

超长基线星载干涉SAR概念与体制

王祎笛^{①②} 王宇^{*①②} 张云俊^{①②} 梁达^② 蔡永华^② 吴一戎^{①②}

^①(中国科学院空天信息创新研究院微波成像国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘要: 星载干涉合成孔径雷达(InSAR)技术通过测量雷达视线方向的相位差实现地表高程测量与形变监测。然而,面向未来更高精度的干涉测量需求,InSAR系统设计参数与测量精度的解析模型仍存在关键参数不完备、物理约束刻画不充分等问题,对下一代合成孔径雷达干涉测量技术的发展形成制约。该文针对系统设计参数和测量精度间存在的复杂多因素耦合问题开展研究,详细分析了空间、时间基线星载干涉合成孔径雷达成像理论约束关系,构建了融合多源失相干的空-时误差模型,量化了基线参数与测量精度的非线性关系,建立了涵盖相干性、高程精度、基于相干时间基线的形变灵敏度等关键指标的完备评估框架,在此基础上提出了超长基线星载InSAR的概念与体制。同时,对超长基线星载InSAR的性能进行了详细分析,阐述了超长基线星载InSAR在轨道设计、系统设计、同步方法、误差校正以及相位解缠等方面的技术挑战,介绍了超长基线星载InSAR在高精度高程测量与形变测量以及分布式SAR系统等方面的应用潜力,可为未来新一代高精度、多维度InSAR系统设计提供理论支撑,在地球科学前沿探索与国家重大工程安全保障中发挥更大价值。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 超长基线; 高精度高程测量; 高精度形变测量; 系统设计

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)01-0001-24

DOI: 10.12000/JR25220

CSTR: 32380.14.J25220

引用格式: 王祎笛, 王宇, 张云俊, 等. 超长基线星载干涉SAR概念与体制[J]. 雷达学报(中英文), 2026, 15(1): 1–24. doi: 10.12000/JR25220.

Reference format: WANG Yidi, WANG Robert, ZHANG Yunjun, *et al.* The concept and system of very large baseline spaceborne interferometric synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2026, 15(1): 1–24. doi: 10.12000/JR25220.

The Concept and System of Very Large Baseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar

WANG Yidi^{①②} WANG Robert^{*①②} ZHANG Yunjun^{①②} LIANG Da^②
CAI Yonghua^② WU Yirong^{①②}

^①(National Key Laboratory of Microwave Imaging, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) enables surface elevation measurement and deformation monitoring by measuring phase differences along the radar line of sight. However, meeting the future demand for higher-precision measurements remains challenging: analytical models linking InSAR system

收稿日期: 2025-11-03; 改回日期: 2026-01-01; 网络出版: 2026-01-15

*通信作者: 王宇 yuwang@mail.ie.ac.cn

*Corresponding Author: WANG Robert, yuwang@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62495030, 62421001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62495030, 62421001)

责任主编: 陈杰 Corresponding Editor: CHEN Jie

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

design parameters to measurement accuracy are still limited by incomplete key parameters and insufficient or unclear physical constraints. These limitations restrict the development of next-generation InSAR technology. This study examines the complex multifactor coupling between system design parameters and measurement accuracy. It provides a detailed analysis of the imaging mechanism and theoretical constraints of spaceborne InSAR with spatial and temporal baselines and presents a spatiotemporal error model integrating multisource decorrelation. The nonlinear relationship between baseline parameters and measurement accuracy is quantitatively characterized, and a comprehensive evaluation framework is established based on key indicators such as coherence, elevation accuracy, and coherent temporal baseline-based deformation sensitivity. Built on top of these analysis, the concept and system architecture of very large baseline spaceborne InSAR are proposed, and its performance is analyzed in detail. The associated technical challenges—including orbit configuration, system design, synchronization, error correction, and phase unwrapping—are systematically discussed. Potential applications of this type of InSAR system architecture in high-precision elevation, deformation measurements, and distributed SAR systems are introduced. The proposed framework provides theoretical support for the design of next-generation high-precision, multidimensional InSAR systems and is expected to play a key role in the frontier of Earth science exploration and the safety assurance of major national engineering projects.

Key words: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR); Very large baseline; High-precision elevation measurement; High-precision deformation measurement; System design

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种主动式微波遥感技术,凭借其独特的全天时、全天候、全球尺度成像能力,历经数十载发展演进,已广泛应用于环境监测、灾害评估、地形测绘、军事侦察等诸多领域^[1-4]。

干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)是一种基于微波相干性原理的空间对地观测技术^[5],其通过精确配准同一区域、具有特定空间或时间基线的两景(或多景)复图像,解算干涉相位差,并依此反演地表目标的高程或动态形变信息。干涉概念的起源可追溯至17~19世纪光学领域的突破性发现,其本质是波的相干叠加——当两列相干波相遇时,空间会形成稳定的强弱相间的干涉条纹,这一原理从光学的实验验证逐步拓展至整个波动物理学。空间基线与时间基线是InSAR的两个基本要素。从物理概念上讲,空间基线是指两个雷达天线等效相位中心在空间中的物理分离距离及其方向;时间基线是指同一雷达观测平台对同一目标区域进行两次重复观测时,两组相干观测数据之间的时间跨度。从基线获取方式上讲,空间基线可利用卫星编队飞行或单星多天线同步观测形成^[6,7],用于生成米级甚至亚米级精度的数字高程模型,为地形测绘、冰川动态监测提供关键数据支撑;时间基线可依托单颗或多颗卫星对同一区域周期性严格回归重访形成,用于测量地表缓慢形变,为地质灾害与基础设施监测提供关键信息^[8-10]。InSAR技术在地形测绘、地表形变与冰川

运动监测等方面表现出高分辨率、高精度、高效率、大区域、非接触式、动态监测与连续空间覆盖等显著特点^[11,12],具有测量技术无法比拟的突出优势,是地球科学研究与国家重大工程建设中难以替代的核心手段,因此InSAR技术已经成为目前发展迅速、极具潜力的对地观测新技术之一。自从20世纪80年代以来,InSAR技术已取得了令人瞩目的研究进展,然而其在观测体制与信号处理方面也面临一系列新的技术挑战。

空间基线方面,现有InSAR双/多基体制下,空间基线的设计对高程测量精度的限制越来越凸显。早在20世纪90年代,Zebker等人^[13]就提出“临界基线”概念,构建的理论模型指出,当SAR复图像对的垂直基线处于临界基线范围内时可实现干涉测量,超出后图像完全失相干。Roson等人^[14]进一步指出,更长的空间基线理论上能提升地形地貌刻画的精细度,并提出将基线长度控制在临界基线10%以内以抑制空间失相干的经验规则^[15]。然而随着研究的深入,Chang等人^[16]发现,垂直基线接近临界值时,干涉相位失相干严重,不仅高程反演误差陡增,甚至可能导致数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)解算失败,由此提出垂直基线不能达到临界基线。后续,Krieger等人^[17-19]提到,实际TanDEM-X卫星编队在全球DEM采集任务中基线仅为临界值的5%。然而,这些研究多依赖工程经验,未从相位误差传播机理本质出发,建立严格数学描述,导致现有体制下,无法精确界定“临界有效基线”的理论边界,空间基线延长到何

种程度会触发失相干主导权的转移，使得空间基线的理论潜力难以充分发挥。

时间基线方面，尽管长时间基线可实现对微弱形变信号的精细观测，有效提高形变测量精度，但是不容忽视的是，在长时间基线内，需要保持高相干性，才能避免因相干性下降带来的形变测量精度损失。因此，在系统参数与地物类型存在复杂耦合作用下如何调整系统设计参数获得最长时间基线成为亟待解决的难题之一。研究学者对此进行了一系列研究，例如Rocca^[20]建立时间失相干统计模型，揭示雷达频段、地物散射特性对相干性的影响；Parizzi等人^[21]对比L, C, X波段数据，发现不同频段时间失相干基线差异显著，如L波段时间基线容忍度远高于X波段；Horst等人^[22]研究指出，重复周期、传感器极化多样性等系统参数，与农田、森林、裸土等地物相干特性耦合^[23]，直接影响高相干时间基线跨度，进而影响形变速率测量精度。从上述研究可见，目前缺乏基于相位误差传播理论的推导与模型约束，未能建立兼顾系统参数、时间基线和形变速率测量精度的解析关系。这直接导致干涉体制设计中，系统参数调整陷入“经验试错”模式，无法判断参数提升是否适配场景需求，也难以解决如何搭配参数以突破时间基线制约、最优化形变测量精度。

在地球科学、地形测绘、环境监测等研究对全球高精度DEM的构建和毫米级乃至亚毫米级形变测量的需求持续攀升背景下，现有InSAR体制在空间基线、时间基线、多维度观测的理论与技术短板，已成为制约其向更高精度、更多维度拓展的瓶颈。鉴于此，本文对空间、时间基线干涉合成孔径雷达成像体制与理论约束展开研究，围绕超长基线干涉机理，建立多源失相干误差耦合模型，并进行数值仿真，明确了空间基线、时间基线的理论边界。在上述研究的基础上，提出了星载超长基线InSAR的概念(图1)，对星载超长基线InSAR的性能进行了详细分析，阐述了星载超长基线InSAR在轨道设计与控制、提高系统灵敏度、高精度相位同步、大气传输误差校正以及相位解缠等方面的技术挑战，最后介绍了星载超长基线InSAR在高精度高程测量与形变测量以及分布式SAR系统等方面的应用潜力，预期为新一代高精度、全维度InSAR系统设计与研发提供理论支撑，在地球科学前沿探索与国家重大工程安全保障中发挥更大价值。

2 超长基线InSAR模型

2.1 基于临界有效空间基线解析方程的EBF分类模型

在分析空间基线对干涉SAR高程测量的影响

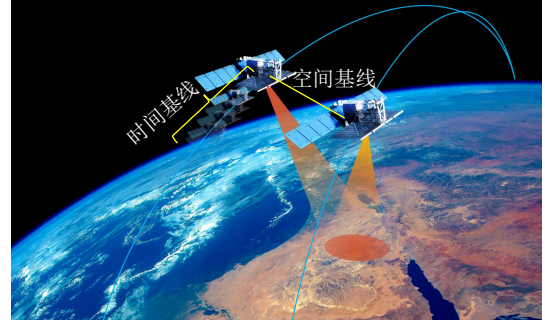


图1 超长基线合成孔径雷达干涉测量

Fig. 1 Very large baseline synthetic aperture radar interferometry

时，通常将基线分为垂直基线和平行基线。垂直基线定义为基线垂直于雷达波束视线方向的分量；平行基线定义为基线平行于雷达波束视线方向的分量。为了将空间基线参数与高程测量精度的关系进行精确表征，定义有效基线因子(Effective Baseline Factor, EBF)的概念：

$$\Omega = B_{\perp} / B_{\perp}^c \quad (1)$$

其中， $B_{\perp}$ 代表垂直基线长度， $B_{\perp}^c$ 为临界基线长度。在双基干涉合成孔径雷达系统中，临界基线表示为

$$B_{\perp}^c = \frac{2B_{rg}\lambda r \tan(\theta - \tau)}{c} \quad (2)$$

其中， B_{rg} 为距离向带宽， θ 为当地入射角， τ 为当地坡度角， c 为电磁波在真空中的传播速度， λ 为波长， r 为主星斜距。

在干涉合成孔径雷达系统中，高程测量精度主要由干涉相位测量误差决定^[24]。本文在单独分析相位误差对高程误差的贡献时，暂不考虑基线测量偏差的影响。同时，本文主要分析高程测量的灵敏度与垂直基线之间的关系，区别于实际反演过程中求解高程时的各种误差因素，故暂不考虑平行基线测量误差、大气误差等因素的影响。在双基干涉合成孔径雷达系统中，高程精度与EBF的关系为

$$\sigma_h = \frac{c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{rg} \cdot \Omega} \cdot \sigma_{\phi} \quad (3)$$

其中， σ_h 为高程精度， σ_{ϕ} 为相位测量误差。本文主要考虑空时失相干引起的干涉相位误差 σ_{dec} 。失相干误差 σ_{dec} 由两部分构成：与基线相关的失相干(体散射、基线失相干)和与基线无关的失相干(热噪声、量化噪声、多普勒、旁瓣、配准误差及模糊失相干)^[25-28]，以EBF为自变量构建失相干误差表达式^[29-32]，具体为

$$\sigma_{dec} = \sqrt{\frac{1 - f^2(\Omega)}{2L f^2(\Omega)}} \quad (4)$$

$$f(\Omega) = \gamma_{\text{other}} \cdot \left(\frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{e^{P_1 h_v} - 1}{e^{P_0 h_v} - 1} \right) \cdot (1 - \Omega) \quad (5)$$

其中, $P_0 = \frac{2\beta}{\cos \theta}$, $P_1 = \frac{j4\pi B_{\text{rg}} \cos(\theta - \tau)}{c \sin \theta} \cdot \Omega + \frac{2\beta}{\cos \theta}$, h_v 为植被高度, γ_{other} 为与基线无关的失相干大小, β 为电磁波与植被单程作用消光系数, L 为多视系数。

综合式(1)—式(5), 构建以EBF为自变量的临

$$g(\Omega) = \frac{\gamma_{\text{other}} \cdot \left[\frac{j \cos(\theta - \tau)}{F \tan(\theta - \tau)} \cdot \left(\frac{(P_0 P_1^2 - P_0) e^{P_1 h_v} + 1}{P_1^2 (e^{P_0 h_v} - 1)} \right) \cdot (1 - \Omega) - \left(\frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{e^{P_1 h_v} - 1}{e^{P_0 h_v} - 1} \right) \right]}{2L^3 f^3(\Omega)}$$

基于上述分析, 高程精度随EBF的变化趋势如图2中蓝色曲线所示, 高程误差变化率随EBF的变化趋势如橙色曲线所示。受驻定相位原理启发, 将系统调制效应的平衡临界点称为驻留点, 用于描述非线性系统动态规律。引入驻留点量化高程精度随基线变化的临界转换机制, 以此解析InSAR系统中基线参数与高程精度的动态关联特性。在高程精度-空间基线模型中, 驻留点被定义为高程误差变化率为零的特征点。在图2中, 黑色虚线与圆点为驻留点位置。由于驻留点是误差演化的平衡临界点且对应精度最优状态, 故将其定义为“临界有效基线”, 作为高程误差随EBF变化的本质分界点。当有效基线因子从低到临界有效基线再到高变化时, 高程误差呈现先减后增的非线性变化。临界有效基线具有3层物理含义: 一是高程误差收敛至全局最小值(精度最高)的理论边界点; 二是基线增益与失相干损耗的平衡临界点, 标志着误差主导因素的本质转变; 三是InSAR系统精度调控的拐点, 提供了量化基线参数的最优阈值。临界有效基线揭示了InSAR系统中“基线长度-相干性-高程精度”的多因素内在耦合机理, 为基线优化设计与高程精度控制提供了坚实的理论基础。

图3(a)—图3(d)分别考虑入射角、地形坡度角、与基线无关的失相干、体散射参数(消光系数、散

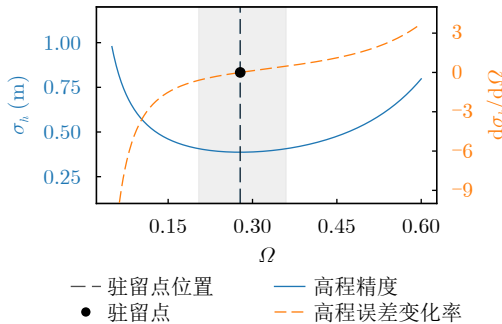


图2 临界有效基线解析方程(灰色阴影区为5%相对误差邻域)

Fig. 2 Analytical equation for critical effective baseline (the gray shaded area denotes the 5% relative error neighborhood)

界有效基线解析方程(推导过程详见附录), 描述高程精度随空间基线变化的动态规律, 其表达式为

$$\frac{d\sigma_h}{d\Omega} = \frac{-F}{\Omega} \cdot \left(\frac{\sigma_\phi}{\Omega} + \frac{g(\Omega)}{\sigma_\phi} \right) \quad (6)$$

其中, $F = \frac{c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}}}$ 为与系统参数相关的常数, $g(\Omega)$ 是以EBF为约束的失相干误差函数, 表示为

射体高度)对临界有效基线的影响, 不同参数情况下临界有效基线方程的单调性保持一致, 驻留点位置发生变化。设定以临界有效基线为中心的5%相对误差邻域, 为系统设计和工程应用划定了可接受的基线参数范围, 图3(e)为综合考虑各影响因素后, 临界有效基线的取值区间为有效基线因子处于26%~27%。

最终, 我们基于上述临界有效基线解析方程得到临界有效基线的取值区间26%~27%, 结合传统卫星编队任务将基线长度控制在临界基线10%以内的经验规则^[15,17,18], 给出空间EBF分类标准如表1所示。

2.2 临界相干时间基线模型

在重轨干涉形变测量中, 除空间基线失相干、体散射失相干、热噪声失相等失相干因素外, 时间失相干是影响形变测量精度最关键的因素。地表物体随时间发生形变、位移或散射特性改变, 雷达在不同时间获取的回波信号之间的相干性会逐渐降低。地表散射体的运动具有无后效性: 当前时刻运动状态仅与前一时刻相关, 符合马尔可夫随机过程特性^[20,21]。定义散射体在时刻 k 的位移状态为 x_k , 状态转移概率满足 $P(X_k = x_k | X_{k-1} = x_{k-1}, \dots, X_0 = x_0) = P(X_k = x_k | X_{k-1} = x_{k-1})$, 基于此, 时间失相干可定义为

$$\gamma_{\text{tem}}(t) = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_0 + \text{NESZ}} - \gamma_\infty \right) e^{-\frac{t}{\mu}} + \gamma_\infty \quad (7)$$

其中,

$$\mu = \frac{2}{\sigma_m^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \text{ 且 } 0 < \mu < \frac{1}{e} \gamma_{\text{tem}}(0) \quad (8)$$

$$\gamma_\infty = e^{-\frac{1}{2} \sigma_{\text{max}}^2 \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2} \text{ 且 } \gamma_\infty < \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0 + \text{NESZ}} \quad (9)$$

σ_0 为后向散射系数, μ 为时间常数, λ 为波长, σ_m 为单位时间物体运动距离标准差, σ_{max} 为长期物体运动距离标准差, $t = N\Delta t$ 为时间序列长度, Δt 为重访周期, N 为时间个数, γ_∞ 为长期相干性, NESZ为噪声等效后向散射系数。

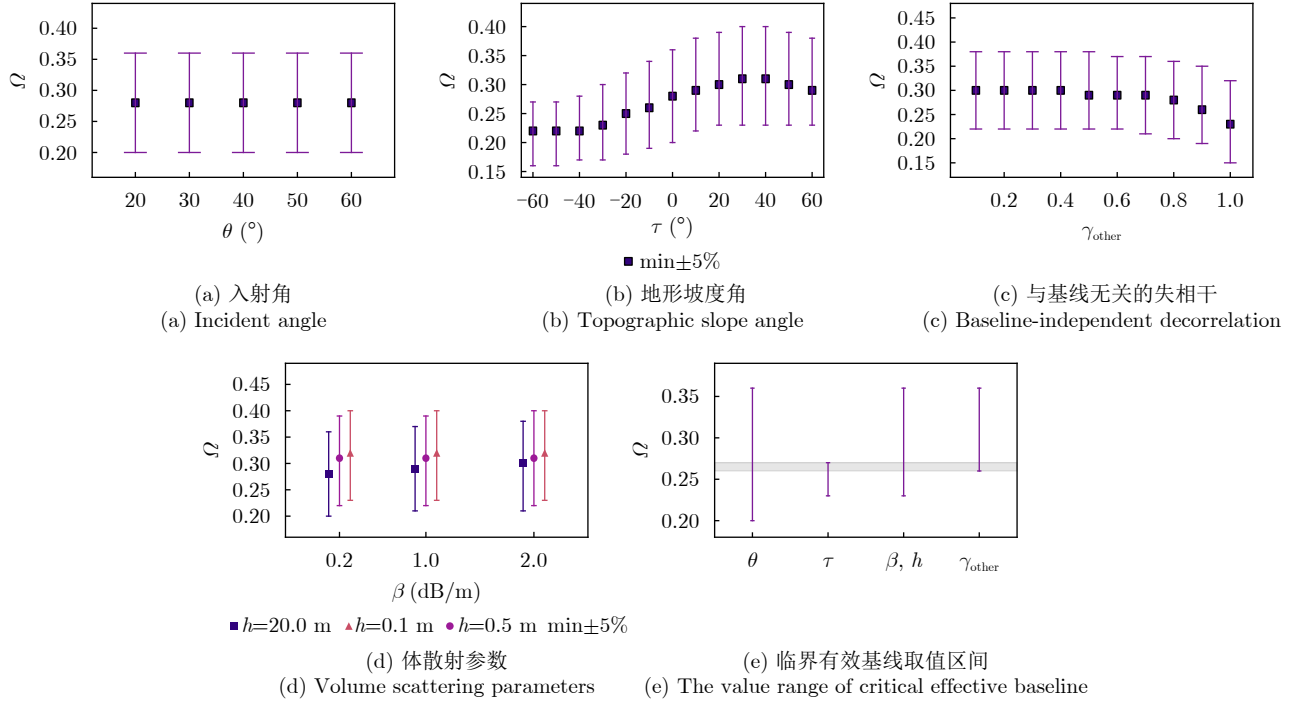


图 3 不同参数变化对临界有效基线取值的影响

Fig. 3 Influence of different parameter variations on the value of critical effective baseline

表 1 基于临界有效基线解析方程的EBF分类标准

Tab. 1 Classification standard for EBF based on the analytical equation of critical effective baseline

条件	定义	基线类型	物理意义
$d\sigma_h/d\Omega > 0$	$\Omega > 27\%$	无效空间基线	失相干成为误差主导因素，此时高程测量相位误差急剧上升，严重失相干导致测量结果不可信
$d\sigma_h/d\Omega = 0$	$\Omega = 26\% - 27\%$	临界有效空间基线	作为高程误差随EBF变化的分界点，是高程误差收敛至全局最小值(精度最高)的理论边界点；是基线增益与失相干损耗的平衡临界点，标志误差主导因素本质转变；是InSAR系统精度调控拐点，提供量化基线参数最优阈值，对应精度最优状态
$d\sigma_h/d\Omega < 0$ 且 $\Omega > 10\%$	$10\% < \Omega < 26\%$	超长空间基线	导数变化变缓，高程精度对基线长度变化仍敏感，但开始出现相干性造成的误差抵消高程精度的提升，控制误差优于提升基线长度，需严格把控失相干误差的影响
$\Omega \leq 10\%$	$\Omega \leq 10\%$	传统空间基线 ^[15,17,18]	即传统短基线和长基线。导数快速变化，基线增益起主导作用，高程精度对基线长度变化敏感

对时间失相干式(7)求导，得到其演化方程为

$$\frac{d\gamma_{\text{tem}}(t)}{dt} = -\frac{1}{\mu} (\gamma_{\text{tem}}(t) - \gamma_{\infty}) \quad (10)$$

该方程刻画的演化过程属于自治系统。时间系数 μ 对系统变化起关键调控作用：当观测时间 $t < \mu$ 时，相干性衰减速率 $e^{-\frac{t}{\mu}}$ 快于标准速率 e^{-1} ；当 $t > \mu$ 时，相干性衰减速率慢于标准速率。这一特性类似二维自治系统的鞍点， $t = \mu$ 是相干性从快速衰减向长期稳定态缓慢趋近的临界转变点，可定义为临界相干时间基线。临界相干时间基线物理含义包括：(1)作为相干性衰减进程的临界标识，当观测时间达到 μ 时，相干性完成从快速衰减到缓慢逼近长期相干性的过渡，此后变化趋于平缓，几乎临近长期相干性 γ_{∞} ，成为衰减速率由快转缓的理论分界；(2)作为InSAR时间序列观测策略的拐点，明

确时间基线最优阈值，超过该值继续增加基线对高相干性累积量无显著增益，为优化重访周期和观测资源配置提供量化依据。

将相干性降低到初始相干性的 k 倍($0 < k < 1$)时所用时间基线记为 t_k ，根据式(7)推导得

$$t_k = -\mu \ln \left[\frac{k \cdot \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_0 + \text{NESZ}} - \gamma_{\infty} \right) - (1-k) \gamma_{\infty}}{\frac{\sigma_0}{\sigma_0 + \text{NESZ}} - \gamma_{\infty}} \right] \quad (11)$$

当 $0.5 < k < 1.0$ 时， t_k 与初始时间失相干强相关；当 $0 < k < 0.5$ 时， t_k 与长期相干性强相关；当 $\gamma_{\infty} = 0$ ， $k = 0.5$ 时， $t_{0.5} = \mu \ln 2$ 为关于 μ 的常数，相干性影响因素从初始相干转为长期相干性，故将其称为超长时间基线临界点。超长时间基线临界点物理含义

包括：在时间基线小于 $\mu \ln 2$ 的阶段，相干性衰减主要受初始相干性支配，相干性变化与初始观测时刻的散射体状态紧密相关；当时间基线超过 $\mu \ln 2$ 后，长期相干性对相干性衰减的影响占据主导，散射体运动的长期统计特性成为相干性演化的主要控制因素，是时间序列InSAR相干性衰减过程中，从短期初始状态关联向长期稳定特性关联过渡的关键时间节点。

最终，我们给出基于临界相干时间基线模型的时间基线分类标准，如表2所示。

基于上述模型，计算关键参数 μ 的常见值。利用10年C波段Sentinel-1数据，结合谷歌地图光学影

像与土地利用覆盖数据集(Land Use and Land Cover, LULC)[33–35]的地物分类结果，通过ISCE-2开源软件[36,37]提取裸土、农田、森林等典型地物的相干系数时间序列，采用最小二范数拟合公式(7)，获得不同地物类型的临界相干时间基线与长期相干性(图4)。

依据式(7)—式(9)，利用C波段实测数据反演其他波段参数，涉及的各波段中心频点为：L波段(1.257 GHz), S波段(3.200 GHz), C波段(5.405 GHz)及X波段(9.650 GHz)。综合C波段实测数据验证与公式理论推导结果可得：波长越长，临界相干时间基

表 2 基于临界相干时间基线模型的时间基线分类标准

Tab. 2 Classification standard for temporal baseline based on the critical coherence temporal baseline model

定义	基线类型	物理意义
$t > \mu$	无效时间基线	超出临界相干时间基线，相干性趋近长期值且变化极缓，继续增加基线无显著增益且浪费资源
$t = \mu$	临界相干时间基线	相干性衰减速率由快转缓的临界转变点，标志向长期稳定态过渡的理论分界
$\mu \ln 2 < t < \mu$	超长时间基线	长期相干性主导衰减过程，散射体长期统计特性为主要控制因素
$t = \mu \ln 2$	超长时间基线临界点	相干性从短期初始状态主导向长期稳定特性主导过渡的关键节点
$0 < t < \mu \ln 2$	传统时间基线	即传统短基线和长基线。初始相干性主导衰减过程，系统参数设计为主要控制因素，相干性保持较高水平

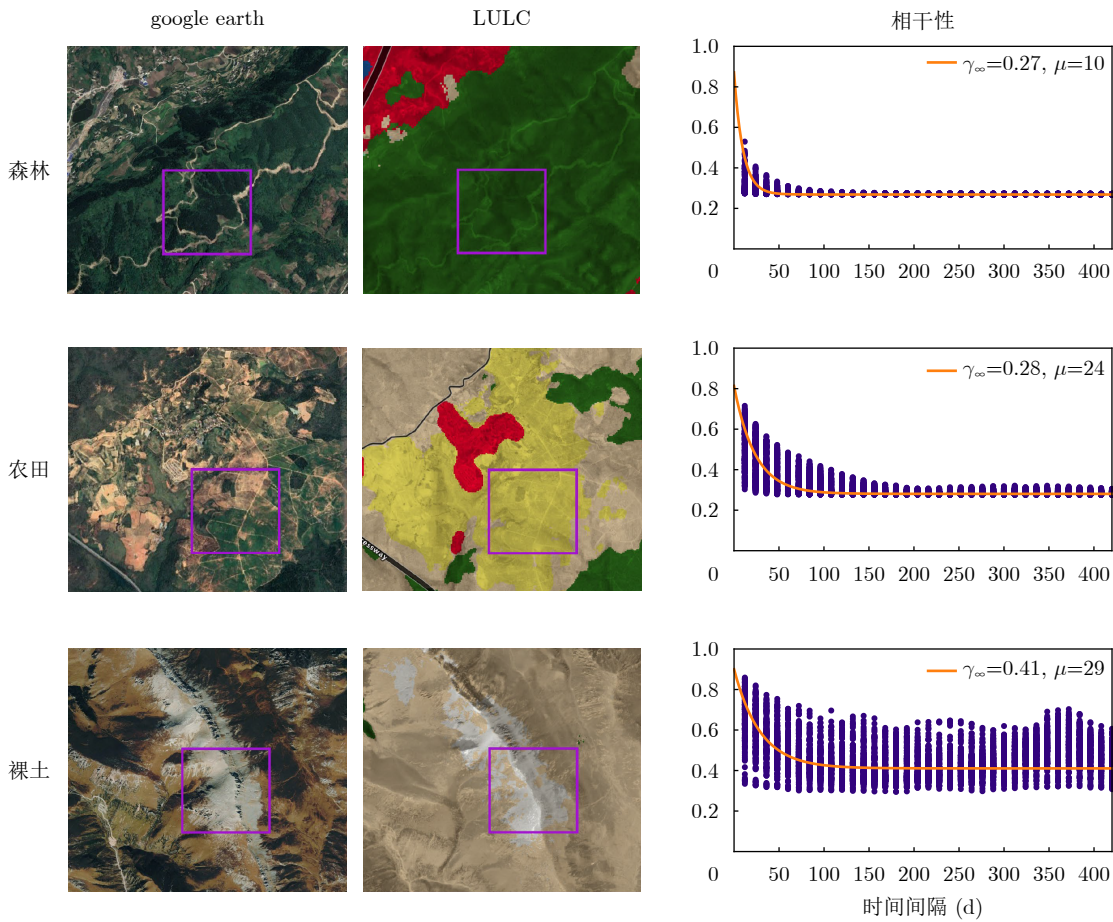


图 4 Sentinel-1在不同地物类型的相干性

Fig. 4 Coherence of Sentinel-1 in different land cover types

线与长期相干性越优。该规律直接决定系统对时间间隔的容忍度，更长的临界相干时间基线可在相同时间间隔下保留更优相干性，避免时间去相干导致的信号质量下降。最终，不同波段、不同地物类型的临界相干时间基线和超长时间基线临界点如表3所示。

3 超长基线InSAR概念与内涵

由前文给出的定义可知，在空间基线上，当 $\Omega \leq 10\%$ 时为传统经验空间基线^[15,17,18]， Ω 在 $10\% \sim 26\%$ 时为超长空间基线， Ω 在 $26\% \sim 27\%$ 时达到临界空间有效基线(图5(a))；在时间基线上，针对森林、农田、裸土不同地物类型，明确不同波段临界相干时间基线长度 μ (具体见表3)。以临界相干时间基线为划分依据：当 $0 < t < \mu \ln 2$ 时为传统时间基线， $\mu \ln 2 < t < \mu$ 时为超长时间基线， $t = \mu$ 为临界相干时间基线(图5(b))。

基于上述分析，我们提出了超长基线干涉合成孔径雷达(InSAR)的概念，并给出了其具体内涵：超长基线干涉合成孔径雷达(Very Large Baseline

InSAR)是以突破传统干涉空间和时间基线经验值约束为目标，从理论上分别定义临界有效空间基线和时间基线边界条件，其核心特征是在维持高相干性的基础上，突破地表高程测量与形变监测的精度极限，实现对观测目标的高精度定量探测。该技术以建立基线参数与测量精度间的定量化映射关系为理论基础，以电磁波相干性保持机理为理论支撑，重点解决因系统参数不完备、物理机制不明确导致的测量精度瓶颈问题，通过构建融合多源失相干机制的空-时误差模型，实现系统误差的精准抑制评估与测量精度的有效提升，旨在为下一代高精度全球地表高程和形变监测系统提供理论基石，推动地球科学研究和重大工程安全监测精度的跨越性提升。

4 超长基线InSAR性能分析

在高程测量中，面对山区等地形起伏剧烈区域，传统空间基线受长度限制，难以精准刻画地形细微变化，生成的数字高程模型精度易受制约；而超长基线凭借更长空间延伸，可获取更精确地形相位信息，为复杂地形的DEM构建提供更精细数据(图6)。从精度与基线的动态关系可以看出，传统基线模式下，基线增益主导高程精度，精度对基线长度变化高度敏感(图6(a)，图6(b))；超长基线场景中，精度虽仍与基线长度强相关，但失相干引发的误差，会抵消一部分基线延长带来的精度增益(图6(c))。此时，通过严格误差控制，能突破超长基线InSAR的精度瓶颈，最大限度地发挥其在复杂地形观测中的潜力(图7)。

在形变监测中，随着时间基线长度增加，时间基线内的干涉图数量增多、冗余量变大，形变速率测量精度得以提升。超长时间基线可突破传统测量

表 3 不同波段、不同地物类型的临界相干时间基线和超长时间基线临界点

Tab. 3 Critical coherent temporal baseline and very large temporal baseline critical point for different wavebands and different land cover types

波段	临界相干时间基线(d)			超长时间基线临界点(d)		
	森林	农田	裸土	森林	农田	裸土
L波段	185	444	536	128	308	371
S波段	29	68	83	20	47	57
C波段	10	24	29	7	17	20
X波段	3	8	9	2	5	6

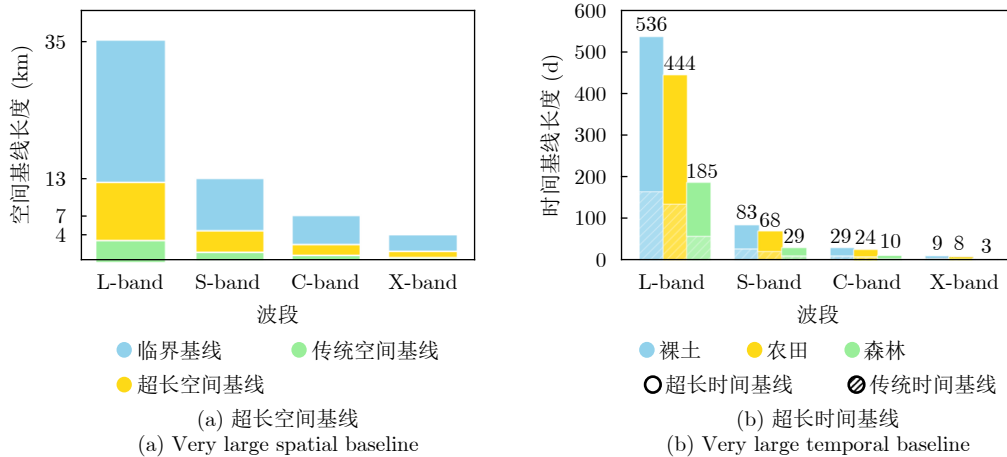


图 5 超长基线InSAR概念

Fig. 5 Concept of very large baseline InSAR

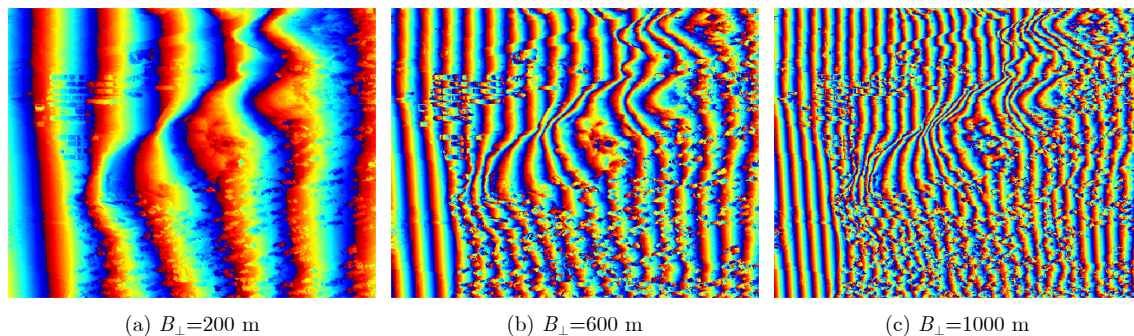


图6 干涉条纹密集程度与基线的变化关系

Fig. 6 Relationship between the density of interferometric fringes and baseline variation

精度的局限,实现测量精度的进一步提高。当达到临界相干时间基线时,干涉图相干性达到低值且趋于平缓,可测量精度趋于稳定。此时,若继续增加时间基线,难以对测量精度提供有效贡献,而且会造成数据处理与计算资源浪费。图8展示了相干性随时间基线的变化,反映了精度提升和资源利用的平衡点。同时,相同时间基线下,干涉图的相干性和形变测量精度正相关。如图9所示,逐像素计算干涉相位时序相干性^[38]:

$$\alpha = \frac{\left| \sum_{p=0}^{M-1} e^{j(\varphi_p - \bar{\varphi}_p)} \right|}{M}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (12)$$

其中, M 为干涉图的个数, p 为 $[0, M-1]$ 区间的整数, φ_p 为第 p 个原始的干涉相位, $\bar{\varphi}_p$ 为第 p 个估计的干涉相位。相同时间基线下,全部干涉图平均相干性从0.36(图9(a))提升到0.45(图9(b)), α 达到0.5标准以上的点占比从7%(图9(c))提升到27%(图9(d)),这一结果直观揭示了相干性对精度的增益机制,维持高相干性能够为高精度形变测量提供优质数据支撑,在形变监测技术的优化进程中具备关键的应用价值。

5 超长基线InSAR系统挑战

超长基线InSAR通过拓展空间基线长度与时间基线跨度实现高精度高程与形变测量,但需突破轨道设计、系统灵敏度、相位同步、误差校正及相位解缠等多维度技术瓶颈,各挑战共同制约着系统性能的整体提升,如图10所示。

5.1 轨道设计与控制

超长基线星载InSAR的配置更为灵活,但同时也对轨道设计与控制提出了更为严苛的要求^[39,40]。(1)超长空间基线下的最优轨道设计与编队控制难(图11(a)):在超长空间基线条件下开展干涉测量,

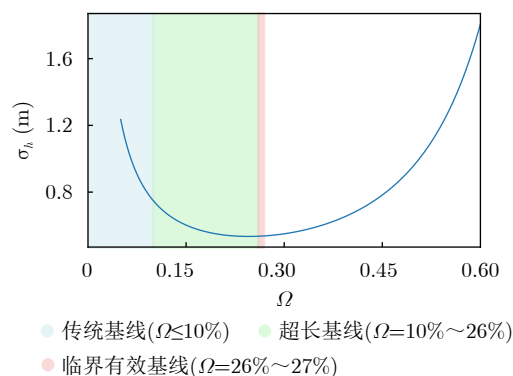


图7 高程误差随有效基线因子的变化关系

Fig. 7 Relationship between elevation error and effective baseline factor

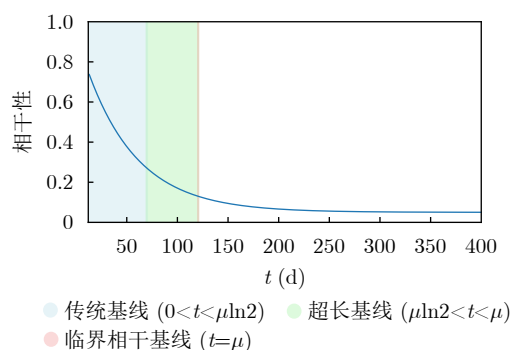


图8 相干性随时间基线的变化关系

Fig. 8 Relationship between coherence and the temporal baseline

需同时满足远距多星成像几何、时间、相位同步协同,这些因素相互耦合,对卫星编队轨道设计形成叠加制约,使得最优轨道参数求解更加复杂。同时,随着空间基线的增长,地球重力场的非均一性等因素将使得子星间轨道摄动差异显著^[41],进而导致相对漂移剧烈,因此稳定保持预定空间基线将依赖于更高频次的轨道修正和更高精度的轨道控制方法。(2)超长时间基线下的轨道回归控制与扰动补偿难(图11(b)):传统重轨InSAR轨道设计通常仅考

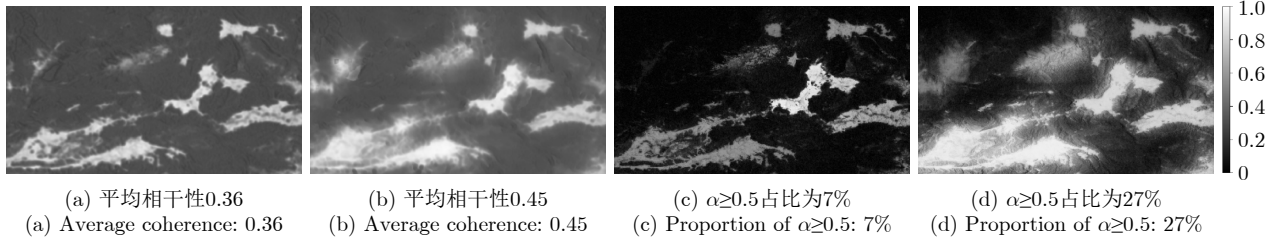


图9 平均相干性与形变测量精度的关系

Fig. 9 Relationship between average coherence and deformation measurement accuracy

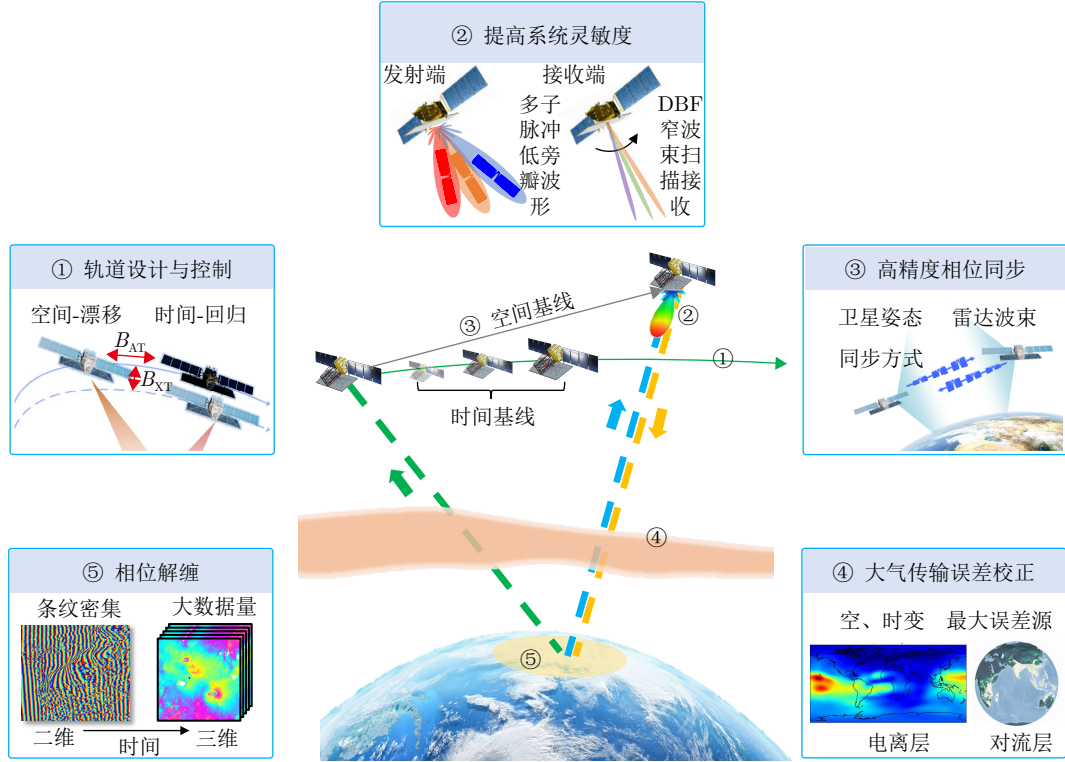


图10 超长基线InSAR技术挑战概念图

Fig. 10 Concept map of technical challenges in very large baseline InSAR

单一的短回归周期^[40], 超长时间基线InSAR则需同时兼顾由短至长的多重回归周期约束。在超长时间干涉间隔内实现轨道的高精度回归, 是开展高精度形变监测的前提。然而, 在长期运行中, 卫星编队将持续受到地球重力场不均、太阳辐射压等多源扰动的累积作用^[41,42], 故而严格轨道回归的实现将对扰动建模的精细程度和补偿策略的准确性提出更高要求。因此, 应对多因素耦合制约的轨道优化设计, 以及实现严格轨道回归控制, 是超长基线InSAR体制发展的关键挑战。

5.2 提高系统灵敏度

高灵敏度可提升干涉图相干性, 从而提升临界相干时间基线长度, 是实现超长时间基线干涉的核心前提, 在保持干涉相干性、抑制相位噪声和提升

测量精度等方面具有不可替代的作用。然而, 星载SAR系统灵敏度的显著提升长期受到两大机理性瓶颈制约: (1)功率孔径积受限。一方面, 受发射器件性能、热控能力、系统架构及平台条件等多物理因素的耦合制约, 星载SAR系统的发射功率极其受限, 难以满足超长时间基线干涉的能量需求。另一方面, 传统SAR多采用静态波束收发方式, 天线孔径高度与波束幅宽之间存在固有矛盾, 在大幅宽成像条件下, 孔径高度降低, 必然导致天线增益显著下降, 从而使系统灵敏度严重恶化。(2)相关滤波器失配问题。现有SAR系统普遍采用线性调频信号, 其冲激响应旁瓣较高, 易引发旁瓣杂波, 显著降低图像信噪比。加窗处理虽可有效抑制旁瓣, 但会造成相关滤波器失配, 导致信号能量损失为1~2 dB, 从而限制了系统灵敏度的提升。为突破上述机理性

难题, 亟须探索突破功率-孔径积限制与相关滤波器失配的新途径, 从根本上提升超长时间基线干涉SAR系统的灵敏度。

现阶段, 国际上提升星载SAR系统灵敏度的研究路径主要分为空间域与波形域两大类。空间域方法以动态扫描波束为核心, 通过增强信号的空域相干性突破功率-孔径积的限制, 典型代表包括多维空时编码、多子脉冲处理以及数字波束形成(Digital Beamforming, DBF)等技术^[43]。作为其中最具代表性的方向, DBF技术经过三十余年的发展, 已成为国际星载SAR领域的研究热点。美国NASA、欧洲航天局(ESA)和德国航空航天中心(DLR)等机构^[44,45]先后提出了基于复数域的DBF架构与合成方法。中国科学院空天信息创新研究院(简称空天院)研究团队^[46]在国际上率先提出实数域DBF架构、基于有限阶泰勒展开的实时权值生成方法^[47]、扇形波束形成(Digital Sector Beamforming, DSBF)技术^[48], 研制了国际首个16通道X波段高分辨率机载DBF-SAR系统, 并成功获取高质量DBF-SAR图像(图12)^[49]。与空间域方法相对应, 波形域方法以消除相关滤波器失配效应为核心, 通过引入高自由度相位编码, 实现低旁瓣、无能量损失的成像处理,

从而等效提升系统灵敏度。美国Sandia国家实验室Doerry博士^[50]最早开展非线性调频(Nonlinear Frequency Modulation, NLFM) SAR波形研究, 初步讨论了NLFM信号在SAR应用中的可行性。中国科学院空天院研究团队^[51]提出基于Chebyshev窗的NLFM信号设计方法、分段线性函数的NLFM设计架构^[52]以及基于线性插值的高精度波形生成器^[53], 率先开展国际首次非线性调频机载SAR实验并成功获取NLFM图像^[54]。2022年, 陆地探测一号卫星作为国际首个公开具备NLFM波成像能力的星载SAR系统, 成功获取单极化、全极化及混合极化模式下的低旁瓣高质量SAR影像, 充分验证了NLFM波形在工程应用中的高效性与可靠性(图13)。这一成果标志着我国在波形域灵敏度提升技术方向上实现了从理论突破到星载应用的国际领先跨越, 在星载超长时间基线干涉SAR中具有十分重要的应用潜力。

5.3 高精度相位同步

空间收发分置的卫星平台分别采用不同的频率源, 其频率差异性会引入相位同步误差, 引起成像聚焦质量与干涉测量精度下降^[55]。首个真正意义上在星载SAR系统中应用的相位同步技术是TanDEM-X

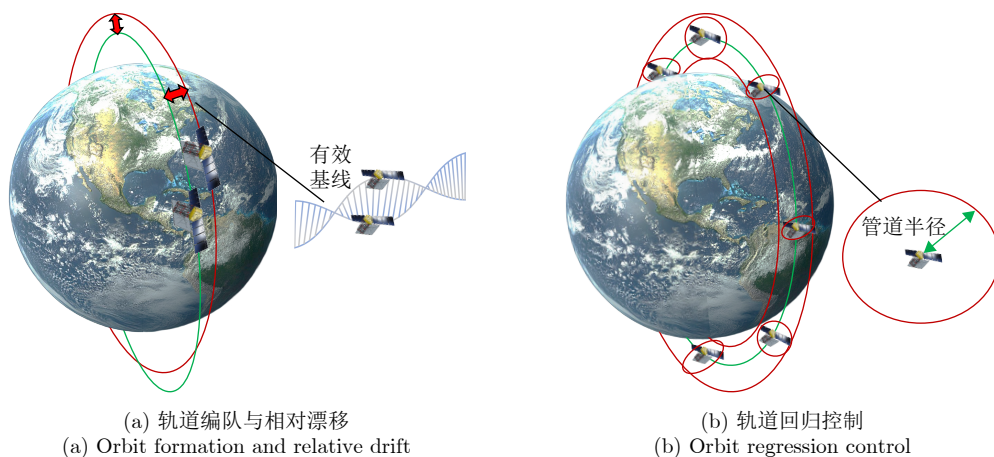


图 11 轨道设计与控制示意图

Fig. 11 Schematic diagram of orbit design and control

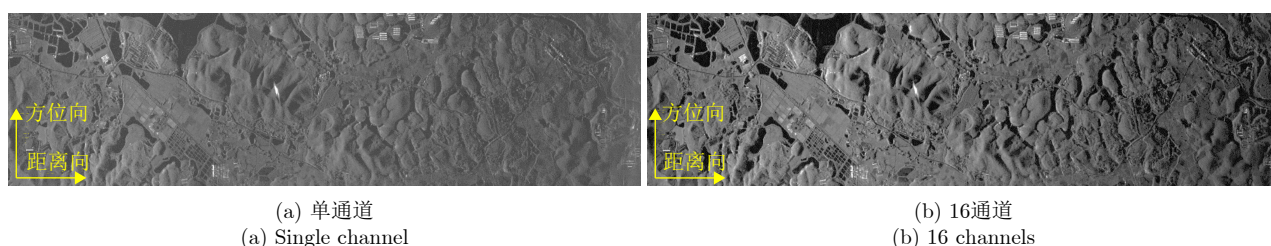


图 12 机载DBF实验验证结果^[49]

Fig. 12 Airborne DBF experimental verification results^[49]

系统采用的双向脉冲对传方案(图14(a)), 然而TanDEM-X系统采用了中断式的同步工作模式, 同步对传与成像采集难以同时兼顾^[19]。陆地探测一号系统研究人员基于时分复用的思想提出了非中断双向脉冲对传同步方案^[56,57](图14(b)), 避免了在同步过程中周期性打断成像采集, 在此基础上提出了基于卡尔曼滤波与稀疏成像思想的相位同步精度提升方法^[58-60], 经试验验证, 同步相位误差精度优于 0.3° , 非中断双向脉冲对传同步方案也成功推广应用于国际首个车轮编队InSAR商业卫星——宏图一

号^[61,62]。为进一步提高同步时序设计的灵活性, 文献^[63]提出一种基于波形分集和相干累积的相位同步方法, 系统同时接收回波信号与同步信号两种信号, 通过相干积累获得高信噪比同步信号, 通过波形分集提取回波信号。此外, 随着频谱拥塞现象的日益严重, 同步信号极易受到来自地海空同频设备的无意干扰, 相位同步窄带干扰抑制方法、盲源分离多通道干扰抑制方法等被提出^[64-67], 可有效抑制干扰对相位同步的影响, 提高相位同步精度(图15)。从目前的发展趋势来看, 针对超长基线InSAR系统,

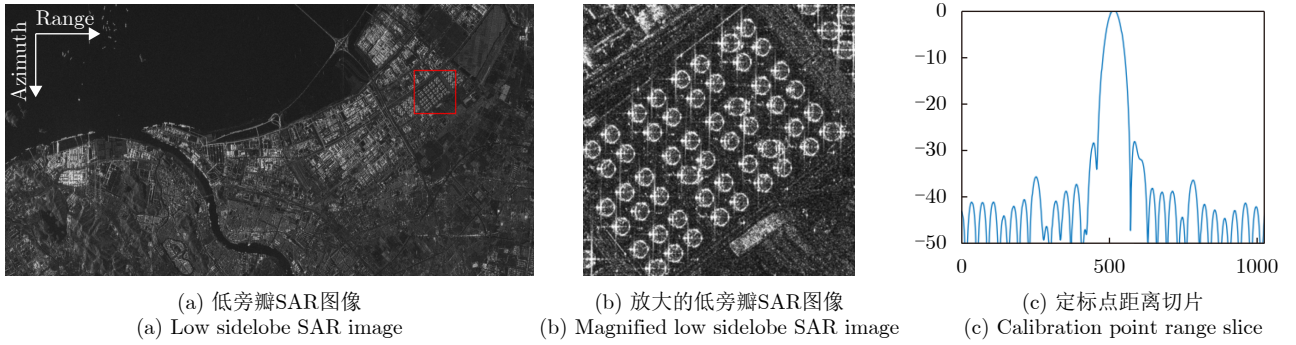


图 13 LuTan-1的NLFM波形数据获得的聚焦图像^[56]

Fig. 13 Focused images obtained from LuTan-1's NLFM waveform data^[56]

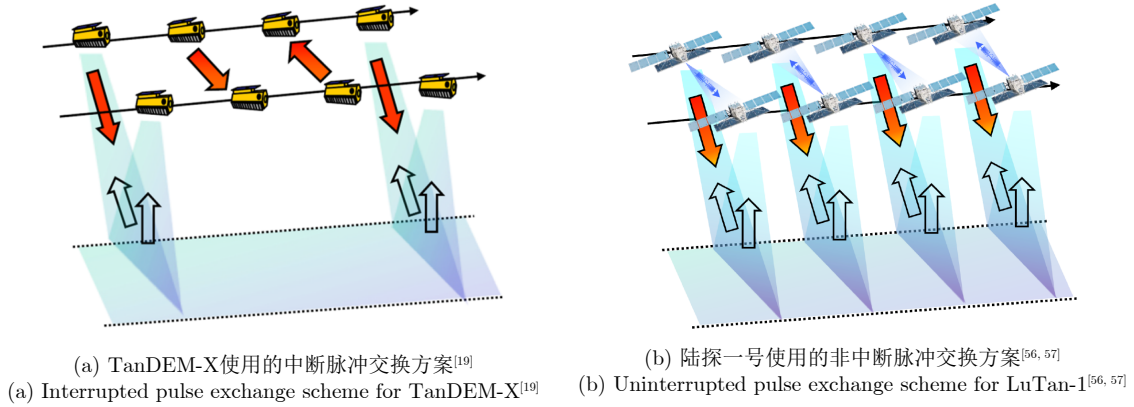


图 14 脉冲交换方案示意图

Fig. 14 Schematic diagram of pulse exchange scheme

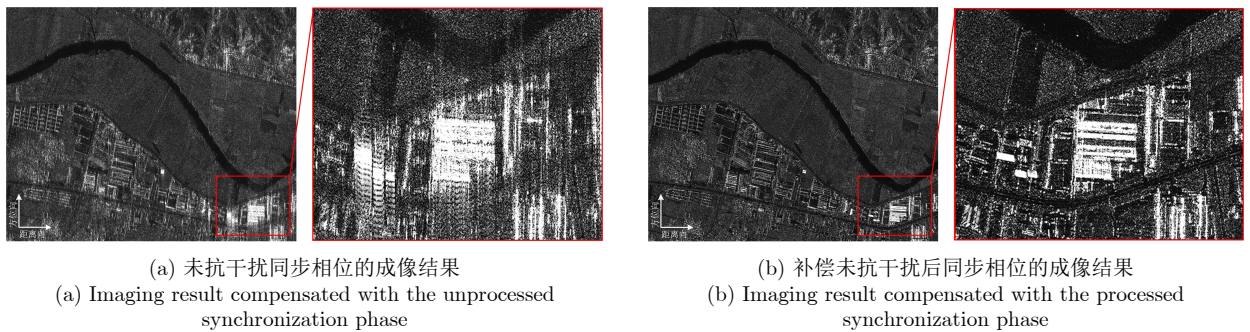


图 15 陆探一号同步抗干扰处理前后成像结果^[68]

Fig. 15 LuTan-1 imaging results before and after synchronous anti-interference processing^[68]

非中断双向脉冲对传同步方案仍然是切实可行、有效的技术方案。

在超长基线InSAR系统中,空间基线延长导致信号传播路径变长且信道复杂性显著增加,主要表现为自由空间传播损耗加剧、射频干扰频发及多普勒效应增强等。在发射功率不变的情况下,接收端信噪比急剧下降,直接影响同步精度与成像质量。为维持信噪比需大幅提高发射功率,但受限于设备成本、功耗及卫星功率承载能力,面临实际可行性挑战。此外,超长基线引起的单程时延增大导致同步交换窗延长,压缩了有效观测幅宽,并显著增加系统暴露于射频干扰的风险,易引发相位提取错误或同步失效。同时,为克服信号衰减需采用窄波束集中能量,但卫星轨道摄动力(如地球非球形引力、太阳辐射压)导致的微小漂移,极易引发波束偏离目标方向,造成信号强度骤降甚至链路中断。因此,设计大功率同步天线、提高波束控制精度与自适应控制能力、提高时序链路控制精度以及建立基于波形分集的同步体制,是实现超长基线InSAR系统高精度相位同步的有效技术途径。

5.4 大气传输误差校正

大气层的时空异质性分布对雷达信号传输产生显著相位延迟,是影响超长时间基线干涉形变测量精度的最大误差源。其中,对流层分布在30 km以下,其折射率主要由温度、水汽、干空气分压决定^[69]。当前主流的对流层延迟校正方法有两类:一类方法基于数值天气模型(比如ERA5),可以在很大程度上校正静力延迟(“干延迟”),但是受限于时间和空间分辨率(ERA5的时间分辨率为1 h,空间分辨率为0.25°,约31 km^[70]),无法有效捕捉对流层紊流(“湿延迟”)的时空异质性,难以满足微小形变的高分辨率高精度测量需求;另一类方法基于InSAR相位数据,利用对流层延迟相位和地形之间

的经验关系,实现高分辨率估计与校正,该方法已在L波段ALOS-2数据上得到了有效的验证(图16),但是该经验关系在大尺度广域形变和与地形相关形变的应用场景的普适性还有待进一步验证^[71]。

电离层分布在50 km以上,折射率由大气中的自由电子密度决定,其时空分布不均匀且受太阳和地磁活动影响。由于电离层的色散特性,其对低频L波段SAR的影响是C波段SAR的16倍,因此在超长时间基线干涉SAR中尤为重要。当前主流的基于谱分集的方法^[72-74]借鉴全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的双频电离层延迟校正原理,通过带通滤波将SAR数据在距离向划分为高、低频子带,然后进行干涉获取子带干涉相位,最后基于电离层延迟具有色散属性而干涉相位其他分量不具有色散属性这一特点提取电离层延迟。然而该方法受限于InSAR数据的相干性,难以在浓密植被或者积雪覆盖的场景下应用。图17展示了电离层对L波段干涉图造成了密集的条纹影响。需要指出的是,该方法在高相干区域可有效发挥作用,但是对于低相干区域而言依旧是亟待解决的难题。

5.5 相位解缠

随着空间基线的增加,干涉条纹变得更加密集,这给相位解缠带来了更大的挑战^[75,76]。超长空间基线提高了相位对地形高度的敏感性,相同的高程变化所对应的干涉条纹空间频率急剧上升,从而在相位解缠过程中引发一系列困难:相邻像素之间的相位差容易超出可解缠范围,造成解缠失败;失相干噪声被放大,增加了误判的可能性;低相干区域的噪声还会诱发局部相位跳变,进而导致解缠误差传播。在深度学习相位解缠方面已有诸多研究工作并取得显著进展。通过构建深度神经网络模型,可从复杂的干涉条纹数据中自动挖掘深层特征,无须人工进行烦琐的特征工程,有效提升解缠的智

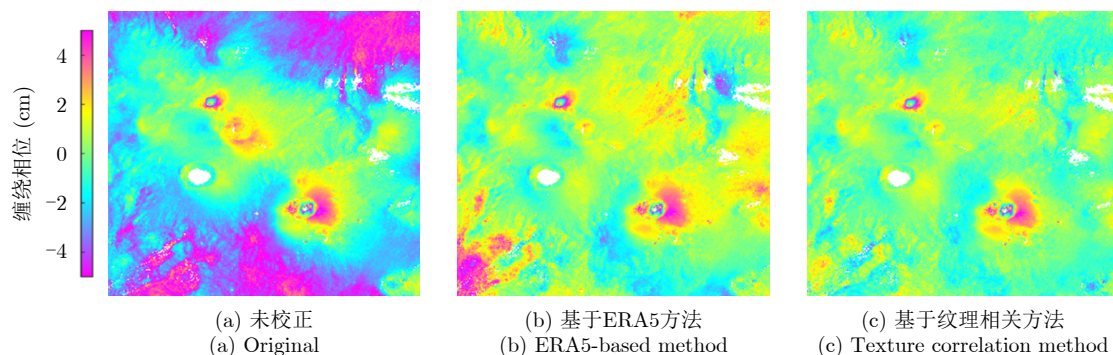


图 16 对流层延迟校正前和用不同方法校正后的干涉相位^[71]

Fig. 16 Interference phase before tropospheric delay correction and after correction using different methods^[71]

能化与自动化水平。同时，深度学习模型对噪声和相位跳变等问题具有更强的鲁棒性，经过大量数据训练后，能够更好地适应超复杂场景下的相位解缠需求，降低解缠错误率(图18)。因此深度学习等技术手段成为解决超长空间基线相位解缠难题的关键方向^[77]。

同样，超长时间基线配置下，对海量InSAR数据处理的效率和自动化程度提出了更高要求^[78,79]，其中存在两大突出难题：其一，传统解缠方法在处理高维度、大规模的时间序列InSAR数据时，效率与精度均受限。为解决该问题，可引入多分辨率处理策略，通过分层、分尺度的处理方式降低计算复杂度，以适应超长时间基线下面临的大数据场景；其二，针对空-时域三维相位解缠，在时间维度上相位演化受到多种因素干扰，需实现精准解缠以充分挖掘时间序列中的相位信息，为超长时间基线InSAR分析提供支持。目前，对时间维相位复杂演化规律的建模与解缠算法设计仍存在诸多技术瓶颈。未来需致力于融合多源数据，并结合先进的机器学习或信号处理技术，以实现高精度三维相位解缠，这将是一项亟待攻克的关键课题。

6 超长基线InSAR应用潜力

6.1 高精度高程测量

通过2.1节可知，超长基线系统通过扩大空间基线配置范围，能够显著提升对地表高程变化的感知灵敏度，尤其在复杂地表覆盖场景下可突破传统基线的精度瓶颈。更长的基线意味着干涉相位对高程差异的响应更强烈，从而在森林、农田、裸地等多样化场景中实现更高精度的高程反演。这一技术优势可在星载双基SAR系统仿真中得到验证。

2010年，德国TanDEM-X与TerraSAR-X卫星组成全球首个星载双基SAR系统，突破单星模式，推动国际星载双基干涉测量研究应用。2022年，中国发

射民用分布式SAR卫星星座LuTan-1，标志双基星载干涉SAR技术获关键进展。表4展示了TanDEM-X^[19]和LuTan-1^[56]的典型参数。结合地表覆盖类型，计算了不同情景下这两颗卫星的高程测量精度在典型参数的理论值，如图19所示。在森林覆盖场景中，有效基线因子相同的条件下，LuTan-1系统的高程测量精度优于TanDEM-X，当LuTan-1的有效基线因子超过9%时，其高程精度可突破TanDEM-X的高程精度。针对农田覆盖场景，TanDEM-X表现更优，当有效基线因子大于14%时，高程精度能够高于LuTan-1的最优高程精度。对于裸土地表，有效基线因子小于32%时，LuTan-1精度远高于TanDEM-X；有效基线因子超过32%后，TanDEM-X则实现精度反超。从空间基线设计看，TanDEM-X基线限制在临界基线的10%以内；而LuTan-1支持0.7~7.0 km宽基线动态配置^[56]。根据表4计算，LuTan-1的临界基线为40 km，此时有效基线因子为17.5%。在临界有效基线条件下，LuTan-1的高程测量精度优于TanDEM-X。超长基线系统相比传统基线系统具有更大的潜力。

6.2 高精度形变测量

在形变监测领域，超长时间基线结合灵活的系统参数设计，能够有效延长临界相干时间基线，降低地表散射特性变化导致的失相干影响，为长期、高精度的形变速率反演提供坚实基础。更长的时间基线可积累更显著的形变信号，配合优化的重访周期和NESZ，能够在不同地物类型和波段条件下，提升形变速率测量的稳定性与精度，尤其对缓慢形变区域的监测具有不可替代的优势。

根据图4、式(7)—式(9)，我们可以分不同地物类型计算任意时刻的两幅干涉图的相干性。选取不同的重访周期和NESZ，根据基于小基线集方法的失相干形变速率测量精度反演模型，模拟三年时间

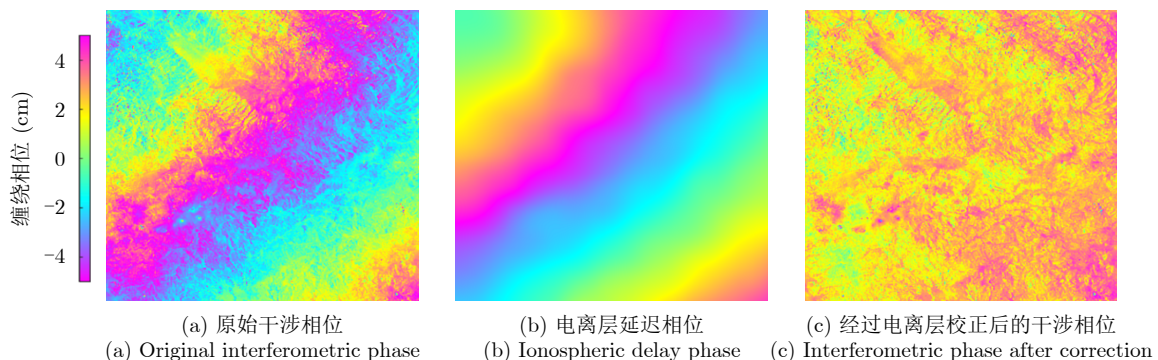
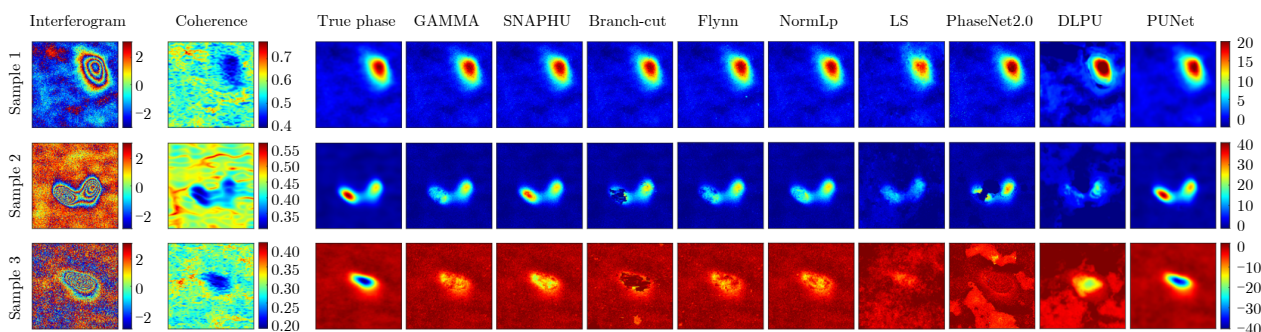
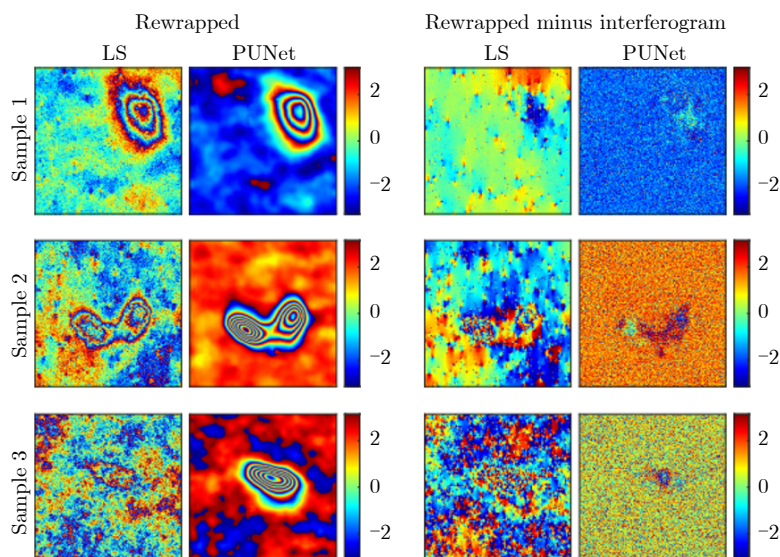
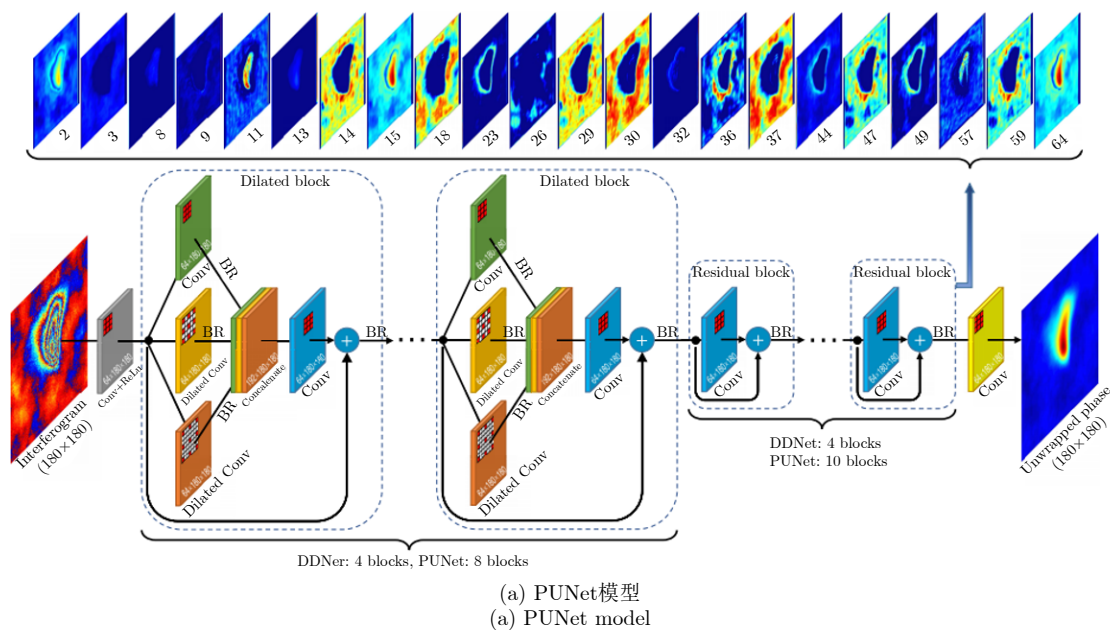


图 17 基于谱分集方法校正L波段ALOS-2电离层延迟相位

Fig. 17 Ionospheric delay phase correction of L-band ALOS-2 based on split-spectrum method

图 18 基于深度学习的相位解缠示例^[77]Fig. 18 Example of phase unwrapping based on deep learning^[77]

跨度下, 不同波段、地物类型, 形变速率精度随系统设计参数NESZ和重访周期的变化, 如图20所示。

随着重访周期的增加和NESZ的增大, 形变速率测量精度有所提升。整体精度表现为: 裸土最高, 草

表 4 TanDEM-X和LuTan-1的典型参数
Tab. 4 Typical parameters of TanDEM-X and LuTan-1

参数	TanDEM-X	LuTan-1
NESZ	-19 dB	-28 dB
入射角	35°	35°
距离向带宽	100 MHz	80 MHz

地次之，森林最差；随着频率降低、波长变长，精度对NESZ的敏感性增强，其中L波段对NESZ变化的敏感性最强，NESZ的增大对精度的影响最大；随着频率升高、波长变短，精度对重访周期的敏感性增强，X波段对重访周期变化的敏感性最强，重访周期的增加对精度的影响最大。

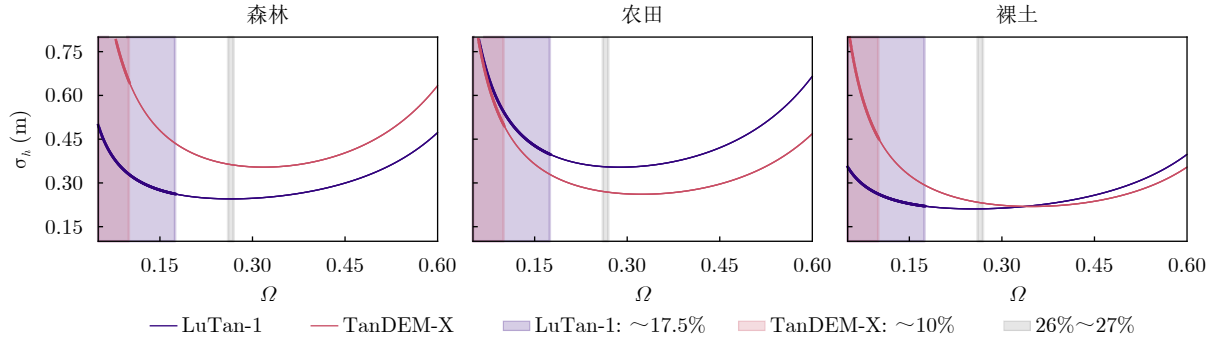


图 19 TanDEM-X和LuTan-1在典型系统参数(见表4)条件下，不同地表覆盖类型下的高程误差

Fig. 19 Elevation errors of TanDEM-X and LuTan-1 under different land cover types with typical system parameters (see Tab. 4)

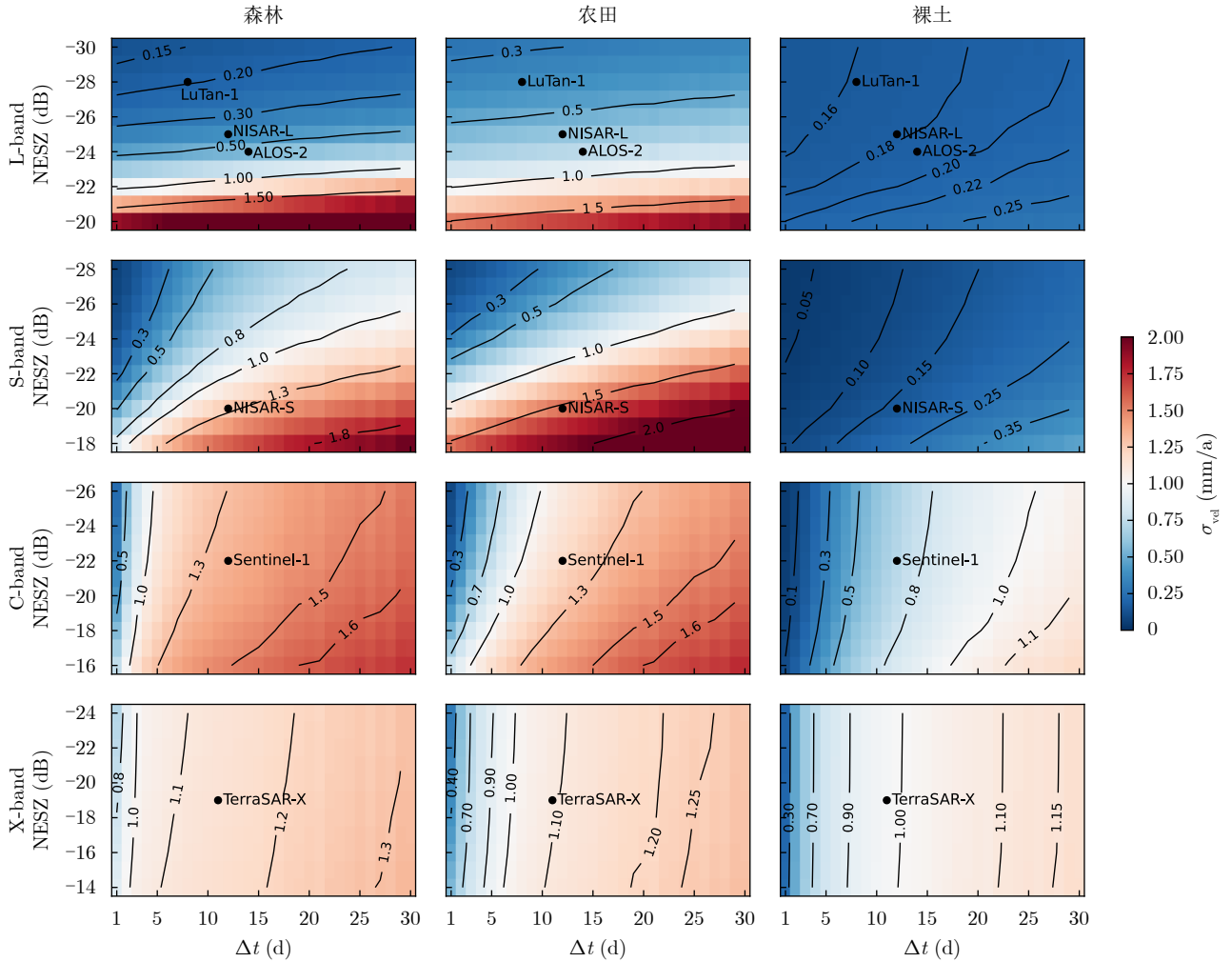


图 20 不同波段、不同地物类型的相干性影响的形变速率测量精度

Fig. 20 Deformation velocity measurement accuracy affected by coherence under different frequency bands and different land cover types

特别地,我们研究L波段和S波段的精度差,如图21所示,发现在森林地区 $NESZ \leq -23$ dB或重访周期 ≤ 8 d时,S波段精度反而高于L波段,这是由

于相同相位误差的情况下,S波段相干性同样很好,且波长小,相同的相位误差造成的形变误差相比于L波段小。

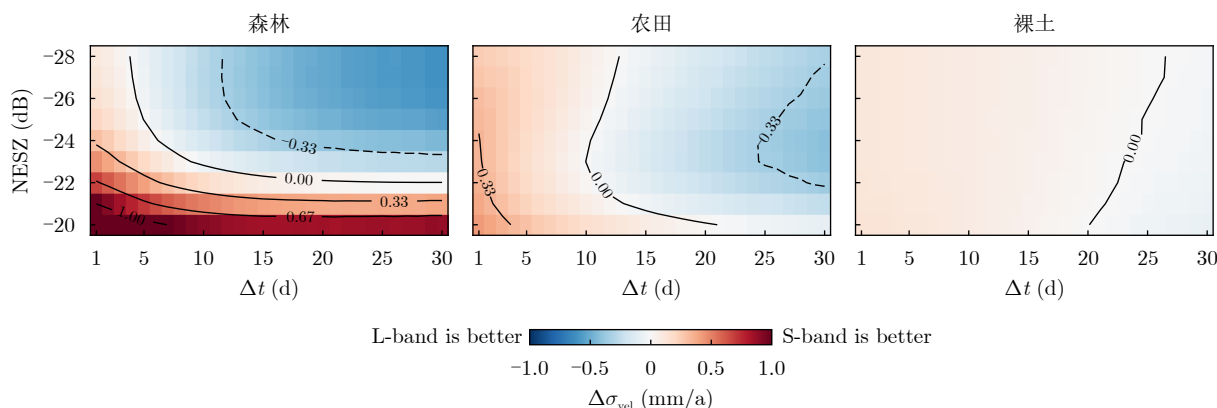


图 21 L波段与S波段之间的精度差异

Fig. 21 Accuracy difference between L-band and S-band

6.3 分布式SAR系统

作为一类具备多平台协同观测能力的广义技术体系,分布式SAR系统为星载InSAR技术的性能突破提供了重要载体,而超长基线InSAR体制则是该技术体系下实现性能优化、拓展应用边界的核心方向与关键应用形式。系统级协同层面,其高精度同步机制通过构建跨平台时间、相位与空间基准一体化框架,有效抑制多星观测误差累积,保障数据时空一致性与相位相干性,为干涉处理及联合成像提供高质量数据,奠定大规模分布式观测网络的构建基础。工程实践中,以LuTan-1^[56], Harmony^[80]等星座为例,通过动态调整星座构型,采取超长基线体制实现高精度的高程测量与形变监测需求,实现“一星多用、多星协同”模式,提升星座任务效能与资源利用率。技术演进上,该体制为新型系统发展提供条件,尤其在三维形变测量领域,依托多基线配置与高精度测量能力,突破传统二维监测局限,实现地表三维运动的高精度量化。

LuTan-1系统作为分布式SAR系统,在6.1节—6.2节已分析其理论应用潜力。在实测数据中,自然资源部国土卫星遥感应用中心唐新明研究员等人^[81]针对LuTan-1卫星开展在轨测试,依托该卫星双星绕飞模式数据,选取河南省及江苏省具有角反射器校验的区域,进行DEM产品生产与测试。结果表明,在测试区域中LuTan-1卫星DEM产品精度在平差后为2.9 m。我们选取中国山西省晋城市地区作为典型区域利用LuTan-1数据生成DEM产品(图22),与SRTM的DEM产品进行对比,精度为2.6 m。许兵教授等围绕LuTan-1卫星的形变测量能力开展系统

性评估研究^[82]。以山西省大同市矿区为典型研究区,选取LuTan-1卫星重轨绕飞模式下获取的遥感数据作为核心数据源。分别利用SBAS-InSAR和PS-InSAR方法进行了时间序列干涉SAR地表形变速率测量(图23),并利用GPS站点进行对比。结果表明, LuTan-1的长时间序列干涉SAR地表形变速率测量精度可达5.7 mm/yr (SBAS-InSAR)和3.4 mm/yr (PS-InSAR)。

综上,超长基线InSAR既是当前分布式SAR性能优化的核心应用,更是推动星载InSAR向高维度、高精度、多尺度演进的关键支撑,在地球科学研究、资源监测及灾害防治等领域具有不可替代的学术与应用价值。

7 结语

本研究聚焦星载超长空间基线与超长时间基线干涉合成孔径雷达体制,探究其内在理论约束条件。在此基础上,构建了融合多源失相干因素的空

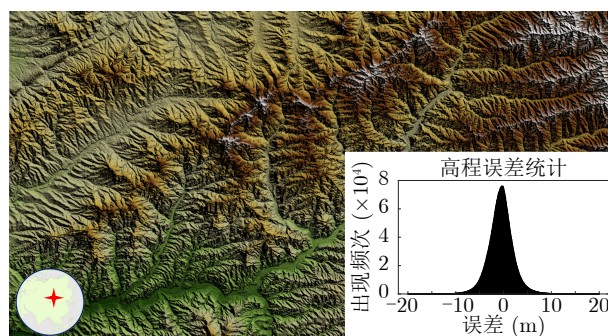
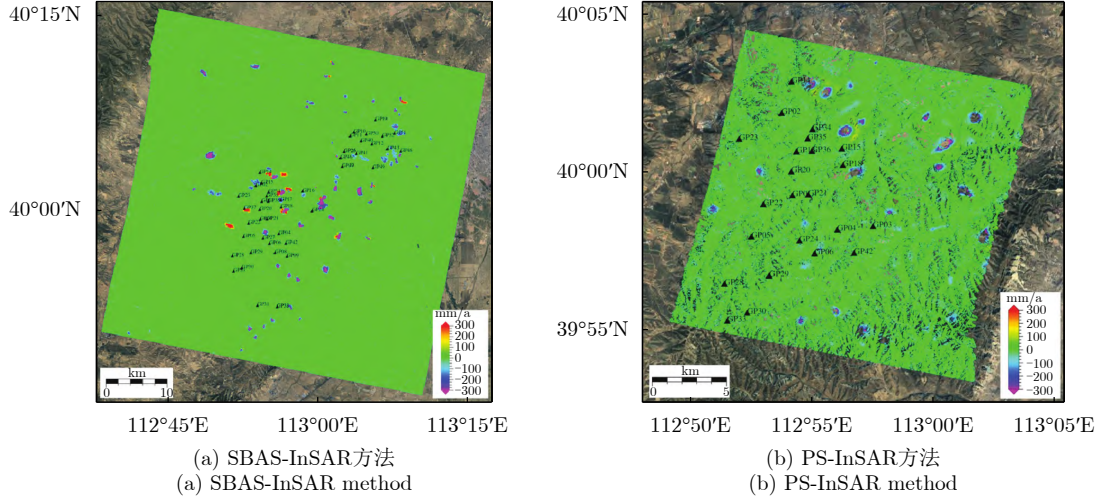


图 22 基于LuTan-1数据的DEM产品

Fig. 22 DEM product based on LuTan-1 data

图 23 山西省大同市矿区基于LuTan-1数据的形变结果^[82]Fig. 23 Deformation results based on LuTan-1 data in the mining area of Datong, Shanxi^[82]

时误差模型，量化了基线设计参数与测量精度之间的非线性关联，并建立了一套评估体系。该体系涵盖相干性、高程测量精度、基于相干时间基线的形变探测灵敏度等多项关键性能指标。明确星载超长基线InSAR的概念内涵，在此基础上对其综合性能展开系统分析，系统阐述了该技术路线在工程实现中面临的核心挑战。最后，结合技术特性与应用需求，重点探讨了星载超长基线InSAR在高精度高程测量、形变监测及分布式SAR系统构建等领域的应用前景。上述研究成果预期为下一代高精度、全维度InSAR系统的方案设计提供理论依据，进而在地球科学前沿探索与国家重大工程安全保障等关键场景中发挥更为重要的支撑作用。

附录 临界有效基线解析方程推导

首先计算以EBF为自变量的空间失相干解析表达式。其中基线去相干 γ_{geom} 为

$$\begin{aligned}
 f(\Omega) &= \gamma_{\text{other}} \cdot \gamma_{\text{vol}} \cdot \gamma_{\text{geom}} \\
 &= \gamma_{\text{other}} \cdot \left(\frac{\int_0^{h_v} \exp\left(-2 \cdot \beta \cdot \frac{h_v - z}{\cos \theta}\right) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{2B_{\text{rg}} \cdot \Omega \cdot z \cos(\theta - \tau)}{c \sin \theta}\right) dz}{\int_0^{h_v} \exp\left(-2 \cdot \beta \cdot \frac{h_v - z}{\cos \theta}\right) \cdot dz} \right) \cdot (1 - \Omega) \\
 &= \gamma_{\text{other}} \cdot \left(\frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{e^{P_1 h_v} - 1}{e^{P_0 h_v} - 1} \right) (1 - \Omega)
 \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

其中，

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \frac{2\beta}{\cos \theta}, \\
 P_1 &= \frac{j4\pi B_{\text{rg}} \cos(\theta - \tau)}{c \sin \theta} \cdot \Omega + \frac{2\beta}{\cos \theta}
 \end{aligned}$$

$$\gamma_{\text{geom}} = \begin{cases} 1 - \Omega, & |B_{\perp}| \leq B_{\perp}^c \\ 0, & |B_{\perp}| > B_{\perp}^c \end{cases} \quad (\text{A-1})$$

其中， $B_{\perp}$ 为垂直基线长度， $B_{\perp}^c$ 为临界基线长度。体散射失相干 γ_{vol} 的表达式为

$$\gamma_{\text{vol}} = \frac{\int_0^{h_v} \sigma^0(z) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{z B_{\perp}}{\lambda r \sin \theta}\right) dz}{\int_0^{h_v} \sigma^0(z) dz} \quad (\text{A-2})$$

其中， z 为积分自变量， h_v 为植被高度， $\exp(\cdot)$ 为指数函数， j 为虚数单位， $\sigma^0(z)$ 是植被对电磁波的衰减函数，表示为

$$\sigma^0(z) = \exp\left[-2 \cdot \beta \cdot \frac{h_v - z}{\cos \theta}\right] \quad (\text{A-3})$$

其中， β 为电磁波在植被中的单程消光系数。则以EBF为自变量的空间失相干解析表达式为

其次计算以EBF为自变量的高程误差解析表达式：

$$\sigma_h = \frac{c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}} \cdot \Omega} \cdot \sigma_{\phi} \quad (\text{A-5})$$

本文在单独分析相位误差对高程误差的贡献时，

暂不考虑基线测量偏差的影响, 且相位误差主要考虑失相干误差 σ_{dec} :

$$\sigma_{\text{dec}} = \sqrt{\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}} \quad (\text{A-6})$$

故有

$$\sigma_h = \frac{c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}} \cdot \Omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)} \quad (\text{A-7})$$

最后, 构建以EBF为自变量的临界有效基线解析方程 $(d\sigma_h)/(d\Omega)$ 。其中, 以EBF为自变量的体散射失相干变化率为

结合式(A-1)~式(A-9), 我们得到以EBF为自变量的临界有效基线解析方程:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_h}{d\Omega} &= \frac{-c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}} \Omega^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)} + \frac{c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}} \Omega} \cdot \frac{d\sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)}}{d\Omega} \\ &= \frac{-c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}} \Omega^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)} + \frac{c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}} \Omega} \cdot \frac{-1 \cdot \frac{df(\Omega)}{d\Omega}}{2Lf^3(\Omega) \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)}} \\ &= \frac{-c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}}} \cdot \left[\frac{1}{\Omega^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)} + \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{\frac{df(\Omega)}{d\Omega}}{2Lf^3(\Omega) \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)}} \right] \\ &= \frac{-c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}} \Omega} \cdot \left[\frac{1}{\Omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)} + \frac{\gamma_{\text{other}} \cdot \left[\frac{d\gamma_{\text{vol}}}{d\Omega} \cdot (1 - \Omega) - \left(\frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{e^{P_1 h_v} - 1}{e^{P_0 h_v} - 1} \right) \right]}{2Lf^3(\Omega) \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)}} \right] \\ &= \frac{-c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{\text{rg}} \Omega} \cdot \left\{ \frac{1}{\Omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\gamma_{\text{other}} \cdot \left[\frac{j4\pi B_{\text{rg}} \cos(\theta - \tau)}{c \sin \theta} \cdot \left(\frac{(P_0 P_1^2 - P_0) e^{P_1 h_v} + 1}{P_1^2 (e^{P_0 h_v} - 1)} \right) \cdot (1 - \Omega) - \left(\frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{e^{P_1 h_v} - 1}{e^{P_0 h_v} - 1} \right) \right]}{2Lf^3(\Omega) \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)}} \right\} \\ &= \frac{-F}{\Omega} \cdot \left(\frac{\sigma_\phi}{\Omega} + \frac{g(\Omega)}{\sigma_\phi} \right) \end{aligned} \quad (\text{A-10})$$

其中,

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma_{\text{vol}}}{d\Omega} &= \frac{d\frac{P_0}{P_1}}{d\Omega} \cdot \frac{e^{P_1 h_v} - 1}{e^{P_0 h_v} - 1} + \frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{d\frac{e^{P_1 h_v} - 1}{e^{P_0 h_v} - 1}}{d\Omega} \\ &= \frac{j4\pi B_{\text{rg}} \cos(\theta - \tau)}{c \sin \theta} \cdot \left[\frac{(P_0 P_1^2 - P_0) e^{P_1 h_v} + 1}{P_1^2 (e^{P_0 h_v} - 1)} \right] \end{aligned} \quad (\text{A-8})$$

以EBF为自变量的空间失相干解析表达式变化率为

$$\frac{df(\Omega)}{d\Omega} = \frac{-1 \cdot \frac{df(\Omega)}{d\Omega}}{2Lf^3(\Omega) \sqrt{\left(\frac{1 - f^2(\Omega)}{2Lf^2(\Omega)}\right)}} \quad (\text{A-9})$$

$$F = \frac{c \sin \theta}{4\pi \tan(\theta - \tau) B_{rg}}$$

$$g(\Omega) = \frac{\gamma_{other} \cdot \left[\frac{j \cos(\theta - \tau)}{F \tan(\theta - \tau)} \cdot \left(\frac{(P_0 P_1^2 - P_0) e^{P_1 h_v} + 1}{P_1^2 (e^{P_0 h_v} - 1)} \right) \cdot (1 - \Omega) - \left(\frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{e^{P_1 h_v} - 1}{e^{P_0 h_v} - 1} \right) \right]}{2L f^3(\Omega)}$$

致谢 本文的工作是在国家自然科学基金的资助下完成的, 并且得到了中国资源卫星中心、中国航天科技集团第八研究院的大力支持, 在此表示感谢。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参 考 文 献

- [1] HOWARD H D, ROBERTS S C, and BRANKIN R. Target detection in SAR imagery by genetic programming[J]. *Advances in Engineering Software*, 1999, 30(5): 303–311. doi: [10.1016/S0965-9978\(98\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00093-3).
- [2] KIRK J C, DARDEN S, MAJUMDER U, *et al*. Forty years of digital SAR and slow GMTI technology[C]. 2014 IEEE Radar Conference, Cincinnati, USA, 2014: 64–69. doi: [10.1109/RADAR.2014.6875556](https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.6875556).
- [3] HENDERSON F M and LEWIS A J. Principles and Applications of Imaging Radar[M]. 3rd ed. John Wiley and Sons, 1998.
- [4] MATSUOKA M and YAMAZAKI F. Use of satellite SAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes[J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(3): 975–994. doi: [10.1193/1.1774182](https://doi.org/10.1193/1.1774182).
- [5] GRAHAM L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(6): 763–768. doi: [10.1109/PROC.1974.9516](https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9516).
- [6] ZINK M, BACHMANN M, BRAUTIGAM B, *et al*. TanDEM-X: The new global DEM takes shape[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, 2(2): 8–23. doi: [10.1109/MGRS.2014.2318895](https://doi.org/10.1109/MGRS.2014.2318895).
- [7] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, *et al*. The shuttle radar topography mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): RG2004. doi: [10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183).
- [8] VAN NATIJNE A L, BOGAARD T A, VAN LEIJEN F J, *et al*. World-wide InSAR sensitivity index for landslide deformation tracking[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 111: 102829. doi: [10.1016/j.jag.2022.102829](https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102829).
- [9] BEKAERT D P S, HANDWERGER A L, AGRAM P, *et al*. InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: An application to Nepal[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 249: 111983. doi: [10.1016/j.rse.2020.111983](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111983).
- [10] MACCHIARULO V, MILILLO P, DEJONG M J, *et al*. Integrated InSAR monitoring and structural assessment of tunnelling-induced building deformations[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28(9): e2781. doi: [10.1002/stc.2781](https://doi.org/10.1002/stc.2781).
- [11] ZEBKER H A and GOLDSTEIN R M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B5): 4993–4999. doi: [10.1029/JB091iB05p04993](https://doi.org/10.1029/JB091iB05p04993).
- [12] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, *et al*. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364(6433): 138–142. doi: [10.1038/364138a0](https://doi.org/10.1038/364138a0).
- [13] ZEBKER H A and VILLASENOR J. Decorrelation in interferometric radar echoes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950–959. doi: [10.1109/36.175330](https://doi.org/10.1109/36.175330).
- [14] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, *et al*. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333–382. doi: [10.1109/5.838084](https://doi.org/10.1109/5.838084).
- [15] ROSEN P A, HENSLEY S, WHEELER K, *et al*. UAVSAR: A new NASA airborne SAR system for science and technology research[C]. 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, USA, 2006: 8. doi: [10.1109/RADAR.2006.1631770](https://doi.org/10.1109/RADAR.2006.1631770).
- [16] CHANG Zhanqiang, ZHANG Jianbo, GONG Huili, *et al*. ‘Maximal effective baseline’ for conventional SAR interferometry[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(24): 5603–5615. doi: [10.1080/01431160701227646](https://doi.org/10.1080/01431160701227646).
- [17] KRIEGER G and MOREIRA A. Spaceborne Interferometric and Multistatic SAR Systems[M]. CHERNIAKOV M. Bistatic Radar: Emerging Technology. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008: 95–158. doi: [10.1002/9780470985755.ch4](https://doi.org/10.1002/9780470985755.ch4).
- [18] 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. doi: [10.1109/JPROC.2009.2038948](https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2038948).
- [19] KRIEGER G, MOREIRA A, FIEDLER H, *et al*. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and*

- Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3317–3341. doi: [10.1109/TGRS.2007.900693](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900693).
- [20] ROCCA F. Modeling interferogram stacks[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(10): 3289–3299. doi: [10.1109/TGRS.2007.902286](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.902286).
- [21] PARIZZI A, CONG Xiaoying, and EINEDER M. First results from multifrequency interferometry. A comparison of different decorrelation time constants at L, C and X band[C]. Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy, 2009.
- [22] HORST S, CHRONE J, DEACON S, *et al.* NASA's surface deformation and change mission study[C]. 2021 IEEE Aerospace Conference (50100), Big Sky, USA, 2021: 1–19. doi: [10.1109/AERO50100.2021.9438290](https://doi.org/10.1109/AERO50100.2021.9438290).
- [23] KELLNDORFER J, CARTUS O, LAVALLE M, *et al.* Global seasonal Sentinel-1 interferometric coherence and backscatter data set[J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 73. doi: [10.1038/s41597-022-01189-6](https://doi.org/10.1038/s41597-022-01189-6).
- [24] HANSSEN R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis[M]. Dordrecht: Springer, 2001. doi: [10.1007/0-306-47633-9](https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9).
- [25] RODRIGUEZ E and MARTIN J M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars[J]. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, 1992, 139(2): 147–159. doi: [10.1049/ip-f-2.1992.0018](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1992.0018).
- [26] BAMLER R and HARTL P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Inverse Problems*, 1998, 14(4): R1–R54. doi: [10.1088/0266-5611/14/4/001](https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001).
- [27] TREUHAFT R N and SIQUEIRA P R. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar[J]. *Radio Science*, 2000, 35(1): 141–177. doi: [10.1029/1999RS900108](https://doi.org/10.1029/1999RS900108).
- [28] BAMLER R and JUST D. Phase statistics and decorrelation in SAR interferograms[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo, Japan, 1993: 980–984. doi: [10.1109/IGARSS.1993.322637](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1993.322637).
- [29] BILLINGS S A. Parameter estimation: Principles and problems[J]. *Electronics and Power*, 1981, 27(5): 413. doi: [10.1049/ep.1981.0202](https://doi.org/10.1049/ep.1981.0202).
- [30] JOUGHIN I R, WINEBRENNER D P, and PERCIVAL D B. Probability density functions for multilook polarimetric signatures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3): 562–574. doi: [10.1109/36.297975](https://doi.org/10.1109/36.297975).
- [31] 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. doi: [10.1109/36.312890](https://doi.org/10.1109/36.312890).
- [32] TOUZI R and LOPES A. Statistics of the Stokes parameters and of the complex coherence parameters in one-look and multilook speckle fields[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 519–531. doi: [10.1109/36.485128](https://doi.org/10.1109/36.485128).
- [33] TURNER II B L, LAMBIN E F, and REENBERG A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20666–20671. doi: [10.1073/pnas.0704119104](https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104).
- [34] WANG Yanzhao, SUN Yonghua, CAO Xuyue, *et al.* A review of regional and global scale land use/land cover (LULC) mapping products generated from satellite remote sensing[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 206: 311–334. doi: [10.1016/j.isprsjprs.2023.11.014](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.11.014).
- [35] KARRA K, KONTGIS C, STATMAN-WEIL Z, *et al.* Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning[C]. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021: 4704–4707. doi: [10.1109/IGARSS47720.2021.9553499](https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499).
- [36] ROSEN P A, GURROLA E, SACCO G F, *et al.* The InSAR scientific computing environment[C]. 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Nuremberg, Germany, 2012: 730–733.
- [37] FATTAHI H, AGRAM P, and SIMONS M. A network-based enhanced spectral diversity approach for tops time-series analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(2): 777–786. doi: [10.1109/TGRS.2016.2614925](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2614925).
- [38] PEPE A and LANARI R. On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2374–2383. doi: [10.1109/TGRS.2006.873207](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873207).
- [39] 李楠, 丛琳, 陈重华, 等. 多约束条件分布式InSAR编队构形工程优化方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(12): 2440–2447. doi: [10.11947/j.AGCS.2022.20210381](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2022.20210381).
- LI Nan, CONG Lin, CHEN Chonghua, *et al.* An engineering optimization method for distributed spaceborne InSAR formation configuration based on multiple constraints[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(12): 2440–2447. doi: [10.11947/j.AGCS.2022.20210381](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2022.20210381).
- [40] 李楠, 温俊健, 刘艳阳, 等. L波段差分干涉SAR卫星严格回归轨道优化设计方法[J]. 测绘学报, 2024, 53(10): 1873–1880. doi: [10.11947/j.AGCS.2024.20230250](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2024.20230250).
- LI Nan, WEN Junjian, LIU Yanyang, *et al.* A strictly-regressive orbit optimization algorithm for L-band differential interferometric SAR satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(10): 1873–1880. doi: [10.11947/j.AGCS.2024.20230250](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2024.20230250).

- [41] SCHWEIGHART S A and SEDWICK R J. High-fidelity linearized J_2 model for satellite formation flight[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2002, 25(6): 1073–1080. doi: [10.2514/2.4986](#).
- [42] 邵凯, 张厚喆, 秦显平, 等. 分布式InSAR编队卫星精密绝对和相对轨道确定[J]. *测绘学报*, 2021, 50(5): 580–588. doi: [10.11947/j.AGCS.2021.20200415](#).
SHAO Kai, ZHANG Houzhe, QIN Xianping, *et al.* Precise absolute and relative orbit determination for distributed InSAR satellite system[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(5): 580–588. doi: [10.11947/j.AGCS.2021.20200415](#).
- [43] 邓凯凯, 禹卫东, 张衡, 等. 未来星载SAR技术发展趋势[J]. *雷达学报*, 2020, 9(1): 1–33. doi: [10.12000/JR20008](#).
DENG Yunkai, YU Weidong, ZHANG Heng, *et al.* Forthcoming spaceborne SAR development[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 1–33. doi: [10.12000/JR20008](#).
- [44] RINCON R F, VEGA M A, BUENFIL M, *et al.* NASA's L-band digital beamforming synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3622–3628. doi: [10.1109/TGRS.2011.2157971](#).
- [45] SCHAEFER C, HEER C, and LUDWIG M. X-band demonstrator for receive-only frontend with digital beamforming[C]. 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 1–4.
- [46] WANG Wei, WANG Robert, DENG Yunkai, *et al.* An improved processing scheme of digital beam-forming in elevation for reducing resource occupation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(3): 309–313. doi: [10.1109/LGRS.2015.2508098](#).
- [47] QIU Jinsong, ZHANG Zhimin, WANG Robert, *et al.* A novel weight generator in real-time processing architecture of DBF-SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5204915. doi: [10.1109/TGRS.2021.3067882](#).
- [48] ZHAO Qingchao, ZHANG Yi, WANG Wei, *et al.* On the frequency dispersion in DBF SAR and digital scalloped beamforming[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(5): 3619–3632. doi: [10.1109/TGRS.2019.2958863](#).
- [49] ZHOU Yashi, WANG Wei, CHEN Zhen, *et al.* Digital beamforming synthetic aperture radar (DBSAR): Experiments and performance analysis in support of 16-channel airborne X-band SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(8): 6784–6798. doi: [10.1109/TGRS.2020.3027691](#).
- [50] DOERRY A W. SAR processing with non-linear FM chirp waveforms[R]. SAND2006-7729, 2006.
- [51] ZHANG Yongwei, WANG Wei, WANG Robert, *et al.* A novel NLFM waveform with low sidelobes based on modified Chebyshev window[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(5): 814–818. doi: [10.1109/LGRS.2019.2930817](#).
- [52] JIN Guodong, DENG Yunkai, WANG Robert, *et al.* An advanced nonlinear frequency modulation waveform for radar imaging with low sidelobe[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 6155–6168. doi: [10.1109/TGRS.2019.2904627](#).
- [53] JIN Guodong, LIU Kaiyu, DENG Yunkai, *et al.* Nonlinear frequency modulation signal generator in LT-1[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(10): 1570–1574. doi: [10.1109/LGRS.2019.2905359](#).
- [54] WANG Wei, WANG Robert, ZHANG Zhimin, *et al.* First demonstration of airborne SAR with nonlinear FM chirp waveforms[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(2): 247–251. doi: [10.1109/LGRS.2015.2508102](#).
- [55] DENG Yunkai and WANG R. Exploration of advanced bistatic SAR experiments[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(1): 1–9. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14026](#).
- [56] WANG Robert, LIU Kaiyu, LIU Dacheng, *et al.* LuTan-1: An innovative L-band spaceborne bistatic interferometric synthetic aperture radar mission[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, 13(2): 58–78. doi: [10.1109/MGRS.2024.3478761](#).
- [57] LIANG Da, LIU Kaiyu, ZHANG Heng, *et al.* The processing framework and experimental verification for the noninterrupted synchronization scheme of LuTan-1[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(7): 5740–5750. doi: [10.1109/TGRS.2020.3024561](#).
- [58] 吴一戎, 洪文, 张冰尘, 等. 稀疏微波成像研究进展(科普类)[J]. *雷达学报*, 2014, 3(4): 383–395. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14105](#).
WU Yirong, HONG Wen, ZHANG Bingchen, *et al.* Current developments of sparse microwave imaging[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(4): 383–395. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14105](#).
- [59] LIANG Da, LIU Kaiyu, ZHANG Heng, *et al.* A high-accuracy synchronization phase-compensation method based on Kalman filter for bistatic synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(10): 1722–1726. doi: [10.1109/LGRS.2019.2952475](#).
- [60] CAI Yonghua, WANG Robert, YU Weidong, *et al.* An advanced approach to improve synchronization phase accuracy with compressive sensing for LT-1 bistatic spaceborne SAR[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4621. doi: [10.3390/rs14184621](#).
- [61] WANG Jili, LI Hongxiang, ZHANG Heng, *et al.*

- Demonstration of single-pass spaceborne multi-baseline InSAR result of Hongtu-1 constellation[C]. IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024: 10881–10884. doi: [10.1109/IGARSS53475.2024.10642742](https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10642742).
- [62] DENG Yunkai, ZHANG Heng, LIU Kaiyu, *et al.* Hongtu-1: The first spaceborne single-pass multibaseline SAR interferometry mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 5202518. doi: [10.1109/TGRS.2024.3523299](https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3523299).
- [63] LIANG Da, ZHANG Heng, CAI Yonghua, *et al.* An advanced phase synchronization scheme based on coherent integration and waveform diversity for bistatic SAR[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 981. doi: [10.3390/rs13050981](https://doi.org/10.3390/rs13050981).
- [64] CAI Yonghua, LI Junfeng, YANG Qingyue, *et al.* First demonstration of RFI mitigation in the phase synchronization of LT-1 bistatic SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5217319. doi: [10.1109/TGRS.2023.3310613](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3310613).
- [65] CAI Yonghua, LI Junfeng, WANG Yachao, *et al.* Detecting and removing phase jitters for the phase synchronization of LT-1 bistatic SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2023, 20: 4011705. doi: [10.1109/LGRS.2023.3318125](https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3318125).
- [66] CHEN Yuesheng, NAN Yijiang, CAI Yonghua, *et al.* Joint narrowband RFI suppression and phase synchronization signal retrieval for BiSAR via robust principal component analysis[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 17461–17470. doi: [10.1109/JSTARS.2024.3419256](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3419256).
- [67] CHEN Yuesheng, CAI Yonghua, NAN Yijiang, *et al.* An advanced RFI mitigation scheme for phase synchronization of bistatic SAR based on blind source separation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5222513. doi: [10.1109/TGRS.2023.3333372](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3333372).
- [68] 蔡永华. 星载双基多通道SAR时相同步与误差校正技术研究[D]. [博士学位], 中国科学院大学, 2024.
- CAI Yonghua. Research on time phase synchronization and error correction technology for spaceborne bistatic multichannel SAR[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2024.
- [69] BERRADA BABY H, GOLÉ P, and LAVERGNAT J. A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements[J]. *Radio Science*, 1988, 23(6): 1023–1038. doi: [10.1029/RS023i006p01023](https://doi.org/10.1029/RS023i006p01023).
- [70] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, *et al.* The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999–2049. doi: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).
- [71] YANG Qingyue, ZHANG Yunjun, and WANG R. Heterogeneous InSAR tropospheric correction based on local texture correlation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5203814. doi: [10.1109/TGRS.2024.3356749](https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3356749).
- [72] GOMBA G, PARIZZI A, DE ZAN F, *et al.* Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: The split-spectrum method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(3): 1446–1461. doi: [10.1109/TGRS.2015.2481079](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2481079).
- [73] LIANG Cunren, AGRAM P, SIMONS M, *et al.* Ionospheric correction of InSAR time series analysis of C-band Sentinel-1 TOPS data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 6755–6773. doi: [10.1109/TGRS.2019.2908494](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2908494).
- [74] NING Jiaqi, WANG Robert, WANG Jili, *et al.* Ionospheric correction of ALOS-2 full-aperture ScanSAR interferometric data for surface deformation measurement in Beijing[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(19): 5685–5688. doi: [10.1049/joe.2019.0331](https://doi.org/10.1049/joe.2019.0331).
- [75] LI Shijin, ZHANG Shubi, LI Tao, *et al.* Modeling the optimal baseline for a spaceborne bistatic SAR system to generate DEMs[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(2): 108. doi: [10.3390/ijgi9020108](https://doi.org/10.3390/ijgi9020108).
- [76] HU Fengming, XU Feng, WANG Robert, *et al.* Conceptual study and performance analysis of TanDEM multi-antenna spaceborne SAR interferometry[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2024, 4: 0137. doi: [10.34133/remotesensing.0137](https://doi.org/10.34133/remotesensing.0137).
- [77] WU Zhipeng, WANG Teng, WANG Yingjie, *et al.* Deep learning for the detection and phase unwrapping of mining-induced deformation in large-scale interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5216318. doi: [10.1109/TGRS.2021.3121907](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3121907).
- [78] 江利明, 邵益, 周志伟, 等. 智能化InSAR数据处理研究进展、挑战与展望[J]. *测绘学报*, 2024, 53(6): 1037–1056. doi: [10.11947/j.AGCS.2024.20230440](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2024.20230440).
- JIANG Liming, SHAO Yi, ZHOU Zhiwei, *et al.* A review of intelligent InSAR data processing: Recent advancements, challenges and prospects[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(6): 1037–1056. doi: [10.11947/j.AGCS.2024.20230440](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2024.20230440).
- [79] 陈军, 刘万增, 武昊, 等. 智能化测绘的基本问题与发展方向[J]. *测绘学报*, 2021, 50(8): 995–1005. doi: [10.11947/j.AGCS.2021.20210235](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2021.20210235).
- CHEN Jun, LIU Wanzeng, WU Hao, *et al.* Smart surveying and mapping: Fundamental issues and research agenda[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 995–1005. doi: [10.11947/j.AGCS.2021.20210235](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2021.20210235).

- [80] LÓPEZ-DEKKER P, BIGGS J, CHAPRON B, *et al.* The Harmony mission: End of phase-0 science overview[C]. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021: 7752–7755. doi: [10.1109/IGARSS47720.2021.9554896](https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554896).
- [81] 唐新明, 李涛, 张祥, 等. L波段差分干涉SAR卫星在轨应用关键参数测试分析[J]. 测绘学报, 2024, 53(10): 1863–1872. doi: [10.11947/j.AGCS.2024.20230240](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2024.20230240).
TANG Xinming, LI Tao, ZHANG Xiang, *et al.* In-orbit application parameters test and analysis of L-band differential interferometric SAR satellite constellation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(10): 1863–1872. doi: [10.11947/j.AGCS.2024.20230240](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2024.20230240).
- [82] 许兵, 朱焱, 李志伟, 等. 国产卫星时序InSAR形变监测精度分析[J]. 测绘学报, 2024, 53(10): 1930–1941. doi: [10.11947/j.AGCS.2024.20230572](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2024.20230572).
XU Bing, ZHU Yan, LI Zhiwei, *et al.* Analysis of InSAR time-series deformation monitoring accuracy of domestic satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(10): 1930–1941. doi: [10.11947/j.AGCS.2024.20230572](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2024.20230572).

作者简介

王祎笛, 博士生, 主要研究方向为干涉SAR信号处理。

王 宇, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为新体制航天成像雷达系统技术、微波雷达遥感图像处理和深空微波探测。

张云俊, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为干涉SAR信号处理、固体地球物理、地质灾害。

梁 达, 博士, 主要研究方向为双基合成孔径雷达同步与成像处理、微波电磁散射仿真。

蔡永华, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为分布式SAR同步与成像处理。

吴一戎, 研究员, 中国科学院院士, 主要研究方向为微波成像理论与技术、遥感数据信号与图像处理、地理空间信息技术。

(责任编辑: 于青)