

文章编号: 2095-4980(2025)08-0793-11

基于北斗导航的 PR 海面目标联合定位与跟踪方法

李奥成¹, 黄川², 李中余¹, 杨青¹, 安洪阳¹, 武俊杰¹, 杨建宇¹

(1. 电子科技大学 信息与通信工程学院, 四川 成都 611731; 2. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 随着北斗导航系统的应用完善, 外辐射源雷达(PR)获得了全天时、全天候和广域覆盖的机会信号源, 在海面监测领域具有巨大的应用价值, 但极低的信噪比条件和非线性时-空变结构, 导致传统雷达定位与跟踪方法难以有效适用。本文提出一种融合多卫星辐射源的海面目标联合定位与跟踪(JLT)方法, 通过长时间积累将各卫星回波能量聚焦至双基距离差-多普勒质心-多普勒调频率(DBR-DC-DFR)域, 利用同一目标在不同卫星照射下的 DFR 一致性特征, 将多基积累结果联合投影至 X - Y - V_r 域进行非相干融合, 从而实现初始定位和速度估计。然后, 针对外辐射源雷达的非线性量测模型, 采用粒子滤波(PF)联合多卫星实现运动目标的精确跟踪。仿真实验验证了该方法能提高目标的状态估计性能, 并有效降低目标轨迹误差。

关键词: 外辐射源雷达(PR); 定位和跟踪; 海面目标; 多基融合

中图分类号: TN957

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025078

Joint localization and tracking method of BeiDou-based PR for maritime target

LI Aocheng¹, HUANG Chuan², LI Zhongyu¹, YANG Qing¹, AN Hongyang¹, WU Junjie¹, YANG Jianyu¹

(1.School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China; 2.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the global deployment of the BeiDou navigation system, Passive Radar(PR) has gained access to all-weather, continuous, and wide-coverage opportunistic signals, demonstrating significant potential for maritime surveillance. However, the extremely low signal-to-noise ratio and nonlinear spatio-temporal variations challenge the effectiveness of conventional radar localization and tracking methods. A Joint Localization and Tracking(JLT) method is proposed for maritime targets by fusing multi-satellite illuminators. The approach involves long-time coherent integration of echoes into the Difference Bistatic Range(DBR), Doppler Centroid(DC), and Doppler Frequency Rate(DFR) domain. Leveraging the consistency of DFR, the multi-static results are projected and non-coherently fused in the X - Y - V_r domain to achieve initial target localization and velocity estimation. Subsequently, a Particle Filter(PF) is employed to address the nonlinear measurement model of PR, enabling precise multi-satellite tracking of moving targets. Simulation results confirm that the proposed method enhances the performance of state estimation and significantly reduces trajectory estimation errors.

Keywords: Passive Radar(PR); localization and tracking; maritime target; multistatic fusion

随着发展经济贸易与维护国家安全的需求日益增强, 海洋权益保护和资源开发利用成为科学技术研究的重点, 其中海面区域的持续稳定监测是主要方向之一^[1]。相较于有源雷达(Active Radar, AR), 外辐射源雷达(PR)能够利用环境中存在的机会照射源实现对环境和目标的监测感知, 具有广域覆盖、高费效比、强隐蔽性与反隐身等诸多优势, 凸显了用于海面监测的巨大潜能^[2]。早期 PR 的相关研究主要利用调频(Frequency Modulation, FM)^[3]、数字音频广播(Digital Audio Broadcasting, DAB)^[4]和数字地面广播电视(Digital Video Broadcasting-

收稿日期: 2025-03-13; 修回日期: 2025-05-08

引用格式: 李奥成, 黄川, 李中余, 等. 基于北斗导航的 PR 海面目标联合定位与跟踪方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(8): 793-803. DOI:10.11805/TKYDA2025078.

Citation format: LI Aocheng, HUANG Chuan, LI Zhongyu, et al. Joint localization and tracking method of BeiDou-based PR for maritime target[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(8): 793-803. DOI:10.11805/TKYDA2025078.

Terrestrial, DVB-T)^[5]等地基系统播发的信号。固定的发射站导致相关应用仅能覆盖有限的陆地区域,而且较窄的信号带宽提供的探测精确度不足。之后,研究延伸至机载平台搭载辐射源的空基 PR^[6-7],该类系统构型灵活,可通过平台自身的运动合成较大的天线孔径,探测精确度显著提升,但覆盖范围和时间非常局限。近年来,随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的建设完善和低轨卫星的加速部署,推动星基 PR 系统成为研究的焦点^[8-9]。卫星辐射源具有全天时、全天候和构型丰富等多方位优势,广泛拓展了 PR 的应用场景。但受限于卫星运行轨道高度,星基 PR 系统面临可用信号能量极低的难题。以北斗导航卫星为例,信号落地功率密度典型值为 -135 dBW/m^2 ,需要长时间的回波积累提升信噪比;同时,卫星的高速运动使得长时间观测下系统构型存在强时-空变特性,对能量积累造成严重干扰。目前相关领域已积累大量的研究成果^[10-13]。

对于 PR 在海面监测的实际应用,更重要的是根据检测结果对高价值运动目标进行定位和跟踪。传统跟踪算法依赖先验状态和模型^[14-15],但在目标非合作的情况下,需将定位作为先决条件^[16]。目前,PR 普遍采用距离-多普勒(Range-Doppler, RD)检测和定位模型^[17-18],通过提取距离和多普勒参数,结合双基几何构型联合方程求解目标位置,其精确度受参数估计准确性的制约。文献[19]通过最小化熵图像,联合分布式检测结果实现目标定位和速度估计,但该方法需要冗长的迭代过程,很难用于跟踪阶段。文献[20]通过构建椭圆坐标系降维未知参量、估计多普勒来确定位置,其目的主要为聚焦成像,很大程度上依赖目标的先验信息。文献[21]通过提取并反演回波中目标的能量轨迹进行定位和跟踪,避免了多普勒参数估计。但星基 PR 接收回波脉压后的信噪比低于 -20 dB ,无法实现轨迹提取。文献[22]改进了 PR 跟踪算法以适应机动目标,但需要阵列雷达提供角度量测,很难适用于星载 PR。针对星载 PR 体制,文献[23]通过时-空联合积累,再投影至本地坐标系实现目标定位,但无法估计目标的真实速度,且未考虑检测误差的影响。文献[24]利用单颗正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)卫星形成的虚拟孔径进行被动定位,未考虑分布式的情况,且信号类型不适用于导航卫星。

本文提出一种利用北斗导航的 PR 联合定位与跟踪方法,能够避免参数估计,融合多辐射源信号实现目标的直接定位,提高检测性能;能够根据初始定位结果完成多基非线性构型下的目标跟踪。

1 海面目标信号模型与特性分析

1.1 多辐射源海面目标回波模型

基于北斗导航卫星的外辐射源雷达系统几何构型如图 1 所示,其中以地面静止接收站为原点建立三维笛卡尔坐标系 X - Y - Z - O 。考虑有 K 颗北斗卫星波束范围能够覆盖该场景,分别对应位置矢量 $\mathbf{P}_{T,k}$ 、速度矢量 $\mathbf{v}_{T,k}$ 和加速度矢量 $\mathbf{a}_{T,k}$,其中 $k=1,2,3,\dots,K$ 。为方便分析,假设场景中仅单个海面目标,其位置矢量和速度矢量分别记为 $\mathbf{P}_{Tg}$ 、 $\mathbf{v}_{Tg}$ 。则第 k 颗卫星到接收站 R_x 的基线距离为 $R_{b,k}$,信号到目标以及经过目标反射到接收站的传播距离分别为 $R_{T,k}$ 和 R_R 。以上距离均随着卫星和目标的位置运动而不断变化,计算表达式为^[23]:

$$\begin{cases} R_{b,k}(\eta) = \left| \mathbf{P}_{T,k} + \mathbf{v}_{T,k}\eta + \frac{1}{2}\mathbf{a}_{T,k}\eta^2 \right| \\ R_{T,k}(\eta) = \left| \mathbf{P}_{T,k} - \mathbf{P}_{Tg} + (\mathbf{v}_{T,k} - \mathbf{v}_{Tg})\eta + \frac{1}{2}\mathbf{a}_{T,k}\eta^2 \right| \\ R_R(\eta) = \left| \mathbf{P}_{Tg} + \mathbf{v}_{Tg}\eta \right| \end{cases} \quad (1)$$

式中 η 为慢时间。

接收站雷达包含参考通道和监视通道两路天线,其中参考通道采集卫星的直达波用于同步,监视通道接收监测区域的散射回波。北斗卫星播发的导航信号调制有测距码和导航电文信息,测距码由伪随机序列构成,以脉冲重复间隔(Pulse Recurrence Interval, PRI, 公式中用 I_{PR} 表示)为周期连续发送,能够辅助卫星捕获和时频同步处理^[25]。将本地生成的参考信号与目标散射回波分别按照 PRI 二维划分后进行距离向脉冲压缩,得到第 k 颗卫星在距离-方位时间的回波时域模型为:

$$s_k(\tau, \eta) = \sigma_{\eta,k} \text{rect}\left(\frac{\eta}{T_a}\right) \rho \left[\tau - \frac{R_k(\eta)}{c} \right] \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} R_k(\eta) \right\} \quad (2)$$

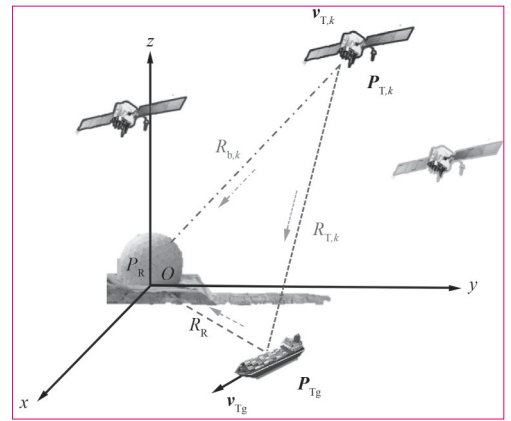


Fig.1 Geometry of BeiDou-based passive multistatic radar
图 1 基于北斗导航卫星的外辐射源雷达几何构型

式中: τ 为快时间; $\rho(\cdot)$ 为参考信号与目标散射回波的互相关函数; T_a 为观测总时长; $\sigma_{\eta,k}$ 为随方位时间变化的复散射系数; c 为光速; λ 为信号波长; $R_k(\eta)$ 为双基距离差(Difference Bistatic Range, DBR), 其表达式为:

$$R_k(\eta) = R_{T,k}(\eta) + R_R(\eta) - R_{b,k}(\eta) \quad (3)$$

将式(3)进行二阶泰勒展开:

$$R_k(\eta) = R_{0,k} - \lambda \bar{f}_{dc,k} \eta - \lambda \frac{\bar{f}_{dr,k}}{2} \eta^2 \quad (4)$$

式中: $R_{0,k}$ 为观测中心时刻($\eta=0$)的双基距离差; $\bar{f}_{dc,k}$ 和 $\bar{f}_{dr,k}$ 分别为多普勒质心(DC)和多普勒调频率(DFR)。则方位向多普勒频率为:

$$f_{d,k}(\eta) = -\frac{1}{\lambda} \times \frac{dR_k(\eta)}{d\eta} = \bar{f}_{dc,k} + \bar{f}_{dr,k} \eta \quad (5)$$

1.2 多辐射源回波特性定位分析

在外辐射源雷达的目标检测中, 可利用 DBR、DC 与 DFR 三维参数实现目标回波的能量积累和运动状态参数估计。由式(3)和式(5)可得上述参数的表达式:

$$R_k(\eta) = \left| \mathbf{P}_{T,k} - \mathbf{P}_{Tg} + (\mathbf{v}_{T,k} - \mathbf{v}_{Tg})\eta + \frac{1}{2} \mathbf{a}_{T,k} \eta^2 \right| + \left| \mathbf{P}_{Tg} + \mathbf{v}_{Tg} \eta \right| - \left| \mathbf{P}_{T,k} + \mathbf{v}_{T,k} \eta + \frac{1}{2} \mathbf{a}_{T,k} \eta^2 \right| \quad (6)$$

$$\bar{f}_{dc,k} = -\frac{1}{\lambda} \left\{ \left| \mathbf{P}_{T,k} - \mathbf{P}_{Tg} \right|^{-1} (\mathbf{P}_{T,k} - \mathbf{P}_{Tg}) (\mathbf{v}_{T,k} - \mathbf{v}_{Tg})^T + \left| \mathbf{P}_{Tg} \right|^{-1} \mathbf{P}_{Tg} \mathbf{v}_{Tg}^T - \left| \mathbf{P}_{T,k} \right|^{-1} \mathbf{P}_{T,k} \mathbf{v}_{T,k}^T \right\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{f}_{dr,k} = & -\frac{1}{\lambda} \left\{ -\left| \mathbf{P}_{T,k} - \mathbf{P}_{Tg} \right|^{-3} \left[(\mathbf{P}_{T,k} - \mathbf{P}_{Tg}) (\mathbf{v}_{T,k} - \mathbf{v}_{Tg})^T \right]^2 + \left| \mathbf{P}_{T,k} - \mathbf{P}_{Tg} \right|^{-1} \left[\left| \mathbf{v}_{T,k} - \mathbf{v}_{Tg} \right|^2 + (\mathbf{P}_{T,k} - \mathbf{P}_{Tg}) \mathbf{a}_{T,k}^T \right] + \right. \\ & \left. \left| \mathbf{P}_{T,k} \right|^{-3} (\mathbf{P}_{T,k} \mathbf{v}_{T,k}^T)^2 - \left| \mathbf{P}_{T,k} \right|^{-1} \left(\left| \mathbf{v}_{T,k} \right|^2 + \mathbf{P}_{T,k} \mathbf{a}_{T,k}^T \right) - \left| \mathbf{P}_{Tg} \right|^{-3} (\mathbf{P}_{Tg} \mathbf{v}_{Tg}^T)^2 + \left| \mathbf{P}_{Tg} \right|^{-1} \left| \mathbf{v}_{Tg} \right|^2 \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

由于北斗导航卫星部署在中高轨道, $R_{b,k} \gg R_R$, 且 $\mathbf{v}_{T,k} \gg \mathbf{v}_{Tg}$, 因此式(8)可近似为:

$$\bar{f}_{dr,k} = -\frac{1}{\lambda} \left\{ \left| \mathbf{P}_{Tg} \right|^{-1} \cdot v^2 \right\} \quad (9)$$

式中: $v = \left| \mathbf{v}_{Tg} \right| \sin \theta$, θ 为向量 $\mathbf{P}_{Tg}$ 和 $\mathbf{v}_{Tg}$ 间的夹角。

从式(9)可以发现, 目标散射回波中的 DFR 只取决于目标的位置矢量和径向速度, 因此同一个目标在不同卫星照射下检测得到的 DFR 近似相等。

设置一个海面运动目标, 观测中心时刻位置为(1 000, 0, 0)m, 运动速度 15 nmile/h, 运动方向与 x 轴夹角为 45° 。通过查询星历计算获取一组北斗卫星轨迹, 播发信号载频为 1 268.52 MHz, 仿真得到目标回波的距离历史变化情况, 如图 2(a)所示。结果显示, 在 60 s 的观测时长下, 由卫星和目标运动产生的距离徙动达到千米量级, 且变化程度存在差异, 对于目标检测的影响不可忽略。

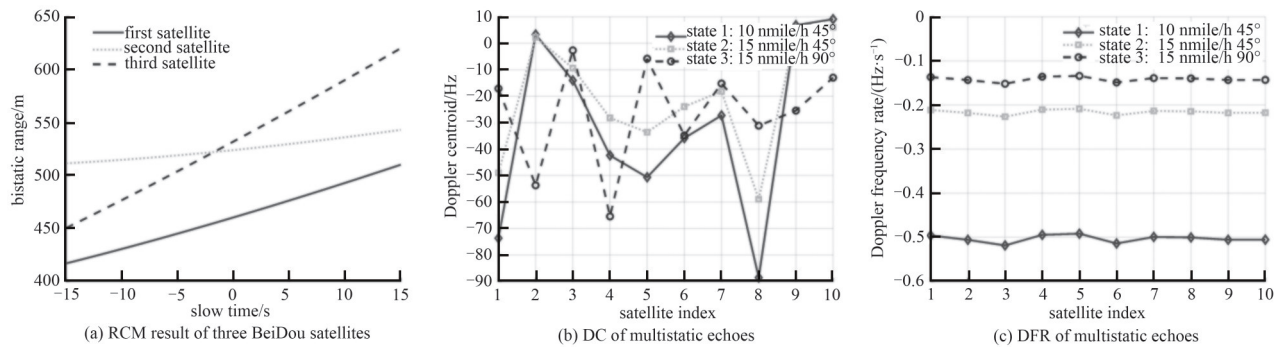


Fig.2 Characteristic analysis of multistatic echoes

图2 多基目标回波特性分析

进一步改变目标的运动状态, 计算不同卫星及目标不同状态下回波的 DC 和 DFR 参数值。分别增加两组运动状态进行对照, 一组将速度设置为 10 nmile/h, 另一组将运动方向设置为 90°。图 2(b)显示卫星和目标均对回波中的 DC 产生较大影响。而观察图 2(c)可以发现, DFR 主要受目标运动状态的影响, 卫星的影响可忽略。

以观测中心时刻作为参考积累回波能量, 能够获得目标的 DBR、DC 和 DFR 参数。联合多颗北斗卫星的 DBR 和 DC 能够有效估计目标的位置和速度, 同时当场景中存在多个运动目标时, DFR 能够辅助目标量测关联。

2 多辐射源联合定位与跟踪方法

2.1 目标回波预处理

受限于北斗导航信号的落地功率密度, 接收站收到的目标散射回波通常淹没在噪声中。为实现海面目标定位和跟踪, 需准确积累回波能量并提高检测性能。但由于目标的运动会使能量沿方位和距离向扩散, 且通常情况下运动状态未知, 因此采用信号处理方法进行补偿处理。首先, 通过去调频 Keystone(Dechirp-Keystone, DcKT)完成对回波距离徙动校正, 并同时去除 $\bar{f}_{\text{dr},k}$ 项导致的多普勒展宽; 然后分帧进行傅里叶变换, 并将各帧得到的 $R-f_{\text{dc}}-f_{\text{dr}}$ 结果非相干叠加, 实现方位向能量和复散射系数的积累。

由于天线旁瓣会录取到较强的直达波信号, 因此经过双通道时频同步与距离向脉冲压缩后, 零 DBR 单元处会存在明显的峰值。采用高效通道注意力机制(Efficient Channel Attention, ECA)算法^[26]进行直达波对消, 能够抑制直达波干扰对后续目标检测造成的不利影响。对式(2)进行距离向傅里叶变换, 并代入式(3), 得到回波距离频率-方位时间域表达式为:

$$S_k(f_r, \eta) = \sigma_{\eta,k} \text{rect}\left(\frac{\eta}{T_a}\right) P(f_r) \exp\left\{-j2\pi \frac{f_r + f_c}{c} \left[R_{0,k} - \lambda \bar{f}_{\text{dc},k} \eta - \lambda \frac{\bar{f}_{\text{dr},k}}{2} \eta^2\right]\right\} \quad (10)$$

由于目标的 $\bar{f}_{\text{dr},k}$ 变化范围较小, 可设置一定范围的 $f_{\text{dr},k}^* \in [f_{\text{dr},\min}, f_{\text{dr},\max}]$ 作为测试值构造 DcKT 变换:

$$S_{\text{DcKT},k}(f_r, \eta_m) = S_k\left(f_r, \frac{f_c}{f_r + f_c} \eta_m\right) \exp\left\{j2\pi \frac{f_c + f_r}{f_c} f_{\text{dr},k}^* \eta_m^2\right\} \quad (11)$$

式中 $f_{\text{dr},k}^*$ 的范围可根据最高切向速度配置, 区间采样间隔取 $1/T_a$, 以保证离散补偿后的偏差小于多普勒分辨单元。当 $f_{\text{dr},k}^* = \bar{f}_{\text{dc},k}$ 时, 回波表达式可整理为:

$$S_{\text{DcKT},k}(f_r, \eta_m | \bar{f}_{\text{dr},k}) = \sigma_{\eta,k} \text{rect}\left(\frac{\eta_m}{T_a}\right) P(f_r) \exp\left\{-j2\pi \frac{f_r}{c} R_{0,k} - j2\pi \frac{f_c}{c} R_{0,k} + j2\pi \bar{f}_{\text{dc},k} \eta_m\right\} \quad (12)$$

将式(12)进行距离向傅里叶逆变换, 得到处理后的二维时域表达式为:

$$S_{\text{DcKT},k}(\tau, \eta_m | \bar{f}_{\text{dr},k}) = \sigma_{\eta,k} \text{rect}\left(\frac{\eta_m}{T_a}\right) \rho\left[\tau - \frac{R_{0,k}}{c}\right] \exp\left\{-j2\pi \frac{f_c}{c} R_{0,k} + j2\pi \bar{f}_{\text{dc},k} \eta_m\right\} \quad (13)$$

式(13)结果显示, 回波的 RCM(Range Cell Migration)校正至 $\tau = R_{0,k}/c$ 对应的距离单元处, 相位中的多普勒展宽被有效去除。如图 3(a)所示, 黄色实线表示脉压后原始回波的距离历史, 存在明显的跨单元现象, 经过 DcKT 校正后的回波中心位置为青色曲线标注, 可以发现回波能量集中在一个距离单元内。考虑到回波中 $\sigma_{\eta,k}$ 随方位时间变化, 将回波信号按 T_{CPI} 划分为 N 帧, $N = T_a/T_{\text{CPI}}$ 。帧内的 $\sigma_{\eta,k}$ 可近似为恒定常数。则分帧后的回波表达式为:

$$S_{k,n}(\tau, \eta_m | \bar{f}_{\text{dr},k}) = \sigma_{\eta,k} \text{rect}\left(\frac{\eta_m - nT_{\text{CPI}}}{T_a}\right) \rho\left[\tau - \frac{R_{0,k}}{c}\right] \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} R_{0,k} + j2\pi \bar{f}_{\text{dc},k} \eta_m\right\} \quad (14)$$

式中 $n = -(N-1)/2, \dots, (N-1)/2$ 。

进一步将回波在慢时间 η 上进行傅里叶变换, 得到单帧的 RD 结果为:

$$S_{k,n}(\tau, f_{\eta_m} | \bar{f}_{\text{dr},k}) = \sigma_{\eta,k} \text{rect}\left(\frac{f_{\eta_m}}{B}\right) \rho\left[\tau - \frac{R_{0,k}}{c}\right] \sin\left[(f_{\eta_m} - f_{\eta})T_a\right] \exp\left\{-j2\pi (f_{\eta_m} - \bar{f}_{\text{dc},k})nT_{\text{CPI}} - j \frac{2\pi}{\lambda} R_{0,k}\right\} \quad (15)$$

式中 f_{η_m} 为方位向多普勒频率。将多帧信号的幅度叠加获得观测总时间的积累结果为:

$$S_k(R_{0,k}, \bar{f}_{\text{dc},k}, \bar{f}_{\text{dr},k}) = \frac{1}{N} \sum_n |S_{k,n}(R_{0,k}, \bar{f}_{\text{dc},k}, \bar{f}_{\text{dr},k})| \quad (16)$$

式(16)显示接收回波的能量积累至 DBR-DC-DFR 域内, 如图 3(b)所示。峰值位置 $(\hat{R}_{0,k}, \hat{f}_{dc,k}, \hat{f}_{dr,k})$ 即为目标的 DBR、DC 和 DFR 参数, 为后续的目标定位和跟踪提供了重要的量测支撑。

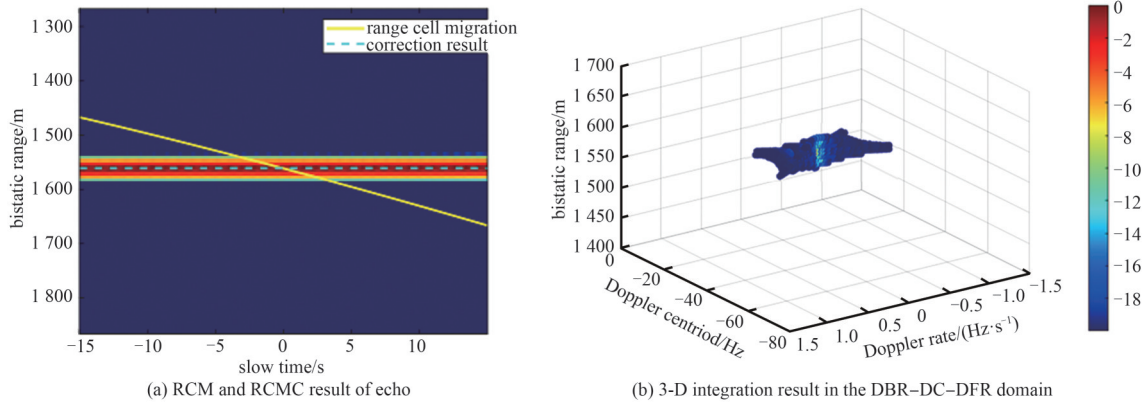


Fig.3 Long time integration result of echo

图3 长时间回波能量积累结果

2.2 海面目标初始定位与速度估计

移动目标跟踪方法的研究应用, 依赖于先验状态的获取和运动模型的构造。但实际情况中探测目标的非合作性, 使运动状态的估计成为跟踪必要的前置环节。在信噪比较差的情况下, 参数估计的偏差会影响定位的准确性; 同时, 虚警与漏检也会对目标定位产生严重干扰。因此, 本文将多颗卫星获得的 DBR-DC-DFR 域回波投影至 X - Y - V_r 域内, 对目标进行定位。该过程避免了参数估计的中间过程, 同时融合了多辐射源信号, 提升了检测性能。最后, 将位置参数代入式(7)联立解算目标的真实速度。

为实现上述流程, 首先以接收站为原点 O 将海面监视区域进行网格划分, 单元格位置为 $\mathbf{P}_g(x, y) = (x, y, 0)$ 。在第 k 颗北斗导航卫星照射下的双基距离差为:

$$R_g(x, y | \eta=0) = |\mathbf{P}_{T,k}(\eta=0) - \mathbf{P}_g(x, y)| + |\mathbf{P}_{T,k}(\eta=0)| - |\mathbf{P}_g(x, y)| \quad (17)$$

将回波数据 $S_k(R=R_g, f_{dc}, f_{dr})$ 沿 DC 方向压缩得

$$S'_k(R=R_g, f_{dr}) = \frac{1}{T_a/I_{PR}} \sum_{f_{dc}} S_k(R=R_g, f_{dc}, f_{dr}) \quad (18)$$

将 $S'_k(R=R_g, f_{dr})$ 按照 DFR 结果投影至径向速度, 映射表达式为:

$$X_k(\mathbf{P}_g(x, y), v_r) = S'_k \left(R=R_g, f_{dr} = -\frac{1}{\lambda} \times \frac{v_r^2}{|\mathbf{P}_g(x, y)|} \right) \quad (19)$$

式中 v_r 为径向速度。重复此过程直到完成监视区域内全部网格的投影, 便可获得第 k 颗北斗导航卫星照射下的 DBR-DC-DFR 域映射至 X - Y - V_r 域的数据。进一步, 将 k 颗卫星的数据进行非相干积累, 即:

$$X_{\text{all}}(\mathbf{P}_g(x, y), v_r) = \frac{1}{K} \sum_k |X_k(\mathbf{P}_g(x, y), v_r)| \quad (20)$$

由于目标的 DFR 仅与自身的位置向量和径向速度有关, 因此, 多基回波将在目标真实位置和径向速度处获得积累, 提取 $X_{\text{all}}(\mathbf{P}_g(x, y), v_r)$ 域的能量峰值位置, 得到目标在场景中对对应网格的估计位置, 即 $\hat{\mathbf{P}}_{Tg} = \mathbf{P}(\hat{x}, \hat{y})$, 实现了对海面目标的准确定位。此外, 多基能量融合能够提高信噪比, 增强目标的可观测性, 有利于后续的跟踪处理。

将 $\hat{\mathbf{P}}_{Tg}$ 和 $\hat{v}_r$ 代入式(7), 反解海面目标的真实速度 $\hat{\mathbf{v}}_{Tg}$ 。联合 k 颗卫星的 DC 方程, 得:

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\Theta}) \mathbf{v}_{Tg}^T = \mathbf{B}(\boldsymbol{\Theta}) \quad (21)$$

式中: $\boldsymbol{\Theta} = (\mathbf{P}_{T,1}, \dots, \mathbf{P}_{T,k}, \mathbf{v}_{T,1}, \dots, \mathbf{v}_{T,k}, \hat{\mathbf{P}}_{Tg})$ 为参数向量; 系数矩阵 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\Theta}) = [\mathbf{A}_{ij}(\boldsymbol{\Theta})]_{K \times 2}$, $\mathbf{B}(\boldsymbol{\Theta}) = [\mathbf{B}_i(\boldsymbol{\Theta})]_{K \times 1}$ 。

$$\begin{cases} A_{k,1}(\Theta) = \frac{x_{T,k} - x_{Tg}}{|P_{T,k} - \hat{P}_{Tg}|} + \frac{x_{Tg}}{|\hat{P}_{Tg}|}, A_{k,2}(\Theta) = \frac{y_{T,k} - y_{Tg}}{|P_{T,k} - \hat{P}_{Tg}|} + \frac{y_{Tg}}{|\hat{P}_{Tg}|} \\ B_i(\Theta) = \frac{\hat{v}^2}{|\hat{P}_{Tg}|} + C_k + D_k, C_k = \frac{P_{T,k} v_{T,k}^T}{|P_{T,k}|}, D_k = \frac{-(x_{T,k} - x_{Tg})v_{Tx,k} - (y_{T,k} - y_{Tg})v_{Ty,k}}{|P_{T,k} - \hat{P}_{Tg}|} \end{cases} \quad (22)$$

采用最小二乘法求解式(21),可估计目标真实速度为:

$$\hat{v}_{Tg}^T = (A^T(\Theta)A(\Theta))^{-1}A^T(\Theta)B(\Theta) \quad (23)$$

2.3 基于粒子滤波的外辐射源跟踪算法

利用信号处理获取到海面目标初始位置与速度后,通常期望维持对目标较长时间的有效观测,即实现运动目标的跟踪。跟踪算法不仅能够及时迭代过程中降低目标量测估计存在的误差,输出稳定的航迹,而且状态预测能够为目标检测提供先验信息,提高运算效率。传统的基于卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)的跟踪理论,建立在线性模型和高斯误差假设下,应用在非线性和非高斯系统中则会滤波扩散,导致跟踪精确度显著下降。但由2.2节可知,外辐射源体制下从量测 (R, f_{dc}, f_{dr}) 到状态 (P_{Tg}, v_{Tg}) 的映射关系是完全非线性的。

粒子滤波(PF)作为一种基于蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)的递归贝叶斯滤波技术,通过多粒子辅助拟合系统的状态分布,能够有效处理基于北斗导航卫星下的外辐射源雷达目标非线性跟踪问题。根据式(17)和式(22)可知,目标的定位与速度估计依赖于北斗导航卫星与接收站的位置。考虑到卫星在运行过程中可能存在误差,以及网格化引入的位置误差,构造状态矢量 $C(m) \in \mathcal{R}^p (p=9K+4)$,其中包含有所选 K 颗导航卫星的位置和速度,以及目标的状态向量:

$$C(m) = [P_{T,1}(m), v_{T,1}(m), a_{T,1}(m), P_{T,2}(m), v_{T,2}(m), a_{T,2}(m), \dots, P_{T,K}(m), v_{T,K}(m), a_{T,K}(m), \Omega(m)]^T \quad (24)$$

式中 $\Omega(m) = [\hat{x}_{Tg}(m), \hat{y}_{Tg}(m), \hat{v}_{Tg,x}(m), \hat{v}_{Tg,y}(m)]$, m 和 $\mathbf{m}$ 分别为标量和向量形式的状态索引。

构造量测向量 $Z(m) \in \mathcal{R}^q (q=6K)$,其中包含有所选 K 颗导航卫星的位置向量和目标量测:

$$Z(m) = [\hat{R}_{0,1}(m), \hat{R}_{0,2}(m), \dots, \hat{R}_{0,K}(m), \hat{f}_{dc,1}(m), \hat{f}_{dc,2}(m), \dots, \hat{f}_{dc,K}(m)]^T \quad (25)$$

于是,依据马尔科夫性可得到状态的一步转移方程为:

$$C(m+1) = F \cdot C(m) + v(m) \quad (26)$$

式中: F 为状态转移矩阵, $F = \text{diag}[\Phi_{1,1}, \dots, \Phi_{1,K}, \Phi_2]$, $\Phi_{1,K} = \begin{bmatrix} I(3) & I(3) \cdot \Delta T & I(3) \cdot \Delta T^2/2 \\ 0 & I & I(3) \cdot \Delta T \\ 0 & 0 & I(3) \end{bmatrix}$, 其中, ΔT 为观测时间

间隔, I 为单位矩阵, $\Phi_2 = \begin{bmatrix} I(2) & I(2) \cdot \Delta T \\ 0 & I(2) \end{bmatrix}$; $v(m)$ 为系统的运动噪声。

结合式(24)~(25),量测方程可表示为:

$$Z(m) = h[C(m)] + u(m) \quad (27)$$

式中: $h[\cdot] = [h_{1,1}, \dots, h_{1,K}, h_{2,1}, \dots, h_{2,K}]$, $h_{1,1}, \dots, h_{1,K}$ 与 $h_{2,1}, \dots, h_{2,K}$ 分别为目标散射回波中DBR和DC的计算过程,如式(6)和(7)所示; $u(m)$ 为系统的观测噪声。

应用PF算法解决外辐射源雷达跟踪中的非线性问题,主要步骤如下:

1) 输入变量。所用辐射源卫星的量测位置坐标 $\hat{P}_{Tg,k}(m)$,目标检测后得到的 $\hat{R}_{0,k}$ 和 $\hat{f}_{dc,k}$,以及目标的初始运动状态。

2) 初始化。设置 $m=0$,由先验分布 $p[C(0)]$ 生成初始粒子群 $\{C^i(0), \omega^i(0)\}, i=1, 2, \dots, N_p$, N_p 为总粒子数。其中 $C^i(0)$ 表示粒子初始状态, $\omega^i(0)$ 为粒子对应的权重系数, $\omega^i(0) = 1/N_p$,设置有效样本阈值 $N_{\text{threshold}}$ 。

3) 更新。根据式(26)计算新时刻 $m:=m+1$ 的粒子状态 $\{\tilde{C}^i(m)\}, i=1, 2, \dots, N_p$,并计算对应的权重系数:

$$\omega^i(\mathbf{m}) = \omega^i(\mathbf{m}-1) \times \frac{p[\mathbf{Z}(\mathbf{m})|\mathbf{C}^i(\mathbf{m})]p[\mathbf{C}^i(\mathbf{m})|\mathbf{C}^i(\mathbf{m}-1)]}{q[\mathbf{C}^i(\mathbf{m})|\mathbf{C}^i(\mathbf{m}-1), \mathbf{Z}(\mathbf{m})]}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (28)$$

式中: $p[\mathbf{Z}(\mathbf{m})|\mathbf{C}^i(\mathbf{m})]$ 为似然函数; $q[\mathbf{C}^i(\mathbf{m})|\mathbf{C}^i(\mathbf{m}-1), \mathbf{Z}(\mathbf{m})]$ 为重要密度函数。

$$q[\mathbf{C}^i(\mathbf{m})|\mathbf{C}^i(\mathbf{m}-1), \mathbf{Z}(\mathbf{m})] = \frac{p(\mathbf{Z}(\mathbf{m})|\mathbf{C}^i(\mathbf{m}), \mathbf{C}^i(\mathbf{m}-1))p(\mathbf{C}^i(\mathbf{m})|\mathbf{C}^i(\mathbf{m}-1))}{p(\mathbf{Z}(\mathbf{m})|\mathbf{C}^i(\mathbf{m}-1))} \quad (29)$$

4) 归一化。将权重系数归一化为:

$$\tilde{\omega}^i(\mathbf{m}) = \omega^i(\mathbf{m}) / \sum_{j=1}^{N_p} \omega^j(\mathbf{m}) \quad (30)$$

5) 重采样。为防止粒子退化, 计算更新后粒子的有效程度:

$$N_{\text{eff}} = 1 / \sum_{i=1}^{N_p} (\omega^i)^2 \quad (31)$$

用于判决, 若 $N_{\text{eff}} < N_{\text{threshold}}$, 则进行重采样, 将新时刻粒子群重置为等权样本 $\{\tilde{\mathbf{C}}^i(\mathbf{m}), 1/N_p\}, i=1, 2, \dots, N_p$; 否则, 维持粒子群原有权重, 得到 $\{\tilde{\mathbf{C}}^i(\mathbf{m}), \tilde{\omega}^i(\mathbf{m})\}, i=1, 2, \dots, N_p$ 。

6) 更新状态。根据新时刻的粒子状态和权重系数计算后验分布:

$$\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{m}) = E[\tilde{\mathbf{C}}^i(\mathbf{m})] = \sum_{i=1}^{N_p} \tilde{\omega}^i(\mathbf{m}) \tilde{\mathbf{C}}^i(\mathbf{m}) \quad (32)$$

7) 返回结果: 若索引 $\mathbf{m}$ 未到达上限, 则返回至 3) 重复上述过程, 输出目标的状态估计和跟踪轨迹。

在每个时刻重复上述迭代过程, 即能够实现基于北斗导航卫星的外辐射源雷达对海面目标的准确跟踪。此处需进一步指出, 为叙述简洁, 以上 JLT 算法处理着眼于单目标场景。但结合 1.2 节中对于目标回波特性的分析, 由于预处理后的 DFR 仅与目标状态有关, 因此可利用 DFR 实现数据关联操作, 对各目标并行跟踪。

综上所述, 本文所提基于北斗导航的外辐射源雷达 JLT 方法流程如图 4 所示, 其中预处理、初始定位和跟踪 3 个阶段, 能够实现在极低信噪比与卫星高速运动条件下, 对运动目标的长时间跟踪。

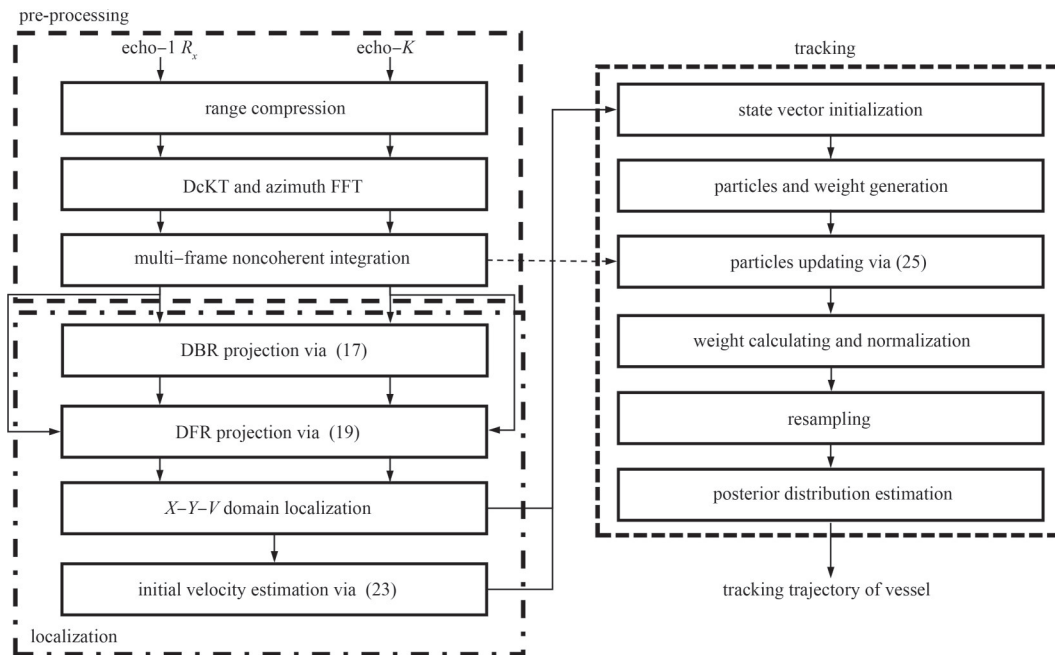


Fig.4 Maritime target localization and tracking flowchart for passive radar

图4 外辐射源雷达海面目标定位与跟踪方法流程图

分别用 M_x 、 M_y 和 M_z 表示定位范围在 X - Y - Z 的单元数量, K 为卫星辐射源个数。则投影与速度估算阶段的计算复杂度分别为 $O(KM_xM_yM_z)$ 和 $O(K)$ 。设置粒子数 N_p , 状态与量测向量维度分别为 D_x 、 D_z , 重采样层数为 L , 则粒子滤波跟踪阶段的计算复杂度为 $O(N_p(D_x+D_z)) + O(N_p \log L)$ 。因此在 N_T 次跟踪中, 总的计算复杂度为 $O(KM_xM_yM_z+K) + N_T[O(N_p(D_x+D_z)) + O(N_p \log L)]$ 。

3 实验验证

为验证本文所提外辐射源雷达联合定位与跟踪方法的准确性与有效性, 利用 2 颗部署于中轨道(Medium Earth Orbit, MEO)的北斗导航卫星作为照射源, 通过精密星历拟合运行轨迹仿真生成的回波数据进行处理验证。在观测时间内, 运动海面目标同时被卫星播发的 B3I 信号波束范围覆盖, 回波由一个地面静止接收站采集, 系统仿真参数由表 1 所示。

如图 5 所示, 海面目标由 12 个点散射体组成, 中心位于 (1 000, 0, 0) m。根据接收机参数(噪声温度 290 K, 噪声系数 1.5 dB, 系统损耗 6 dB, 天线面积 0.15 m²), 理论计算表明距离向脉压后信噪比为 -17.4 dB, 仿真中通过加性高斯白噪声复现此条件。使用 DcKT 对回波进行 RCM 和 DFM 盲校正, 并将积累总时间以 $T_{CPI}=3$ s 分帧非相参积累, 帧数 $N=10$, 得到 2 颗卫星各自 DBR-DC-DFR 的积累结果, 如图 6 所示。为更清晰地可视化, 将含有目标的 DC 切面图展示在右侧方框中, 海面目标的回波能量峰值分别位于 (1 115.32 m, -36.87 Hz, -0.12 Hz/s) 和 (659.54 m, -25.90 Hz, -0.12 Hz/s)。峰值位置在 DBR 和 DC 维有较大差异, 而 DFR 保持一致, 符合 1.2 节中的特性分析结果。

为说明投影定位效果, 将 2 颗卫星的回波积累结果映射至 X - Y - Z 域中。将观测区域划分为网格, 计算每个单元对应的 DBR, 并计算该距离单元中不同 DFR 对应的径向速度。2 颗卫星的回波在 X - Y - Z 域中的投影结果分别如图 7 所示。可以观察到, 回波峰值 X - Y - Z 域中形成方向各异的曲线。融合 2 颗卫星对应的投影结果, 能量曲线在交叉部分叠加出现峰值, 即所定位到的目标位置, 三维结果如图 8(a) 结果显示。提取几何中心位置, 得到目标位置估计值为 (1 001, -5) m, 径向速度估计值为 7 nmile/h, 与设置参数值一致。图 8(b) 和 (c) 分别为峰值位置对应 X - Y 切面和径向速度切面结果。根据目标位置, 反解得到目标速度为 (7.11, 7.48) nmile/h。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters

simulation parameter	value
carrier frequency/MHz	1 268.520
bandwidth/MHz	10.23
pulse repetition frequency/Hz	1 000
integration time/s	30
ground power density/(dBW/m ²)	-134
number of satellites	2
target central position/m	(1 000,0,0)
target velocity/(nmile/h)	(7.07, 7.07, 0)
radar cross section/dBm ²	20

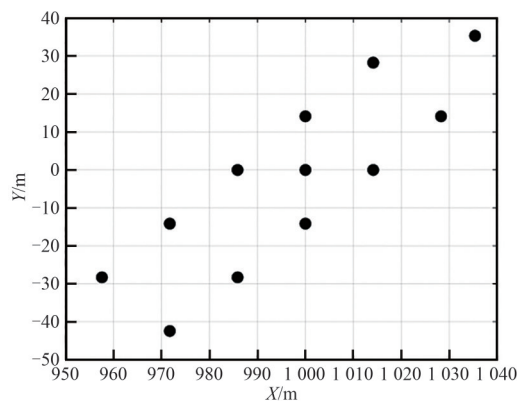


Fig.5 Pointlike vessel target

图 5 舰船点状仿真模型

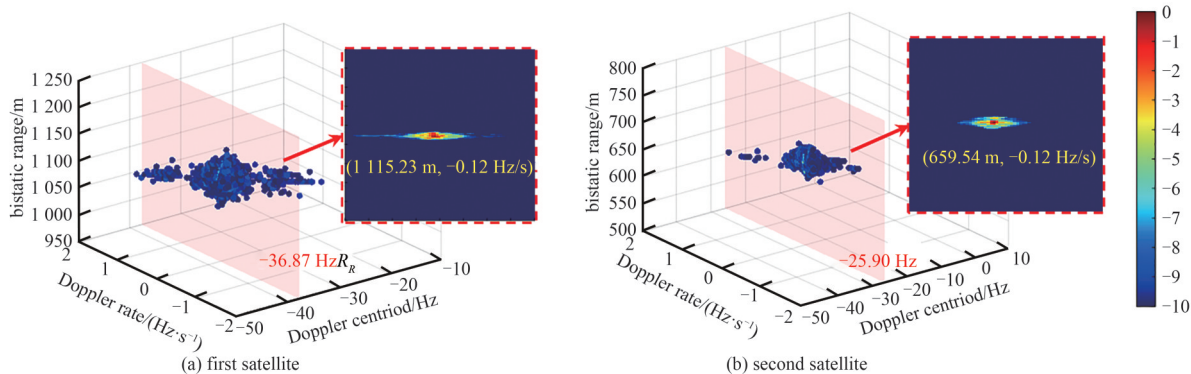


Fig.6 3-D integration result in the DBR-DC-DFR domain of the echo

图 6 DBR-DC-DFR 域回波积累三维结果

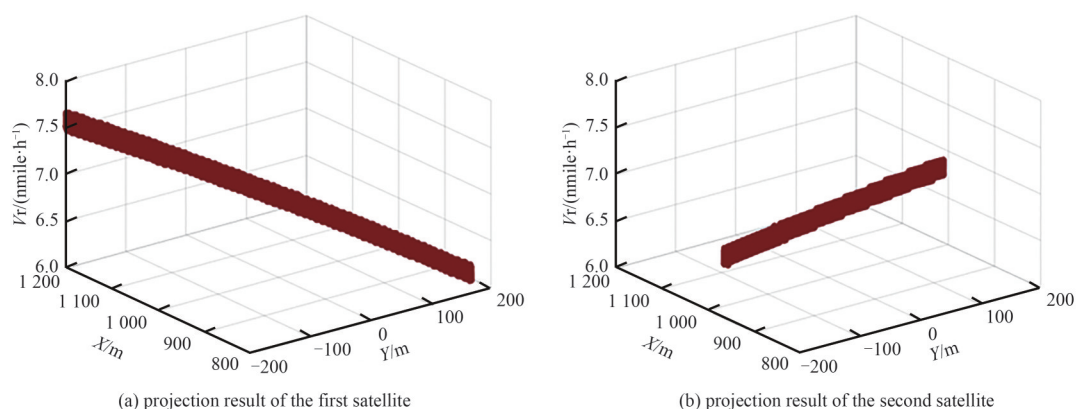
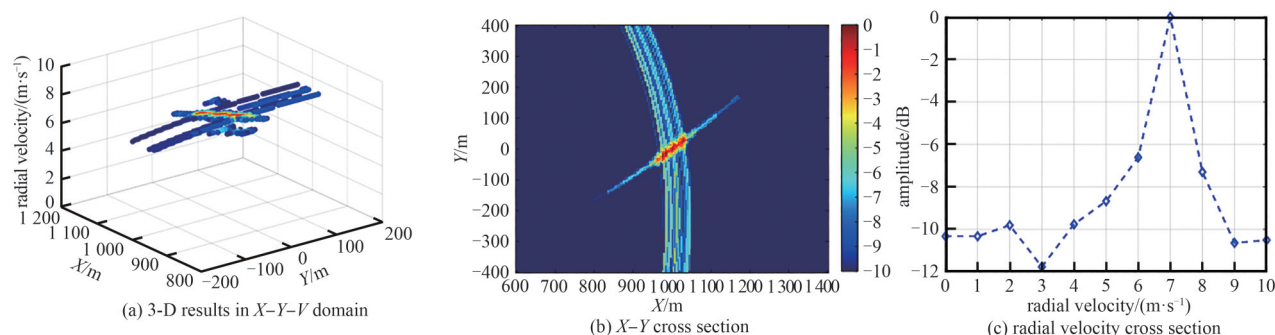
Fig.7 Projection result in X - Y - V_r domain of a single satellite echo图 7 单颗卫星回波在 X - Y - V_r 域的投影结果

Fig.8 Localization result of the vessel

图 8 海面目标投影定位结果

通过 1 000 次蒙特卡罗实验对所提方法的检测与定位性能进行评估, 其中虚警率为 10^{-4} , 距离脉压后信噪比范围为 $-45 \sim -20$ dB。图 9(a) 为单/双/多辐射源利用本文定位所提方法仿真对比的检测曲线。结果表明, 双/多星融合的检测能力分别提高了 4 dB、9 dB, 能够探测更远或更小的目标。图 9(b)~(c) 分别为传统 RD 定位与本文所提定位方法的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)随信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)变化曲线。由于 RD 定位方法依赖参数的准确估计, 因此噪声与错检会产生严重干扰。本文所提方法不仅提高了检测性能, 而且定位精确度更优。RMSE 上限受各自方法设置范围的限制。

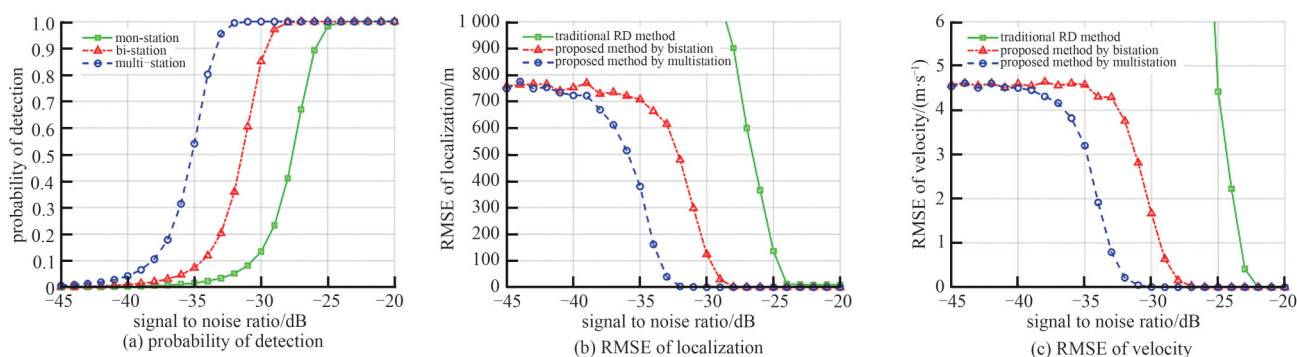


Fig.9 Performance of localization and velocity estimation

图 9 定位与速度估计性能分析

在获得目标的初始状态估计后, 可根据所提算法实现海面目标的持续跟踪, 结果如图 10 所示。设置粒子数为 100, 状态向量与量测向量维度分别为 22 和 10, 有效粒子数判决为 0.6, 重采样层数为 5。受限于北斗导航信号极低的落地功率密度, 跟踪过程中采取步进 $\Delta T=1$ s 的滑窗处理, 以保持 30 s 的总积累时长。图 10(a) 为 50 个 ΔT 的跟踪轨迹结果, 图 10(b)~(c) 分别为在 X 和 Y 方向上的轨迹和误差结果。由图中可以看出, 本文所提方法进行跟踪滤波后的轨迹误差显著小于仅依赖定位确定目标位置, 且在 15 次跟踪后误差小于 5 m。图 10(d)~(e) 为定位和

跟踪分别估计到的目标速度。结果显示, 相比于定位解算, 跟踪滤波同样能够显著降低速度估计误差, 误差小于 0.4 nmile/h。图 10(f) 为 500 次蒙特卡罗仿真下位置和速度的 RMSE 变化曲线, 可以看出, 所提 JLT 方法 RMSE 随跟踪过程趋于收敛, 且优于对比方法。

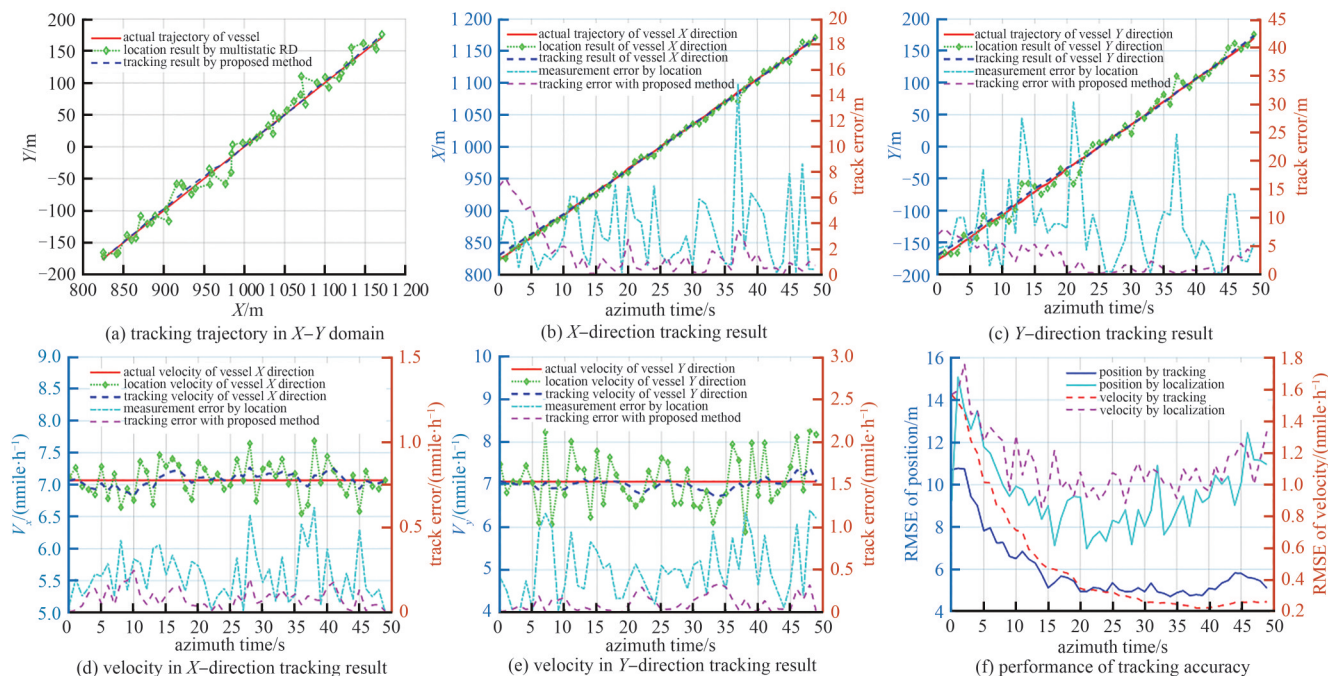


Fig.10 Location and tracking results and performance analysis of the vessel

图 10 海面目标联合定位和跟踪结果及性能分析

4 结论

本文提出一种基于北斗导航卫星的外辐射源雷达的 JLT 技术, 实现对海面运动目标的初始状态估计和持续轨迹跟踪。分析目标回波特性可以发现, 不同北斗辐射源信号经过目标反射后具有相近的 DFR。因此, 可通过对每颗卫星的回波分别应用 DcKT, 校正 RCM 并补偿调频率, 再进行方位向 FFT 和分帧非相干叠加, 实现目标能量在 DBR-DC-DFR 域的积累; 然后, 将多颗卫星回波的积累结果映射投影至 X - Y - V_r 域内, 融合多基能量提高信噪比, 完成目标的初始定位估计, 同时根据 DC 反解出目标速度; 最后, 采用 PF 方法处理外辐射源雷达非线性量测模型的跟踪问题。仿真实验表明, 跟踪后的目标轨迹误差得到显著降低, 验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 李中余, 黄川, 武俊杰, 等. 基于 GNSS 的无源雷达海面目标检测技术综述[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(4): 404-416. (LI Zhongyu, HUANG Chuan, WU Junjie, et al. Overview of maritime target detection techniques using GNSS-based passive radar[J]. Radar Science and Technology, 2020, 18(4): 404-416.) DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2020.04.009.
- [2] 黄川. 天基外辐射源雷达海面目标检测与成像方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2023. (HUANG Chuan. Ship target detection and imaging methods for space-based passive radar with satellite transmitters[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.) DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005534.
- [3] ZAIMBASHI A. Broadband target detection algorithm in FM-based passive bistatic radar systems[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(8): 1485-1499. DOI:10.1049/iet-rsn.2015.0608.
- [4] POULLIN D. Passive detection using digital broadcasters (DAB, DVB) with COFDM modulation[J]. IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(3): 143-152. DOI:10.1049/ip-rsn:200450.
- [5] PALMER J E, HARMS H A, SEARLE S J, et al. DVB-T passive radar signal processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(8): 2116-2126. DOI:10.1109/TSP.2012.2236324.
- [6] SUN H B, TAN D K P, LU Y L. Aircraft target measurements using A GSM-based passive radar[C]// 2008 IEEE Radar Conference. Rome, Italy: IEEE, 2008: 1-6. DOI:10.1109/RADAR.2008.4721053.
- [7] CHERNIAKOV M. Space-surface bistatic synthetic aperture radar-prospective and problems[C]// RADAR 2002. Edinburgh, UK: IEEE, 2002: 22-25. DOI:10.1109/RADAR.2002.1174646.

- [8] ANTONIOU M,ZENG Z,FEIFENG L,et al. Experimental demonstration of passive BSAR imaging using navigation satellites and a fixed receiver[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012,9(3):477–481. DOI:10.1109/LGRS.2011.2172571.
- [9] 李唐,王峰,杨新宇,等. GNSS 外辐射源空中目标探测研究现状及发展[J]. 无线电工程, 2023,53(7):1639–1651. (LI Tang, WANG Feng, YANG Xinyu, et al. Development and status of air target detection from GNSS-based passive radar[J]. Radioengineering, 2023,53(7):1639–1651.) DOI:10.3969/j.issn.1003–3106.2023.07.018.
- [10] PERRY R P,DIPIETRO R C,FANTE R L. SAR imaging of moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999,35(1):188–200. DOI:10.1109/7.745691.
- [11] KONG Y K,CHO B L,KIM Y S. Ambiguity-free Doppler centroid estimation technique for airborne SAR using the Radon transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005,43(4):715–721. DOI:10.1109/TGRS.2005.843955.
- [12] CHEN Xiaolong,GUAN Jian,LIU Ningbo,et al. Maneuvering target detection via Radon-fractional Fourier transform-based long-time coherent integration[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014,62(4):939–953. DOI:10.1109/TSP.2013.2297682.
- [13] LI Zhongyu,FABRIZIO S,DEBRORA,et al. Multi-frame fractional Fourier transform technique for moving target detection with space-based passive radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017,11(5):822–828. DOI:10.1049/iet-rsn.2016.0432.
- [14] CHOI S,CROUSE D,WILLETT P,et al. Multistatic target tracking for passive radar in a DAB/DVB network:initiation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015,51(3):2460–2469. DOI:10.1109/TAES.2015.130270.
- [15] HU Yueyang,YI Jianxin,CHENG Feng,et al. 3D target tracking for distributed heterogeneous 2D–3D passive radar network[J]. IEEE Sensors Journal, 2023,23(23):29502–29512. DOI:10.1109/JSEN.2023.3325550.
- [16] PASTINA D,SANTI F,PIERALICE F,et al. Passive radar imaging of ship targets with GNSS signals of opportunity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021,59(3):2627–2642. DOI:10.1109/TGRS.2020.3005306.
- [17] LUO Yitong,QIU Xiaolan,DONG Qian,et al. A robust stereo positioning solution for multiview spaceborne SAR images based on the range-Doppler model[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022(19):1–5. DOI:10.1109/LGRS.2020.3048731.
- [18] XING Chao, LI Zhenfang, TANG Fanyi, et al. A high-precision target geolocation algorithm for a spaceborne bistatic interferometric synthetic aperture radar system based on an improved range-Doppler model[J]. Remote Sensing, 2024, 16(3): 532. DOI:10.3390/rs16030532.
- [19] HUANG Chuan,LI Zhongyu,AN Hongyang,et al. Passive multistatic radar imaging of vessel target using GNSS satellites of opportunity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022(60):1–16. DOI:10.1109/TGRS.2022.3195993.
- [20] YANG Qing,LI Zhongyu,LI Jun'ao,et al. An optimal polar format refocusing method for bistatic SAR moving target imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022(60):1–17. DOI:10.1109/TGRS.2022.3176402.
- [21] LI Junao,LI Zhongyu,YANG Haiguang,et al. Joint localization and tracking method for BiSAR-GMTI via transmitter-receiver trajectories extraction and inversion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024(62):1–14. DOI:10.1109/TGRS.2024.3437635.
- [22] 傅雄滔,易建新,万显荣,等. 基于改进 ATPM-IMM 算法的外辐射源雷达机动目标跟踪[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(2): 122–131. (FU Xiongtao, YI Jianxin, WAN Xianrong, et al. Passive radar maneuvering target tracking based on improved ATPM-IMM algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024,22(2):122–131.) DOI:10.11805/TKYDA2023061.
- [23] LI Zhongyu,HUANG Chuan,SUN Zhichao,et al. BeiDou-based passive multistatic radar maritime moving target detection technique via space-time hybrid integration processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022(60):1–13. DOI:10.1109/TGRS.2021.3128650.
- [24] ZHANG Tong,ZHANG Xin,YANG Qiang. Passive location for 5G OFDM radiation sources based on virtual synthetic aperture[J]. Remote Sensing, 2023,15(6):1695. DOI:org/10.3390/rs15061695.
- [25] MA Hui,ANTONIOU M,PASTINA D,et al. Maritime moving target indication using passive GNSS-based bistatic radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018,54(1):115–130. DOI:10.1109/TAES.2017.2739900.
- [26] COLONE F,O'HAGAN D W,LOMBARDO P,et al. A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009,45(2):698–722. DOI:10.1109/TAES.2009.5089551.