

一种双星分布式干涉SAR流场测量的基线设计方法

范黄江 张庆君* 刘磊 王志斌 王涛

(中国空间技术研究院遥感卫星总体部 北京 100094)

摘要: 传统星载SAR单基线顺轨干涉体制因基线固定难以满足复杂海况下海面流场测量需求。针对分布式SAR卫星系统多基线协同测流基线设计的问题,该文在干涉相干性与测流敏感性双重约束下,提出一种面向海流测量的多基线优化设计方法,并推导了多基线加权最小二乘融合反演海面流场的理论精度上限。结果表明,该方法可显著降低径向流速误差;当基线数量增加到一定程度后,精度逼近理论上限。不同海况下,融合误差均满足0.1 m/s的测速精度要求,且X频段和C频段需求的短基线较Ku频段更长。该方法可以有效支撑分布式干涉SAR海流测量卫星系统设计。

关键词: 分布式SAR; 顺轨干涉; 多基线优化; 海流测量; 加权最小二乘

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-14

DOI: 10.12000/JR26065

CSTR: 32380.14.JR26065

引用格式: 范黄江,张庆君,刘磊,等.一种双星分布式干涉SAR流场测量的基线设计方法[J].雷达学报(中英文),待出版. doi: 10.12000/JR26065.

Reference format: FAN Huangjiang, ZHANG Qingjun, LIU Lei, *et al.* A baseline design method for interferometric SAR ocean current measurements using a dual-satellite distributed system[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR26065.

A Baseline Design Method for Interferometric SAR Ocean Current Measurements Using a Dual-satellite Distributed System

FAN Huangjiang ZHANG Qingjun* LIU Lei WANG Zhibin WANG Tao

(Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Due to their fixed baselines, traditional single-baseline spaceborne along-track interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) systems struggle to meet the measurement requirements for ocean surface current, particularly under complex sea conditions. To overcome this limitation and optimize multi-baseline designs for distributed SAR satellite systems, this study introduces a multi-baseline optimization method for ocean current measurements. The method operates under the dual constraints of interferometric coherence and current measurement sensitivity. The study also derives the theoretical upper bound of accuracy for multi-baseline weighted least squares fusion inversion of ocean surface current. Results show that this method significantly reduces radial current velocity error, with accuracy approaching the theoretical upper limit as the number of baselines increases. Under various sea conditions, the fusion error meets the required velocity measurement accuracy of 0.1 m/s. Notably, the X and C-band require longer baselines than the Ku-band. This method effectively supports the design of distributed interferometric SAR satellite systems for ocean current measurements.

收稿日期: 2026-03-25; 改回日期: 2026-06-15; 网络出版: 2026-xx-xx

*通信作者: 张庆君 ztzhangqj@163.com

*Corresponding Author: ZHANG Qingjun, ztzhangqj@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(62031005), 国家民用航天计划(D040305,D030103)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62031005), Civilian Space Programme of China (No: D040305), Civilian Space Programme of China (D030103,D030103)

责任主编: 王岩 Corresponding Editor: WANG Yan

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

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

Key words: Distributed SAR; Along-track interferometry; Multi-baseline optimization; Ocean current measurement; Weighted least squares

1 引言

海洋表面流场是海洋动力环境的核心参量之一,在海洋动力学研究、气候变化监测、海上搜救及海洋生态系统分析等领域具有重要科学价值和应用意义。车载声学多普勒流速剖面仪、海流浮标及高频地波雷达等传统观测手段虽然能够获取局地或区域尺度的海流信息,但仍存在空间覆盖范围有限、观测时效性不足或运维成本较高等问题^[1-3]。随着星载传感器技术的不断发展,卫星遥感为海洋流场的大范围、连续化监测提供了新的技术手段。

星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种主动式微波遥感传感器,具有全天时、全天候和宽幅成像能力^[4]。SAR回波信号中包含由海面运动引起的多普勒频移信息,因此可为全球及区域尺度海流观测提供新的技术途径^[5]。目前,基于星载SAR的海面流速测量方法主要包括多普勒异常法(Doppler Centroid Anomaly, DCA)^[6]和顺轨干涉法(Along-Track Interferometric SAR, ATI-SAR)^[7]。其中,DCA法利用单星单通道观测即可估计海面径向速度,但其空间分辨率和测流精度通常受系统多普勒误差、海浪轨道速度和地球物理多普勒模型精度等因素限制。相比之下,ATI-SAR技术通过精确测量沿航向两接收天线之间的干涉相位差,反演海面径向速度分量,具有高分辨率和高精度测流的潜力^[8]。

国际上目前相继开展了ATI研究,Goldstein等人^[7]首次利用机载ATI-SAR系统实现了加利福尼亚湾的海面流速观测,验证了该技术的可行性。Romeiser等人^[9-11]利用TerraSAR-X/TanDEM-X双星数据,在易北河口、德国湾等海域开展了系统性海面流速反演研究,首次实现了星载ATI对复杂近海动力过程的高分辨率观测。加拿大Radarsat-2及中国高分三号等任务也已开展单星单基线或双星单基线ATI海流测量技术的在轨验证与应用研究^[12,13]。总体来看,目前已开展在轨验证和应用研究的ATI海面流速测量主要仍以单星双天线或双星单基线成像干涉体制为主。

然而,ATI海面流速测量精度与沿轨基线长度、海面相干性和海况条件密切相关。对于单基线ATI系统而言,固定基线难以同时满足不同海况下的相干性约束和测速敏感性需求。在高风速、强波浪等复杂海况下,较长的沿轨基线可能导致海面时间去相干增强,使干涉相干性急剧下降,甚至难以稳定

获取干涉相位;而在低海况或弱流速条件下,较短基线对应的干涉相位响应较弱,海流信号可能被系统热噪声和相位估计误差淹没,进而导致测速精度下降。因此,单基线ATI系统难以在单次过境条件下同时适应多种海况并实现高精度海面流速测量。

为突破单基线ATI系统在基线长度、海面相干性和测速敏感性之间的固有矛盾,国际上开始由单基线ATI成像干涉向多基线、多视向干涉SAR观测体制发展。有代表性的任务是欧洲提出的Wavemill,该系统采用斜视顺轨干涉SAR体制,通过前视/后视的多视向观测获取海面运动信息,为二维海面流矢量反演提供了新的技术思路^[14]。在此基础上,英国国家海洋中心等机构进一步提出了SEASTAR任务。SEASTAR面向近岸海域、陆架海和边缘冰区的小尺度海洋动力过程,计划利用单颗卫星搭载多波束斜视ATI-SAR载荷,同时获取总表层流矢量和海面风矢量。其载荷设计包括沿卫星飞行方向前后约 $\pm 45^\circ$ 的两个斜视SAR波束以及一个侧视宽波束,并结合多极化观测,实现单次过境条件下海面流场两个水平分量的同步反演^[15]。此外,Harmony由两颗被动接收SAR卫星组成,与Sentinel-1卫星编队飞行,利用Sentinel-1作为照射源,构成多静态SAR观测系统。通过编队构型变化,Harmony可形成多视角、多基线干涉观测能力,并服务于海表速度、海气相互作用、冰川运动和地表形变等动态过程探测^[16]。

与此同时,国内外学者也围绕多基线ATI系统设计与性能分析开展了相关研究^[17,18]。Sletten等人^[19]提出一种超宽带多孔径顺轨干涉SAR系统,通过单星子孔径划分形成多基线观测能力,但该类体制受限于平台尺度,等效基线相对较短,难以满足低海况弱流速条件下的高灵敏度测量需求;Guo等人^[20]提出了一种通过双天线发射,多星接收的MIMO体制SAR系统,实现了多角度的海面观测,但ATI基线长度固定,无法适用多海况;Bamler等人^[21]从Cramér-Rao下界出发推导了干涉相位估计的理论精度极限,为多基线优化设计提供了基线长度设计约束,但未开展多基线设计;胡瑞贤等人^[22]在地面动目标检测(Ground Moving Target Indication, GMTI)场景下建立了多基线ATI的最优搜索方法,但不能适配海面流场的测量;王祎笛等人^[23]介绍了超长基线干涉SAR的应用前景,可为长基线干涉构型设计提供参考,但尚未形成针对海面流速测量的多基线优化方法。

综上, 现有多基线ATI体制研究多集中于固定长度多基线系统设计、任务概念论证或一般性能分析, 尚未充分考虑不同海况下海面时间相干性、测速敏感性和干涉相位估计精度之间的耦合约束, 难以保证在单次过境条件下实现多海况适应的高精度海面流速测量。因此, 有必要面向分布式SAR卫星系统开展多基线优化设计研究, 建立基线长度、海面相干性、流速反演精度和海况条件之间的定量关系, 为未来高精度二维海面流场观测卫星系统设计提供理论依据。本文理论分析建立在协同编队条件下短时间窗参考海面信息可获得的前提下, 参考场构建与准同步观测机制是该类混合基线测流系统实现的关键约束之一。

本文旨在面向海面流速测量需求, 开展分布式SAR卫星系统多基线优化设计研究。通过分析不同基线配置下的测速精度、相干性保持能力和海况适应性, 本文在兼顾图像干涉相干性与流速测量敏感性的双重约束下, 提出一种面向海流测量的分布式卫星系统多基线优化设计方法。该方法可为不同海况条件下的单次过境高精度海面流速测量提供优化基线配置方案, 从而为未来分布式ATI-SAR海洋动力观测任务设计提供支撑。

2 分布式SAR卫星流场测量多基线优化设计方法

2.1 针对流场测量的分布式SAR卫星

分布式SAR卫星系统是一种“多发多收、多基线”的高精度海面径向速度测量体制, 具备多基线干涉能力^[24]。在分布式SAR系统中, 增加接收孔径(即增加基线数量 N)可以显著降低随机干涉相位噪声对最终流速测量的影响。假设系统包含 M 颗卫星, 形成 N 条有效干涉基线($N \geq M$), 一发 M 收分布式卫星几何构型如图1所示。对于同一海面分辨单元, 考虑到不同基线观测可能共享平台误差及部分环境扰动, 其误差项之间可能存在相关性, 因此

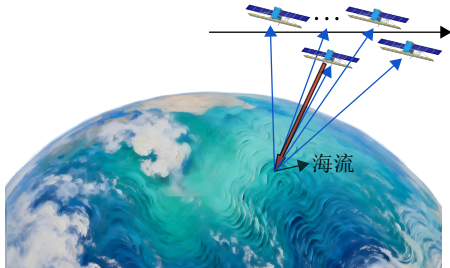


图1 一发 M 收星座在轨测流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of on-orbit current measurement of the M receiving constellation

径向流速估计误差一般不满足严格独立假设, 径向速度观测值 $v_{r,i}$ 也存在一定耦合。本文所讨论的多基线干涉海流测量方案, 默认系统具备协同观测能力, 即可在足够短的时间窗内获取与SAR干涉测量相匹配的参考海面信息。该参考信息可以来自同平台多载荷协同观测、双星/星座准同步观测, 或与海洋动力模型、数据同化结合后的参考场重建。本文重点讨论在上述前提下的基线长度设计、相干性约束和流速测量精度的上限, 而不对参考海面信息获取进行赘述, 具体可参考SWOT (Surface Water and Ocean Topography)^[25]。

具有沿轨道与跨轨道的基线的斜视干涉测量与普通顺轨/跨轨干涉测量存在区别, 首先对混合基线斜视干涉进行分析, 如图2所示, 在轨道坐标系下, $S_1(t)$, $S_2(t)$ 为 t 时刻主、辅卫星位置, $S_2(t+\tau)$ 为经过时间基线 τ 后辅卫星位置, 基线矢量为 $\mathbf{B} = [B_x \ B_y \ B_z]$, 斜视工况下相比正侧视工况, 有效顺轨基线 B_{AT} 与时间基线减小。

$$B_{AT} = B_x - B_y \tan \psi \quad \tau = B_{AT}/V_s \quad (1)$$

其中, ψ 为雷达波束中心线与正侧视方向投影在水平面上的夹角, V_s 为卫星速度。

2.2 海面流速测量及误差估计方法

(1) 海面流速测量方法

分布式SAR卫星星座系统通过在沿航向方向形成顺轨干涉基线, 利用ATI技术提取海面流场速度。对于第 i 条基线, 顺轨干涉相位与海面径向流速的映射关系为^[7]

$$\hat{\phi}_i = \frac{2\pi B_{AT,i}}{\lambda V_s} \cdot v_{r,i} + \phi_{\text{noise},i} \quad (2)$$

其中, λ 为雷达波长, $\phi_{\text{noise},i}$ 为系统相位噪声。

由式(2)可以得到第 i 条基线径向流速估计量:

$$\hat{v}_{r,i} = \frac{\lambda V_s}{2\pi B_{AT,i}} \cdot \hat{\phi}_i \quad (3)$$

(2) 海面流速测量误差分解

对式(3)进行全微分, 考虑干涉相位误差 $\delta\phi$ 、

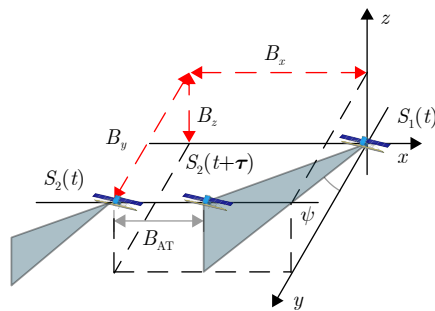


图2 混合基线斜视卫星几何示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the geometry of a hybrid baseline strabismus satellite

基线测量误差 δB_{AT} 、卫星速度误差 δV_s 3项误差来源, 径向流速总误差方差为^[26]

$$\sigma_{v_i}^2 = \underbrace{\left(\frac{\lambda V_s}{2\pi B_{AT,i}}\right)^2 \sigma_{\phi}^2}_{\text{①相位噪声}} + \underbrace{\left(\frac{v_r}{B_{AT,i}}\right)^2 \sigma_B^2}_{\text{②基线误差}} + \underbrace{\left(\frac{v_r}{V_s}\right)^2 \sigma_V^2}_{\text{③速度误差}} \quad (4)$$

如式(4)所示, 径向流速总误差方差将总误差分解为3项独立贡献。其中式(4)第①项来自干涉相位噪声, Romeiser等人^[11]基于TerraSAR-X实测数据的研究指出, 在系统噪声水平一定的情况下, 流速反演精度 σ_{v_i} 直接取决于基线长度对干涉相位噪声的缩放效应:

$$\sigma_{v_i} = \frac{\lambda V_s}{2\pi B_{AT,i}} \sigma_{\phi_i} + O(\sigma_{v_i}^n) \quad (5)$$

其中, $O(\sigma_{v_i}^n)$ 为残余误差(海面高程测量误差干涉相位导致的流速测量误差)。在同质基线近似(各基线相干性相近)下, 多基线融合流速反演精度 σ_{fused} 可表示为单基线流速反演精度 σ_{single} 和多基线数量 N 的关系:

$$\sigma_{\text{fused}} \approx \frac{\sigma_{\text{single}}}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

干涉相位误差 σ_{ϕ_i} 的估计量是通过两天线回波的相关性获得的, 主要受限于干涉总相干系数 $\gamma_{\text{total},i}$ 和多视数 N_L ^[21]。干涉相位误差的最大似然估计如式(7)计算。

$$\sigma_{\phi_i} \approx \sqrt{\frac{1}{2N_L} \cdot \frac{1 - \gamma_{\text{total},i}^2}{\gamma_{\text{total},i}^2}} \quad (7)$$

由式(5)和式(7)可以计算得到第 i 条基线径向流速测量精度:

$$\sigma_{v_i} = \frac{\lambda V_s}{2\pi B_{AT,i}} \sqrt{\frac{1}{2N_L} \cdot \frac{1 - \gamma_{\text{total},i}^2}{\gamma_{\text{total},i}^2}} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知, 干涉总相干系数 $\gamma_{\text{total},i}$ 越大, 干涉相位标准差 σ_{ϕ_i} 越小, 流速测量精度 σ_{v_i} 越高。根据式(8)输入第4节的仿真参数, 不同多视数流场测量误差随相干系数变化如图3所示, 在不同多视数条件下, 流场测量误差随干涉总相干系数的增大而单调减小; 在相同相干系数下, 多视数越多, 流速测量误差越小。因此, 提高海面流速反演精度需要提高相干系数。

(3) 相干系数影响因素

在分布式SAR卫星系统中, 不同基线长度对应不同的时间延迟, 进而导致各基线干涉通道的图像相干性存在差异, 通常用干涉相干性 γ_{total} 来描述这一差异。根据多基线ATI-SAR误差传递模型, 总相干性可表达为各去相干因子的乘积^[20]。其中, 在

用于海面观测的分布式SAR卫星系统中, 时间去相干 γ_{temp} 和信噪比去相干 γ_{SNR} 是随海况变化的主要影响因子, 计算式如式(9)和式(10)所示, 顺轨基线越长, 前、后天线成像时延越大, 时间去相干引入的相位噪声越严重^[20], 海面相干性受海况影响显著。海况升高虽能改善信噪比去相干, 但会使得海面随机运动加剧, 从而导致总体相干性不断降低。Carande^[27]的研究表明, 海面作为随机分布且快速变化的分布式目标, 其微波散射特性随时间变化, 相干时间 τ_c 通常仅在毫秒量级。 γ_{SNR} 主要受到噪声等效后向散射系数(Noise Equivalent Sigma Zero, NESZ)和海面散射系数 σ^0 影响:

$$\gamma_{\text{temp}} = \exp\left(-\frac{B_{AT}^2}{V_s^2 \tau_c^2}\right) \quad (9)$$

$$\gamma_{\text{SNR}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\text{NESZ}_1}{\sigma^0}} \sqrt{1 + \frac{\text{NESZ}_2}{\sigma^0}}} \quad (10)$$

其中, τ_c 为海面散射的相干时间, $\tau_c = \lambda / (2\sqrt{2}\pi \cdot 0.068U_{10})$, U_{10} 表示10 m高度的海面风速; NESZ₁和NESZ₂分别是两个接收通道的噪声等效后向散射系数。

除此之外, 干涉相干性还受到垂直基线去相干 γ_B 影响, 当主辅星之间垂直基线长度超过极限基线长度, 主辅图像将完全去相干无法形成干涉图像, 垂直基线去相干可以表示为^[26]

$$\gamma_B = 1 - \frac{2 \cos \theta B_{\perp} \rho_{rg}}{\lambda R} \quad (11)$$

其中, B_{\perp} 为交轨基线垂直雷达视线方向的分量, ρ_{rg} 为距离向分辨率, R 为斜距, θ 为入射角。

值得注意的是, 单基线估计流速精度存在不足, 表现为短基线测流敏感性低($B_{AT,i}$ 小导致 σ_{v_i} 大), 长基线图像相干性低($\gamma_{\text{total},i}$ 小同样导致 σ_{v_i} 大)。通

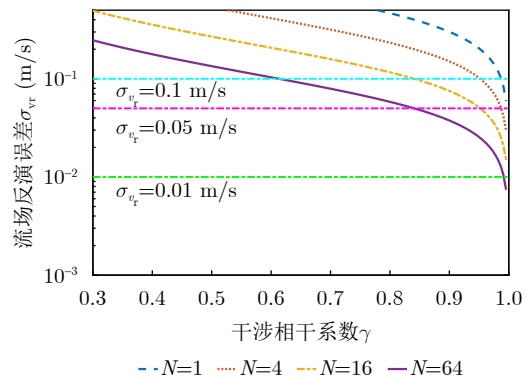


图3 不同多视数, 流场测量误差随相干系数变化

Fig. 3 OSC measurement error variation with coherence coefficient under different multi-look numbers

过平衡测流敏感性和图像相干性来优化基线长度, 但该最优值随海况变化而变化。

2.3 多基线优化设计方法

(1) 基线数量优化设计

基于最大似然估计(Maximum Likelihood Estimation, MLE)准则^[28], 多基线融合后的最优流速估计 \hat{v}_{fused} 可通过加权最小二乘法(Weighted Least Squares, WLS)获得。本文根据各基线的多视数与去相干程度分配权重 w_i , 最优速度估计公式如式(12)所示。

$$\hat{v}_{\text{fused}} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i v_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (12)$$

权重计算公式如式(13)所示。

$$w_i = \frac{1}{\sigma_{\phi_i}^2} = \frac{2N_L \gamma_i^2}{1 - \gamma_i^2} \quad (13)$$

其中, 权重 w_i 正比于各通道相干性的平方, 物理含义为相干性越高的通道在融合估计中权重越大。由此, 高海况下长基线的 γ_i 急剧下降, 权重自动趋近于零, 系统无需人工切换即可自适应退化为依赖短基线的工作模式。

引入拉格朗日乘法求解, 那么多基线融合后的理论方差为

$$\sigma_{\text{fused}}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{\phi_i}^2}} \quad (14)$$

依据式(6)提供的精度增益规律, 多基线融合精度随基线数量的增加呈 $1/\sqrt{N}$ 收敛, 为基线数量的选取提供了理论依据。多基线的设计除了基线数量, 还有基线长度需要优化设计。

(2) 短基线优化设计

分布式卫星系统通过配置短基线可以具备高海况下高精度测流能力, 当最短基线时间相干系数足够大, 满足 $\gamma_{\text{temp},1} \geq \gamma_{\text{th}}$, 则可以满足高海况下系统图像相干性的约束, 由式(9)可得短基线的最大值

$$B_{\text{AT},\min} \leq V_s \tau_c \sqrt{-\ln(\gamma_{\text{th}})} \quad (15)$$

其中, γ_{th} 为短基线相干性阈值, 保证高海况下短基线系统依然可以保持强相干性。

(3) 长基线优化设计

为了满足低海况下高精度测流能力, 分布式SAR卫星系统还需要配置长基线使得最长基线对最小可测流速产生可检测的干涉相位, 通常要求 $\phi_{\text{ATI},\min} \geq 3\sigma_{\phi}$ ^[21,29]。由式(3)和式(7)可以得到最长基线的最小值为

$$B_{\text{AT},\max} \geq \frac{3\lambda V_s}{2\pi v_{\min}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2N_L} \cdot \frac{1 - \gamma_{\text{total}}^2}{\gamma_{\text{total}}^2}} \quad (16)$$

3 一种典型分布式SAR卫星系统多基线优化设计

根据前文分布式多基线优化设计方法对卫星基线数量和长度的推导, 为了保证编队卫星在飞行状态下不发生碰撞, 且顺轨基线长时间稳定不变, 本文以交轨钟摆双星编队^[29]为典型示例, 双星轨道六根数如表1所示, 星间相对位置和基线如图4所示, 顺轨基线保持在345 m, 交轨基线在一定范围内振荡。

每个卫星配置两个天线, 其中一个卫星一发双收, 另一个卫星仅接收, 形成6根基线, 如图5所示单星分成两个子孔径(A1, A2, B1, B2), 星内基线 d_{intra} 指星上两个子孔径天线相位中心之间的顺轨基线(A1-A2, B1-B2), 星间基线 d_{inter} 指相邻卫星子孔径相位中心之间的顺轨基线(A2-B1)。设星内天线间距统一为 d_{intra} ($d_1 = d_3 = d_{\text{intra}}$), 星间距离为 d_{inter} ($d_2 = d_{\text{inter}}$), 4根接收天线沿航迹方向以A1, A2, B1, B2顺序排列, 如图5(b)所示, 则6条基线长度(A1-A2, A2-B1, B1-B2, A1-B1, A2-B2, A1-B2)为:

$$\begin{aligned} d_1 &= d_{\text{intra}}, d_2 = d_{\text{inter}}, d_3 = d_{\text{intra}}, \\ d_4 &= d_{\text{intra}} + d_{\text{inter}}, d_5 = d_{\text{intra}} + d_{\text{inter}}, \\ d_6 &= 2d_{\text{intra}} + d_{\text{inter}} \end{aligned}$$

要满足高海况下图像相干性的约束, 则短基线时间去相干应尽可能大, 满足 $\gamma_{\text{temp},1} \geq 0.99$ 。代入表2的部分参数, 由式(15)可以计算得到短基线 $d_{\text{intra}} = B_{\text{AT},\min} \leq 3.5 \text{ m}$ 。

要满足低海况下具备高精度测流能力, 则分布

表 1 交轨钟摆双星编队轨道六根数

Tab. 1 The orbital elements of the pendulum

卫星	半长轴(km)	离心率	轨道倾角(°)	近地点辐角(°)	升交点赤经(°)	平近点角(°)
主星	7133.137	0.0001	97.4	0	0	0
辅星	7133.137	0.0001	97.4	0	0.0024	0.0031

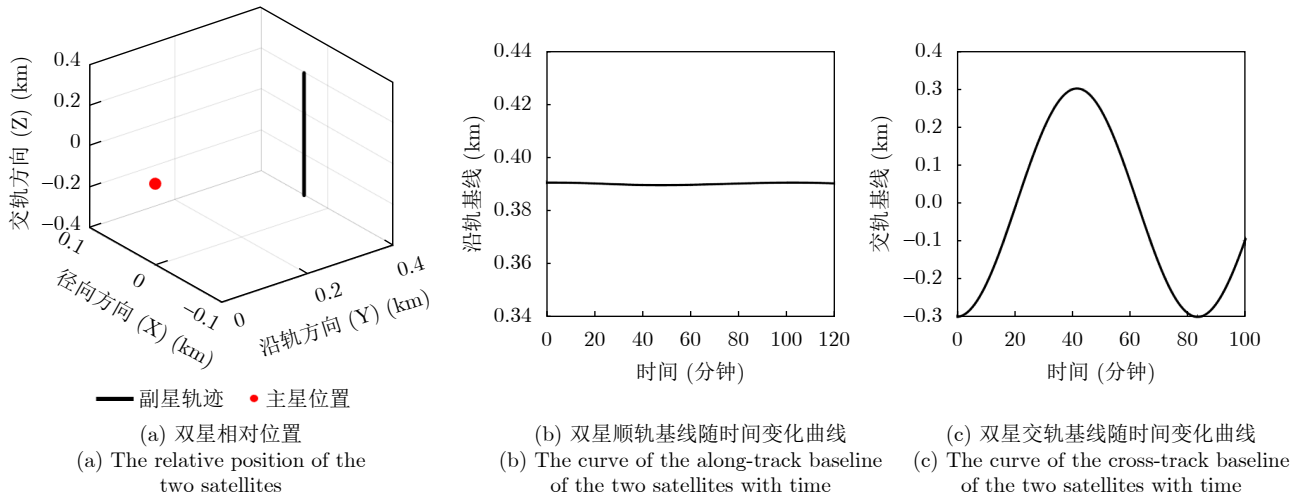


图4 一个轨道周期交轨钟摆双星相对位置和基线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of relative position and baseline of pendulum

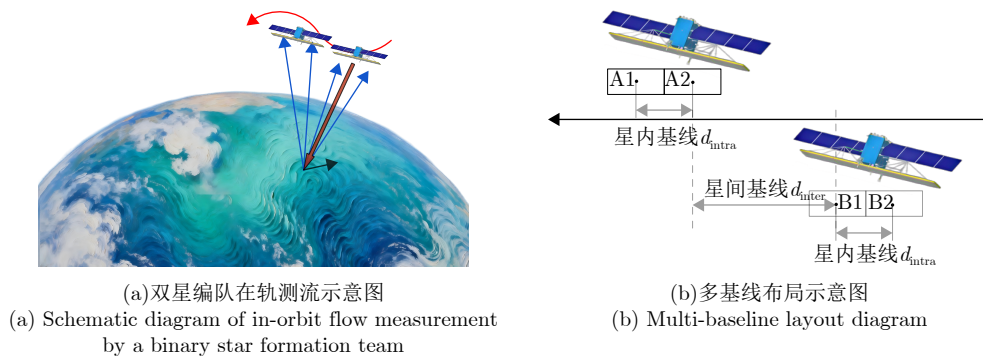


图5 一种典型分布式SAR卫星系统几何构型示意图

Fig. 5 Schematic illustration of a representative geometric configuration for a distributed SAR system

式卫星系统还需要配置长基线,进而满足低海况下系统测流敏感性的约束,这要求最长基线对最小可测流速 $v_{\min} = 0.1 \text{ m/s}$ 产生可检测的干涉相位,总相干约0.3。由式(1)和式(16)可以计算对应长基线

$$d_6 = 2d_{\text{intra}} + d_{\text{inter}} = B_{\text{AT,max}} + B_y \tan \psi \geq 343.69 \text{ m} \quad (17)$$

综合上述分析,本系统选取6条有效基线(通过“一发四收”双星编队,即A星和B星各搭载两根天线实现A1, A2和B1, B2)作为系统最优配置。该选择位于效费比曲线的拐点,在性能与工程代价之间取得合理平衡。

4 分布式SAR卫星流场测量仿真验证分析

4.1 系统参数

为验证针对海流测量的分布式卫星系统多基线优化设计方法在各种海况下的流速测量精度,通过仿真验证分布式SAR系统性能。各参数独立运行1000次蒙特卡罗实验,以均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为性能评价指标。主要仿

真参数如表2所示。高、中、低海况分别对应海面风速 $U_{10}=3 \text{ m/s}$, $U_{10}=7 \text{ m/s}$, $U_{10}=12 \text{ m/s}$,由式(9)计算对应海况下不同波段的海面相干时间。

表2 系统仿真参数
Tab. 2 System simulation parameters

参数	数值
波长 λ	0.022 m
卫星飞行速度 V_s	7400 m/s
斜视角 ψ	45°
入射角 θ_i	30°
轨道高度 H	755 km
风速 U_{10}	3~12 m/s
径向流速 v_r	0.05~2.0 m/s
海面散射系数 σ^0	-12.5~-6.2 dB
噪声等效后向散射系数 NESZ	-20 dB
等效多视数 N_L	1600
处理去相干 γ_{proc}	0.98
垂直基线去相干 γ_B	0.97

以Ku频段为例, 根据第3节计算得到的短基线不超过3.5 m, 取 $d_{\text{intra}} = 3.5$ m, 对应 $\gamma_{\text{temp},1} \approx 0.992$, 满足短基线图像相干性约束, 此时有效顺轨基线为3.5 m。根据式(17)计算得到长基线高于343.69 m, 取 $d_6 = 2d_{\text{intra}} + d_{\text{inter}} = 345$ m(留有一定设计余量), 此时系统测流敏感性满足要求, 有效顺轨基线为45 m。有效时间基线为 $\tau_i = B_{\text{AT}}/V_s$ 。在中等海况下, 对应的时间去相干系数计算结果汇总于表3, 表中物理基线长度 B_x 实际为沿航迹方向两星或者两通道间隔物理长度, 对于单星而言, 两通道间隔物理长度也就是物理基线长度 B_x 等于有效顺轨基线长度 B_{AT} ; 对于双星而言, 在斜视几何下, 物理基线长度 B_x 与有效顺轨基线长度 B_{AT} 有一个转化关系式(17)。有效顺轨基线长度以波长的倍率表示。

上述计算结果表明, 中等海况下, 单星短基线(B_1, B_3)的时间去相干几乎可以忽略($\gamma_{\text{temp}} \approx 0.992$), 而多星长基线(B_6)的时间去相干系数降至0.255。这一梯度分布特性正是多基线融合自适应加权的物理基础, 在高海况下, 系统自动向短基线倾斜; 在低海况下, 系统充分利用长基线的高测流敏感性。

4.2 多基线加权分析

由于图像相干性随基线增加单调下降而测流敏感性随基线增加单调提升, 单一基线长度无法同时满足全海况下的两类约束。为此, 将卫星多基线设计目标调整为, 以均匀分布为原则, 使6条基线在

图像相干性-测流敏感性空间内均匀覆盖, 最大化加权融合增益。

基于各通道NESZ和时间去相干模型, 分别计算3种海况下各干涉通道的总相干性, 结果如表4所示。短基线通道在全海况范围内均满足图像相干性约束($\gamma_{\text{total}} \geq 0.3$), 可在任意海况下提供有效的干涉相位观测。长基线通道 B_6 在中低海况下满足图像相干性约束, 在高海况下时间去相干严重, 总相干性低于可用阈值。这一结果与设计预期一致: B_6 的设计目标本就是针对低海况下的低流速高精度测量, 在高海况下应自动降权或切换至短基线模式。

上述结果验证了加权最小二乘方案中以总相干性为权重的必要性: 在高海况下, 由式(13)计算 B_6 通道的权重 $w_6 = 2N_L\gamma_6^2/(1 - \gamma_6^2) \approx 164.27$, 而短基线 B_1 的权重 $w_1 \approx 3839.8$, 系统自动退化为依赖短基线的工作模式, 保证了全海况下的鲁棒性。

对各通道在海面最大流速($v_{\text{max}} = 2$ m/s)条件下的干涉相位进行计算, 计算结果如表5所示, B_6 此时 $\phi_{\text{max}} = 3.47$ rad $> \pi$, 且考虑到干涉相位噪声的影响, B_6 通道在实际应用中仍存在干涉相位跳变, 需借助短基线 B_1 的无模糊干涉相位作为初始估计进行验证, 必要时采用德宇航先单基线解缠处理后校正的双基线相位解缠方法^[30,31]消除模糊。

对中等海况、标称流速($v = 0.5$ m/s)条件下, 各通道计算结果如表6所示, σ_ϕ 由式(7)计算, σ_{v_i} 由式(8)计算, 融合精度由式(14)计算。

表 3 6条基线时间去相干系数汇总表

Tab. 3 Summary of time decorrelation coefficients for six rear-view baselines

基线	天线对	物理基线长度	有效顺轨基线长度	时间基线(ms)	γ_{temp}	适用场景
B_1	A1-A2	3.5 m	159 λ	0.473	0.992	全海况, 高相干
B_2	A2-B1	338 m	1727 λ	5.135	0.377	中-低海况
B_3	B1-B2	3.5 m	159 λ	0.473	0.992	全海况, 高相干
B_4	A1-B1	341.5 m	1886 λ	5.608	0.313	中-低海况
B_5	A2-B2	341.5 m	1886 λ	5.608	0.313	中-低海况
B_6	A1-B2	345 m	2045 λ	6.081	0.255	中-低海况, 高测流敏感性

表 4 各干涉通道总相干性对比表

Tab. 4 Verification of total coherence for each interferometric channel

通道	海况 U_{10}	γ_{SNR}	γ_{temp}	γ_{total}	是否满足 ≥ 0.3
短基线(B_1)	3 m/s	0.85	1.00	0.81	✓
	7 m/s	0.93	0.99	0.88	✓
	12 m/s	0.96	0.98	0.89	✓
长基线(B_6)	3 m/s	0.85	0.78	0.63	✓
	7 m/s	0.93	0.25	0.23	×
	12 m/s	0.96	0.02	0.02	×

表 5 各通道干涉相位模糊约束对比表

Tab. 5 Verification of interferometric phase ambiguity constraints for each channel

通道	ϕ_{\max} (rad)	$\phi_{\max} < \pi$	备注
短(B_1)	0.27	√	高相干, 无模糊
中(B_2)	2.93	√	接近 π , 利用 B_1 解缠
长(B_6)	3.47	×	超出 π , 利用 B_1/B_2 逐级解缠

表 6 各通道径向流速测量精度对比表

Tab. 6 Verification of phase ambiguity constraints for each channel

通道	γ_{total}	σ_{ϕ} (rad)	σ_{v_r} (m/s)	备注
短基线(B_1)	0.88	0.013	0.096	高相干, 低测流敏感性
长基线(B_6)	0.23	0.102	0.059	低相干, 高测流敏感性
融合(等效)	—	—	0.027	六基线加权融合后精度

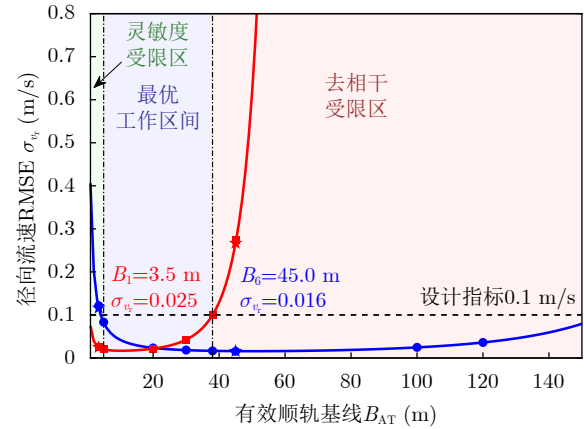
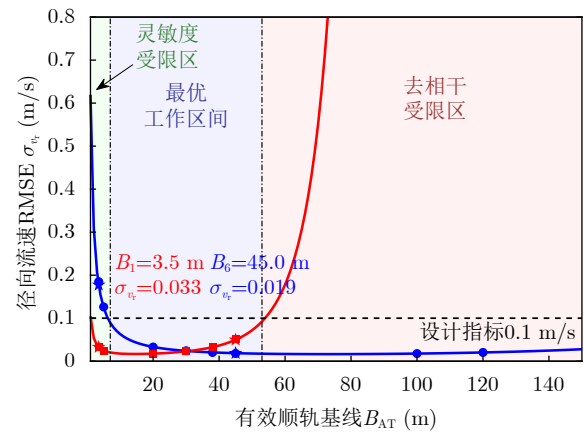
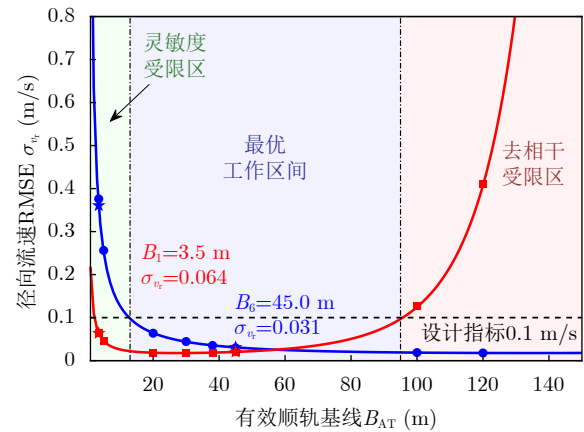
为了对比分析不同波段的多基线加权结果, 参考Ku波段处理流程同时对X波段($\lambda = 0.0312$ m, $\sigma^0 = -13 \sim -6.7$ dB)和C波段($\lambda = 0.0556$ m, $\sigma^0 = -14.2 \sim -7.9$ dB)进行仿真验证^[32], 结果如图6至图8所示。其中图6展示了在低海况和高海况下, 单基线流速测量RMSE随有效基线长度变化的仿真曲线。曲线呈现出典型的“浴盆”形状, 可划分为3个特征区间。蓝色实线绘制的是低海况下海面径向流速RMSE随基线长度变化情况, 红色实线绘制的是高海况下海面径向流速RMSE随基线长度变化情况, 蓝色点标记了低海况下几个基线长度经1000次蒙特卡罗实验仿真海面径向流速RMSE, 蓝色点标记的是高海况下几个基线长度经1000次蒙特卡罗实验仿真海面径向流速RMSE。

测流敏感性受限区($B_{AT} < 5$ m): 海面相干性高, 但测流敏感性系数过大, 系统热噪声被放大至流速域后较为显著。以 $B_{AT} = 3.5$ m为例, 低海况下 $\sigma_{v_r} \approx 0.117$ m/s, 不满足精度要求; 随基线增大, 测流敏感性提升, 误差单调下降。

最优工作区间($B_{AT} \in 5 \sim 38$ m): 低海况曲线在此区间达到极小值, 约为0.02~0.1 m/s, 小于0.1 m/s。这一区间与4.1节推导的最长基线设计值(有效顺轨基线45 m)吻合, 验证了双约束推导方法的合理性。

去相干受限区($B_{AT} > 38$ m): 时间去相干效应随基线增大而显现, 误差开始回升。在高海况下, 该趋势更为剧烈: 当 $B_{AT} > 20$ m时, 高海况曲线(红色)误差已明显上升; 在 $B_{AT} = 38$ m处, 误差超过0.1 m/s, 长基线在高海况下不再满足设计精度。

对比图6中不同频段的仿真结果可以发现, 单一基线难以同时满足全海况(3~12 m/s)下的精度要求, 非均匀稀疏阵列的多基线组合策略是必要的

(a) Ku频段
(a) Ku band(b) X频段
(b) X band(c) C频段
(c) C band

— 低海况解析 • 低海况MC验证
— 高海况解析 • 高海况MC验证

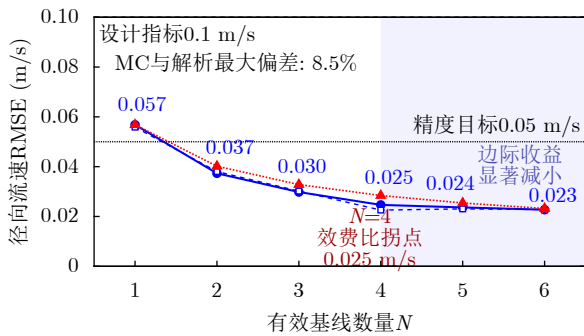
图 6 单基线流速测量RMSE随有效基线长度变化示意图

Fig. 6 Single-baseline velocity measurement RMSE variation with effective baseline length

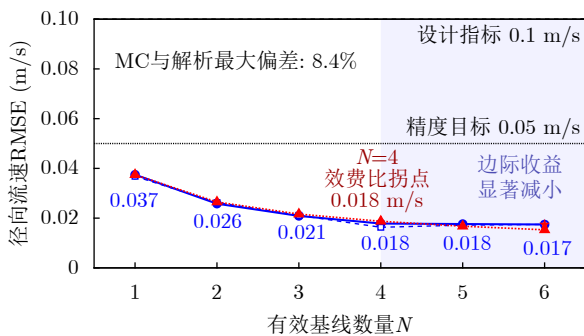
工程选择: 高海况时系统以短基线(B_1, B_3)为主, 保证观测的连续性; 低海况时系统充分利用长基线(B_6)的高测流敏感性, 实现高精度流速反演, 二者

通过自适应加权融合覆盖全海况工作范围。对比Ku频段仿真结果, X频段和C频段满足设计指标的最短基线分别达到了7 m和13 m, 需要更大的天线才能满足设计指标要求。

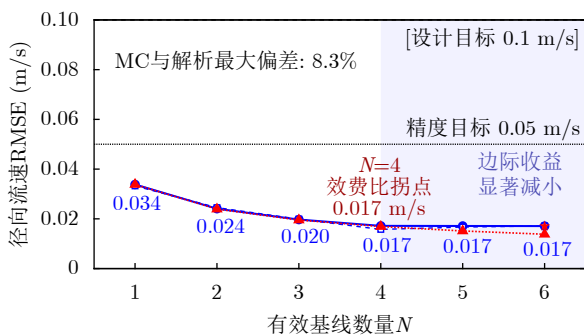
本文方法进行多基线融合时是按基线长度由长到短的顺序。图7展示了多基线加权融合流速RMSE随有效基线数量 N 增加的收敛曲线, 并与式(6)的 $1/\sqrt{N}$ 理论预测对比。仿真参数为 $U_{10} = 7$ m/s, $v_r = 0.5$ m/s。仿真曲线与理论预测的相对偏差约8.5%, 偏差主要来源于本系统各基线图像相干性差



(a) Ku频段
(a) Ku band



(b) X频段
(b) X band



(c) C频段
(c) C band

—●— 加权融合精度(解析)
- - - 加权融合精度(MC验证)
-▲- $1/\sqrt{N}$ 理论预测(等精度假设)

图7 多基线加权融合精度随基线数量的收敛特性示意图

Fig. 7 Convergence characteristics of multi-baseline weighted fusion accuracy with the number of baselines

异较大(非同质基线)导致的同质近似误差, 且中等海况下, 长基线干涉通道权重自动趋近于0, 不足短基线干涉通道权重的十分之一, 导致实际上仅有部分基线在提供有效信息。主要结论如下:

$N = 1 \rightarrow 2$: 融合后速度估计误差从0.0568 m/s降至0.0373 m/s, 速度估计精度提升约34.3%, 与理论值一致;

$N = 2 \rightarrow 4$: 融合后速度估计误差从0.0373 m/s降至0.0247 m/s, 速度估计精度累计提升约56.6%;

$N = 4 \rightarrow 6$: 融合后速度估计误差从0.0247 m/s降至0.0227 m/s, 速度估计精度累计提升约60.0%, 这是因为最后融合的是短基线, 主要作用是用于解缠;

对比图7中不同频段仿真结果可以发现, 多基线加权融合精度随基线数量的收敛曲线在 $N=4\sim 6$ 处出现明显的斜率转折, $N=4$ 后的边际收益显著减小, 这一仿真结果从定量角度支持了选取至少4条基线作为系统配置。随着波长增大, 多基线加权融合径向流速RMSE整体都在增加, X频段多基线加权融合径向流速RMSE曲线趋近于0.017 m/s, C频段多基线加权融合径向流速RMSE曲线趋近于0.017 m/s。

图8表明径向流速融合精度与有效基线数量(N)及海况之间的定量关系: 随着有效基线数量的增加, 流速融合的均方根误差(RMSE)呈现显著下降趋势。高海况下5条有效基线才满足0.1 m/s的精度目标; 当 $N \geq 4$ 时, 中、低海况的误差均稳定处于精度目标(0.05 m/s)下方。结果表明, 只要保证有效基线数不少于4条, 系统即可在中、低海况下实现较高的测量精度, 表现出良好的鲁棒性。

对比图8中不同频段仿真结果可以发现, X频段在高海况下多基线加权融合径向流速RMSE曲线趋近于0.045 m/s, 至少2基线才能满足设计指标, 在中、低海况下可以满足设计指标, C频段在高海况下精度较高, 多基线加权融合径向流速RMSE曲线趋近于0.028 m/s, 满足设计指标。

5 结论

本文针对传统ATI单基线在低海况下测流敏感性不足、高海况下容易失相干, 测流精度不足的问题, 基于最大似然估计和海面去相干原理, 建立了一种分布式SAR海流测量误差传递模型, 理论推导了多基线加权最小二乘(WLS)融合精度的 $1/\sqrt{N}$ 收敛规律, 依托“双重约束”设计了一种典型多基线InSAR系统, 并利用蒙特卡洛仿真分析了不同干涉基线配置测流精度。

研究结果表明基线数量由1增加到2时, 融合精

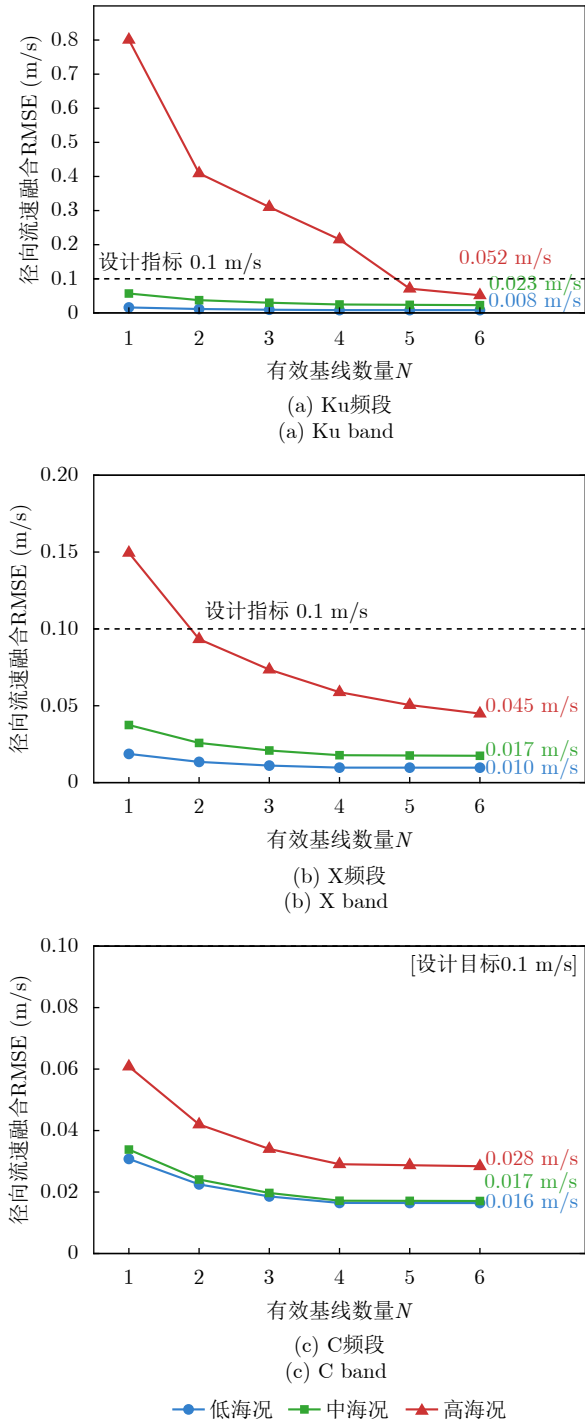


图8 不同海况下多基线加权融合精度随基线数量变化曲线示意图
Fig. 8 Schematic of the variation curve of multi-baseline weighted fusion accuracy with baseline number under different sea states

度提升约34.3%，由2增加到4时融合精度累计提升约56.6%，由4增加到6时融合精度累计提升约60.0%，满足流场测量精度设计要求。蒙特卡罗仿真表明高中低海况下该方法将流速测量RMSE分别降至0.052 m/s, 0.023 m/s, 0.008 m/s, 显著优于设计指标。不同频段仿真结果表明多基线加权融合径向流速RMSE会随着频段增大而增加, X频段和

C频段需要更大的天线尺寸才能满足短基线干涉精度要求, 进行分布式海流测量SAR卫星系统设计优选Ku频段降低卫星设计难度。本文的研究可以为分布式星载SAR卫星基线设计提供理论支持。

本文的理论结果建立在参考海面信息可准同步获取的前提下。对于传统下视高度计与侧视SAR之间存在的观测几何差异、空间分辨率差异及时间非同步问题, 本文未展开具体工程实现, 仅将其视为后续系统集成与数据融合研究中的关键问题。未来将结合协同编队观测和海洋动力模型对参考场构建机制进行进一步研究。目前国际上尚没有针对海流测量的分布式SAR卫星系统, 缺少实测数据。本文的研究成果基于纯理论推导和仿真验证, 计划在后续研究工作中加强实测数据的等效验证和分析, 通过开源的机载多通道SAR数据, 或宏图一号的车轮干涉编队数据, 对本模型中的“测流敏感性与图像相干性双重约束”进行等效的实测数据验证评估。

附录1 相干性权重推导

在由3颗或更多SAR天线组成的多卫星干涉配置中, 每对天线都可以构成干涉。观测场景中目标P的干涉相位, 由多干涉对直接推导, 可以表示为

$$\begin{cases} \phi_1 = -\frac{4\pi B_{AT1}}{\lambda V} \cdot u_{Doppler1} \\ \phi_2 = -\frac{4\pi B_{AT2}}{\lambda V} \cdot u_{Doppler2} \\ \vdots \\ \phi_n = -\frac{4\pi B_{ATn}}{\lambda V} \cdot u_{Dopplern} \end{cases} \quad (A-1)$$

由于入射角相同, 可以合理假设 $u_{Doppler1} = u_{Doppler2} = \dots = u_{Dopplern} = u_{Doppler}$ 保持不变。其中 B_{AT1} , B_{AT2} 和 B_{ATn} 表示干涉对的沿航向基线长度。通过求解方程, 可以获得点P的径向速度。 $u_{Doppler}$ 可由

$$\begin{aligned} u_{Doppler} &= -\frac{a_1}{\sum_{i=1}^n a_i} \frac{\lambda V \phi_1}{4\pi B_{AT1}} - \frac{a_2}{\sum_{i=1}^n a_i} \frac{\lambda V \phi_2}{4\pi B_{AT2}} \\ &\quad - \dots - \frac{a_n}{\sum_{i=1}^n a_i} \frac{\lambda V \phi_n}{4\pi B_{ATn}} \\ &= -\frac{\lambda V}{4\pi \sum_{i=1}^n a_i} \sum_{i=1}^n \frac{a_i \phi_i}{B_{ATi}} \\ &= -\frac{\sum_{i=1}^n a_i u_{Doppleri}}{\sum_{i=1}^n a_i} \end{aligned} \quad (A-2)$$

在整体速度计算中，采用加权平均方法，权重 a_i 与相应的测量误差方差成 $\sigma_{u_r,i(\text{Doppler})}^2$ 反比。可表示为

$$a_i = 1/\sigma_{u_r,i(\text{Doppler})}^2 \quad (\text{A-3})$$

附录2 多基线融合理论方差推导

假设多基线干涉系统有 N 个通道，每个通道测量到的真实相位(或流速)为 ϕ_{true} 。第 i 个通道的观测值为 ϕ_i ，包含独立噪声 n_i ：

$$\phi_i = \phi_{\text{true}} + n_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{A-4})$$

已知噪声均值为0($E[n_i] = 0$)，方差为已知量 σ_i^2 ，且各通道噪声相互独立($\text{Cov}(n_i, n_j) = 0, i \neq j$)。我们希望通过各通道的线性加权来获得融合后的估计值 $\hat{\phi}_{\text{fused}}$ ：

$$\hat{\phi}_{\text{fused}} = \sum_{i=1}^N w_i \phi_i \quad (\text{A-5})$$

为了保证估计出来的结果没有系统偏差，即期望值等于真实值 $E[\hat{\phi}_{\text{fused}}] = \phi_{\text{true}}$ ，必须满足：

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{i=1}^N w_i (\phi_{\text{true}} + n_i)\right] &= \phi_{\text{true}} \sum_{i=1}^N w_i + \sum_{i=1}^N w_i E[n_i] \\ &= \phi_{\text{true}} \sum_{i=1}^N w_i \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

因此，权重必须满足约束条件： $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ 。因为各通道相互独立，融合后估计值的方差 V 为各分量方差的加权和：

$$V = \sigma_{\text{fused}}^2 = \text{Var}\left(\sum_{i=1}^N w_i \phi_i\right) = \sum_{i=1}^N w_i^2 \sigma_i^2 \quad (\text{A-7})$$

现在的数学目标是：在约束 $\sum w_i = 1$ 的条件下，寻找一组权重 w_i ，使得总方差 $V = \sum w_i^2 \sigma_i^2$ 最小。

构造拉格朗日函数： $L(w_1, w_2, \dots, w_N, \lambda) = \sum_{i=1}^N w_i^2 \sigma_i^2 - \lambda \left(\sum_{i=1}^N w_i - 1\right)$

对任意权重 w_k 求偏导，并令其等于0：

$$\frac{\partial L}{\partial w_k} = 2w_k \sigma_k^2 - \lambda = 0 \Rightarrow w_k = \frac{\lambda}{2\sigma_k^2} \quad (\text{A-8})$$

将这个 w_k 代入约束条件 $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ 中，求解 λ ：

$$\sum_{i=1}^N \frac{\lambda}{2\sigma_i^2} = 1 \Rightarrow \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} = 1 \Rightarrow \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (\text{A-9})$$

将求出的 $\lambda/2$ 代回 w_k 的表达式，得到最优权重(即逆方差加权)：

$$w_k = \frac{\frac{1}{\sigma_k^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (\text{A-10})$$

将求得的最优权重 w_k 代回目标方差公式 $V = \sum w_k^2 \sigma_k^2$ 中：

$$\sigma_{\text{fused}}^2 = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\frac{1}{\sigma_k^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}}\right)^2 \sigma_k^2 \quad (\text{A-11})$$

展开平方项：

$$\sigma_{\text{fused}}^2 = \sum_{k=1}^N \frac{\left(\frac{1}{\sigma_k^2}\right)^2 \cdot \sigma_k^2}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}\right)^2} = \sum_{k=1}^N \frac{\frac{1}{\sigma_k^2}}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}\right)^2} \quad (\text{A-12})$$

提取出分母(分母与 k 无关，是个常数)：

$$\sigma_{\text{fused}}^2 = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}\right)^2} \cdot \left(\sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_k^2}\right) \quad (\text{A-13})$$

分子和分母消去一个 $\left(\sum \frac{1}{\sigma_i^2}\right)$ ，最终得到

$$\sigma_{\text{fused}}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (\text{A-14})$$

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] AMANI M, GHORBANIAN A, ASGARIMEHR M, *et al.* Remote sensing systems for ocean: A review (Part 1: Passive systems)[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 210–234. doi: [10.1109/JSTARS.2021.3130789](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3130789).
- [2] AMANI M, MOHSENI F, LAYEGH N F, *et al.* Remote sensing systems for ocean: A review (Part 2: Active systems)[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 1421–1453. doi: [10.1109/JSTARS.2022.3141980](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3141980).
- [3] AMANI M, MEHRAVAR S, ASIYABI R M, *et al.* Ocean remote sensing techniques and applications: A review (Part

- II)[J]. *Water*, 2022, 14(21): 3401. doi: [10.3390/w14213401](https://doi.org/10.3390/w14213401).
- [4] ZHANG Qingjun, FAN Huangjiang, QIN Yuxiao, *et al.* Advances in interferometric synthetic aperture radar technology and systems and recent advances in Chinese SAR missions[J]. *Sensors*, 2025, 25(15): 4616. doi: [10.3390/s25154616](https://doi.org/10.3390/s25154616).
- [5] 邓云凯, 张衡, 范怀涛, 等. 面向综合环境监测的星载SAR技术发展[J]. *中国空间科学技术*, 2023, 43(2): 32–46. doi: [10.16708/j.cnki.1000-758X.2023.0018](https://doi.org/10.16708/j.cnki.1000-758X.2023.0018).
DENG Yunkai, ZHANG Heng, FAN Huaitao, *et al.* Forthcoming development trend of spaceborne SAR technology for earth environment monitoring[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43(2): 32–46. doi: [10.16708/j.cnki.1000-758X.2023.0018](https://doi.org/10.16708/j.cnki.1000-758X.2023.0018).
- [6] DU Yanlei, CHONG Jinsong, YIN Junjun, *et al.* Effect of current-wave interaction on ocean surface current retrieval using Doppler centroid anomaly (DCA) method[C]. 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024: 5969–5972. doi: [10.1109/IGARSS53475.2024.10642010](https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10642010).
- [7] GOLDSTEIN R M and ZEBKER H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents[J]. *Nature*, 1987, 328(6132): 707–709. doi: [10.1038/328707a0](https://doi.org/10.1038/328707a0).
- [8] WOLLSTADT S, LÓPEZ-DEKKER P, DE ZAN F, *et al.* Design principles and considerations for spaceborne ATI SAR-based observations of ocean surface velocity vectors[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(8): 4500–4519. doi: [10.1109/TGRS.2017.2692880](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2692880).
- [9] CALDARELLA N, LOPEZ-DEKKER P, PRATS-IRAOLA P, *et al.* Retrieval of wind and total surface current vectors using experimental bidirectional along-track interferometric TanDEM-X data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5223412. doi: [10.1109/TGRS.2022.3147490](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3147490).
- [10] ROMEISER R, RUNGE H, SUCHANDT S, *et al.* Quality assessment of surface current fields from TerraSAR-X and TanDEM-X along-track interferometry and Doppler centroid analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2759–2772. doi: [10.1109/TGRS.2013.2265659](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265659).
- [11] ROMEISER R, SUCHANDT S, RUNGE H, *et al.* First analysis of TerraSAR-X along-track InSAR-derived current fields[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 820–829. doi: [10.1109/TGRS.2009.2030885](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030885).
- [12] RASHID M and GIERULL C H. Retrieval of ocean surface radial velocities with RADARSAT-2 along-track interferometry[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 9597–9608. doi: [10.1109/JSTARS.2021.3110198](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3110198).
- [13] YUAN Xinzhe, LIN Mingsen, HAN Bing, *et al.* Observing sea surface current by gaofen-3 satellite along-track interferometric SAR experimental mode[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 7762–7770. doi: [10.1109/JSTARS.2021.3099105](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3099105).
- [14] GOMMENDINGER C, CHAPRON B, MARQUEZ J, *et al.* Wavemill: A new mission for high-resolution mapping of total ocean surface current vectors[C]. The 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, Germany, 2014: 1–4.
- [15] MARTIN A, MACEDO K, PORTABELLA M, *et al.* OSCAR: A new airborne instrument to image ocean-atmosphere dynamics at the sub-mesoscale: Instrument capabilities and the SEASTARex airborne campaign[C]. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 2023: EGU23-9940. doi: [10.5194/egusphere-egu23-9940](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9940).
- [16] LÓPEZ-DEKKER P, ROTT H, PRATS-IRAOLA P, *et al.* Harmony: An earth explorer 10 mission candidate to observe land, ice, and ocean surface dynamics[C]. 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019: 8381–8384. doi: [10.1109/IGARSS.2019.8897983](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8897983).
- [17] HU Cheng, LI Yuanhao, CHEN Zhiyang, *et al.* Distributed Spaceborne SAR: A review of systems, applications, and the road ahead[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, 13(2): 329–361. doi: [10.1109/MGRS.2025.3535412](https://doi.org/10.1109/MGRS.2025.3535412).
- [18] 王意军, 宋天祚, 李威, 等. 基于去相干敏感因子的多基线 PolInSAR植被高度反演方法[J]. *上海航天(中英文)*, 2021, 38(6): 21–27. doi: [10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.003](https://doi.org/10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.003).
WANG Yijun, SONG Tianyi, LI Wei, *et al.* Multi-baseline PolInSAR vegetation height inversion method based on decorrelation sensitivity factor[J]. *Aerospace Shanghai*, 2021, 38(6): 21–27. doi: [10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.003](https://doi.org/10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.003).
- [19] SLETTEN M A and TOPORKOV J V. A multichannel approach to ocean surface current measurement with an ultrawideband ATI-SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 5211110. doi: [10.1109/TGRS.2025.3568267](https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3568267).
- [20] GUO Huancheng, WANG Zhibin, LI Zhenfang, *et al.* Wide-swath ocean current measurement based on MIMO along-track interferometry SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5221216. doi: [10.1109/TGRS.2024.3452120](https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3452120).
- [21] 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).
- [22] 胡瑞贤, 张昭, 骆成. 一种分布式卫星系统基线优化设计方法[J].

- 系统工程与电子技术, 2023, 45(8): 2423–2437. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2023.08.16](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2023.08.16).
- HU Ruixian, ZHANG Zhao, and LUO Cheng. A baseline optimization method for distributive satellites system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(8): 2423–2437. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2023.08.16](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2023.08.16).
- [23] 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): 215–237. doi: [10.12000/JR25220](https://doi.org/10.12000/JR25220).
- WANG Yidi, WANG Yu, ZHANG Yunjun, *et al.* The concept and system of very large baseline spaceborne interferometric synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2026, 15(1): 215–237. doi: [10.12000/JR25220](https://doi.org/10.12000/JR25220).
- [24] 邵晓巍, 张德新, 陈筠力, 等. 分布式卫星编队设计与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021: 3–18.
- SHAO Xiaowei, ZHANG Dexin, CHEN Yunli, *et al.* Design and Control of Distributed Satellite Formation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021: 3–18.
- [25] PERAL E, ESTEBAN-FERNÁNDEZ D, RODRÍGUEZ E, *et al.* KaRIn, the Ka-band radar interferometer of the SWOT mission: Design and in-flight performance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5214127. doi: [10.1109/TGRS.2024.3405343](https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3405343).
- [26] 袁新哲, 王小青, 赵良波, 等. 顺轨干涉合成孔径雷达海表面流测量原理、方法与信号仿真[M]. 北京: 海洋出版社, 2022: 84–92.
- YUAN Xinzhe, WANG Xiaoqing, ZHAO Liangbo, *et al.* Principles, Methods, and Signal Simulation of Along-Track Interferometric Synthetic Aperture Radar for Sea Surface Current Measurement[M]. Beijing: China Ocean Press, 2022: 84–92.
- [27] CARANDE R E. Estimating ocean coherence time using dual-baseline interferometric synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 846–854. doi: [10.1109/36.298012](https://doi.org/10.1109/36.298012).
- [28] 刘旗, 郭瑞, 王佳佳, 等. 低仰角目标高精度波束空间DOA估计方法[J]. 雷达学报(中英文), 2026, 15(3): 860–875. doi: [10.12000/JR25173](https://doi.org/10.12000/JR25173).
- LIU Qi, GUO Rui, WANG Jiajia, *et al.* A high-accuracy beamspace DOA estimation method for low-elevation angle targets[J]. *Journal of Radars*, 2026, 15(3): 860–875. doi: [10.12000/JR25173](https://doi.org/10.12000/JR25173).
- [29] ROMEISER R and RUNGE H. Theoretical evaluation of several possible along-track InSAR modes of TerraSAR-X for ocean current measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(1): 21–35. doi: [10.1109/TGRS.2006.885405](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.885405).
- [30] PETERSON E H, FOTOPOULOS G, and ZEE R E. A feasibility assessment for low-cost InSAR formation-flying microsattellites[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2847–2858. doi: [10.1109/TGRS.2009.2017521](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2017521).
- [31] LACHAISE M, FRITZ T, and BREIT H. InSAR processing and dual-baseline phase unwrapping for global TanDEM-X DEM generation[C]. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec, Canada, 2014: 2229–2232. doi: [10.1109/IGARSS.2014.6946912](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946912).
- [32] GUO Mingde, CHEN Kunshan, YANG Ying, *et al.* Effective surface roughness in radar ocean backscattering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 2004113. doi: [10.1109/TGRS.2023.3306464](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3306464).

作者简介

范黄江, 博士生, 主要研究方向为星载合成孔径雷达干涉测量、星载SAR系统设计等。

张庆君, 研究员, 主要研究方向为卫星微波遥感。

刘磊, 研究员, 主要研究方向为合成孔径雷达海洋遥感与系统设计。

王志斌, 高级工程师, 主要研究方向为星载微波遥感系统设计和信号处理。

王涛, 高级工程师, 主要研究方向为星载微波遥感系统设计与控制。

(责任编辑: 于青)