

地球同步轨道SAR运动舰船探测跟踪定位方法与实验验证

向建冰^{①②} 仲利华^{①②} 吴一凡^{①②} 宋冲^{①③} 黄丽佳^{①②}
高明样^④ 袁新哲^⑤ 胡玉新^{*①②⑥}

^①(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

^②(目标认知与应用技术重点实验室 北京 100190)

^③(微波成像国家重点实验室 北京 100190)

^④(苏州空天信息研究院 苏州 215128)

^⑤(国家卫星海洋应用中心 北京 100081)

^⑥(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 101408)

摘要: 地球同步轨道(GEO)合成孔径雷达(SAR)具有对大区域进行连续观测的优势,但由于探测距离远、合成孔径时间长、大视场杂波累加和非平直观测几何的特点,利用GEO SAR对运动舰船探测存在成像聚焦困难、信杂比低、位置偏移大等巨大技术挑战。该文提出一种面向GEO SAR的运动舰船探测-跟踪-定位一体化处理新方法,可有效解决上述难题。该文首先建立了GEO SAR对运动舰船的观测信号模型,深入分析了超长合成孔径时间内运动舰船的回波特性,提出了基于最优子孔径处理实现目标成像探测和长时间跟踪定位方法,该方法通过改进BP成像算法在孔径内实现了低信杂比下非合作舰船能量良好积累聚焦,获得了GEO SAR非平直观测下复杂运动舰船目标偏移位置与距离多普勒关系;然后,基于舰船短时匀速运动假设,利用双向平滑滤波方法对多子孔径探测结果进行航迹跟踪,并基于长时间跟踪结果获得运动舰船速度估计,在此基础上利用偏移位置与实际位置距离多普勒关系实现了运动舰船重定位。最后,通过仿真数据和在轨GEO SAR卫星实测数据验证了所提方法的正确性。

关键词: 地球同步轨道; 合成孔径雷达; 最优子孔径; 改进BP成像算法; 双向平滑滤波; 重定位

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)02-0687-23

DOI: 10.12000/JR25235

CSTR: 32380.14.JR25235

引用格式: 向建冰, 仲利华, 吴一凡, 等. 地球同步轨道SAR运动舰船探测跟踪定位方法与实验验证[J]. 雷达学报(中英文), 2026, 15(2): 687-709. doi: 10.12000/JR25235.

Reference format: XIANG Jianbing, ZHONG Lihua, WU Yifan, *et al.* An integrated detection-tracking-localization framework for moving ships in geosynchronous orbit synthetic aperture radar with experimental verification[J]. *Journal of Radars*, 2026, 15(2): 687-709. doi: 10.12000/JR25235.

An Integrated Detection-tracking-localization Framework for Moving Ships in Geosynchronous Orbit Synthetic Aperture Radar with Experimental Verification

XIANG Jianbing^{①②} ZHONG Lihua^{①②} WU Yifan^{①②} SONG Chong^{①③}
HUANG Lijia^{①②} SHANG Mingyang^④ YUAN Xinzhe^⑤ HU Yuxin^{*①②⑥}

^①(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

^②(Key Laboratory of Target Cognition and Application Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(National Key Laboratory of Microwave Imaging, Beijing 100190, China)

收稿日期: 2025-11-07; 改回日期: 2026-02-11; 网络出版: 2026-03-19

*通信作者: 胡玉新 huyx@aircas.ac.cn *Corresponding Author: HU Yuxin, huyx@aircas.ac.cn

责任编辑: 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/>)

^④(Suzhou Aerospace Information Research Institute, Suzhou 215128, China)

^⑤(National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

^⑥(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: Geosynchronous Orbit (GEO) Synthetic Aperture Radar (SAR) detection ensures persistent, wide-area surveillance. However, this ship-detection method faces significant technical challenges, such as imaging defocusing, low Signal-to-Clutter Ratio (SCR), and large position offsets, due to the long detection distance, long synthetic aperture time, clutter accumulation within a large field of view, and nonplanar observation geometry. To address these challenges, this paper proposes a novel integrated detection-tracking-localization framework for moving-ship targets in GEO SAR. First, a GEO SAR observation signal model is established for moving ships, after which their echo characteristics within the ultra-long synthetic aperture time are analyzed in depth. On this basis, the model realizes target-image detection and long-term tracking localization via optimal subaperture processing. Using an improved back-projection imaging algorithm tailored for moving ships, effective energy accumulation and focusing of noncooperative ships under low SCR are achieved within the aperture. In addition, the relationship between the offset position of moving targets and the Range-Doppler (RD) parameters under GEO SAR nonplanar geometric observation is obtained. Second, under the assumption of short-term uniform ship motion, a bidirectional smoothing filter is applied to track the multisubaperture detection results. The velocity estimation of moving ships is obtained from the long-term tracking results, and the relocation of moving ships is realized using the RD relationship between the offset position and the actual position. Finally, the proposed framework is validated using simulation data and on-orbit GEO SAR satellite test data.

Key words: Geosynchronous Orbit (GEO); Synthetic Aperture Radar (SAR); Optimal sub-aperture; Improved BP; Bidirectional smoothing filter; Relocation

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术凭借全天时、全天候观测能力,在海洋舰船监测与目标识别等领域发挥着重要作用^[1-3]。然而,传统低轨(Low Earth Orbit, LEO) SAR卫星受轨道高度和重访周期限制,对特定海域的连续观测能力严重不足。单颗低轨SAR卫星覆盖范围有限,难以满足大范围、近实时海上移动目标快速搜索发现需求;多颗低轨SAR卫星星座观测时间仍较为稀疏,重访问隔较长,无法获取目标连续观测数据,严重限制了对运动舰船目标运动参数估计与航迹跟踪的能力。地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO) SAR^[4-6]运行在具有一定轨道倾角的距地面约35800 km轨道上,轨道高度相比低轨SAR提升数十倍,可视范围大幅提升,在运动舰船观测方面相较于LEO SAR具有独特的应用优势。首先,单次成像可覆盖数百到数千公里海域范围,可实现超大幅宽海域运动舰船的快速发现。其次,星地相对运动较为缓慢,单颗GEO SAR能够对特定海域实现长时间凝视观测或者对多个特定海域实现高频次周期性观测,少量GEO SAR卫星组网即可对重点海域实现24小时不间断观测,为运动舰船连续跟踪观

测提供了可能。因此,利用GEO SAR卫星超大幅宽和长时间观测的核心优势,可显著提升对重点海域运动舰船主动搜索和持续观测能力,有望成为未来运动舰船观测体系的重要组成部分。

然而,GEO SAR轨道高度大幅提升在带来显著优势的同时,也带来了严峻的技术挑战。首先,受轨道升高和地速变小的影响,GEO SAR的合成孔径时间由LEO SAR的数秒延长到数十分钟量级,超长合成孔径时间导致运动舰船回波信号相位历程严重畸变、相干性降低、无法实现有效聚焦,且大视场杂波累加导致船海信杂比急剧下降,严重影响检测性能;其次,根据距离-多普勒原理,运动目标速度会造成定位偏差,且定位偏差与斜距成正比、与卫星速度成反比^[7,8],根据GEO SAR参数,GEO SAR中运动舰船定位偏差则可能达到数百公里^[9]。目标散焦严重、信杂比极低,定位偏差大等因素严重制约了GEO SAR在运动舰船监测中的实际应用。

LEO SAR运动舰船探测技术目前已趋于成熟,在海洋监测与舰船识别等领域得到充分应用,然而,由于GEO SAR在轨道高度、合成孔径时间、地面分辨率以及目标运动特性等方面与LEO SAR存在根本性差异,上述在LEO SAR中行之有效的检测与重定位方法在GEO SAR体制下均面临严重

的适用性问题, 亟须针对GEO SAR的独特性提出全新的信号处理方法。在舰船目标检测方面, LEO SAR主要采用传统的恒虚警检测法和近年来发展迅速的深度学习两类方法^[10-12]。传统恒虚警检测方法主要聚焦于复杂海况下的海杂波建模, 而基于深度学习的目标检测与识别技术通过模型剪枝、量化和知识蒸馏等优化手段, 有效提升了运动舰船检测的准确率和实时性。在运动舰船重定位方面, LEO SAR针对传统单通道体制提出了基于舰船尾迹重定位、基于舰船多普勒中心估计重定位等方法^[13,14]; 而在方位多通道体制下则利用通道间相位差异, 采用沿迹干涉(Along-Track Interferometry, ATI)、空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)等技术实现运动舰船速度估计进而完成重定位^[15,16]。

GEO SAR在静止目标成像方面已经产生了大量研究成果^[17-19]。近年来, 随着GEO SAR研究的深入, 其超大幅宽和长时间观测的特点使得GEO SAR运动舰船探测成像成为新的关注点。早期对GEO SAR运动目标的研究主要集中在目标运动误差估计补偿和全部合成孔径时间舰船再聚焦方法方面, 通过仿真或机载长合成孔径数据进行验证, 对实际GEO SAR中运动舰船回波信杂比极低导致参数估计补偿难等问题考虑不足, 且全流程解决运动舰船的有效探测、精确定位与连续跟踪等关键环节的研究不足, 制约了GEO SAR在海洋运动舰船监测领域的应用效能发挥。文献^[20-22]对地球同步轨道卫星非平稳舰船目标成像开展了深入研究, 分别利用自适应Chirplet分解、扩展GRFT算法和多尺度快速分数阶傅里叶变换对运动舰船复杂运动引起的距离走动和相位误差进行估计和补偿, 但均需要高信杂比信号进行参数估计。此外, 也有研究采用深度学习技术实现低轨卫星动目标的重聚焦成像^[23,24], 需要基于大量高质量样本数据进行学习训练。在运动目标定位跟踪方面, 基于子孔径间图像序列的方法作为一种经典有效的方法被应用于低轨卫星视频SAR中, 文献^[25-28]对低轨视频SAR对陆上运动目标检测跟踪进行研究, 通过对陆上动目标前后帧图像间阴影区域幅度变化实现阴影检测, 进而基于阴影位置实现了目标跟踪和重定位, 然而, 受动态海杂波影响, 海上舰船并无阴影, 难以直接应用于海上目标跟踪定位。文献^[29]从去除动目标对静止场景影响的角度出发, 提出了利用子孔径处理来检测强陆地运动目标的思路; 文献^[30]提出了一种GEO SAR对运动目标时序RD粗定位方法, 基于GEO SAR和目标运动长时均速直线轨

迹、高信杂比、平直成像几何关系等假设, 在子孔径成像RD定位时利用包络对齐并加入目标距离-多普勒状态转移方程约束进行目标粗定位, 文献^[8]对GEO SAR非平直观测下匀速运动目标引入的位置偏移量进行了分析和推导, 它们未建立复杂运动舰船目标多普勒频率与位置偏移关系, 对实际GEO SAR曲线轨迹、非平直斜视观测几何、低信杂比和目标晃动等问题考虑不足。由于GEO SAR轨道高度大幅提升, 等距离线和等多普勒线与地球球面的交线是复杂的空间曲线, 星地几何关系剧烈变化且呈现非平直特点, 动目标对GEO SAR成像和定位的影响发生变化, 传统机载/低轨平直几何下的动目标位置偏移与多普勒关系难以直接适用于GEO SAR^[25-31]。综上, 上述算法均在高信杂比下进行运动目标参数估计和补偿、基于平直成像几何进行运动目标跟踪定位, 未考虑实际GEO SAR面临的大视场杂波累加导致低信杂比下舰船复杂运动参数难以直接估计和补偿、非平直观测几何下位置偏移大等难题, 难以直接用于GEO SAR实际应用中。因此, 需要设计一种全流程、系统性的处理算法解决实际应用中GEO SAR对运动舰船的成像积累、航迹跟踪和精确定位难题。

本文从GEO SAR卫星的信号特点出发, 针对运动舰船长时间观测的应用需求, 提出了面向GEO SAR的运动舰船探测、跟踪和定位一体化处理方法, 并利用仿真和实测数据验证了方法的有效性。创新点有:

(1) 为降低长合成孔径时间内舰船运动带来的累积相位误差和杂波积累能量, 提出了将全孔径划分为多个子孔径的处理方法, 并结合GEO SAR的观测几何与系统参数, 从成像分辨率、舰船航速、舰船大小等影响因素综合分析, 建立了最优子孔径选择策略, 并给出了GEO SAR实际数据处理中的子孔径选择方法。

(2) 在子孔径内利用方位Dechirp处理消除卫星平台运动引入的多普勒模糊, 利用Keystone变换进行距离徙动盲矫正, 并利用改进相位补偿函数进行成像。该方法无需估计运动目标速度即可在低信杂比下对运动目标信号进行距离徙动矫正和积累聚焦, 克服了目标运动产生的距离徙动和相位误差导致成像严重散焦、同步轨道SAR回波中目标信杂比极低导致传统运动参数估计方法难以直接估计的问题, 实现了对运动舰船信号的良好积累, 提高了运动舰船积累信杂比。此外, 本方法直接将运动舰船成像至经纬度网格, 保证了不同子孔径间图像中静止场景的稳定性, 有利于后续定位跟踪。

(3) 基于面向运动舰船目标改进成像算法的原理和推导, 获得了GEO SAR卫星非平直观测几何下复杂运动舰船目标偏移位置与实际位置的距离多普勒关系式, 并建立了GEO SAR运动舰船探测, 跟踪和定位一体化处理算法框架。基于多子孔径探测结果, 利用双向平滑滤波方法进行航迹跟踪和预测, 实现了对运动舰船长时跟踪和重定位, 利用在轨GEO SAR实测数据进行验证, 重定位精度优于4 km。

2 面向运动舰船的GEO SAR信号模型

GEO SAR对运动舰船的成像几何模型如图1所示^[20,32], 运动舰船回波信号模型可以表示为

$$S(\tau, \eta) = A_0 p_r \left[\tau - \frac{2R_t(\eta)}{c} \right] p_a(\eta - \eta_c) \cdot \exp \left[-j4\pi f_c \frac{R_t(\eta)}{c} \right] \cdot \exp \left\{ j\pi K_r \left[\tau - \frac{2R_t(\eta)}{c} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

其中, τ, η 分别表示距离向快时间与方位向慢时间, A_0 表示信号幅度, p_r, p_a 分别表示距离向包络与方位向包络, c 表示光速, f_c 表示载频, $R_t(\eta)$ 表示卫星与舰船之间的斜距, K_r 表示调频率。

舰船在航行过程中, 除了自身动力驱动产生水平运动外, 还受到海风海浪扰动的影响, 产生复杂的六自由度运动^[33]。这种多维度的复合运动特性使得运动舰船在GEO SAR长时间相干积累过程中呈现出高度复杂的运动状态。首先构建运动舰船坐标系 $o-xyz$, 随舰船一起运动, 其中原点 o 为坐标中心、 x 轴为横滚轴、 y 轴为俯仰轴、 z 轴为偏航轴。六自由度运动可分解为沿 x, y, z 轴方向的横荡、纵荡

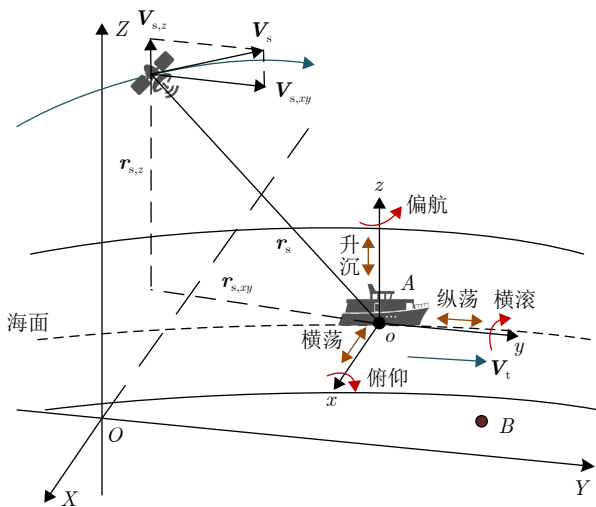


图1 GEO SAR对运动舰船的成像几何模型

Fig. 1 Imaging geometric model of moving vessels by GEO SAR

和升沉三维平动, 以及绕 x, y, z 轴的俯仰、横滚、偏航三维转动。设舰船上某个散射点 P 在舰船坐标系中坐标为 $(X_{T_0}, Y_{T_0}, Z_{T_0})$ 。直角坐标系 $O-XYZ$ 为地心地固坐标系, 运动舰船坐标系 $o-xyz$ 的原点 o 在地心地固坐标系中坐标为 (x_0, y_0, z_0) 。

在 η 时刻, 舰船的瞬时斜距 $R_t(\eta)$ 可以通过发射斜距和接收斜距表示为

$$R_t(\eta) = \|\mathbf{r}_{\text{Tsatsat}} - \mathbf{r}_{\text{ship}}\| + \|\mathbf{r}_{\text{Rsatsat}} - \mathbf{r}_{\text{ship}}\| \quad (2)$$

其中, $\mathbf{r}_{\text{Tsatsat}}$ 和 $\mathbf{r}_{\text{Rsatsat}}$ 分别表示GEO SAR卫星在信号发射时刻和接收时刻的瞬时位置, \mathbf{r}_{ship} 为舰船的瞬时位置。

利用 X_m, Y_m, Z_m 表示舰船的三维振荡运动, \mathbf{R}_{rot1} 表示三维摇摆旋转矩阵, 计算公式参考文献^[33]。在某时刻 η , 散射点 P 于舰船参考坐标系下的位置坐标为

$$\begin{bmatrix} X_{T_m}(\eta) \\ Y_{T_m}(\eta) \\ Z_{T_m}(\eta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{T_0} \\ Y_{T_0} \\ Z_{T_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{\text{rot1}} \cdot \begin{bmatrix} X_{T_0} \\ Y_{T_0} \\ Z_{T_0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由坐标系变换可得舰船上散射点 P 在地心地固坐标系中的瞬时位置为

$$\begin{bmatrix} x_T(\eta) \\ y_T(\eta) \\ z_T(\eta) \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\text{rot2}} \cdot \begin{bmatrix} X_{T_m}(\eta) \\ Y_{T_m}(\eta) \\ Z_{T_m}(\eta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_{\text{rot2}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 & 0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, \mathbf{R}_{rot2} 为从运动舰船坐标系 $o-xyz$ 至地心地固坐标系的转换矩阵。

可将上述舰船三维摆动和三维震荡引起的时变斜距表示为 $\sigma(\eta)$, 因此卫星与舰船之间的瞬时斜距可以表示为

$$R_t(\eta) = R_0 + \sum_{n=1}^N r_n(\eta - \eta_c)^n + \sigma(\eta) \quad (6)$$

其中, R_0 为卫星与舰船在波束中心穿越时刻的斜距, η_c 为波束中心穿越时刻, r_n 为第 n 阶多项式系数。

根据文献^[8,9], 由于舰船运动, 其位置在SAR图像上会出现偏移, 位置偏移量表示为

$$r_a = \frac{\mathbf{r}_{s,xy} \mathbf{V}_t}{|\mathbf{V}_{s,xy}|} \quad (7)$$

$$r_r = \sqrt{|\mathbf{r}_{s,xy}|^2 - \left[\frac{\mathbf{r}_{s,xy} \mathbf{V}_{s,xy}}{|\mathbf{V}_{s,xy}|} \right]^2} - \sqrt{|\mathbf{r}_{s,xy}|^2 - \left[\frac{\mathbf{r}_{s,xy} (\mathbf{V}_{s,xy} - \mathbf{V}_t)}{|\mathbf{V}_{s,xy}|} \right]^2} \quad (8)$$

其中， r_a 和 r_r 分别表示平行径向偏移量和垂直径向偏移量， V_t 为目标在运动舰船坐标系下的运动速度矢量， V_s 为卫星的运动速度矢量。卫星瞬时位置矢量 r_s 在运动舰船坐标系 $x-y$ 平面的投影为 $r_{s,xy}$ ，在 z 轴的投影为 $r_{s,z}$ ， V_s 在 $x-y$ 平面的投影为 $V_{s,xy}$ ，在 z 轴方向的投影为 $V_{s,z}$ 。可以发现，当舰船速度垂直于斜距径向时，运动舰船偏移量为零；而当舰船速度平行于斜距径向时，运动舰船偏移量达到最大值。

3 GEO SAR运动舰船探测跟踪定位方法框架

基于上述分析，本文提出了一种GEO SAR运动舰船探测，跟踪和定位一体化处理算法，算法整体流程如图2所示。

首先针对GEO SAR对舰船长时间探测时复杂运动引入非线性非平稳相位误差大、目标能量无法有效积累、大场景杂波累加导致回波信杂比低的问题，提出了基于子孔径处理的GEO SAR运动舰船成像与检测方法。该算法将全孔径划分为多个子孔径，其目的是降低每个子孔径内舰船运动带来的相位累积误差，以获得最优信杂比。论文结合GEO

SAR的观测几何与系统参数，从成像分辨率、舰船航速航向、舰船大小等影响因素综合分析，建立了多约束条件下的最优子孔径选择策略。

其次，为了实现子孔径内运动舰船能量有效积累，同时与后续跟踪定位处理有效衔接和一体化设计，提出了面向运动目标的改进BP成像算法。该方法通过方位Dechirp处理消除卫星平台运动引入的多普勒模糊，并利用Keystone变换消除不同目标非合作运动引入的距离徙动，最后基于距离徙动校正后的斜距进行BP成像，直接将运动舰船成像至经纬度网格，同时保证了不同子孔径间图像中静止场景的稳定性，为后续的跟踪和定位构建了统一的坐标框架。

最后，在完成基于子孔径的目标探测获得目标点迹后，如何在舰船位置和速度均未知的条件下实现对运动舰船的关联跟踪和精确定位成为研究的关键。精确定位的关键是准确获取目标的径向速度，然而舰船的复杂运动会引入非线性非平稳相位误差，使得不同孔径下的舰船位置偏移量存在非线性抖动。因此，直接利用多子孔径探测结果进行径向速度估计，舰船摆动引入的估计误差会导致舰船跟踪定位精度严重恶化。为提高运动舰船跟踪与重定

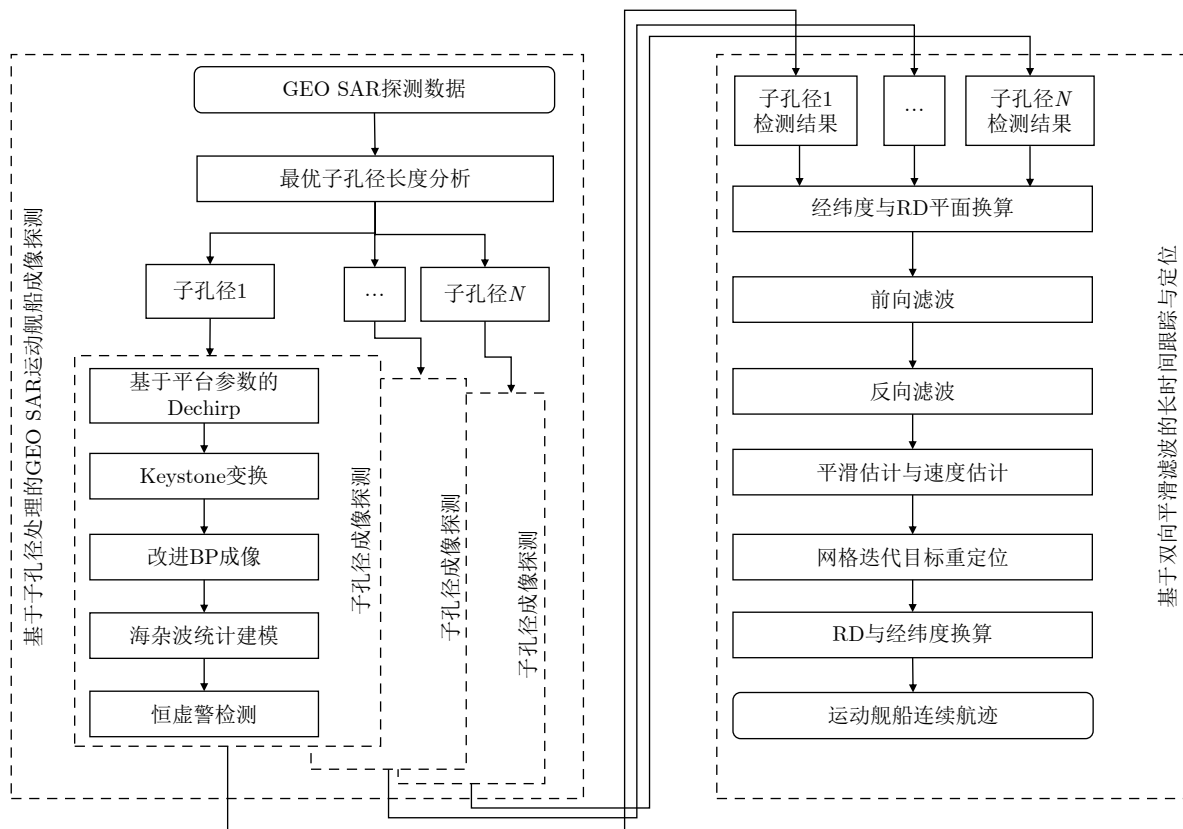


图 2 GEO SAR探测、跟踪定位一体化处理方法框架

Fig. 2 Framework of the integrated processing method for GEO SAR detection, tracking and localization

位精度, 首先基于运动舰船偏移后的位置进行跟踪滤波, 将目标位置转换到斜距多普勒平面, 基于舰船目标短时匀速平动模型, 利用双向平滑滤波方法对多子孔径探测结果进行航迹跟踪和预测。在前向卡尔曼滤波估计后, 再通过长时间运动积累的多个时刻距离和多普勒信息, 经反向平滑处理, 修正历史时刻的跟踪结果, 求解径向速度精估计值。在此基础上, 依据径向速度估计结果, 将目标从偏移位置校正回到真实位置, 从而在舰船位置和速度双盲条件下实现舰船目标高精度跟踪与重定位。

4 基于子孔径处理的GEO SAR运动舰船成像探测方法

在GEO SAR长合成孔径时间观测模式下, 平台航迹的弯曲特性导致回波信号在距离向和方位向存在严重的耦合及空变特性, 传统频域成像算法(如距离多普勒算法、非线性chirp Scaling算法等)难以实现大场景范围内的空变校正, 且运动目标会出现严重散焦。此外, 该类方法在不同子孔径间的成像结果存在位置偏移, 使得其在GEO SAR运动舰船的成像探测中存在较大局限性。后向投影(Back Projection, BP)算法是一种适用于复杂观测几何的成像方法, 其通过在地表构建成像网格, 并逐点进行精确的时域相干累积, 实现了对弯曲航迹的无近似成像处理。该方法不仅适用于GEO SAR弯曲航迹精确成像, 还能有效避免子孔径图像间失配问题, 在GEO SAR运动目标成像探测、跟踪和定位中具有显著优势。然而, 传统BP算法针对静止目标成像设计补偿函数, 当目标运动时会出现严重散焦, 使得对运动目标的成像探测性能大幅下降。此外, 受大场景杂波累加影响和舰船复杂运动

影响, 同步轨道SAR回波中目标信杂比极低且无法直接相干积累, 传统运动参数估计方法难以实现同步轨道SAR舰船运动参数估计, 无法直接应用于GEO SAR运动舰船积累聚焦^[19-22]。

针对GEO SAR对海探测时舰船长时间复杂运动引入非线性非平稳相位误差、大场景杂波累积导致回波信杂比极低的问题, 本节提出了基于子孔径处理的GEO SAR海面运动舰船成像与检测方法, 将全孔径划分为若干子孔径, 在子孔径内通过统一去斜和Keystone变换等信号处理方式完成卫星平台运动补偿和运动舰船距离徙动盲校正, 利用改进BP成像算法逐像素点完成舰船目标及临近背景的相干积累, 获取多子孔径运动舰船图像序列。同时, 基于相干积累增益与积累时间关系, 本节结合GEO SAR的系统参数与观测几何, 围绕成像分辨率、舰船运动速度与方向、舰船大小等影响因素建立关联模型, 构建多约束条件下最优信杂比孔径长度选择策略。所提方法克服了传统GEO SAR全孔径成像方法由于舰船长时间复杂运动引起空时变相位误差导致信杂比低、检测率差的缺点, 提高了运动舰船积累信杂比和检测性能, 并获得了GEO SAR非平直几何观测下偏移位置与实际位置的距离多普勒关系式, 为后续运动目标的跟踪定位提供约束条件。算法流程如图3所示。

4.1 面向运动目标的改进BP成像算法

假设在一段时间内运动舰船自身平动相对平稳, 利用速度和加速度表示其平动。舰船目标在中心时刻位于点 $A(la_1, lon_1)$, 其中 la_1 和 lon_1 分别表示纬度和经度, 将运动舰船斜距历程在 $\eta = 0$ 处泰勒展开为

$$\begin{aligned} R_t(\eta) &= \sqrt{[R_{tc} + V_r\eta + A_r\eta^2]^2 + [(V_g - V_a)\eta + A_g\eta^2]^2 - 2R_{tc}V_g\eta\sin\varphi + \sigma(\eta)} \\ &\approx R_{tc} + (V_r - V_g\sin\varphi)\eta + \frac{(V_g - V_a)^2}{2R_{tc}}\eta^2 + A_r\eta^2 + \sigma(\eta) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, R_{tc} 表示子孔径中心时刻舰船与卫星的距离, V_g 和 A_g 分别表示GEO SAR卫星运动引起的等效速度和等效加速度, V_r 和 A_r 分别表示舰船平动速度的径向分量和加速度的径向分量, V_a 表示舰船平动速度的切向分量, φ 为中心斜视角, $\sigma(\eta)$ 表示由于舰船摆动和震荡引起的时变斜距。

将式(1)进行距离FFT可以表示为

$$\begin{aligned} s_1(f_\tau, \eta) &= w_r(f_\tau)w_a(\eta) \exp\left[-j\frac{4\pi(f_c + f_\tau)R_t(\eta)}{c}\right] \\ &\cdot \exp\left(-j\frac{\pi f_\tau^2}{k_r}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, f_τ 和 η 分别表示距离频率和方位时间, $w_a(\cdot)$ 和 $w_r(\cdot)$ 分别表示方位窗函数和距离窗函数。

考虑到卫星平台运动引起的多普勒频率通常远大于目标运动引入的多普勒, 这会导致回波信号的多普勒混叠, 因此考虑通过解调频(Dechirp)的操作对卫星平台运动引起的多普勒进行补偿。利用场景中心参考信号进行平台运动补偿, 补偿函数为

$$H_{dechirp}(f_\tau, \eta) = \exp\left[j\frac{4\pi(f_c + f_\tau)R_{ref_d}(\eta)}{c}\right] \exp\left(j\frac{\pi f_\tau^2}{k_r}\right) \quad (11)$$

其中, $R_{ref_d}(\eta) = V_{ref}\eta + A_{ref}\eta^2$ 表示卫星平台运动

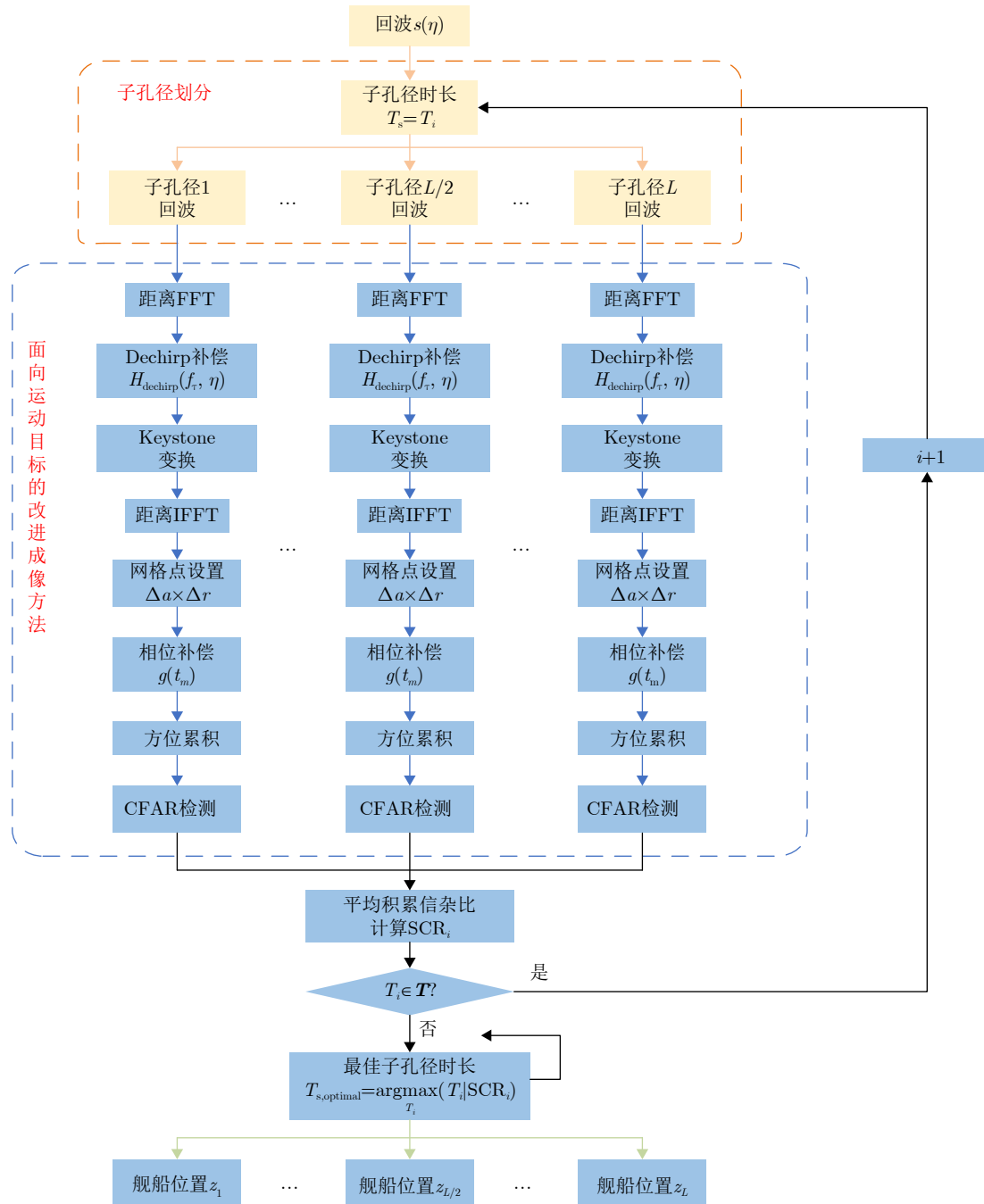


图3 基于子孔径处理的GEO SAR运动舰船成像探测方法流程图

Fig. 3 Flowchart of the GEO SAR moving ship imaging detection method based on sub-aperture processing

引起的场景中心斜距历程变化， V_{ref} 和 A_{ref} 分别表示卫星相对场景中心的等效速度和等效加速度，令

$V_{se} = -V_g \sin \varphi$, $A_{se} = (V_g - V_a)^2 / (2R_{tc})$ ，将式(10)与式(11)相乘可得

$$\begin{aligned}
 s_2(\tau, \eta) &= \text{IFFT} [s_2(f_\tau, \eta) * H_{com}(f_\tau, \eta)] \\
 &= A w_a(\eta) \delta \left(\tau - \frac{2 [R_{tc} + (V_r + V_{se} - V_{ref})\eta + (A_r + A_{se} - A_{ref})\eta^2 + \sigma(\eta)]}{c} \right) \\
 &\quad \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi [R_{tc} + (V_r + V_{se} - V_{ref})\eta + (A_{se} + A_r - A_{ref})\eta^2 + \sigma(\eta)]}{\lambda} \right]
 \end{aligned} \tag{12}$$

利用Dechirp进行补偿的示意图如图4所示,其中 $f_M = -2(V_r + V_{se})/\lambda$ 和 $f_0 = -2V_{se}/\lambda$ 分别表示运动舰船和场景中心静止目标的多普勒中心。可以发现,由于舰船位置和运动,场景中心补偿后存在舰船距离历程与场景中心距离历程差、舰船运动产生的残余距离历程和残余多普勒。

为校正残余距离历程,我们引入Keystone变换通过重新缩放时间轴消除线性距离徙动。应用Keystone来消除线性距离徙动,执行如下缩放:

$$(f_\tau + f_c)\eta = f_c t_m \quad (13)$$

其中, t_m 为缩放后的方位时间变量。使用Keystone后的回波可以表示为

$$\begin{aligned} S_3(f_\tau, t_m) = & \delta_a(t_m) w_r(f_\tau) \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_\tau + f_c) R_{tc} \right] \\ & \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (V_r + V_{se} - V_{ref}) t_m \right] \\ & \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi f_c}{\lambda(f_\tau + f_c)} (A_r + A_{se} - A_{ref}) t_m^2 \right] \\ & \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi (f_\tau + f_c)}{c} \sigma(t_m) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

从式(14)可以看出,速度和距离频率 f_τ 之间的线性耦合已经消除,但加速度、摆动和震荡引起的高阶距离徙动(Range Cell Migration, RCM)和多普勒频率徙动(Doppler Frequency Migration, DFM)效应仍然存在。GEO SAR卫星信号的带宽比较窄,即满足 $f_\tau \ll f_c$ 。对 $f_c/(f_\tau + f_c)$ 进行一阶泰勒展开有

$$\frac{f_c}{f_\tau + f_c} \approx f_c - f_\tau \quad (15)$$

将式(15)代入式(14),并进行距离IFFT可得

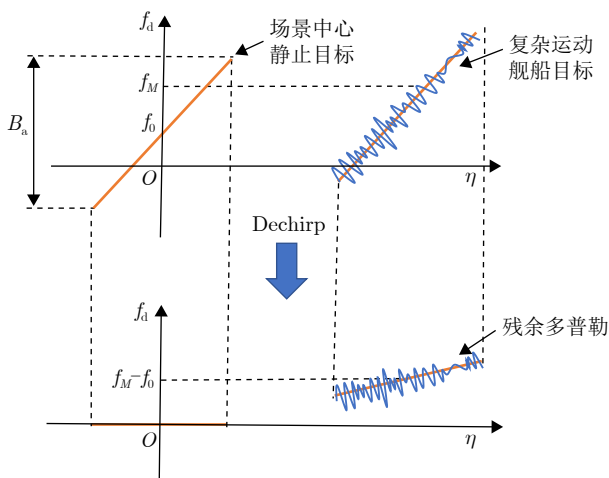


图4 Dechirp对目标运动多普勒补偿示意图

Fig. 4 Schematic diagram of Doppler compensation for target motion by Dechirp

$$\begin{aligned} S_4(\tau, t_m) = & \delta_a(t_m) \delta_r \left(\tau - \frac{2[R_{tc} - (A_r + A_{se} - A_{ref})t_m^2 + \sigma(t_m)]}{c} \right) \\ & \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{tc} \right) \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (V_r + V_{se} - V_{ref}) t_m \right] \\ & \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (A_r + A_{se} - A_{ref}) t_m^2 \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \sigma(t_m) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)中的第2个指数项和第3个指数项表示了速度和加速度引起的多普勒徙动,最后一个指数项表示舰船摆动和震荡引入的多普勒徙动,可以发现,多普勒徙动将随着观测时间的延长而显著增加。

传统BP成像算法未考虑目标非合作运动引入的距离徙动和相位误差,无法对式(16)进行精确相位补偿和相干积累,即运动舰船目标信号会散焦导致难以有效检测。为获得舰船目标高信杂比积累结果,对成像算法进行改进,构造如下改进相位补偿函数:

$$g(t_m) = \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + (V_0 - V_{ref})t_m + (A_0 - A_{ref})t_m^2] \right\} \quad (17)$$

其中, R_0 和 V_0 分别表示地面网格点斜距历程的中心斜距和速度, A_0 表示补偿的加速度。为实现目标信号的积累聚焦,利用式(18)进行方位向积累:

$$S = \int_{t_m=t_0}^{t_1} s_4(\tau_0, t_m) * g(t_m) dt_m \quad (18)$$

其中, t_0 和 t_1 分别表示子孔径起始时间和结束时间。可以发现当满足以下条件时,运动舰船信号将被完全积累:

$$\begin{cases} \tau_0 = \frac{2[R_{tc} - (A_{se} + A_r - A_{ref})t_m^2 + \sigma(t_m)]}{c} \\ V_0 = V_{se} + V_r + \sigma'(t_m) \\ A_0 = A_{se} + A_r + \sigma''(t_m) \end{cases} \quad (19)$$

其中, $\sigma'(t_m)$ 和 $\sigma''(t_m)$ 表示 $\sigma(t_m)$ 在 t_m 时刻的一阶导数和二阶导数。因此,经过式(17)和式(18)积累后,目标将被聚焦至地面网格上的一位置点,该点与卫星中心时刻距离为 R_{tc} ,与卫星相对速度为 $V_{se} + V_r + \sigma'(t_m)$ 。

对于非合作运动目标,由于其运动参数未知,无法直接获取运动目标的斜距历程,导致经典BP算法无法直接对运动目标进行良好积累聚焦;此外,在GEO SAR中,受大视场杂波累加和目标运动的影响,目标回波信号的信杂比极低,难以从回波中对运动目标的参数进行估计。所提改进成像算法通过引入Dechirp和Keystone变换实现了距离徙动盲校正,利用改进相位补偿函数对运动目标信

号进行积累，在不估计目标运动速度的条件下，实现了对非合作运动目标信号的良好积累，提高了积累信杂比。对于具有加速度的目标，设置不同加速度组成的滤波器组并利用式(17)和式(18)进行方位积累，选取SCR最高的结果作为探测成像结果。面向运动目标的改进BP成像算法示意图如图5所示。

如图6所示，经过所提改进BP成像算法处理，运动舰船被聚焦至与A点等中心斜距但不等多普勒的位置点B，两位置之间的距离多普勒关系为

$$\begin{cases} R_{Ac} = R_{Bc} = \|\mathbf{P} - \mathbf{A}\| = \|\mathbf{P} - \mathbf{B}\| = R_{tc} \\ f_{dA} = f_{dB} + \frac{2[V_r + \sigma'(t_m)]}{\lambda} \\ f_{drA} = f_{drB} + \frac{2[(V_a^2 - 2V_a V_g)/R_{tc} + \sigma''(t_m)]}{\lambda} \end{cases} \quad (20)$$

其中， \mathbf{P} 、 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 分别表示中心时刻的卫星位置、A点位置和B点位置。式(20)建立了运动目标偏移位置与实际位置的距离多普勒关系式，可以发现，若能精确估计目标运动引入的多普勒频率，可根据目标偏移位置反算出运动目标实际位置。

4.2 最优子孔径时长选取准则

根据4.1节提出的改进BP成像算法，舰船的径向速度和摆动会引起目标多普勒中心偏移，从而导致成像后运动目标出现位置偏移。同时，切向速度和摆动会带来相位误差，若未进行补偿则会导致目标散焦。在实际处理中，运动舰船为非合作目标，其运动参数未知，由目标运动引起的二次距离徙动和二次多普勒徙动将随着积累时间的延长而显著增加，且与积累时间的平方成正比。对于GEO SAR而言，大场景杂波累加导致回波信杂比低，为了获得足够高的信杂比实现舰船检测，需要在保证目标信号有效积累的前提下尽可能增长孔径长度。为实现GEO SAR运动舰船的最优信杂比成像检测，需要结合舰船运动特性、卫星系统参数选取合适的积累时长。因此，我们首先将回波沿方位时间分为若干个子孔径，每个子孔径时间为 $T_s = N_s T_{PRI}$ ， N_s 表示每个子孔径中包含的脉冲数， T_{PRI} 表示脉冲间隔时间。从舰船运动信号模型可知，目标积累增益与积累时长、舰船运动速度及方向、成像网格大小、舰船大小等紧密相关，因此我们以二次相位

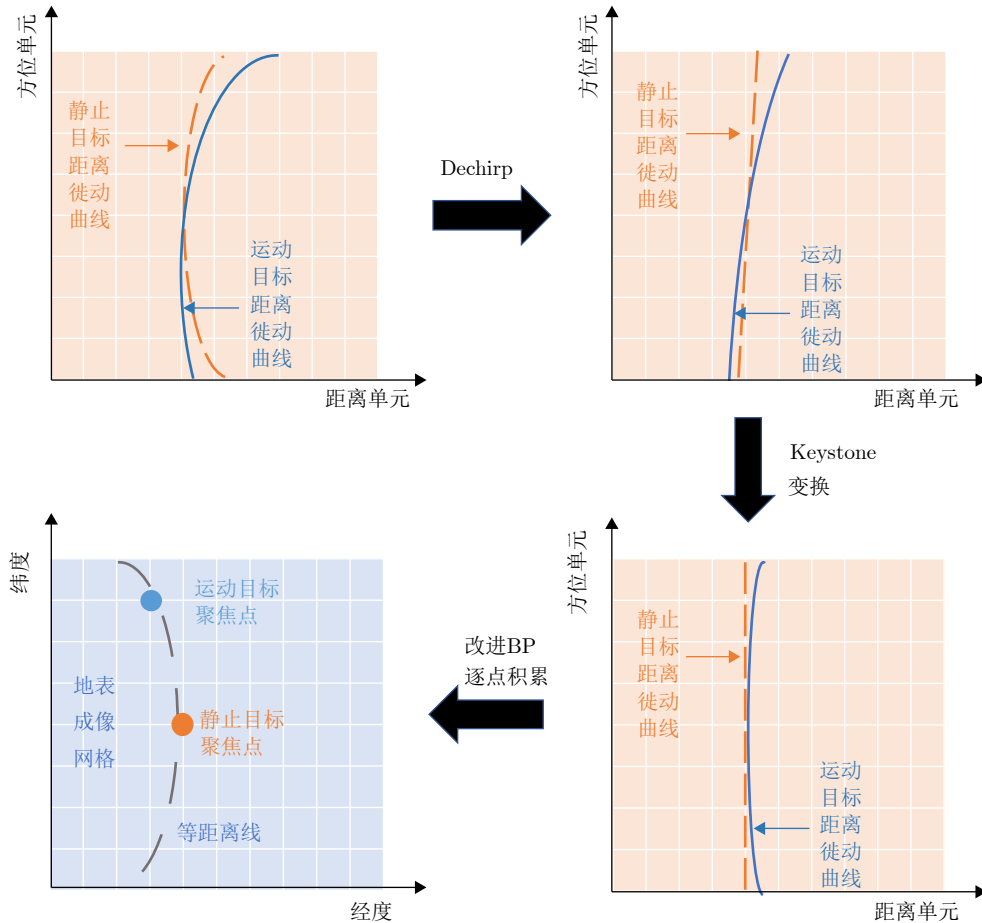


图5 面向运动目标的改进BP成像算法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the improved BP imaging algorithm for moving targets

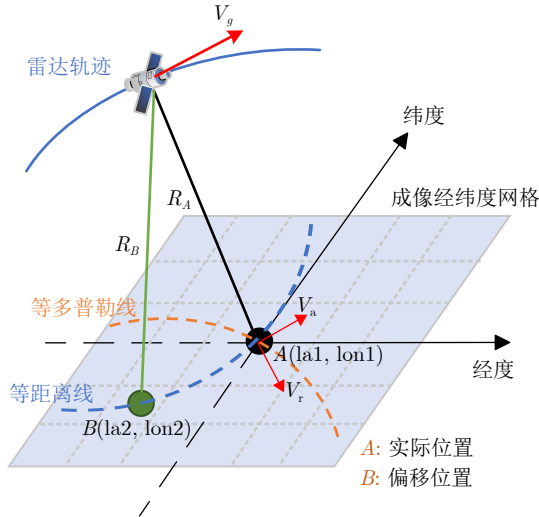


图6 运动目标聚焦位置偏移示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the offset of the focusing position of the moving target

误差和信杂比作为约束条件, 建立最优子孔径选取准则。

值得注意的是, 回波划分后的一个子孔径回波代表子孔径持续时间为 T_s 的二维数据。假设运动舰船长度和宽度分别为 w_{ship} 和 l_{ship} , 忽略散射点间的相互影响, 子孔径回波信号 $y(n)$ 为

$$y(n) = \sum_{i=1}^{k-1} A_i \exp[j2\pi\phi_i(n)] + w_i(n), n = 0, 1, \dots, N_s - 1 \quad (21)$$

其中, $i = 0, 1, \dots, k - 1$ 表示反射回波的舰船散射点个数, $A_i \exp(j2\pi\phi_i)$ 和 $w_i(n)$ 分别为第 i 个散射点反射回波中的目标信号和杂波。利用所提方法对式(21)进行处理可得

$$Y = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{n=0}^{N_s-1} \mathfrak{S}[y(n)] \quad (22)$$

$$= \sum_{i=1}^{k-1} \left[N_s A_i \exp(j2\pi\phi_i) + \sum_{n=0}^{N_s-1} w_i(n) \right]$$

其中, $\mathfrak{S}[\cdot]$ 表示成像处理。经过相参积累后, 第 i 个散射点功率为 $N_s^2 A_i^2$, 相参积累后杂波的功率为独立杂波功率之和, 即总杂波功率为 $N_s \sigma_i^2$ 。所以, 成像积累后的SCR为

$$\text{SCR}_{\text{CI}} = \frac{\sum_{i=0}^{k-1} N_s^2 A_i^2}{\sum_{i=0}^{k-1} N_s \sigma_i^2} = \sum_{i=0}^{k-1} N_s \frac{A_i^2}{\sigma_i^2} = N_s \times \text{SCR}_{\text{in}} \quad (23)$$

其中, SCR_{in} 表示回波SCR。从式(23)可以发现, 相干积累可以将SCR提高 N_s 倍。式(21)—式(23)中

假设了目标信号在积累时间内保持相干性, 在实际情况下, 由于目标运动会带来回波多普勒和距离徙动, 需要对多普勒和距离徙动进行精确补偿才能使得SCR随积累时间线性增大, 然而在GEO SAR中, 从极低信杂比回波中估计非合作舰船的复杂运动参数极其困难。为利用改进BP成像算法实现非合作舰船目标的良好聚焦, 在忽略舰船摆动下, 要求子孔径内平动速度的切向分量引入的二次相位误差积累不能超过 $\pi/4$ 。即

$$\Delta\varphi_{\text{error}2}(V_a, T_s) = 2\pi \left(\frac{V_a^2 - 2V_a V_g}{\lambda R_{\text{tc}}} \right) \left(\frac{T_s}{2} \right)^2 \leq \frac{\pi}{4} \quad (24)$$

图7显示了舰船在不同切向速度引入的二次相位误差。可以看出, 为满足式(24)要求, 积累时间随切向速度增大而减小, 即最长子孔径时间与切向速度呈反比关系。

此外, 雷达的杂波累积功率与其空间分辨率成反比。提高分辨率会显著降低单个分辨单元内接收到的杂波总功率, 但也会导致船散射点能量弥散。随着子孔径时间的增大, 方位向像素间隔也逐渐缩小, 即方位分辨率逐渐提高。根据式(23), 设当成像网格大小为 $\Delta a \times \Delta r$ 时, 单个网格包含 M 个舰船目标散射点 ($0 < M \leq k$), 积累后单个网格单元内的信杂比可以表示为

$$\text{SCR}_{\Delta}(T_s) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} N_s^2 A_i^2}{\sum_{i=0}^{M-1} N_s \sigma_i^2 + \sum_{j=0}^H N_s \sigma_j^2}$$

$$\leq \sum_{i=0}^{M-1} N_s \frac{A_i^2}{\sigma_i^2}$$

$$= N_s \times \sum_{i=0}^{M-1} \text{SCR}_{\text{in},i} \leq \text{SCR}_{\text{CI}} \quad (25)$$

其中, $M = \text{round}[k/\Gamma(\frac{w_{\text{ship}} \times l_{\text{ship}}}{\Delta a \times \Delta r})]$ 表示单个网格包含的舰船目标散射点个数, $H = \text{floor}[k/(\frac{w_{\text{ship}} \times l_{\text{ship}}}{\Delta a \times \Delta r}) - M]$ 表示单个网格内杂波点数量与目标散射点数量差值, $\Gamma(x) = \begin{cases} 1, 0 < x \leq 1 \\ x, 1 < x \end{cases}$, $\text{round}(\cdot)$ 和 $\text{floor}(\cdot)$ 分别表示四舍五入和向下取整运算。

可以发现, 当且仅当 $\frac{w_{\text{ship}} \times l_{\text{ship}}}{\Delta a \times \Delta r} = 1$, 即 $M = k, H = 0$ 时, SCR_{Δ} 取得最大值。由此, 我们建立最优子孔径时长 $T_{s,\text{optimal}}$ 的选取准则:

$$T_{s,\text{optimal}} = \min(T_{s1}, T_{s2}) \quad (26)$$

其中,

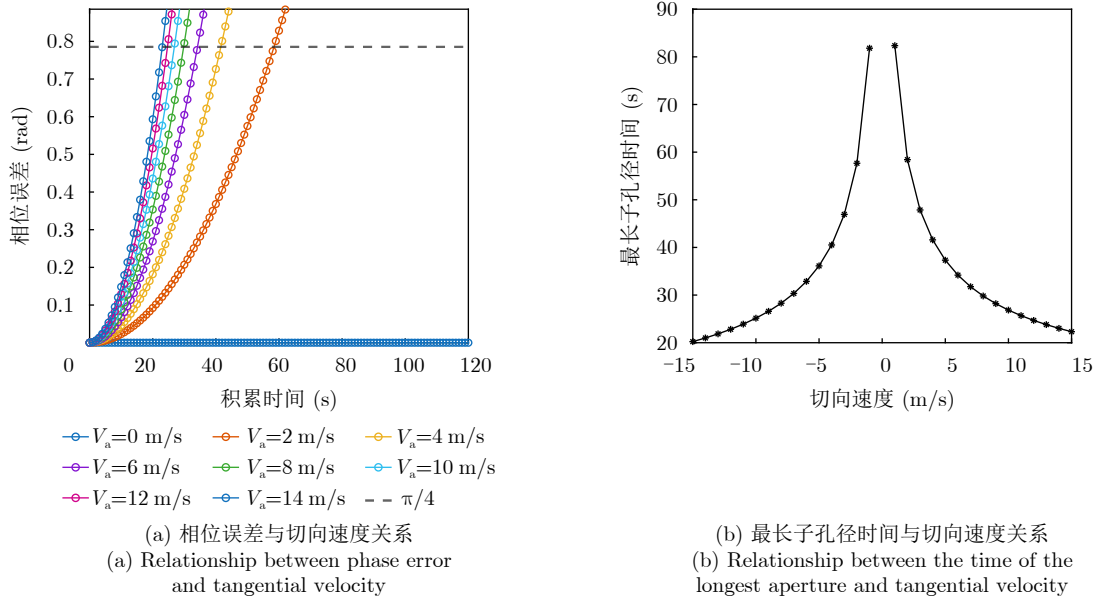


图7 切向速度导致二次相位误差分析

Fig. 7 Analysis of quadratic phase error caused by tangential velocity

$$\begin{cases} T_{s1} = \operatorname{argmax}_{T_s, V_a} \left[\Delta\varphi_{\text{error}2}(V_a, T_s) \leq \frac{\pi}{4} \right] \\ T_{s2} = \operatorname{argmax}_{T_s} [\operatorname{SCR}_{\Delta}(T_s)] \end{cases} \quad (27)$$

在实际处理非合作舰船过程中，其大小与速度通常未知，一般舰船大小不超过400 m，速度不超过15 m/s，因此可设网格大小为100~500 m，并以 ΔT 为间隔设置子孔径时长组 \mathbf{T} ，通过计算在不同子孔径时长 T_i 下的平均信杂比 SCR_i ，即

$$\begin{cases} \mathbf{T} = [20 \text{ s}; \Delta T: 50 \text{ s}] \\ T_i \in \mathbf{T} \\ M = \operatorname{round}(30/\Delta T) \\ \operatorname{SCR}_i = \sum_{j=1}^L \operatorname{SCR}_{i,j} \end{cases} \quad (28)$$

其中， $\operatorname{SCR}_{i,j}$ 表示子孔径时长 T_i 时，第 j 个子孔径图像中目标信杂比。选取平均信杂比最大对应的子孔径时长为最优子孔径时长 $T_{s,\text{optimal}}$ ，即

$$T_{s,\text{optimal}} = \operatorname{argmax}_{T_i} (T_i | \operatorname{SCR}_i) \quad (29)$$

在实际应用中，可根据被观测舰船的先验信息调整初始网格大小， ΔT 等参数，根据式(28)和式(29)完成最优子孔径时长计算。

5 基于双向平滑滤波的长时间跟踪与定位方法

在GEO SAR中，非合作运动舰船的位置及速度均未知，受舰船运动速度和卫星轨道高度影响，舰船在SAR影像中的位置偏移距真实位置几十至数百千米，给GEO SAR运动舰船跟踪与定位带来巨

大挑战。为实现GEO SAR运动舰船长时间精确跟踪和重定位，本节基于舰船多子孔径探测结果和距离多普勒偏移关系，提出联合多子孔径的双向平滑长时间跟踪与定位方法，通过对探测成像结果进行航迹跟踪和预测，获得径向速度的估计，从而实现运动舰船跟踪与重定位。

舰船的复杂摆动运动会引入非线性非平稳相位误差，使得不同孔径下的舰船位置偏移量存在非线性抖动。其中，舰船自身平动速度在短时间内通常不变，其在多个相邻子孔径中导致的位置偏移量可视为相同。而摆动具有非线性空时变的特性，其在各个子孔径中产生的位置偏移量不一致，若直接利用多子孔径探测结果进行径向速度估计，舰船摆动引入的估计误差会导致舰船跟踪定位精度严重恶化。为提高运动舰船跟踪与重定位精度，将目标位置转换到斜距多普勒平面，基于目标短时匀速平动模型，利用双向平滑滤波方法对多子孔径探测结果进行航迹跟踪和预测，在前向卡尔曼滤波估计后，再通过长时间运动积累的多个时刻距离和多普勒信息，经反向平滑处理，修正历史时刻的跟踪结果，求解径向速度精估计值，进而实现舰船目标高精度跟踪与重定位。算法流程如图8所示。

经4.1节所提方法处理后，在划分的地面网格中计算每个网格的坐标，建立斜距平面与地面网格坐标投影关系，舰船探测结果在斜距多普勒平面的测量值可表示为

$$\mathbf{Z}_k = [R_k \quad f_{B_k}]^T \quad (30)$$

其中，

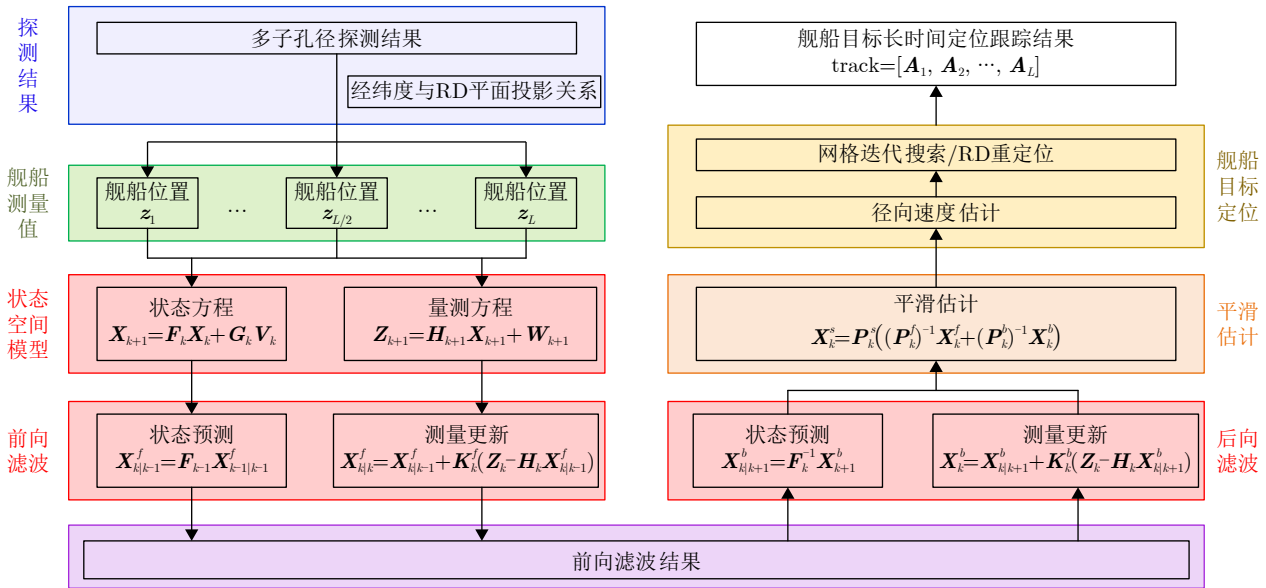


图8 基于双向平滑滤波的长时间跟踪定位方法流程图

Fig. 8 Flowchart of the long-term tracking and localization method based on bidirectional smooth filtering

$$\begin{cases} R_k = \|P_k - B_k\| \\ f_{B_k} = 2V_0/\lambda = 2V_r/\lambda + 2(V_{sc} + \sigma'(t_m))/\lambda \\ = f_k + f_u + \Delta f_{d,k} \end{cases} \quad (31)$$

其中, $k = 1, 2, \dots, L$ 表示子孔径序号, P_k 和 B_k 分别表示第 k 个子孔径卫星中心时刻位置与目标在 SAR 图像中位置, $f_k = 2V_r/\lambda$ 表示目标平动速度径向分量引起的多普勒频率; $f_u = 2V_{sc}/\lambda$ 表示卫星等效速度引起的多普勒频率; $\Delta f_{d,k} = 2\sigma'(t_m)/\lambda$ 表示舰船摆动引入的时变多普勒频率。

由于舰船复杂摆动引入的时变多普勒频率会在子孔径间引入位置误差, 导致径向速度估计误差。为提高径向速度的估计精度, 将摆动引入的时变多普勒频率作为未知噪声, 建立目标运动状态和量测方程, 定义目标状态方程为

$$X_{k+1} = F_k X_k + G_k V_k \quad (32)$$

其中, k 时刻的状态向量表示为 $X_k = [R_k \ \dot{R}_k \ f_k \ \dot{f}_k]^T$, \dot{R}_k 和 \dot{f}_k 表示斜距和多普勒的变化率, F_k 是状态转移矩阵, G_k 为过程噪声分布矩阵, V_k 为零均值、协方差为 Q_k 的高斯过程噪声序列。

定义目标量测方程为

$$Z_{k+1} = H_{k+1} X_{k+1} + W_{k+1} \quad (33)$$

其中, $Z_{k+1} = [R_{k+1} \ f_{k+1}]^T$ 表示目标量测, H_{k+1} 是观测矩阵, W_{k+1} 是零均值, 协方差为 U_{k+1} 的高斯量测噪声序列。

前向滤波步骤包括状态预测和测量更新, 将状态 $X_{k|k-1}^f$ 和协方差 $P_{k|k-1}^f$ 的一步预测为

$$X_{k|k-1}^f = F_{k-1} X_{k-1|k-1}^f \quad (34)$$

$$P_{k|k-1}^f = F_{k-1} P_{k-1|k-1}^f F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (35)$$

在前向卡尔曼滤波估计后, 获得了前向滤波后舰船目标长时间运动积累的多个时刻距离和多普勒信息, 然而历史航迹仍存在由于舰船摆动引入的误差。对此, 进行反向平滑处理, 修正历史时刻定位结果。后向滤波则从正向滤波终点 ($k=L$) 开始, 反向迭代到起点 ($k=1$), 后向滤波的状态转移矩阵是前向滤波的逆。将后向滤波的初始值设为前向滤波的最终值:

$$X_L^b = X_{L|L}^f \quad (36)$$

$$P_L^b = P_{L|L}^f \quad (37)$$

后向递归过程包括后向协方差 $P_{k|k+1}^b$ 与状态 $X_{k|k+1}^b$ 预测、卡尔曼增益 K_k^b 计算、后向状态 X_k^b 和协方差 P_k^b 更新, 即

$$X_{k|k+1}^b = F_k^{-1} X_{k+1}^b \quad (38)$$

$$P_{k|k+1}^b = F_k^{-1} (P_{k+1}^b + Q_k) (F_k^{-1})^T \quad (39)$$

进一步将前向与后向估计结果进行融合提高航迹滤波精度, 求解各个时刻斜距和多普勒的估计值。融合后的平滑协方差 P_k^s 和状态 X_k^s 估计为

$$P_k^s = \left((P_k^f)^{-1} + (P_k^b)^{-1} \right)^{-1} \quad (40)$$

$$X_k^s = P_k^s \left((P_k^f)^{-1} X_k^f + (P_k^b)^{-1} X_k^b \right) \quad (41)$$

基于最后的平滑状态估计 X_k^s 可以得出斜距和多普勒的估计值 \hat{R}_k 和 \hat{f}_k , 以及时变多普勒频率 $\Delta \hat{f}_{d,k}$, 并利用式(42)估计径向速度

$$\hat{v}_{r,k} = \lambda \hat{f}_k / 2 \quad (42)$$

进一步根据式(20)，在地面网格中利用网格迭代搜索或距离-多普勒定位法对各个时刻舰船目标位置进行重定位，获得舰船目标长时间跟踪与重定位结果 $[A_1 A_2 \cdots A_L]$ 满足：

$$\begin{cases} \|P_k - A_k\| = \|P_k - B_k\| = \hat{R}_k \\ f_{A_k} - f_{B_k} = 2\hat{v}_{r,k}/\lambda + \Delta\hat{f}_{d,k} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (43)$$

其中， A_k 表示舰船在第 k 个子孔径中心时刻跟踪重定位后的位置， f_{A_k} 和 f_{B_k} 分别表示第 k 个子孔径中心时刻卫星相对 A_k 和 B_k 的多普勒中心频率。

6 实验验证与结果分析

6.1 仿真实验

为了验证所提出的GEO SAR运动舰船探测、跟踪定位方法，本节开展了仿真实验验证。基于建立的舰船运动模型，开展了GEO SAR运动舰船信号特征分析和对运动舰船成像的仿真实验。仿真所用GEO SAR主要参数如表1所示。

仿真实验中建立运动舰船模型如图9所示，舰

表 1 GEO SAR系统仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters for the GEO SAR system

参数	符号	典型GEO SAR参数值
载频	f_c	1.3 GHz
信号带宽	B_r	30 MHz
采样率	F_r	40 MHz
脉冲宽度	T_r	400 μ s
脉冲重复频率	PRF	250 Hz
合成孔径时间	T_{total}	30 min

船长度300 m、宽度60 m；为了模拟舰船在5级海况下的真实运动，舰船运动参数设置为俯仰 2.3° 、横滚 4° 、偏航 0.26° 、纵荡 0.12° 、升沉 0.05° 、横荡 0.56° ；周期分别为俯仰13.3 s、横滚4.1 s、偏航4.8 s、纵荡6.4 s、升沉8.2 s、横荡8.6 s^[34,35]。

图10给出了运动舰船目标船头的积累增益变化情况，其中图10(a)为积累时间1000 s下静止、只存在平动的运动舰船和存在平动加晃动的船头方位积累结果对比；图10(b)为3种情况下船头积累增益随方位时间的变化。由图10可见，受目标平动和晃动影响，舰船目标信号无法有效积累，积累时间大于1000 s时，船头积累增益相较于静止目标损失超过20 dB。随着积累时间的增加，增益损失逐渐变大。

图11显示了2~5级海况条件下舰船运动对信号积累增益的影响。可以发现，相同积累时间下，海况越高，积累增益越低。随着积累时间增加，高海况下的积累增益损失逐渐增大，且高于低海况。

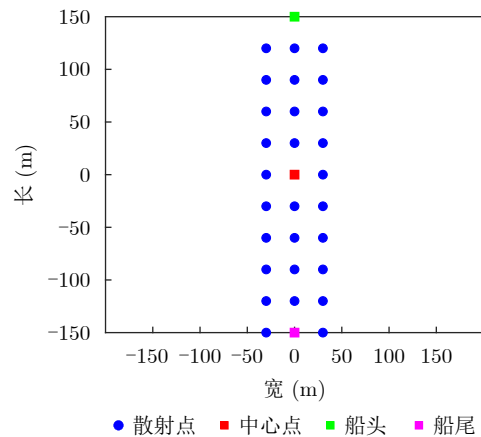
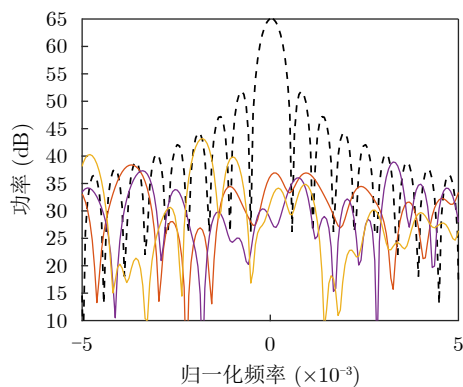


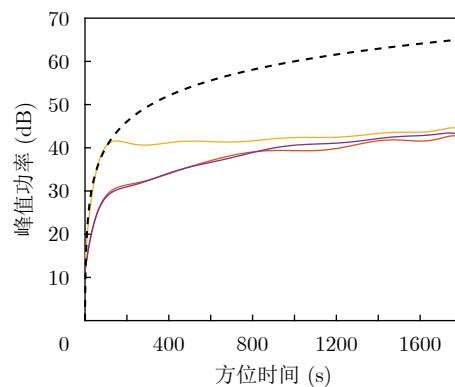
图 9 仿真的运动舰船

Fig. 9 Simulated motion vessel



(a) 运动舰船方位积累结果对比

(a) Comparison of azimuth accumulation results of moving ships



(b) 积累增益随时间的变化

(b) The variation of accumulated gain over time

图 10 GEO SAR舰船运动对能量退化的影响

Fig. 10 The influence of GEO SAR ship movement on energy degradation

图12给出了GEO SAR不同速度、不同航向下运动舰船位置偏移仿真结果。由于GEO SAR轨道高度达到35800 km，相比于LEO SAR提高了数十倍，同时卫星速度也大大降低，导致运动舰船偏移远大于LEO SAR。同时，GEO SAR中距离-方位耦合严重，舰船偏移关系更加复杂。由图12可见，对于5 m/s航速的运动舰船，最大可引起约400 km以上的位置偏差。当航向角大约为140°和320°时，即舰船速度垂直于斜距径向时，运动舰船偏移量为零；当航向角大约为50°和230°时，即舰船速度平行于斜距径向时，运动舰船偏移量达到最大值。当目标速度增加时，其位置偏移也随之等比例增加，且运动方向的不同也会导致位移大小出现明显差异。

按照表1参数分别仿真静止、10 m/s匀速直线、匀加速、匀速直线加摆动的舰船回波信号，图13给出了子孔径时长30 s时的仿真舰船探测成像结果。从图13(a)和图13(b)可以看出，传统BP与改进BP成像算法对静止目标具有相同的聚焦效果。从图13(c)、图13(d)、图13(e)和图13(f)可以看出，舰船径向速

度和加速度导致传统BP成像处理失配，图13(c)和图13(e)中舰船出现严重的方位散焦和能量弥散现象，而所提改进BP成像方法能够有效补偿运动引起的相位误差，使得图13(d)和图13(f)中舰船目标良好聚焦，对匀速运动目标积累增益提升约5 dB，对匀加速运动目标积累增益提升约12 dB。同时，由于径向速度引起了多普勒偏移，舰船目标在SAR图像中出现了约432 km的位置偏差。而对于具有摇摆的舰船，由于各散射点具有空变斜距误差，舰船方位向无法实现聚焦，其中，目标在BP成像结果图13(g)中主要能量散焦后沿方位向弥散约80 km，在改进BP成像方法结果图13(h)中主要能量沿方位向弥散约30 km。仿真表明，所提改进BP成像方法对静止目标的积累增益与经典BP算法一致，对运动目标的积累增益明显高于经典BP算法，散焦效应减弱。

图14给出了仿真运动舰船的多子孔径探测成像位置、跟踪和重定位结果，经过所提方法积累检测后，舰船在各个子孔径探测成像结果中的位置与理

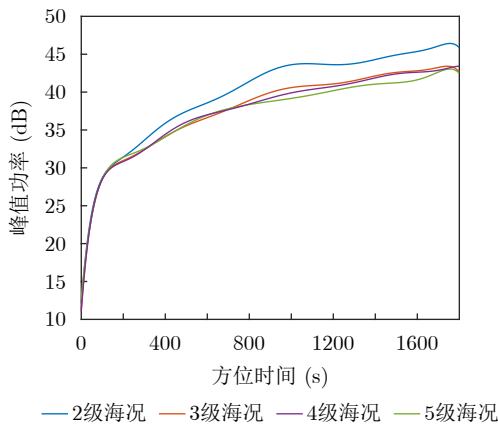


图 11 不同海况下GEO SAR舰船运动对能量退化的影响

Fig. 11 The influence of GEO SAR ship movement on energy degradation under different sea conditions

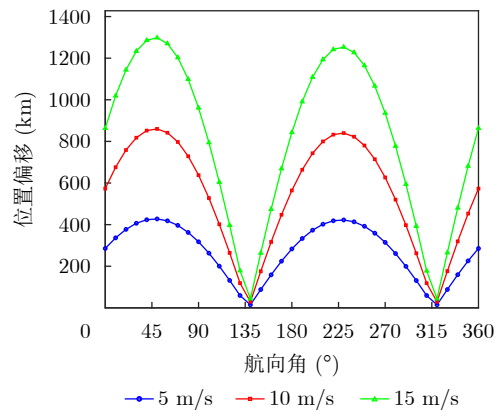
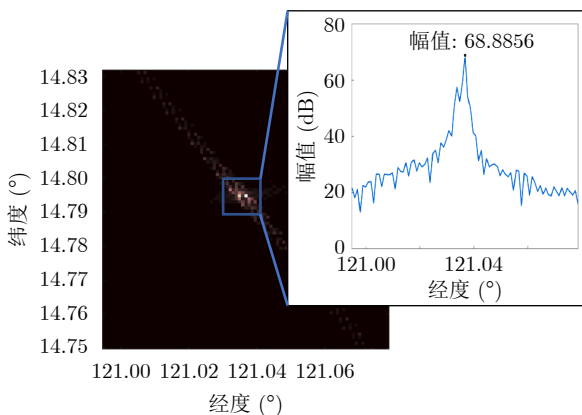
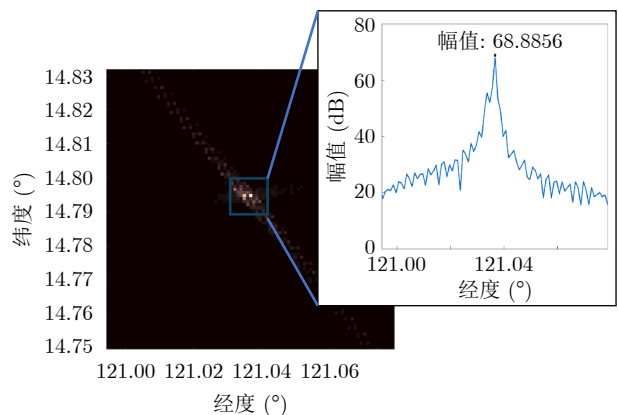


图 12 不同航速下位置偏移随航向(以正北为0°)的关系

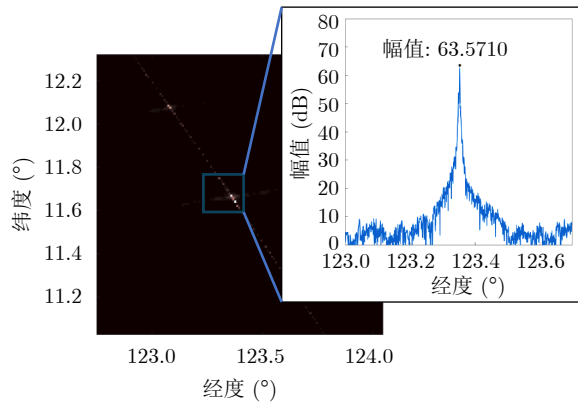
Fig. 12 The relationship between position offset and heading (with true north as 0°) at different speeds



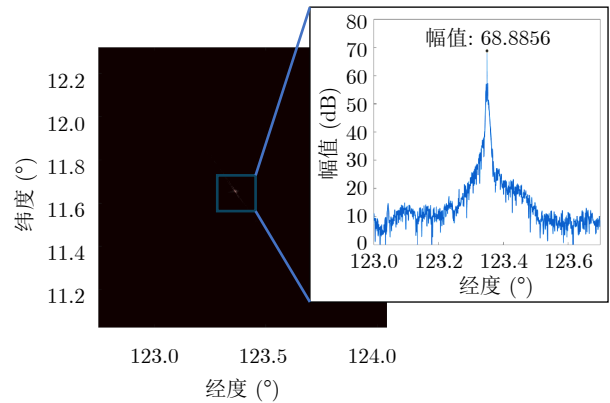
(a) 静止舰船BP成像结果
(a) BP imaging results of stationary ships



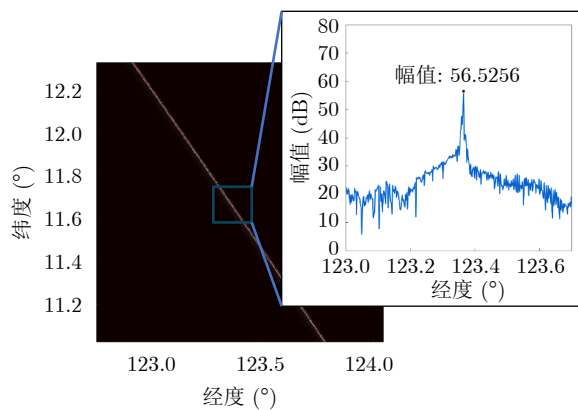
(b) 静止舰船改进BP成像结果
(b) Improved BP imaging results of stationary ships



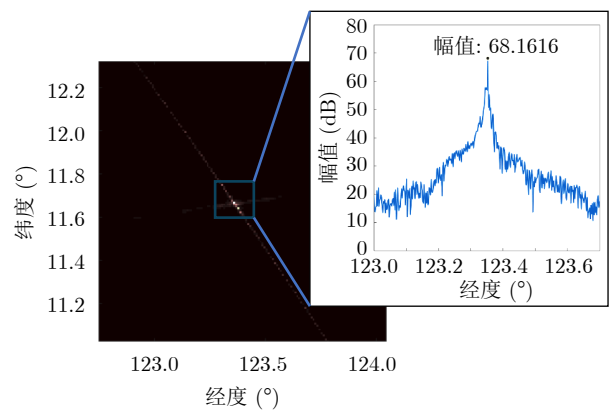
(c) 具有10 m/s速度的舰船BP成像结果
(c) BP imaging results of ships with a speed of 10 m/s



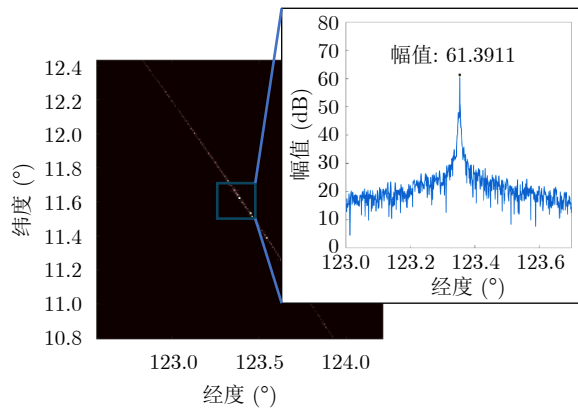
(d) 具有10 m/s速度的舰船改进BP成像结果
(d) Improved BP imaging results of ships with a speed of 10 m/s



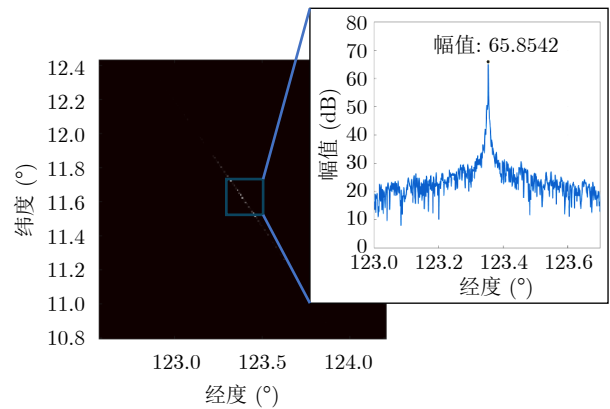
(e) 具有10 m/s速度和0.2 m/s²加速度的舰船BP成像结果
(e) BP imaging results of ships with a speed of 10 m/s and 0.2 m/s²



(f) 具有10 m/s速度和0.2 m/s²加速度的舰船改进BP成像结果
(f) Improved BP imaging results of ships with a speed of 10 m/s and 0.2 m/s²



(g) 具有10 m/s速度和摆动的舰船BP成像结果
(g) BP imaging results of ships with a speed of 10 m/s and swing



(h) 具有10 m/s速度和摆动的舰船改进BP成像结果
(h) Improved BP imaging results of ships with a speed of 10 m/s and swing

图 13 传统BP与所提改进成像方法的仿真运动舰船探测成像结果

Fig. 13 The simulation imaging results of moving ship detection by BP and the proposed improved imaging method

论偏移位置十分接近，经过滤波跟踪后，弱化了摆动引起的时变多普勒频率影响，舰船航迹得到了进一步修正，获得了较为准确的径向速度估计结果，与理论值相比，径向速度估计误差小于0.03 m/s，图14(c)和图14(d)给出了运动舰船跟踪定位航迹和重定位误差，定位误差小于900 m，表明所提方法

能实现GEO SAR复杂运动舰船的长时间跟踪与重定位。

根据文献[36]，GEO卫星位置精度为30 m，速度精度为0.05 m/s。在轨道位置测量中，沿航向的轨道位置误差和沿雷达到目标径向的轨道位置误差均会引入定位误差，GEO SAR卫星入射角范围通

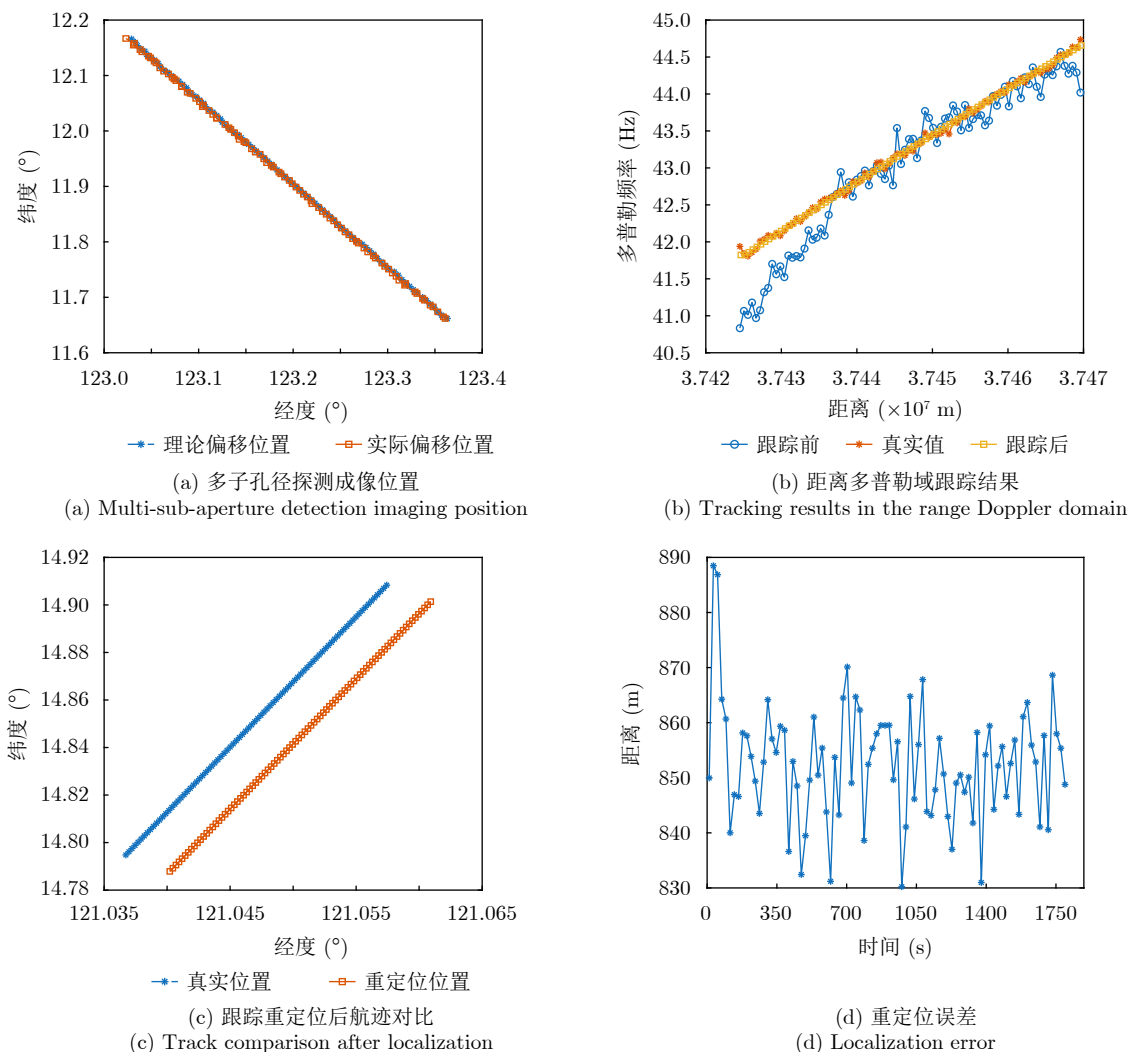


图 14 仿真运动舰船定位跟踪结果

Fig. 14 The localization and tracking results of simulated moving ships

常为 $20^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ，引入的定位误差通常不超过100 m。此外，由于GEO SAR运动速度慢，其多普勒调频率非常小且多普勒频率变化较慢，对速度误差以及求解误差的敏感性更大，因此卫星速度误差对定位误差影响较大，图15(a)画出了表1参数下卫星速度误差为 $0.01\sim 0.05$ m/s时的定位误差，可以发现定位误差随卫星速度误差增加而增大；此外，不同卫星速度误差大小下，定位误差随速度误差方向与斜距径向的夹角变化趋势相同，速度误差方向与斜距径向垂直时误差最小，速度误差方向与斜距径向平行时误差最大，最大定位误差约4.5 km。舰船速度估计误差对定位误差的影响结果如图15(b)所示，可以发现，定位误差与速度估计误差成正比，且不同航向角下的定位误差不一致，当舰船目标航向与斜距径向平行时，定位误差最大，反之则逐渐减小，所提方法对速度估计精度优于 0.03 m/s，产生的定位误差不超过2.5 km。

6.2 信杂比分析

由4.2节可知，舰船运动速度 V 、成像子孔径时长 T_s 和成像网格大小 $\Delta a \times \Delta r$ 均会影响成像积累增益，为了分析所提方法在不同情况下的积累性能，将输入信杂比设置为 $[-40$ dB, 0 dB]区间，利用所提方法进行蒙特卡罗实验，图16画出了输入SCR与输出SCR关系图。图16(a)展示了不同速度下的输入输出SCR关系，可以发现，舰船运动速度为2 m/s与5 m/s时，舰船运动在子孔径时间内引入的二次相位误差可以忽略，输出SCR高于其他情况；当速度增大至10 m/s与15 m/s时，舰船运动在子孔径时间内引入的二次相位误差显著增大，导致积累增益下降。因此，在一定子孔径时长下，随运动速度增大，积累增益先增后降。图16(b)展示了不同子孔径时长下的输入输出SCR关系，可以发现随着子孔径时长从5 s增加到30 s，输出SCR逐渐增大，这是因为在满足二次相位误差不大于 $\pi/4$ 条件下，积累

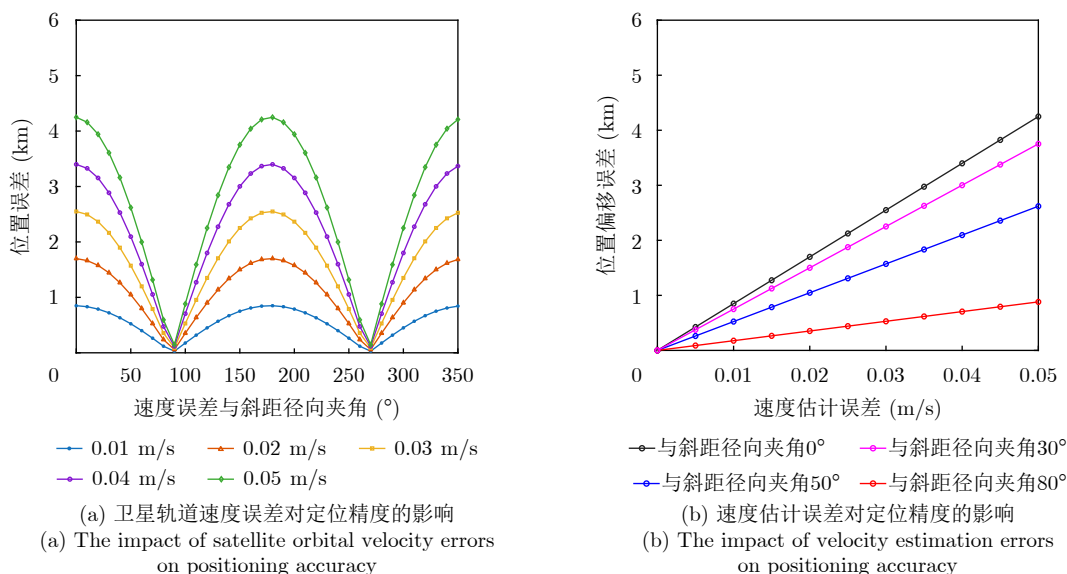


图 15 定位精度分析

Fig. 15 Positioning accuracy analysis

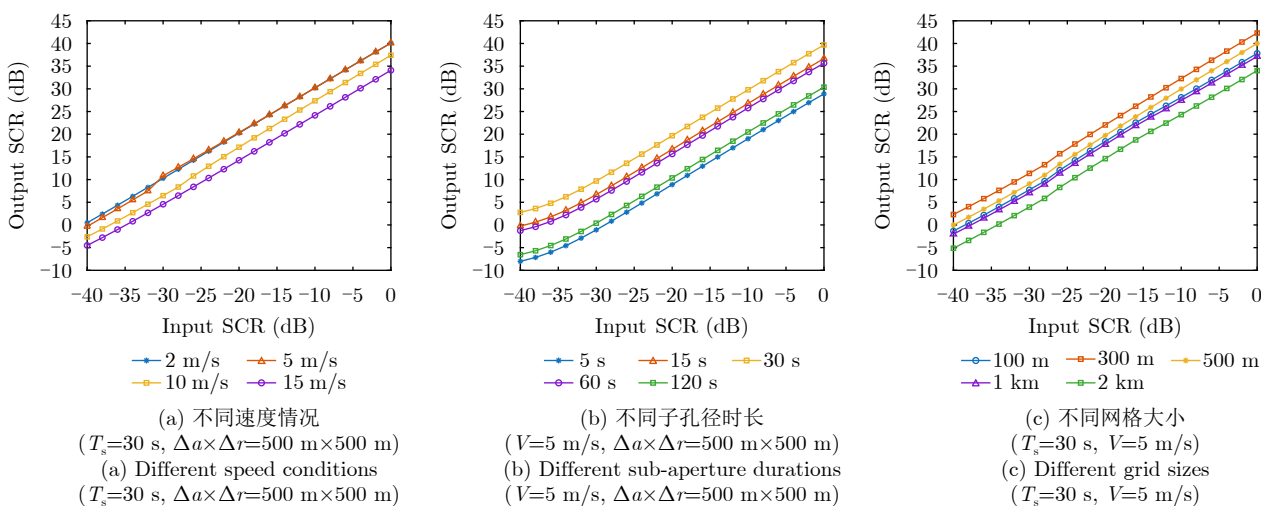


图 16 输入-输出信杂比分析

Fig. 16 Input-output signal-to-noise ratio analysis

增益随着积累脉冲数增加而增大。而随着积累时间进一步增大至60 s和120 s, 目标运动速度引入的相位误差增大, 导致积累增益下降。图16(c)展示了不同成像网格大小下的输入输出SCR关系, 当成像网格小于舰船目标时, 积累增益随着成像网格的增大而增加, 但是当成像网格大于目标大小时, 积累增益随着成像网格的增大而减小, 与4.2节分析一致。

6.3 实测数据实验

本节利用我国陆地探测四号01星GEO SAR实验数据进行了运动舰船探测成像与跟踪定位处理验证实验^[5,6], 实验数据获取区域海况如表2所示, 风速为27 km/h, 浪高2.48 m, 对应4级海况。为了

验证探测、跟踪和定位的有效性, 同步获取了实验海域的船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)信息。设置子孔径时长组 $T = [20$ s: 2 s: 50 s], 平均SCR随积累时间的变化结果如图17(a)所示, 可以发现当积累时间为30 s时平均SCR最高, 因此选取30 s为最优子孔径时长。单个子孔径改进BP成像算法探测结果如图17(b) — 图17(d)所示, 可以看到, Keystone变换后距离徙动已被校正, 经过改进BP成像算法积累后, 信杂比约21.6 dB。

图18展示了运动舰船多子孔径探测成像结果, 进一步利用所提方法对上述运动舰船进行定位跟踪, 结果如图19所示。根据AIS信息, 图19(a)为长

349 m、宽60 m的TOWA MARU货船。图19(b)为舰船实际位置偏移与理论偏移位置对比,其中实际偏移位置表示舰船在不同子孔径图像中的中心时刻位置,理论偏移位置基于AIS信息与卫星轨道信息结合星地观测几何计算获得。图19(c)为本文方法跟踪航迹与AIS航迹对比,可以看出经过跟踪与重定位后,在30分钟时间观测内舰船目标航迹与真值接近。图19(d)展示了不同时刻重定位误差, TOWA MARU舰船目标的定位误差约为3100 m, 小于

4 km, 与陆地探测四号01星标称无控定位精度一致^[5]。与6.1节仿真结果相比, 实测数据定位误差要更大一些, 这主要是由于在实际数据中, 定位误差除算法误差外, 还存在由轨道误差、大气传输等因素引入的误差。

表3给出了本次实验中5艘不同运动舰船的跟踪与定位结果, 跟踪定位时长均为30 min, 经与AIS信息比对, 定位均方根误差均小于4 km, 与陆地探测四号01星标称无控定位精度一致^[5], 实现了同步轨道SAR卫星对运动舰船目标的长时间持续跟踪。

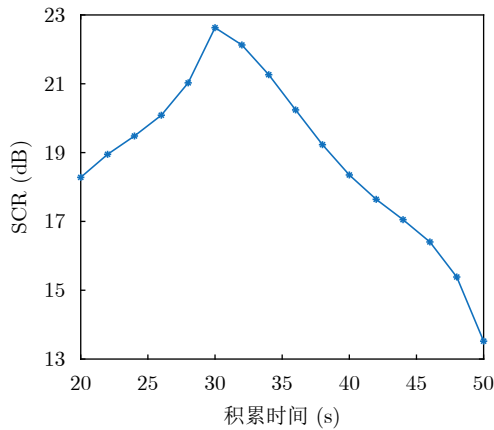
7 结语

本文针对地球同步轨道合成孔径雷达(GEO SAR)在海上舰船探测与跟踪中面临的舰船运动相位历程畸变严重、目标信杂比降低、定位偏移显著等挑战, 提出了一种覆盖成像探测、跟踪与定位的一体化处理算法。该算法首先将全孔径合理划分并优化

表 2 实验区域海况参数

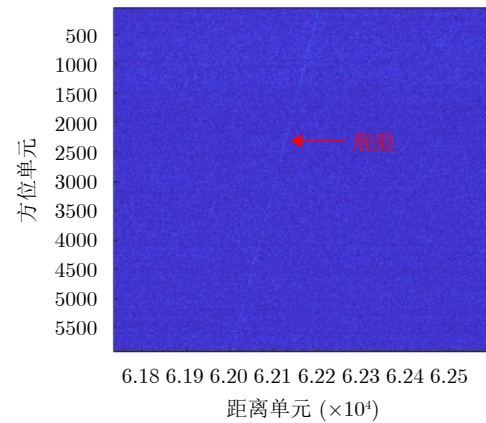
Tab. 2 Test area sea conditions parameters

参数	数值	参数	数值
风向	185°	风速	27 km/h
浪高	2.48 m	波浪周期	8.6 s
洋流方向	100°	洋流速度	1.19 km/h
海况等级	4级		



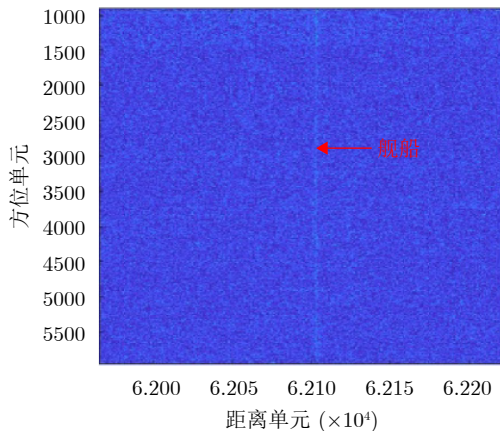
(a) 平均SCR随积累时间变化

(a) Average SCR variation with intergration time



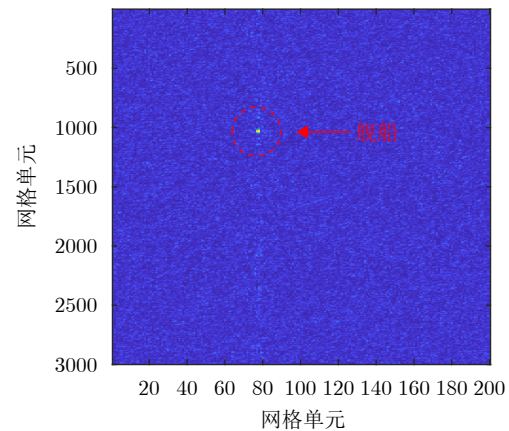
(b) 距离压缩后

(b) After range compression



(c) Dechirp和KT变换后

(c) Following Dechirp and KT



(d) 成像积累结果

(d) Imaging accumulation results

图 17 基于改进BP成像算法的单个子孔径运动舰船探测成像过程

Fig. 17 Imaging process of a single sub-aperture moving ship detection based on the improved BP imaging algorithm

子孔径长度，通过子孔径改进成像方法有效抑制了舰船运动导致的散焦现象，提升了强杂波背景下舰船的检测能力。在获取目标点迹后，通过将舰船摆动引起的时变多普勒频率建模为未知量测噪声，并将目标定位信息转换至斜距-多普勒平面，基于短时匀速运动假设，采用双向平滑滤波方法实现对多子孔径检测结果的航迹跟踪。最终，依据长时间序

列的跟踪结果反演目标径向速度，实现高精度舰船重定位。实验结果表明，本文提出的方法显著提升了GEO SAR对运动舰船的持续跟踪能力，为解决GEO SAR在运动舰船观测中的关键难题提供了有效的技术途径。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

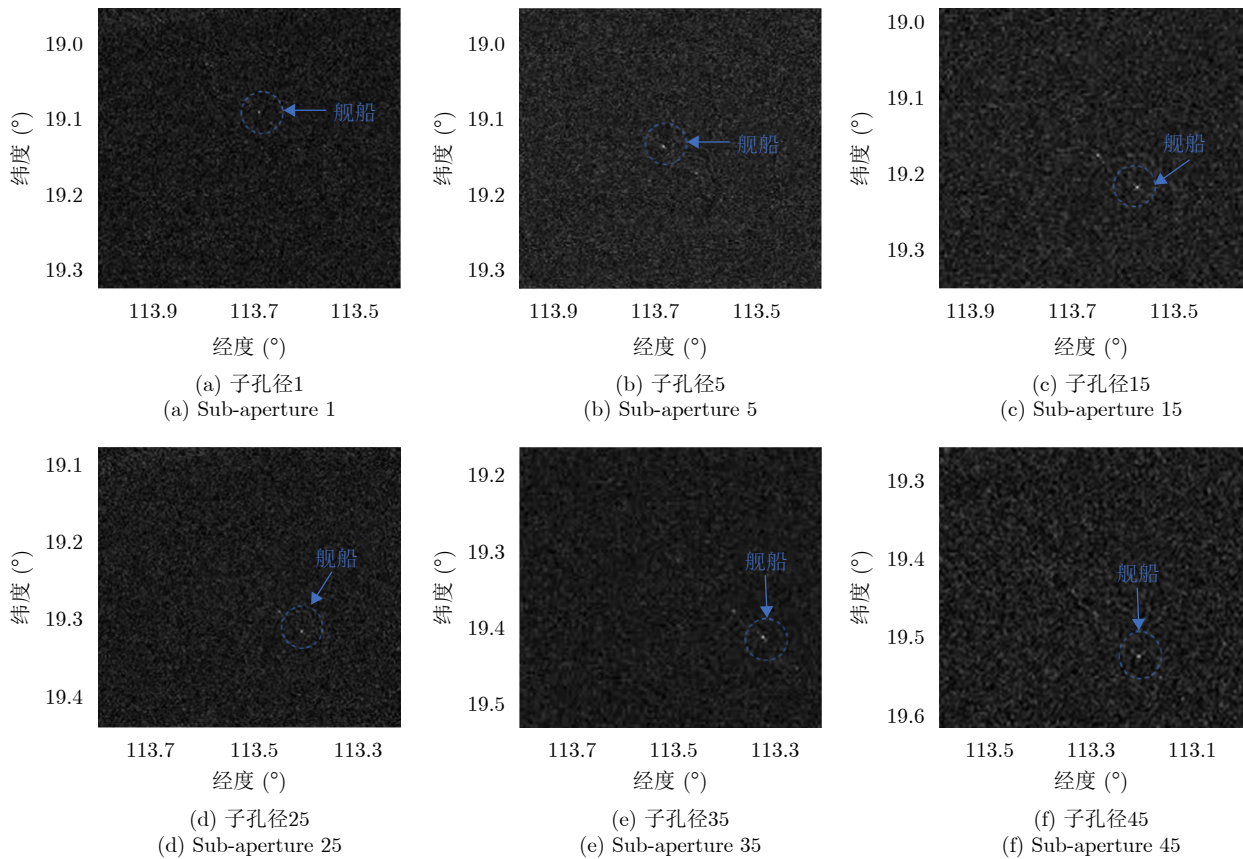
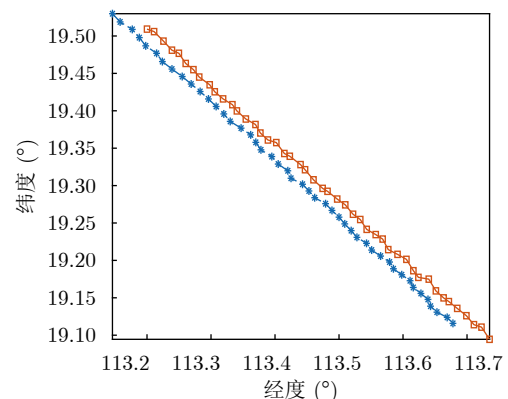


图 18 运动舰船多子孔径探测成像结果

Fig. 18 Imaging results of multi-sub-aperture detection on moving ships



(a) 舰船目标
(a) Ship target



—◆— 理论偏移位置 —□— 实际偏移位置
(b) 舰船偏移位置对比
(b) Comparison of ship offset positions

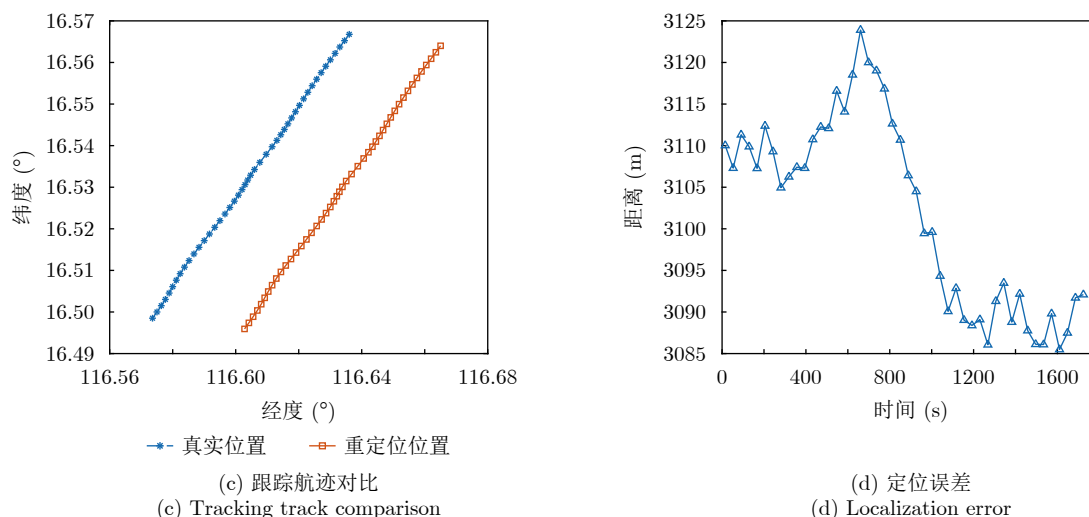


图 19 运动舰船1定位跟踪结果

Fig. 19 Localization and tracking results of moving ship 1

表 3 在轨GEO SAR舰船定位跟踪实验结果

Tab. 3 Results of in-orbit GEO SAR ship localization and tracking tests

舰船编号	长度(m)×宽度(m)	位置 [纬度,经度]	子孔径1	...	子孔径15	...	子孔径30	...	子孔径45	定位均方根误差(m)
1	349×60	跟踪定位位置	16.564°N 116.665°E	...	16.543°N 116.646°E	...	16.521°N 116.625°E	...	16.497°N 116.604°E	3102.04
		AIS位置	16.567°N 116.636°E	...	16.545°N 116.617°E	...	16.524°N 116.597°E	...	16.500°N 116.575°E	
2	263×60	跟踪定位位置	11.268°N 111.527°E	...	11.254°N 111.512°E	...	11.231°N 111.494°E	...	11.209°N 111.479°E	1614.67
		AIS位置	11.274°N 111.518°E	...	11.256°N 111.499°E	...	11.238°N 111.480°E	...	11.216°N 111.461°E	
3	333×60	跟踪定位位置	10.681°N 111.266°E	...	10.654°N 111.258°E	...	10.624°N 111.250°E	...	10.594°N 111.241°E	2663.21
		AIS位置	10.651°N 111.277°E	...	10.634°N 111.261°E	...	10.615°N 111.245°E	...	10.596°N 111.228°E	
4	399×60	跟踪定位位置	12.823°N 114.212°E	...	12.843°N 114.260°E	...	12.863°N 114.311°E	...	12.884°N 114.362°E	3168.05
		AIS位置	12.784°N 114.215°E	...	12.820°N 114.253°E	...	12.858°N 114.294°E	...	12.894°N 114.332°E	
5	295×46	跟踪定位位置	12.342°N 110.118°E	...	12.346°N 110.134°E	...	12.351°N 110.153°E	...	12.356°N 110.171°E	3296.07
		AIS位置	12.337°N 110.141°E	...	12.388°N 110.142°E	...	12.362°N 110.142°E	...	12.341°N 110.143°E	

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

参考文献

- [1] 邢相薇, 计科峰, 康利鸿, 等. HRWS SAR图像舰船目标监视技术研究综述[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 107–121. doi: 10.12000/JR14144.
- [2] NEWAY M K, KANTOR J M, and BENITZ G R. XING Xiangwei, JI Kefeng, KANG Lihong, *et al.* Review of ship surveillance technologies based on high-resolution wide-swath synthetic aperture radar imaging[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 107–121. doi: 10.12000/JR14144.
- [3] JIA Hecheng, PU Xinyang, LIU Qiaoyu, *et al.* A fast progressive ship detection method for very large full-scene SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 5214411. doi: 10.1109/TGRS.2021.3098460.
- [4] TOMIYASU K and PACELLI J L. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, GE-

Autofocus methods for moving target imaging in synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 5214411. doi: 10.1109/TGRS.2021.3098460.

[3] JIA Hecheng, PU Xinyang, LIU Qiaoyu, *et al.* A fast progressive ship detection method for very large full-scene SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5206615. doi: 10.1109/TGRS.2024.3369637.

[4] TOMIYASU K and PACELLI J L. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, GE-

- 21(3): 324–329. doi: [10.1109/TGRS.1983.350561](https://doi.org/10.1109/TGRS.1983.350561).
- [5] 张庆君, 倪崇, 戴超, 等. 陆地探测四号01星总体设计与技术创新[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2025, 45(1): 1–11. doi: [10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0001](https://doi.org/10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0001).
ZHANG Qingjun, NI Chong, DAI Chao, *et al.* System design and key technologies of No.4 land exploration satellite 01[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2025, 45(1): 1–11. doi: [10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0001](https://doi.org/10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0001).
- [6] 李光廷, 谭小敏, 李财品, 等. 陆地探测四号01星合成孔径雷达载荷设计与实现[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2025, 45(4): 123–130. doi: [10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0064](https://doi.org/10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0064).
LI Guangting, TAN Xiaomin, LI Caipin, *et al.* The load design and implementation of LT-4 space-borne SAR[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2025, 45(4): 123–130. doi: [10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0064](https://doi.org/10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0064).
- [7] MELZI M, HU Cheng, DONG Xichao, *et al.* Velocity estimation of multiple moving targets in single-channel geosynchronous SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(8): 5861–5879. doi: [10.1109/TGRS.2020.2971853](https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2971853).
- [8] 胡哲颖, 黄丽佳, 胡文龙, 等. 高轨SAR非平直几何动目标成像影响建模[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(5): 496–504. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2018.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2018.05.006).
HU Zheyang, HUANG Lijia, HU Wenlong, *et al.* Modeling and analysis of target motion influence on GEO SAR based on non-straight squint imaging geometry[J]. *Radar Science and Technology*, 2018, 16(5): 496–504. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2018.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2018.05.006).
- [9] 吴一凡, 黄丽佳, 严朝保, 等. 面向GEO SAR图像的海上区域运动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(6): 1723–1733. doi: [10.11999/JEIT240906](https://doi.org/10.11999/JEIT240906).
WU Yifan, HUANG Lijia, YAN Chaobao, *et al.* A moving target detection method for GEO SAR image in maritime areas[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(6): 1723–1733. doi: [10.11999/JEIT240906](https://doi.org/10.11999/JEIT240906).
- [10] ZENG Tianjiao, ZHANG Tianwen, SHAO Zikang, *et al.* CFAR-DP-FW: A CFAR-guided dual-polarization fusion framework for large-scene SAR ship detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 7242–7259. doi: [10.1109/JSTARS.2024.3358058](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3358058).
- [11] 杜兰, 王兆成, 王燕, 等. 复杂场景下单通道SAR目标检测及鉴别研究进展综述[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 34–54. doi: [10.12000/JR19104](https://doi.org/10.12000/JR19104).
DU Lan, WANG Zhaocheng, WANG Yan, *et al.* Survey of research progress on target detection and discrimination of single-channel SAR images for complex scenes[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 34–54. doi: [10.12000/JR19104](https://doi.org/10.12000/JR19104).
- [12] LI Jianwei, CHEN Jie, CHENG Pu, *et al.* A survey on deep-learning-based real-time SAR ship detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 3218–3247. doi: [10.1109/JSTARS.2023.3244616](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3244616).
- [13] 于宗琴, 金智鹏. 局部K-分布的SAR图像舰船航迹精确定位方法[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(24): 79–81. doi: [10.3404/j.issn.1672-7649.2020.12A.027](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2020.12A.027).
YU Zongqin and JIN Zhipeng. Accurate location method of ship track based on local K-distribution in SAR image[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(24): 79–81. doi: [10.3404/j.issn.1672-7649.2020.12A.027](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2020.12A.027).
- [14] 龙雅君. 多通道体制SAR运动目标检测与成像关键问题研究[D]. [博士论文], 中国科学院大学, 2022.
Long Yajun. Research on key issues of moving target detection and imaging for multi-channel SAR system[D]. [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [15] 李中余, 皮浩卓, 李俊奥, 等. 双基SAR空时自适应ANM-ADMM-Net杂波抑制技术[J]. 雷达学报(中英文), 2025, 14(5): 1196–1214. doi: [10.12000/JR24032](https://doi.org/10.12000/JR24032).
LI Zhongyu, PI Haozhuo, LI Jun'ao, *et al.* Clutter suppression technology based space-time adaptive ANM-ADMM-Net for bistatic SAR[J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(5): 1196–1214. doi: [10.12000/JR24032](https://doi.org/10.12000/JR24032).
- [16] WANG Zhihao, WANG Yongliang, XING Mengdao, *et al.* A novel two-step scheme based on joint GO-DPCA and local STAP in image domain for multichannel SAR-GMTI[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 8259–8272. doi: [10.1109/JSTARS.2021.3104595](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3104595).
- [17] ZHANG Tianyi, DING Zegang, TIAN Weiming, *et al.* A 2-D nonlinear chirp scaling algorithm for high squint GEO SAR imaging based on optimal azimuth polynomial compensation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5724–5735. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2765353](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2765353).
- [18] CHEN Quan, LIU Wenkang, SUN Guangcai, *et al.* A fast Cartesian back-projection algorithm based on ground surface grid for GEO SAR focusing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5217114. doi: [10.1109/TGRS.2021.3125797](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3125797).
- [19] DING Zegang, ZHU Kaiwen, ZHANG Tianyi, *et al.* An autofocus back projection algorithm for GEO SAR based on minimum entropy[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5226114. doi: [10.1109/TGRS.2022.3164922](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3164922).
- [20] 廉濛. 地球同步轨道星/机双基地SAR非平稳舰船目标成像研

- 究[D]. [博士论文], 哈尔滨工业大学, 2019. doi: [10.27061/d.cnki.gghgdu.2019.005154](https://doi.org/10.27061/d.cnki.gghgdu.2019.005154).
- LIAN Meng. Research on non-stationary ship targets imaging based on geosynchronous spaceborne/airborne bistatic SAR[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Institute of Technology, 2019. doi: [10.27061/d.cnki.gghgdu.2019.005154](https://doi.org/10.27061/d.cnki.gghgdu.2019.005154).
- [21] YU Jindong, YU Ze, GUO Yukun, *et al.* Signal separation in GEO SAR imaging of maneuvering ships by removing micro-motion effect[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 788–803. doi: [10.1109/JSTARS.2021.3139112](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3139112).
- [22] ZHU Xinhang, JIANG Yicheng, LIU Zitao, *et al.* Division and focusing of multiple moving ship targets for GEO SAR via MFDFrFT spectrum analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5217816. doi: [10.1109/TGRS.2024.3427852](https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3427852).
- [23] 化青龙, 张云, 任航, 等. 基于最小熵准则与生成对抗网络的SAR三维转动舰船目标重聚焦方法[J]. *电子学报*, 2024, 52(8): 2900–2912. doi: [10.12263/DZXB.20230465](https://doi.org/10.12263/DZXB.20230465).
- HUA Qinglong, ZHANG Yun, REN Hang, *et al.* Refocusing for three-dimensional rotating ship targets in SAR images based on minimum entropy criteria and generative adversarial network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(8): 2900–2912. doi: [10.12263/DZXB.20230465](https://doi.org/10.12263/DZXB.20230465).
- [24] YU Jindong, YU Ze, and LI Chunsheng. GEO SAR imaging of maneuvering ships based on time-frequency features extraction[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5226321. doi: [10.1109/TGRS.2022.3166758](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3166758).
- [25] ZHONG Chao, DING Jinshan, and ZHANG Yuhong. Joint tracking of moving target in single-channel video SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5212718. doi: [10.1109/TGRS.2021.3115491](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3115491).
- [26] ZHANG Ying, MAO Xinhua, YAN He, *et al.* A novel approach to moving targets shadow detection in VideoSAR imagery sequence[C]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, USA, 2017: 606–609. doi: [10.1109/IGARSS.2017.8127026](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127026).
- [27] FAN Lei, WANG Hongqiang, YANG Qi, *et al.* High frame-rate and low-latency video SAR based on robust Doppler parameters estimation in the terahertz regime[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5207016. doi: [10.1109/TGRS.2023.3271310](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3271310).
- [28] YAN He, LIU Hui, XU Xing, *et al.* A new method of video SAR ground moving target detection and tracking based on the interframe amplitude temporal curve[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5219217. doi: [10.1109/TGRS.2023.3325848](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3325848).
- [29] WU Yifan, QI Xiyu, HUANG Lijia, *et al.* Enhanced BP algorithm combined with semantic segmentation and subaperture for improving agricultural scene image quality in GEO SAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, 18: 3043–3056. doi: [10.1109/JSTARS.2024.3520119](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3520119).
- [30] 付嘉瑜, 李元昊, 陈志扬, 等. GEO SAR对运动目标时序RD粗精度定位方法[C]. 第十八届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集, 合肥, 中国, 2024: 269–274. doi: [10.26914/c.cnkihy.2024.050388](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2024.050388).
- FU Jiayu, LI Yuanhao, CHEN Zhiyang, *et al.* Coarse-precision moving target RD localization method of GEO SAR using time sequences[C]. The 18th National Academic Conference on Signal and Intelligent Information Processing and Application, Hefei, China, 2024: 269–274. doi: [10.26914/c.cnkihy.2024.050388](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2024.050388).
- [31] 胥遇时. 双(多)基地合成孔径雷达定位方法[D]. [硕士论文], 电子科技大学, 2018.
- XU Yushi. Bistatic and multistatic synthetic aperture radar localization methods[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [32] 张升. 机/星载远距离SAR动目标信号处理方法研究[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2017. doi: [10.7666/d.D01384546](https://doi.org/10.7666/d.D01384546).
- ZHANG Sheng. Study on signal processing of moving target for long range distance airborne/spaceborne SAR[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2017. doi: [10.7666/d.D01384546](https://doi.org/10.7666/d.D01384546).
- [33] 杨传安. 振荡及摇摆舰船SAR成像技术研究[D]. [硕士论文], 中国科学院大学, 2017.
- YANG Chuanan. Research on SAR imaging technology for oscillating and swaying ships[D]. [Master dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [34] LEWINTER S W. High resolution radar: US2999236 A[P]. 1961-12-10.
- [35] DOERRY A W. Ship dynamics for maritime ISAR imaging[R]. SAND2008-1020, 2008. doi: [10.2172/929523](https://doi.org/10.2172/929523).
- [36] 李冰, 刘蕾, 王猛. GEO卫星GNSS导航在轨长期性能验证与分析[J]. *上海航天*, 2017, 34(4): 133–143. doi: [10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.016](https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.016).
- LI Bing, LIU Lei, and WANG Meng. Performance demonstration and analysis of GNSS navigation in GEO satellites[J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(4): 133–143. doi: [10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.016](https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.016).

作者简介

向建冰，助理研究员，主要研究方向为SAR成像与动目标探测定位。

仲利华，研究员，主要研究方向为星载宽幅SAR处理和舰船检测。

吴一凡，助理研究员，主要研究方向为SAR智能数据处理与信息提取。

宋冲，助理研究员，主要研究方向为雷达目标检测与成像。

黄丽佳，研究员，主要研究方向为星载SAR精细化处理和智能应用。

商明样，副研究员，主要研究方向为高分宽幅、超分辨率星载SAR成像处理。

袁新哲，正高级工程师，主要研究方向为新体制星载SAR系统、星载SAR海洋遥感。

胡玉新，研究员，主要研究方向为SAR成像与海洋目标信息提取。

(责任编辑：于青)