

# 透视地球——新一代对地观测技术

周翔, 潘洁, 吴一戎

中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

**摘要:** 地球系统的观测正从看清地球的样貌深入拓展到探测、分析、认知地球圈层的内在。基于天基、空基、陆基等观测平台, 利用电磁、微波、激光和重力等穿透性、多维度、高密度的新型透视遥感探测前沿技术, “透视地球”对大气圈、水圈、生物圈、岩石圈等地球空间物理要素、内部结构及其演变过程进行精细、综合探测, 获取地球各圈层更“精确”、更“深层”的信息, 成为新一代对地观测技术发展的积极探索和重要方向。本文阐述了透视地球的概念和内涵, 依据“透视方法—载荷集成—探测试验—参数反演—效能验证”的设计思路, 提出透视地球原型系统的构建方案。通过多谱段耦合、多物理量融合, 提升空基跨平台协同探测能力, 改进遥感观测的信息维度、尺度和密度, 以透视视角拓展人类对各圈层的认知边界, 推动地球系统重大科学问题的突破, 提升人类进行资源开发与利用、预测应对极端天气事件及环境变化的能力。

**关键词:** 透视地球, 遥感, 对地观测, 大气, 森林, 固体地球, 海洋

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 周翔, 潘洁, 吴一戎. 2024. 透视地球——新一代对地观测技术. 遥感学报, 28(3): 529–540

Zhou X, Pan J and Wu Y R. 2024. Transparent Earth—Observing: Exploring the new generation of Earth observation technology. National Remote Sensing Bulletin, 28(3): 529–540 [DOI:10.11834/jrs.20234048]

## 1 引言

地球系统是由大气圈、生物圈、水圈（包括冰冻圈）和岩石圈等组成的一个多圈层耦合、复杂非线性的巨系统。在地球系统科学理念不断演进和新技术加快发展的新时代, 地球系统的观测正从看清地球的样貌深入拓展到探测、分析、认知地球圈层的内在。例如, 为应对频发的极端天气事件, 需要对大气圈内部的云雨结构进行精细观测, 以获得精确预报 (Lee 等, 2018)。全球及区域尺度碳源汇的研究需要对大气—陆表/海表碳通量进行立体动态监测 (Regnier 等, 2022; Bai 等, 2023)。研究中小尺度海洋动力过程对海洋能量级联和物质转移的影响, 需要开展海洋上混合层乃至中层水体的垂直立体观测 (Frémand 等, 2022)。此外, 估算极地冰盖融化速度和冰川物质平衡, 需要准确测绘冰盖厚度和冰下地形 (崔祥斌 等, 2009)。

从飞行到登陆, 人类对于太空的探索已经开

启未来之门, 但对地球自身的探测仍然非常初步。世界主要发达国家都已经将地球圈层内部探测列入推进可持续发展的国家科学发展战略。航空航天技术先进国家基于地球系统的观测试验和模拟分析, 战略布局全方位的对地观测体系, 争相部署大深度、高性能的主被动探测载荷及相关应用研究计划。自 20 世纪 70 年代开始, 美国率先实施了“大陆反射地震探测计划”。2001 年美国国家科学基金会、美国地质调查局和美国国家航空航天局 (NASA), 联合发起了“地球透镜计划”。1999 年澳大利亚提出了要使地下 1000 m 变得“透明”的“玻璃地球”计划。加拿大、法国、德国、荷兰、英国、瑞士、意大利、俄罗斯等国也都在积极推动地壳深探。中国设立《深部探测技术与实验研究 (SinoProbe)》计划, 研究并实验了地壳与地幔深部探测的一系列技术方法, 包括矿集区立体探测、岩石圈三维结构与地球动力学数值模拟等。这些计划的实施多采取以发展固体地球深部探测技术与装备系统结合三维地质填图的方式, 加速

收稿日期: 2024-01-06; 预印本: 2024-03-25

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2023YFB3907700)

第一作者简介: 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

了人类对地球深部的认识和理解,但对于地球系统各个圈层的精细探测和过程演变分析仍然不够系统和深入。

对地观测技术作为对现代社会最具影响的科技之一,已成为世界各国加速抢占发展先机的战略必争领域,呈现透明化、立体化、一体化、动态化、精细化的发展特征。随着大数据、人工智能、物联网、云计算和机器学习等加速技术变革,对地球系统的立体探测、持续观测、智能监测不断深入,地球系统科学研究的国际投入和跨学科、跨领域的深度融合达到了前所未有的水平。2018年,美国国家科学院发布了《持续变化的星球上的蓬勃发展:天基对地观测十年战略》报告(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018),强调面对地球的不断变化,系统性获取、掌握和理解地球内部数据至关重要,新一代对地观测技术将融入人类日常生活,成为指导人类生产活动的核心基础设施之一。2021年5月,NASA正式公布了建立地球系统观测平台ESO(Earth System Observatory)的计划。欧洲航天局发射了人类首个研究高层大气风的卫星“风神”,通过采用紫外激光器精确探测从地球表面到平流层的风速和风向,填补了全球对地观测系统缺乏详细测风数据的空白。NASA碳监测系统CMS(Carbon Monitoring System)发布了多套数据产品,应用于全球及区域森林结构参数、碳储量参数的精准估算及验证。NASA和德国地球科学研究中心合作的GRACE-FO(Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On)卫星监测任务,采用高低轨卫星组合跟踪测量模式,通过捕捉GRACE-FO卫星上的重力变化,研究地下水储量、河流湖泊、土壤湿度以及冰川质量变化机制等。由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室研究人员牵头开发的能源百兆级地球系统模型E3SM(Energy Exascale Earth System Model)成为第一个端到端的多尺度地球系统模型,能可靠地模拟地球系统的变化。人工智能和信息基础设施的不断突破把地球观测及应用引入智能时代,地球观测组织GEO(Group on Earth observation)在制定未来十年发展战略(GEO Post-2025 Strategy)中明确提出,随着全球挑战的加剧,发展地球智能(Earth Intelligence)保护地球的使命变得越来越重要。

近年来,中国在对地观测技术方面取得了重要进展。通过“高分”专项和国家民用空间基础

设施的建设实施,已经构建了从全色、多光谱到高光谱,从光学到微波雷达的天地一体化对地观测系统,初步形成高时间、高空间分辨率的宽幅观测能力,但在对地球各圈层内部信息的获取与分析应用上,与西方国家还有差距。

探索地球系统内部的奥秘,是解决人类资源、环境和可持续发展问题的必然选择。整体而言,国内外对地观测系统已经具备相当规模,但现阶段获取的地球系统数据以平面化为主,在密度、维度、尺度上已难以满足当前地球系统科学重大前沿问题研究和社会经济发展对高质量数据的需求。通过电磁、微波、红外和重力等新型“透视技术”获取地球各圈层更“精确”、更“深层”的信息,可以更全面、更深入地了解地球系统的运行机制,从而推动地球系统重大科学问题的突破,提升人类进行资源探测、预测应对极端天气事件及全球环境变化的能力。

## 2 透视地球

### 2.1 透视地球的概念

“透视地球”瞄准地球系统圈层“看不见”的内部信息感知,利用电磁、微波、激光和重力等穿透性、多维度、高密度的新型透视遥感探测前沿技术,基于天基、空基、陆基等观测平台,对大气圈、水圈、生物圈、岩石圈等地球空间物理要素、内部结构及其演变过程进行精细、综合探测,是新一代对地观测技术发展的重要方向,为经济社会发展、资源环境合理利用、军事防卫、粮食安全和能源生态安全、海洋权益保护等提供基础性、战略性的信息资源保障。其主要构成如图1所示。

当前,人类对地球系统的探索正在发生重大战略转移,从表层到内部,从局部走向整体,新时代的“地球系统”理论知识和方法技术体系对遥感观测提出了新的要求。透视地球的核心基础是发展穿透性、新体制的先进遥感技术,探测技术的观测维度从二维拓展到三维,探测通道涵盖紫外到毫米波,通过天一临一空一地一海多基协同、多谱段耦合、多数据集成,将实现圈层多物理量动态化、立体化、全息化的透视观测信息获取,催生新的地球系统科学知识,有望成为下一代对地观测技术体系的制高点,具有极高的科学价值和战略意义。

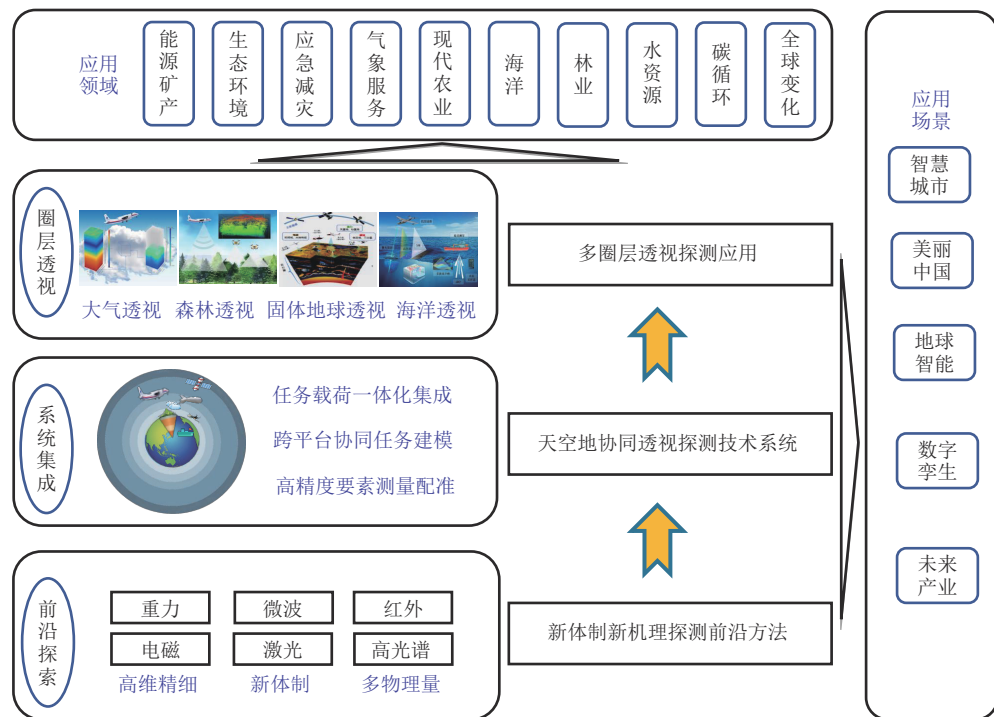


图1 透视地球系统构成

Fig. 1 Composition of Transparent Earth-Observing system

## 2.2 重点领域

针对大气、海洋、植被和固体地球观测等领域的任务和探测目标，以透视视角开展空间对地观测/探测新原理、地球系统参量反演新理论、定量应用新方法研究，构建精细分辨率、全天候、高可靠性的新一代地球系统空间观测技术体系。分为4个重点领域。

(1) 大气透视。大气圈层是地球最外部的气体圈层，与地球系统中的其他圈层密切耦合，不断进行物质和能量的交换（邱金桓和陈洪滨，2005），与人类生活息息相关。大气圈层透视主要利用全谱段、主被动协同、星—机—地联合的观测手段，实现对大气中“气象—辐射—成分”关键要素的三维立体观测。全球三维大气风场、台风内部结构特征观测、大气痕量气体、平流层温湿度、气溶胶—云垂直特征等要素的高精度三维“透视”对数值天气预报、温室气体监测等具有重大意义（Qian等，2007；Ramanathan和Feng，2009；Scherer等，2019；李占清，2020），也是理解气候变化背景下大气演变过程的关键（IPCC，2023）。

目前国际上的大气透视技术实现了对晴空和云雨条件下大气的全球性、高时空分辨率的观测，

为数值预报提供了大量可靠的观测信息。国际上已经发射了TRMM-PR（Tropical Rainfall Measuring Mission Precipitation Radar）单频降水雷达、Cloudsat-CPR（CloudSat Cloud Profiling Radar）单频云廓线雷达以及GPM-DPR（Global Precipitation Measurement Dual-frequency Precipitation Radar）双频降水雷达，为云、降雨透视提供了丰富的观测资料（Ravuri等，2021）。中国在星载云、降雨透视探测雷达研制和应用方面也快速发展（赵文化和单海滨，2018）。以2023年中国发射的首颗降水星为例，其搭载的Ku/Ka波段双频降水观测雷达，能与国外现有的降水雷达组合获取更加丰富的降水观测资料。但现有在轨运行的雷达频率较低，仅对尺度较大降水粒子比较敏感，难以同步获取准确的云垂直结构信息，无法为云、降雨演变过程机理的研究提供足够的精细观测资料，限制了云降雨研究的发展。

(2) 森林透视。植被森林作为陆地生态系统的主体，其复杂的森林空间结构直接决定了太阳辐射和水分蒸散在林冠中的传递过程，影响着森林和大气环境之间的能量、水分和物质交换，是生物多样性和森林生态系统得以维系的基础。在地球系统科学、全球变化和生态学等领域的研究中，对大范围森林空间结构信息的需求越来越



迫切。

森林透视技术通过综合利用多种遥感技术手段,以获取森林的三维精细结构信息。目前美国和欧洲对地观测战略规划均将碳循环和生态系统观测作为主要观测目标之一,明确规划了激光雷达、合成孔径雷达、光学相结合的森林监测体系。如何实现复杂地形条件下森林三维结构的观测,是森林遥感的前沿与难点。综合利用多频雷达干涉、激光雷达和光学多角度立体观测等手段,从波段、极化、时相、基线等不同维度,探索多维度森林空间结构遥感探测机理模型,形成多波段一体化森林空间结构遥感理论与方法,以实现森林植被结构透视、森林组分透视和森林生化参数透视。

(3) 固体地球透视。固体地球透视探测利用多场量、主被动协同、星—空—地联合观测方案,获取重力、磁力、电磁等地球物理场,对岩石圈进行穿透性、大深度、多场量特征综合分析,“揭开”地表覆盖层,研究与刻画地球内部的物理性质、岩性和构造特征,探测与识别地下目标体,对地质结构实现立体三维数据获取,为解决人类社会生存发展至关重要的资源、环境等问题提供出路。

随着探测仪器精度的不断提升和探测手段的多元化,重力、磁力和电磁探测技术已广泛应用于矿产资源调查、能源资源勘查、地下水资源探测、重大工程勘察、地质灾害监测预警等方面(赵越等,2017)。然而,在传统电磁装备技术及基于航空航天的地球物理探测装备技术方面,中国对岩石圈内部参数获取能力还存在一定的差距。突破新型小型化、高灵敏度的地球物理核心传感器,开展大深度、高效率和高精度的固体地球透视技术系统研制,观察、分析和捕捉岩石圈频繁的地质活动和地质现象,实现地质结构立体三维数据获取具有重大应用价值。

(4) 海洋透视。海洋拥有全球97%以上的水资源,平均深度3.7 km,是地球水圈最重要的组成部分(Pendleton等,2020)。海洋遥感通常采用可见光—红外—微波等电磁波段对海表开展遥感监测,如何综合利用遥感和水下现场观测,实现对海水内部信息的挖掘,从表层深度到次表层乃至中层和深层水体的透视探测,是当前国际海洋遥感发展的大趋势。

近年来,国际海洋强国纷纷推出自己的遥感

研究计划,加速了海洋观测技术的发展。美国NASA提出了IceSat系列星载激光雷达计划、SWOT(Surface Water and Ocean Topography)星载干涉雷达高度计等(Schutz等,2005;Abdalati等,2010;Steven等,2012)。欧洲航天局提出了CryoSAT系列星载干涉雷达高度计、海流干涉测量的Harmony计划、海面多普勒测量的SKIM(Sea-surface Kinematics Multiscale monitoring)计划等(Wingham等,2006;Boy等,2017;López-Dekker等,2021;Ardhuin等,2019)。同时,也积极利用机载平台开展海—空同步海洋透视验证试验,例如,NASA的S-MODE(Sub-Mesoscale Ocean Dynamics Experiment)试验和Scripps海洋研究所的MASS-DoppVis系统(Farrar等,2020;Lenain等,2023)。中国海域辽阔,有丰富的海洋资源,亟需发展海洋内部观测技术,高精度描绘海洋生物量、海洋动力场、海底地形地貌、海底油气矿藏等各种水下环境,支撑内波、涡旋、锋面、洋流与潮汐等各种海洋水下现象的自主可控预测预报。

### 3 透视遥感前沿技术

在地球系统科学理念持续深入和科技创新持续突破的大背景下,聚焦地球系统各圈层的内部探测,对地观测技术也在不断发展和创新,成为推动地球科学发展的核心驱动力。新型载荷观测能力的提高,观测平台载荷集成能力的提升以及综合地球探测理论的发展,为地球系统多物理量的联合探测、关联建模与信息重构提供了理论和技术基础。

(1) 多频段雷达降水探测技术。雷达降水探测技术是指通过发射雷达信号,并依据接收的降水的雷达回波强度,实现对降水强度的三维空间分布结构的探测。搭载降水雷达的平台可分为地基、空基和星基。其中地基降水雷达多以X、C、S等波段为主(李柏,2011);空基和星基降水雷达主要以Ku、Ka等波段为主(Liao和Meneghini,2022);W波段主要用于测量弱降水或高层云(Turk等,2021)。目前,星载双频降雨雷达可实现水平距离5 km,垂直距离250 m的降水廓线观测;机载双频降雨雷达可实现水平距离1 km,垂直距离100 m的降水廓线观测。通过多频段雷达组合,实现对云和降水的协同观测,能够提供更加精细的云和降水三维结构透视数据,有利于更加

清楚地理解云降水的演变过程,为降水预报的改进提供支撑。

(2) 多基线 InSAR 三维透视森林探测技术。合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 在 L、P 波段具有较好的穿透性,结合多基线 InSAR 通过水平方向或高度方向多个不同的 SAR 天线在法向形成合成孔径,从而具备高程透视分辨能力。其中,分布式多基线 InSAR 的天线水平方向分布,在实现不同平台上所安装 SAR 的时间、相位、空间同步的基础上通过单次飞行形成多基线干涉(朱金彪等,2023);层析多基线 InSAR 通过单天线沿不同高度多次飞行形成多基线干涉。多基线 InSAR 技术可获取相对反射率表达的森林垂直结构剖面、林下地表高度等参量信息,其中,森林垂直结构剖面分布形状与森林空间分布形态具有较强的相似性,在一定程度上反映了森林垂直结构信息(李兰等,2017),可用于反演森林地上生物量。协同探测方式可实现基线可变和分布式观测,植被圈透视观测三维分辨率达到 0.5 m,提升森林生物量估测精度优于 90%。

(3) 磁力探测技术。航空磁力探测技术通过航空平台搭载磁力探测设备,在飞行过程中对地球磁场进行测量和记录。通过利用磁补偿技术消除平台对测量的干扰,并进行数据处理和改正,可获取地下目标体引起的磁异常信息。这些异常信息可以用于反演地下磁性体的磁化强度和成像,从而建立起地下磁性体的透视模型(Nabighian等,2005)。近年来,新发展的航磁矢量测量系统可以实现较标量更丰富的磁场信息,适用于精细地质填图、磁源剩磁性质确定等应用;还可直接测量地磁图构建所需的全部地磁要素信息,在地下磁力探测中具有重要价值。

(4) 重力探测技术。航空重力探测技术通过航空平台搭载重力仪和定位传感器组合系统进行连续重力测量(熊盛青等,2010)。通过扣除载体运动引起的加速度,获取地下目标体密度差异引起的微弱重力异常信号。这些异常信号可以揭示地壳厚度变化、断裂带位置和延伸情况,探测密度差异显著的隐伏岩体或岩层。新的航空重力矢量测量系统可以获取水平重力分量信息,进一步确定目标体形状走向,用于精细的地质构造研究和高精度资源勘探。

(5) 电磁探测技术。航空电磁探测是一种利

用航空平台搭载电磁探测设备进行地下介质探测的技术。通过剔除噪声,获取地下目标体引起的电磁场异常响应,从而建立地下由浅至深电阻率透视模型。目前,航空电磁探测广泛应用于矿产勘查、油气资源评价、海洋地质调查、地下水勘查、工程地质和环境调查、海洋地形与极地海冰探测、军事与国防等领域(Neeck等,2012)。这种技术在快速获取大范围地下信息和探测复杂地质条件下具有明显的优势,对资源开发和环境保护具有重要的应用价值。

(6) 高分辨率冰冻圈甚高频微波探测技术。冰雷达探测是利用冰盖、冰体对特定频率的雷达信号的“透明性”,来研究冰盖、冰层结构和冰岩界面特征的地球物理方法,目前已经发展为一门新的学科——雷达冰川学(崔祥斌等,2009)。通过分析冰雷达信号在冰盖内部和冰岩界面位置回波信号的时间、能量和形状特征等,可以实现对冰盖几何特征、冰底环境和地貌的认识,有助于促进人类对冰盖的动力机制和快速变化的认识,为准确评估冰底环境提供了基础(Frémand等,2022)。

(7) 冰冻圈主被动微波探测技术。冰冻圈主被动微波探测技术,根据不同波长微波对冰川、积雪、冻土的穿透差异性原理,基于星载或航空平台搭载主动微波探冰雷达和被动微波辐射计,实现对南极或山地冰川内部结构、温度/密度廓线、冰下基岩和水系、积雪雪水当量、次表层土壤含水量等冰冻圈关键参数的高分辨率透视探测。为全球变化背景下冰盖物质平衡、不稳定性对海平面影响,冰冻圈多环境要素快速变化等前沿科学问题和极区航道开发的重大应用需求提供理论依据和技术基础(中国科学院国家空间科学中心,2020;Bai等,2023)。

(8) 海洋水体剖面激光探测技术。激光作为一种高功率主动遥感器,是穿透水体最有效的探测手段之一。面向全球海洋的跃层时空结构及其变化规律、初级生产力与碳循环和生命系统探测、海气能量与物质通量3大科学问题,利用蓝绿波段强穿透能力,开展海洋剖面激光探测技术攻关,突破海洋动力热力剖面激光探测、上层海洋生物光学剖面探测、激光高光谱多波长偏振颗粒物散射、海—气界面复杂参数激光探测等关键技术,有望实现全球海洋百米深度内的生物光学参数的立体探测与高精度反演(唐军武等,2021)。

## 4 透视地球原型系统

### 4.1 原型系统构建方法

透视探测技术系统的建立面临探测要素和数据手段单一、观测连续性差、精细表征和信息重构能力不足等问题，这些问题阻碍了“透视地球”的全系统实现和体系化发展。本文依据“透视方法—载荷集成—探测试验—参数反演—效能验证”的设计思路，提出了一种构建透视地球原型系统的方案。通过多谱段联合和跨平台协同，提升空基协同透视探测能力，实现多维探测的集成和信息资源的聚合，改进多物理量的信息维度、尺度和密度，拓展对地球各圈层的认知边界，支持“透视地球”的持续演进。

首先，通过需求分析和数据获取，建立透视探测目标集和可反演遥感数据集。基于不确定度

分析和误差传播理论，分析不同场景下载荷和平台对透视结果的不确定性影响，构建包含载荷和平台的能力集。通过解释结构模型、建立拓扑图和传递矩阵，推导出集约原型系统方案。

其次，基于透视地球技术体系架构，在耦合载荷特征和数据获取需求的基础上，建立载荷与航空平台的关系，构建空基透视探测技术系统，实现载荷集成测试与效能验证，完成系统集成、功能联调和性能测试。

最后，综合考虑载荷性能、数据质量和要素精度等因素，实施空基透视探测试验，实现透视视角下关键要素和过程的集成刻画；进行多圈层透视探测过程的不确定度量化和效能分析，验证透视地球过程的可行性、透视探测技术体系的可用性和透视地球原型系统的有效性。原型系统设计如图2所示。

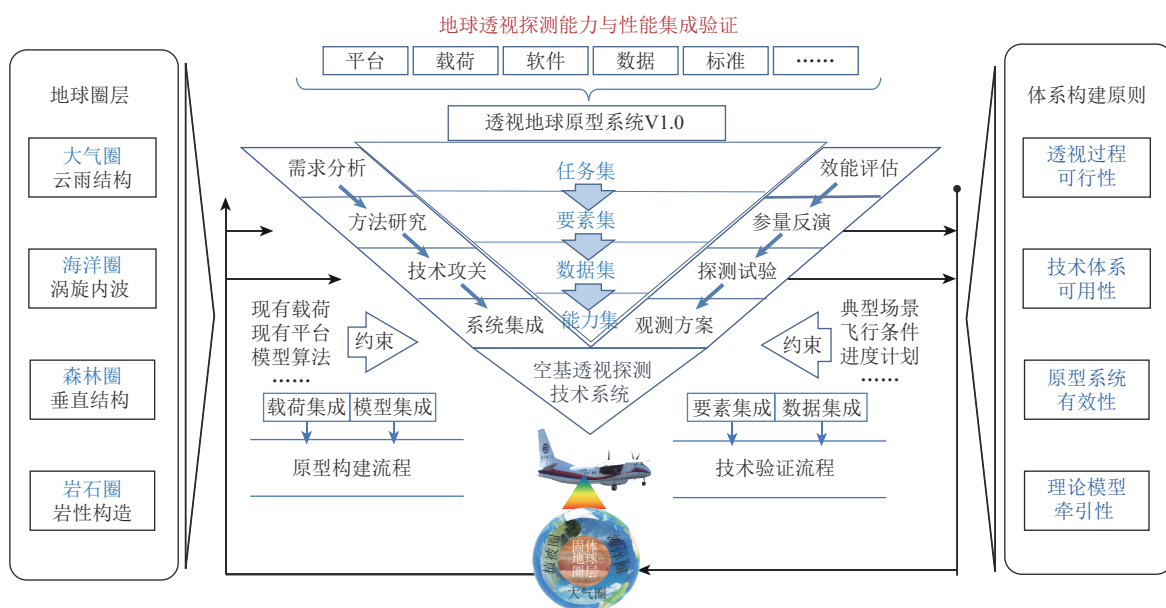


图2 透视地球原型系统设计

Fig. 2 Design of the prototype system of Transparent Earth-Observing

### 4.2 集成与试验

基于透视地球探测技术体系架构，分析各圈层的透视特征和典型应用场景导出的目标需求，理清多圈层透视探测载荷集成、多谱段物理特征耦合、多维度数据协同获取间的要素关系，结合现有空基飞行平台特点以及各圈层透视载荷能力，建立多型载荷与航空平台矩阵关系，突破任务载荷一体化集成设计与测试，多机协同任务建模与

飞行管控等技术，构建透视地球原型系统，实现多谱特征耦合与多维数据协同的航空透视探测系统集成。

为了评估透视地球原型系统的应用效能，以云雨结构、海洋动力与生物场、森林结构、岩性构造等透视探测为阶段性目标，依托新舟60航空遥感平台，有/无人多平台及多载荷协同组网（图3），构建全谱系、多波段的“透视地球”空中实验室，



选择典型示范区并顾及航空试验飞行与地基参考真值测量条件约束, 组织开展空基透视探测试验,

建立技术体系可用性分析和效能评估的指标体系, 验证各圈层透视目标的满足程度。

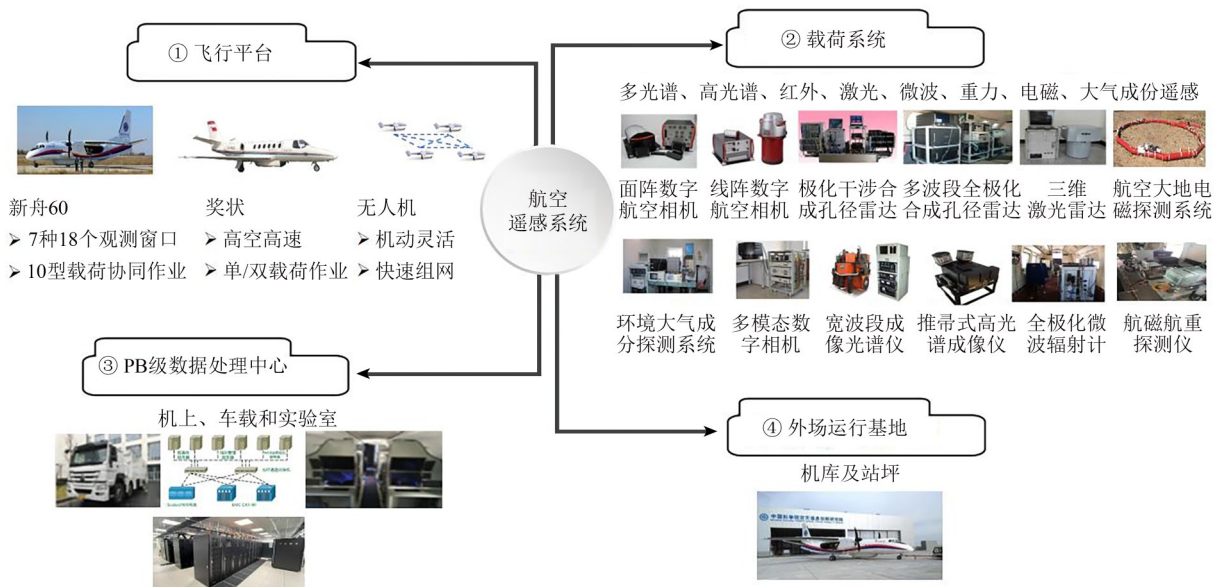


图3 空基透视探测技术系统

Fig. 3 Airborne platform for Transparent Earth-Observing (Flying laboratory)

#### 4.3 典型应用场景

(1) 云雨三维结构精细透视。降雨过程中的云微物理特性和降雨强度的三维结构精细观测是当前大气透视研究的热点和难点。通过透视技术准确获取降雨过程中温度、湿度、压强、风场以及云水和降雨的三维结构协同观测数据, 可以了

解降雨的形成和发展过程, 有助于改进天气预报模式中的云和降雨的参数化方案, 提高天气预报的准确性和可靠性, 为提前预警极端天气事件提供支撑, 为社会公众和相关机构提供及时的预警和应对措施。图4为云雨三维结构精细透视观测示意图。

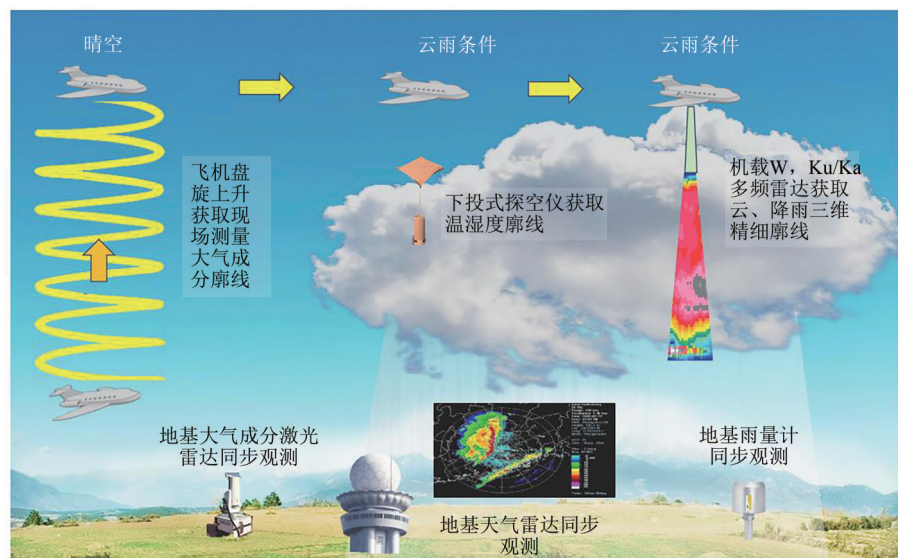


图4 云雨三维结构精细透视观测

Fig. 4 Transparent observing of the three-dimensional distribution of cloud and rain

(2) 景观尺度森林生物量估算。复杂地形场景中的森林结构参数探测具有挑战性。通过联合

多平台、多模式、多类型的观测手段, 开展森林优势树种类型、林下地形、林高、地上生物量的

观测, 构建主被动遥感联合的森林三维结构参数估算方法体系, 可准确捕捉到多层次、多方向的森林结构信息, 实现景观尺度森林地上生物量的科学、

精准计量, 为中国“双碳目标”中对区域森林资源精细调查和快速动态监测提供技术支撑。图5为景观尺度森林生物量估算示意图。



图5 景观尺度森林生物量估算

Fig. 5 Estimation of forest biomass at the landscape scale

(3) 戈壁荒漠覆盖区岩性、构造透视。由于覆盖层的屏蔽特性及反演方法的多解性, 覆盖层下伏基岩的岩性和地质体的定位仍是当前国内外研究的热点和难点。通过探索多种空基平台协同透视探测方案, 构建磁性体(含剩磁)透视模型、重磁性融合透视模型、全空间三维电阻率透视模型, 实现对地表和近地表岩性、构造精细填图, 深化戈壁荒漠区的区域地质构造研究, 助力能源资源勘查。图6为岩性结构与地下河展布透视观测示意图。

(4) 岩溶地下河的空间展布。岩溶地区的水资源调查受复杂地形和技术的限制, 传统方法无法摸清岩溶地下河的展布规律。而航空电磁探测为主的地下水资源调查是国际前沿和发展趋势。制定岩溶地下河透视方案, 构建浅表电阻率透视模型, 摸清岩溶地下河空间展布规律, 可为岩溶区的水资源规划和生态保护提供技术基础。

(5) 亚中尺度海洋涡旋水下三维动力场重构。亚中尺度涡旋的三维动力特征对海洋动力学过程的理解至关重要。利用交顺轨海洋探测雷达等空基透视探测能力, 建立涡旋水下三维动力特征与海表温度、海面高程、海表流场等遥感可观测量之间的映射关系, 有望在公里级分辨上实现厘米级测高和厘米每秒级测流能力, 结合卫星遥感获

得涡旋海表二维特征分布, 可实现亚中尺度海洋涡旋水下温盐结构的重构, 为深入了解亚中尺度海洋能量的串级传递机制、研究海洋能量传输和环境变化提供重要的观测数据支撑。图7为水下三维动力场、生物场、地形透视观测示意图。

(6) 近海浮游植物生物量三维结构构建。浮游植物生物量的精确估算是海洋初级生产力和碳循环研究的关键。浮游植物的水下三维分布呈现不均匀特征, 单一遥感载荷无法准确获取叶绿素的三维空间连续分布特征。联合蓝绿激光雷达的水下垂直透视能力和高光谱的空间特征提取能力, 可以获取近海浮游植物生物量三维结构信息, 从而更好地理解海洋浮游植物生态系统及其对海洋环境的响应。

(7) 空间连续的近海水下地形反演。激光雷达能够以点云的形式高精度测量近岸光学浅水区域的水深, 但是实现空间连续的水下地形图绘制一直是一个难题。发展融合主被动光学和SAR的水深联合反演技术, 即通过联合高光谱和激光雷达两类主被动光学遥感手段实现光学浅水区域的水下地形反演, 通过建立海浪波长和水下地形的关系实现基于SAR的近岸深水区域水下地形反演, 可为近海资源开发利用、海洋工程设计规划、海上航行安全提供测绘信息保障。



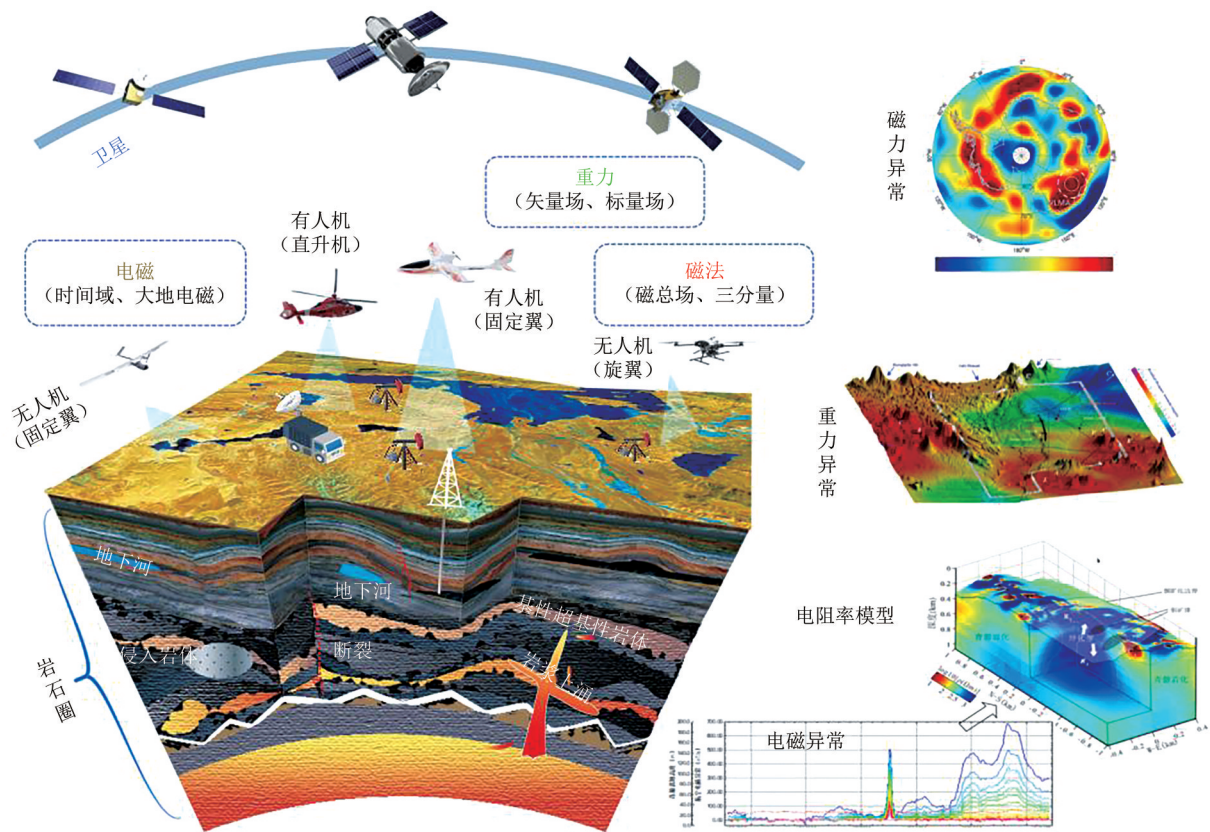


图6 岩性结构与地下河展布透视观测

Fig. 6 Transparent observing of lithological structures and distribution of underground river systems

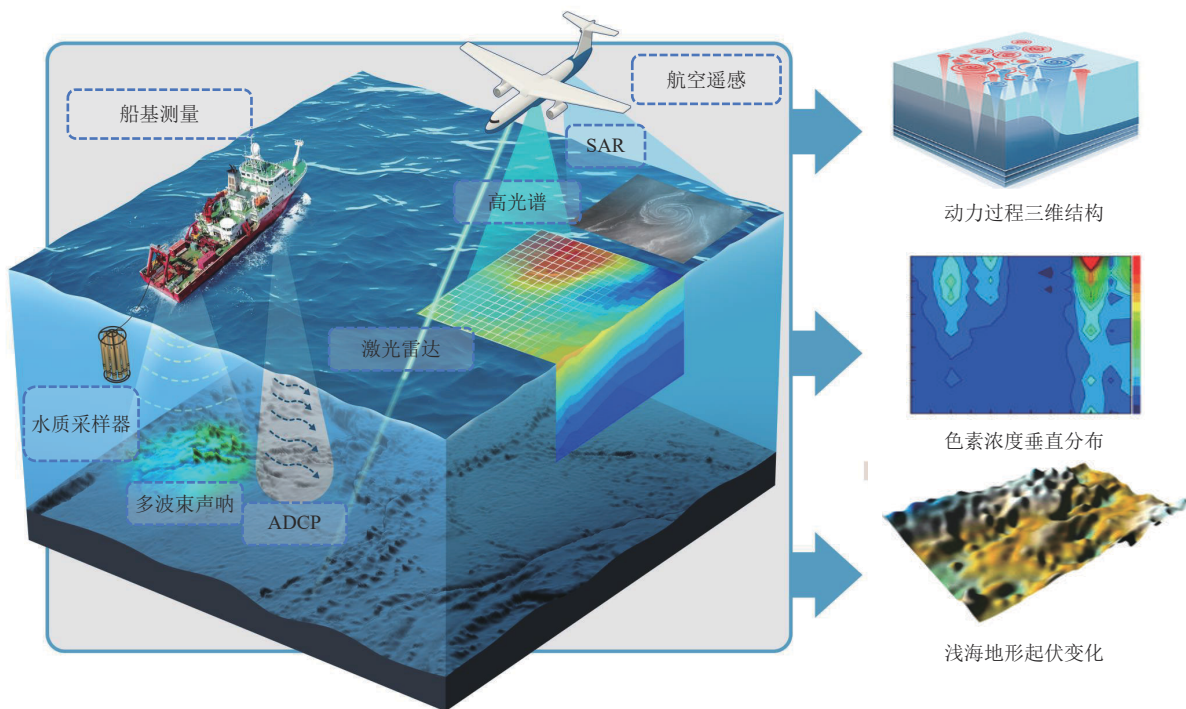


图7 水下三维动力场、生物场、地形透视观测

Fig. 7 Transparent observing of underwater three-dimensional dynamics fields, biological fields, and topography

## 5 结 语

地球观测是认识地球变化、合理利用自然资源、预防自然灾害的重要战略技术手段。当前,对地观测技术的发展重点正在从国家区域性观测扩展到全球战略性信息获取,从对地物形貌属性的可视化识别转向地球圈层内部结构及过程变化的量化精细分析,从地球资源静态信息采集迈向人与自然互动平衡的持续观测。

“透视地球”是对地观测技术新体系的尝试和探索,在关键技术、应用创新和发展路径等方面还有待不断发展和持续完善。依靠探测机理、先进载荷和数据应用上的技术突破和加速变革,透视地球有望实现对地球圈层多物理量的动态、立体探测,生成全空间、高可信的透视数据资源,引领以圈层透视信息为核心的新一代地球科学知识体系的发展,并推动空天科技、深地深海等基础核心领域的前沿创新,为人类的生产和生活提供智能化服务。

**志 谢** 感谢国家重点研发计划“航空协同透视探测技术系统”项目、“透视地球集成与应用验证技术”项目和中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心、中国林业科学院资源信息研究所、国家卫星气象中心、中国测绘科学研究院等参加单位的支持。

## 参考文献(References)

- Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, Csatho B, Farrell S L, Fricker H A, Harding D, Kwok R, Lefsky M, Markus T, Marshak A, Neumann T, Palm S, Schutz B, Smith B, Spinhirne J and Webb C. 2010. The ICESat-2 laser altimetry mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 735-751 [DOI: 10.1109/JPROC.2009.2034765]
- Arduin F, Brandt P, Gaultier L, Donlon C, Battaglia A, Boy F, Casa T, Chapron B, Collard F, Cravatte S, Delouis J M, De Witte E, Dibarboure G, Engen G, Johnsen H, Lique C, Lopez-Dekker P, Maes C, Martin A, Marié L, Menemenlis D, Nougier F, Peureux C, Rampal P, Ressler G, Rio M H, Rommen B, Shutler J D, Suess M, Tsamados M, Ubelmann C, van Sebille E, van den Oever M and Stammer D. 2019. SKIM, a candidate satellite mission exploring global ocean currents and waves. *Frontiers in Marine Science*, 6: 209 [DOI: 10.3389/fmars.2019.00209]
- Bai D J, Dong X L, Tjuatja S, Zhu D and Zhang Z J. 2023. A comprehensive emission model for layered irregular and inhomogeneous medium. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 2000720 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3249793]
- Boy F, Desjonqueres J D, Picot N, Moreau T and Raynal M. 2017. CryoSat-2 SAR-Mode over oceans: processing methods, global assessment, and benefits. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(1): 148-158 [DOI: 10.1109/TGRS. 2016. 2601958]
- Cui X B, Sun B, Zhang X P, Zhang D, Li X, Tang X Y and Tian G. 2009. A review of ice radar's technical development in polar ice sheet investigation. *Chinese Journal of Polar Research*, 21(4): 322-335 (崔祥斌, 孙波, 张向培, 张栋, 李鑫, 唐学远, 田钢. 2009. 极地冰盖冰雷达探测技术的发展综述. *极地研究*, 21(4): 322-335)
- Farrar J T, D'Asaro E, Rodriguez E, Shcherbina A, Czech E, Matthias P, Nicholas S Bingham F, Mahedevan A, Omand M, Rainville L, Lee C, Chelton D, Samelson R, O'Neill L, Lenain L, Menemenlis D, Perkovic-Martin D, Mouroulis P, Gierach M, Thompson D, Wineteer A, Torres H, Klein P, Thompson A, McWilliams J C, Molemaker J, Barkan R, Wenegrat J, Rocha C, Jacobs G, D'Addezio J, De Halleux S and Jenkins R. 2020. S-MODE: the Sub-Mesoscale ocean dynamics experiment//IGARSS 2020 — 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE: 3533-3536 [DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323112]
- Frémant A C, Fretwell P, Bodart J, Pritchard H D, Aitken A, Bamber J L, Bell R, Bianchi C, Bingham R G, Blankenship D D, Casassa G, Catania G, Christianson K, Conway H, Corr H F J, Cui X, Damaske D, Damm V, Drews R, Eagles G G, Eisen O, Eisermann H, Ferraccioli F, Field E, Forsberg R, Franke S, Fujita S, Gim Y, Goel V, Gogineni S P, Greenbaum J, Hills B, Hindmarsh R C A, Holmlund P, Holschuh N, Holt J W, Humbert A, Jacobel R W, Jansen D, Jenkins A, Jokat W, Jordan T, King E, Kohler J, Krabill W, Langley K, Lee J, Leitchenkov G, Leuschen C, Luyendyk B, MacGregor J, MacKie E, Matsuoka K, Morlinghem M, Mouginit J, Nitsche F O, Nogi Y, Nost O A, Paden J, Pattyn F, Popov S V, Riger-Kusk M, Rignot E, Rippin D M, Rivera A, Roberts J, Ross N, Ruppel A, Schroeder D M, Siegert M J, Smith A M, Steinhage D, Studinger M, Sun B, Tabacco I, Tinto K, Urbini S, Vaughan D, Welch B C, Wilson D S, Young D A and Zirizzotti A. 2022. Antarctic Bedmap data: FAIR sharing of 60 years of ice bed, surface and thickness data. *Earth System Science Data Discussions*: 1-25 [DOI: 10.5194/essd-2022-355]
- IPCC. 2023. Sections//Core Writing Team, Lee H and Romero J, eds. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC: 35-115 [DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647]
- López-Dekker P, Biggs J, Chapron B, Hooper A, Kääb A, Masina S, Mouginit J, Nardelli B B, Pasquero C, Prats-Iraola P, Rampal P, Stroeve J and Rommen B. 2021. The harmony mission: end of phase-0 science overview//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Brussels: IEEE: 7752-7755 [DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554896]
- Lee B, Di Girolamo L, Zhao G Y and Zhan Y Z. 2018. Three-dimen-

- sional cloud volume reconstruction from the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer. *Remote Sensing*, 10(11): 1858 [DOI: 10.3390/rs10111858]
- Lenain L, Smeltzer B K, Pizzo N, Freilich M, Colosi L, Ellingsen S Å, Grare L, Peyriere H and Statom N. 2023. Airborne remote sensing of upper-ocean and surface properties, currents and their gradients from meso to submesoscales. *Geophysical Research Letters*, 50(8): e2022GL102468 [DOI: 10.1029/2022GL102468]
- Li B. 2011. *Weather Radar and Applications*. Beijing: China Meteorological Press (李柏. 2011. 天气雷达及其应用. 北京: 气象出版社)
- Li L, Chen E X, Li Z Y, Ren C, Zhao L and Gu X Z. 2017. Forest above-ground biomass estimation based on multi-baseline InSAR tomography. *Scientia Silvae Sinicae*, 53(11): 85-93 (李兰, 陈尔学, 李增元, 任冲, 赵磊, 谷鑫志. 2017. 森林地上生物量的多基线 InSAR 层析估测方法. 林业科学, 53(11): 85-93) [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20171110]
- Li Z Q. 2020. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: an overview. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 43(1): 76-92 (李占清. 2020. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述. 大气科学学报, 43(1): 76-92) [DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200115005]
- Liao L and Meneghini R. 2022. GPM DPR retrievals: algorithm, evaluation, and validation. *Remote Sensing*, 14(4): 843 [DOI: 10.3390/rs14040843]
- Nabighian M N, Grauch V J S, Hansen R O, LaFehr T R, Li Y, Peirce J W, Phillips J D and Ruder M E. 2005. The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6): 33ND-61ND [DOI: 10.1190/1.2133784]
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2018. *Thriving on Our Changing Planet: A Decadal Strategy for Earth Observation from Space*. Washington: National Academies Press [DOI: 10.17226/24938]
- National Space Science Center of the Chinese Academy of Sciences. 2020. An active passive microwave joint remote sensing method for the internal state distribution of ice and snow. China, 20201024594.5 (中国科学院国家空间科学中心. 2020. 一种冰雪内部状态分布的主被动联合微波遥感探测方法. 中国, 20201024594.5)
- Neeck S P, Lindstrom E J, Vaze P V and Fu L L. 2012. Surface water and ocean topography (SWOT) mission//Proceedings Volume 8533, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVI. Edinburgh: SPIE: 111-120 [DOI: 10.1117/12.981151]
- Pendleton L, Evans K and Visbeck M. 2020. We need a global movement to transform ocean science for a better world. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(18): 9652-9655 [DOI: 10.1073/pnas.2005485117]
- Qian Y, Wang W G, Leung L R and Kaiser D P. 2007. Variability of solar radiation under cloud-free skies in China: the role of aerosols. *Geophysical Research Letters*, 34(12): L12804 [DOI: 10.1029/2006GL028800]
- Qiu J H and Chen H B. 2005. *Atmospheric Physics and Atmospheric Detection*. Beijing: China Meteorological Press (邱金桓, 陈洪滨. 2005. 大气物理与大气探测学. 北京: 气象出版社)
- Ramanathan V and Feng Y. 2009. Air pollution, greenhouse gases and climate change: global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*, 43(1): 37-50 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.063]
- Ravuri S, Lenc K, Willson M, Kangin D, Lam R, Mirowski P, Fitzsimons M, Athanassiadou M, Kashem S, Madge S, Prudden R, Mandhane A, Clark A, Brock A, Simonyan K, Hadsell R, Robinson N, Clancy E, Arribas A and Mohamed S. 2021. Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar. *Nature*, 597(7878): 672-677 [DOI: 10.1038/s41586-021-03854-z]
- Regnier P, Resplandy L, Najjar R G and Ciais P. 2022. The land-to-ocean loops of the global carbon cycle. *Nature*, 603(7901): 401-410 [DOI: 10.1038/s41586-021-04339-9]
- Scherer D, Ament F, Emeis S, Fehrenbach U, Leitl B, Scherber K, Schneider C and Vogt U. 2019. Three-dimensional observation of atmospheric processes in cities. *Meteorologische Zeitschrift*, 28(2): 121-138 [DOI: 10.1127/metz/2019/0911]
- Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, Hancock D and DiMarzio J P. 2005. Overview of the ICESat mission. *Geophysical Research Letters*, 32(21): L21S01 [DOI: 10.1029/2005GL024009]
- Tang J W, Chen G, Chen W B, Zhao C F, He Y, Wu S H, Liu B Y, Mao Z H, He H X, Yang J, Chen S G, Hu L B, He X D, Shi J L, Zheng Y C, Liu J Q, Lin M S, Wu L X, Guo H D, Jiang X W, Pan D L and Gu Y D. 2021. Three dimensional remote sensing for oceanography and the Guanlan ocean profiling Lidar. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 460-500 (唐军武, 陈戈, 陈卫标, 赵朝方, 贺岩, 吴松华, 刘秉义, 毛志华, 何惠馨, 杨杰, 陈树果, 胡连波, 何兴道, 史久林, 郑永超, 刘建强, 林明森, 吴立新, 郭华东, 蒋兴伟, 潘德炉, 顾逸东. 2021. 海洋三维遥感与海洋剖面激光雷达. 遥感学报, 25(1): 460-500) [DOI: 10.11834/jrs.20210495]
- Turk F J, Ringerud S E, Camplani A, Casella D, Chase R J, Ebtehaj A, Gong J, Kulie M, Liu G S, Milani L, Panegrossi G, Padullés R, Rysman J F, Sanò P, Vahedizade S and Wood N B. 2021. Applications of a CloudSat-TRMM and CloudSat-GPM satellite coincidence dataset. *Remote Sensing*, 13(12): 2264 [DOI: 10.3390/rs13122264]
- Wingham D J, Francis C R, Baker S, Bouzinac C, Brockley D, Cullen R, De Chateau-Thierry P, Laxon S W, Mallow U, Mavrocordatos C, Phalippou L, Ratier G, Rey L, Rostan F, Viau P and Wallis D W. 2006. CryoSat: a mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields. *Advances in Space Research*, 37(4): 841-871 [DOI: 10.1016/j.asr.2005.07.027]
- Xiong S Q, Zhou X H, Guo Z H, Zhou J X, Li W Y and Wang J B. 2010. *Theoretical Method and Application of Aerial Gravity Exploration*. Beijing: Geology Press (熊盛青, 周锡华, 郭志宏, 周坚鑫, 李文勇, 王静波. 2010. 航空重力勘探理论方法及应用. 北京: 地质出版社)
- Zhao W H and Shan H B. 2018. A study of cloud top height retrieval from FY-2 stereoscopic observation. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 38(2): 200-205 (赵文化, 单海滨. 2018. 风云静止卫星双星立体观测云顶高度反演初步研究. 大地测量与地球动力



学, 38(2): 200-205] [DOI: 10.14075/j.jgg.2018.02.019]  
Zhao Y, Xu F and Li X. 2017. Review on time-domain AEM system and applied potential. *Progress in Geophysics*, 32(6): 2709-2716 (赵越, 许枫, 李貅. 2017. 时间域航空电磁系统回顾及其应用前景. *地球物理学进展*, 32(6): 2709-2716) [DOI: 10.6038/pg20170656]  
Zhu J B, Pan J, Qiu X L, Jiang W, Liu Y Q, Dong Y W, Li W, Lin B,

Ni F, Shangguan S T, Liu M Q and Cheng Y. 2023. Analysis and experimental validation of key technologies for unmanned aerial vehicle-borne bistatic interferometric synthetic aperture radar. *Journal of Radars*, 12(4): 832-848 (朱金彪, 潘洁, 仇晓兰, 蒋雯, 刘玉泉, 董勇伟, 李威, 蔺蓓, 倪帆, 上官松涛, 刘鸣谦, 程遥. 2023. 无人机载双站干涉SAR系统关键技术分析与实验验证研究. *雷达学报*, 12(4): 832-848) [DOI: 10.12000/JR23060]

## Transparent Earth–Observing: Exploring the new generation of Earth observation technology

ZHOU Xiang, PAN Jie, WU Yirong

*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*

**Abstract:** Earth is a complex giant system. The spheres of earth, such as the Atmosphere, Hydrosphere, Biosphere, and Lithosphere, are interconnected and interact on each other as subsystems of the giant system. However, achieving a comprehensive and profound understanding of the spatial-temporal processes and interaction mechanisms within Earth system remains an imposing scientific endeavor. One significant obstacle is the limited availability of fine and interior data of spheres that can support groundbreaking researches on critical Earth system science topics and applications of remote sensing observation to the earth. Thus, there is an urgent need for systematic, multi-dimensional, and multi-scale observation information of the interior of the earth's spheres to effectively address these concerns.

Utilizing multiple observing means—including satellites, aircraft, and ground-based systems, along with advanced remote sensing detecting technologies that cover a spectrum from electromagnetic to microwave, laser, and gravity, the physical elements, internal structure, and evolution processes of the atmosphere, hydrosphere, biosphere, and lithosphere can be finely and comprehensively measured. Integration on diverse observing means will greatly enhance the ability to acquire highly accurate and deeply detailed insights into the earth and its subsystems.

This paper proposed the concept of Transparent Earth-Observing (TEO) and its composition, which refers to the integration of new transparent-detecting model and advanced remote sensing technologies to acquire comprehensive, dynamic, and multi-dimensional interior information of Earth spheres. Transparent Earth-Observing helps to overcome the limitations of traditional Earth observation methods that primarily focus on the Earth's surface, facilitating multi-dimensional, penetrative, high-resolution sensing of internal structures and process variation within the atmosphere, forests, oceans, and solid Earth. Transparent Earth-Observing, to a certain extent, symbolizes a new era in earth observation. This paper also put forwards a scheme to establish prototype system of Transparent Earth-Observing, which primarily focuses on design and implementation of airborne transparent observing platform, a novel remote sensing flying laboratory. The system follows a methodology that includes transparent-detecting methods, payload integration, field experiments, parameter retrieval, and validation and assessment. The prototype system of Transparent Earth-Observing enables the integration of multidimensional remote sensing technologies and the consolidation of diverse interior detecting information of the Earth sphere, thereby enhancing the dimension, scale, and density of observation information regarding various physical quantities and broadening our cognitive horizons.

In summary, as an exploration research and development direction of the next generation of Earth observation, the Transparent Earth-Observing will support the quantitative understanding of internal structures within Earth spheres and then promote the advancement of Earth System Science. At the same time, it will also stimulate innovation in core areas such as aerospace technology, enhance humanity's ability to develop and utilize resources, predict and respond to extreme weather events and global environmental changes.

**Key words:** Transparent Earth-Observing (TEO), remote sensing, Earth observation, atmosphere, forest, solid-Earth, ocean

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB3907700)