



中国科学院遥感与数字地球研究所

用户简讯

2016/2 总第94期

全国地面沉降 InSAR 调查与 监测工程进展介绍

葛大庆、张玲、王艳、李曼、刘斌、郭小方、王毅
中国国土资源航空物探遥感中心，卫星应用技术研发室，100083

1、介绍

地面沉降是我国中东部平原、盆地和三角洲地带面临的主要地质灾害，以华北平原、长江三角洲、汾渭盆地为代表的三大地面沉降区因长期过量开采地下水，产生大范围沉降，局部伴有地裂缝发生，其影响范围广、防治难度大，形成过程缓慢，难以恢复。截至 2009 年，全国累计地面沉降量超过 200 毫米的地区达到 7.9 万平方公里，发生地面沉降的城市超过 50 个，分布于北京、天津、河北、山西、上海、江苏、浙江、陕西等多个省（区、市）。

我国政府高度重视地面沉降防治工作，国务院领导曾多次作出批示，要求国土资源部门开展地面沉降监测与防治工作。早在 2002 年，时任国务院副总理的温家宝同志在国土资源部《关于长江三角洲地区地面沉降防治的调研报告》上批示：“超采地下水造成地面沉降在许多地方呈加剧趋势，成为影响生态环境和可持续发展的一个重大问题，必须引起足够重视并采取综合措施加以解决”。

为加强地面沉降防治工作的组织领导，强化协调配合，2007 年经国务院批准，建立了全国地面沉降防治部际联席会议制度。由国土资源部会同国家发改委、财政部、住建部、铁道部、交通部、水利部、环保总局、国务院法制办、地震局等部委，按照职责分工，研究地面沉降防治工作有关问题。此后，长三角、华北平原、汾渭盆地三个全国重点地区逐步开展地面沉降防治工作的联防联控，部省、省际地面沉降防控联席会议制度有力的推动了地下水和地面沉降监测工作，促进了监督监管工作的全面开展。

2、全国地面沉降 InSAR 调查与监测工程

2.1 InSAR 技术发展与规模化应用

2000 年前后，雷达干涉测量（InSAR）技术经过欧洲众多科研团队（TRE、IREA、e-GEOS、DLR、TuDelft、GAMMA、Altamira 等）的研究与发展，具备了从事地表形变调查与监测的基本条件，从形变信息提取的方法技术先后发展了常规差分干涉测量（D-InSAR）、相干目标差分干涉相位时间序列分析（如永久散射体干涉测量 PSInSAR，短基线集 SBAS 方法等）技术等，改变了单一时相下差分干涉相位受制于外部因素（大气、轨道等）影响监测结果精度偏低的困境。此后，随着欧空局（ESA）ENVISAT 卫星大量获取 ASAR 数据并保持较高的轨道测量精度，为长期规模化 InSAR 应用提供了数据基础。加之欧空局大力推动 InSAR 技术环境监测应用，陆续召开的 Fringe 国际 InSAR 技术研讨会极大的促进了多尺度地表形变高精度 InSAR 监测实践，拓展了这一空间对地观测新技术的应用领域。

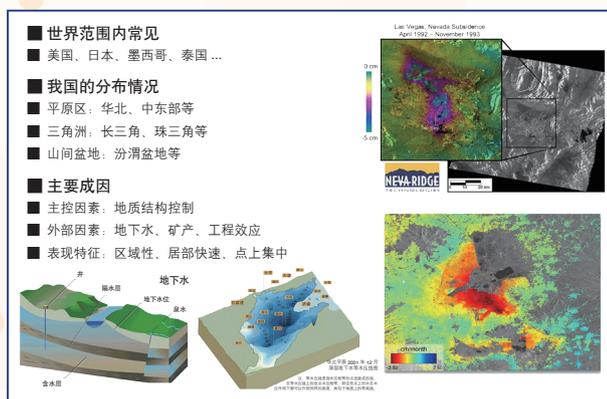


图 1. 地面沉降基本状况

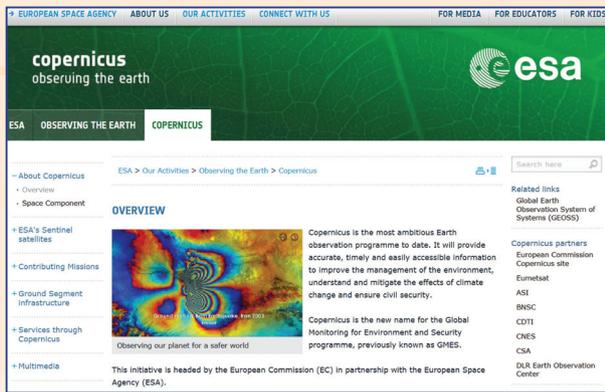


图 2. 欧洲哥白尼科学计划 (GMES) 与 Sentinel-1 卫星业务化 InSAR 应用

需要特别指出的是 ESA 支持的“全球环境监测计划 (GMES, Global Monitoring for Environment and Security)” 下属的 TerraFirma 项目, 该项目旨在利用近 ERS (卫星工作期为 1992-2000 年)、ENVISAT (工作期为 2002-2010 年) 以及 Sentinel-1 (2014 年发射, 双星编队模式) 系列卫星和 InSAR 技术进行地表移动及其灾害的调查与监测, 为灾害早期识别、风险评估和防灾减灾提供技术和数据支持。该项目根据地表形变的主控因素分为三个主题, 分别为构造地质专题、海岸带专题和水文地质专题。其中, 构造地质专题主要面向地震、活动断裂、大地构造活动等开展 InSAR 调查监测与灾害分析; 海岸带专题主要面向沿海低凹地区地面下沉与城市防洪减灾; 而水文地质专题则针对地下水开发利用引发的地面沉降, 山体滑坡及矿山 (固体或液体) 开采沉陷的大范围监测制图。

该计划始于 2003 年, 目前已进入第四阶段, 成为欧空局主导的 Copernicus 计划下陆地监测服务 (Copernicus Land Monitoring Service) 计划。至 2013 年已圆满完成第三阶段的工作, 进入第四阶段后, 主要利用 ESA 新一代中尺度雷达卫星 Sentinel-1, 继续围绕三个专题开展地表形变与地质灾害服务。截至 2014 年已经开展并完成了长期提供 TerraFirma 产品及在线服务的技术保障。



图 3. GMES 下的 TerraFirma 计划组成

2.2 全国地面沉降 InSAR 监测工程

从 2005 年起, 根据国土资源部的统一部署, 中国地质调查局 (CGS) 针对全国地面沉降调查监测与防治管理工作需要, 安排中国国土资源航空物探遥感中心 (AGRS) 率先在华北平原开展大范围地面沉降 InSAR (雷达干涉测量) 监测技术研究与应用示范, 至 2008 年, 完成了关键技术研发, 建立了基本的工作流程, 获得了北京、天津、沧州、德州等典型地面沉降区的监测成果, 经过与地面精密水准测量数据 (2 个示范区, 4 组观测数据, 150 余个验证点) 的对比, 取得了年沉降速率 3-5mm 的比较精度, 奠定了 InSAR 技术大规模应用的技术基础。

从 2008 年起, 航遥中心继续开展区域性地面沉降 InSAR 监测工程化应用实践, 在规模化应用中不断完善监测技术, 提升 InSAR 解决低相干条件下大范围广域监测的应用能力。至 2010 年底, 经过 5 年的技术研究与应用实践, 区域性地面沉降 InSAR 监测技术基本成熟, 工程化监测能力得到检验, 监测应用效果显著; 首次实现了华北平原、长三角和汾渭盆地近 25 万平方公里范围的全覆盖监测, 形成了区域地面沉降 InSAR 监测成果“一张图”, 获得了覆盖北京、天津、上海、河北平原、鲁北平原、豫北平原、苏锡常、杭嘉湖和扬泰通等地区自上世纪 90 年代 (因地区有所不同) 以来不同历史时期的监测成果, 编制了《华北平原地面沉降区 InSAR 调查与监测成果图集》和《长三角地面沉降 InSAR 监测成果图集》, 为开展全国地面沉降“扫面”调查起到了示范作用, 引领了 InSAR 技术在地面沉降、矿区塌陷、高铁路基变形、油田地表下沉等领域的技术发展, 支撑服务新一轮全国地面沉降防治规划的编制工作。



图 4. 《全国地面沉降防治规划 (2011 - 2020)》主要任务与地面沉降联席会议制度

从 2011 年起，为落实《全国地面沉降防治规划（2011-2020）》，中国地质调查局在“十二五”期间部署开展了我国中东部平原、盆地和三角洲等地面沉降已发区、易发区和潜在区共计约 75 万平方千米范围的 InSAR 调查计划。该计划依托“重点地区地面沉降 InSAR 调查”、“全国地表形变遥感地质调查”、“重大工程区地表形变 InSAR 监测”等项目，下设全国地面沉降已发区、易发区和潜在区“扫面”调查、重点沉降区带连续监测、重大工程高精度 InSAR 测量等主题，以期满足对全国地面沉降现状的全面掌控，并服务高铁、重点开发建设区对地面沉降基础数据的需要。“扫面”调查围绕重点地面沉降区动态监测和空白区“摸底”调查两个层次，于 2015 年底完成了华北平原、长江三角洲、汾渭盆地等三大重点沉降区新一轮全覆盖调查数据更新，实现了松嫩平原、下辽河平原、江汉-洞庭湖平原、珠三角地区、河南省、山东省和安徽省等中东部主要省份摸底调查。

- 2015 年目标:
- 完成长江三角洲、华北平原、汾渭盆地等主要地面沉降区和高速及重载铁路沿线等重大工程区的地面沉降调查
- 初步建立覆盖重点地区的监测网络：完成地面沉降区的地下水超采复核，控制并逐渐压缩地下水超采规模






图 5. 2015 年《规划》任务与目标

2.3 雷达数据

全国地面沉降 InSAR 调查与监测工程自开展以来，陆续应用了 ERS、ENVISAT 与 RADARSAT-1/2 等中等分辨率\中大覆盖 SAR 数据，以满足大范围覆盖监测需要。“十二五”期间，全国大范围监测中利用 RADARSAT-2 宽幅 SAR 数据 (wide, 30m 分辨率, 170km 幅宽, 编程定制) 实现“面上全覆盖”，以 TerraSAR-X、CosmoskyMed 等高分辨率 SAR 开展“点上、线上”精细监测，分年度、分层次推进多目标监测工作。

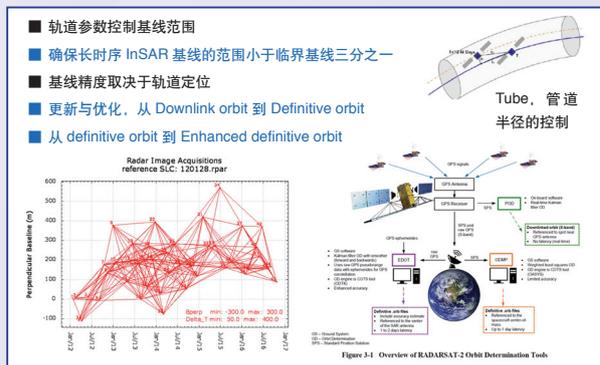


图 6. RADARSAT-2 卫星基线控制与轨道精度改进

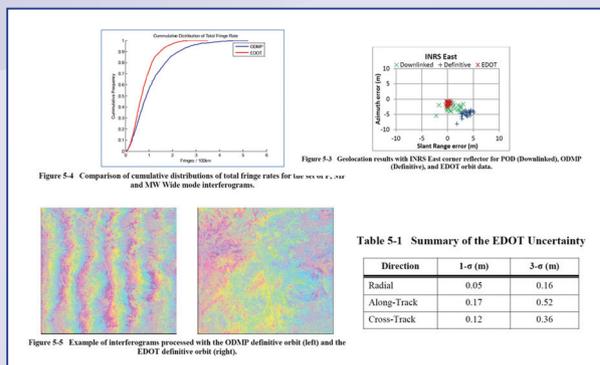


图 7. RADARSAT-2 轨道精度改进指标

从 SAR 数据和雷达卫星应用上具有典型意义的是由该工程的规模化应用牵引，使得 RADARSAT-2 (2011 年开始) 卫星强大的成像能力得以“释放”，开启了 wide 成像观测模式及其 wide fine、multi-look wide fine 以及 Extra fine 等观测模式，在大范围覆盖的条件下具备了多种分辨率 (由 30m、20m、8m 和 5m 等)。同时，针对 InSAR 解算的关键参数——基线控制范围和轨道定位精度，经过与 MDA 公司长时间的交流与合作，促使其提高了 RADARSAT-2 卫星的轨道定位精度 (优于 1m)，基线范围控制在 300-500m 以内。卫星观测模式的扩展与关键参数的控制，极大地促进了卫星数据质量的提升，惠及诸多应用领域。

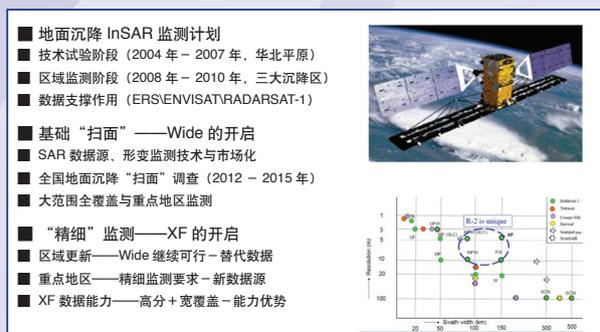


图 8. 全国地面沉降 InSAR 监测 SAR 数据

在大规模数据集成处理方面，侧重关键技术集成研发，建立面向广域监测的多轨道、长条带 InSAR 集成监测技术，研发了面向重大线性工程、“点上”目标的中高分辨率 InSAR 融合技术，以相干目标时间序列分析方法为主要手段，完善多尺度地表形变高精度监测技术，该技术入选中国地质调查局“百年地质调查—百项技术”，是空间对地观测技术支撑服务地质灾害调查与地质环境监测的重要代表性技术。

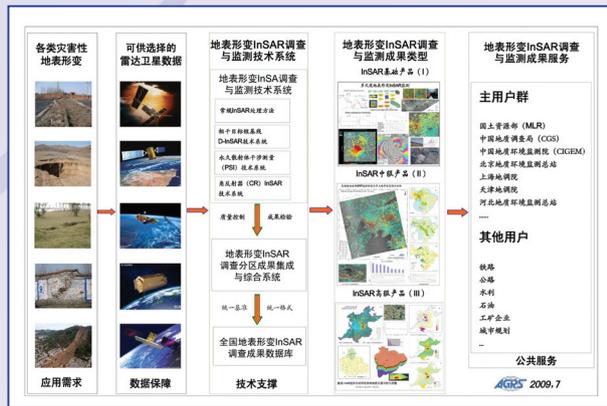


图 9. 地表形变 InSAR 监测与服务技术系统

3. 主要进展

3.1 明确了全国地面沉降的历史变化和发展现状

2015 年完成了全国 16 个省份地面沉降现状调查，获取了截至 2015 年 10 月的地面沉降现状结果，进一步明确了当前全国发生（10mm/a 以上）地面沉降的影响面积（超过 12 万平方千米，涉及 94 个地级市，425 个区县，其中发生在规划建设区的地级（及以上）城市超过 57 个）和发生严重沉降（超过 50mm/a）的地区范围（分布于 9 省 24 市 71 区县）。分别获取了京津冀、苏锡常、杭嘉湖、扬泰通（10 万平方千米）等大型地面沉降区带和北京、天津、沧州、德州等重点沉降漏斗高分辨率 InSAR 精细监测数据，系统反映了近十年来各地区地面沉降发展变化特征，通过综合区域地下水开发利用状况、断裂构造分布与地区产业布局等多元信息，有效揭示了地面沉降分布与演化特征，实现了全国、重点地区、重要城市、重点沉降区带等多尺度调查。

此外，在全国层面上突出体现了华北平原（京津冀）、长三角和汾渭盆地三大沉降区 2008-2010 年、2012-2015 年两期全覆盖 InSAR 监测数据更新，实现了当年监测，当年提交成果的快速及时服务，支撑了华北平原、长三角各主要城市、中部地区重点工矿区地表变形与地质环境管理。

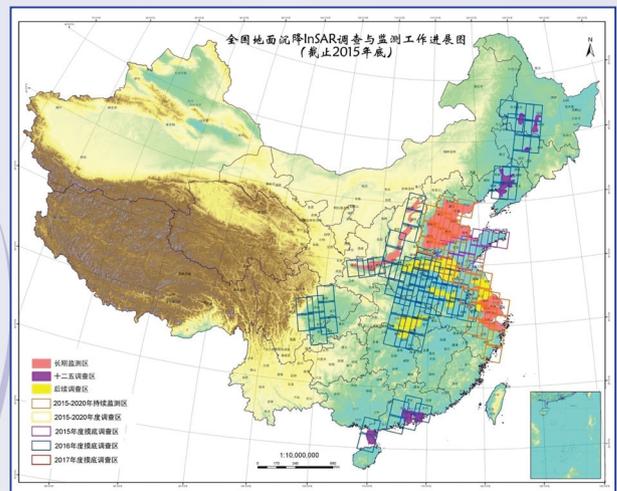


图 10. 全国地面沉降 InSAR 监测范围

针对《规划》中对高速铁路、重载铁路等线性工程沉降监测任务，完成了京沪高铁、京津城际、津保高铁、南水北调工程、西气东输工程、京沪线、京九线、上海磁悬浮轨道工程、沪杭高铁、甬温高铁、曹妃甸工业区等工程区沉降监测，实现了地质调查为京津冀协同发展、长江经济带和重大工程服务的目标。

从地质环境演化意义上，InSAR 监测成果丰富了对地面沉降发生发展规律的认识，为解决地下水合理开发、城市规划、工程布局等工作提供了高精度反映现势性的调查成果，直接服务于全国地面沉降规划落实，全国地质环境承载能力评价，重要城市群地质环境保障以及全国重大工程规划布局等决策管理工作。

3.2 全国地面沉降 InSAR 监测成果服务

在支撑服务国土资源部、中国地质调查局落实《全国地面沉降防治规划（2011-2020）》，推进全国地面沉降联防联控的过程中，综合多年来的监测成果编制了系列成果图集。其中《全国地面沉降 InSAR 调查与监测成果图集》、《京津冀协同发展区地面沉降 InSAR 监测成果图集》、《长三角地面沉降 InSAR 监测成果图集》是主要成果的集中体现。

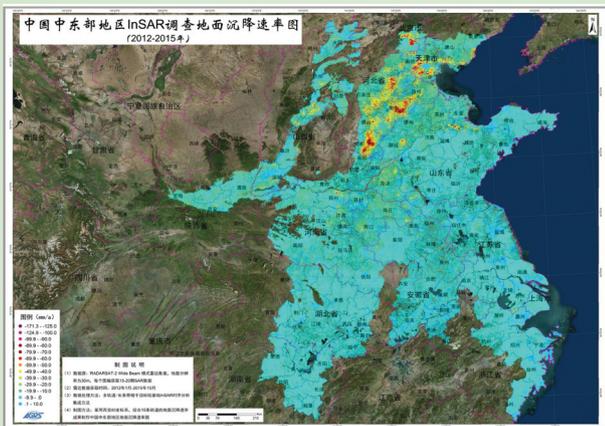


图 11. 中东部地区地面沉降 InSAR 监测“一张图”



图 12. 《全国地面沉降 InSAR 调查与监测成果图集》封面

系列《图集》立足于 InSAR 监测成果资料的特点，运用地图语言，充分利用高分辨率光学遥感数据、地下水观测资料等，综合 GIS 平台进行制图分析与表达，涵盖了全国地面沉降分布现状，中东部地面沉降 InSAR 监测“一张图”，三大沉降区不同历史时期变化序列，各主要平原、盆地摸底调查现状，重点城市和主要沉降区精细监测，重大工程区、工矿区地表形变中、高分辨率 InSAR 综合监测等成果。《图集》是支撑全国地面沉降防治规划的数据来源，也是地质环境演化研究、区域国土规划、铁路、交通、水利等部门的重大决策的技术依据；可供学术交流与普及地质灾害、水资源环境、遥感、测绘等专业知识使用。

3.3 当前的工作

根据我国当前地面沉降的基本状况，由中国地质调查局统一部署，继续分层次，有重点地开展面向中东部平原、盆地、海岸带和三角洲等地面沉降

已发区和快速发展区的动态监测，实现全国三大地面沉降区的每个年度的动态监测和中东部地区 3 年度监测数据更新。这—个工作模式充分考虑了地面沉降这一地质灾害的发生特点和影响特征，体现了中国地质调查局十大地质调查计划、50 个工程的部署原则，围绕重要经济区和城市群综合地质环境调查、地质灾害防治和地质环境保护支撑计划、国土开发与保护基础地质支撑计划等需要，做到了工作部署有重点，支撑服务有抓手的要求。

4、总结与思考

4.1 应用需求是技术进步的驱动力

中国地质调查局在地表形变 InSAR 监测工程化应用过程中给予了连续支持，率先在国内将 InSAR 技术发展为一项支撑地质环境调查监测的先导性手段，成为地面沉降监测“空-地一体化”体系中的“空中”部分，进而更好的支撑服务我国地质调查工作，为区域经济社会发展和城市建设提供环境安全保障。

就 InSAR 监测技术而言，“曾是王谢堂前燕，今入寻常百姓家。助力地学究天际，精研广用正当时”。经过广大研究者的努力探索和应用实践，InSAR 技术已走向成熟，新的研究方向和应用领域正不断开启，支撑 InSAR 技术广泛应用的卫星数据源与信息系统正以蓬勃之势向前发展，正如世界知名 InSAR 技术机构意大利 TRE 公司 Ferretti 博士所言，“Till now, InSAR is a mature technology, and it is now time to use it and it is time to think big!”

就 InSAR 技术的认可与接纳程度而言，广泛应用所取得的效果和解决问题能力的提升，促进了稳定的研究与应用群体的形成。而另一方面，目前的发展趋势中，新体制 SAR 卫星驱动监测应用技术进步，多领域应用牵引卫星参数优化，加上综合处理平台、云计算等，InSAR 技术本身已走向成熟。

就测量意义上的观测方式而言，InSAR 有别于点位观测的大地测量手段，以遥感的方式实现了几何测量的目标，具备了数千（万）平方公里范围上数以百万计的测量点的同步观测，而这恰是以往点位测量手段所不具备的。InSAR 与全球定位系统（GNSS）、水准等手段并非对立，而是实践中可以协同工作的“盟友”。

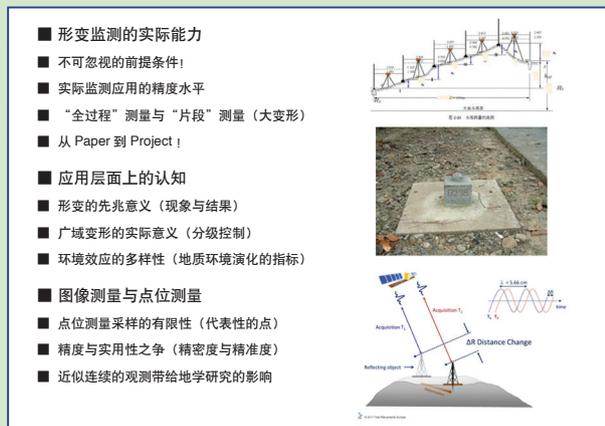


图 13. 地表形变 InSAR 监测技术能力

4.2 长期连续监测方显综合效益

从地表形变监测对象上，已开展工程的核心目标是地面沉降。但在全覆盖“一张图”的监测模式下，所测量的对象并非沉降单一类型。油田地表抬升（下沉）、矿山塌陷、构造活动、海岸带变化、城市扩展下的地表变化、地下工程建设引发的局部变形、桥梁变形、工程体变形、非均匀地表变形等在全覆盖调查监测中均有不同程度的体现，间接反映了多类型的地面变形的影响特征和主控因素。同时，就全国各地区不同地质条件下地面沉降的分异特征、变化规律等有了更为明确的认识。因此，InSAR 监测虽为一种观测数据，其内涵则是人类活动、资源开发利用、城市建设、工程布局等作用下地质环境变化的“指标因子”，既是人地互动下的特定“结果”，也是开发利用规划的一种“前提”。

从 InSAR 形变监测的实现途径上，需要制定出与观测对象变形尺度相符合的 SAR 数据接收方案，确保长期固定模式的 SAR 接收。实际工作中，连续的获取 SAR 数据是目前常用的（如 PSInSAR 技术、SBAS 方法等）时间序列分析方法的前提保障，在高精度监测结果要求下，需要工作区具有较长时间（1—3 年，视沉降状况和数据累积量而定）同一类型、同一模式、同一卫星的数据积累。而就数据本身，在类型固定的条件下，其质量首先取决于 SAR 的相位测量精度、信噪比等，其次则是与卫星相关的轨道控制精度、基线范围等。这些参数看似简单，实际上在形变监测中起到决定性的作用。ESA 从 ERS 到 Sentinel-1 三代雷达卫星的改进式发展就包含了对于上述参数的不断完善。

从 InSAR 观测的综合效益上，长期连续的获取 SAR 数据，形成长时序的形变监测数据，从较长的时间尺度上认识地质灾害现象及其变化特征，

是推进地质环境与经济活动关联关系研究的重要基础。而 InSAR 观测数据本身，既可用于未来趋势预测的基础，又是变化过程的记录。从实际监测的工作模式上，制定长期数据接收计划，有序的获取不同地区的 SAR 数据，既保证了重点地区的快速监测，又实现了大范围监测数据的定期更新，而随着监测范围的增加，时间长度的增大，InSAR 监测在经济学意义上的显著“正外部性”将得以释放，其价值远非一种观测数据。

4.3 进一步的发展思考

当前，随着 Sentinel-1（哨兵）等中大覆盖、双（多）星编队、短重放周期卫星的发展，InSAR 数据源不断增多。以 Sentinel-1 为例，其地面系统处理能力的设计指标超过 1T/天，相当于过去几年中所有对地观测卫星日接收数据量的总和。数据源解决之后，从事 InSAR 的机构随之“井喷”，这些因素共同作用，推动着 InSAR 向更为广泛的领域深入，

就实际应用而言，InSAR 并非适用于任何环境，应充分重视应用条件的科学判断。“过度鼓吹与不分条件而盲目的应用必将导致不科学的结果”，必然会对 InSAR 研究与应用行业产生不利影响。因而仍需客观分析，在监测应用之前应进行充分的适用性评价。到目前，尽管 InSAR 技术在诸多形变监测领域发挥了积极作用，但仍然必须理性的认识到，并不是所有的 InSAR 应用都能达到最佳的效果，因为“Failure is often perceived differently by different observers, so depends strongly on the participants and their philosophy”！不仅仅对于 InSAR，甚至测量技术，这一观点可推广至更为广阔的领域，取决于对研究对象和观测手段（广义的）能力与特性的深刻认识，唯此，方能做到知行统一！

推动测量技术进步，助力地学研究深入，InSAR 技术大有可为！以连续的观测方式实现由“面—线—点”的测量，也必将为测量这一学科和技术系统的发展方向，以此，“既见森林，又见树木！”地学应用中发挥 InSAR 测量优势，仍需学科交叉融合，要求“InSAR scientists should learn more about the object of InSAR observed and understand much beyond the technology itself”。尽管如此，仍须保持清醒的认识，虽然 InSAR 技术应用广泛，但并非解决所有问题的“灵丹妙药”，其独特之处更多的在于以遥感的方式获取高精度的形变（位移）测量数据。

编者按:

SENTINEL-1 卫星自发射以来,已经积累了大量的存档数据,但由于下载速度较慢,且只支持单景下载,给广大用户的数据应用带来了诸多不便。目前中科院遥感地球所已经下载了相当数量的存档数据,正在考虑以适当方式面向用户提供数据服务,请大家关注后续动态。

SENTINEL-1 卫星及产品介绍

编译 王媛媛 苏杭 靳丽伟 黄鹏

1. SENTINEL-1 卫星简介

SENTINEL-1 卫星是由两颗卫星 (SENTINEL-1A 和 SENTINEL-1B) 组成的卫星星座,两颗卫星在同一个轨道平面运行,轨道相差 180°, 重访周期为 6 天。

两颗卫星搭载先进的 C 波段合成孔径雷达 (SAR) 设备,可穿透雨、云、雾等不良天气状况,全天时、全天候进行稳定成像拍摄,尤其适于黑暗区域长期监测,以及极端天气条件下的突发紧急情况观测。其雷达干涉测量监测精度达毫米级,可监测到细微的地表变形。城市规划及地震、山体滑坡和火山喷发等自然灾害监测具有较高的监测精度。

SENTINEL-1 卫星设定为无冲突工作模式,可对全球陆地、沿海地区和水运航线进行高分辨率成像,也可进行全球海洋成像。该工作模式确保了卫星运行的可靠性和影像观测的长期一致性,可为全球用户提供长时间序列的卫星影像。

SENTINEL-1 卫星数据的其它应用包括,北极海冰监测;日常海冰、海洋环境(溢油、船舶和海上安全等)监测;海风、波浪和洋流监测;森林、水源和土壤变化监测;人道主义援助、突发灾害等应急监测。

2. SENTINEL-1 主要参数

SENTINEL-1 卫星主要参数如下表 1 所示。

表 1. SENTINEL-1 卫星主要参数表

发射时间	Sentinel-1A 于 2014 年 4 月 3 日发射 Sentinel-1B 于 2016 年 4 月 25 日发射
发射地点	法属圭亚那空间中心
轨道	太阳同步轨道
轨道高度	693 公里
轨道倾角	98.18°
重访周期	6 天, (在赤道上) 两颗卫星星座
设计寿命	至少七年
卫星质量	2300 公斤 (包括 130 公斤燃料)
传感器	C 波段合成孔径雷达 (SAR), 5.405 GHz

3. 成像模式

SENTINEL-1 卫星搭载 C 波段合成孔径雷达,工作频率为 5.405GHz。包括一个右视相控阵列天线,可提供垂直向和方位向快速扫描,卫星存储容量为 1410 Gb, X 波段下行能力为 520Mbit/s。

SENTINEL-1 卫星具有四种独特的成像模式,如图 2 所示。

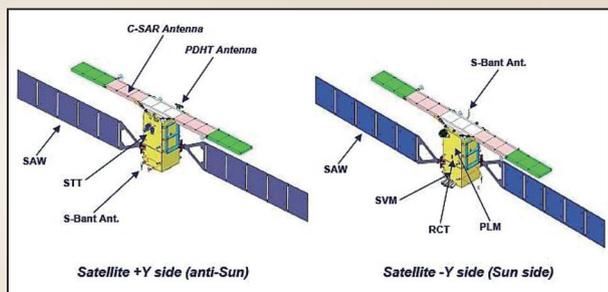


图 1. SENTINEL-1 卫星示意图

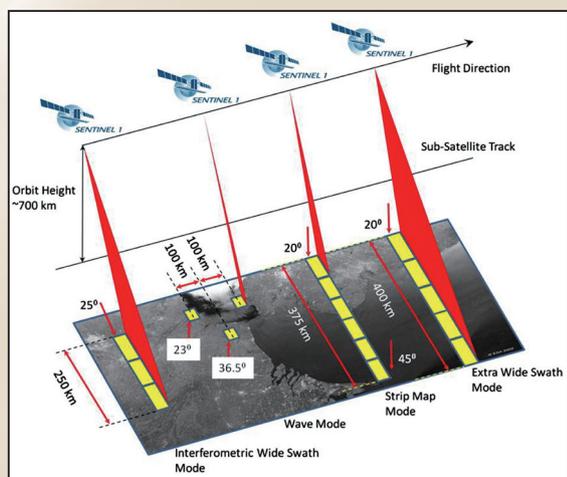


图 2. SENTINEL-1 四种成像模式示意图

(1) 条带模式 (SM: Stripmap)

条带模式 (SM) 延续了 ERS 和 ENVISAT 卫星的运行模式, 成像幅宽为 80km, 空间分辨率为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ (单视)。可通过改变光束入射角和仰角波束宽度, 从 S1 至 S6 六种波束中选择一种。

(2) 干涉宽幅模式 (IW: Interferometric Wide Swath)

干涉宽幅模式 (IW) 是 SENTINEL-1 卫星默认的陆地成像模式, 可满足大多数任务需求。该模式影像幅宽为 250km, 空间分辨率为 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$ (单视)。TOPSAR 处理技术的采用确保了整幅图像具有均匀的图像品质, 与传统的 ScanSAR 数据图像相比, 扇形边效应得到了很好的控制。

(3) 超宽模式 (EW: Extra Wide Swath)

超宽模式 (EW) 与 IW 模式相同, 也可用于干涉测量, 同样采用了 TOPSAR 处理技术。图像幅宽更大, 为 400km, 空间分辨率为 $20\text{ m} \times 40\text{ m}$ 。EW

模式由于幅宽大、重访周期短, 特别设定为海事、冰川和极地区域监测服务。

(4) 波模式 (WV: Wave)

SENTINEL-1 卫星波模式 (WV) 与 ERS 和 ENVISAT 卫星的此种成像模式相同, 由于采用了更大的数据段和新型“蛙跳”式成像, 其图像分辨率更高。WV 模式包含多个数据段, 每个数据段被包含在一个独立的数据产品内, 数据段可以作为独立的图像来处理。

WV 模式成像的数据段大小为 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$, 分辨率为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$, 沿轨道方向每隔 100km, 会在两种入射角 (23° 或 36.5°) 之间转换。一种入射角的数据段每 200 公里被分割一次。

在海域, WV 模式默认的极化方式为 VV, WV 模式与 SM 模式具有相同的比特率, 由于数据段小、单极化成像、每 100km 就转换一次入射角这些特点, 数据量小很多。

SENTINEL-1 卫星 WV 模式与全球海洋波模型联合应用, 可以获取开放海域的波向、波长和波高。

SM, IW 和 EW 模式可单极化 (HH 或 VV) 或双极化 (HH+HV 或 VV+VH) 方式成像。WV 模式仅支持单极化 (HH 或 VV) 成像。

SENTINEL-1 卫星设计为无冲突方式在轨运行, 陆地上默认为 IW 模式 VV+VH 双极化方式成像, 海洋上默认为 WV 模式 VV 单极化方式成像。EW 模式主要用于大面积海岸带监测, 包括船舶交通、溢油和海冰等监测。SM 模式仅用于紧急情况下突发事件的监测。

SENTINEL-1 卫星四种成像模式特征如下表 2 所示。

表 2. SENTINEL-1 卫星四种成像模式特征表

	条带模式 (SM)	干涉宽幅模式 (IW)	超宽模式 (EW)	波模式 (WV)
幅宽	80km	250km	400km	—
单数据段拍摄长度	—	—	—	20km
沿轨方向数据段分割长度	—	—	—	100km
入射角范围	$18.3^\circ \sim 46.8^\circ$	$29.1^\circ \sim 46.0^\circ$	$18.9^\circ \sim 47.0^\circ$	$21.6^\circ \sim 25.1^\circ$ $34.8^\circ \sim 38.0^\circ$
子幅数	—	3	5	—
方位转角	—	$\pm 0.6^\circ$	$\pm 0.8^\circ$	—
仰角波束数	6	—	—	2
视数	单视	单视	单视	单视

(接上页)

	条带模式 (SM)	干涉宽幅模式 (IW)	超宽模式 (EW)	波模式 (WV)
极化方式	双极化 HH+HV, VV+VH 单极化 HH, VV	双极化 HH+HV, VV+VH 单极化 HH, VV	双极化 HH+HV, VV+VH 单极化 HH, VV	单极化 HH, VV
最大信噪比	-22dB	-22dB	-22dB	-22dB
辐射稳度	0.5dB (3σ)	0.5dB (3σ)	0.5dB (3σ)	0.5dB (3σ)
辐射精度	1dB (3σ)	1dB (3σ)	1dB (3σ)	1dB (3σ)
相位误差	5°	5°	5°	5°

SENTINEL-1 卫星四种成像模式入射角、分辨率、幅宽和极化方式如下表 3 所示。

表 3. SENTINEL-1 卫星四种成像模式入射角、分辨率、幅宽及极化方式

模式	入射角°	分辨率	幅宽	极化方式
SM	20~45	5 × 5m	80km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
IW	29~46	5 × 20m	250km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
EW	19~47	20 × 40m	400km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
WV	22~35 35~38	5 × 5m	20 × 20km	HH, VV

4. 产品级别

SENTINEL-1 卫星在条带模式 (SM)、干涉宽幅模式 (IW)、超宽模式 (EW) 和波模式 (WV) 下成像的数据由 PDGS 进行数据处理和分发, 产品处理级别分为 0 级、1 级和 2 级。如图 3 所示。

SENTINEL 卫星数据产品面向公众、科学和商业用户均开放使用。近实时 (NRT) 应急响应数据可在一小时内网站发布 (主要针对地震、洪水等灾难事件), 优先领域在三个小时内提供, 24 小时内成像数据进行系统归档。

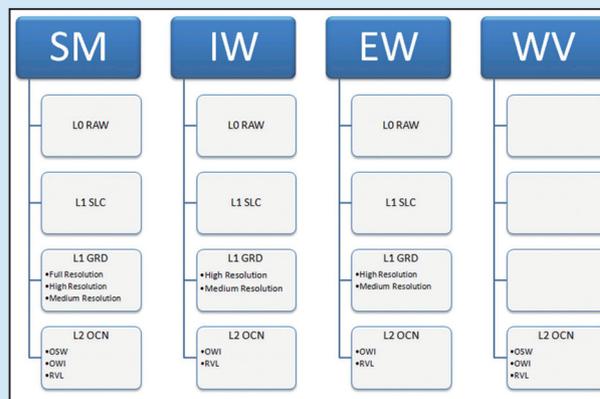
TOPSAR 模式的 2 级 OWS 产品不可用。

0 级产品是生产其它所有高级别产品的基础。

只在 SM、IW 和 EW 模式下有 0 级数据产品。

1 级产品有 SLC (Single Look Complex) 和 GRD (Ground Range Detected) 两种产品。GRD 产品分辨率取决于成像模式和视数。

2 级海洋产品由 1 级产品衍生而来。2 级海洋 (OCN) 产品有海洋风场 (OWI: Ocean Wind field), 涌浪 (OSW: Ocean Swell spectra), 表面径向速度 (RVL: Radial Velocity)。不同的成像模式决定了不同种类的海洋产品。



OSW: Ocean Swell spectra — 涌浪
OWI: Ocean Wind field — 海风场
RVL: Radial Velocity — 径向波速

图 3. SENTINEL-1 卫星数据成像模式与产品级别

5. 重访周期与覆盖范围

与 ERS-1/2 和 ENVISAT ASAR 相比, SENTINEL-1 卫星重访周期更短, 覆盖范围更宽, 分辨率更高, 且可以双极化模式进行全球成像。

SENTINEL-1 卫星为近地太阳同步轨道, 重访周期为 12 天, 每个周期拍摄 175 轨道。单颗

SENTINEL-1 卫星干涉宽幅模式 (IW) 每 12 天可扫描全球陆地一次。两颗卫星组成的卫星星座 6 天可扫描全球陆地一次。由于轨道间距随纬度变化, 高纬度地区的重访频率明显比赤道上高。

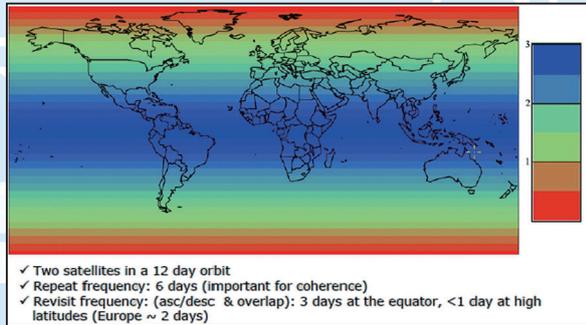


图 4. SENTINEL-1A 和 SENTINEL-1B 卫星星座重访频率随纬度变化示意图

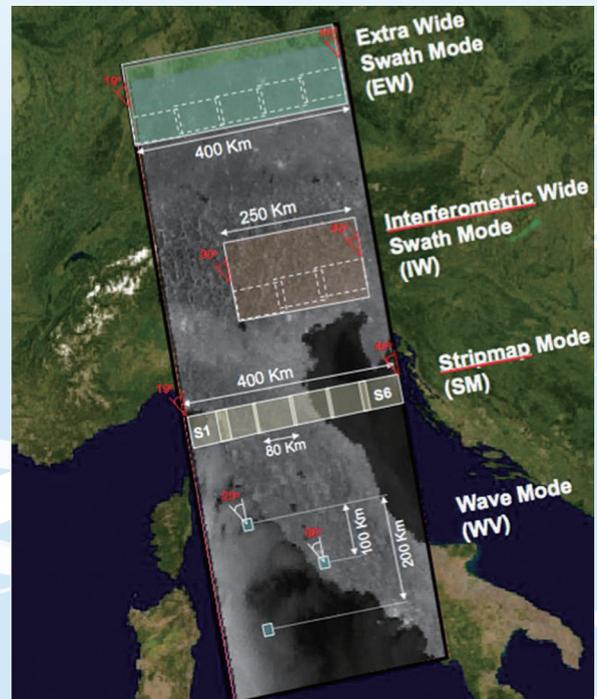


图 5. SENTINEL-1 影像幅宽覆盖范围示意图

6. 命名规则

(1) SENTINEL-1 数据产品文件夹命名规则

SENTINEL-1 产品文件夹名称由大写字母、数字和字符组成, 并由下划线 (_) 隔开。

MMM_BB_TTTR_LFPP_YYMMDDTHHMSS_YYYYMMDDTHHMSS_OOOOOO_DDDDDD_CCC.SAFE

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

上图中各字段注释如下:

- 1、卫星名称: S1A 或 S1B。
- 2、模式 / 波束: “S1~S6” (SM) /IW/EW/WV。
- 3、TTT: 产品类型 RAW/SLC/GRD/OCN; R: 分辨率级别, 为 F/H/M, 仅用于 SLC 和 OCN 产品类型 (F: Full resolution; H: High resolution; M: Medium resolution)。
- 4、L: 处理级别, 为 0/1/2; F 为产品级别, 为 S/A (S: Standard; A: Annotation, A 级别产品仅供 PDGS 内部使用, 不分发); PP 代表 SH (single HH polarisation)/SV (single VV

polarisation)/DH (dual HH+HV polarisation)/DV (dual VV+VH polarisation)。

- 5、开始日期 / 时间。
- 6、结束日期 / 时间。
- 7、轨道号: 范围是 000001~999999。
- 8、任务 ID 号: 范围是 000001~FFFFFF。
- 9、产品唯一 ID 号: 十六进制字符串组成。
- 10、产品文件扩展名: SAFE。

(2) SENTINEL-1 数据产品子文件命名规则

在一个产品文件夹中, 每个子文件遵循与文件夹类似的命名规则, 只是以小写字母、数字和字符组成, 由下划线 (_) 分隔开。

mmm_sss_ttt_pp_yyymmddthhmss_YYYYMMDDTHHMSS_oooooo_ddd_ddd_nnn.eee

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

上图中各字段注释如下:

- 1、卫星名称: s1a 或 s1b。
- 2、模式 / 波束: SM 模式 “s1~s6”; IW 模式 “iw1~iw3”; EW 模式 “ew1~ew5”; WV 模式 “wv1~wv2”。
- 3、产品类型 slc/grd/ocn。
- 4、极化方式: hh (single HH polarisation); vv (single VV polarisation); hv (single HV polarisation); vh (single VH polarisation)。

- 5、开始日期 / 时间。
- 6、结束日期 / 时间。
- 7、轨道号: 范围是 000001~999999。
- 8、任务 ID 号: 范围是 000001~FFFFFF。
- 9、景号 ID。
- 10、文件扩展名: 表示文件的数据格式, 为 tiff, nc, xml, html, kml, xsd 或者 png。

本期 目录

- 全国地面沉降 InSAR 调查与监测工程进展介绍
- SENTINEL-1 卫星及产品介绍
- 封面：高分三号天津卫星影像图（该卫星是中国第一颗高分辨率 C 波段合成孔径雷达卫星）



中国科学院遥感与数字地球研究所

开户行：中国工商银行北京永丰支行

户 名：中国科学院遥感与数字地球研究所

账 户：0200151809100041862

服务热线：(010) 62553662 62554865

传 真：(010) 82631979

主 页：<http://www.radi.ac.cn/>

数据查询网址：<http://eds.ceode.ac.cn/>

数据服务电子信箱：imgserv@radi.ac.cn

数据服务部地址：北京市朝阳区大屯路科学园南里风林绿洲

18 号楼 201 室 邮编：100101

出版日期：2016 年 12 月

本期责任编辑

靳 丽 伟