

合成孔径雷达分谱干涉测量综述：原理、应用与展望

王晓文, 毛文飞, 张瑞, 刘国祥

西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756

摘要: 卫星合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 作为一种可全天候、全天时工作的空间对地遥感观测技术, 在地形重建、地表形变提取、以及地学参数反演等方面已得到广泛应用。作为传统 InSAR 技术的延伸, 近年来 SAR 分谱干涉测量技术 (如 SAR 距离向分谱干涉、方位向分谱干涉和 TOPS 模式 Burst 重叠区干涉) 在干涉相位解缠、地表三维形变提取、以及电离层误差校正等方面展示了巨大的应用潜力。本文概述了星载 SAR 分谱干涉测量技术的发展现状, 重点介绍了 SAR 分谱干涉测量原理和数据处理方法, 系统分析了 SAR 分谱干涉在高精度地形测绘、大梯度地表形变观测、多维地表形变信息提取、以及 InSAR 电离层误差校正等方面的最新研究进展。此外, 本文还讨论了利用 SAR 分谱干涉技术监测高精度地表形变的最优参数配置方案, 并对 SAR 分谱干涉测量的发展趋势进行了展望。

关键词: InSAR, 雷达干涉测量, 分谱干涉, 多孔径雷达干涉, 电离层校正, 地表形变, 地形测绘

中图分类号: P2

引用格式: 王晓文, 毛文飞, 张瑞, 刘国祥. 2026. 合成孔径雷达分谱干涉测量综述: 原理、应用与展望. 遥感学报, 30(4): 777-797
Wang X W, Mao W F, Zhang R and Liu G X. 2026. Synthetic Aperture Radar Split-Spectrum Interferometry: Principles, applications, and prospects. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 777-797 [DOI: 10.11834/jrs.20265230]

1 引言

合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 利用卫星两次过境获取的同一地区 SAR 影像, 通过计算同名像素的相位差获取地表的地形或者形变信息, 相对于传统地面观测手段具有全天候、大范围、高效率、低成本等优势 (刘国祥等, 2019; Hanssen, 2001; Ferretti 等, 2007; 王超等, 2002; Rosen 等, 2000), 已广泛应用于全球地形测图 (Graham, 1974; Zebker 和 Goldstein, 1986)、地质灾害监测 (Hashimoto, 2020; Henderson 等, 2017; Hu 等, 2020; Strozzi 等, 2005; Liu 等, 2021)、以及冰川流速提取 (Liao 等, 2018) 等研究领域。然而, 传统 InSAR 数据处理一般需要进行相位解缠步骤 (Costantini, 1998; Yu 等, 2018; Goldstein 等, 1988), 在地形起伏和大梯度形变区域由于相位条纹密集易造成相位混叠, 从而引入相位解缠误差并降低 InSAR

观测结果的可靠性和精度 (Luo 等, 2019)。此外, 由于 SAR 成像系统采用侧视成像, 这导致传统 InSAR 技术提取的形变信息为地表真实形变矢量在雷达视线方向 LOS (Line of Sight) 的投影值, 进而导致 InSAR 解译地表复杂形变特征 (如滑坡形变、地震同震形变等) 常面临模糊性难题 (Hu 等, 2014)。为抑制 InSAR 技术在高密度条纹区面临的相位解缠误差, Madsen 和 Zebker 在传统 InSAR 观测原理的基础上, 率先对 SAR 距离向频谱信号进行分割以获取具有不同频谱特征的子带 SAR 影像, 并在此基础上提出子带 SAR 影像干涉 RSSI (Range Split-Spectrum Interferometry) 数据处理思路, 从而获得稀疏条纹密度的干涉图, 标志着 SAR 分谱干涉测量技术的诞生 (Madsen 和 Zebker, 1992; Madsen 等, 1993)。RSSI 技术有效克服了由于 InSAR 相位条纹混叠引起的解缠难题, 但其测量精度严重受限于 SAR 传感器的距离向带宽 (Bamler 和 Eineder, 2004, 2005)。由于早期 SAR 系统距离

收稿日期: 2025-06-27; 预印本: 2025-10-24

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42401535, 42371458, U22A20565); 四川省科技厅杰出青年科学基金 (编号: 2024NSFJQ0040)

第一作者简介: 王晓文, 研究方向为 InSAR 遥感与地质灾害监测。E-mail: insarwxw@swjtu.edu.cn

通信作者简介: 毛文飞, 研究方向为 InSAR 地表形变提取技术。E-mail: insarwfm@swjtu.edu.cn

向带宽通常较小, 利用RSSI获取的子带干涉图质量较差, 导致该技术长期未得到实践应用。进入21世纪, 随着新一代大距离向带宽SAR卫星(如TerraSAR-X、CosmoSkyMed)的相继发射并投入使用, RSSI的子带干涉图质量得到有效提升, 并成功应用于DEM的获取(Brcic等, 2008, 2009)。此后, 受GNSS观测可利用双频信号观测校正电离层延迟误差思路启发, 学者们将RSSI技术进一步扩展应用于InSAR电离层误差校正和大梯度形变测量, 并论证了其巨大的应用潜力(Luo等, 2019; Brcic等, 2010a, 2011; Gomba等, 2016a; Liang和Fielding, 2017)。

为突破传统InSAR一维LOS形变测量难以提取地表真实形变特征难题, Bechor和Zebker创新性地提出多孔径雷达干涉技术MAI (Multiple Aperture InSAR) (Bechor和Zebker, 2006), 即基于SAR方位向频谱的分谱干涉测量方法ASSI (Azimuth Split-Spectrum Interferometry)。ASSI可获取地表沿SAR方位向的位移信息, 极大弥补了传统InSAR LOS向形变测量的不足, 从而将InSAR一维形变测量扩展至二维, 被广泛应用于地质灾害多维形变场提取和特征解译(Hu等, 2014, 2012, 2017; Liang和Fielding, 2017; Jung等, 2011; 王晓文, 2017)。与RSSI类似, ASSI技术测量精度受限于SAR传感器的方位向带宽(与脉冲重复频率正相关)。但值得一提的是, 当前广泛应用的Sentinel-1系列SAR卫星采用TOPS模式观测以实现大范围、高质量成像, 由于其天线波束指向的步进变化导致SAR多普勒中心频率在每个burst内部以及不同burst之间都会发生显著变化, 造成无法直接将ASSI应用于该数据以获取地表的方位向位移。为此, Grandin等根据ASSI技术原理, 并结合Sentinel-1 SAR成像特征, 提出了一种Burst重叠区域干涉BOI (Burst Overlap Interferometry)的地表方位向位移测量方法, 并证实其形变测量精度与传统InSAR观测相当(Grandin等, 2016)。需要注意的是BOI技术仅可获取较小范围(相邻Burst的重叠区)的地表方位向位移, 一般需要将不同Burst重叠区的观测结果插值得到大范围地表方位向形变(He等, 2019a, 2019b; Pepe等, 2023)。

随着SAR技术迅猛发展, 星载SAR系统正朝大带宽、多频段、多视角、多极化、宽覆盖、高

重叠度、星座化等方向发展(张景发等, 2020), 分谱干涉测量技术在改善SAR干涉相位解缠精度、校正电离层延迟误差、测量SAR多维形变等方面展现显著优势, 可有效赋能当前和未来新体制SAR系统应用面临的系列挑战。本文系统总结了SAR分谱干涉测量技术的研究现状, 并结合笔者前期研究基础, 重点介绍了SAR分谱干涉测量在高精度地形重建、大梯度形变测量、多维地表形变信息提取、以及InSAR电离层误差校正方面的应用进展, 探讨了SAR分谱干涉技术的测量精度和仍然面临的技术挑战。在此基础上, 本文以SAR对地观测的深化应用需求为导向, 探讨了SAR分谱干涉技术的发展趋势。

2 星载SAR传感器发展现状与趋势

早期雷达技术主要用于军事探测, 1978年, 美国宇航局(NASA)发射了首个卫星SAR系统SEASAT(L波段), 开启了民用星载SAR对地观测新篇章(Thompson等, 1983)。1981年和1984年, NASA又相继发射了同样搭载L波段的SIR-A和SIR-B卫星, 为后期星载SAR系统成熟奠定了基础(Cimino等, 1986; Gabriel和Goldstein, 1988; 朱建军等, 2017)。进入90年代, 星载SAR技术取得了较大突破, 在1991年—1995年间, 全球先后发射了C波段ERS-1/2、L波段JERS-1、同时拥有L/C/X波段的SIR-C/X-SAR、以及C波段RADARSAT-1(Attema, 1991; Rignot和Van Zyl, 1993; Dobson等, 1996; Jordan等, 1995; Perski, 1998; Wackerman等, 2001)等卫星系统。迈入21世纪后, 星载SAR系统的观测能力取得重大突破。2000年, 美国利用航天飞机搭载SAR系统, 完成了覆盖全球80%陆地30 m和90 m空间分辨率DEM产品制作, 即航天飞机雷达地形测量任务SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM(朱建军等, 2017; Van Zyl, 2001), 为InSAR技术推广提供了可靠的外部DEM数据。2002年和2006年, 欧洲航天局和日本空间局先后发射了搭载ASAR(C波段)的ENVISAT和PALSAR(L波段)的ALOS-1卫星(Pepe等, 2005; Iwata等, 2008), 进一步丰富了SAR数据类型。需要指出, 上述这些早期的卫星SAR系统获取的影像分辨率普遍为中、低分辨率, 距离向带宽一般小于30 MHz。

随着中低分辨率SAR系统的陆续退役及SAR

成像技术持续突破,新一代星载SAR系统也从小带宽、单极化、单模式、单波段、单星运行、固定入射角、低重访周期向大带宽、多极化、多模式、多波段、双星星座或多星组网、可变入射角、高重访周期等方向发展。2007年,德国航空航天局、意大利空间局和加拿大相继发射了X波段TerraSAR-X (Werninghaus 和 Buckreuss, 2010)、COSMO-SkyMed (Bianchessi 和 Righini, 2008; Covello等, 2010; Caltagirone等, 2014)和C波段RADARSAT-2卫星 (Riendeau 和 Grenier, 2007),三者对应的最高分辨率分别达0.25 m、1 m和1 m,标志着星载SAR对地观测进入高空间分辨率时代。与此同时,德国航空航天局也于2010年发射了TerraSAR-X的姊妹星TanDEM-X,为全球高精度InSAR形变测量和地形测绘提供了高质量数据 (Zink等, 2014)。2013年,韩国发射了首颗搭载X波段的民用SAR卫星KOMPSAT-5,提供最高1 m分辨率的影像 (Lee等, 2022)。此外,日本于2014年成功发射了ALOS-1的继任星ALOS-2,拥有更高的空间分辨率 (最高达1 m)、更稳定的轨道控制技术 (轨道控制精度在500 m以内)以及更短的重访周期 (14 d),在大型地质灾害 (如地震、滑坡等)监测领域发挥了重要作用 (Kankaku等, 2013; Arikawa等, 2014)。

2014年,欧洲航天局成功发射了C波段SAR卫星Sentinel-1A,并后续发射了其姊妹星Sentinel-1B/1C,提供全球覆盖、最高6 d重访周期的免费SAR数据,全面推动了星载SAR技术的发展和應用 (Potin等, 2016)。此后,世界各国或机构先后发射了多颗搭载不同波段的SAR卫星,且将多颗新体制SAR卫星的研制和发射列入未来计划。例如,2018年之后,日本、西班牙、意大利及美国等在高分辨率SAR卫星方面集体发力,先后发射了搭载X波段的SAR卫星ASNARO-2 (小型卫星)、PAZ、COSMO-SkyMed二代卫星星座 (CSG-1)以及Capella和Umbra等小型卫星星座 (Kawasaki等, 2019; Munoz等, 2024; Buono等, 2024; Farquharson等, 2023; Clemente等, 2024);此外,德国未来计划发射搭载X波段的高分辨率宽幅SAR卫星 (HRWS) (Bartusch等, 2021)。在中低频SAR卫星方面,英国发射了搭载S波段的小型SAR卫星NovaSAR-1 (Rosenqvist等, 2020),阿根廷先后发射了搭载L波段的SAOCOM-1A和

SAOCOM-1B (Palomeque等, 2025);欧洲航天局发射了搭载P波段的森林测高和生物量反演卫星BIOMASS (Le Toan等, 2011; Moreira等, 2015);美国和印度联合发射了搭载L波段和S波段的NISAR卫星 (Kellogg等, 2020);而德国和欧洲航天局未来分别计划发射搭载L波段的全球地表动态变化监测卫星Tandem-L和ROSE-L (Moreira等, 2015)。中国在星载SAR系统研发方面起步较晚,但发展迅猛。2012年,中国发射了首颗搭载S波段的民用SAR卫星HJ-1C,与2008年发射的HJ-1A/B光学卫星形成互补,填补了中国民用SAR卫星对地观测的空白 (禹卫东等, 2014)。2016年中国发射了首颗具有干涉测量能力的高分辨率SAR卫星,即搭载C波段的高分三号SAR卫星,最高可达1 m空间分辨率 (张庆君, 2017)。此后,中国先后发射了搭载C波段的高分三号02和03星,形成了高分三号三星组网卫星系统,大幅提升了中国SAR卫星海陆观测能力 (Zhang等, 2024)。此外,中国还发射了世界上首个搭载L波段的双星组网SAR系统 (LT-1A/B),实现了最高3 m空间分辨率和最快4 d重访周期的对地观测能力 (Li等, 2022)。在同步轨道SAR技术方面,中国也取得了重大突破,发射了世界上首颗搭载L波段的地球同步轨道SAR卫星 (LT-4),从而实现高重访 (最快1 d重访)和超宽幅的对地观测能力 (Ji等, 2025)。值得一提的是,中国在小型SAR卫星方面也取得了重要进展,如航天宏图发射的宏图一号 (HT-1)星座 (女娲星座),由1颗主星和3颗辅星组成,具备全球范围高分宽幅成像、高精度测绘及形变监测等能力,可快速、高效地制作高精度数字表面模型 (DSM)并完成全球非极区测绘任务 (Mou等, 2024)。

图1给出了过去、当前和未来几年主要民用SAR卫星的发展历程 (本文不包含军用SAR卫星系统)。未来SAR卫星将针对不同用途进行设计,但总体上朝高分辨率、超宽幅覆盖等方向发展,这意味着SAR系统的设计将增大距离带宽,并平衡SAR覆盖范围和脉冲重复频率PRF (Pulse Repetition Frequency)。当前,大多星载SAR系统的距离向带宽已经从早期的30 MHz以下提升到现在的40 MHz以上,部分SAR卫星条带或者聚束成像模式的距离带宽甚至超80 MHz,如上文述及的TerraSAR-X、COSMO-SkyMed、ALOS-2、LT-1和

2024年发射的ALOS-4，表1呈现了部分主流SAR卫星传感器的PRF和距离向带宽。在此背景下，SAR分谱干涉测量技术的发展和推广应用将迎来新机遇。

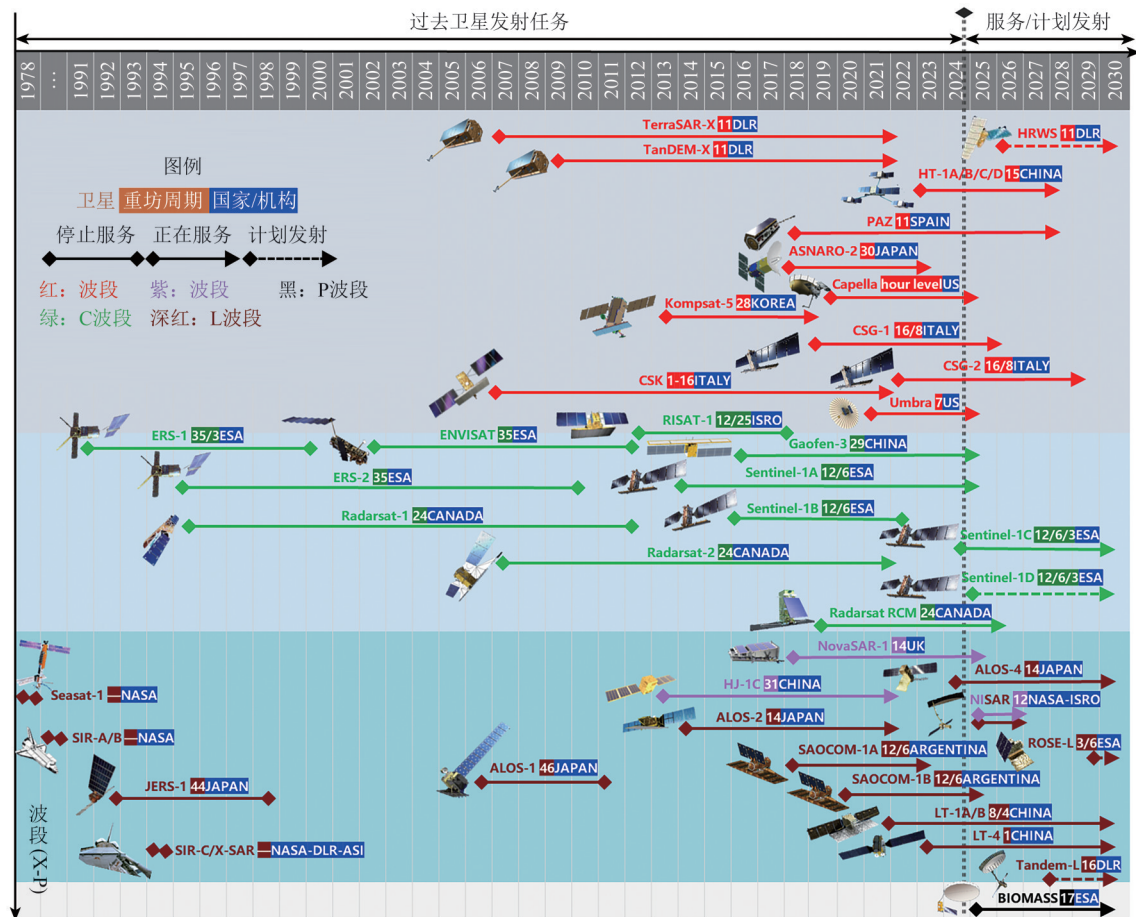


图1 主要民用星载SAR过去、当前和未来几年的发展历程

Fig. 1 The development of spaceborne SAR over the past, present, and the next few years

表1 主流星载SAR的脉冲重复频率和距离向带宽

Table 1 Pulse repetition frequencies and range bandwidths of mainstream SAR satellites

发射年份/年	波段	SAR卫星	脉冲重复频率/Hz	距离向带宽/MHz
2007/2010		TerraSAR-X/TanDEM-X	800—2400	150—300
2018	X	PAZ		
2007—2010		COSMO-SkyMed	2000—3900	100—400
1991/1995		ERS-1/2	1678	15.5
1995/2007		Radarsat-1/2	1256.98/2000—6500	11.6/17.3/30、50/100
2002	C	ENVISAT	1650—2100	16
2014/2016/2024		Sentinel-1A/B/C	1000—2500	25—100
2016		Gaofen-3	500—4000	25—100
1992		JERS-1	1505.8—1606.0	15
2006		ALOS-1	1500—2500	14/28
2014		ALOS-2	1500—3000	14/28/42/84
2018/2020	L	SAOCOM-1A/B	500—2000	14—40
2022		LT-1	500—2500	14—42
2024		ALOS-4	1500—3500	14—85

2 SAR分谱干涉测量研究现状

作为InSAR衍生对地观测技术，SAR分谱干涉测量的核心思想是将SAR影像分割为多个中心频率略有差异的子带或前、后视子孔径影像，然

后利用多个子带或子孔径SAR影像进行多次干涉形成子带干涉图；在此基础上通过分析子带干涉相位的组成并开展数学建模，实现地形恢复、地表形变测量、以及InSAR电离层误差校正等。SAR分谱干涉测量技术的关键发展历程如图2所示。

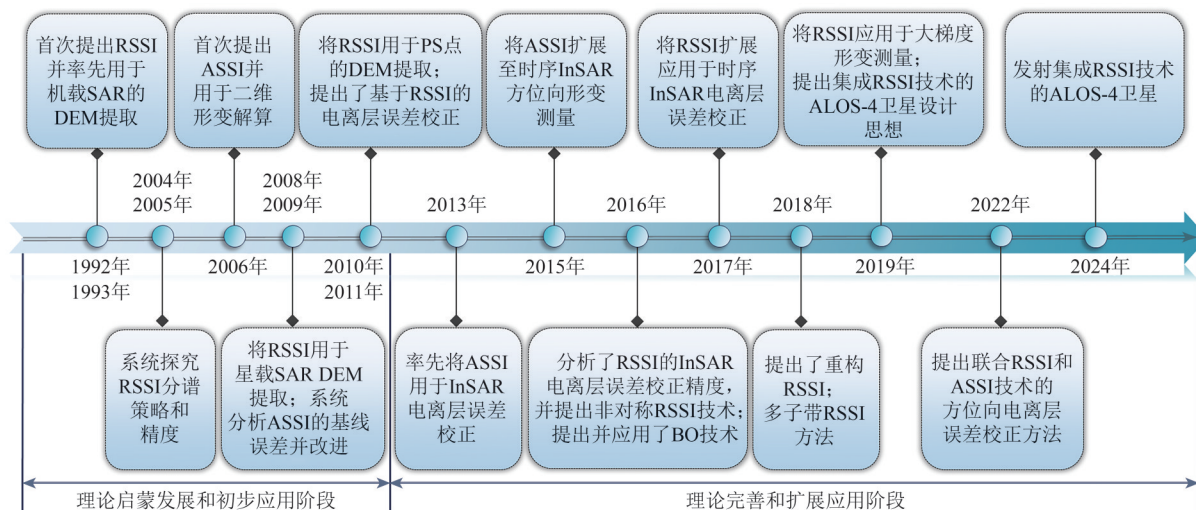


图2 SAR分谱干涉测量发展的关键历程

Fig. 2 Key milestones in the development of SAR split-spectrum interferometry

上文已述及，早期SAR分谱干涉技术受限于SAR系统参数，难以得到推广应用。随着21世纪高性能、多模式的星载SAR系统迎来井喷式发展，为SAR分谱干涉测量理论发展与推广应用提供了新机遇。经过数十年的发展和完善，SAR分谱干涉技术已成功植入卫星SAR数据预处理，以抑制InSAR电离层误差影响，如2024年7月发射的ALOS-4（Advanced Land Observing Satellite-4）卫星植入了RSSI技术（Motohka等，2019）；此外，基于非对称RSSI技术，设计了同时搭载L波段和S波段的双频SAR卫星NISAR（NASA-ISRO SAR）（Kellogg等，2020），并于2025年7月30日成功发射升空。目前，SAR分谱干涉技术主要包括距离向分谱干涉（RSSI）、方位向分谱干涉（ASSI）和Burst重叠区干涉（BOI）方法。下文将简要介绍这3种方法的基本原理。

2.1 SAR距离向分谱干涉

距离向分谱干涉（RSSI）技术最早可追溯到1982年Newhouse等提出的信号分谱处理SSP（Split-Spectrum Processing）（Newhouse等，1982），并于1992年首次引入SAR干涉测量，其基本思路是通过带通滤波将一幅全带宽SAR影像分成中心

频率略有差异的高低频子带SAR数据，从而形成SAR双频干涉模式，其分谱原理如图3所示。RSSI利用高低频子带SAR数据产生高低频子带干涉图，并将子带干涉图进行二次干涉处理，获得双差分子带干涉图，其工作原理为

$$\begin{cases} \Delta\phi_{\text{int}}^H = M_H \cdot S_H^* \\ \Delta\phi_{\text{int}}^L = M_L \cdot S_L^* \\ \Delta\phi_d = \Delta\phi_{\text{int}}^H \cdot \Delta\phi_{\text{int}}^{L*} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $\Delta\phi_{\text{int}}^H$ 和 $\Delta\phi_{\text{int}}^L$ 分别为高频和低频子带干涉相位； $\Delta\phi_d$ 表示高低频子带差分干涉相位； M_H 和 M_L 分别表示高频和低频主影像； S_H 和 S_L 分别表示高频和低频副影像；*表示共轭相乘。

图3中， B 表示SAR距离向带宽； k 为带通滤波宽度相对SAR带宽 B 的比例因子， $1 > k > 0$ ，假设两次分谱为对称子带分割，则 $k_1 = k_2$ ，否则 $k_1 \neq k_2$ ； f_0 表示雷达载波频率。

自21世纪以来，新一代高分辨率、大带宽星载SAR系统的发射，极大推动了RSSI技术的应用。2004年，Bamler和Eineder深入探讨了RSSI技术的精度与距离向带宽分割之间的关系，论证了当带通滤波设计为1/3的距离向带宽时，RSSI技术的精度达最高（Bamler和Eineder，2004）。随后，

Eineder 等 (2008)、Bricic 等 (2009) 将 RSSI 技术应用于 TerraSAR-X 数据的 DEM 提取, 取得了突破性的进展, 揭示了 RSSI 技术的相位精度可达 $\pm 0.5\pi$, 并指出 RSSI 技术可有效降低地形起伏剧烈区域的相位解缠误差。2010 年, Bricic 等 (2010b) 进一步将 RSSI 技术扩展应用于永久散射体 PS (Permanent Scatterer) DEM 提取, 证实了该技术提取 PS 点的精度与常规 PS-InSAR 接近。根据 Madsen 和 Zebker (1992) 和 Mao 等 (2022a) 利用 RSSI 技术提取 DEM 的理论公式如下:

$$\begin{cases} \varphi_H = \frac{4\pi \cdot B_{\perp} \cdot f_H \cdot h}{c \cdot R \cdot \sin \theta} \\ \varphi_L = \frac{4\pi \cdot B_{\perp} \cdot f_L \cdot h}{c \cdot R \cdot \sin \theta} \\ h = \frac{c \cdot R \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot B_{\perp} \cdot (f_H - f_L)} \Delta\varphi_{H-L} \end{cases} \quad (2)$$

式中, f_H 和 f_L 分别为高频和低频子带的中心频率; φ_H 和 φ_L 分别代表高频和低频绝对干涉相位; h 为地形高度; c 是真空中光速; R 是斜距; θ 是入射角; f_0 是雷达载波频率; B_{\perp} 是垂直基线; $\Delta\varphi_{H-L} = \varphi_H - \varphi_L$ 。

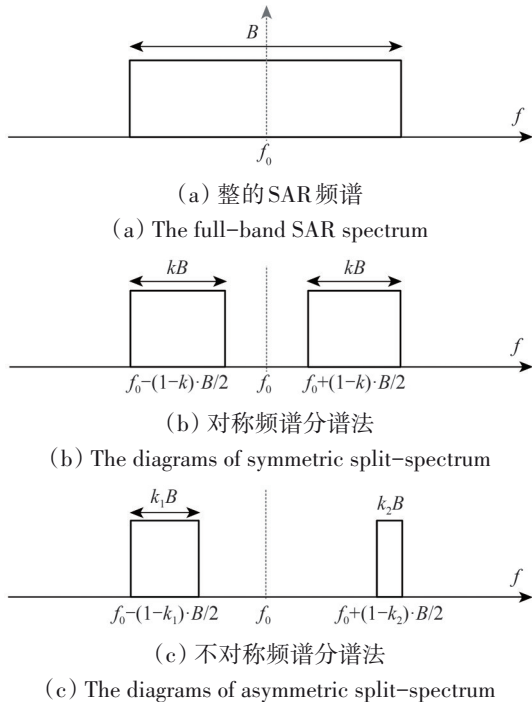


图3 SAR 频谱分割示意图, 图中标注了不同频谱分割方法所得到的子带带宽和中心频率

Fig. 3 Schematic diagram of split-spectrum with annotations of sub-band bandwidth and central frequency

此外, 受 GNSS 双频电离层误差校正方法启发, Bricic 等将 RSSI 技术拓展应用于 InSAR 电离层误差

估计与校正, 极大改善了 InSAR 测量精度, 同时也为差分电离层总电子含量 TEC (Total Electron Content) 估计提供了新思路 (Bricic 等, 2010b, 2011), 其 InSAR 电离层误差估计与校正公式为

$$\begin{cases} \Delta\phi_{\text{iono}} = \frac{f_L f_H^2}{f_0 (f_H^2 - f_L^2)} \cdot \Delta\phi_L - \frac{f_L^2 f_H}{f_0 (f_H^2 - f_L^2)} \cdot \Delta\phi_H \\ \Delta\phi_{\text{non-disp}} = \frac{f_0 f_H}{f_H^2 - f_L^2} \cdot \Delta\phi_H - \frac{f_0 f_L}{f_H^2 - f_L^2} \cdot \Delta\phi_L \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\Delta\phi_H$ 和 $\Delta\phi_L$ 分别为高频和低频子带差分干涉相位; 将 $\Delta\phi_{\text{non-disp}} = \Delta\phi_{\text{flat}} + \Delta\phi_{\text{topo}} + \Delta\phi_{\text{def}} + \Delta\phi_{\text{tropo}}$ 称之为非色散相位, $\Delta\phi_{\text{flat}}$ 、 $\Delta\phi_{\text{topo}}$ 、 $\Delta\phi_{\text{def}}$ 和 $\Delta\phi_{\text{tropo}}$ 分别为残余参考椭球相位、残余地形相位、形变相位和残余对流层相位; 电离层相位 $\Delta\phi_{\text{iono}}$ 则称为色散相位。

在 Bricic 等基础上, Gomba 等 (2016b) 就 RSSI 技术在 InSAR 电离层误差校正方面展开深入研究, 系统揭示了 RSSI 技术电离层误差校正性能的影响因素, 并提出了相应的改善策略; 同时, 为满足大带宽 SAR 数据的分谱应用需求, 提出了非对称 RSSI 技术, 即分谱产生的子带带宽不相同 (如图 3 (c)), 并论证了其适用性。考虑一些星载 SAR 系统距离向带宽较小, 限制了利用 RSSI 校正 InSAR 电离层误差的精度, Wegmüller 等 (2018) 提出了一种重构的 RSSI (Reformulating RSSI, Re-RSSI) 技术, 极大改善了 RSSI 技术的鲁棒性和电离层误差校正精度。此外, Liao (2018) 提出多子带 RSSI 技术, 通过形成多个子带干涉图, 构建 InSAR 电离层误差校正的最小二乘平差模型, 从而改善 RSSI 技术电离层校正的鲁棒性, 但该技术涉及多次子带分割, 计算效率太低, 未被广泛使用。值得一提的是, 为克服电离层对低频 SAR 测量的影响, RSSI 技术被集成于 ALOS-4 卫星 (Motohka 等, 2019, 2021), 这标志着 RSSI 技术从理论到应用取得了历史性突破。

除了在 DEM 提取和 InSAR 电离层误差校正得到广泛应用, RSSI 技术也被扩展应用于大梯度形变测量, 如 Luo 等 (2019) 将 RSSI 技术应用于矿山区域的大梯度形变测量, 获取了高质量的形变信息。假设 $\Delta\phi_H$ 和 $\Delta\phi_L$ 只有形变信息, 则基于 RSSI 技术的大梯度形变提取可表示为

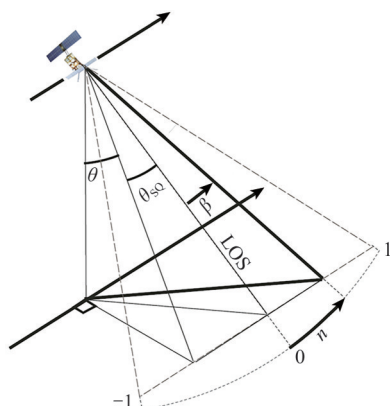
$$\begin{cases} \Delta\phi_H = 4\pi \cdot \frac{f_H}{c} \cdot \Delta d \\ \Delta\phi_L = 4\pi \cdot \frac{f_L}{c} \cdot \Delta d \\ \Delta\phi = \Delta\phi_H - \Delta\phi_L = 4\pi \cdot \frac{2\Delta f}{c} \cdot \Delta d \end{cases} \quad (4)$$

式中， Δd 表示地表位移； $\Delta\phi$ 为高频和低频子带差分干涉图的双差分干涉相位。

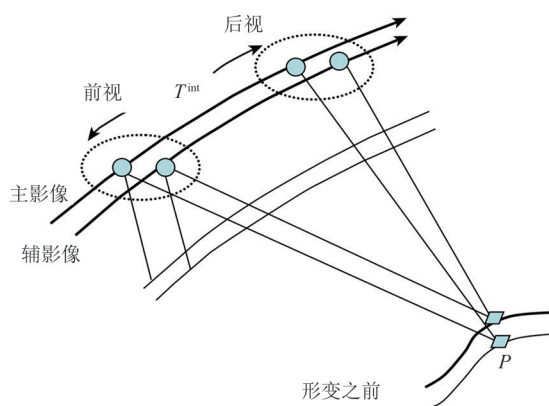
2.2 SAR方位向分谱干涉

SAR方位向分谱干涉（ASSI）技术由Bechor和Zebker（2006）提出，该技术顾及SAR成像和干涉几何特征（图4（a）），采用带通滤波对SAR方位向带宽信号分波束处理，将一幅全孔径SAR

影像分成前、后视两幅子孔径SAR影像；在此基础上，对子孔径SAR影像进行差分处理，产生前、后视子孔径干涉图（图4（b））；将前、后视子孔径干涉图进行二次差分，可获取地表沿SAR方位向形变信息。ASSI技术成功将InSAR形变测量从一维扩展至二维，显著提升InSAR形变测量的精细程度和可解译性。



(a) 多普勒中心频率非零情况下主、副SAR干涉几何
(a) The interferometric geometry of the primary and secondary SAR with non-zero doppler centroid frequency



(b) 多孔径雷达干涉前视和后视干涉示意图
(b) The schematic diagram of forward-looking and backward-looking interferometry for multiple-aperture InSAR

图4 SAR方位向分谱干涉几何(改编自Bechor和Zebker(2006)及Jung等(2009))

Fig. 4 The interferometric geometry of SAR azimuth split-spectrum (Adapted from Bechor & Zebker (Bechor and Zebker, 2006) and Jung et al. (Jung et al., 2009))

假设一对SAR影像，主影像为 M ，副SAR影像为 S ，则根据Bechor和Zebker，ASSI技术方位向形变提取可表示为

$$\begin{cases} \phi_f = M_f \cdot S_f^* = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta x \sin(\theta_{sq} + \frac{\Delta\beta}{2}) \\ \phi_b = M_b \cdot S_b^* = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta x \sin(\theta_{sq} - \frac{\Delta\beta}{2}) \\ \phi_{ASSI} = \phi_f \cdot \phi_b^* = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta\beta \cdot \Delta x \approx \frac{4\pi}{L} \cdot n \cdot \Delta x \end{cases} \quad (5)$$

式中， M_f 和 M_b 及 S_f 和 S_b 分别表示主影像前视和后视及副影像前视和后视子孔径； ϕ_f 和 ϕ_b 分别为前视和后视干涉相位； ϕ_{ASSI} 为ASSI技术提取的SAR方位向形变相位； λ 为雷达波波长； θ_{sq} 为零多普勒频率方向与雷达正侧视方向的斜视角； Δx 表示方位向位移； $\Delta\beta$ 为前视和后视合成信号视线向之间的夹角， $\Delta\beta = n \cdot \beta = n \cdot \lambda/L$ ， β 为雷达波束宽度角， L 为SAR传感器天线长度， n 一般取0.5；角标 f 和 b 分别代表前视和后视。为提升ASSI提取地表方位向形变的精度，Jung等（2009）考虑一个合成孔径时间段 T^{int} 内主、副SAR卫星空间轨迹并非完全平行，而这将导致前视和后视干涉对的空间

基线存在距离差异、方位角差异以及雷达波天底入射角差异；通过系统分析ASSI技术的测量误差，提出了严密模型以校正前、后视干涉图基线差异引起的轨道误差。

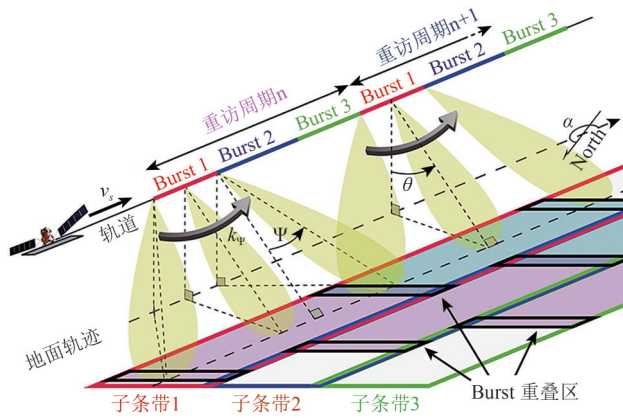
基于上述研究，Jung等（2011）结合InSAR和ASSI技术，提取了夏威夷Kilauea火山的三维形变场。随后，Jung等（2013）分析了电离层误差的时空变化特征及其与传统InSAR观测量之间的关系，率先将ASSI技术扩展应用于InSAR电离层误差校正。2015年，Jo等（2015）和He等（2015）分别将ASSI技术拓展至Stacking-InSAR和小基线集SBAS（Small Baseline Subset）-InSAR，极大提高了SAR方位向形变测量精度。此后，ASSI技术被广泛应用于InSAR多维形变解算和InSAR电离层误差校正（Hu等，2017；He等，2019a，2019b；Liu等，2019；Jung和Lee，2015）。2022年，Mao等（2022a）基于RSSI和ASSI分谱干涉测量原理，创新性地建立了SAR方位向形变、电离层误差与分谱干涉相位之间的数学模型，实现了SAR方位向形变观测量中电离层误差的有效校正，大幅度提高了利用

ASSI测量地表沿SAR方位向形变的精度。2024年, Liang等(2024)将Mao等(2022b)提出的方法扩展至时序InSAR方位向形变测量和电离层误差校正, 有效提升了SAR方位向时序形变的测量精度, 为动态高精度SAR方位向形变测量提供了技术支持。

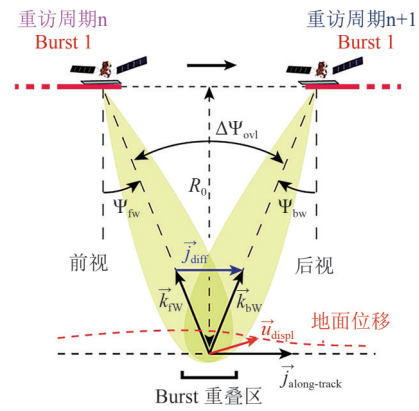
2.3 Burst重叠区干涉

Burst重叠区干涉(BOI)技术随着Sentinel-1 SAR卫星发射而诞生, 其方位向形变测量原理与

ASSI基本一致, 但前者利用SAR成像时斜视角的稳定漂移形成前、后视干涉模式, 无须进行子孔径分割, 充分保证了方位向频谱重叠(图5), 使其方位向形变测量精度与常规InSAR LOS向形变测量精度相当, 且显著高于ASSI技术(Grandin等, 2016)。需要指出的是, 尽管BOI技术可获取高精度方位向形变, 但受TOPSAR数据相邻Burst重叠区域较小的限制(图5(a)), 难以获取空间上连续的大范围方位向形变信息。



(a) Sentinel-1 TOPS成像模式原理
(a) Principle of Sentinel-1 TOPS imaging mode



(b) Burst重叠区域的斜视角差异与方位向位移之间的关系
(b) The relationship between squint angle difference and azimuth displacement in the burst overlap region

图5 Sentinel-1 TOPS成像模式原理与观测几何(改自Grandin等(2016))

Fig. 5 Principles of Sentinel-1 TOPS imaging mode and observation geometry (Adapted from (Grandin et al., 2016))

根据Grandin等(2016)和图5(b), 可得BOI技术提取方位向位移的基本原理为

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{ovl} &= \Delta\phi_{fw} - \Delta\phi_{bw} \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \vec{u}_{displ} \cdot (\vec{k}_{fw} - \vec{k}_{bw}) \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x \cdot \left\| \vec{j}_{diff} \right\| \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\Delta\phi_{ovl}$ 为重叠区域方位向形变相位; $\Delta\phi_{fw}$ 和 $\Delta\phi_{bw}$ 分别表示重叠区域前视和后视干涉相位; \vec{u}_{displ} 为地面位移; \vec{k}_{fw} 和 \vec{k}_{bw} 分别表示前视和后视干涉图的视线向向量; $\vec{j}_{diff} = \vec{k}_{fw} - \vec{k}_{bw} \approx \Delta\Psi_{ovl} \cdot \vec{j}_{along-track}$, $\Delta\Psi_{ovl} = \Delta\eta_{ovl} k_{\Psi}$, $\vec{j}_{along-track}$ 表示平行于卫星地面轨迹的水平单位矢量, $\Delta\Psi_{ovl}$ 为斜视角差异, $\Delta\eta_{ovl}$ 为Burst重叠时间间隔, k_{Ψ} 为波束转向率。

Grandin等(2016)利用BOI技术测量了2015年智利伊亚佩尔Mw8.3级地震的方位向同震形变, 并在此基础上联合LOS向形变解算了该地震的三

维形变场。相比于RSSI和ASSI技术, BOI技术可获取更精确的形变数据, 但其观测覆盖范围仅限于相邻Burst重叠区域。因此, BOI技术应用场景偏少, 目前主要应用于地震、火山等多维形变解算和大范围构造活动监测(Pepe等, 2023; Jiang等, 2017; Nergizci等, 2024; Magen等, 2024; Li等, 2021)。

表2给出了RSSI、ASSI和BOI这3种技术的主要特点、应用场景和优缺点。

3 SAR分谱干涉测量应用与进展

随着21世纪以来SAR卫星在硬件技术上的重大突破, 新一代大带宽、高分辨率SAR系统相继发射或进入未来规划, 分谱干涉测量技术的应用潜力将得到释放。本节重点围绕分谱干涉测量技术在DEM提取、大梯度形变测量、多维形变获取和InSAR电离层误差校正等方面的应用进展进行介绍。

表2 RSSI、ASSI、BOI 3种技术对比
Table 2 Comparisons of the RSSI, ASSI and BOI techniques

技术方法	RSSI	ASSI	BOI
核心原理	将SAR距离向回波频谱分割为高、低频两个子带,用其生成高低频子带干涉图	将SAR多普勒频谱分割为前视和后视子孔径,形成两对分孔径干涉图,两个子孔径干涉图之间再次干涉	利用相邻Burst在方位向重叠区具有不同的侧视方向,对重叠区数据进行干涉处理,获取重叠区的方位向地表形变。
作用维度	SAR距离向	SAR方位向	SAR方位向
解决的核心问题	提高地表高程反演精度;校正InSAR电离层误差;提取大梯度形变	测量SAR方位向地表形变,弥补传统InSAR对南北向形变不敏感的缺陷	提取ScanSAR/TOPS宽幅模式数据在Burst重叠区的干涉信息,获取重叠区方位向形变
主要应用场景	地形陡峭区DEM测绘;矿区/地震等大梯度形变提取;InSAR电离层误差校正/电离层TEC反演	地震/滑坡等灾害的二维/三维形变场,揭示地表复杂形变特征	大空间尺度方位向形变,如断层、板块运动等
优点	降低InSAR相位条纹密度,提高相位解缠精度;有效移除InSAR电离层误差,提高InSAR形变测量精度	对SAR南北向敏感,其方位向形变测量精度可达厘米级,弥补传统InSAR只对SAR视线向形变敏感的缺陷	充分利用现有宽幅SAR数据中被忽略的观测信息,获取与InSAR视线向形变精度相当的方位向形变信息
缺点	测量精度依赖SAR距离向带宽和干涉相干性	测量精度低于InSAR视线向形变测量精度,并且依赖SAR干涉相干性	仅能获取相邻Burst重叠区域的形变信息,不同Burst需要高精度配准

3.1 DEM获取

利用InSAR技术获取DEM产品,需得到SAR干涉图的绝对解缠绕相位,因此相位解缠质量直接影响DEM产品的精度。上文已经指出,RSSI技术可有效稀疏InSAR相位的条纹密度,避免InSAR相位解缠的难题。然而,早期星载SAR的距离向带宽较小,利用RSSI技术难以获取满足精度要求的DEM。

随着TerraSAR-X为代表的高距离向带宽SAR数据不断获取,RSSI开始在高精度DEM产品生产中展现潜力。Eineder等(2008)率先基于TerraSAR-X Spotlight模式数据(距离向带宽为300 MHz),并利用RSSI技术开展了DEM生成试验,发现RSSI可有效克服地形起伏剧烈区域的相位解缠误差。Brcic等(2009)对比分析了150 MHz和300 MHz TerraSAR-X数据生成DEM的结果,发现后者模糊高阈值小于前者的1/3(Brcic等,2009)。Brcic等(2008)利用RSSI技术和距离向带宽为150 MHz的TerraSAR-X数据提取南美Salt lake Salar de Uyuni地区的DEM,与常规InSAR DEM和SRTM DEM对比,发现RSSI技术相位解缠精度在 0.5π 以内。

随后,Brcic等(2010b)将RSSI技术与PS-InSAR结合,基于25幅300 MHz的TerraSAR-X数据提取埃菲尔铁塔的DEM,并指出随SAR带宽的增加以及信号与杂波比的降低,RSSI技术在PS-InSAR测量中的应用将更具潜力。2016年,庾露对RSSI技术的子带分割参数进行了系统地探讨分

析,从14组实验方案中选出最优参数方案,并证明了在地形起伏剧烈区域RSSI技术获取的DEM精度高于常规InSAR(庾露等,2016)。Mao等(2022a)考虑到RSSI技术分谱处理损失了SAR数据的空间分辨率,使得DEM提取精度降低,提出了RSSI和常规InSAR融合的DEM提取方法,克服了InSAR相位解缠困难,同时补偿了SAR数据分辨率的损失,提高DEM获取精度。图6呈现了利用InSAR、RSSI以及RSSI+InSAR融合技术提取地形起伏剧烈的澳大利亚艾尔斯岩区域DEM,结果表明,在地形起伏剧烈区域RSSI的DEM提取精度显著高于传统InSAR,但数据分辨率更低,而融合RSSI和传统InSAR可兼顾DEM的数据分辨率和精度。

总之,RSSI技术可有效提升相位解缠精度,联合InSAR观测可进一步提升地形重建精度。然而,RSSI的大范围推广应用仍存在局限,这主要源于当前大带宽高分辨率SAR数据大多需要定制,并且成本高昂。随着未来新一代大带宽星载SAR系统的相继发射和应用,大带宽星载SAR数据将不断丰富,上述问题将得到有效改善,RSSI技术应用将迎来新机遇。

3.2 SAR视线向大梯度形变测量

在大梯度形变区域(如地震、矿区等),由于InSAR干涉图相位条纹密集和去相干问题,易使滤波过程出现条纹混叠效应,导致相位解缠误差,传统InSAR观测难以测量大梯度地面位移。如前

文所述, RSSI技术在应对InSAR相位解缠误差方面的优势, 因此RSSI技术从原来的DEM提取逐渐

应用于地震、火山、滑坡、矿山沉降等大梯度形变测量。

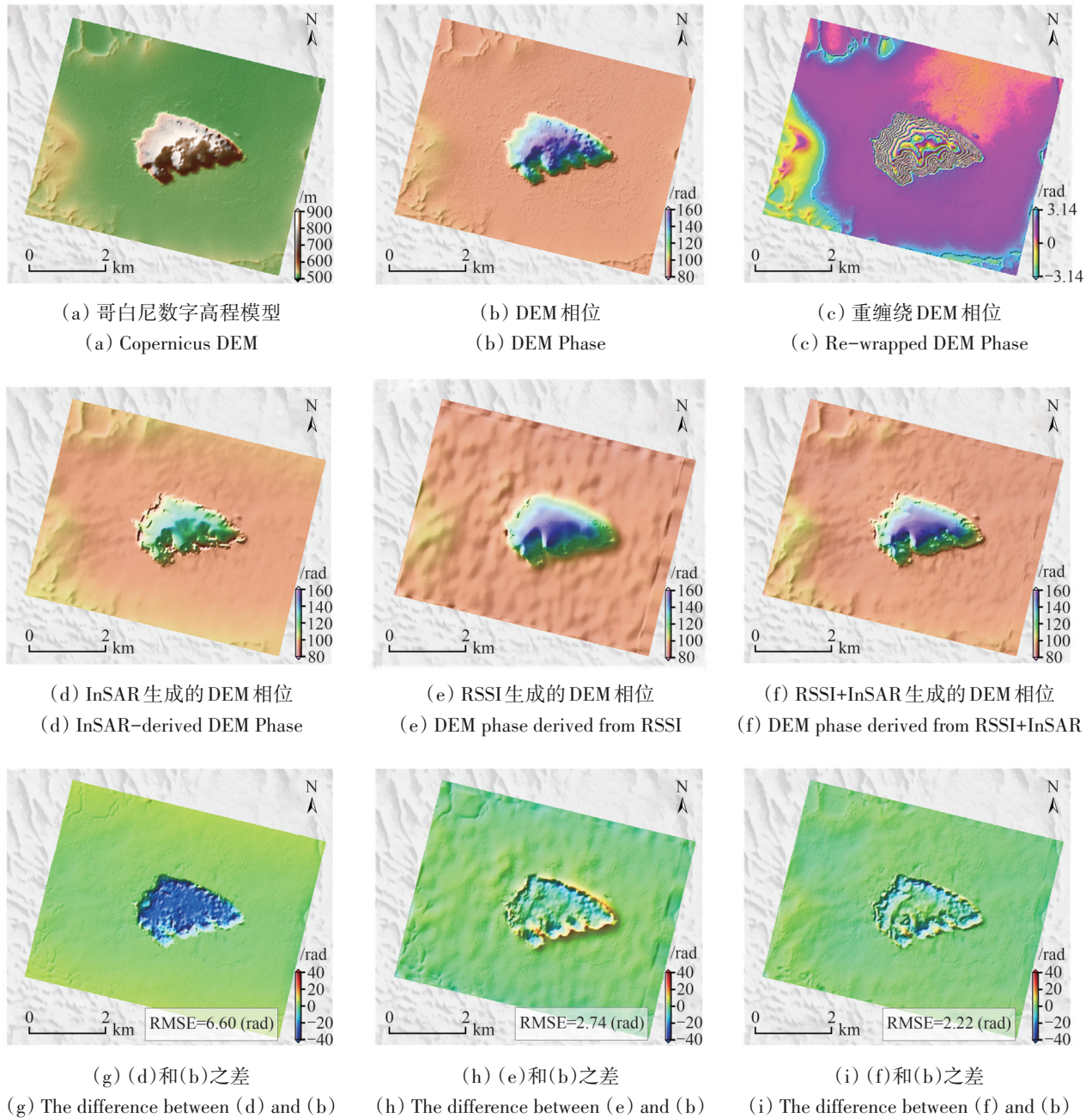


图6 不同SAR干涉测量方法提取的DEM对比(改自(Mao等,2022a))

Fig. 6 Comparison of the DEMs generated with different interferometric SAR methods (Adapted from (Mao et al., 2022a))

庚露等(2016)率先将RSSI技术引入地震形变测量,并以TerraSAR-X SAR影像为测试数据,利用RSSI技术提取了2013年巴基斯坦发生的Mw7.7级地震同震形变场;结果表明,RSSI技术可显著降低同震形变干涉图的相位条纹密度,极大提高相位解缠精度,与InSAR及SAR和光学像素偏移追踪POT(Pixel Offset Tracking)结果对比

发现,RSSI技术可获得精度更高且细节更丰富的同震形变信息,但难以获得低相干区域(如震中区域)的形变信息。随后,Jiang等(2017)率先利用RSSI技术从Sentinel-1 TOPS SAR数据中提取2016年日本熊本地震同震形变;研究表明,在大梯度形变导致的低相干区域,RSSI技术可有效克服传统InSAR由于相位条纹密集导致的相位解缠

问题;此外,尽管在近场同震区域失相干严重,RSSI提取的形变信息存在显著空洞,但仍优于传统InSAR结果,如图7(a)所示。在已有研究基础上,Libert等(2017)发展了一种基于RSSI技术的频率永久散射体探测方法,并用于测量柯帕威火山形变,揭示了RSSI技术在克服地形陡峭、局部失相干严重、几何失真和大梯度形变等区域InSAR相位解缠误差方面具有显著优势,如图7(b)所示。Shi等(2017)将RSSI技术用于三峡库区树坪滑坡时序位移监测,并验证了基于RSSI技术的时序点目标形变测量精度可达厘米级,同时强调了RSSI技术在快速运动的地质灾害监测中具有巨大

潜力,如图7(c)所示。Libert等(2018)再次对基于RSSI技术的频率永久散射体探测与形变监测方法展开研究,揭示了频率永久散射体可能在时间尺度上不稳定,且论证了频率永久散射体不能与特定散射机制关联。Luo等(2019)顾及RSSI技术损失了部分SAR数据分辨率的缺陷,提出了RSSI与传统InSAR联合的大梯度形变测量方法,并应用于采矿沉降监测,表明两者融合可有效克服大梯度形变场景下传统InSAR相位解缠的难题,同时弥补了RSSI技术损失SAR影像分辨率和对形变不敏感的缺陷,如图7(d)和表3所示。

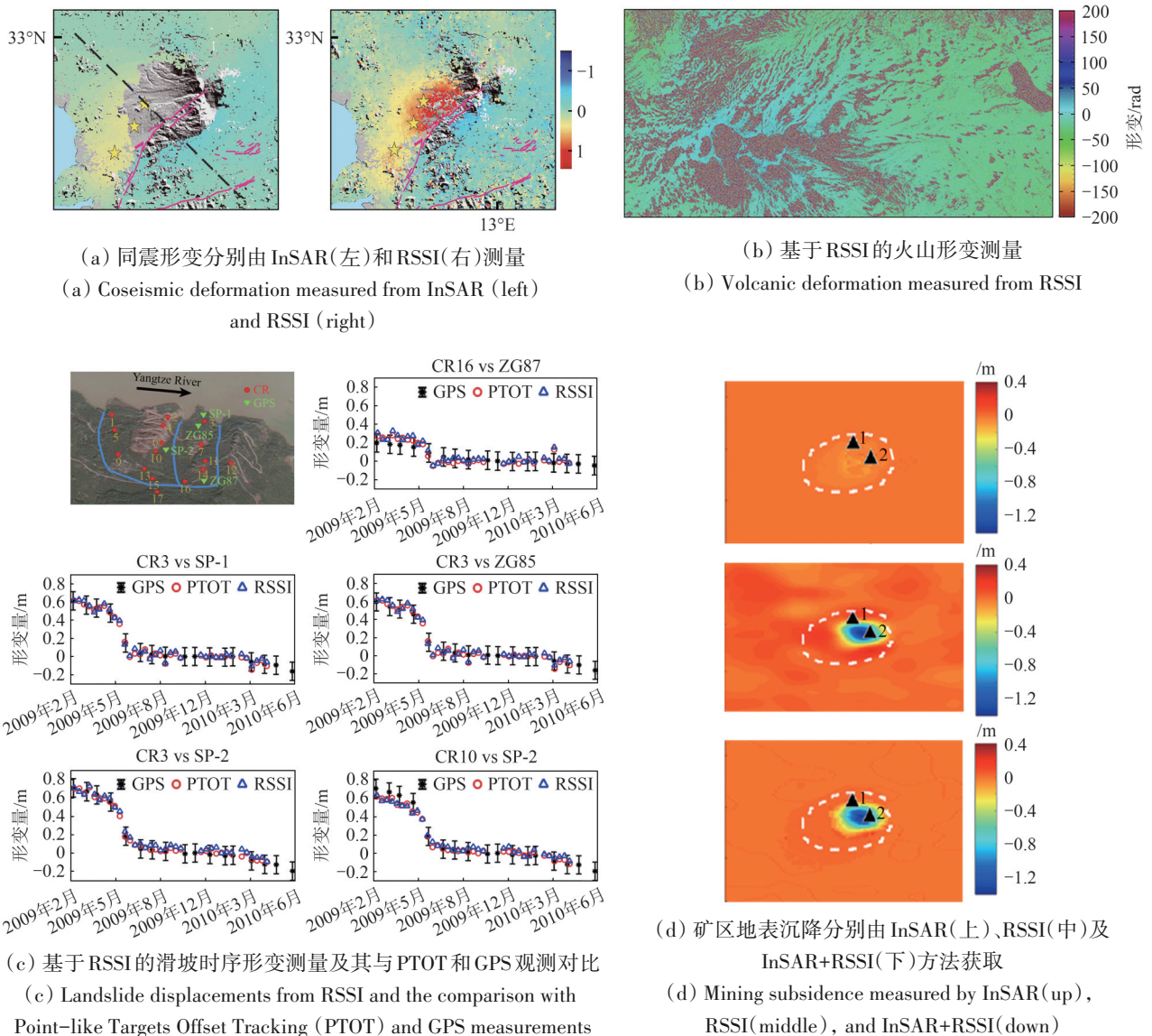


图7 RSSI技术在大梯度形变场景中的应用(改自(Luo等,2019;Jiang等,2017;Libert等,2017,2018;Shi等,2017))
Fig. 7 Application of RSSI in different large gradient deformation scenarios (Adapted from (Luo et al., 2019; Jiang et al., 2017; Libert et al., 2017, 2018; Shi et al., 2017))

表3 图7(d)中不同方法测量结果及其与GPS观测结果的对比

Table 3 Comparisons of the different measurement results in Fig. 7(d) with GPS measurements

方法	最大视线向位移/m	InSAR与GPS的差异/m		非形变区域的位移均方根误差/m
		站点1	站点2	
InSAR	-0.133	0.019	-0.979	0.002
RSSI	-1.375	0.047	0.073	0.036
InSAR+RSSI	-1.362	0.039	0.042	0.006

上述研究表明, 基于RSSI技术的大梯度形变测量已在大地测量领域得到了广泛认可, 目前主要应用于地震、火山、滑坡、矿区等大梯度形变场景。尽管RSSI技术由于分谱处理, 损失了SAR数据的空间分辨率, 且对地表形变的敏感性较低, 但将InSAR和RSSI融合, 可有效克服此类问题, 从而实现高质量相位解缠, 并保证形变测量精度, 应用潜力巨大。

3.3 InSAR 多维形变测量

SAR特殊的成像方式使InSAR技术仅可测量沿雷达波束视线方向的一维形变信息, 导致真实地表形变机理解译偏差或错误, 极大限制InSAR技术的应用。为突破这一技术瓶颈, 学者们将InSAR提取的SAR视线向形变与ASSI技术获取的SAR方位向形变联合, 开展了地震、火山、滑坡、冰川等InSAR多维形变信息提取研究。

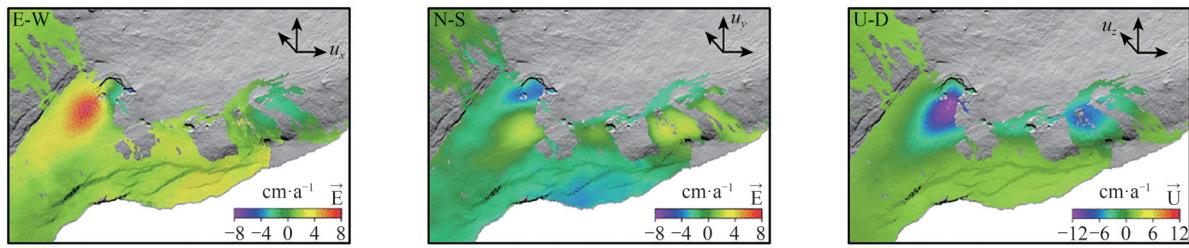
早在1999年, Michel等(1999)提出利用POT技术获取SAR方位向和视线向形变信息; 此后, POT技术被广泛用于地震、火山、冰川运动、滑坡等大梯度多维形变提取。但POT技术的形变测量精度取决于SAR影像分辨率和配准精度, 通常仅能实现12—15 cm的形变测量精度(Jung等, 2014), 难以满足高精度多维形变测量需求。为提高SAR方位向形变测量精度, Bechor和Zebker(2006)提出了ASSI技术, 并用于提取1999年海克特煤矿Mw7.1级地震的二维同震变形场, 论证了InSAR干涉图相干性不低于0.4和信噪比不低于30 dB时, ASSI技术获取的方位向形变精度优于POT技术所能达到的最高精度。随后, 考虑到基线对ASSI技术测量精度的影响, Jung等(2009)对ASSI技术进行了改进, 显著减小了基线差引起的方位向形变误差。为进一步提升ASSI技术对方位向形变的敏感性, 以提高多维形变的估计精度, Jo等(2015)和He等(2015)分别将ASSI技术扩展至Stacking-InSAR和SBAS-InSAR, 并分别应用于夏

威夷基拉威厄火山三维形变估计(图8(a))和抚顺西露天矿二维形变测量, 与GPS数据对比验证了方法的可靠性(图8(b))。然而, Sentinel-1A/B TOPS模式SAR数据的出现, 其以牺牲方位向带宽为代价获取大覆盖幅宽, 打破了ASSI技术获取高精度方位向形变的可能。为克服这一问题, Grandin等(2016)提出了与传统InSAR技术形变测量精度相当的BOI技术, 成功应用于智利伊亚佩尔地区Mw8.3级地震的三维同震形变提取, 并与GPS数据对比, 论证了BOI技术的可靠性, 如图8(c)所示。随后BOI技术被迅速推广应用于地震同震三维形变估计、断层活动等大范围方位向形变监测(He等, 2019a, 2019b; Li等, 2021)。

综上, 随着ASSI技术的应用和不断完善以及BOI技术的提出, 基于SAR数据的多维形变测量在地震、火山、矿山等领域得到广泛应用, 已取得显著进展, 这些研究主要通过联合升降轨InSAR和ASSI或BOI获取的形变数据实现二维或三维形变估计。相比于POT技术, ASSI和BOI技术显著提高了SAR方位向形变测量精度, 有效弥补了InSAR技术仅能测量一维形变的不足, 极大地促进了InSAR技术的发展, 同时显著提升了形变灾害机理的可解释性, 为地质灾害监测和防控策略的制定提供理论和数据支撑。

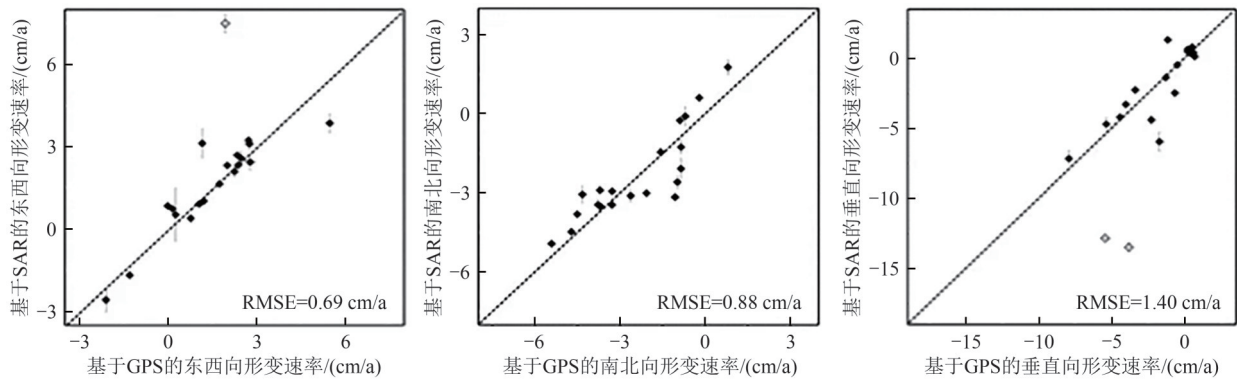
3.4 InSAR 电离层误差校正

电离层是上层大气重要组成部分, 也是InSAR测量的主要误差源之一。2000年, Gray等(2000)率先证明了电离层可引起SAR方位向偏移, 降低了InSAR测量精度。此后, 针对InSAR电离层误差, 学界开展了大量研究, 提出了一系列InSAR电离层误差校正方法。早期InSAR电离层误差校正通过SAR影像堆叠, 利用时空滤波的方法进行校正。然而, 这种方法需要大量SAR数据, 且受滤波参数的影响较大。SAR分谱干涉技术的出现, 为InSAR电离层误差校正开辟了新思路。



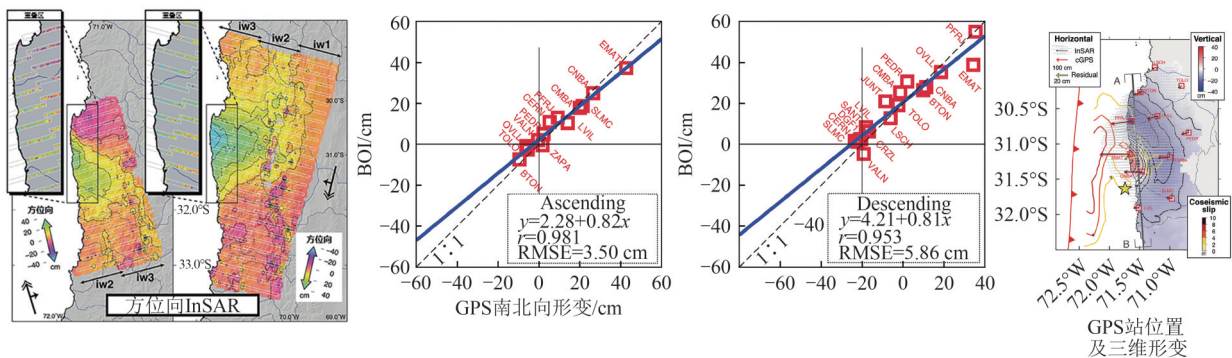
(a) 基于SAR影像的三维形变,左、中、右分别为东西向、南北向和垂直向形变

(a) Three-dimensional deformation based on SAR imagery, with the left, middle, and right panels representing the east-west, north-south, and vertical deformation, respectively



(b) 基于SAR和GPS的三维形变对比,左、中、右分别为东西向、南北向和垂直向形变

(b) Comparison of three-dimensional deformation based on SAR and GPS, with the left, middle, and right panels representing the east-west, north-south, and vertical deformation, respectively



(c) BOI方位向形变测量,从左到右依次为升降轨BOI方位向形变场、升轨BOI与GPS对比、以及降轨BOI与GPS对比
(c) BOI azimuth deformation measurements, from left to right: ascending and descending azimuth deformation field from BOI, comparison between the ascending and descending BOI results with GPS measurements

图8 联合InSAR和ASSI或BOI的三维形变估计示例(改编自(Jung等,2011;Grandin等,2016))

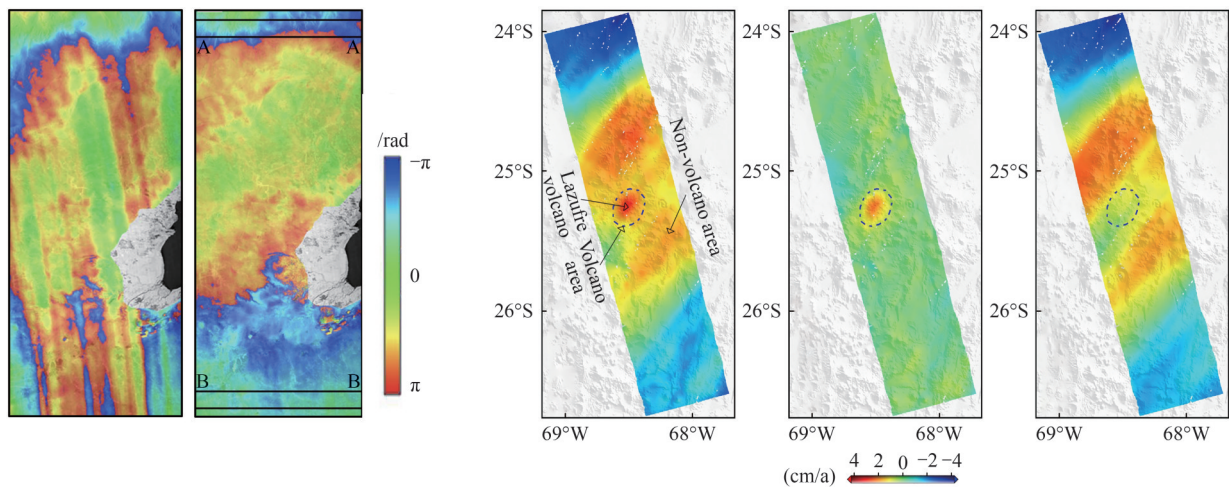
Fig. 8 Example of 3D deformation estimation by combining InSAR and ASSI/BOI (Adapted from (Jung et al., 2011; Grandin et al., 2016))

与方位向偏移法原理不同, RSSI技术受双频GNSS电离层误差校正启发, 将一幅SAR影像分成中心频率略有差异的高低频子带SAR影像, 从而构建双频电离层误差估计模型。2010年, Brcic等(2010a)首次将RSSI技术引入InSAR电离层误差估计和校正, 并从理论和实例论证了其精度和可靠性, 奠定了RSSI电离层误差校正的基础。基于此, Gomba等(2016b)系统分析了RSSI技术在InSAR电离层误差校正方面存在的问题, 并提出了

相应的解决策略, 通过实例证明了RSSI技术的可靠性及提出策略的有效性; 同时, Gomba等针对NISAR双频星载SAR计划, 提出了非对称RSSI, 并通过模拟数据测试分析, 论证了该技术的可行性。此外, Gomba和De Zan(2017)考虑RSSI技术的鲁棒性受限于SAR距离向带宽, 难以校正InSAR测量结果中的中小尺度电离层误差, 提出了基于贝叶斯先验信息的RSSI和方位向偏移联合的InSAR电离层误差校正模型, 结果表明联合模型可

有效校正 InSAR 结果中不同空间尺度的电离层误差, 如图 9 (c) 所示。为改善 RSSI 技术的鲁棒性, Wegmüller 等 (2018) 提出了 Re-RSSI 技术, 并从理论和实例对比分析了 Re-RSSI 与 RSSI 的性能, 证明了 Re-RSSI 方法性能显著优于 RSSI。Liao (2018) 为提高 RSSI 技术的鲁棒性, 提出了多子带 RSSI 方法, 即将一幅 SAR 影像分成 3 个或以上的子带, 从而获得冗余观测量, 以达到 InSAR 电离层误差鲁棒估计和校正的目的。Mao 等 (2021) 顾及多尺度电离层误差校正和先验信息难以获取等问题, 在 Gomba 和 De Zan (2017) 的基础上, 提出了基于赫尔默特方差分量后验估计的 RSSI 和 ASSI 联合的 InSAR 电离层误差校正模型, 并利用实例测试和 GPS 数据验证, 表明提出方法可有效校正不同空间尺度电离层误差, 同时无需提供精确的先验信息。为校正时序 InSAR 测量的电离层

误差, Fattahi 等 (2017) 首次将 RSSI 扩展应用于时序 InSAR 电离层误差校正, 结果表明 RSSI 方法可显著提高时序 InSAR 形变测量精度。Mao 等 (2023) 将 Re-RSSI 技术扩展至时序 InSAR 电离层误差校正, 并与 RSSI 对比, 结论与 Wegmüller 等一致, 如图 9 (b) 所示。值得一提的是, Liang 和 Fielding (2017) 根据电离层对 SAR 方位向形变的影响机制, 首次将 RSSI 技术应用于校正 SAR 方位向形变的电离层误差, 并利用尼泊尔地震前后获取 ALOS-2 ScanSAR 数据论证了该方法的可行性和有效性。Mao 等 (2022a) 通过联合 RSSI 和 ASSI 技术, 首次构建了 SAR 方位向电离层误差的双频校正模型, 通过真实数据测试, 并利用模拟数据和 GPS 数据验证, 充分证实了这种双频校正模型的有效性, 显著提升了 SAR 方位向形变的测量精度。



(a) 基于 ASSI 的方位向偏移 InSAR 电离层误差校正, 左、右分别为校正前后的干涉图
(a) Azimuth offset InSAR ionospheric error correction based on ASSI, with the left and right panels showing the interferograms before and after correction, respectively

(b) 基于距离向分谱的 InSAR 电离层误差校正, 左、中、右分别为未校正、RSSI 校正和 Re-RSSI 校正的时序 InSAR 形变速率
(b) InSAR ionospheric error correction based on range-direction sub-band spectrum, with the left, middle, and right panels representing the time-series InSAR deformation rates of uncorrected, RSSI-corrected, and Re-RSSI-corrected results, respectively

(c) 联合方位向偏移和 RSSI 的 InSAR 电离层误差校正, 从左到右分别为未校正、方位向偏移法校正、RSSI 校正和联合校正
(c) Joint azimuth offset and RSSI-based InSAR ionospheric error correction, with the panels from left to right showing the uncorrected, azimuth offset-corrected, RSSI-corrected, and jointly corrected results

图 9 基于分谱法的 InSAR 电离层误差校正示例 (改编自 (Jung 等, 2013; Gomba 和 De Zan, 2017; Mao 等, 2023))

Fig. 9 Example of InSAR ionospheric error correction based on split-spectrum methods (Adapted from (Jung et al., 2013; Gomba and De Zan, 2017; Mao et al., 2023))

基于SAR分谱干涉技术的电离层误差校正方法已被广泛应用,是InSAR领域长期关注的热点,主要包括基于ASSI技术的方位向偏移校正电离层误差正法和基于RSSI技术的电离层误差校正法。前者对电离层沿SAR方位向的梯度变化非常敏感,易捕获InSAR结果的中小尺度电离层误差,但其涉及积分运算,在大范围场景中易产生累积误差,因此难以移除InSAR测量数据中的大尺度电离层误差。相比之下,后者可有效移除InSAR结果中的大尺度电离层误差,但其性能受限于当前较小的SAR距离向带宽,易放大InSAR相位中的噪声,中小尺度电离层误差难以估计和校正。然而,两者可以互补,将其联合可有效移除多尺度电离层误差,提高InSAR地表形变测量精度。

4 SAR分谱干涉测量挑战与展望

4.1 SAR分谱干涉测量挑战

4.1.1 分谱干涉地表形变测量精度

如上文所述,分谱干涉技术在地表形变测量中已呈现了巨大潜力,但受SAR距离带宽限制,其观测精度有限。RSSI可以应用于SAR视线向形变测量,但其测量精度严重依赖于SAR系统的距离向带宽。由于RSSI技术涉及分谱处理,导致子带SAR数据的空间分辨率和信噪比显著降低,从而使得子带干涉图的空间分辨率下降,同时噪声水平显著升高。特别是在SAR距离向带宽较小时,高频和低频子带SAR影像对的公共带宽减小,这对子带干涉图的相干性产生严重影响,甚至可能导致完全失相干现象。ASSI技术主要用于提取SAR方位向形变信息,与RSSI类似,ASSI涉及分孔径处理。由于子孔径SAR影像的空间分辨率和信噪比仅相当于原始SAR影像的一部分,导致其在方位向形变测量中的精度显著低于传统InSAR技术,难以实现SAR方位向形变的高精度测量。与ASSI技术类似,BOI技术也可提取SAR方位向形变信息。BOI技术通过利用相邻Burst重叠区域的不同观测视角来测量SAR方位向形变,该技术在保持数据分辨率和信噪比的同时,避免了分谱处理带来的不利影响。此外,BOI技术的相邻区域公共带宽较大,可保证干涉图的相干性,使其形变测量精度接近传统InSAR技术。然而,BOI技术的覆盖

范围相对有限,通常只能获取研究区域的部分形变信息。综上所述,SAR分谱干涉技术在地形测绘和形变测量领域的应用仍存在一些局限性。

4.1.2 InSAR电离层误差校正精度

当前,RSSI和ASSI还常应用于InSAR电离层误差校正。然而,RSSI技术受当前SAR距离向带宽限制,其InSAR电离层误差校正的鲁棒性较低,从而放大高低频自带干涉图中的各种噪声,如相位解缠误差、残余斑点噪声等,导致估计的电离层相位屏不平滑。为克服这一问题,学者们通常采用强弱滤波结合的方式,对电离层相位屏进行滤波处理。这种处理方法可有效改善电离层相位屏的平滑性,但损失了数据分辨率,降低了电离层相位屏的估计精度。因此,RSSI技术一般仅对大尺度电离层误差敏感,严重影响其电离层误差校正性能。相比于RSSI技术,Re-RSSI和多子带RSSI技术在InSAR电离层误差校正方面精度更高,但前者鲁棒性仍有待增强,而后者效率较低,难以推广应用。与RSSI技术直接估计和校正InSAR电离层误差不同,ASSI技术需与InSAR相结合,通过构建方位向形变与InSAR相位沿SAR方位向相位梯度之间的线性关系,并利用离散积分运算估计InSAR电离层误差。但ASSI测量的方位向形变与电离层效应难以准确分离,导致线性模型参数和积分常数估计不准,进而降低InSAR电离层误差校正精度。此外,基于ASSI技术的InSAR电离层误差校正方法涉及积分,易造成累积误差。因此,基于ASSI技术的方位向偏移方法通常对中小空间尺度电离层误差敏感。综上,RSSI和ASSI技术在InSAR电离层误差校正方面的应用仍面临挑战,特别是单独使用其中任何一种方法均难以准确估计和校正不同空间尺度的InSAR电离层误差。

4.2 SAR分谱干涉测量展望

未来,星载SAR系统朝大带宽、多频率、多视角、多极化、星座化发展,如ALOS-4数据距离向带宽可达80 MHz,NISAR卫星设计为同时搭载S和L波段的双频SAR卫星,LT-1设计卫双星绕飞,女娲星座采用分布式多基线干涉雷达星座设计,RSSI和ASSI技术形变测量精度将有效提升,BOI技术形变覆盖范围可能显著增加。随着分谱干涉技术精度的提升,将推进其在滑坡、冰川、火山等大

梯度形变测量和多维形变估计的广泛应用。此外,新体制大带宽、多载频等星载 SAR 系统的发展和广泛应用,一方面将显著提高 RSSI 技术的鲁棒性,使其在 InSAR 电离层误差校正方面的精度得到极大提升;另一方面,多种 InSAR 电离层误差校正方法的融合将得到进一步优化和完善,如融合 RSSI 和 ASSI,以实现多尺度 InSAR 电离层误差的有效校正。此外,随着星载 SAR 数据的不断丰富以及人工智能技术的发展,联合 SAR 分谱干涉与人工智能技术进行高精度、多尺度 InSAR 电离层误差校正值得关注。并且,随着 SAR 星座组网观测技术的不断突破以及同步轨道卫星(如 LT-4)的发展,利用星载 SAR 数据生产覆盖全球的高时空分辨率大气产品,也是未来有待发展的研究方向。

5 结 论

以 RSSI、ASSI 和 BOI 为代表的 SAR 分谱干涉技术凭借其易进行相位解缠、对南北向形变敏感、可分离电离层误差等优势,在地形测绘、大梯度视线向形变测量、多维形变获取、电离层误差校正等方面发挥了重要作用,取得一系列成果,展现了巨大的应用潜力,极大地促进了 InSAR 技术的发展。同时, SAR 分谱干涉技术也面临诸多挑战,如 RSSI 和 ASSI 技术的形变测量和电离层误差校正精度受限于 SAR 系统参数(如距离向带宽、方位向脉冲重复频率),而 BOI 技术的覆盖范围十分有限。随着 SAR 技术的不断革新,星载 SAR 系统正朝大带宽、多视角、多频段、多极化、星座化等方向迈进, RSSI 和 ASSI 技术的形变测量和电离层误差校正精度有望进一步提升, BOI 技术获取的形变覆盖范围可能显著增加,形成联合 InSAR 和 SAR 分谱干涉的高精度多维形变监测技术体系,赋能广域地形测绘、地质灾害监测、以及全球环境变化评估等领域。

参考文献(References)

Arikawa Y, Saruwatari H, Hatooka Y and Suzuki S. 2014. ALOS-2 launch and early orbit operation result//Proceedings of the 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City: IEEE: 3406-3409 [DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947212]

Attema E P W. 1991. The active microwave instrument on-board the ERS-1 satellite. Proceedings of the IEEE, 79(6): 791-799 [DOI: 10.1109/5.90158]

Bamler R and Eineder M. 2004. Split band interferometry versus absolute ranging with wideband SAR systems//Proceedings of the 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage: IEEE: 980-984 [DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1368573]

Bamler R and Eineder M. 2005. Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2(2): 151-155 [DOI: 10.1109/LGRS.2004.843203]

Bartusch M, Bruens C, Quiroz A E N and Stettner S. 2021. HRWS: the upcoming German X-band spaceborne SAR mission//EUSAR 2021; 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Online: VDE: 1-4

Bechor N B D and Zebker H A. 2006. Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair. Geophysical Research Letters, 33(16): L16311 [DOI: 10.1029/2006GL026883]

Bianchessi N and Righini G. 2008. Planning and scheduling algorithms for the COSMO-SkyMed constellation. Aerospace Science and Technology, 12(7): 535-544 [DOI: 10.1016/j.ast.2008.01.001]

Brcic R, Eineder M and Bamler R. 2008. Absolute phase estimation from TerraSAR-X acquisitions using wideband interferometry//Proceedings of IEEE Radar Conference: 1-4

Brcic R, Eineder M and Bamler R. 2009. Interferometric absolute phase determination with TerraSAR-X wideband SAR data//Proceedings of the 2009 IEEE Radar Conference. Pasadena: IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/RADAR.2009.4977112]

Brcic R, Eineder M, Bamler R, Steinbrecher U, Schulze D, Metzger R, Papatianassiou K, Nagler T, Müller F and Süß M. 2010a. Delta-k wideband SAR interferometry for DEM generation and persistent scatterers using TerraSAR-X. ESA Special Publication, 2010, 677: 3

Brcic R, Parizzi A, Eineder M, Bamler R and Meyer F. 2010b. Estimation and compensation of ionospheric delay for SAR interferometry//Proceedings of the 2010b IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu: IEEE: 2908-2911 [DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5652231]

Brcic R, Parizzi A, Eineder M, Bamler R and Meyer F. 2011. Ionospheric effects in SAR interferometry: an analysis and comparison of methods for their estimation//Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver: IEEE: 1497-1500 [DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049351]

Buono A, Inserra G and Virelli M. 2024. Inland and coastal waterline extraction using Cosmo-SkyMed second generation SAR imagery//IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens: IEEE: 1051-1054 [DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10642001]

Caltagirone F, Capuzi A, Coletta A, De Luca G F, Scorzafava E, Leonardi R, Rivola S, Fagioli S, Angino G, Labbate M, Piemontese M, Zampolini Faustini E, Torre A, De Libero C and Esposito P G. 2014. The COSMO-SkyMed dual use earth observation program: development, qualification, and results of the commissioning of the overall constellation. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(7): 2754-2762 [DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2317287]

- Cimino J, Elachi C and Settle M. 1986. SIR-B-the second shuttle imaging radar experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(4): 445-452 [DOI: 10.1109/TGRS.1986.289658]
- Clemente C, Tonelli D, Lotti A, Rollo F, Ilioudis C, Riofrio S D, Biondi F, Tubaldi E, Macdonald M, Zonta D, Zavagli M, Costantini M, Minati F, Vecchioli F, Milillo P, Zimmermanns M, Imbembo E and Corvino M M. 2024. On micro-motion extraction from high resolution x-band SAR products//IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens: IEEE: 1182-1186 [DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10642825]
- Costantini M. 1998. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 813-821 [DOI: 10.1109/36.673674]
- Covello F, Battazza F, Coletta A, Lopinto E, Fiorentino C, Pietranera L, Valentini G and Zoffoli S. 2010. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth. *Journal of Geodynamics*, 49(3/4): 171-180 [DOI: 10.1016/j.jog.2010.01.001]
- Dobson M C, Pierce L E and Ulaby F T. 1996. Knowledge-based land-cover classification using ERS-1/JERS-1 SAR composites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(1): 83-99 [DOI: 10.1109/36.481896]
- Eineder M, Adam N, Brcic R, Yague-Martinez N and Fritz T. 2008. High bandwidth spotlight SAR interferometry with TerraSAR-X// *Proceedings of the 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Boston: IEEE: II-113-II-116 [DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4778940]
- Farquharson G, Castelletti D, De S, Stringham C, Yague N, Bes V C, Ryu J and Goncharenko Y. 2023. The new Capella space satellite generation: Acadia//IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE: 1513-1516 [DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10283030]
- Fattahi H, Simons M and Agram P. 2017. InSAR time-series estimation of the ionospheric phase delay: an extension of the split range-spectrum technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10): 5984-5996 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2718566]
- Ferretti A, Monti-Guarnieri A, Prati C, Rocca F and Massonnet D. 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*.
- Gabriel A K and Goldstein R M. 1988. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*, 9(5): 857-872 [DOI: 10.1080/01431168808954901]
- Goldstein R M, Zebker H A and Werner C L. 1988. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23(4): 713-720 [DOI: 10.1029/RS023i004p00713]
- Gomba G and De Zan F. 2017. Bayesian data combination for the estimation of ionospheric effects in SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(11): 6582-6593 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2730438]
- Gomba G, De Zan F and Parizzi A. 2016a. Ionospheric phase screen and ionospheric azimuth shift estimation combining the split-spectrum and multi-squint methods//*Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. Hamburg: IEEE: 1-4
- Gomba G, Parizzi A, De Zan F, Eineder M and Bamler R. 2016b. Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: the split-spectrum method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(3): 1446-1461 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2481079]
- Graham L C. 1974. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, 62(6): 763-768 [DOI: 10.1109/PROC.1974.9516]
- Grandin R, Klein E, Métois M and Vigny C. 2016. Three-dimensional displacement field of the 2015 M_w 8.3 Illapel earthquake (Chile) from across- and along-track Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical Research Letters*, 43(6): 2552-2561 [DOI: 10.1002/2016GL067954]
- Gray A L, Mattar K E and Sofko G. 2000. Influence of ionospheric electron density fluctuations on satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 27(10): 1451-1454 [DOI: 10.1029/2000GL000016]
- Hanssen R F. 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht: Springer [DOI: 10.1007/0-306-47633-9]
- Hashimoto M. 2020. Postseismic deformation following the 2016 Kumamoto earthquake detected by ALOS-2/PALSAR-2. *Earth, Planets and Space*, 72(1): 154 [DOI: 10.1186/s40623-020-01285-0]
- He L M, Wu L X, Liu S J, Wang Z, Su C and Liu S N. 2015. Mapping two-dimensional deformation field time-series of large slope by coupling DInSAR-SBAS with MAI-SBAS. *Remote Sensing*, 7(9): 12440-12458 [DOI: 10.3390/rs70912440]
- He P, Wen Y M, Xu C J and Chen Y G. 2019a. Complete three-dimensional near-field surface displacements from imaging geodesy techniques applied to the 2016 Kumamoto earthquake. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111321 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111321]
- He P, Wen Y M, Xu C J and Chen Y G. 2019b. High-quality three-dimensional displacement fields from new-generation SAR imagery: application to the 2017 Ezgeleh, Iran, earthquake. *Journal of Geodesy*, 93(4): 573-591 [DOI: 10.1007/s00190-018-1183-6]
- Henderson S T, Delgado F, Elliott J, Pritchard M E and Lundgren P R. 2017. Decelerating uplift at Lazufre volcanic center, Central Andes, from A.D. 2010 to 2016, and implications for geodetic models. *Geosphere*, 13(5): 1489-1505 [DOI: 10.1130/GES01441.1]
- Hu C, Li Y H, Dong X C, Wang R, Cui C and Zhang B. 2017. Three-dimensional deformation retrieval in geosynchronous SAR by multiple-aperture interferometry processing: theory and performance analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(11): 6150-6169 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2721554]
- Hu J, Li Z W, Ding X L, Zhu J J, Zhang L and Sun Q. 2014. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: a review. *Earth-Science Reviews*, 133: 1-17 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005]
- Hu J, Li Z W, Sun Q, Zhu J J and Ding X L. 2012. Three-dimensional surface displacements from InSAR and GPS measurements with variance component estimation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4): 754-758 [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2181154]
- Hu X, Bürgmann R, Schulz W H and Fielding E J. 2020. Four-dimen-

- sional surface motions of the Slumgullion landslide and quantification of hydrometeorological forcing. *Nature Communications*, 11(1): 2792 [DOI: 10.1038/s41467-020-16617-7]
- Iwata T, Ishida H and Osawa Y. 2008. Advanced Land Observing Satellite (ALOS): enabling technologies and platform performance// *Proceedings Volume 7106, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XII*. Cardiff: SPIE: 113-125 [DOI: 10.1117/12.801072]
- Ji Y F, Dong Z, Zhang Y S, Wang C, Hu C and Xu Z W. 2025. Transionospheric Synthetic Aperture Radar Observation: a comprehensive review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 13(2): 273-313 [DOI: 10.1109/MGRS.2024.3454635]
- Jiang H J, Feng G C, Wang T and Bürgmann R. 2017. Toward full exploitation of coherent and incoherent information in Sentinel-1 TOPS data for retrieving surface displacement: application to the 2016 Kumamoto (Japan) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 44(4): 1758-1767 [DOI: 10.1002/2016GL072253]
- Jo M J, Jung H S, Won J S, Poland M P, Miklius A and Lu Z. 2015. Measurement of slow-moving along-track displacement from an efficient multiple-aperture SAR interferometry (MAI) stacking. *Journal of Geodesy*, 89(5): 411-425 [DOI: 10.1007/s00190-014-0786-9]
- Jordan R L, Huneycutt B L and Werner M. 1995. The SIR-C/X-SAR synthetic aperture radar system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4): 829-839 [DOI: 10.1109/36.406669]
- Jung H S, Lee D T, Lu Z and Won J S. 2013. Ionospheric correction of SAR interferograms by multiple-aperture interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5): 3191-3199 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2218660]
- Jung H S and Lee W J. 2015. An Improvement of ionospheric phase correction by multiple-aperture interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(9): 4952-4960 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2413948]
- Jung H S, Lee W J and Zhang L. 2014. Theoretical accuracy of along-track displacement measurements from multiple-aperture interferometry (MAI). *Sensors*, 14(9): 17703-17724 [DOI: 10.3390/s140917703]
- Jung H S, Lu Z, Won J S, Poland M P and Miklius A. 2011. Mapping three-dimensional surface deformation by combining multiple-aperture interferometry and conventional interferometry: application to the June 2007 Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(1): 34-38 [DOI: 10.1109/LGRS.2010.2051793]
- Jung H S, Won J S and Kim S W. 2009. An improvement of the performance of multiple-aperture SAR interferometry (MAI). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8): 2859-2869 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2016554]
- Kankaku Y, Suzuki S and Osawa Y. 2013. ALOS-2 mission and development status//*Proceedings of the 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Melbourne: IEEE: 2396-2399 [DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6723302]
- Kawasaki T, Miyawaki M, Kimura T, Hebiishi K and Ogawa T. 2019. Powerful situation awareness using high resolution optical satellites 'ASNA-RO-1' and radar satellites 'ASNARO-2'//*IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Yokohama: IEEE: 3408-3411 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8899038]
- Kellogg K, Hoffman P, Standley S, Shaffer S, Rosen P, Edelstein W, Dunn C, Baker C, Barela P, Shen Y, Guerrero A M, Xaypraseuth P, Sagi V R, Sreekantha C V, Harinath N, Kumar R, Bhan R and Sarma C V H S. 2020. NASA-ISRO synthetic aperture radar (NISAR) mission//*Proceedings of the 2020 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky: IEEE: 1-21 [DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172638]
- Lee E, Hong S, Choi Y, Yoo S and Sohn H G. 2022. Error budget analysis of geocoding and geometric correction for KOMPSAT-5 SAR imagery. *GIScience and Remote Sensing*, 59(1): 1938-1955 [DOI: 10.1080/15481603.2022.2142669]
- Le Toan T, Quegan S, Davidson M W J, Balzter H, Paillou P, Papathanassiou K, Plummer S, Rocca F, Saatchi S, Shugar H and Ulander L. 2011. The BIOMASS mission: mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote sensing of environment*, 115(11): 2850-2860 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.020]
- Li T, Tang X M, Zhou X Q, Zhang X, Li S J and Gao X M. 2022. Deformation products of Lutan-1 (Lt-1) SAR satellite constellation for geohazard monitoring//*Proceedings of the 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Kuala Lumpur: IEEE: 7543-7546 [DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883601]
- Li X, Jónsson S and Cao Y M. 2021. Interseismic deformation from sentinel-1 burst-overlap interferometry: application to the southern Dead Sea fault. *Geophysical Research Letters*, 48(16): e2021GL093481 [DOI: 10.1029/2021GL093481]
- Liang C R and Fielding E J. 2017. Measuring azimuth deformation with L-band ALOS-2 scanSAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(5): 2725-2738 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2653186]
- Liang C R, Fielding E J, Liu Z, Motohka T, Natsuaki R and Yun S H. 2024. An analysis of the potentials of L-band SAR satellites for measuring azimuth motion. *Remote Sensing of Environment*, 315: 114426 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114426]
- Liao H M. 2018. Ionospheric Correction of Interferometric SAR Data with Application to the Cryospheric Sciences. Fairbanks: University of Alaska Fairbanks
- Liao H M, Meyer F J, Scheuchl B, Mouginito J, Joughin I and Rignot E. 2018. Ionospheric correction of InSAR data for accurate ice velocity measurement at polar regions. *Remote Sensing of Environment*, 209: 166-180 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.048]
- Libert L, Derauw D, D'Oreye N, Barbier C and Orban A. 2017. Split-band interferometry-assisted phase unwrapping for the phase ambiguities correction. *Remote Sensing*, 9(9): 879 [DOI: 10.3390/rs9090879]
- Libert L, Derauw D, D'Oreye N, Orban A and Barbier C. 2018. On the characterization of frequency-persistent scatterers in split-band interferometry//*Proceedings of the 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Valencia: IEEE: 1332-1335 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517462]
- Liu G X, Chen Q, Luo X J and Cai G L. 2019. *InSAR Principles and Applications*. Beijing: Science Press (刘国祥, 陈强, 罗小军, 蔡国林. 2019. *InSAR原理与应用*. 北京: 科学出版社)
- Liu J H, Hu J, Xu W B, Li Z W, Zhu J J, Ding X L and Zhang L. 2019.

- Complete three-dimensional coseismic deformation field of the 2016 central Tottori earthquake by integrating left- and right-looking InSAR observations with the improved SM-VCE method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(11): 12099-12115 [DOI: 10.1029/2018JB017159]
- Liu X J, Zhao C Y, Zhang Q, Yin Y P, Lu Z, Samsonov S, Yang C S, Wang M and Tomás R. 2021. Three-dimensional and long-term landslide displacement estimation by fusing C- and L-band SAR observations: a case study in Gongjue County, Tibet, China. *Remote Sensing of Environment*, 267: 112745 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112745]
- Luo H B, Li Z H, Chen J J, Pearson C, Wang M M, Lv W C and Ding H Y. 2019. Integration of range split spectrum interferometry and conventional InSAR to monitor large gradient surface displacements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74: 130-137 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.09.004]
- Madsen S N and Zebker H A. 1992. Automated absolute phase retrieval in across-track interferometry//Proceedings of the 1992 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Houston: IEEE: 1582-1584 [DOI: 10.1109/IGARSS.1992.578639]
- Madsen S N, Zebker H A and Martin J. 1993. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(1): 246-256 [DOI: 10.1109/36.210464]
- Magen Y, Baer G, Ziv A, Inbal A, Nof R N, Hamiel Y, Piatibratova O and Gürbüz G. 2024. Fault coalescence, slip distribution, and stress drop of the February 2023 southeast Türkiye earthquakes from joint inversion of SAR, GNSS, and burst overlap interferometry. *Seismological Research Letters*, 95(2A): 680-696 [DOI: 10.1785/0220230271]
- Mao W F, Liu G X, Wang X W, Xie Y K, He X X, Zhang B, Xiang W, Wu S Y, Zhang R, Fu Y and Pirasteh S. 2022a. Using range split-spectrum interferometry to reduce phase unwrapping errors for InSAR-derived DEM in large gradient region. *Remote Sensing*, 14(11): 2607 [DOI: 10.3390/rs14112607]
- Mao W F, Liu G X, Wang X W, Zhang R, Xiang W, Wu S Y, Zhang B, Bao J W, Cai J L and Pirasteh S. 2021. An InSAR ionospheric correction method based on variance component estimation with integration of MAI and RSS measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 1423-1433 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3045267].
- Mao W F, Wang X W, Liu G X, Pirasteh S, Zhang R, Lin H, Xie Y K, Xiang W, Ma Z F and Ma P F. 2023. Time series InSAR ionospheric delay estimation, correction, and ground deformation monitoring with reformulating range split-spectrum interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 5213118 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3298919]
- Mao W F, Wang X W, Liu G X, Zhang R, Shi Y L and Pirasteh S. 2022b. Estimation and compensation of ionospheric phase delay for multi-aperture InSAR: an azimuth split-spectrum interferometry approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5209414 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3095272]
- Michel R, Avouac J P and Taboury J. 1999. Measuring ground displacements from SAR amplitude images: application to the Landers earthquake. *Geophysical Research Letters*, 26(7): 875-878 [DOI: 10.1029/1999GL900138]
- Moreira A, Krieger G, Hajnsek I, Papatthassiou K, Younis M, Lopez-Dekker P, Huber S, Villano M, Pardini M, Eineder M, De Zan F and Parizzi A. 2015. Tandem-L: a highly innovative bistatic SAR mission for global observation of dynamic processes on the Earth's surface. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(2): 8-23 [DOI: 10.1109/MGRS.2015.2437353]
- Motohka T, Kankaku Y, Miura S and Suzuki S. 2019. ALOS-4 L-band SAR mission and observation//Proceedings of the 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE: 5271-5273 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898169]
- Motohka T, Kankaku Y, Miura S and Suzuki S. 2021. Overview of ALOS-2 and ALOS-4 L-band SAR//Proceedings of the 2021 IEEE Radar Conference. Atlanta: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/Radar-Conf2147009.2021.9454977]
- Mou J W, Wang Y, Fu X K, Guo S B, Lu J F, Yang R Y, Ma X F and Hong J. 2024. Initial results of geometric calibration of interferometric cartwheel SAR HT-1//IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens: IEEE: 8886-8890 [DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10640430]
- Munoz J M C, Rodriguez M G, Vazquez N C, Revenga P C, Martinez N G, Bonilla M J G, Martinez N A and Carrasco E V. 2024. PAZ mission after 5 years: calibration status//EUSAR 2024; 15th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Munich: VDE: 1123-1126
- Nergizci M, Lazecky M, Ou Q, Wright T and Hooper A. 2024. Along-track displacement of Mw 7.8 and 7.6 Kahramanmaraş earthquakes from sentinel-1 offset tracking and burst overlap interferometry. *Procedia Computer Science*, 239: 2135-2141 [DOI: 10.1016/j.procs.2024.06.401]
- Newhouse V L, Bilgutay N M, Saniie J and Furgason E S. 1982. Flaw-to-grain echo enhancement by split-spectrum processing. *Ultrasonics*, 20(2): 59-68 [DOI: 10.1016/0041-624X(82)90003-8]
- Palomeque M, Ferreyra J and Thibeault M. 2025. Monitoring results of the SAOCOM-1 constellation: a mission overview and summary of results. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 13(2): 49-57 [DOI: 10.1109/MGRS.2024.3475228]
- Pepe A, Mastro P, Falabella F and Calò F. 2023. Synthetic aperture radar burst overlapped interferometry (BOI) and multiple aperture interferometry (MAI) for the analysis of large ground instabilities: experiments in mining and volcanic sites//Proceedings of the 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena: IEEE: 1956-1959 [DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10281965]
- Pepe A, Sansosti E, Bernardino P and Lanari R. 2005. On the generation of ERS/ENVISAT DInSAR time-series via the SBAS technique. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(3): 265-269 [DOI: 10.1109/LGRS.2005.848497]
- Perski Z. 1998. Applicability of ERS-1 and ERS-2 InSAR for land subsidence monitoring in the Silesian coal mining region, Poland. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(7): 555-558

- Potin P, Rosich B, Miranda N and Grimont P. 2016. Sentinel-1 mission status. *Procedia Computer Science*, 100: 1297-1304 [DOI: 10.1016/j.procs.2016.09.245]
- Riendeau S and Grenier C. 2007. RADARSAT-2 antenna//Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference. *Big Sky: IEEE*: 1-9 [DOI: 10.1109/AERO.2007.352861]
- Rignot E J M and Van Zyl J J. 1993. Change detection techniques for ERS-1 SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(4): 896-906 [DOI: 10.1109/36.239913]
- Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, Li F K, Madsen S N, Rodriguez E and Goldstein R M. 2000. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3): 333-382 [DOI: 10.1109/5.838084]
- Rosenqvist A, Parker A, Zhou Z S, Brindle L and Held A. 2020. First assessment of NovaSAR-1 S-band SAR backscatter characteristics over tropical wetlands//IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. *Waikoloa: IEEE*: 5065-5068 [DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324143]
- Shi X G, Jiang H J, Zhang L and Liao M S. 2017. Landslide displacement monitoring with split-bandwidth interferometry: a case study of the shuping landslide in the three gorges area. *Remote Sensing*, 9(9): 937 [DOI: 10.3390/rs9090937]
- Strozzi T, Farina P, Corsini A, Ambrosi C, Thüring M, Zilger J, Wiesmann A, Wegmüller U and Werner C. 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 2(3): 193-201 [DOI: 10.1007/s10346-005-0003-2]
- Thompson T W, Weissman D E and Gonzalez F I. 1983. L band radar backscatter dependence upon surface wind stress: a summary of new SEASAT-1 and aircraft observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 88(C3): 1727-1735 [DOI: 10.1029/JC088iC03p01727]
- Van Zyl J J. 2001. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 48(5/12): 559-565 [DOI: 10.1016/S0094-5765(01)00020-0]
- Wackerman C C, Friedman K S, Pichel W G, Clemente-Colón P and Li X. 2001. Automatic detection of ships in RADARSAT-1 SAR imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(5): 568-577 [DOI: 10.1080/07038992.2001.10854896]
- Wang C, Zhang H, Liu Z. 2002. *Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry*. Beijing: Science Press (王超, 张红, 刘智. 2002. 星载合成孔径雷达干涉测量. 北京: 科学出版社)
- Wang X W. 2017. *Ionospheric Error Correction and Three-Dimensional Coseismic Deformation Estimation and Fault Slip Inversion with InSAR and MAI*. Chengdu: Southwest Jiaotong University (王晓文. 2017. 基于InSAR和MAI的电离层误差校正及同震三维形变场计算与断层滑动反演. 成都: 西南交通大学)
- Wegmüller U, Strozzi T and Werner C. 2012. Ionospheric path delay estimation using split-beam interferometry//Proceedings of the 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. *Munich: IEEE*: 3631-3634 [DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6350630]
- Wegmüller U, Werner C, Frey O, Magnard C and Strozzi T. 2018. Reformulating the split-spectrum method to facilitate the estimation and compensation of the ionospheric phase in SAR interferograms. *Procedia Computer Science*, 138: 318-325 [DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.045]
- Werninghaus R and Buckreuss S. 2010. The TerraSAR-X mission and system design. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2): 606-614 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2031062]
- Yu H W, Lee H, Yuan T and Cao N. 2018. A novel method for deformation estimation based on multibaseline InSAR phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(9): 5231-5243 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2812769]
- Yu L. 2016. Sub-band interferometry technique based on high-resolution SAR data and its application in coseismic deformation field studies. *Recent Developments in World Seismology*, (8): 45-47 (庾露. 2016. 基于高分辨率SAR数据的子带干涉测量技术及其在地震同震形变场中的应用研究. 国际地震动态, (8): 45-47) [DOI: 10.3969/j.issn.0235-4975.2016.08.012]
- Yu L, Shan X J, Song X G and Qu C Y. 2016. Deformation of the 2013 Pakistan $M_w 7.7$ earthquake derived from sub-band InSAR. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(4): 1371-1382 (庾露, 单新建, 宋小刚, 屈春燕. 2016. 基于子带干涉测量技术的巴基斯坦地震形变获取研究. 地球物理学报, 59(4): 1371-1382) [DOI: 10.6038/cjg20160418]
- Yu W D, Yang R L, Deng Y K, Zhao F J and Lei H. 2014. The load design and implementation of HJ-1-C space-borne SAR. *Journal of Radars*, 3(3): 256-265 (禹卫东, 杨汝良, 邓云凯, 赵凤军, 雷宏. 2014. HJ-1-C 卫星合成孔径雷达载荷的设计与实现. 雷达学报, 3(3): 256-265) [DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14020]
- Yu W D, Yang R L, Deng Y K, Zhao F J and Lei H. 2014. The load design and implementation of HJ-1-C space-borne SAR. *Journal of Radars*, 3(3): 256-265 (禹卫东, 杨汝良, 邓云凯, 赵凤军, 雷宏. 2014. HJ-1-C 卫星合成孔径雷达载荷的设计与实现. 雷达学报, 3(3): 256-265) [DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14020]
- Zebker H A and Goldstein R M. 1986. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B5): 4993-4999 [DOI: 10.1029/JB091iB05p04993]
- Zhang G, Wang S Y, Chen Z W, Zheng Y Z, Zhao R S, Wang T Y, Zhu Y, Yuan X Z, Wu W and Chen W T. 2024. Development of China's spaceborne SAR satellite, processing strategy, and application: take Gaofen-3 series as an example. *Geo-Spatial Information Science*, 27(1): 221-236 [DOI: 10.1080/10095020.2022.2124129]
- Zhang J F, Li Y S, Luo Y and Zhang Q Y. 2020. *Interferometric Synthetic Aperture Radar and Seismic Applications*. Beijing: Tsinghua University Press (张景发, 李永生, 罗毅, 张庆云. 2020. 干涉雷达测量技术及地震应用. 北京: 清华大学出版社)
- Zhang Q J. 2017. System design and key technologies of the GF-3 satellite. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(3): 269-277 (张庆君. 2017. 高分三号卫星总体设计与关键技术. 测绘学报, 46(3): 269-277) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170049]
- Zhu J J, Li Z W and Hu J. 2017. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1717-1733 (朱建军, 李志伟, 胡俊. 2017. In-

SAR变形监测方法与研究进展. 测绘学报, 46(10): 1717-1733
[DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170350]
Zink M, Bachmann M, Brautigam B, Fritz T, Hajnsek I, Moreira A,

Wessel B and Krieger G. 2014. TanDEM-X: the new global DEM takes shape. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2(2): 8-23 [DOI: 10.1109/MGRS.2014.2318895]

Synthetic Aperture Radar Split-Spectrum Interferometry: Principles, applications, and prospects

WANG Xiaowen, MAO Wenfei, ZHANG Rui, LIU Guoxiang

Faculty of Geoscience and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: Interferometric synthetic aperture radar (InSAR), as an all-weather and 24-hour operational spaceborne remote sensing technology, has been widely utilized in applications such as terrain reconstruction, surface deformation detection, and geophysical parameter inversion. As an extension of traditional InSAR technology, SAR split-spectrum interferometry techniques (including SAR range split-spectrum interferometry, azimuth split-spectrum interferometry, and TOPS mode burst overlap interferometry) have shown significant potential in fields such as interferometric phase unwrapping, three-dimensional surface deformation extraction, and ionospheric error correction in recent years. This study aims to provide a comprehensive overview of the development status of satellite-borne SAR split-spectrum interferometry techniques, with a particular emphasis on their principles and data processing methodologies. A total of 112 scientific papers published between 1992 and 2024, focusing specifically on the topic of split-spectrum interferometry, were reviewed. The review content was organized into four main parts: SAR sensors, current research progress in SAR split-spectrum interferometry, applications and advancements of SAR split-spectrum interferometry, and challenges and future perspectives of SAR split-spectrum interferometry. The paper offers a comprehensive summary and insights into the development of split-spectrum interferometry through analysis. First, this study summarizes the current SAR satellites, including commercial platforms. Then, it introduces the fundamental principles of SAR split-spectrum interferometry and systematically reviews its latest advancements in areas such as high-precision terrain mapping, surface deformation monitoring in regions with steep gradients, multidimensional surface deformation extraction, and ionospheric error correction within InSAR frameworks. Additionally, the study explores optimal parameter configuration schemes for high-precision surface deformation monitoring using SAR split-spectrum interferometry. Future trends in the development of this technology are also outlined in this paper. Continuous innovations in SAR technology enable the advancement of satellite-borne SAR systems toward broad bandwidths, multiangle observations, multifrequency capabilities, diverse polarizations, and satellite constellations. Techniques such as range split-spectrum interferometry and azimuth split-spectrum interferometry are expected to enhance accuracy in deformation measurements and ionospheric error correction, whereas burst overlap interferometry may significantly enhance the spatial coverage of deformation monitoring. Ultimately, these advancements are poised to establish a high-precision, multidimensional deformation monitoring system that integrates InSAR with SAR split-spectrum interferometry, thereby driving innovations in large-scale terrain mapping, geological hazard monitoring, and global environmental change assessments.

Key words: InSAR, SAR interferometry, split-Spectrum interferometry, multiple-aperture InSAR, ionospheric correction, ground deformation, topography mapping

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42401535, 42371458, U22A20565); Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2024NSFJQ0040)