

天基干涉合成孔径雷达技术与展望

陈筠力¹, 刘艳阳², 陈重华², 赵迪²

(1. 上海航天技术研究院, 上海 201109; 2. 上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘要: 天基干涉合成孔径雷达(InSAR)技术发源自合成孔径雷达(SAR)技术, 突破性地实现了平面向立体维度的拓展, 并在此基础上衍生了差分干涉(D-InSAR)等一系列技术研究方向。经过近 30 年的技术积累和工程实践, InSAR 技术已从理论走向工程实践, 填补了天基高效测绘手段的空白, 产生了极大的应用效益, 其中, 德国 TerraSAR-X/TanDEM-X 系统、我国天绘-2 卫星系统均为典型代表。同时, 基于 InSAR 技术体制以及在轨数据的积累和研究, 不断衍生新的技术方向、新的应用前景, 该技术领域仍具有极大的发展潜力和广泛的应用前景。本文从 InSAR 技术原理出发, 介绍了天基 InSAR 卫星的发展现状及典型应用。通过天绘-2 卫星系统真实在轨数据的分析与解读, 阐述了我国在该领域的工程与技术基础。通过分析天基 InSAR 主要应用方向的观测需求, 给出了未来该领域的发展方向。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 差分干涉; 极化; 数字高程模型; 地表形变监测

中图分类号: TN 911.73; TP 391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.03.012

Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar: Status and Prospect

CHEN Junli¹, LIU Yanyang², CHEN Zhonghua², ZHAO Di²

(1. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: Spaceborne interferometric synthetic aperture radar (InSAR) is one of the important applications of synthetic aperture radar (SAR). It extends the observation of SAR from two-dimension to three-dimension, based on which a series of further applications such as differential InSAR (D-InSAR) are developed. After nearly 30 years of technical accumulation and engineering practice, InSAR has developed from theory to engineering practice, filling in the gaps of spaceborne efficient surveying and mapping and having produced great application benefits in earth observation. The TerraSAR-X/TanDEM-X system of German and the Tianhui-2 satellite system of China are typical representatives. Meanwhile, due to the constant accumulation of InSAR research achievements, novel techniques and applications have been proposed continuously, and the spaceborne InSAR field still has great development potential and wide application prospects. In this paper, the basic principle of InSAR, together with the development status and typical applications of spaceborne InSAR systems, are reviewed. The achievements of China in spaceborne InSAR systems are presented by the interpretation of images observed by the Tianhui-2 satellite. By analyzing the observation requirements for the main application directions of spaceborne InSAR systems, the development direction of this field in the future is given.

Key words: interferometric synthetic aperture radar (InSAR); differential synthetic aperture radar (D-InSAR); polarimetric; digital elevation model (DEM); surface deformation monitoring

收稿日期: 2021-04-02; 修回日期: 2021-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61601298)

作者简介: 陈筠力(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为星载合成孔径雷达系统总体设计与信号处理。

通信作者: 刘艳阳(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为星载合成孔径雷达系统设计与信号处理。

0 引言

近些年来,星载干涉合成孔径雷达(InSAR)因其全天时、全天候、高分辨率、宽幅对地观测能力,得到了国内外的普遍关注与研究^[1-6]。该技术利用多幅相干合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的图像进行干涉处理,通过获取干涉相位得到主辅雷达相对目标的斜距差,进一步测量反演目标的位置及其运动变化信息^[3-5],已广泛应用于数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)生成^[6-9]、大范围地表形变监测^[11-15]、森林生物量反演^[16-20]、海面流场测量^[21-25]等领域。

20世纪80年代早期,ZEBKER等^[4]首次利用机载SAR和卫星SeaSAR卫星数据验证InSAR技术的可行性。此后,国内外基于欧空局ERS-1/2^[26]、ENVISAT ASAR^[27]和Sentinel-1A/B^[28],加拿大RadarSAT-1/2^[29],日本ALOS-2^[30]等SAR卫星数据开展了大量的重复航过InSAR技术研究,如地表形变监测、高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)获取等,有效地促进了相关理论方法和应用技术的迅速发展。重复航过星载InSAR面临着严重的航过间大气延迟差异、时间去相干及基线测量精度低等问题,影响了DEM生成精度^[7]。

星载单航过InSAR利用多副接收天线同时获取多幅相干SAR图像进行干涉处理,可有效避免上述问题实现高精度DEM获取。作为第1个星载单航过SAR系统,美国SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)系统将雷达安装在60 m长度的伸展臂两端,获取了南纬56°到北纬60°范围内满足DTED-2(Digital Terrain Elevation Data level 2)标准的DEM^[31]。2010年,德国发射了TanDEM-X卫星,与之前发射的TerraSAR-X构成了全球第1个分布式编队InSAR卫星系统^[7]。2016年,TanDEM-X利用垂直航迹干涉技术实现了全球满足HRTI-3标准的DEM生成。此外,通过灵活的基线及载荷设置,TanDEM-X还开展了沿航向干涉SAR技术、极化干涉SAR技术等科学试验,极大地促进了分布式编队卫星InSAR技术的发展^[32]。2019年,我国成功发射了天绘-2号SAR卫星,是我国首个分布式编队SAR卫星,在国际上是继TanDEM-X系统后的第2个微波干涉测绘卫星系统^[33]。天绘-2号卫星系统在轨测试结果表明,可满足1:50 000比例尺测图精度要求。

1 InSAR基本原理

SAR利用距离向大带宽脉冲压缩技术和方位向孔径合成技术获取地物目标回波,经成像处理,实现高分辨率对地成像观测和特征识别^[1-2,34]。SAR图像信号可表示为^[34]

$$s = K \exp\left(-j2\pi \frac{r_{Tx} + r_{Rx}}{\lambda}\right) \quad (1)$$

式中: r_{Tx} 、 r_{Rx} 为发射雷达天线相位中心和接收雷达天线相位中心到目标的距离; λ 为雷达波长; K 为与目标后向散射及雷达方程相关的复数。对于自发自收雷达, $r_{Tx} = r_{Rx} = r$ 。

InSAR通过对同一地区获取的两/多幅相干SAR图像进行干涉处理,通过测量干涉相位实现高精度相对测距^[5]。以两幅自发自收SAR图像为例,主辅SAR图像经干涉处理后可表示为

$$I_F = s_1 \cdot s_2^* \quad (2)$$

式中: s_1 、 s_2 为主辅SAR图像。

干涉相位可表示为

$$\varphi = \text{angle}(I_F) = 4\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \quad (3)$$

式中: $\text{angle}(\cdot)$ 为取相角运算符; r_1 、 r_2 为主辅SAR天线相位中心到目标的斜距。

由式(3)可知

$$r_2 - r_1 = \frac{\varphi}{4\pi} \lambda \quad (4)$$

干涉相位测量精度与主辅SAR图像的相干系数 γ 有关^[35],

$$\gamma = \frac{|E(s_1 \cdot s_2^*)|}{\sqrt{E(|s_1|^2)E(|s_2|^2)}} \quad (5)$$

式中: $E(\cdot)$ 为期望函数。

主辅SAR图像干涉相位概率密度函数为^[36]

$$p_\varphi(\varphi) = \frac{\Gamma\left(N_1 + \frac{1}{2}\right)(1 - \gamma^2)^{N_1} \gamma \cos \varphi}{2\sqrt{\pi} \Gamma(N_1)(1 - \gamma^2 \cos^2 \varphi)^{N_1 + \frac{1}{2}}} + \frac{(1 - \gamma^2)^{N_1}}{2\pi} F\left(N_1, 1; \frac{1}{2}; \gamma^2 \cos^2 \varphi\right) \quad (6)$$

式中: N_1 为多视视数; $\Gamma(\cdot)$ 为gamma函数; $F(\cdot)$ 为高斯超几何分布函数。

干涉相位标准差可表示为

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} \varphi^2 p_\varphi(\varphi) d\varphi} \quad (7)$$

不同视数下干涉相位标准差随相干系数变化曲线如图 1 所示。由图可知,当多视数为 9 视时,相干系数大于 0.5,相对测距精度即可达到亚波长量级。

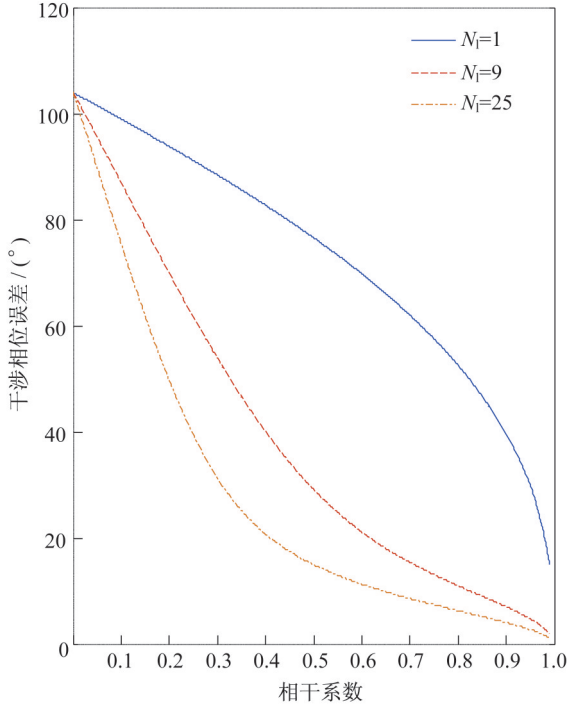


图 1 干涉相位误差随相干系数变化曲线

Fig.1 Variations of the interferometric phase error with the coherence coefficient

根据对目标位置及其变化敏感程度的不同, InSAR 可分为垂直航迹干涉 (Cross-Track InSAR, CT-InSAR) 和沿航迹干涉 (Along-Track InSAR, AT-InSAR)^[5]。

1) 垂直航迹干涉。

垂直航迹 InSAR 通过对垂直航向不同视角获取的两幅相干 SAR 图像进行干涉处理, 获得主辅雷达到目标的斜距差。与雷达立体测量 (通过图像配准获得相对斜距差) 相比, InSAR 的相对斜距测量精度可达亚波长量级精度, 可在主辅雷达小视角差的情况下实现高精度地面高程^[5-6]。

这里以一发双收分布式编队 SAR 卫星为例, 其系统观测几何如图 2 所示。在 WGS-84 坐标系下, 考虑图像中某一目标点, 其坐标为 $p_t = (p_x \ p_y \ p_z)$, s_k 、 v_k 分别表示雷达的轨迹和速度矢量, 下标 $k=1, 2$ 分别为主星雷达和辅星雷达, b 为主辅雷达瞬时基线矢量, B_a 和 B_e 分别为沿航迹基线和垂直有效基线, r_1 为主星雷达到目标的斜距。

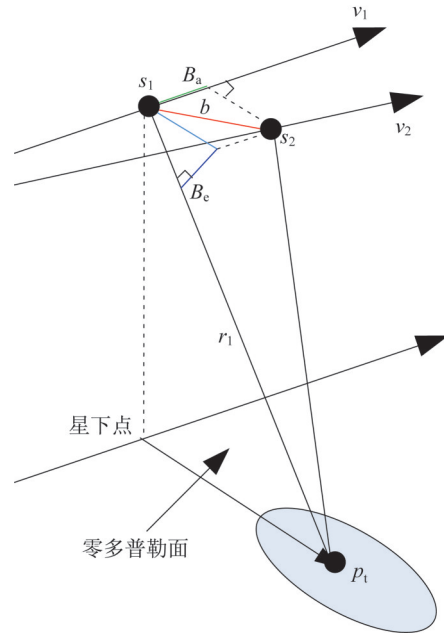


图 2 垂直航迹 InSAR 测高空间几何关系

Fig.2 Observation geometry of cross-track InSAR

InSAR 定位方程为^[37]

$$\begin{cases} |p_t - s_1(t_1)| = r_1 \\ \frac{v_1(t_1) \cdot (p_t - s_1(t_1))}{\lambda r_1} = f_{dc} \\ |p_t - s_1(t_2)| + |p_t - s_2(t_2)| = 2r_1 + \frac{\varphi}{2\pi} \lambda \end{cases} \quad (8)$$

式中: r_1 、 f_{dc} 为主星雷达斜距和多普勒中心频率; t_1 、 t_2 为主辅星干涉时刻; $s_2 = s_1 + b$, 其中, b 为主辅雷达瞬时基线矢量。

系统高程测量精度与干涉相位测量精度的关系^[5]为

$$\sigma_h = \frac{\sigma_\varphi}{2\pi} H_{amb} \quad (9)$$

式中: H_{amb} 为模糊高度。

$$H_{amb} = \frac{\lambda r_1 \sin \theta_i}{B_e} \quad (10)$$

式中: θ_i 为入射角。

由式 (10) 可知, 垂直有效基线长度 (视角差) 是影响干涉测高精度的重要因素。系统设计需综合考虑垂直有效基线长度对相干系数及模糊高度的影响^[7]。

2) 沿航迹干涉。

沿航迹干涉测量是利用同一航迹上不同时间采集的多幅 SAR 图像进行干涉处理, 其干涉相位代

表了这些航过目标的径向位移^[5,10]:

$$\Delta r = \frac{\varphi}{4\pi} \lambda \quad (11)$$

通过拟合形变量与时间可进一步获取目标径向速度 v_r ^[12]。通过改变 SAR 图像序列获取的时间间隔,目标运动速率测量范围可从 m/s 变化至 ms/a^[38]。

单航过沿航迹 InSAR 系统 SAR 图像序列时间间隔短,可实现快速运动目标运动速度的测量,典型应用为洋流测速、地面动目标显示(Ground Moving Target Indication, GMTI)等^[38]。重复航过沿航迹 InSAR 系统 SAR 图像获取时间间隔长(为卫星轨道回归周期的整数倍),可用于地面大尺度位移及慢变目标运动速率的测量^[12]。这里需要指出的是,实际重复航过 InSAR 系统不可避免地会出现垂

直航迹基线分量,为降低其对沿航迹干涉效果的影响,需要天基 InSAR 系统采用严格轨道设计与控制技术,并需在地面处理中补偿该分量引入的地形干涉相位^[12]。

2 天基 InSAR 系统发展现状及典型应用

2.1 天基 InSAR 系统发展现状

从 20 世纪 80 年代以来,随着 InSAR 技术日趋成熟,国内外 InSAR 应用需求不断推动着星载 InSAR 系统的发展。SAR 卫星系统设计从最初无法干涉发展到具备重复航过 InSAR 观测能力,从重复航过 InSAR 发展到具备单航过 InSAR 观测能力。典型 SAR 卫星的干涉能力见表 1。

表 1 部分天基 InSAR 系统
Tab.1 Some spaceborne InSAR systems

卫星	所属国家或组织	发射年份	干涉能力
ERS-1/2	ESA	1991、1995	重轨 InSAR:回归周期 35 d,双星干涉间隔 1 d
SRTM	美国	2000	单航过 InSAR:伸展臂体制
RadarSAT-2	加拿大	2007	重轨 InSAR:回归周期 24 d 单航过 InSAR:双天线接收模式
ALOS-2	日本	2014	重轨 InSAR:回归周期 14 d
TerraSAR-X/TanDEM-X	德国	2007、2010	重轨 InSAR:回归周期 11 d 单航过 InSAR:分布式绕飞编队、双天线接收模式
Sentinel-1A/B	ESA	2014、2016	重轨 InSAR:回归周期 12 d,双星重轨干涉周期 6 d
天绘-2 号	中国	2019	单航过 InSAR:分布式绕飞编队

重复航过 InSAR 系统经历单星 InSAR 发展到了多星跟飞组网 InSAR 系统。典型的多星跟飞组网 InSAR 系统有欧空局(ESA)的 ERS-1 和 ERS-2 两颗 SAR 卫星,两星分别于 1991 年和 1995 年发射,具备相隔 1 d 的重复轨道 InSAR 观测能力^[26]。此后,ESA 又于 2014 年和 2016 年分别发射了 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B,双星跟飞相位间隔 180°,该 InSAR 星座重轨周期为 6 d^[28]。

单航过 InSAR 系统经历单星 InSAR 发展到了多星绕飞编队 InSAR 系统。作为第 1 个星载单航过 SAR 系统,美国 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)系统将雷达安装在 60 m 长度的伸展臂两端,获取了南纬 56°到北纬 60°范围内满足 DTED-2 标准的 DEM^[31]。2007 年,加拿大发射的 RadarSAT-2 具备双通道接收能力,可进行沿航迹 InSAR 测量^[29]。2010 年,德国发射了 TanDEM-X 卫星,与

之前发射的 TerraSAR-X 构成了全球第 1 个分布式编队 InSAR 卫星系统^[32]。2019 年,我国成功发射了天绘-2 号 SAR 卫星^[33],是我国首个分布式编队 SAR 卫星,在国际上是继 TanDEM-X 系统后的第 2 个微波干涉测绘卫星系统。

2.2 InSAR 典型应用

目前,InSAR 技术已广泛应用于地面高程测量、地表形变监测、森林生物量反演、洋流测速等领域^[7]。

2.2.1 地面高程测量

数字高程模型(DEM)是描述地球表面形状的三维数字模型,由一系列包含有地理平面坐标和高程的数据集组成,在科学研究、经济建设和军事领域都有着重要的应用价值。如前所述,垂直航迹 InSAR 是获取高精度 DEM 的重要技术手段,特别是

在分布式卫星 InSAR 卫星体制下^[7,33]。分布式编队 SAR 卫星不仅可以有效克服重复轨道 InSAR 时间去相干及大气延迟等问题,还可提供灵活的基线配置和高精度基线测量结果,有效提升了 DEM 生成精度。天绘-2 号卫星获取的新疆吉木萨尔县宜化露天煤矿矿坑 DSM 图如图 3 所示。

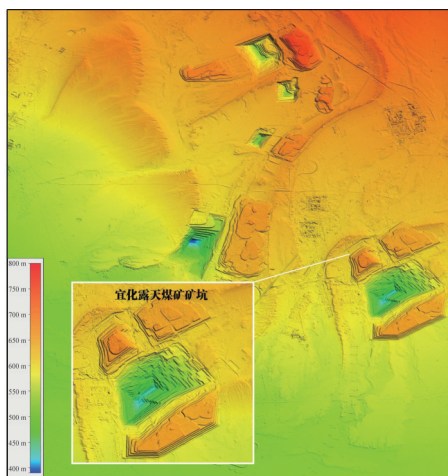


图 3 天绘-2 号获取的新疆吉木萨尔县矿坑 DSM 图

Fig.3 DSM map of the mine pit of Jimusar County, Xinjiang acquired by Tianhui-2

2.2.2 地表形变监测

InSAR 技术以其大范围、高精度、高空间密度的形变获取能力,被广泛用于大范围地表形变监测^[12]。从应用领域而言,InSAR 形变监测主要分为

突发地灾的应急与日常监测应用两大类:一类是基于差分 InSAR (D-InSAR) 技术的地震、重大滑坡等大尺度位移灾后调查应用^[14];另一类主要是基于面向时间序列 InSAR 技术的活动断裂、区域性地面沉降、滑坡监测和矿山塌陷等日常监测应用^[12,15]。

D-InSAR 技术利用覆盖同一地区的形变前后 SAR 图像进行干涉处理,然后除去垂直有效基线引入的地形干涉相位获取地表微量形变的测量技术^[11,14]。差分干涉形变量提取方法有两轨法和三轨法:两轨法利用外部先验 DEM 反演去除垂直有效基线引入的地形干涉相位;三轨法利用形变前或形变后的两景 SAR 图像反演去除地形干涉相位。

为有效克服时间去相干及大气延迟对 D-InSAR 测量精度的影响,时间序列 InSAR 技术通过提取在时间序列上具有稳定散射特性的高相干点,利用不同相位分量的时空频谱特性,获得经过地形、轨道以及大气误差改正的形变速率场^[12-13]。时间序列 InSAR 技术典型方法有永久散射体方法 (Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR) 和小基线集方法 (Small BAseline Subset, SBAS)^[12,39],其中, PS-InSAR 采用公共主图像,SBAS 采用多主图像。目前,时序 InSAR 技术已成功应用于山体滑坡等地质灾害早期预警,堤坝、交通路网沿线、铁路沿线监测和地铁沿线稳定分析、机场稳定性评估和桥梁监测等城市基础设施监测中^[15]。利用 Sentinel-1A/B 数据反演的上海航天城沉降结果如图 4 所示。

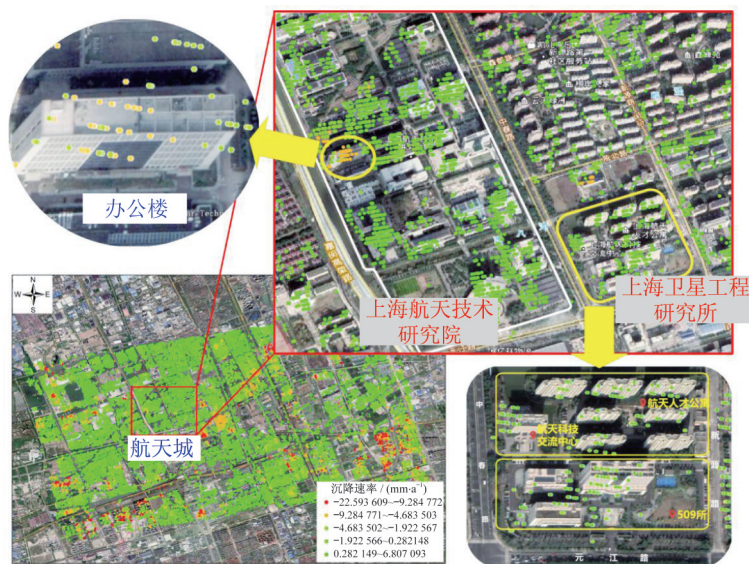


图 4 上海航天城时间序列 InSAR 形变速率监测结果

Fig.4 Monitoring results of the InSAR time series deformation rate of Shanghai Academy of Space Technology

为保证地表形变监测性能,SAR卫星需采用严格回归轨道设计与控制,以提高图像的空间相干性并降低地形干涉相位的影响。

2.2.3 森林生物量反演

森林生物量是表征森林固碳能力的重要指标,也是评估区域森林碳平衡的重要参数。InSAR在植被覆盖区具备一定的穿透能力,可记录植被垂直结构属性信息,但传统 InSAR无法直接区分同一分辨单元内不同散射体的垂直向分布,导致 InSAR在植被区测量面临体散射去相干,干涉相位对应的高度介于植被表面和地面之间。为解决该问题,人们

在 InSAR 高程测量的基础上进一步引入极化测量信息,提出了极化 InSAR(Polarimetric SAR, Pol-InSAR)技术^[16]。该技术基于不同极化方式对散射体形状、空间排布规律及介电属性敏感程度不同,通过建立随机地体散射模型(Random Volume over Ground, RVoG)将 Pol-InSAR 信息与森林生物物理参数进行有效关联,实现对森林高度的监测,可为解决大范围森林高度反演难题提供重要的技术手段。德国 DLR F-SAR 获取的 Rabi 地区 Pol-InSAR 森林高度反演结果如图 5 所示,与激光雷达测量结果基本一致^[17]。

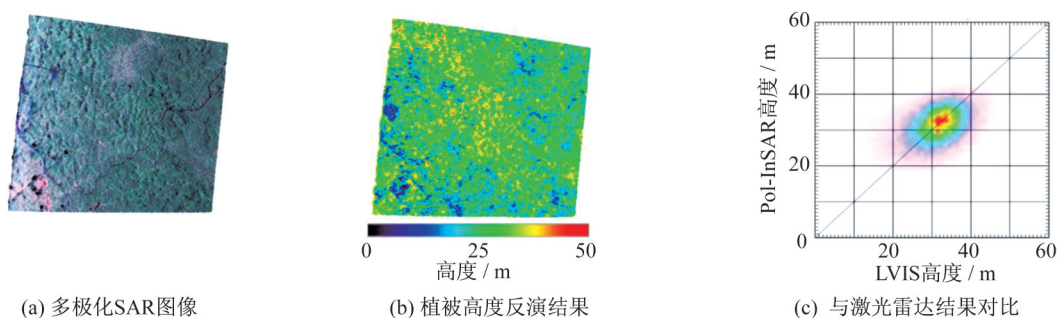


图 5 DLR F-SAR 获取的 Rabi 地区 Pol-InSAR 森林高度反演结果^[17]

Fig.5 Pol-InSAR forest height inversion results of Rabi region obtained by DLR F-SAR^[17]

2.2.4 洋流测速

洋流又称海流,表示海洋中除了由引潮力引起的潮汐运动外,海水沿一定途径的大规模流动。利用星载沿航迹 InSAR 技术可以对洋流的速度进行测量,实现海表流场速度的反演,对海洋灾害预警、海洋经济监视、海洋战场环境测绘、航海安全以及

维护国家海洋权益等具有重要意义^[21-23]。利用 TerraSAR-X/TanDEM-X 数据获取 Pentland Firth 地区的洋流流速测量结果如图 6 所示。其中,TerraSAR-X 双天线接收模式(沿航向有效基线长度为 1.15 m)如图 6(a)所示,TanDEM-X 系统结果(沿航向有效基线长度为 25.00 m)^[22]如图 6(b)所示。

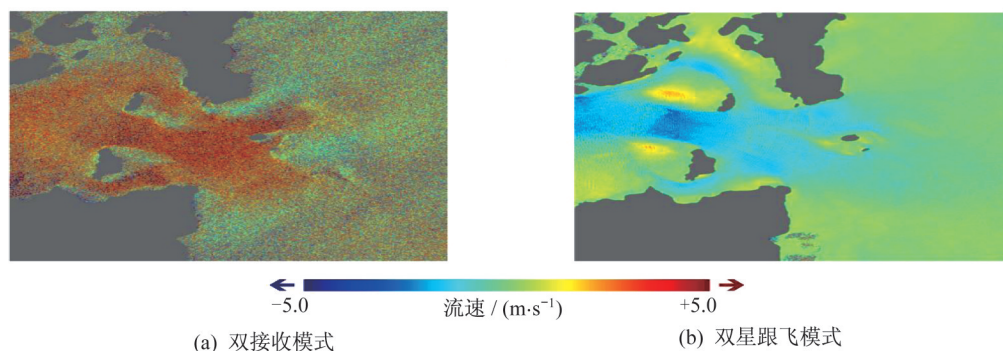
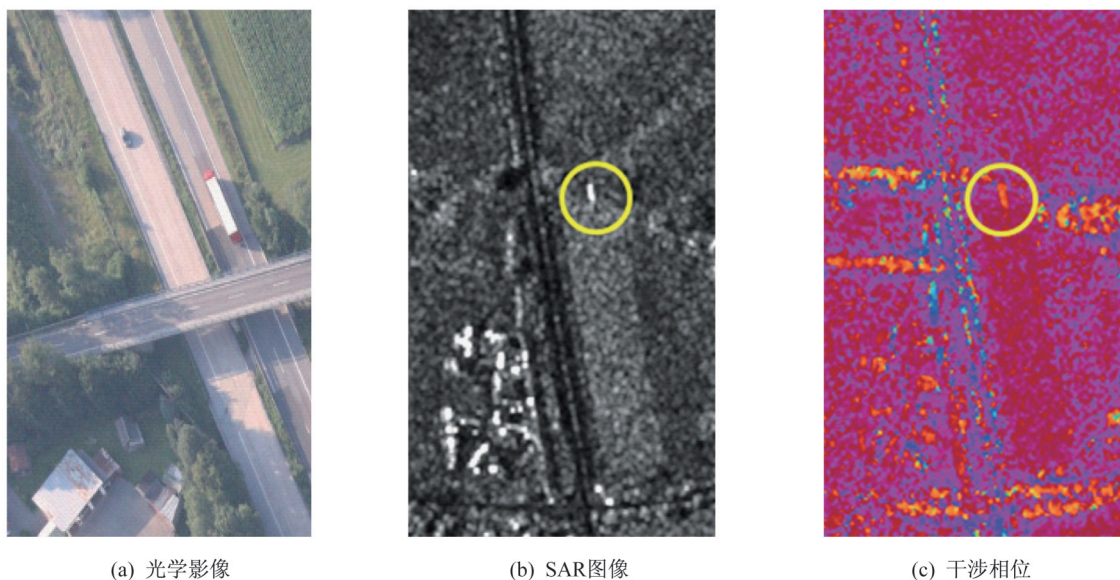


图 6 TerraSAR-X/TanDEM-X 沿航迹干涉洋流流速测量结果^[22]

Fig.6 Current velocity measured by TerraSAR-X/TanDEM-X along-track InSAR^[22]

除上述应用外,垂直航迹 InSAR 技术还可应用于地物分类、农作物估产、冰雪深度探测等领域^[7,40]。沿航迹 InSAR 技术还可应用于地面交通监

视、海面舰船显示及成像等领域^[7,25,41]。TerraSAR-X/TanDEM-X 首次沿航迹干涉动目标监测结果^[42]如图 7 所示。

图 7 TerraSAR-X/TanDEM-X SAR 地面运动目标检测^[42]Fig.7 Ground moving target indication results obtained by TerraSAR-X/TanDEM-X along-track InSAR^[42]

3 天绘-2 号

天绘-2号卫星于2019年4月30日成功发射,是我国首个基于干涉合成孔径雷达技术的微波测绘卫星系统^[33]。该系统工作于X频段,处于500 km的太阳同步轨道,由两颗对等的卫星组成,采用异轨道面卫星编队、一发双收雷达收发模式的技术体制,可以快速测制全球数字表面模型和雷达正射影像。天绘-2号在国际上首次采用双频成像技术解决干涉相位绝对模糊问题,彻底摆脱了对地面控制数据的依赖。

作为分布式编队卫星 InSAR 系统,天绘-2号卫星系统设计关键技术主要包括卫星绕飞编队构型

设计与控制、双星三同步、高精度 SAR 载荷内定标、基线确定及高精度星间基线测量等。文献[33]对各关键技术攻关情况进行了介绍,这里不再赘述。

天绘-2号卫星获取的冰川国家公园地区测绘图如图8所示。其中,干涉条纹图如图8(a)所示,雷达正射影像(Orthorectified Radar Image, ORI)如图8(b)所示,数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)如图8(c)所示。由图可见,测绘产品纹理清晰、边缘锋锐。天绘-2号系统灵敏度高,其在沙漠等低后向散射区域可实现高精度测图^[33]。天绘-2号卫星获取的毛里塔尼亚沙漠地区 DSM 如图9所示。

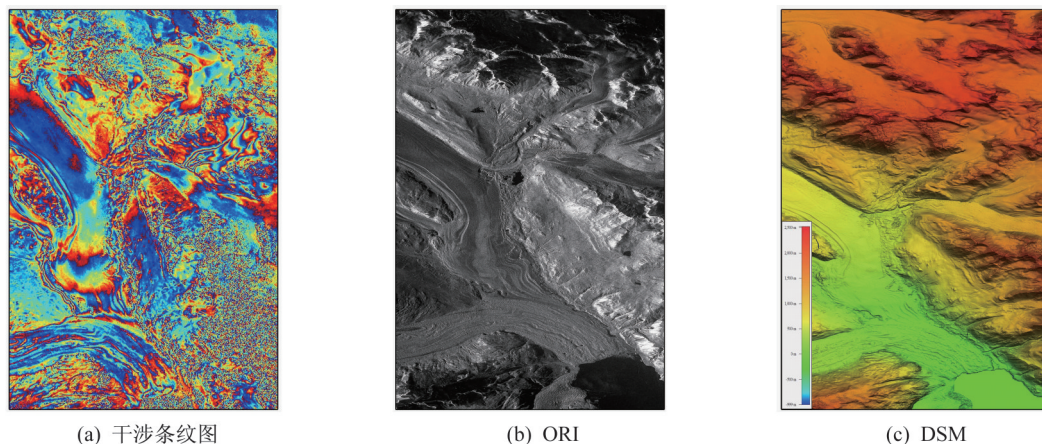


图 8 天绘-2号冰川国家公园观测结果

Fig.8 Observation results of the Glacier National Park obtained by Tianhui-2

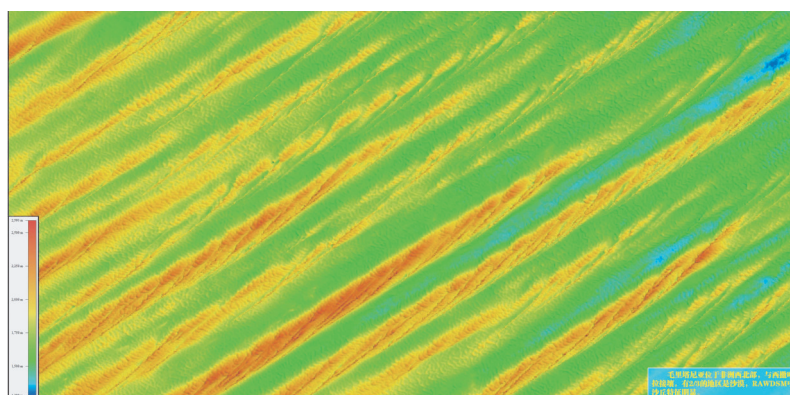


图9 天绘-2号毛里塔尼亚沙漠地区

Fig.9 Observation results of the desert area of Mauritanisha obtained by Tianhui-2

在轨测试结果表明,天绘-2号测图精度可满足 1:50 000 比例尺要求。与美国 SRTM 系统及日本 AW3D30 系统相比,天绘-2 卫星 DSM 产品层次更加分明,地理信息更加精细。天绘-2 号卫星与美国

SRTM 系统对肯尼亚境内相同区域的测绘对比图如图 10 所示。我国天绘-2 号卫星与日本 AW3D30 系统对我国河南省境内相同区域的测绘对比图如图 11 所示。

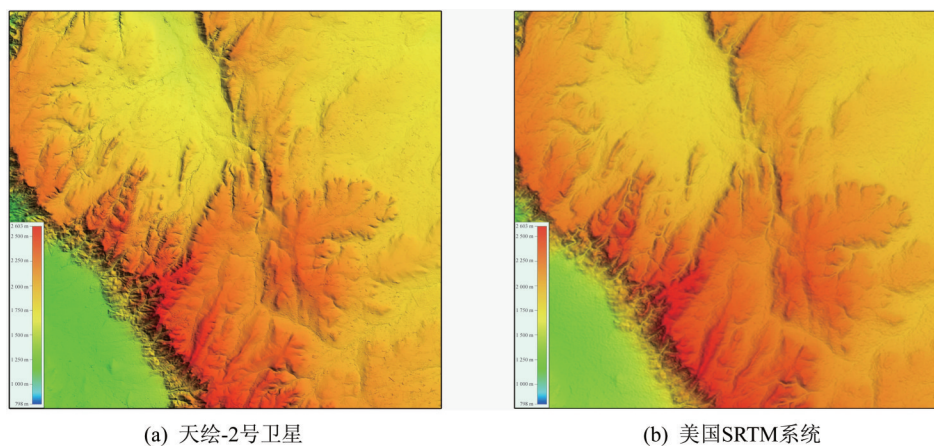


图 10 天绘-2号卫星与美国 SRTM 系统 DSM 产品对比图

Fig.10 DSM product observed by Tianhui-2 satellite and SRTM system

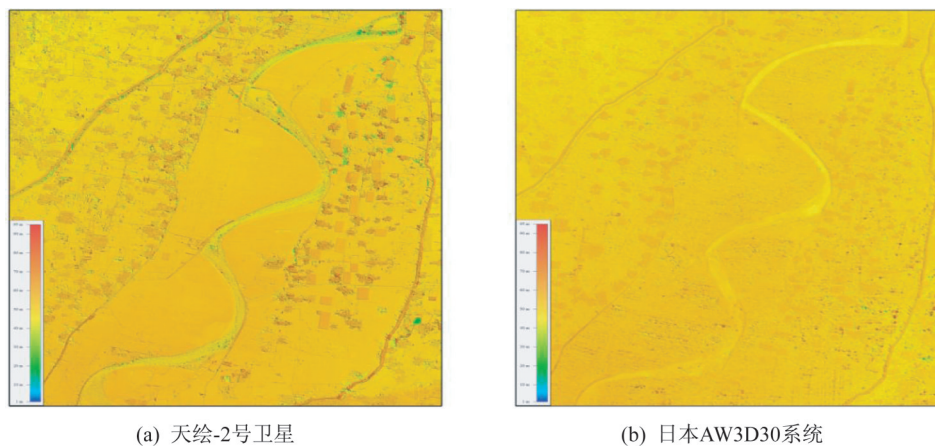


图 11 天绘-2 号卫星与日本 AW3D30 系统 DSM 产品对比图

Fig.11 DSM product observed by Tianhui-2 satellite and AW3D30 system

此外,天绘-2号卫星还能够在国土普查、城区规划、紧急救援、灾害评估、农林监测、国际反恐、基础地理信息获取以及全球生态系统建设等方面为用户提供优质、高效、稳定的航天服务。

4 发展趋势展望

InSAR 应用需求不断牵引着天基微波测绘技术的发展,当前 InSAR 卫星正朝着高分(辨率)宽幅、多维度观测等方向发展。

4.1 高分宽幅

地表形变监测的短临预警等应用需要 SAR 卫星在同一分辨率下尽可能增大观测幅宽,有效提高 InSAR 卫星应用的观测时效性。同一幅宽下提高分

辨率,可一定程度上提升产品的观测精度,如可提高地表形变监测时间序列 InSAR 永久散射体的密度,提升 InSAR 高程测量多视处理有效视数等。高分宽幅成像是未来 InSAR 卫星的重要发展方向之一。

面向高分宽幅发展方向,德国 TanDEM-L 系统设计了 7 m 分辨率 350 km 的超大幅宽 SAR 成像模式^[43],TanDEM-L 系统观测示意图如图 12 所示。在一个回归周期内,可实现单极化、双极化左右侧视共 4 次全球覆盖,实现三维形变测量,可有效提升地表形变监测效率和精度(如图 12(b)所示),更好地服务于城市沉降、滑坡等地质灾害早期预警识别。日本 ALOS-4 卫星 3 m 分辨率条带模式将由 ALOS-2 的 50 km 增大至 200 km,可实现全球陆地 14 d 全覆盖^[44]。

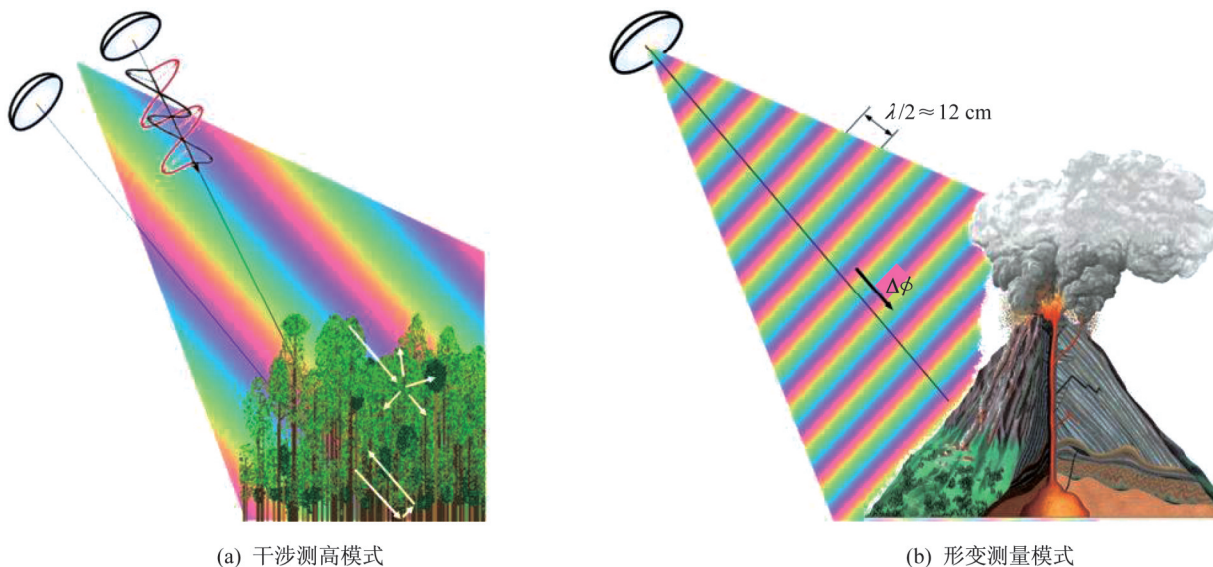


图 12 TanDEM-L 系统观测示意图^[43]

Fig.12 Observation geometry of TanDEM-L system^[43]

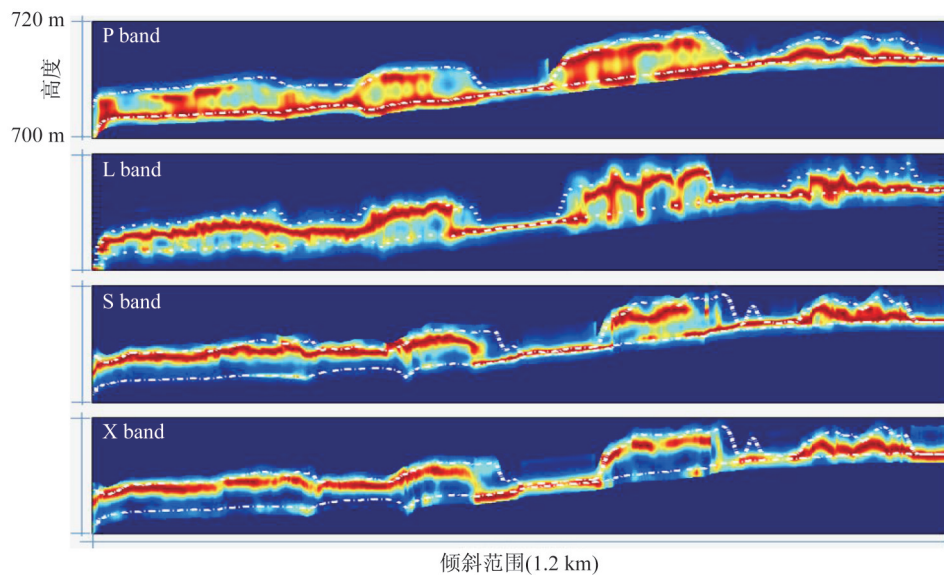
为实现高分宽幅对地 SAR 成像,国内外提出了方位多通道接收^[45]、俯仰向数字波束形成(Digital Beam-Forming)^[46-47]、Staggered SAR^[48]、MIMO-SAR^[49-51]等新体制及新工作模式。

4.2 多维度观测

随着 SAR 成像技术及其应用需求的推动,星载 InSAR 系统逐渐从单极化、单波段、单角度发展到多极化、多波段、多角度等不同观测方式的组合(简称为多维度 InSAR 观测),并向全息 SAR 方向发展^[38,52-55]。多维度 SAR 可有效解决高精度地形测绘、海洋复杂

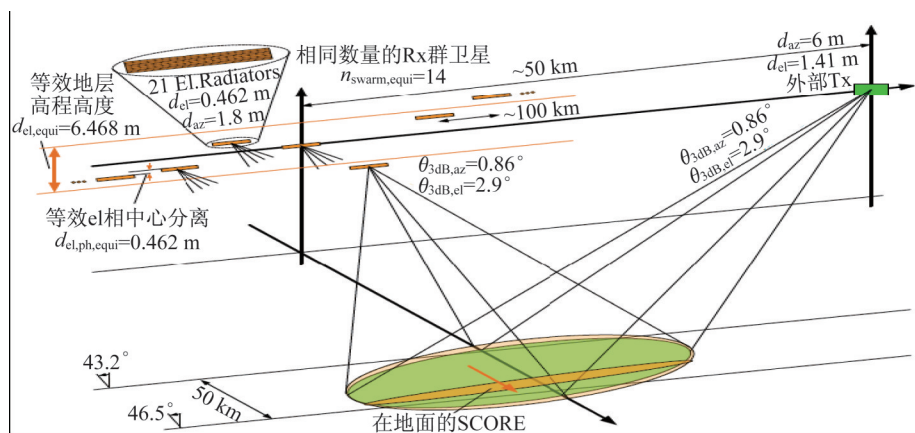
环境观测以及森林生物量等国家重大需求。

1) 多波段。不同波段雷达的穿透能力不同,如图 13 所示。由图可见,低频段 SAR 具有更好的穿透能力,更适合地表森林生物量的估计^[17-19]。通过融合多波段 SAR 图像,可以实现高精度地物分类与地表垂直结构信息反演。现有 SAR 卫星主要工作于 L、S、C 及 X 波段,ESA 将率先发展 P 波段全极化 InSAR 系统——BIOMASS 卫星^[56],该系统采用重复航过全极化 InSAR 体制,主要任务为地表森林生物量估计及年度变化检测,并测量冰川及其次表面结构等。

图 13 不同波段 SAR 穿透能力图^[17-19]Fig.13 Penetration capabilities of different band SAR systems^[17-19]

2) 多极化。目前,德国 TanDEM-X 具备全极化 InSAR 能力,但由于其工作在 X 波段,穿透能力差,在高植被区生物量反演中将存在估计偏差^[57]。星载低频段多极化 InSAR 穿透能力强,但通过重复航过 InSAR 实现,面临着严重的时间去相干和大气延迟差异等问题。因此,亟需发展单航过低频段多极化 InSAR 系统。德国 TanDEM-L 采用双星绕飞编队^[43],并专门设计了用于植被、冰雪、干土等观测的三维成像模式(如图 12(a)所示),可有效克服传统重复航过面临的问题,实现高精度地表垂直结构反演,同时获得数字表面模型和数字地形模型。此外,系统还可通过重复航过层析成像实现植被、冰雪内部结构动态监测。

3) 多角度。星载 InSAR 系统采用侧视成像几何, SAR 图像中存在着层叠、阴影等问题,这大大限制了目标的三维空间分布反演能力。同时,单次观测仅能获取沿径向的斜距差,无法获取观测区域的三维形变场。TomoSAR(多俯仰角 InSAR 成像)、多方位角 InSAR 等多角度 InSAR 系统可有效解决上述问题^[55,58-62]。TomoSAR 通过获取多景相干 SAR 图像,进行俯仰向数字波束形成实现观测区域的 3-D 层析成像,结合时序序列 SAR 图像进行形变场估计,还可实现 4-D SAR 成像^[58-61]。2018 年,德国 DLR 的 MITTERMAYER 等^[60]首次提出了双基 SAR 小卫星浮动集群概念,如图 14 所示,多个小卫星共同编队,在方位和俯仰向形成稀疏阵列,进行 3-D 成像。

图 14 双基 SAR 小卫星浮动集群示意图^[60]Fig.14 Floating swarm concept for passive bi-static SAR satellite^[60]

多方位角 InSAR 系统单次航过利用多个方位角观测,通过融合处理提取二维流场速度^[55,62]。德国 DLR 提出的 Bidirectional InSAR 体制是典型的多方位角 InSAR 观测体制,并利用 TanDEM-X 在轨得到了验证^[62],如图 15 所示。

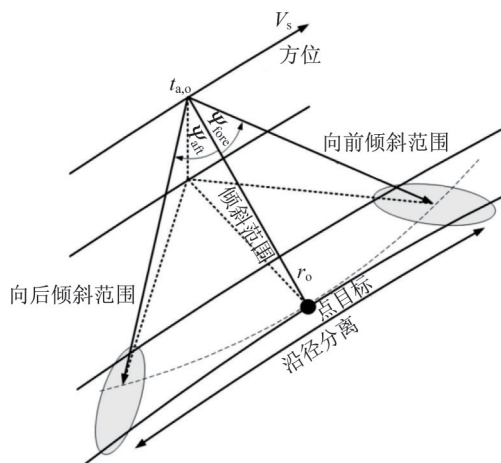


图 15 Bidirectional InSAR 体制观测几何^[62]

Fig.15 Observation geometry of bidirectional InSAR^[62]

5 结束语

本文介绍了 InSAR 基本原理,对天基 InSAR 系统发展现状及其典型应用进行了回顾,包括地面高程测量、地表形变监测、森林生物量反演、洋流测速等,对我国首个基于干涉合成孔径雷达技术的微波测绘卫星系统——天绘-2 号进行了简要的介绍,给出了在轨 DEM 获取结果。针对我国天基 InSAR 系统未来发展需求,建议发展高分宽幅多维度观测 InSAR 卫星系统,突破多星高稳定度编队、甚高精度基线测量、基于深度学习的复杂地理环境(如城市)信息重构等关键技术,在军事和民用航天领域发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] CURLANDER J C, MCDONOUGH R N. Synthetic aperture radar systems and signal processing [M]. New York: Wiley Interscience, 1991.
- [2] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] GRAHAM L C. Synthetic interferometric radar for topographic mapping [J]. Proc IEEE, 1974, 62(6): 763-768.
- [4] ZEBKER H A, GOLDSTEIN R M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1986, 91(B5):4993-4999.
- [5] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 88(3):333-382.
- [6] BAMLERRICHARD, PHILIPP, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Inverse Problems, 1998, 14(4): R1-R54.
- [7] KURAHASHI T, MENINI A. TanDEM-X: a satellite formation for high resolution SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3317-3341.
- [8] LANARI R, FORNARO G, RICCIO D, et al. Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: the Etna case study [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5):1097-1114.
- [9] MOREIRA J E A. X-SAR interferometry: first results [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(4):950-956.
- [10] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364:138-142.
- [11] MASSONNET D, BRIOLE P, ARNAUD A. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry [J]. Nature, 1995, 375(6532):567-570.
- [12] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [13] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR Interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1):8-20.
- [14] 王超, 刘智, 张红, 等. 张北—尚义地震同震形变场雷达差分干涉测量 [J]. 科学通报, 2000, 45(23):2550-2554.
- [15] 廖明生, 王茹, 杨梦诗, 等. 城市目标动态监测中的时序 InSAR 分析方法及应用 [J]. 雷达学报, 2020, 9(3): 409-425.
- [16] PAPATHANASSIOU K, CLOUDE S R. Single-baseline polarimetric SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3):125-134.
- [17] PARDINI M, KIM J S, PAPATHANASSIOU K, et al. Height and 3-D structure estimation of African tropical forests with multi-baseline SAR: results from

- the AfriSAR campaign [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2017: 4288-4291.
- [18] PARDINI M, PAPATHANASSIOU K. First investigation on the information content of multibaseline Pol-InSAR data at S-Band for forest structure observation [J]. *American Journal of Epidemiology*, 2012, 176(9): 751-759.
- [19] PARDINI M, ALONSO M T, CAICOYA A T, et al. A comparison of P- and L-band Pol-InSAR 3-D forest structure estimates: a study case in the traunstein forest [C]// Esa Polinsar Workshop. DLR, 2015.
- [20] 李廷伟,梁甸农,朱炬波.极化干涉SAR森林高度反演综述[J].*遥感信息*, 2009(3): 85-91.
- [21] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents [J]. *Nature*, 1987, 328: 707-709.
- [22] ROMEISER R. Surface current measurements by spaceborne along-track InSAR -terraSAR-X, tanDEM-X, and future systems [C]// 2015 IEEE/OES Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM). 2015: 15110291.
- [23] SUCHANDT S, RUNGE H, BREIT H, et al. Automatic extraction of traffic flows using TerraSAR-X along-track interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48 (2) : 807-819.
- [24] ROMEISER R, SUCHANDT S, RUNGE H, et al. First analysis of TerraSAR-X along-track InSAR-derived current fields [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48 (2) : 820-829.
- [25] GIERULL C H, CERUTTI-MAORI D, ENDER J. Ground moving target indication with tandem satellite constellations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 710-714.
- [26] ATTEMA E P W, DUCHOSSOIS G, KOHLHAMMER G. ERS-1/2 SAR land applications: overview and main results [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. 2002: 6069546.
- [27] DESNOS Y L, BUCK C, GUIJARRO J, et al. The ENVISAT advanced synthetic aperture radar system [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2000: 6770278.
- [28] SNOEIJ P, ATTEMA E, DAVIDSON M, et al. Sentinel-1 radar mission: status and performance [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2010, 25(8): 32-39.
- [29] LUSCOMBE A. Image quality and calibration of RADARSAT-2 [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2009: 11150375.
- [30] KANKAKU Y, SUZUKI S, OSAWA Y. ALOS-2 mission and development status [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2014: 14058803.
- [31] WERNER M. Operating the X-band SAR interferometer of the SRTM [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2000: 6777312.
- [32] ZINK M, MOREIRA A, HAJNSEK I, et al. TanDEM-X: 10 years of formation flying bistatic SAR interferometry [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 3546-3565.
- [33] 楼良盛,刘志铭,张昊,等.天绘-2号卫星工程设计与实现[J].*测绘学报*, 2020, 49(10): 1252-1264.
- [34] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社, 2005.
- [35] ZEBKER H A, VILLASENOR J. Decorrelation in interferometric radar echoes [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30 (5) : 950-959.
- [36] LEE J S, HOPPEL K W, MANGO S A, et al. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1017-1028.
- [37] 刘艳阳.分布式卫星高分辨率宽测绘带SAR/InSAR信号处理关键技术研究[D].西安:西安电子科技大学, 2013.
- [38] KRIEGER G, HAJNSEK I, PAPATHANASSIOU K P, et al. Interferometric synthetic aperture radar (SAR) missions employing formation flying [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 816-843.
- [39] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [40] 王超,张红,刘智.星载合成孔径雷达干涉测[M].北京:科学出版社, 2002: 22-24.
- [41] 姜岩,陈筠力,王贇,等.星载SAR的GMTI技术[J].*上海航天*, 2009, 26(6): 60-64.
- [42] SUCHANDT S, RUNGE H. Along-track interferometry using TanDEM-X: first results from marine and land applications [C]// European

- Conference on Synthetic Aperture Radar. 2012: 392-395.
- [43] MOREIRA A, KRIEGER G, HAJNSEK I, et al. Tandem-L: a highly innovative bistatic SAR mission for global observation of dynamic processes on the earth's surface [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2015, 3(2):8-23.
- [44] MOTOHKA T, KANKAKU Y, MIURA S, et al. Alos-4 L-Band SAR mission and observation [C]// 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2019:19154213.
- [45] KRIEGER G, GEBERT N, MOREIRA A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(4): 260-264.
- [46] GEBERT N, KRIEGER G, MOREIRA A, et al. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 564-592.
- [47] 王志斌,刘艳阳,李真芳,等.俯仰向DBF-SAR系统通道相位偏差估计算法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2018,45(1):145-150.
- [48] VILLANO M, KRIEGER G, MOREIRA A. Staggered SAR: high-resolution wide-swath imaging by continuous PRI variation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(7): 4462-4479.
- [49] CERUTTI-MAORI D, SIKANETA I, KLARE J, et al. MIMO SAR processing for multichannel high-resolution wide-swath radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8): 5034-5055.
- [50] KRIEGER G. MIMO-SAR: opportunities and pitfalls [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5):2628-2645.
- [51] 邓云凯,赵凤军,王宇.星载SAR技术的发展趋势及应用浅析[J].雷达学报,2012,1(1):1-10.
- [52] 吴一戎.多维度合成孔径雷达成像概念[J].雷达学报, 2013,2(2):135-142.
- [53] 朱建军,杨泽发,李志伟.InSAR矿区地表三维形变监测与预计研究进展[J].测绘学报,2019,48(2): 135-144.
- [54] 李春升,王伟杰,王鹏波,等.星载SAR技术的现状与发展趋势[J].电子与信息学报,2016,38(1):229-240.
- [55] 陈杰,杨威,王鹏波,等.多方位角观测星载SAR技术研究[J].雷达学报,2020,9(2):205-220.
- [56] SCIPAL K, ARCIONI M, CHAVE J, et al. The BIOMASS mission: an ESA earth explorer candidate to measure the BIOMASS of the earth's forests [C]// IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2010: 11686624.
- [57] KUGLER F, SCHULZE D, HAJNSEK I, et al. TanDEM-X Pol-InSAR performance for forest height estimation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6404-6422.
- [58] LI F K, GOLDSTEIN R M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(1):88-97.
- [59] ZHU X X, BAMLER R. Very high resolution spaceborne SAR tomography in urban environment [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12):4296-4308.
- [60] MITTERMAYER J, KRIEGER G. Floating swarm concept for passive bi-static SAR satellites [C]// 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. 2018: 1-6.
- [61] FORNARO G, SERAFINO F, REALE D. 4-D SAR imaging: the case study of Rome [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(2): 236-240.
- [62] MITTERMAYER J, WOLLSTADT S, PRATSI-IRAOLA P, et al. Bidirectional SAR imaging mode [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 601-614.

(上接第 67 页)

- [6] PORTILLO I D, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband [J]. Acta Astronautica, 2019(159): 123-135.
- [7] 梁晓莉,王聪,李云.“一网”星座最新发展分析[J].中国航天,2019(7):29-31.
- [8] 陈云雷,李向龙,王鑫鑫.美国卫星互联网军事应用趋势及其影响研究[J].飞航导弹,2021(2):82-87.
- [9] 文涛.美国弹性空间体系最新发展[J].国际太空,2020(5):37-42.
- [10] 汉京滨,张雅声,汤亚锋.太空体系弹性研究现状[J].中国航天,2018(7):28-32.
- [11] 纪凡策.2020年国外通信卫星发展综述[J].国际太空, 2021(2):36-41.