

基于 PS-VF-TBD 的地波雷达船只目标航迹起始方法

高昆鹏^{1,3}, 纪永刚², 王祎鸣^{1,3}, 孟俊敏^{1,3}

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 3. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 针对地波雷达低信噪比目标信号“闪烁”导致的航迹起始困难问题, 本文提出了一种基于 PS-VF-TBD 的航迹起始方法。该方法综合利用了地波雷达回波谱中目标信号的展宽特征和运动特性, 利用 PS-VF-TBD 方法对运动目标能量有效积累的特点, 提高对疑似目标多帧信号间的关联概率, 进而提高对真实目标的搜索概率和航迹起始成功率。通过地波雷达实测数据的航迹起始结果及长时间跟踪结果与同步 AIS 信息的对比分析, 表明本文提出的方法相对于基于 DP-TBD 的航迹起始方法可以给出更好的航迹起始结果, 提高了远端低信噪比下“闪烁”目标的航迹起始概率, 可提高目标跟踪性能, 并具有区分距离-多普勒谱中邻近目标的能力。

关键词: 高频地波雷达; 航迹起始; PS-VF-TBD; 海上目标跟踪

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2022)04-0013-12

DOI: 10.11759/hyxx20211013002

高频地波雷达(high frequency surface wave radar, HFSWR)是海上舰船目标大范围连续探测的重要手段, 它利用高频电磁波(3~30 MHz)沿海面爬行的特性实现超视距的目标(海上船只、低空飞机等)探测, 并获取运动目标的位置及航速航向信息, 最远探测距离可达 300 km, 因此又被称为地波超视距雷达^[1-3]。在地波雷达船只目标跟踪过程中, 航迹起始是在目标跟踪过程中未进入稳定跟踪之前的航迹确认过程, 包括真实目标的确认和初始航迹段的确认, 是目标跟踪的首要环节, 因此航迹起始的性能对于海上目标航迹探测的最终结果有重要的影响。

目前常应用于地波雷达的航迹起始方法主要采用先检测后跟踪(detect before track, DBT)的处理流程, 如直观法、逻辑法^[4]和 Hough 变换法等^[5-6], 这些方法都是先在距离-多普勒(range-Doppler, RD)谱中进行恒虚警率检测(constant false alarm rate, CFAR)、目标测向和精确参数估计得到目标点迹信息, 实现目标的确认; 然后基于点迹数据开展航迹关联实现初始航迹段的确认^[7-8]。这类航迹起始方法可以实现具有较高信噪比、能被持续稳定探测目标的航迹起始, 而对于尺寸较小或者远距离的船只目标, 目标回波强度较弱、信噪比较低, 难以保持持续稳定探测, 影响真实目标的确认和航迹关联过程, 导致航迹起始失败。检测前跟踪(track before detect,

TBD)是近年来提出的针对低信噪比目标的检测方法, 其不对单帧回波谱数据进行目标有无的判断, 而是利用在时空序列上目标的关联性和杂波的随机性, 对多帧回波谱数据进行信号能量积累, 最大化积累目标信号能量从而提高目标的信噪比, 在目标检测的同时得到目标航迹。目前常应用于地波雷达的检测前跟踪方法主要有基于动态规划的 TBD 算法(DP-TBD)^[9]和基于粒子滤波的 TBD 算法(PF-TBD)^[10]。其中, PF-TBD 算法需要大量的粒子保持鲁棒性, 计算复杂度较高, 实用性较弱, 因此通常较少用于工程应用; DP-TBD 算法使用最优化策略在最大允许速度的可行区域内进行搜索, 可能会错误积累低信噪比条件下大于目标信号强度的噪声值, 导致弱目标信号能量积累错误等问题, 容易导致产生虚假航迹。

VF-TBD 是近几年发展的一种新的 TBD 方法, 该方法假设目标在多帧处理期间具有恒定的速度, 当该

收稿日期: 2021-10-13; 修回日期: 2021-11-16

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2017YFC1405202); 国家自然科学基金(62031015)

[Foundation: National Key R & D Program of China, No. 2017YFC1405202; the National Natural Science Foundation of China, No. 62031015]

作者简介: 高昆鹏(1996—), 男, 山东济宁人, 硕士, 主要从事高频地波雷达目标检测与跟踪方面研究, E-mail: gaokunpeng@fio.org.cn; 纪永刚(1977—), 通信作者, 教授, 主要从事高频地波雷达海洋探测方面研究, E-mail: jiyonggang@upc.edu.cn

波器假设的速度与测量的速度相匹配时,目标能量沿轨迹积分到最大,具有提高信噪比和复杂度适中的优点。Zhou 等^[11]和 Wang 等^[12]发展了基于 VF-TBD 的伪谱方法(PS-VF-TBD),将该方法推广到距离-多普勒域,通过构建点扩展函数的方式构建伪谱,可以实现目标信号扩展情况下的信号能量精确积累,仿真验证了在提高快速移动目标信噪比、进行弱目标提取方面具有优势。目前该方法主要用于常规多普勒雷达仿真研究,还未应用于高频地波雷达。

相对于其他常规多普勒雷达而言,高频地波雷达具有距离分辨率较低的特性,而且船只目标具有慢速运动的特点,因此,有必要结合地波雷达实测数据特点发展适用于地波雷达的 PS-VF-TBD 航迹起始方法。本文首先结合实测数据给出了 PS-VF-TBD 的原理推导,然后给出了基于 PS-VF-TBD 的航迹起始数据处理流程,最后结合实测 AIS 数据对方法进行验证,并与 DP-TBD 航迹起始方法进行了比较。

1 基于 PS-VF-TBD 的方法原理与处理流程

1.1 PS-VF-TBD 原理

PS-VF-TBD 依据多普勒雷达目标的展宽特性和运动特性,通过构建伪谱和速度匹配滤波进行目标回波能量的有效积累,伪谱构建示意图如图 1 所示。基于 K 帧目标的距离-多普勒预测值使用如下公式构建伪谱:

$$f_{PS}((n_{r,k}, n_{v,k}), (n_{r,K}, n_{v,K}), I(n_{r,K}, n_{v,K})) = \begin{cases} I(n_{r,K}, n_{v,K}) \exp(-\lambda_r(n_{r,K} - n_{r,k})^2 - \lambda_v(n_{v,K} - n_{v,k})^2), \\ |n_{r,K} - n_{r,k}| \leq SS_r \text{ 和 } |n_{v,K} - n_{v,k}| \leq SS_v \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $I(n_{r,k}, n_{v,k})$ 为距离-多普勒单元格为 $(n_{r,k}, n_{v,k})$ 处的回波幅度值, λ_r, λ_v 为目标的回波扩展参数, SS_r, SS_v 为在距离维和多普勒维的单元格选取范围, K 为能量积累批次数。

若目标初始距离-多普勒为 $(n_{r,0}, n_{v,0})$, 那么 PS-VF-TBD 的传递函数^[11]可以表示为:

$$h(n_r, n_v, k, V_h) = \sum_{k_t \in R_K} \delta \left(n_r + \frac{z_{p,k_t}^{r,V_h} - z_{n,0}^r}{\Delta r}, n_v + \frac{z_{p,k_t}^{v,V_h} - z_{n,0}^v}{\Delta v}, k + k_t \right), \quad (2)$$

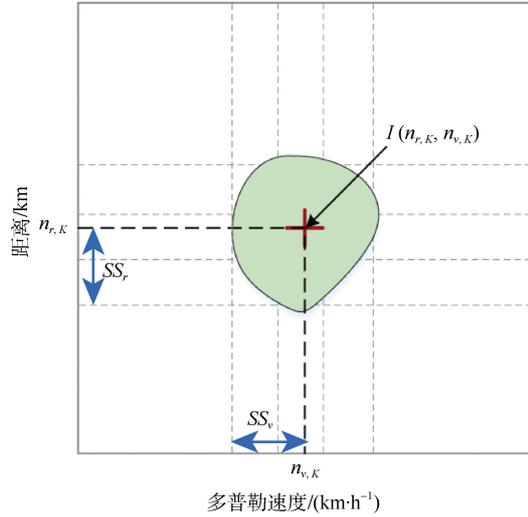


图 1 伪谱示意图

Fig.1 Pseudospectrum sketch

其中, $\delta(\cdot)$ 是狄拉克函数, R_K 为 $(1-K, \dots, -1, 0)$, z_{p,k_t}^{r,V_h} 和 z_{p,k_t}^{v,V_h} 分别为在假设的 V_h 条件下预测的目标径向距离和多普勒速度。当 $V_h = V, k = K_t$ 时, $z_{p,k_t}^{r,V_h} = z_{n,k}^r, z_{p,k_t}^{v,V_h} = z_{n,k}^v$ 。利用传递函数将目标在距离多普勒坐标系下的位置预测到处理批次的最后一帧,如图 2 所示,进行多帧能量积累:

$$u_{kr,kv}(n_r, n_v, k) = f_{PS}((n_r, n_v), (n_{r,k} - kr, n_{v,k} - kv), I(n_{r,k}, n_{v,k})) \times h(n_r, n_v, k, V_h) \quad (3)$$

其中, kr, kv 分别代表在距离和多普勒方向上从目标能量峰值点到量化单元格之间的距离。目标信号积累总能量可表示为:

$$u(n_r, n_v, k) = \sum_{kr \in R_r} \sum_{kv \in R_v} u_{kr,kv}(n_r, n_v, k), \quad (4)$$

其中, R_r, R_v 代表能量积累区域在距离和多普勒方向上分别占据几个单元格,如图 2 所示所占单元格为 $n1-n8$ 。最后将信号积累总能量与设定的阈值进行比较,判断目标是否存在。

1.2 PS-VF-TBD 航迹起始方法应用

PS-VF-TBD 对于探测具有匀速直线运动的目标具有极佳的目标提取性能^[13],但是实际中的海上船只目标多为非匀速直线运动的慢速目标。再加上地波雷达具有较高的速度分辨率和较低的距离分辨率,在实测数据中会存在目标在距离-多普勒谱中的速度抖动、距离变化缓慢的现象,如果将该方法直接用于地波雷达实测数据,则无法取得良好的目标提取效果。

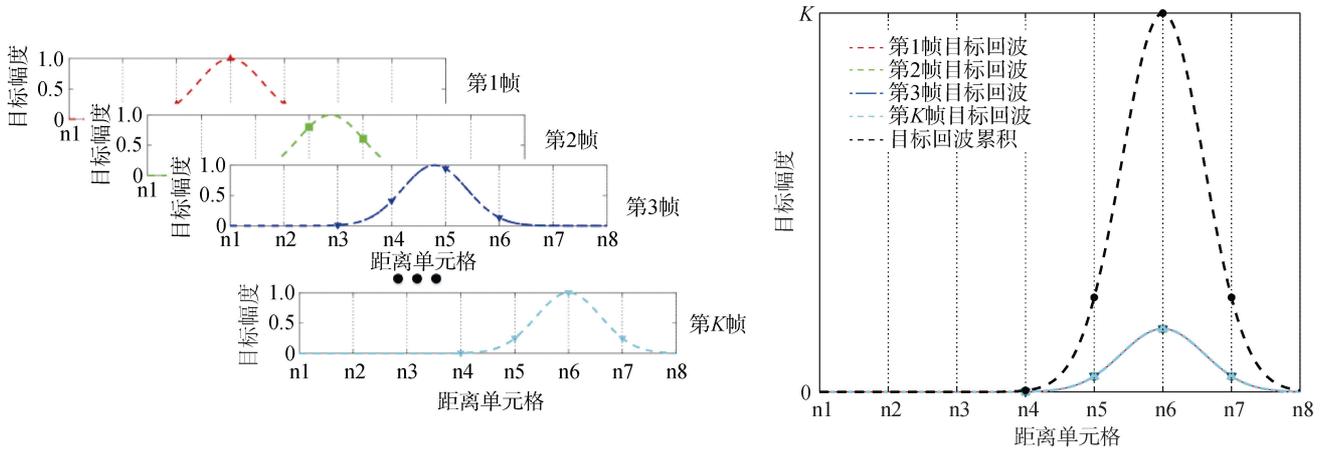


图2 多帧能量积累示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-frame energy accumulation

针对以上问题, 本文采用低门限 CFAR 检测获取疑似目标点, 基于目标在距离-多普勒中的运动特征利用 PS-VF-TBD 对展宽目标信号准确积分的特性进行能量积累, 通过疑似目标点与信号积累点相结合的方式将目标的首、末帧特征信息进行关联, 实现真实目标的提取和初始航迹段的确认。一方面, 使用首帧疑似目标点的距离-多普勒坐标作为 PS-VF-TBD 的目标信号能量积累起始基准点以减少计算量; 另一方面, 通过末帧疑似目标点的距离-多普勒坐标与 PS-VF-TBD 的信号能量积累点的关联完成真实目标的确认。

假设 k 时刻疑似目标点集合为 $\{X_k^1, X_k^2, \dots, X_k^i \mid i=1, 2, \dots, N_k\}$ (其中 N_k 为第 k 帧疑似目标点个数), 某一做匀速直线运动的目标距离-多普勒坐标为 $(n_{r,k}, n_{v,k})$, 则其相对于雷达的径向距离和径向速度可以表示为:

$$z_{n,k}^r = n_{r,k} \Delta r, \quad (5)$$

$$z_{n,k}^v = (n_{v,k} - 1)\Delta v + v_{\min}, \quad (6)$$

其中, Δr 、 Δv 分别为距离分辨率和多普勒速度分辨率, v_{\min} 为最小多普勒速度。对每个疑似目标点进行目标信号积累, 为排除其他目标信号的影响, 以疑似目标点的距离-多普勒坐标为基准限定距离-多普勒范围 n_{r_width} 、 n_{v_width} 基于假设的速度的平方 $V_h^{[11]}$, 计算各单元格在第 K 帧的距离-多普勒预测值:

$$z_{p,K}^r = \sqrt{(z_{n,k}^r)^2 - 2z_{n,k}^r z_{n,k}^v (K-k)t + V_h (K-k)^2 t^2}, \quad (7)$$

$$z_{p,K}^v = \frac{z_{n,k}^r z_{n,k}^v - V_h (K-k)t}{z_{p,K}^r}. \quad (8)$$

进而得到对应的距离-多普勒单元格:

$$n_{r,K} = z_{p,K}^r / \Delta r, \quad (9)$$

$$n_{v,K} = (z_{n,k}^v - v_{\min}) / \Delta v + 1. \quad (10)$$

图 3(a、b)展示了仿真疑似展宽目标 3 在限定区域内的 PS-VF-TBD 疑似目标信号能量积累。

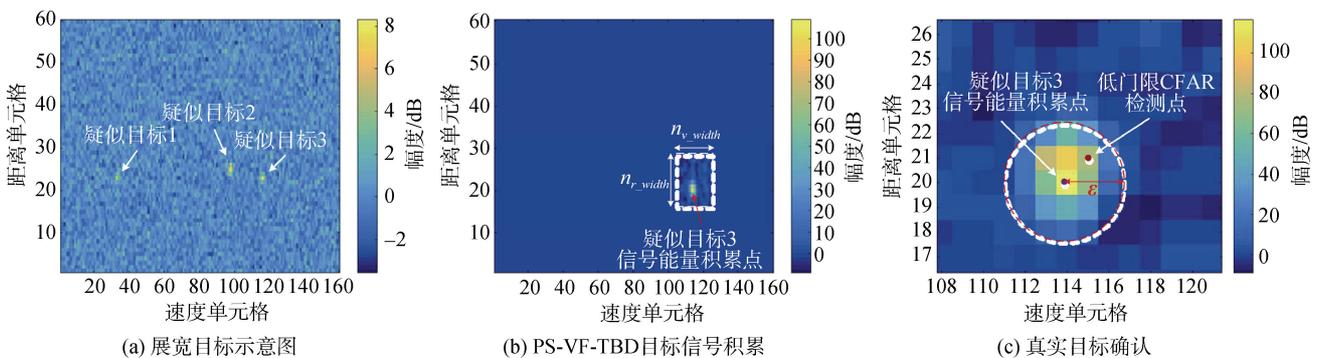


图3 疑似目标信号积累与真实目标确认

Fig. 3 Signal accumulation of the suspected target and confirmation of the real target

实际中会出现目标能量积累点 $\{A_T^1, A_T^2, \dots, A_T^j | j=1, 2, \dots, M_T\}$ 的距离-多普勒单元格与第 T 帧中疑似目标点 $\{X_T^1, X_T^2, \dots, X_T^i | i=1, 2, \dots, N_T\}$ 所在距离-多普勒单元格不一致的情况。因此，有必要设置一定门限值 ε 进行二者的关联，实现虚假目标的剔除和真实目标的确认。假设 A_T^j 和 X_T^i 的距离-多普勒单元格分别为 $(n_{r,T}^{A,j}, n_{v,T}^{A,j})$ 、 $(n_{r,T}^{X,i}, n_{v,T}^{X,i})$ ，当满足以下条件则确认为目标：

$$\sqrt{(n_{r,T}^{A,j} - n_{r,T}^{X,i})^2 + (n_{v,T}^{A,j} - n_{v,T}^{X,i})^2} \leq \varepsilon, \quad (11)$$

其中， $j \in \{1, 2, \dots, M_T\}$ ， $i \in \{1, 2, \dots, N_T\}$ 。若能够关联上，则说明该疑似目标在 T 帧内运动状态相对稳定，该疑似目标可认定为真实目标，如图 3(c) 所示。将关联上的疑似目标点作为真实目标 $\{X_T^1, X_T^2, \dots, X_T^i | i=1, 2, \dots, TN_T\}$ ，其中 TN_T 为真实目标数量。

上述过程建立了疑似目标多帧信号间关联。基于此，采用反向搜索的方式进行目标航迹回溯完成起始航迹的各时刻目标距离-多普勒的确认。海上船只目标航速普遍小于 30 节 (55.6 km/h)，地波雷达量测的目标径向速度小于等于目标航速。设定目标航速为 30 节，在 1 min 的时间间隔里，即使当目标沿雷达径向方向航行时，径向距离的变化量最大为

0.926 km，而地波雷达的距离分辨率通常在几公里，如当带宽为 60 K 时雷达分辨率 2.5 km，在 1 min 的时间里目标的径向距离变化量均小于高频地波雷达距离分辨率。此外，对于采用上述方式提取的弱机动目标具有速度相对稳定的特性，在相邻距离-多普勒谱中速度变化一般也不会超过 1 个多普勒单元格，因此，假设 X_T^i 的距离-多普勒坐标为 (r, d) ，对于朝向雷达运动的目标(径向速度为正)在 $T-1$ 帧的搜索区域为：

$$A_{T-1} = \begin{bmatrix} Z_{T-1}(r+1, d-1), Z_{T-1}(r+1, d), Z_{T-1}(r+1, d+1) \\ Z_{T-1}(r, d-1), Z_{T-1}(r, d), Z_{T-1}(r, d+1) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

对于远离雷达运动的目标(径向速度为负)在 $T-1$ 帧的搜索区域为：

$$A_{T-1} = \begin{bmatrix} Z_{T-1}(r, d-1), Z_{T-1}(r, d), Z_{T-1}(r, d+1) \\ Z_{T-1}(r-1, d-1), Z_{T-1}(r-1, d), Z_{T-1}(r-1, d+1) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其中， $Z_{T-1}(r, d)$ 代表在第 $T-1$ 帧 RD 谱中距离-多普勒坐标 (r, d) 处的幅度值。在航迹回溯中取 A_{T-1} 中回波幅度最大值对应的距离-多普勒坐标作为在 $T-1$ 中的目标搜索结果，最终完成初始航迹段的确认。

1.3 航迹起始数据处理流程

基于本文提出的航迹起始方法的实测数据处理流程图如图 4 所示。

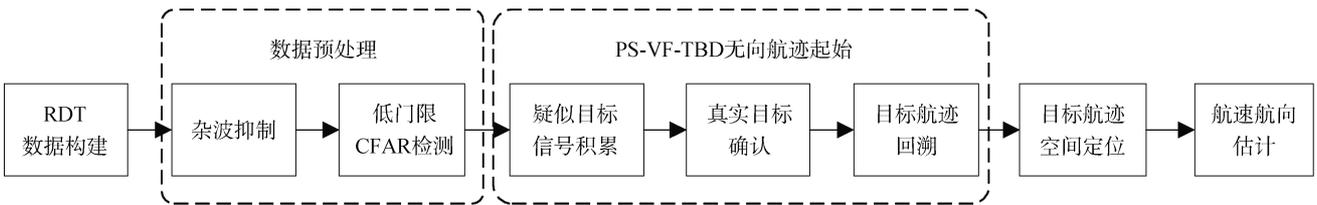


图 4 数据处理流程图
Fig. 4 Data processing flow chart

步骤 1: 利用多帧回波谱数据进行 R-D-T 三维数据构建。地波雷达数据往往有多个阵列从而形成多通道数据，为了使航迹起始效果最优，主要采用对强目标进行信噪比分析的方式进行不同通道的数据质量评估，判别各通道信号接收质量的优劣，通过对多通道的回波谱数据对比，选取目标信噪比高，背景更加纯净的通道来构建数据集。

步骤 2: 数据预处理。该步包括对 R-D-T 数据进行杂波抑制和低门限 CFAR 检测。对于地波雷达目标探测而言，地杂波和一阶海杂波都属于杂波干扰，

其较高的幅度对于步骤 3 中目标信号的积累会产生不良影响。本文采用文献[14]中基于信噪比的方法提取一阶海杂波并进行抑制，基于地杂波固定在零频附近的特性进行提取并置为背景值，对杂波抑制后的数据进行低门限 CFAR 检测。这样处理有利筛选出疑似目标点，减少步骤 3 中 PS-VF-TBD 处理的计算量，提高算法运行效率。

步骤 3: 基于 PS-VF-TBD 的无向航迹起始。理论表明积累批次越多越有利于把握目标的运动规律，疑似目标信号积累点的信噪比越高；然而，通过结

合 AIS 目标运动特性分析,发现积累批次越多目标速度发生变化的可能性越大,会影响目标提取效果,因此本文将航迹起始时间限定为 10 min。结合回波谱数据中的目标展宽范围将展宽参数 λ_r 、 λ_v 设置为 0.7;综合考虑地波雷达分辨率和船只目标运动特点选取积累区域范围,在 10 min 内按船速 30 节计算最远行驶 9.3 km,在回波谱中展宽目标的变化范围对应大约 4~5 个距离单元格,因此积累区域范围设置为 5;综合考虑地波雷达较低的距离分辨率和航迹起始的准确性将关联参数 ε 设置为 2。

步骤 4: 目标航迹空间定位。对无向航迹进行测向、精确径向距离估计、精确径向速度估计,实现起始航迹的精确参数估计,然后结合雷达站的空间位置将目标航迹投影到地理坐标系,完成目标航迹的空间定位。

步骤 5: 航速航向估计。由于地波雷达测向误差较大,在进行航迹空间定位后可能会出现航迹抖动现象,为保持起始航迹的良好线性特征,根据目标相对于雷达基站方位缓慢变化的规律性,进行异常点剔除和方位角变化曲线拟合,最后进行航速航向估计,实现对起始航迹运动特征的把握。

2 基于实测数据的方法验证

采用 2019 年 4 月在威海海域获取的地波雷达目标探测实验数据,验证本文提出的基于 PS-VF-TBD 的地波雷达航迹起始方法的性能。雷达工作中心频率 4.7 MHz,距离分辨率 2.5 km,接收阵元数为 5 个,相干积累时间 262.144 s,选取其中 10 帧回波谱数据开展航迹起始,相邻帧的时间间隔为 1 min,回波谱数据图 5(a)所示。

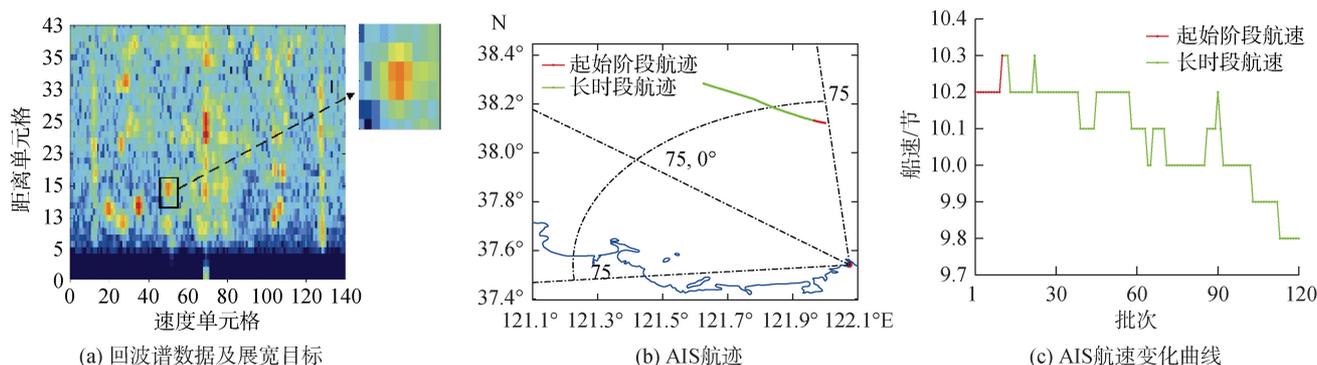


图 5 回波谱数据及 AIS 信息
Fig. 5 Echo spectrum data and AIS information

通过回波谱数据可以看出船只目标多为面目标,在多普勒维度和距离维度上均存在一定的展宽。本文对船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)航迹数据进行了航迹分析,典型 AIS 个例两个小时的航迹信息如图 5(b、c)所示。可以看出目标在该时段航行期间(绿色部分)航速变化幅度达到 0.5 节,在航迹起始阶段(红色部分)航速变化幅度为 0.1 节,航迹起始阶段可以近似看作目标做匀速直线运动。

为比较本文提出方法的航迹起始性能,与常规检测前跟踪方法 DP-TBD 算法进行了航迹起始结果对比并给出了长时间(60 min)跟踪结果。图 6 分别展现了目标在雷达坐标系下的航迹起始结果和长时间跟踪结果。通过图 6 可以看出,两种方法起始的航迹数量较为接近,航迹起始最远距离可以达到 150 km

左右,在 60~120 km 距离处起始了相对较多的航迹。结合长时间跟踪结果可以看出从整体上看航迹结果大致相当,由于两种航迹起始方法都是基于检测前跟踪思想,因此从整体上无法直观看出方法的优劣及航迹起始质量。为了验证本文所提出方法的航迹起始效果,采用同步 AIS 数据进行对比分析,图 7 展示了具有同步 AIS 信息的部分长航迹目标跟踪个例结果。

本文选取典型个例进行具体分析,图 8 展示了对个例 1 的分析结果:

通过目标航迹与 AIS 信息的对比可以看出,本文方法实现了对目标 56 航迹的正确起始,对该目标的最远探测距离可以达到 114.5 km,对地波雷达目标探测而言属于远端目标,且起始航迹的径向速度误差小于 0.5 km/h,径向距离误差小于 1.5 km,均在地波雷达

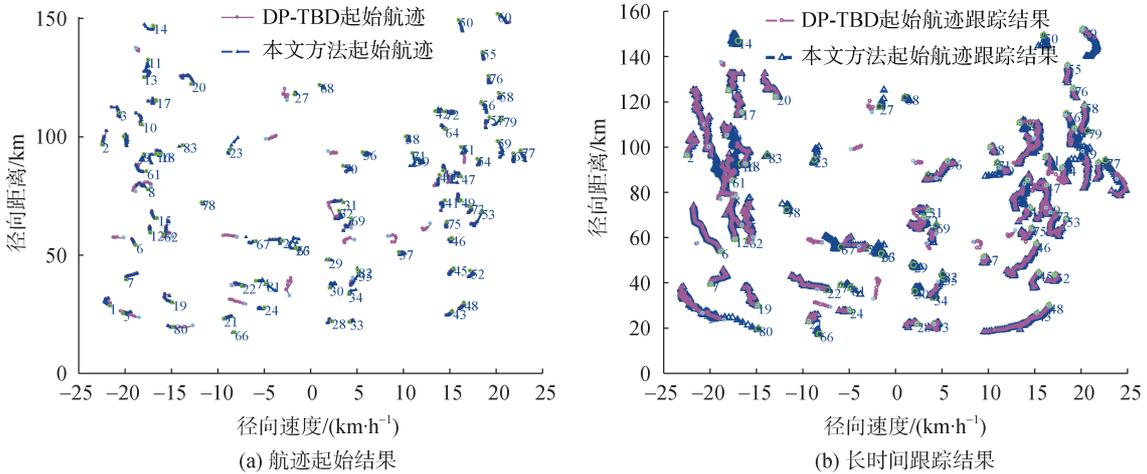


图 6 不同方法下的结果对比

Fig. 6 Comparison of results under different methods

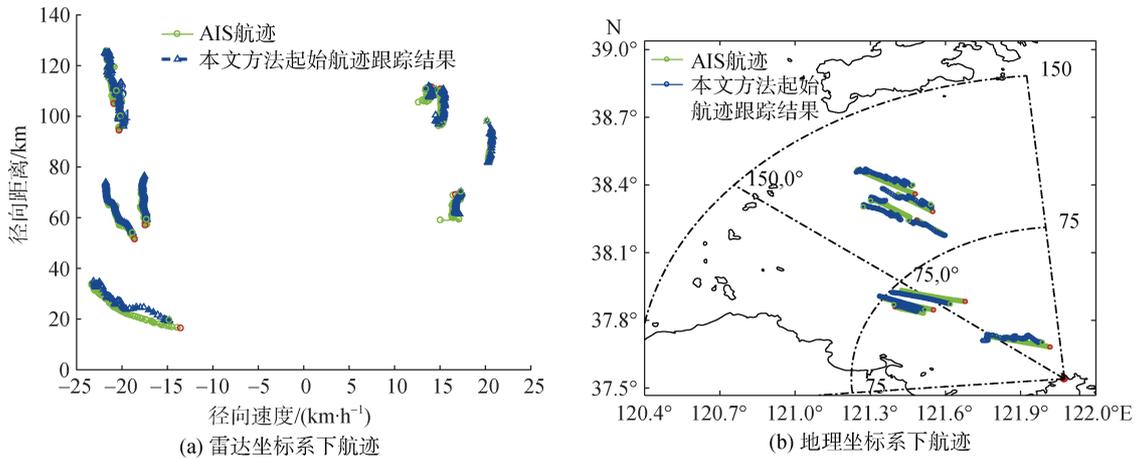


图 7 地波雷达航迹与 AIS 航迹结果对比

Fig. 7 Comparison of partial matching results between the HFSWR track and AIS

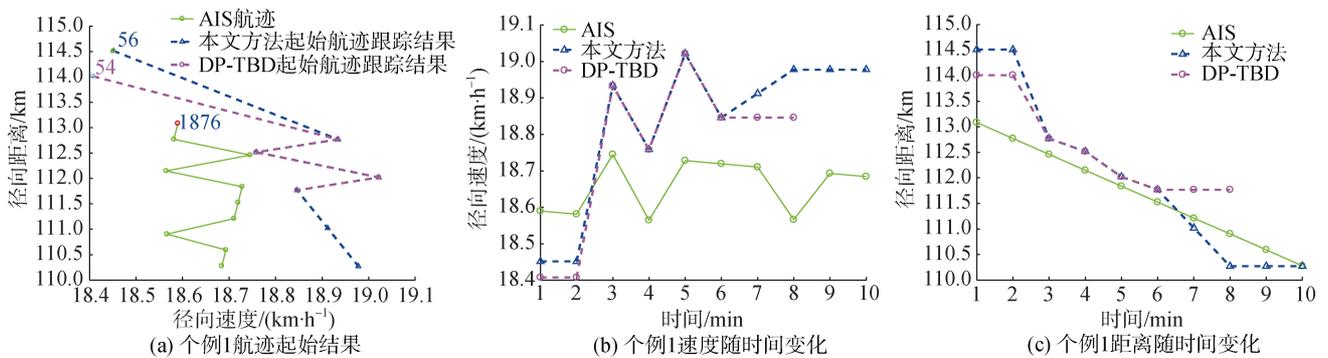


图 8 个例 1 运动特性分析

Fig. 8 Example 1 motion characteristic analysis

系统目标探测允许的误差范围之内;而 DP-TBD 方法在航迹起始阶段的第 6~8 min 没有正确搜索到航迹点,出现了航迹中断的问题,导致航迹起始失败。下面结合目标的幅度信息和信噪比进行具体分析。

通过图 9 可以看出,在航迹起始阶段目标 56 的幅度强度较低,整体在 189~194 dB 范围内波动,信噪比最低为 3.5 dB 最高为 11.5 dB,总体上在 6 dB 左右波动,目标信号“闪烁”。该目标在前 6 时刻幅

度相对较高,在第 6~8 时刻幅度迅速降低,由于 DP-TBD 算法是通过设定搜索范围通过搜索回波信号强度最大的位置确定目标,另外该时段内目标信噪比较低(3~6 dB),导致在连续批次的搜索中找不到目标点,最终导致航迹起始失败;而本文方法是依据目标的运动特性对航迹起始时段内的目标信号积

累作为判断疑似目标点的依据,虽然目标 56 在 6~8 时刻信号变弱,但是多帧信号的有效积累使得目标信号突显,如图 9(c)所示,实现了目标多帧信息的关联,找到了起始航迹的始末帧点位并最终成功起始航迹。图 10 展示了该目标的航迹起始及长时间跟踪的 V-T、R-T 分布图。

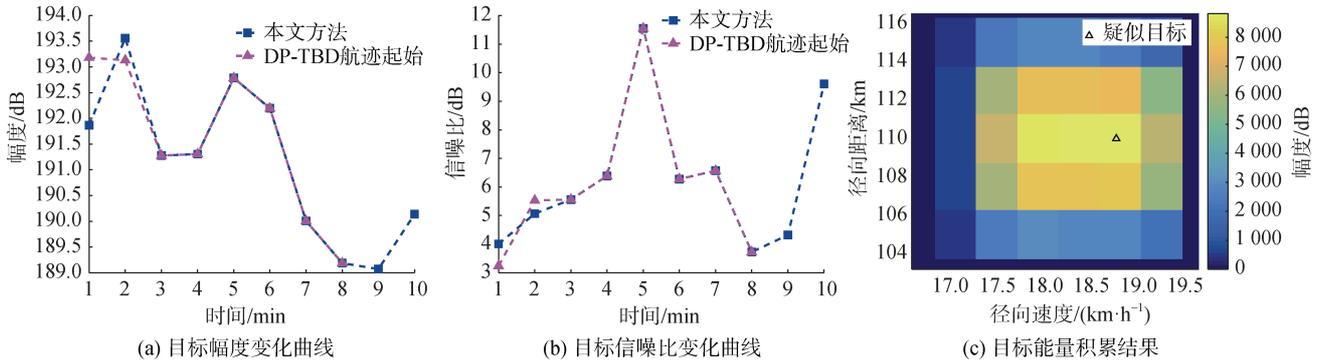


图 9 个例 1 幅度特性分析

Fig. 9 Example 1 amplitude characteristic analysis

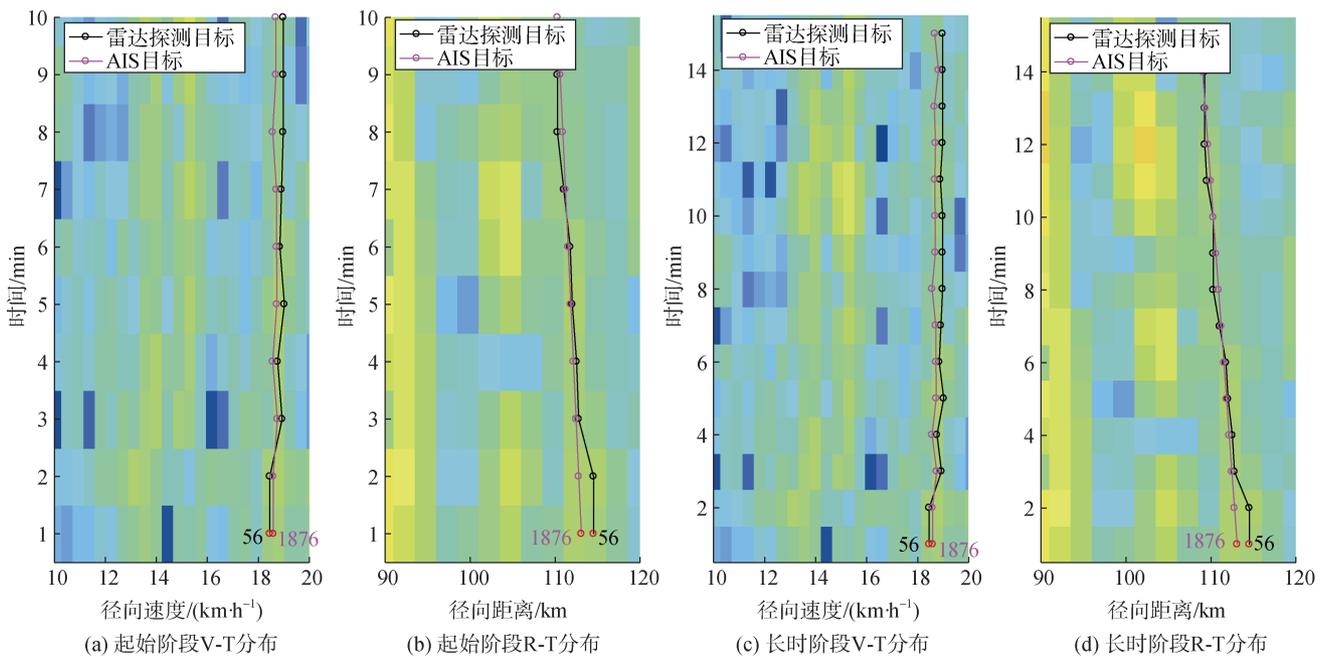


图 10 个例 1 V-T、R-T 分布

Fig. 10 V-T and R-T distribution of example 1

图 11 展示了对个例 2 的分析结果:

通过图 11 可以看出,对于 42 号目标(AIS 编号 1881)和 72 号目标(AIS 编号 1890),本文方法分别实现了两条航迹的起始,并且通过长时间跟踪结果及 AIS 信息证明了航迹起始结果的正确性。基于 DP-TBD 的航迹起始方法则只完成其中一条航迹的

起始,并在航迹起始阶段存在航迹关联错误的现象,在第 1、2 个时刻提取出了对应 AIS 编号 1881 的目标的径向距离、径向速度信息,在第 6~10 个时刻提取出了对应 AIS 编号 1890 的目标的径向距离、径向速度信息。下面给出了回波谱数据及 AIS 投影结果进一步分析。

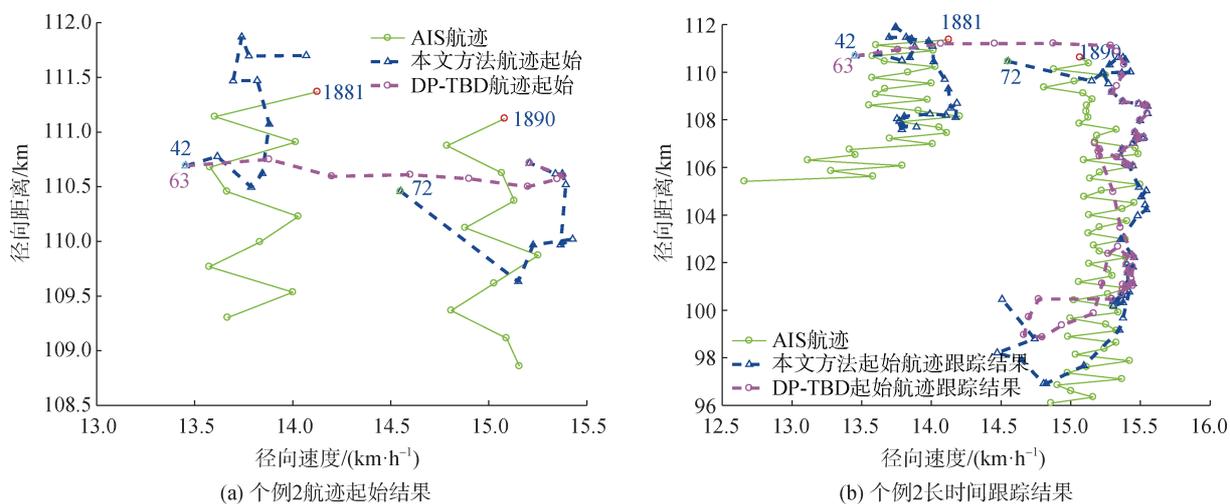


图 11 个例 2 R-V 变化分析
Fig. 11 R-V change analysis of example 2

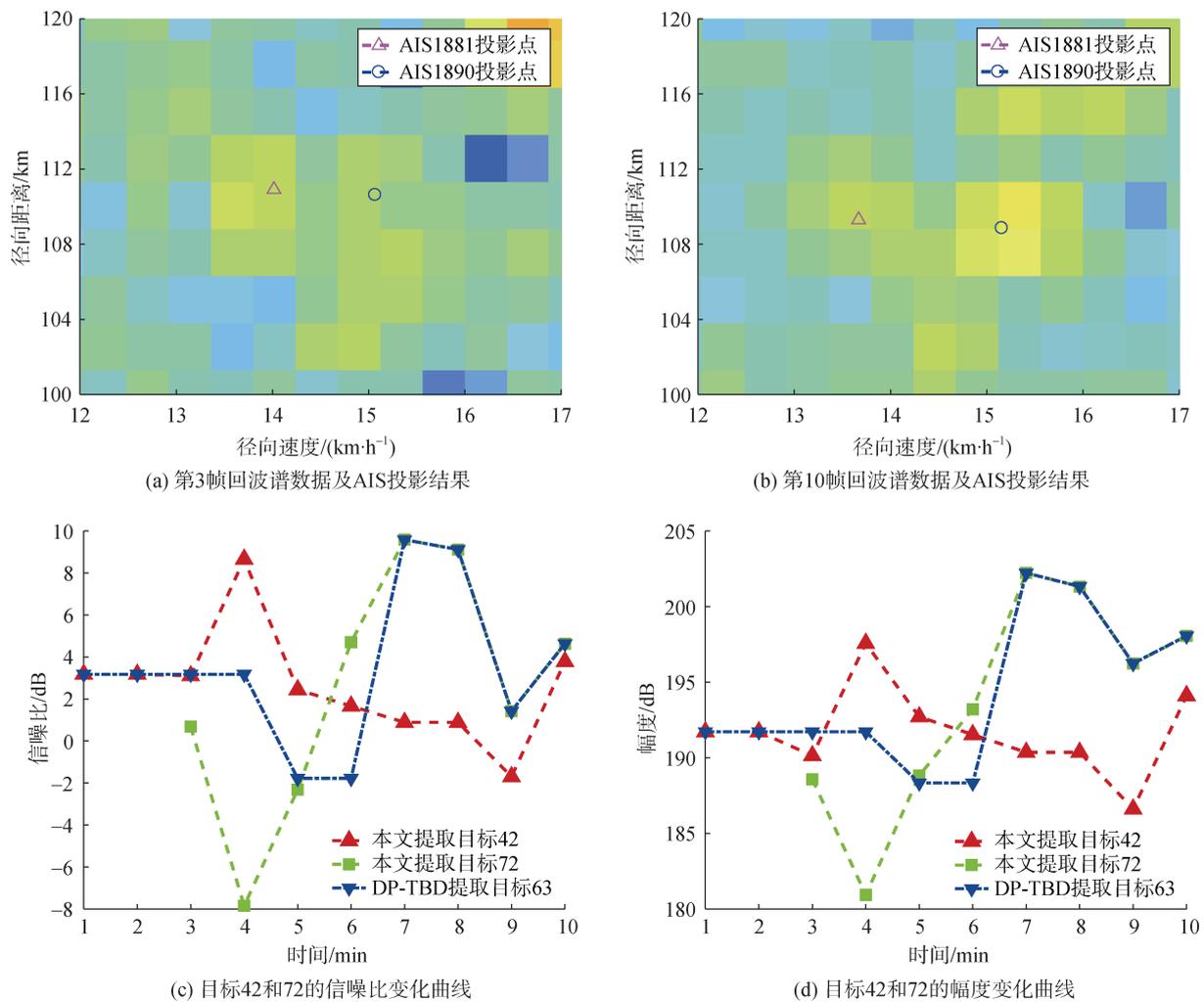


图 12 结合回波谱数据的个例 2 分析
Fig. 12 Example 2 analysis combined with echo spectrum data

通过回波谱数据及 AIS 投影结果可以看出, 这两个目标在距离-多普勒谱中为邻近目标, 相差 2~3 个多普勒单元格, 有相似的运动特征, 而且这两个目标在回波谱数据中能量较为分散, 目标中心点能量不突出, 在航迹起始阶段信噪比都是低于 10 dB。通过这两个目标的幅度变化曲线可以看出, 目标 42 的幅度变化较为稳定, 幅度值在 193 dB 上下浮动; 而目标 72 的幅度变化较大, 总体上呈上升趋势, 幅度最低为 180 dB 左右, 幅度最高可达 202 dB。在前 5 个时刻目

标 42 的幅度值大于目标 72, 在后 5 个时刻目标 42 的幅度值小于目标, 从而导致了基于 DP-TBD 起始的航迹在第 3~6 时刻航迹关联错误, 导致航迹起始失败, 最终影响了航迹起始质量; 而本文方法利用航迹起始阶段目标近似匀速直线运动的特性, 在设定的距离-多普勒范围内进行目标信号积累, 降低了目标信号积累错误的可能性, 从而实现了邻近弱目标的提取及区分。图 13、图 14 通过 V-T、R-T 分布展示了上述两个目标起始航迹和长时间跟踪航迹结果。

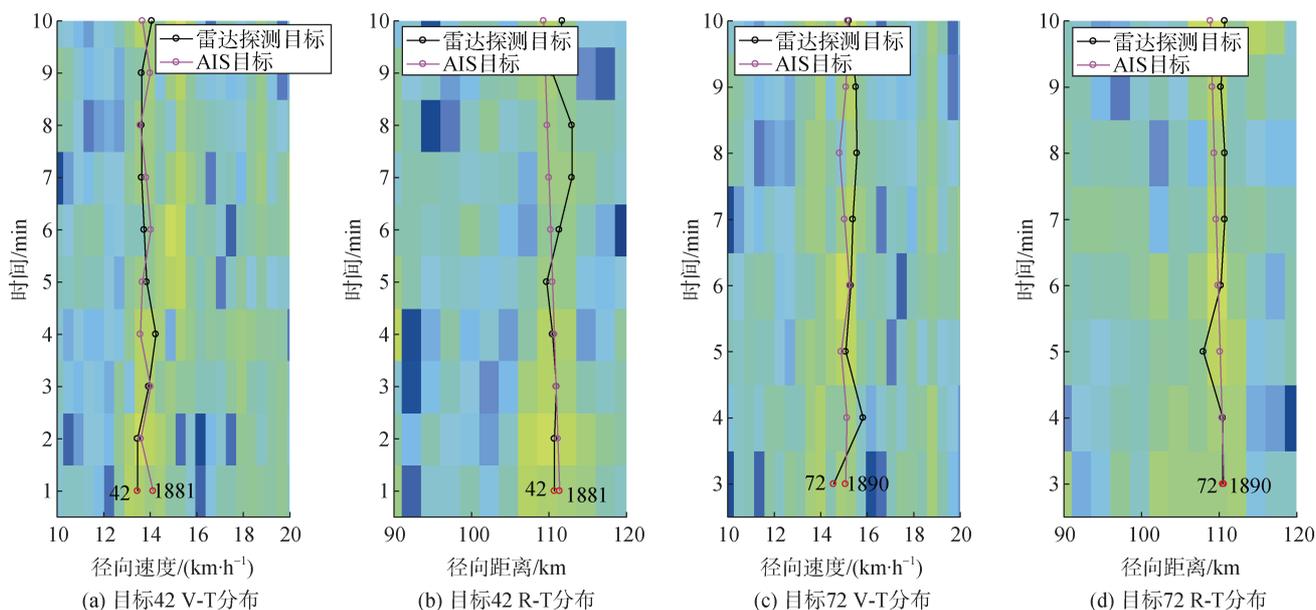


图 13 航迹起始阶段目标 V-T、R-T 分布图

Fig. 13 Target V-T and R-T distribution at the track initiation stage

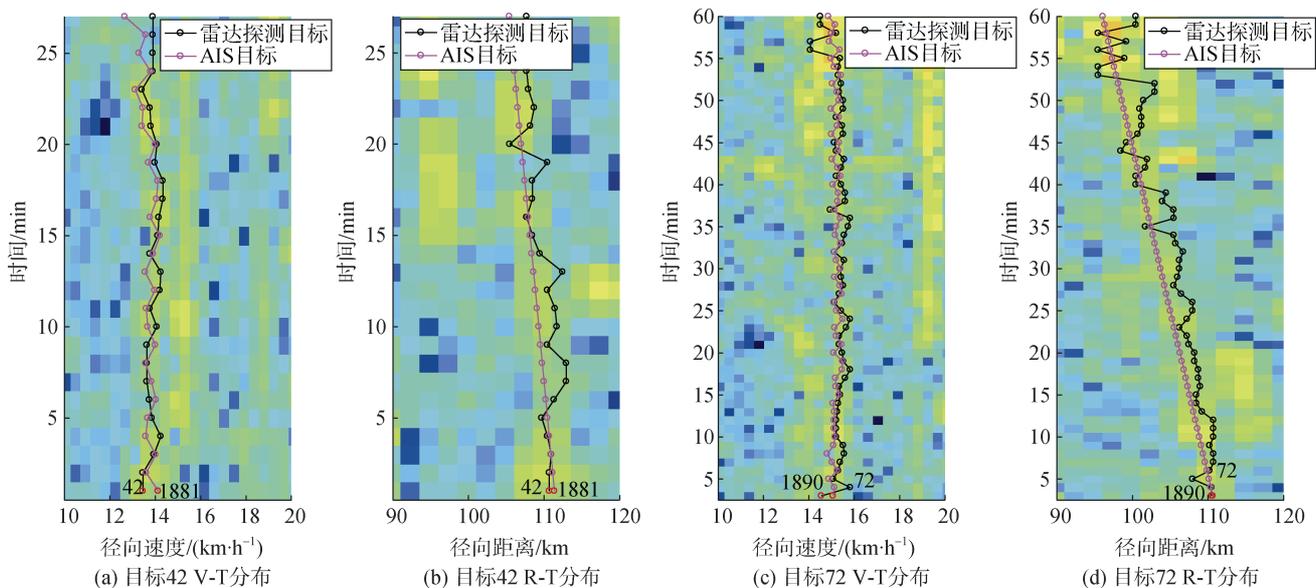


图 14 长时段目标航迹 V-T、R-T 分布图

Fig. 14 V-T and R-T distribution of the long-term target track

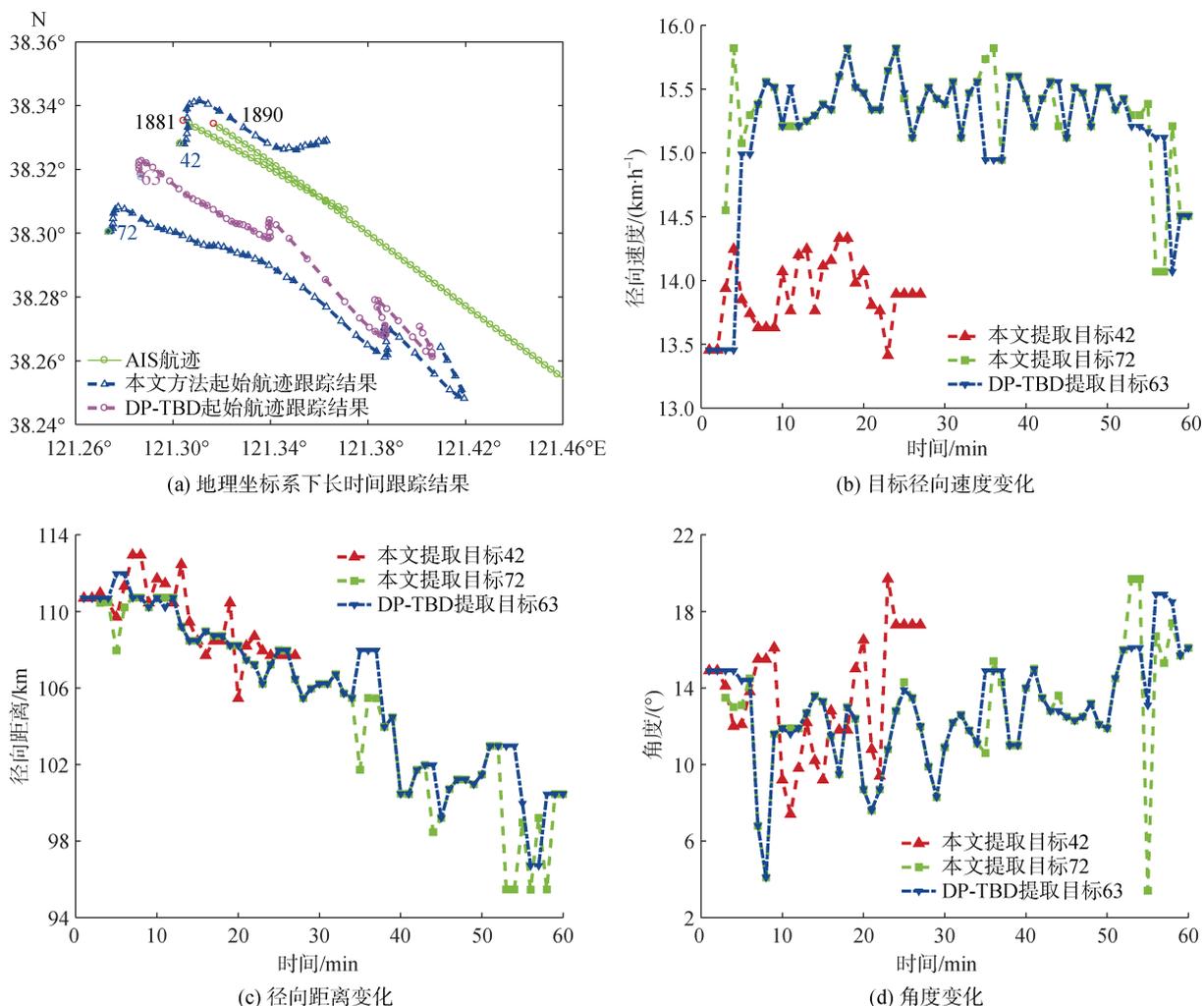


图 15 个例 2 在地理坐标系下的运动分析
Fig. 15 Motion analysis of example 2 in the geographic coordinate system

图 15 展示了基于两种航迹起始方法提取的目标个例 2 在地理坐标系下的长时间跟踪结果及对应的 AIS 信息。

通过图 15 可以看出, 42 号目标(AIS 编号 1881)和 72 号目标(AIS 编号 1890)在地理坐标系下也为邻近目标。通过目标的径向速度、径向距离、角度变化曲线可以看出, 这两个目标相对于雷达的径向距离、径向速度、方位角参数接近, 具有相似的动态信息特征, 使得在航迹起始阶段有相似的运动特征。由于地波雷达距离分辨率和方位分辨率较低, 再加上这两个目标在回波谱中呈现弱目标特性, 使得对此类目标的提取及区分存在一定的困难。对此类情况目标的区分进一步展现了本文方法对邻近目标具有一定的区分能力。

综上所述, 通过本文提出的航迹起始方法与基

于 DP-TBD 的航迹起始方法对比, 证明了本文方法航迹起始的优越性能。实验结果表明, 相对于基于 DP-TBD 的航迹起始方法, 本文提出的航迹起始方法可以提高远端航迹的起始成功率, 并对于在距离-多普勒谱中具有相似运动特征的邻近目标有一定的区分能力。

3 结论

通过对高频地波雷达回波谱数据进行目标展宽特性分析, 结合 AIS 数据进行目标运动特性分析, 将 PS-VF-TBD 方法应用于地波雷达航迹起始, 通过对疑似目标首帧与末帧信息的关联实现虚假目标的剔除和真实航迹的确认, 最后与基于 DP-TBD 的航迹起始方法进行对比, 结果表明: 本文方法可实现较远端、非稳定观测的低信噪比目标的航迹起始, 进而

提高航迹跟踪结果; 对于距离-多普勒谱中的邻近目标具有一定的区分能力。

参考文献:

- [1] JI Y G, ZHANG J, WANG Y M, et al. Target monitoring using small-aperture compact high-frequency surface wave radar[J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 2018, 33(3): 21-31.
- [2] YANG Q S, JI Y G, LIU Y X, et al. Target tracking of surface wave over-the-horizon radars based on FJPDA algorithm[J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(1): 8.
- [3] 王瑞富, 孔祥超, 纪永刚, 等. 基于 GIS 的高频地波雷达回波信号的表达处理与显示[J]. 海洋科学, 2015, 39(7): 86-92.
WANG Ruifu, KONG Xiangchao, JI Yonggang, et al. Expression and display of echo signal of HF surface wave radar based on GIS[J]. Marine Sciences, 2015, 39(7): 86-92.
- [4] 王健. 高频地波雷达舰船目标跟踪关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
WANG Jian. Research on Key Technologies of ship target tracking with high frequency ground wave radar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [5] 王国宏, 苏峰, 毛士艺, 等. 杂波环境下基于 Hough 变换和逻辑的快速航迹起始算法[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(7): 874-876.
WANG Guohong, SU Feng, MAO Shiyi, et al. Fast track initiation algorithm based on Hough transform and logic in clutter environment[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(7): 874-876.
- [6] 金术玲, 梁彦, 潘泉, 等. 基于 Hough 变换和聚类的航迹起始算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(8): 2362-2364.
JIN Shuling, LIANG Yan, PAN Quan, et al. Track initiation algorithm based on Hough transform and clustering[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(8): 2362-2364.
- [7] PONSFORD A M, WANG J. A review of high frequency surface wave radar for detection and tracking of ships[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2010, 18(3): 409-428.
- [8] VIVONE G, BRACA P, HORSTMANN J. Knowledge-based multitarget ship tracking for HF surface wave radar systems[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(7): 3931-3949.
- [9] YI W, MORELANDE M R, KONG L, et al. An efficient multi-frame track-before-detect algorithm for multi-target tracking[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013, 7(3): 421-434.
- [10] 杨亚波, 夏永红, 匡华星, 等. 雷达微弱目标检测前跟踪技术研究[J]. 雷达与对抗, 2015, 35(2): 22-28.
YANG Yabo, XIA Yonghong, KUANG Huaxing, et al. Research on tracking technology before radar weak target detection[J]. RADAR & ECM, 2015, 35(2): 22-28.
- [11] ZHOU Gongjian, WANG Liangliang. Pseudo-spectrum based speed square filter for track-before-detect in range-doppler domain[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(21): 5596-5610.
- [12] WANG Liangliang, ZHOU Gongjian, LI Peiyuan. A complex pseudo-spectrum based velocity filtering method for track-before-detect[J]. Signal Processing, 2020, 174: 107651.
- [13] ZHOU G J, WANG L L, KIRUBARAJAN T. A pseudo-spectrum approach for weak target detection and tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 3394-3412.
- [14] 纪永刚, 张杰, 王彩玲, 等. 基于信噪比方法的天地波混合体制雷达一阶回波谱提取[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(9): 2177-2182.
JI Yonggang, ZHANG Jie, WANG Cailing, et al. Extraction of first-order echo spectrum of heaven earth wave hybrid radar based on signal-to-noise ratio method[J]. Journal of Electronics and Information, 2015, 37(9): 2177-2182.

Ship track initiation method of a high-frequency surface wave radar based on PS-VF-TBD

GAO Kun-peng^{1, 3}, JI Yong-gang², WANG Yi-ming^{1, 3}, MENG Jun-min^{1, 3}

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 3. Technology Innovation Center for Ocean Telemetry, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Received: Oct. 13, 2021

Key words: high-frequency surface wave radar; track initiation; PS-VF-TBD; marine target tracking

Abstract: The high-frequency surface wave radar has a low signal-to-noise ratio, making the target signal “flicker” and tracking initiation difficult. To address this problem, this paper proposes a track initiation method based on PS-VF-TBD. This method makes comprehensive use of the broadening and motion characteristics of the target signal in the echo spectrum, as well as the PS-VF-TBD method that can effectively accumulate the energy of the moving target, to improve the correlation probability between multi-frame signals of suspected targets, thereby improving the search probability of the real target and the success rate of track initiation. The track initiation and long-time tracking performance based on the measured data and synchronous AIS information of the ground wave radar were compared and analyzed; the result reveals that the proposed method could give better track initiation results than the method based on DP-TBD, improve the track initiation probability of “flickering” targets with low signal-to-noise ratio at the far, and improve the target tracking performance. Moreover, it can distinguish adjacent targets in the range-Doppler spectrum.

(本文编辑: 赵卫红)