的基台值；（3）地面仪器的足迹与卫星遥感产品的空间分辨率相当。

随着陆表气候的季节性变化、土地利用方式的时间演变，以及突发性的土地覆盖状态变化，如土壤湿度、沉降等，特定条件下具有空间代表性的站网可能会随着时间变迁而逐渐变得“不具有代表性”。这说明，想要找到一个完全时空不变的理想真实性检验站点是非常困难的。航空飞行通过一次性获取大范围、与卫星同步的地表要素观测结果，可以更好地捕捉和表征地表参数的空间变异性，直接提供卫星像元尺度的“面”观测信息，可在一定程度上缓解真实性检验站点原位测量的局限性和低效率问题。

3.2.2 测量基准不确定性度量及传递方法

产品真实性检验涉及不同站点观测、不同检验场景、不同观测仪器，影响地面基准参考真值一致性的因素很多，给不同时间、不同站点地面测量真值的一致性保证带来了困难。根据计量学中量值溯源及不确定度分析原理，真实性检验中地面测量真值 Y 的测量模型如下式所示：

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, A, E, S) + \nabla \quad (9)$$

式中， X_1, X_2, \dots 表示输入量，对应某一参数测量仪器的测量数值； A 表示测量仪器的标定系数； E 表示对测量参数进行实验室—外场环境差异校正的参数； S 表示对多次测量值进行聚合或者尺度转换； ∇ 表示函数 f 无法完全表征所有影响地面测量真值的因素。

参考 GUM 计量规范中不确定度传播定律 (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008)，特定地面测量真值 y 的不确定度如下式所示：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left(\frac{\partial f}{\partial a_i} \right)^2 u^2(a_i) + \left(\frac{\partial f}{\partial e_i} \right)^2 u^2(e_i) + \left(\frac{\partial f}{\partial s_i} \right)^2 u^2(s_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) + 2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial a} u(x_i, a) + 2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial e} u(x_i, e) +$$

$$2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial s} u(x_i, s) + 2 \frac{\partial f}{\partial a} \frac{\partial f}{\partial e} u(a, e) + 2 \frac{\partial f}{\partial a} \frac{\partial f}{\partial s} u(a, s) + 2 \frac{\partial f}{\partial e} \frac{\partial f}{\partial s} u(e, s) \quad (10)$$

式中，等号右侧前4项为仪器测量数值、实验室标定系数、“实验室—外场”环境差异修正参数以及尺度转换的不确定度贡献，后7项表示了各相关因素间协方差的不确定度贡献，对于两因素影响独立时，对应项为0 (Ma等, 2020)。

对于单点验证结果（对应利用特定站点、特定时间的地面测量真值进行验证） y ，其对应不确定度为 $u(y)$ ，可以表示为两部分，一部分是对不同点验证结果影响独立因素的贡献 R ，另一部分是对不同点验证结果影响非独立因素的贡献 S ，那么 y_i 可以表示为下式 (Woolliams等, 2015)：

$$y_i = R_i + S \quad (11)$$

$$u(y_i) = \sqrt{u^2(R_i) + u^2(S)} \quad (12)$$

当使用多点进行重复验证的情况下，对多点验证结果进行综合的测量等式如下式所示：

$$m = \frac{\sum_{k=1}^N R_k}{N} + S \quad (13)$$

基于 GUM 的不确定度传播原理，多点验证结果的不确定度如下式所示：

$$u^2(m) = \left(\frac{1}{N} \right)^2 u^2(R_1) + \left(\frac{1}{N} \right)^2 u^2(R_2) + \dots + \left(\frac{1}{N} \right)^2 u^2(R_N) + u^2(S) \quad (14)$$

对于不同站点验证中不确定度影响独立的因素，其对不同站点验证的不确定度贡献相等，即：

$$u(R_1) = u(R_2) = \dots = u(R_N) = u(R) \quad (15)$$

结合上面两个公式，可以得到多点验证结果的不确定度，如下式所示：

$$u^2(m) = \frac{u^2(R)}{N} + u^2(S) \quad (16)$$

$$u(m) = \sqrt{\frac{u^2(R)}{N} + u^2(S)} \quad (17)$$

对比上述单点验证不确定度 $u(y_i)$ 和多点综合验证不确定度 $u(m)$ ，通过对多站点验证结果进行综合，能够在一定程度上降低单点验证结果的不确定度，并随着验证数量增加，验证结果的不确定度趋于稳定，验证结果的稳定性也将保证较高水平。

以地表反射率测量为例，不确定度的影响因素中存在独立性影响因素以及关联性影响因素 (Ma等, 2020)。独立性影响因素包括光谱仪噪声、光谱仪响应非线性、温度影响校正以及场地非均匀性等，关联性影响因素包括实验室定标基准、下行照度模拟涉及的影响因素 (太阳照度模型、MODTRAN模型、大气参数误差等)。在计算站点测量反射率的不确定度时，通过多次测量平均能够降低上述独立性因素的不确定度贡献，如上述式 (17) 所示。

与地基数据测量相似，通过航空飞行获取地面参数也是目前常用的测量手段，其优势在于快速获取多种类型的地面像元尺度参考真值。同一机载载荷的实验室标定不确定度和不同场景像元尺度真值的不确定度影响存在关联，而不同场景的非均匀性对像元尺度真值不确定度影响则是独立的。因此，在综合利用不同场景像元尺度真值时，可以通过尽可能多地覆盖不同类型场景的像元尺度真值，降低场景非均匀性独立因素影响从而提升综合验证结果的精度。

3.2.3 多途径检验结果综合定权合成方法

在利用多站点联合检验时，可以借鉴国际测量基准等效互认方法，将不同站点检验结果进行不确定度加权，给出综合检验结果及不确定度。对于多站点检验结果综合定权合成来说，不同站点检验结果的可溯源性和一致性是前提条件，其主要有两种手段，一种是将基准仪器送到专业计量机构的初级辐射基准 SI 进行比对及互认；另一种是利用溯源至 SI 的同一基准传递设备与不同场地测量设备进行比对，RadCalNet 即采用此种方式，由 NPL 负责研制标准传递辐射计，对不同国家的定标场自动观测设备进行现场比对，保证不同场地测量设备和标准辐射产品之间一致性。

在此基础上，依据 CCPR 关键比较 K1-a 方法 (Woolliams 等, 2006)，通过分析遥感产品真实性检验链路中各不确定度因素，核算单点单次检验结果的总体不确定度，并假设各检验样本相互独立，根据每个检验样本的总体不确定度来确定其相应的权重系数，进而获取更接近于“真实值”的关键比较参考值 (KCRV) 及其总体不确定度，实现单场地单次检验结果的对比和综合分析。这里的 KCRV 可表示为

$$\text{KCRV} = w_1 R_1 + w_2 R_2 + \dots + w_N R_N \quad (18)$$

式中， w_i ($i = 1, \dots, N$, N 为样本个数) 为样本 i 的权重系数， R_i 为基于样本 i 的检验结果。式 (18) 中，不同样本代表真实性检验网中的不同站点获取的像元尺度真值，在对多站点像元尺度真值不确定度量化的基础上，通过检验结果综合定权降低产品检验总体不确定度，得到稳定性更高的产品检验结果。当然，多途径检验结果综合定权的前提是保证不同途径检验结果的一致性，需要将不同站点、不同平台获取的像元尺度真值进行实验室 SI 统一基准溯源。

3.2.4 样本集与待检产品的最优匹配方法

采用运筹学的组合优化理论来协调检验样本资源与用户需求之间的矛盾，需要首先对两者的内涵及其关系进行厘定。

由地基站点测量、航空飞行试验或数字场等多种途径获取的检验样本资源，可以表示为一系列属性描述的集合 $\mathbf{R} = \{r_c, r_l, r_t, r_s, r_f, r_q, r_u, \dots\}$ ，至少包括：样本类别 (r_c)、样本地理位置 (r_l)、样本采集时间 (r_t)、样本地理环境代表性 (r_s)、样本采集空间尺度 (r_q)、样本采样频次 (r_f)、样本处理质量控制标识 (r_q)、样本不确定度 (r_u) 等多种要素。同时，将第 i 个站点 (或第 i 次飞行) 获取的第 j 种样本资源属性表示为 $\mathbf{R}_{i,j}$ ，则可构建关于所有检验样本资源属性的描述矩阵 \mathbf{R} 。

与之相对应的，用户需求度矩阵 \mathbf{D} ，可以表示为考虑用户检验产品类型 (d_c)、检验产品覆盖空间范围及地理代表性 (d_l)、检验产品覆盖时间范围 (d_t)、产品分辨率 (d_{res})、检验频次 (d_f)、检验时效性 (d_e) 等多种因素。同时，对于不同的需求维度，采用经验或既有需求满足度量评估等形式得到对应需求因素权重 (w_c, w_l, \dots)。对于每一次特定的任务 (i) 需求，则可采用检验效果与用户需求之间的加权距离表征为对应的满意度 (S_i)，具体表示为

$$S_i = \sqrt{\sum w_j (d_j - \tilde{d}_j)^2} \quad (19)$$

式中，下标 j 表示了不同的需求因素， d 和 \tilde{d} 分别表示检验效果与用户需求。

根据上述资源与需求矩阵，既可实现面向特定需求的最小化资源组合，也可聚焦多种用户的需求，对真实性检验场网资源进行重新优化配置。

(1) 面向用户检验需求的检验样本资源组合优化。首先，分析不同需求与所使用实际资源的关系，建立需求与资源的映射关系模型 $f(\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{D})$ 。需注意的是，映射关系的建立需考虑真实性检验所遵循的其他理论或规律，例如待检验产品与检验样本资源之间的时空尺度差异要求、单次检验的最少样本需求数量等。而后，即可根据用户需求以及已有资源推测出潜在的用户满意度 (\dot{S}) ，其表示为 $f(\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{D})$ 以及用户需求 $\tilde{\mathbf{D}}$ 的函数 (g) ：

$$\dot{S} = g(f(\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{D}); \tilde{\mathbf{D}}) \quad (20)$$

而进行组合优化，实现聚焦与用户服务的资源配置，数学上就是最小化资源条件下的最大化 \dot{S} 的问题。为此，构建表征满足用户需求资源效率的函数 h ：

$$h = \begin{pmatrix} R_1/g(f(R_1 \rightarrow \mathbf{D}); \tilde{\mathbf{D}}) \\ R_2/g(f(R_2 \rightarrow \mathbf{D}); \tilde{\mathbf{D}}) \\ \vdots \\ R_n/g(f(R_n \rightarrow \mathbf{D}); \tilde{\mathbf{D}}) \end{pmatrix} \quad (21)$$

式中， R_i 表示 \mathbf{R} 中某个站点的资源向量。定义 $h(x)$ 为从所有站点中筛选出 x 个站点资源。则最优的检验样本资源配置，就是下述问题的组合规划：

$$\begin{cases} \min h(x) \\ s.t. x \in \mathbf{R} \end{cases} \quad (22)$$

(2) 用户需求聚焦的真实性检验场网资源优化。聚焦用户需求的另一目的是实现场网资源的优化。定义场网总体效能为 eff ，其表征多个用户满足度 S 的函数： $eff = E(S)$ 。为了最大化综合效能，采用体系贡献度的方法，可以计算特定资源（例如某个特定站点）对总体发挥效能的贡献度。尽管目前学界关于体系贡献度还没有各方都能满意的定义，一般来说主要指一系统在加入体系或替换体系中相关系统后，体系整体评价指标的变化，即第 n 个站点引入后的体系贡献度 G_n 可表示为

$$G_n = (eff_n - eff_0)/eff_0 \quad (23)$$

式中， eff_0 表示体系中不含系统 n 时的整体评估值， eff_n 表示体系中含系统 n 时的整体评估值。结合具体检验服务的用户满足度，就可对不同站点的体系贡献度更新迭代，并将观测资源向贡献度较大的站点倾斜，实现聚焦用户需求导向的场网资源优化。

4 陆地观测卫星真实性检验场网技术方案

随着国家民用空间基础设施建设的持续投入，空间信息资源服务利用不断拓展，各领域、各行业深化应用的需求愈发迫切。立足新阶段，统筹建设完善面向高质量应用的国家级真实性检验场网，综合利用各类平台条件与数据资源，有效支撑多类型卫星产品的数据质量综合评测，对遥感产品真实性检验的技术实现和服务模式提出了更高的要求：

(1) 检验对象：随着遥感卫星服务行业领域的范畴不断扩展，行业应用对于遥感产品的需求更加丰富，以空基卫星任务需求为例，覆盖自然资源、生态环境、应急减灾、农业农村等13个行业的主体业务，涉及几何、辐射、陆表、植被、大气、水表共计6类32种共性产品。

(2) 检验区域：遥感技术惠及多领域应用，遥感产品真实性检验需要面向多元化场景，在更多的地理环境与生态系统背景下开展。在时空布局合理性的原则下，需充分利用已有站点的观测基础，考虑新载荷新产品的检验需求，尽可能涵括中国典型地理单元、典型生态系统，关注湿地、荒漠、高海拔山地等复杂环境和可达性差的地理空间区域。

(3) 检验手段：当前陆地观测卫星遥感产品序列日益丰富，载荷集成协同与多谱信息融合不断突破，新体制新载荷生成新产品，实现多种产品综合检验的需求愈加突出。利用航空协同测量的方式进行同一检验区域多类自然场景地面真值协同获取，引入国际共享站网获得境外地面真值数据、进而构建全球数字化检验场，综合采用多种检验手段强化共性产品的协同检验，可有效提升国产卫星在全球范围内的产品价值，为中国遥感产品“走出去”打好技术基础。

(4) 检验精度：是否具有明确的检验精度及可信度，成为用户选择检验数据及方法的首要因素。当前急需开展真实性检验场网参考真值获取全链路各环节不确定度分析和质量控制，建立“实验室计量基准→外场点尺度测量→卫星像元尺度地面真值”各环节的不确定度量化标识，保证地面测量真值的精度和一致性。

(5) 检验频次：当前多星协同乃至星座观测

能力逐渐形成,同一观测要素获取的时间分辨率得到较大提升,需要根据不同产品的时空变化特性,结合卫星重访周期,优化设计检验频次,如几何、地表覆盖等时间变化较小,而积雪覆盖等多在冬季开展观测实验,遥感产品检验频次较低;辐射、植被、陆表类产品由于季节变化,需在植被生长期加密检验频次;大气要素产品具有瞬变性,兼之相关卫星重访周期相对较短,检验频次可进一步提升。

(6) 服务模式:需综合考虑多样化的检验需求,形成多模式的共性产品真实性检验服务能力。多途径的检验数据需要给出量化不确定度标识,

方便用户选择使用,还可根据用户需求提供定制化检验服务,面向卫星主用户业务化应用定期提供主动服务,从而更有效地支撑行业应用及科学研究。

依据前文述及的真实性检验场网理论方法体系,文章提出了如图3所示的中国陆地观测卫星真实性检验场网技术方案,“观测—试验—模拟—服务”一体统筹建设完善真实性检验站网、航空协同真实性检验系统、基准参考构建及传递系统和高精度检验服务系统共4个部分,并制定完善仪器设备、真值溯源、检验样本、运行管理、检验服务等陆地观测卫星相关数据信息产品标准规范。

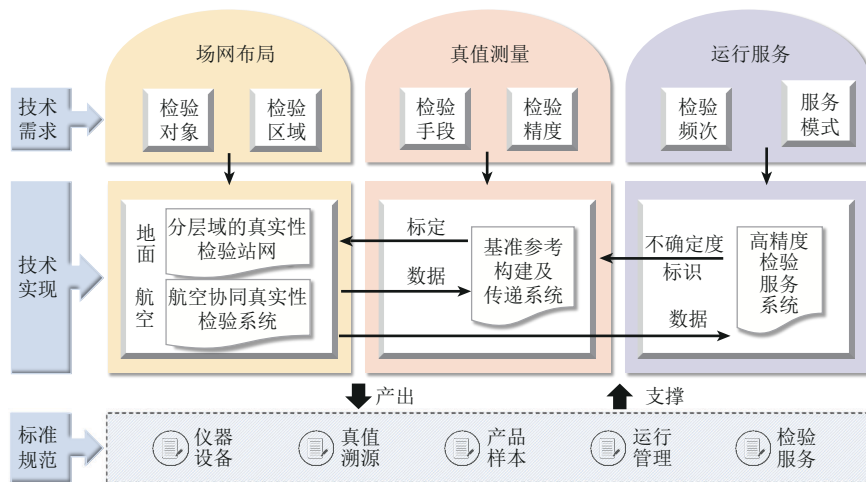


图3 陆地观测卫星真实性检验场网建设内容

Fig. 3 Construction content of the validation network for land observation satellites

4.1 分层域的真实性检验站网

根据真实性检验场网空间代表性表征方法,进一步结合中国生态地理区划特征,同时考虑中国农业、林业、生态环境区划,以及粮食安全、双碳战略等重大应用和区域国家战略及地方需求,开展中国区域真实性检验地面观测场网分区设计,本文将中国划分东北、华北、黄淮海、长江中下游、华南、西北、西南、新疆共8大生态地理区域(表2)。

在此基础上,根据站点遴选原则形成真实性检验站点布局方案:(1)涵盖中国典型地理单元和典型生态系统;(2)合理的时空布局;(3)良好的运行能力保障和研究基础支撑;(4)充分吸纳具备遥感观测能力的已有站点(中国生态系统研究网络、国家林业生态定位研究网络、大气环境网、海洋网、空基真实性检验网、高分真实性

检验网等);(5)支持陆地、海洋、大气和几何等多类产品检验;(6)对新型载荷的产品具有检验潜力,场地能力拓展性强。在有效体现地理生态多样性的基础上,在不同区域内进一步结合未来卫星产品发展格局,按照层级化网络架构科学补充和优化完善既有站点分布,布局覆盖全国的真实性检验站点,建立如图4所示的“主中心—核心站—典型站”3大层级的常态化真实性检验站网系统。

“主中心”负责检验站网常态化运行和站点考核管理工作,组织建立真实性检验站网系统的质量管理体系并监督执行,组织开展真实性检验理论研究、基准系统传递维持、标准规范研制等工作。主中心在真实性检验站网架构中扮演着至关重要的基石角色,是整个观测网络的中枢和物理核心。

表2 陆地卫星真实性检验场网的区域划分
Table 2 Ecogeographic regional division of remote sensing products validation network for the validation of Chinese land observation satellite

分区	省市自治区
东北地区	黑龙江省、吉林省、辽宁省
华北地区	内蒙古自治区、河北省、山西省、北京市、天津市
西北地区	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区
新疆地区	新疆维吾尔自治区
西南地区	四川省、重庆市、贵州省、云南省、西藏自治区
华南地区	广东省、海南省、台湾省、广西壮族自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区
黄淮海地区	山东省、河南省、安徽省、江苏省
长江中下游地区	湖北省、湖南省、江西省、福建省、浙江省、上海市

“核心站”负责区域范围内的高质量基准参考观测 (FRM) 构建和管理的工作，组织和协调地理

分区内站点的高精度协同测量任务实施，建立长序列、高精度、可自主核定观测质量的高可信度地面真值观测数据集，提高数据的可信度和权威性。核心站在整个真实性检验站网架构中发挥核心纽带作用，向上承接主中心的目标任务，向下实施多要素的网络化、协同式测量计划任务。

“典型站”是检验场网数据采集的基础单元，站点布局涵盖中国主要地理区域和主要生态系统类型，每个站点按照统一的技术规范布设长期观测样地，提供直接、持续的具有类型多样性和地域代表性的定点观测数据。典型站由覆盖全域的真实性检验站点组成，针对辐射、植被、大气、陆表、水体、几何等6大类检验样本采集，完成现场测量技术方案制定、测量任务开展、误差控制及成果汇交等工作，是核心站点观测能力的有效补充。

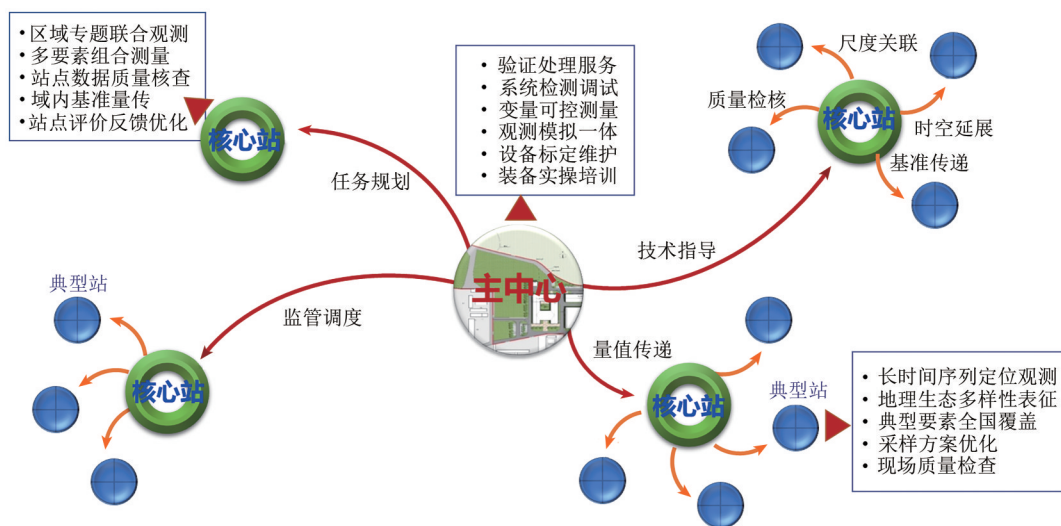


图4 “主中心—核心站—典型站”三级架构

Fig. 4 Three-level architecture of diagram of primary center site, core site, typical site

“主中心—核心站—典型站”紧密衔接，协同运转，主中心通过站网优化、测量计划制定、标准宣贯、数据管理和共享等工作，带动核心站和典型站共同完成站网观测目标任务、技术管理和质量管理。通过建设辐射基准传递链路，加强对站点测量数据质量的控制，定期对各站点进行考核；优化数据处理方法，开发地面数据预处理系统，“规划设计—运行监管—质量控制—测试评价”一体，实现站网观测数据的高质量处理与服务。核心站通过细化对自身站点和周边典型站的建设与观测计划，协助管理区域内的典型站，提

高区域相关站点的运行效率和数据质量。典型站以自动化测量为主，辅以少量人工观测，落实典型观测区的观测，与“核心站”联合开展区域特色的多站协同、多要素综合联动观测，由“核心站”提供技术培训、仪器基准传递和定标等支持，实现站区检验样本的高效率、高精度地面测量。

4.2 航空协同真实性检验系统

地物场景的空间变异随着卫星分辨率的提高更为显著。地面定点观测通常代表仪器所覆盖的空间范围内的参数特征，很难完整描述更大尺度上的要素特性。航空协同真实性检验系统搭载经

过高精度定标的高空间/光谱/辐射分辨率探测载荷, 具有综合观测能力强、载荷灵活可配置、区域响应迅速等特点, 在区域范围全方位获取多样化的地物场景特性, 可以更好地捕捉和表征地表参数的空间变异性和多要素耦合特征, 与检验站点定位观测形成互补。

航空协同真实性系统, 空地一体实现多尺度嵌套, 构建形成从原位观测的“点”、巡航式地面移动车的“线”、航空观测的“面”, 到卫星观测的“域”的跨平台、体系完备、优势互补的综合实验观测技术体系, 如图5所示。



图5 航空协同真实性检验系统组成

Fig. 5 Composition of collaborative airborne experimental system

航空协同真实性检验系统建设主要包括以下内容:

(1) 研制集成化、机动化的星—机—地协同综合实验观测系统。重点构建涵盖辐射、散射和三维等多特性航空综合观测平台, 形成载荷优化配置、飞行协同控制的航空飞行观测系统; 同步构建陆地/水域走航观测平台, 形成灵活配置、机动高效的陆表移动观测系统。具备定制化采集能力, 可按需组合集成载荷以及平台, 实现高效化、精细化实验观测。

(2) 构建面向生态、双碳等主题应用和区域发展需求的综合实验场。凝练强化场地的主题化观测目标, 结合场地地表要素反演特性和时空分布, 建设覆盖中国东北、华北、西北、华中、西南和华南等自然地理区域的综合实验场。形成多要素协同、多尺度嵌套的综合实验观测方案, 设计并实施星空地一体化、点线面域相结合的综合观测实验, 生成高质量的地面验证数据集。

4.3 基准参考构建及传递系统

卫星像元尺度地面参考真值的获取过程包括外场设备溯源标定、采样测量、尺度转换以及像元尺度真值合成等多个环节。通过多级参考基准传递和真值获取全流程不确定度量化, 实现地面真值测量数据向统一基准参考溯源, 进而实现真实性检验网中地面测量真值的一致性保证。

外场设备溯源标定需要构建溯源基准, 包括环境可控的实验室基准和具有原位标定能力的外场基准参考。其中, 环境可控的实验室基准参考通过外场工况环境模拟及实验室量值溯源设备建设, 解决野外环境差异影响及高精度标定问题, 实现场站网测量设备向实验室统一基准溯源。具有原位标定能力的外场基准参考由辐射、植被、陆表、水体、大气等多类型外场基准传递设备组成, 通过对不同站点测量设备进行原位标定, 解决外场测量设备标定中环境差异影响及标定时效

性问题，保证各真实性检验场站测量设备的可溯源性和一致性。

通过以上基准参考的建设，形成一套室内外相结合的溯源基准及传递系统，建立“基准实验

室→核心站量传设备→典型站野外测量设备→遥感产品像元尺度参考真值”链路的量值传递链路，如图6所示。

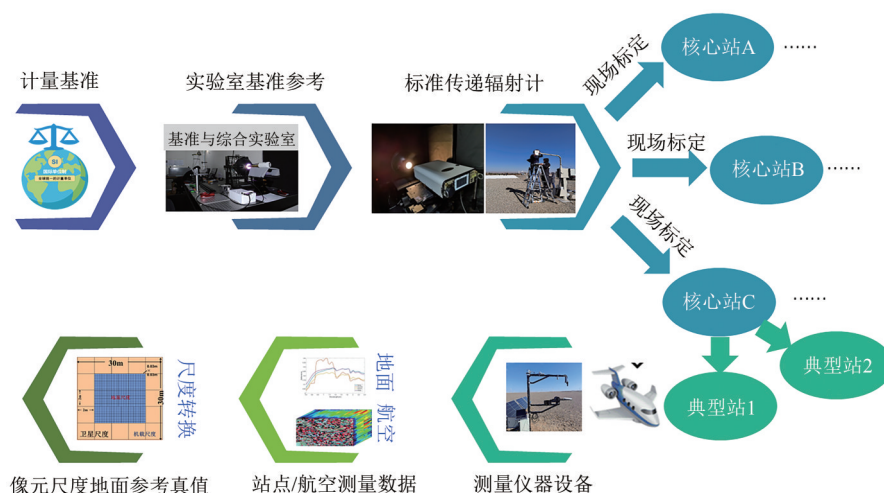


图6 真实性检验中像元尺度参考真值获取基准传递链路

Fig. 6 Benchmark transfer chain for acquiring pixel-scale ground truth validation

(1) 环境可控的实验室基准参考可追溯至国家基准，即：“国家计量基准→实验室基准参考”，具有对标外场环境条件的不同环境参数（如环境温度、环境湿度等）的调控能力，用于外场基准传递设备和外场测量仪器设备的标定、测量仪器设备现场标定不确定度评估等，其与国家计量机构所建设国家基准的不同之处在于测试环境可控，例如：温度调节范围： $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，湿度调节范围： 0% — 100% 。

(2) 可原位标定的外场基准参考可追溯至实验室基准参考，即：“实验室基准参考→外场基准参考”，其建设于站点或由一组外场基准传递设备组成，用于对外场测量仪器设备的现场标定，降低“实验室—外场”环境差异引起的标定不确定度，其便携、可移动等特点有助于保证部署于不同站点的测量仪器设备向统一基准参考溯源。

(3) “点”→“面”尺度转换不确定度量系统，针对尺度转换模型、方法验证与不确定度评估需求，开展多类型自然场景多维度多要素观测，定量分析验证像元尺度真值尺度转换过程的不确定度贡献。涉及“测量仪器设备→像元尺度真值”的基准传递链路，在站点测量数据的基础上，对采样策略、尺度转换等数据处理引起的不确定度

进行分析，确保不同站点提供像元尺度真值的可溯源性和一致性。

室内外相结合的溯源基准及传递系统重点考虑“实验室—外场”的环境差异，尽量消除不同站点、不同环境差异引起的测量值差异，保证真实性检验中各站点、各测量手段和仪器设备测量值的基准一致性，解决测量值不确定度“说不清”的问题，并通过综合定权进一步提升产品检验精度和稳定性。

4.4 高精度检验服务系统

真实性检验站网、航空协同真实性检验系统和基准参考构建及传递系统提供了在全国不同地理环境条件下，开展高质量测量以及数据处理的基础条件。但面向不同区域、行业与领域的用户，如何实现对数据的精准一致处理与质量标识，提供以用户需求为导向的灵活多元服务，也是需要重点考虑的问题。高精度检验服务系统是陆地观测卫星真实性检验场网的总体外部接口，解析用户需求以及待检产品，收集处理真实性检验场网数据，提供多元业务化检验服务，进行全过程量值溯源与质量标识，并向用户提供最终检验报告。图7为高精度检验服务系统流程的示意。

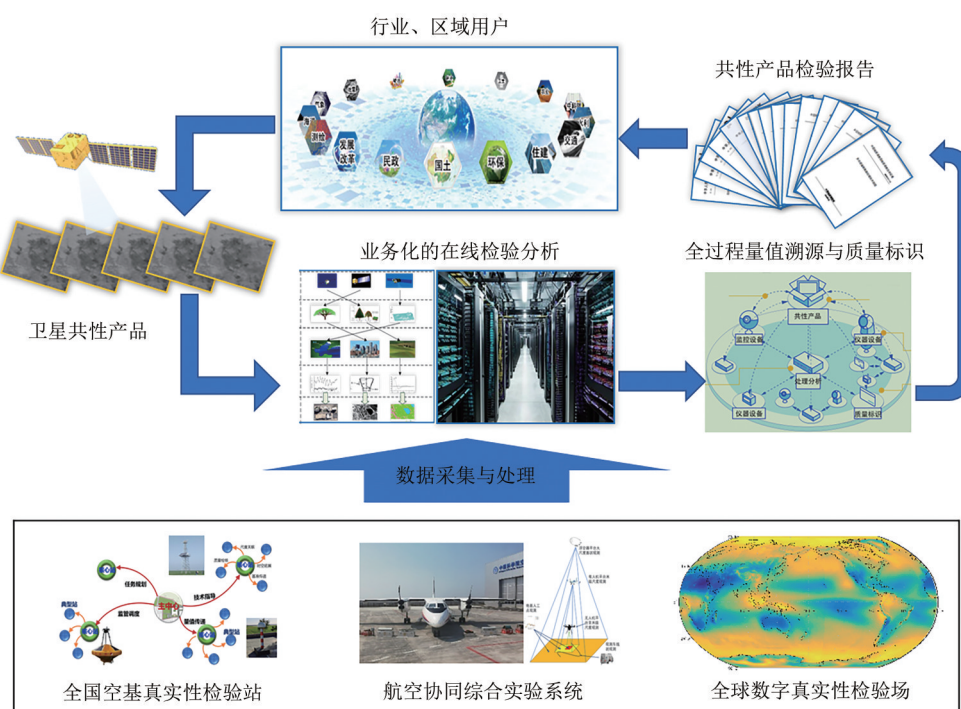


图7 真实性检验技术体系高精度检验服务流程

Fig. 7 High-accuracy validation service process in the validation technology system

高精度检验服务系统除了具有基本的场网监控和数据管理能力之外，将强化如下功能：

(1) 真实性检验样本数据高精度处理：基于基准参考构建及传递系统，发展形成一系列可用于不同要素不同尺度真值的标准化处理方法，实现对真实性检验站网数据、航空协同真实性检验系统飞行数据的业务化一致性处理，获得高精度和高一致性的真实性检验样本数据集。

(2) 全过量量值溯源与质量标识：遵循测量基准不确定性传递方法，给出不同时间、不同环境下真实性检验样本数据的不确定度量质量标识，结合多途径检验结果综合定权合成，支持共性产品检验结果的全过程溯源。

(3) 全球数字化真实性检验：引接国内外合作站网数据，持续积累境外典型区域卫星产品及再分析资料，评估合作站网与本体站网的一致性 & 处理环节不确定性，提供全球典型地理环境下的产品检验服务，作为“无场地验证”思想的实践和探索。

(4) 多元化、动态化的用户服务：针对多领域、多场景、长周期的产品检验需求，提升场网资源调度、任务智能规划、服务柔性定制等能力，向用户提供在线的产品检验与质量评价服务，为重大应用与复杂业务场景提供流程嵌入式的可靠

检验保障。

5 结 语

遥感产品真实性检验是衔接遥感数据产品与应用服务的重要过程，开展真实性检验理论与技术方法研究，推进真实性检验场网系统建设与服务，为多品类遥感产品提供高精度验证和质量评价，是推动遥感产业规模化发展的关键环节。本文以“特性表征—要素测量—样本优化—弹性服务”为目标，结合中国区域及不同领域生态地理区划特征和已有站点布局，给出了真实性检验站网的分层域布局方案；提出协同采样“点”测量及航空“面”测量，基于真实性检验基准的像元尺度真值的获取方案；面向多类型产品的多场景应用，发展真实性检验样本集与待检产品的最优匹配与可信服务。

随着定量遥感产品应用范畴及深度的不断扩展，真实性检验场网的发展迫切需要在遵循地理、物理等学科基本理论的基础上，融合计量、统计、运筹等数学方法，形成指导场网建设、运行、优化的系统性解决方案。陆地观测卫星真实性检验场网的建设是一个系统性工程，涉及到多个学科领域，相应的理论框架和方案也需要不断地补充改进。统筹建设、发展完善以应用为导向、科学

合理、客观量化、常态运行的国家级真实性检验场网基础设施, 是支持国产陆地卫星遥感产品的高质量应用和国际化服务的根本。

志 谢 感谢国家民用空间基础设施地面系统建设项目和陆地观测卫星真实性检验场网系统工程研制团队的支持!

参考文献(References)

- Baret F, Morisette J T, Fernandes R A, Champeaux J L, Myneni R B, Chen J, Plummer S, Weiss M, Bacour C, Garrigues S and Nickeso J E. 2006. Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and intercomparison of land biophysical products: proposition of the CEOS-BELMANIP. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1794-1803 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.876030]
- Bauer P, Dueben P D, Hoefler T, Quintino T, Schulthess T C and Wedi N P. 2021. The digital revolution of earth-system science. *Nature Computational Science*, 1(2): 104-113 [DOI: 10.1038/s43588-021-00023-0]
- Bouvet M, Thome K, Berthelot B, Bialek A, Czaplá-Myers J, Fox N P, Goryl P, Henry P, Ma L L, Marcq S, Meygret A, Wenny B N and Woolliams E R. 2019. RadCalNet: A Radiometric Calibration Network for Earth Observing Imagers Operating in the Visible to Shortwave Infrared Spectral Range. *Remote Sensing*, 11(20): 2401 [DOI: 10.3390/rs11202401]
- Breton E, Bouillon A, Gachet R and Delussy F. 2002. Pre-flight and in-flight geometric calibration of SPOT5 HRG and HRS images. [2024-02-22]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2871044>
- Brown L A, Camacho F, García-Santos V, Origo N, Fuster B, Morris H, Pastor-Guzman J, Sánchez-Zapero J, Morrone R, Ryder J, Nightingale J, Boccia V and Dash J. 2021. Fiducial reference measurements for vegetation bio-geophysical variables: an end-to-end uncertainty evaluation framework. *Remote Sensing*, 13(16): 3194 [DOI: 10.3390/rs13163194]
- Campbell J L, Burrows S, Gower S T and Cohen W B. 1999. Bigfoot Field Manual, Version 2.1. Oak Ridge National Lab. (ORNL) [DOI: 10.2172/13418]
- Chander G, Xiong X X, Choi T and Angal A. 2010. Monitoring on-orbit calibration stability of the Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites. *Remote Sensing of Environment*, 114(4): 925-939 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.003]
- Colliander A, Jackson T J, Bindlish R, Chan S, Das N, Kim S B, Cosh M H, Dunbar R S, Dang L, Pashaian L, Asanuma J, Aida K, Berg A, Rowlandson T, Bosch D, Caldwell T, Caylor K, Goodrich D, Al Jassar H, Lopez-Baeza E, Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Livingston S, Mcnairn H, Pacheco A, Moghaddam M, Montzka C, Notarnicola C, Niedrist G, Pellarin T, Prueger J, Pulliainen J, Rautiainen K, Ramos J, Seyfried M, Starks P, Su Z, Zeng Y, Van Der velde R, Thibeault M, Dorigo W, Vreugdenhil M, Walker J P, Wu X, Monerris A, O'neill P E, Entekhabi D, Njoku E G and Yueh S. 2017. Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites. *Remote Sensing of Environment*, 191: 215-231 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.021]
- Fang H L, Che T, Jin R, Li A N, Li X, Li Z Y, Liu S M, Ma M G, Xiao Q and Zhang Y G. 2021. On the construction of China's fiducial reference measurement network for land surface remote sensing product validation. *Advances in Earth Science*, 36(12): 1215-1223 (方红亮, 车涛, 晋锐, 李爱农, 李新, 李增元, 刘绍民, 马明国, 肖青, 张永光. 2021. 建设中国陆表遥感产品真实性检验基准台站网络的思考. *地球科学进展*, 36(12): 1215-1223) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.003]
- Frederic B, Weiss M, Allard D, Garrigues S, Leroy M, Jeanjean H, Fernandes R, Myneni R, Privette J and Morisette J. 2005. VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products. *Remote Sensing of Environment* 76 (3):36-9.
- Friedl M A, Davis F W, Michaelsen J and Moritz M A. 1995. Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables: an analysis using a scene simulation model and data from FIFE. *Remote Sensing of Environment*, 54(3): 233-246 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00156-5]
- Gao C X, Liu Y K, Liu J R, Ma L L, Wu Z F, Qiu S, Li C R, Zhao Y G, Han Q J, Zhao E Y, Qian Y G and Wang N. 2020. Determination of the key comparison reference value from multiple field calibration of Sentinel-2B/MSI over the Baotou site. *Remote Sensing*, 12 (15): 2404 [DOI: 10.3390/rs12152404]
- Gao H L, Gu X F, Zhou X, Yu T and Wang Y X. 2023. Analysis of the development trend of Chinese remote sensing validation sites and infrastructure construction. *National Remote Sensing Bulletin*, 27 (5): 1088-1098 (高海亮, 顾行发, 周翔, 余涛, 王艺学. 2023. 中国遥感真实性检验基础设施建设发展态势分析. *遥感学报*, 27 (5): 1088-1098) [DOI: 10.11834/jrs.20231694]
- Goryl P, Fox N, Donlon C and Castracane P. 2023. Fiducial reference measurements (FRMs): what are they? *Remote Sensing*, 15(20): 5017 [DOI: 10.3390/rs15205017]
- Gube M, Gärtner V and Schmetz J. 1996. Analysis of the operational calibration of the Meteosat infrared-window channel. *Meteorological Applications*, 3(4): 307-316 [DOI: 10.1002/met.5060030403]
- Hu X D, Yuan Y X, Zhang X S. 2012. Review and prospect for the development of operations research. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 27(2): 145-160 (胡晓东, 袁亚湘, 章祥荪. 2012. 运筹学发展的回顾与展望. *中国科学院院刊*, 27(2): 145-160) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.02.003]
- Huang T Q and Niu D. 2005. Chinese ecosystem research network (CERN)- basic information, achievements and perspectives. *Advances in Earth Science*, 20(8): 895-902 (黄铁青, 牛栋. 2005. 中国生态系统研究网络(CERN): 概况、成就和展望. *地球科学进展*, 20(8): 895-902) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2005.08.0895]
- Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, Chen Y J and Zhu M J. 2012. Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D13): D13113 [DOI: 10.1029/2011JD017037]

- Jimenez-Berni J A, Deery D M, Rozas-Larraondo P, Condon A G, Rebetzke G J, James R A, Bovill W D, Furbank R T and Sirault X R. 2018. High throughput determination of plant height, ground cover, and above-ground biomass in wheat with LiDAR. *Frontiers in Plant Science*, 9: 237 [DOI: 10.3389/fpls.2018.00237]
- Jin R, Li X, Ma M G, Ge Y, Liu S M, Xiao Q, Wen J G, Zhao K, Xin X P, Ran Y H, Liu Q H and Zhang R H. 2017. Key methods and experiment verification for the validation of quantitative remote sensing products. *Advances in Earth Science*, 32(6): 630-642 (晋锐, 李新, 马明国, 葛咏, 刘绍民, 肖青, 闻建光, 赵凯, 辛晓平, 冉有华, 柳钦火, 张仁华. 2017. 陆地定量遥感产品的真实性检验关键技术与试验验证. *地球科学进展*, 32(6): 630-642) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.06.0630]
- Joint Committee for Guides in Metrology. 2008. JCGM 100: evaluation of measurement data - guide to the expression of uncertainty in measurement. [2024-02-22]. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6
- Justice C, Belward A, Morisette J, Lewis P, Privette J and Baret F. 2000. Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 21(17): 3383-3390 [DOI: 10.1080/014311600750020000]
- Kerr Y H, Al-Yaari A, Rodriguez-Fernandez N, Parrens M, Molero B, Leroux D, Bircher S, Mahmoodi A, Mialon A, Richaume P, Delwart S, Al Bitar A, Pellarin T, Bindlish R, Jackson T J, Rüdiger C, Waldteufel P, Mecklenburg S and Wigneron J P. 2016. Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation. *Remote Sensing of Environment*, 180: 40-63 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.042]
- Li C R, Ma L L, Tang L L, Gao C X, Qian Y G, Wang N and Wang X H. 2021. A comprehensive calibration site for high resolution remote sensors dedicated to quantitative remote sensing and its applications. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 198-219 (李传荣, 马灵玲, 唐伶俐, 高彩霞, 钱永刚, 王宁, 王新鸿. 2021. 面向定量遥感的高分辨率遥感综合定标场及其应用. *遥感学报*, 25(1): 198-219) [DOI: 10.11834/jrs.20210326]
- Li Z L, Liu Q L and Tang J B. 2017. Towards a scale-driven theory for spatial clustering. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1534-1548 (李志林, 刘启亮, 唐建波. 2017. 尺度驱动的空间聚类理论, *测绘学报*, 46(10): 1534-1548) [DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170275]
- Li Z N and Pan W Q. 2010. *Econometrics*. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press (李子奈, 潘文卿. 2010. 计量经济学. 3版. 北京: 高等教育出版社)
- Ma L L, Zhao Y G, Woolliams E R, Dai C H, Wang N, Liu Y K, Li L, Wang X H, Gao C X, Li C R and Tang L L. 2020. Uncertainty analysis for RadCalNet instrumented test sites using the Baotou sites BTCN and BSCN as examples. *Remote Sensing*, 12(11): 1696 [DOI: 10.3390/rs12111696]
- Matheron G. 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58(8): 1246-1266 [DOI: 10.2113/gsecongeo.58.8.1246]
- Mittaz J, Merchant C J and Woolliams E R. 2019. Applying principles of metrology to historical Earth observations from satellites. *Metrologia*, 56(3): 032002 [DOI: 10.1088/1681-7575/ab1705]
- Moreno J, Alonso L, Fernández G, Fortea J, Gandía S, Guanter L, García J, Martí J, Melia J, De Coca F, García-Haro J, Martínez B, Verger A, Sobrino J, Cuenca J, Jiménez J, Sòria G, Romaguera M, Zaragoza M, Martínez-Lozano J, Utrillas M, Estellés V, Gómez J, Calpe-Maravilla J, Vila-Frances J, Ferrer F L, Belmonte A, Piqueras J, Moratalla A, Cuesta A, Rubio E, Riquelme F, Ramos A, García F, Cruz A, Corcoles H, Urrea RL, Pujadas M, Molero F, Herranz A, Habermeyer M, Bachmann M, Holzwarth S, Muller A, Frederic B, Beal D, D'Urso G, Giorgioggia R, Lazzaro U, Boussemma R, Abdelfattah R, Bouchnak H, Roujean J, Samain O, Blanchi R, Davidson M. 2004. The SPECTRA Barrax Campaign (SPARC): Overview and First Results from CHRIS Data. European Space Agency
- Morisette J, Privette J L, Justice C, Olson D, Dwyer J L, Davis P, Starr D and Wickland D. 1999. The EOS Land Validation Core Sites: Background Information and Current Status. NASA
- Nappo C J, Caneill J Y, Furman R W, Gifford F A, Kaimal J C, Kramer M L, Lockhart T J, Pendergast M M, Pielke R A, Randerson D, Shreffler J H and Wyngaard J C. 1982. The workshop on the representativeness of meteorological observations, June 1981, Boulder, Colo. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(7): 761-764
- Origo N, Gorroño J, Ryder J, Nightingale J and Bialek A. 2020. Fiducial Reference Measurements for validation of Sentinel-2 and Proba-V surface reflectance products. *Remote Sensing of Environment*, 241: 111690 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111690]
- Román M O, Gatebe C K, Shuai Y M, Wang Z S, Gao F, Masek J G, He T, Liang S L and Schaaf C B. 2013. Use of in situ and airborne multiangle data to assess MODIS- and Landsat-based estimates of Directional Reflectance and Albedo. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1393-1404 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2243457]
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2018. GB/T 36296-2018 Guide for the validation of remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2018. GB/T 36296-2018 遥感产品真实性检验导则. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2020. GB/T 39468-2020 General methods for the validation of terrestrial quantitative remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2020. GB/T 39468-2020 陆地定量遥感产品真实性检验通用方法. 北京: 中国标准出版社)
- Selection and arrangement of the surface observation field for the validation of terrestrial remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022. GB/T 41540-2022 陆地遥感产品真实性检验地面观测场的选址和布设. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2021a. GB/T 40033-2021 Validation of land surface evapotranspiration remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会)

- 会. 2021a. GB/T 40033-2021 地表蒸散发遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2021b. GB/T 40034-2021 Validation of leaf area index remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2021b. GB/T 40034-2021 叶面积指数遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2021c. GB/T 40038-2021 Validation of vegetation index remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2021c. GB/T 40038-2021 植被指数遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2021d. GB/T 40039-2021 Validation of soil moisture remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2021d. GB/T 40039-2021 土壤水分遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2022a. GB/T 41279-2022 Validation of albedo remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022a. GB/T 41279-2022 反照率遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2022b. GB/T 41281-2022 Validation of photosynthetically active radiation remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022b. GB/T 41281-2022 光合有效辐射遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2022c. GB/T 41282-2022 Validation of fractional vegetation cover remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022c. GB/T 41282-2022 植被覆盖度遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2022d. GB/T 41534-2022 Validation of surface temperature remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022d. GB/T 41534-2022 地表温度遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2022e. GB/T 41535-2022 Validation of aerosol optical depth remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022e. GB/T 41535-2022 气溶胶光学厚度遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2022f. GB/T 41536-2022 Validation of land cover remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022f. GB/T 41536-2022 土地覆盖遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2022g. GB/T 41537-2022 Validation of snow cover area remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022g. GB/T 41537-2022 积雪面积遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. 2022h. GB/T 41538-2022 Validation of surface emissivity remote sensing products. Beijing: Standards Press of China (国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2022h. GB/T 41538-2022 地表发射率遥感产品真实性检验. 北京: 中国标准出版社)
- Tansock J, Bancroft D, Butler J, et al. 2015. Guidelines for Radiometric Calibration of Electro-Optical Instruments for Remote Sensing [OL]. [2021-11-10]. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/hb/2015/NIST.HB.157.pdf>.
- Wen J G, Liu Q H, Li Z Y, Li X, Liu S M, Xiao Q, Gao Z H, Ma M G, Che T, Liu L Y, Fang H L, Yan G J, Ge Y, Chen E X, Zhang Y, Ma L L, Wu X D, Chen X. 2023. A review of the development of remote sensing field experiments and product validation in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 573-583 (闻建光, 柳钦火, 李增元, 李新, 刘绍民, 肖青, 高志海, 马明国, 车涛, 刘良云, 方红亮, 阎广建, 葛咏, 陈尔学, 张勇, 马玲玲, 吴小丹, 陈曦. 2023. 中国遥感实验与真实性检验的发展思考. *遥感学报*, 27(3): 573-583) [DOI: 10.11834/jrs.20232673]
- Woolliams E R, Fox N P, Cox M G, Harris P M and Harrison N J. 2006. The CCPR K1-a key comparison of spectral irradiance from 250 nm to 2500 nm: measurements, analysis and results. *Metrologia*, 43(2): S98-S104 [DOI: 10.1088/0026-1394/43/2/S20]
- Woolliams, E, Hueni A, and Gorrone J. 2015. Intermediate uncertainty analysis for earth observation (instrument calibration). NPL Training Course Textbook. Available online: <http://www.emceoc.org/documents/uaco-int-trg-course.pdf> (accessed on 28 May 2015). [DOI: 10.5167/uzh-98386]
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G, You D Q and Hueni A. 2019. Advances in quantitative remote sensing product validation: overview and current status. *Earth-Science Reviews*, 196: 102875 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102875]
- Xu B D, Li J, Liu Q H, Xin X Z, Zeng Y L and Yin G F. 2015. Review of methods for evaluating representativeness of ground station observations. *Journal of Remote Sensing*, 19(5): 703-718 (徐保东, 李静, 柳钦火, 辛晓洲, 曾也鲁, 尹高飞. 2015. 地面站点观测数据代表性评价方法研究进展. *遥感学报*, 19(5): 703-718) [DOI: 10.11834/jrs.20154178]
- Xu B D, Li J, Park T, Liu Q H, Zeng Y L, Yin G F, Zhao J, Fan W L, Yang L, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2018. An integrated method for validating long-term leaf area index products using global networks of site-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 209: 134-151 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.049]
- Yang P, Bai Y F, Song C C and Wu X D. 2020. Construction of long-term ecological research sites in field station: status, progress and prospect. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 35(1): 125-

- 134 (杨萍, 白永飞, 宋长春, 吴冬秀. 2020. 野外站科研样地建设的思考、探索与展望. 中国科学院院刊, 35(1): 125-134) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20191226001]
- Zhang R D. 2005. Spatial Variability Theory and Application. Beijing: Science Press: 13-15 (张仁铎. 2005. 空间变异理论及应用. 北京: 科学出版社: 13-15)
- Zhang R H, Tian J, Li Z L, Su H B and Chen S H. 2010. Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products. Science China Earth Sciences, 53(5): 741-751 (张仁华, 田静, 李召良, 苏红波, 陈少辉. 2010. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法. 中国科学: 地球科学, 40(2): 211-222) [DOI: 10.3724/SP.J.1011.2010.01081]

Practice and reflection on the construction of remote sensing products validation network for the land observation satellite

MA Lingling, ZHOU Xiang, WANG Ning, TAO Zui, ZHAO Yongguang, ZHU Xiaohua, GAO Caixia, YANG Jian, GAO Hailiang, YANG Hong, XIAO Qing, LI Qiangzi, LYU Tingting, ZHANG Fengli, ZANG Wenqian

National Engineering Laboratory for Satellite Remote Sensing Applications, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: Validation of remote sensing products, as a crucial process bridging remote sensing data products and their application services, is essential for meeting the increasing demands for precision and performance in a series of quantitative applications. Such a validation is also necessary for improving the algorithm and production procedure after collecting feedback in such applications.

Over the years, numerous sites for the validation of land remote sensing products have been established domestically and internationally. However, the theoretical and technical systems in the construction of a validation network is still not perfect in the entire process. These systems include the site characteristic representation and selection, measurement of surface and/or atmospheric parameters, sampling of measurement, and validation service mode toward different users. The possible reasons include the complexity and dynamic nature of the Earth system that lead the interaction between different spheres, land surface heterogeneities and uniformities, system and random errors in measurements, and various types of remote sensing satellite products for different applications. These problems result in difficulties in fully utilizing existing facilities. Therefore, to solve a series of basic theories and techniques problems, and to provide new models and specific solutions become the precondition in improving the application efficiency of validation system infrastructure at present and in the near future.

In this research context, the status and development trends are first analyzed, including the research domain of ground observation networks for validation, acquisition technology for ground reference truth, and comprehensive validation services for remote sensing products domestically and internationally. Thereafter, three basis theories (i.e., spatial variability theory in geostatistics, uncertainty theory in metrology, and optimization theory in operations research) are adopted to improve the validation methods. These three theories explore the spatial representativeness characterization of the network of product validation, uncertainty analysis and transfer of the fiducial reference measurements, comprehensive weighting and composition of multiple validation results, and optimal balance between the validation resources and user demands. Based on the theories, a framework is developed for the methodological system of the terrestrial observation satellite product validation network. This framework lays the theoretical foundation for the construction of a remote sensing production validation system and plays an important supporting role in forming targeted solutions. Aiming with the construction of the National Civil Space Infrastructure and the application needs of validation of key common products, considering overall layout, product coverage completeness, spatio-temporal consistency, and traceability, this study proposes specific requirements for the validation targets, validation areas, validation methods, validation accuracy, validation frequency, and service mode of Chinese land observation satellite remote sensing product validation network. The blueprint of the validation network for the "14th Five Year Plan" was designed based on the proposed methodology.

This study coordinates the construction of a comprehensive product validation network, comprising an aerial collaborative validation system, a benchmark referenced transfer and fiducial reference measurement system, and a high accuracy validation service system. This network forms a technical solution for Chinese land observation satellite remote sensing product validation. The proposed solution will promote the resolution of related bottleneck issues, such as the accuracy, efficiency, and consistency of product validation. Lastly, the proposed solution will significantly improve the theoretical method system of the product validation network by fully utilizing and optimizing the use of domestic land observation satellite remote sensing data, and enhancing the level of quantitative applications.

Key words: land observation satellite, remote sensing products, validation, fiducial reference measurements, service system, theoretical and methodology system

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3903000); National Natural Science Foundation of China (No. 42371396)