

基于空变多普勒参数聚类的微波光子 ISAR 高精度成像方法

李俊颜¹, 杨 青¹, 李中余^{1*}, 武俊杰¹, 王安乐², 王党卫², 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. 空军预警学院, 湖北武汉 430019)

摘 要: 微波光子雷达由于具备距离向的超大带宽和超高分辨能力, 通过逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 成像能够带来舰船等重要目标更精细的信息, 对于海上监视具有重要意义。然而在超高分辨特性下, 目标转动导致的三维空变多普勒参数会造成图像的散焦, 在二维回波域成像时必须要进行区域化的补偿处理, 但现有方法无法实现自适应的区域化分割, 要实现二维超高分辨成像难度很大。为了解决上述问题, 本论文提出了一种基于空变多普勒参数聚类的微波光子 ISAR 高精度成像方法。首先, 建立了微波光子 ISAR 舰船目标回波模型, 导出了多普勒参数的三维空变特性, 并分析了二维区域化补偿处理的必要性; 然后, 通过强散射点的分离、多普勒参数的自适应估计及插值等处理, 建立了目标各散射点与二维多普勒参数之间的映射关系, 并在二维多普勒参数域通过聚类处理, 完成空变多普勒参数的自适应最优分割, 为高精度的区域化补偿处理奠定了基础。最后, 通过区域化非空变二维相位一致性补偿处理, 实现了微波光子 ISAR 超高分辨成像。并通过仿真和实测数据处理, 验证了本方法的有效性。

关键词: 微波光子雷达; 逆合成孔径雷达 (ISAR); 舰船成像; 三维空变; 多普勒参数聚类

基金项目: 国家自然科学基金 (No.62171084)

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)12-3941-16

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240442

High-Precision Microwave Photonic ISAR Imaging Method Based on Spatially Variant Doppler Parameter Clustering

LI Jun-yan¹, YANG Qing¹, LI Zhong-yu^{1*}, WU Jun-jie¹, WANG An-le², WANG Dang-wei², YANG Jian-yu¹

(1. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: Due to its large bandwidth and high resolution in the range dimension, microwave photonic radar enables finer information extraction for important targets such as ships through inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging, which is crucial for maritime surveillance. However, under the ultra-high resolution characteristics, the three-dimensional spatially variant Doppler parameters caused by target rotation can lead to image defocusing. In two-dimensional echo domain imaging, regional compensation processing is necessary, but existing methods cannot achieve adaptive regional segmentation, making it difficult to achieve two-dimensional ultra-high resolution imaging. To address these issues, this paper proposes a high-precision microwave photonic ISAR imaging method based on spatially variant Doppler parameter clustering. Firstly, the echo model of microwave photonic ISAR ship target is established, and the three-dimensional spatial variability characteristics of Doppler parameters are derived. The necessity of two-dimensional regional compensation processing is analyzed. Then, by separating strong scattering points, adaptive estimation and interpolation of Doppler parameters, a mapping relationship between each scattering point of the target and the two-dimensional Doppler parameter is established. Clustering processing in the two-dimensional Doppler parameter domain is performed to achieve adaptive optimal segmentation of spatially variant Doppler parameters, laying the foundation for high-precision regional compensation processing. Finally, regional non-spatially variant two-dimensional phase consistency compensation processing is carried out to achieve

ultra-high resolution imaging of microwave photonic ISAR. The effectiveness of this method is validated through simulation and experimental data processing.

Key words: microwave photonic radar; inverse synthetic aperture radar (ISAR); ship imaging; three-dimensional spatial variability; Doppler parameter clustering

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62171084)

1 引言

基于光子技术和微波技术,微波光子雷达解决了传统雷达超大带宽线性度不佳的问题,可以产生远超传统雷达的超宽带雷达信号,其信号带宽可达 GHz 量级,距离分辨力可达厘米级别^[1],通过对舰船目标逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像可以提取更精细的信息,对于海上目标监视有着非常重要的军事和民用意义。

在超高分辨 ISAR 成像中,未知空变多普勒参数补偿一直是重点和难点,并且随着多普勒参数空变维数增高,补偿会越困难。多普勒参数最多存在三维空变特性,分别为距离向空变,方位向空变以及高度向空变三大特性,以距离向空变为例,距离向空变是指多普勒参数随着散射点的距离向位置变化而变化,因此不同距离向位置的散射点无法进行一致性补偿,必须进行空变补偿。研究人员提出了一些方法去解决多普勒参数空变补偿问题,如距离多普勒算法^[2](Range Doppler Algorithm, RDA)考虑多普勒参数的距离空变特性,在距离多普勒域进行徙动校正后,逐距离门补偿方位相位,实现了一维空变的多普勒参数补偿;极坐标格式算法^[3](Polar Format Algorithm, PFA)考虑多普勒参数的距离与方位空变特性,忽略散射点高度,以及假设转轴方向恒定且垂直于雷达视线方向(Radar Line Over Sight, RLOS),将目标转动建模为二维转台模型,实现了二维空变的多普勒参数补偿。

要想对二维回波进行多普勒参数三维空变补偿是格外困难的,传统方法主要分为三类,分别为参数估计类方法、时频瞬时成像类方法以及分块匹配滤波方法,参数估计类方法^[4-7]需要假设距离包络已被对齐,该方法将一个距离门中的回波建模为多分量三次相位信号,通过估计单个分量的多普勒质心、多普勒调频率等参数,将其从回波中减掉从而估计下一个分量,实现目标位置与散射系数的重建,该方法对较强散射目标具有较好的聚焦能力,但是对邻近弱目标的恢复能力不足,造成图像中只有一些散点目标,目标整体信息受损;时频瞬时成像类方法^[8-10]通过对非平稳信号进行时频分析,能够得到聚焦效果较好的雷达图像,但是这类方法需要假设距离包络已被对齐,其中线性的时频瞬时成像方法(如短时傅里叶变换^[9]等)受到时频分辨率限制,造成图像分辨力不足,非线性的时频瞬时成像方

法(如 Winger-Ville 分布^[10]等)受到交叉项限制,造成图像中出现虚假目标,这两类方法由于仅利用少量时刻的数据,目标信噪比都会受损;分块匹配滤波方法^[11,12]大多是在距离包络对齐后进行的,但是也可以在距离包络对齐前进行处理,这一点是比较灵活的。分块匹配滤波方法的原理是在距离多普勒域将散射点进行分块,在块内进行一致性补偿,该方法虽然能够避免上述两类方法的问题,但是缺乏分块依据,特别在二维分块情况下,分块形状、数量、大小等问题均缺乏理论指导,并且会存在图像拼接等问题。

三维空变的多普勒参数会引发距离包络与方位相位的三维空变特性,传统雷达仅需要对方位相位进行空变补偿,而微波光子雷达虽然能够带来距离向更高的分辨能力,具有更高的成像价值,但是需要额外考虑距离包络的空变补偿问题^[13],补偿难度更大,上述的参数估计类方法与时频瞬时成像类方法假设距离包络已被对齐,这一点对于具有超高距离分辨率的微波光子雷达是难以满足的,直接运用到微波光子雷达上势必会造成图像质量的下降;而分块匹配滤波方法缺乏分块依据,并且会存在图像拼接等问题,因此目前的空变补偿方法都存在一定的不足,有必要针对微波光子 ISAR 三维空变补偿成像提出更有效的方法。

本文所提方法对微波光子雷达的三维空变补偿效果更好,并且也可以应用于传统雷达。针对三维空变补偿问题,提出基于空变多普勒参数聚类的微波光子 ISAR 高精度成像方法,首先分析回波三维空变特性,以及二维区域化补偿必要性,其次通过多普勒参数自适应估计与聚类处理,完成空变多普勒参数的自适应最优分割,最后通过区域化非空变二维相位一致性补偿处理,实现了微波光子超高分辨成像。所提方法不需要假设距离包络已被对齐,相对于参数估计类方法,由于没有进行清洗处理,该方法成像可以完整保留目标信息;相对于时频瞬时成像类方法,由于利用了完整回波数据进行二维相干累积,因而能达到较优的图像分辨力与信噪比;相对于传统分块匹配滤波方法,由于给出了基于多普勒参数聚类的理论依据,因此可以实现自适应二维区域化划分。

2 微波光子雷达回波建模与特性分析

本节首先建立微波光子雷达回波模型,分析在超

高分辨特性下,目标三维转动造成多普勒参数的三维空变特性,受限于回波数据自由度,在二维回波域成像时必须要进行区域化的补偿处理,为实现二维高精度成像奠定理论基础。

2.1 微波光子雷达回波模型

首先建立微波光子雷达几何构型,微波光子雷达在单基地 ISAR 体制下照射目标,定义雷达视线方向 RLOS 为距离向,舰船目标存在平动与三维转动,合成总转轴为 ω ,其垂直于 RLOS 的分量为有效旋转向量,记为 ω_e ,基于右手螺旋准则,通过 ω_e 叉乘 RLOS 得到方位向。为了描述雷达与目标的空间位置关系,以目标中心为原点,以距离向为 X 轴,以方位向为 Y 轴,以 ω_e 为 Z 轴建立三维空间坐标系,如图 1 所示,其中由 X、Y 轴组成的平面称为成像投影面 (Image Projection Plane, IPP),经过成像处理后,可得散射点 p 在 IPP 的二维投影坐标,由于舰船目标的三维转动,IPP 可能不稳定,因此本文取某一参考时刻(记为零时刻)的 IPP 作为 XOY 平面,从而建立三维坐标系,本文后续的 XYZ 坐标均在该三维坐标系中讨论。

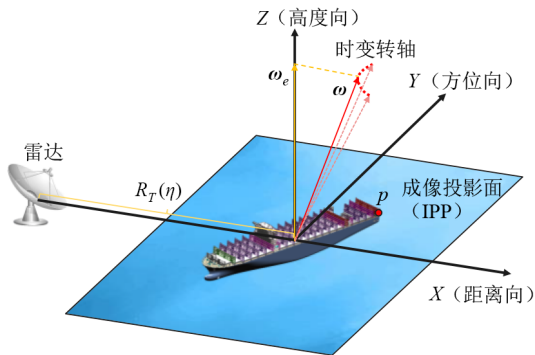


图 1 ISAR 几何构型

基于上述几何构型,微波光子雷达录取回波,通过解线频调 (Dechrip) 方法完成距离聚焦,并去除剩余视频相位,得到:

$$s_0(t, \eta) = \sum_{p=1}^P \exp \left\{ -j \cdot \frac{4\pi}{c} \cdot (f_c + k_r t) \cdot R_p(\eta) \right\} \quad (1)$$

其中, t, f_c, k_r 分别为距离快时间,载频与调频率; η 为方位慢时间; c 为光速; $R_p(\eta)$ 为第 p 个散射点在 η 时刻的瞬时距离,散射点数量为 P 。

在远场假设下,距离历史 $R_p(\eta)$ 可分解为平动和转动

$$R_p(\eta) = R_T(\eta) + R_{\text{Rot},p}(\eta) \quad (2)$$

其中, $R_T(\eta)$ 为目标沿 RLOS 方向平动造成的距离历史; $R_{\text{Rot},p}(\eta)$ 为目标三维转动造成的距离历史。

目标合成总转轴的大小方向往往随方位时间变

化,考虑从 $i-1$ 到 i 时刻,散射点 p 绕着合成总转轴方向 $\omega(i)$ 旋转了角度 θ_i ,其旋转变换矩阵记为 $\text{Rot}_{\omega(i)}(\theta_i)$,矩阵维度为 3×3 ,设 0 时刻散射点 p 的坐标为 $(x_p, y_p, z_p)^T$,那么在第 m 时刻, $R_{\text{Rot},p}(\eta)$ 为

$$R_{\text{Rot},p}(\eta) = \mathbf{D}_{\text{RLOS}} \cdot \prod_{i=1}^m \text{Rot}_{\omega(i)}(\theta_i) \cdot (x_p, y_p, z_p)^T \quad (3)$$

其中, $m = \eta / \text{PRI}$, m 是方位时间离散下标, PRI 为脉冲采样间隔; \mathbf{D}_{RLOS} 为零时刻 RLOS 方向行向量,在本文建立的坐标系中为 $(1, 0, 0)$ 。

根据矩阵运算结合律,对式(3)前两项进行结合运算,得到

$$(k_x(\eta), k_y(\eta), k_z(\eta)) = \mathbf{D}_{\text{RLOS}} \cdot \prod_{i=1}^m \text{Rot}_{\omega(i)}(\theta_i) \quad (4)$$

其中,旋转矩阵作用于 RLOS,使得 RLOS 在不同时刻发生相应的旋转,在 η 时刻的 RLOS 向量是 $(k_x(\eta), k_y(\eta), k_z(\eta))$,其中 $k_x(\eta)$ 、 $k_y(\eta)$ 和 $k_z(\eta)$ 分别为沿 X、Y、Z 轴的波数。

由于 RLOS 向量模长始终为一,因此在球坐标系中仅用偏航角 $\alpha(\eta)$,俯仰角 $\beta(\eta)$ 可以进行表示,实现变量个数的减少,便于后续泰勒展开,有

$$\begin{aligned} k_x(\eta) &= \cos \alpha(\eta) \cdot \cos \beta(\eta) \\ k_y(\eta) &= \cos \alpha(\eta) \cdot \sin \beta(\eta) \\ k_z(\eta) &= \sin \alpha(\eta) \end{aligned} \quad (5)$$

将式(4)代入式(3),得到旋转距离历史 $R_{\text{Rot},p}(\eta)$ 的表达式

$$R_{\text{Rot},p}(\eta) = k_x(\eta) \cdot x_p + k_y(\eta) \cdot y_p + k_z(\eta) \cdot z_p \quad (6)$$

从空间上看, $R_{\text{Rot},p}(\eta)$ 随着散射点的三维位置线性变化,从时间上看, $R_{\text{Rot},p}(\eta)$ 随时间按某种规律变化,在合成孔径时间较短条件下, $R_{\text{Rot},p}(\eta)$ 的时变规律可借助三阶多项式表示^[14],首先需要将 $\alpha(\eta)$ 与 $\beta(\eta)$ 分别建模为匀加速转动,得到二阶转角模型如式(7)所示:

$$\begin{aligned} \alpha(\eta) &= a_\alpha \eta + b_\alpha \eta^2 \\ \beta(\eta) &= a_\beta \eta + b_\beta \eta^2 \end{aligned} \quad (7)$$

然后将式(7)代入式(5),对 \cos 与 \sin 函数进行泰勒展开,由此得到三维波数 $k_x(\eta)$ 、 $k_y(\eta)$ 、 $k_z(\eta)$ 的三阶多项式如

$$\begin{aligned} k_x(\eta) &= 1 + b_x \eta^2 + c_x \eta^3 \\ k_y(\eta) &= a_y \eta + b_y \eta^2 + c_y \eta^3 \\ k_z(\eta) &= a_z \eta + b_z \eta^2 + c_z \eta^3 \end{aligned} \quad (8)$$

其中, b_x 和 c_x 、 b_y 和 c_y 、 b_z 和 c_z 分别为 $k_x(\eta)$ 、 $k_y(\eta)$ 、 $k_z(\eta)$ 的二、三阶展开系数; a_y 和 a_z 为 $k_y(\eta)$ 和 $k_z(\eta)$ 的一阶展开

系数. 由于 $k_x(\eta)$ 表示成两个余弦函数相乘, 因此泰勒展开后不存在一阶项, 由于 $k_x(\eta)$ 和 $k_y(\eta)$ 中存在正弦函数因式, 因此泰勒展开后不存在常数项. 接着将平动距离历史 $R_T(\eta)$ 借助三阶多项式表示为

$$R_T(\eta) = R_0 + a_T\eta + b_T\eta^2 + c_T\eta^3 \quad (9)$$

其中, a_T, b_T, c_T 分别为 $R_T(\eta)$ 的一、二、三阶展开系数. 联立式(2)、式(6)、式(8)、式(9), 并将三阶多项式各项系数进行合并, 得到距离历史的三阶多项式表达, 即

$$R_p(\eta) = A_0(x_p) + A_1(y_p, z_p) \cdot \eta + A_2(x_p, y_p, z_p) \cdot \eta^2 + A_3(x_p, y_p, z_p) \cdot \eta^3 \quad (10)$$

其中, $A_0(x_p)$ 是常数项距离历史, 主要反映散射点距离向投影信息; $A_1(y_p, z_p) \cdot \eta$ 是一阶项距离历史, 主要反映散射点方位向投影信息; 由于本文坐标系建立在零时刻 IPP 上, 因此方位向投影信息主要是 y_p , 但也会有一部分 z_p 的信息; $A_2(x_p, y_p, z_p)$ 与 $A_3(x_p, y_p, z_p)$ 分别是三维空变的二阶多普勒参数与三阶多普勒参数.

将式(10)距离历史模型代入式(1)信号模型, 并且忽略与成像无关的项, 整理得到回波模型如

$$s_0(t, \eta) =$$

$$\sum_{p=1}^P \exp \left\{ \begin{array}{l} -j \cdot \frac{4\pi}{c} \cdot f_c \cdot (A_1(y_p, z_p) \cdot \eta) - j \cdot \frac{4\pi}{c} \cdot k_r t \cdot A_0(x_p) \\ -j \cdot \frac{4\pi}{c} \cdot k_r t \cdot (A_1(y_p, z_p) \cdot \eta) \\ -j \cdot \frac{4\pi}{c} \cdot (f_c + k_r t) \cdot \left(A_2(x_p, y_p, z_p) \cdot \eta^2 + A_3(x_p, y_p, z_p) \cdot \eta^3 \right) \end{array} \right\} \quad (11)$$

式(7)中, 将7项排列为3行, 第一行为散射点二维位置反演的关键信息, 第2行为一阶空变徙动项, 第3行共4项, 为二、三阶多普勒参数造成的二、三阶空变徙动项与二、三阶空变相位误差项.

2.2 三维空变特性分析与二维区域化补偿必要性分析

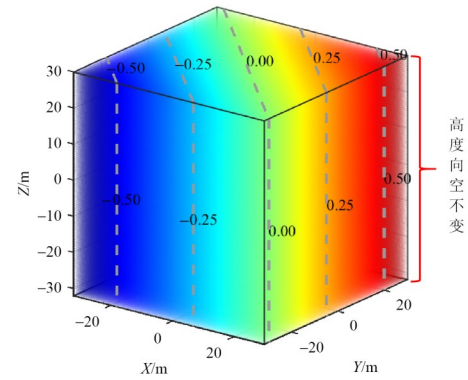
在进行三维空变特性分析之前, 我们需要讨论两种可降维的特殊情况, 一种是 $k_z(\eta)$ 波数基本为零, 这使得二、三阶多普勒参数与散射点高度位置 z_p 无关, 仅需进行二维空变补偿; 另一种是在一般坐标系中(例如以地面为 XOY 平面的坐标系), $k_y(\eta)$ 波数与 $k_z(\eta)$ 波数满足线性关系, 此时 Y 与 Z 两个维度可以合并, 因此仅需进行二维空变补偿^[14], 实际上这种情况相当于将坐标系建立在 IPP 上 $k_z(\eta)$ 波数为零的情况. 以上两种情况均不是三维空变的, 本文接下来要讨论的是真正意义上的三维空变情况.

基于微波光子雷达回波模型分析, 二、三阶多普勒参数是随着散射点 p 的三维空间位置变化而变化的, 这就是多普勒参数的三维空变特性, 若多普勒参数高度空变特性较小, 例如目标做二维转台运动, 那么多普勒参数可近似为二维线性空变, 传统方法如 PFA 可以实现 ISAR 成像; 然而在微波光子超高分辨特性下, 高度空变特性在大多数实际情况下难以忽略, 此时应考虑多普勒参数的三维空变特性, 具体分为如下2种常见情况:

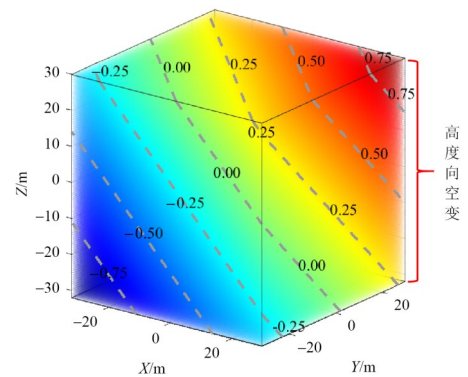
(1) ISAR 目标的合成转轴方向任意, 很难保证完全垂直于 RLOS, 因此无法直接使用传统的转台模型, 此时存在平行于 RLOS 的转轴分量.

(2) 当目标做三维转动时, 成像投影面 (IPP) 晃动^[15], 根据相对运动原理, 可等效为目标存在平行于 RLOS 的转轴分量.

对于以上2种情况, 若平行转轴分量越大, 则 $k_z(\eta)$ 波数越显著不为零, 那么多普勒参数的高度空变特性会越强, 三维空变特性下多普勒参数的空间分布会越显著区别于二维空变特性下多普勒参数的空间分布, 以二阶多普勒参数为例, 在图2中对这一特点进行直观



(a) 二维空变特性下二阶多普勒参数的三维空间分布情况



(b) 三维空变特性下二阶多普勒参数的三维空间分布情况

图2 不同空变特性下, 二阶多普勒参数的三维空间分布比较

比较. 较之于二维空变, 三维空变额外存在多普勒参数的高度空变特性, 而这一特性会造成 ISAR 图像散焦^[16], 为了直观说明这一点, 利用能较好解决二维空变的 PFA 算法完成货船仿真成像, 得到示意图如图 3. 图 3(a) 是货船的三维点云图, 其俯视图为图 3(b), 可以发现, 图 3(a) 中高度 Z 为 0 的散射点在图 3(c) 中实现了聚焦, 然而高度非 0 的散射点存在散焦情况, 例如红框部分, 这是因为 PFA 只考虑了多普勒参数沿距离向与方位向的二维空变特性, 而高度空变多普勒参数没有得到补偿, 造成高度非 0 的散射点散焦.

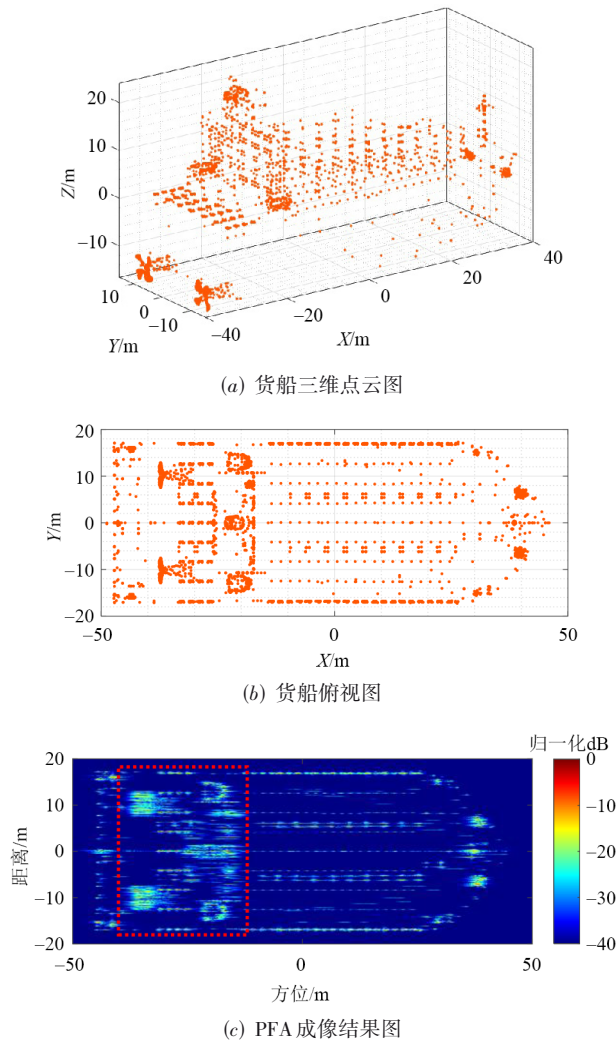


图 3 三维空变导致图像散焦

目标转动导致的三维空变多普勒参数会造成图像的散焦, 在二维回波域成像时必须要进行区域化的补偿处理, 这一结论是通过分析图 4 获得的. 首先在三维空变特性下, 通过匹配滤波方法实现二维成像需要特定条件, 即散射点高度向不重叠, 这使得三维散射点可以唯一投影到二维 IPP, 由此从图 4(a) 得到图 4(b), 基

于此前提, 比较二维空变特性与三维空变特性下, 三维散射点在 IPP 的多普勒参数分布情况, 得到图 4(c) 和图 4(d), 由于二维回波数据自由度的限制, 三维空变多普勒参数在二维 IPP 的空变规律是非定式的, 随散射点高度向坐标变化而变化, 因此针对三维空变问题, 在二维回波域成像时必须要进行区域化的补偿处理.

基于上述分析, 对多普勒参数进行降维, 将 Z 建模为 X 和 Y 的分段函数, 如 $z=g(x,y)$, 其中 g 表示分段函数, 则多普勒参数 A_2, A_3 均只与 X, Y 有关, 二阶多普勒参数与三阶多普勒参数分别表示为 $A_2(x,y)$ 与 $A_3(x,y)$.

至此, 微波光子 ISAR 舰船目标回波模型得到建立, 多普勒参数三维空变特性与二维区域化补偿处理必要性得到分析, 为未知空变多普勒参数估计和微波光子 ISAR 超高分辨成像奠定了理论基础.

3 基于空变多普勒参数聚类的高精度成像方法

在三维空变特性下, 对二维回波数据成像必须进行自适应的区域化补偿处理, 然而现有方法均不能实现自适应的最优分割, 本节提出一种基于空变多普勒参数聚类的高精度成像方法, 首先在回波域进行平动粗补偿, 其次对空变多普勒参数进行自适应估计, 建立目标各散射点与二维多普勒参数之间的映射关系, 再次在二维多普勒参数域通过聚类处理, 完成了图像域散射点的自适应最优分割, 最后通过区域化非空变二维相位一致性补偿处理, 实现了微波光子 ISAR 超高分辨成像.

3.1 平动粗补偿

平动导致非空变的一、二、三阶多普勒参数 a_T, b_T, c_T , 其中一、二、三阶多普勒参数造成距离徙动, 并且二、三阶多普勒参数会造成方位相位误差, 使得图像散焦, 因此需要进行平动补偿^[17].

由于微波光子回波数据规模较大, 为了提高平动参数估计速度, 利用平均最小熵算法^[18]估计距离徙动量, 但是该算法可能估计出异常的徙动量, 破坏方位脉冲间的相位相干性, 最终导致二维图像的散焦, 为了增加估计的稳定性, 通过对徙动量拟合 3 阶多项式, 得到估计参数 a_T, b_T, c_T , 按式 (12) 补偿回波相位:

$$s_1(D_t, D_\eta) = s_0(D_t, D_\eta) \cdot \exp[j \cdot K_R(D_t) \cdot (a_T \eta + b_T \eta^2 + c_T \eta^3)] \quad (12)$$

其中, $s_1(D_t, D_\eta)$ 为补偿二维相位后的回波; K_R 为 $4\pi/c \cdot (f_c + k_r t)$; D_t 为 t 的离散形式, 取值 $1, 2, \dots, N_{\text{fast}}$; D_η 为 η 的离散形式, 取值 $1, 2, \dots, N_{\text{slow}}$.

然后, 利用一阶 Keystone 变换 (Keystone Transform, KT)^[19]校正空变的一阶距离徙动得到式 (13), 通过二维

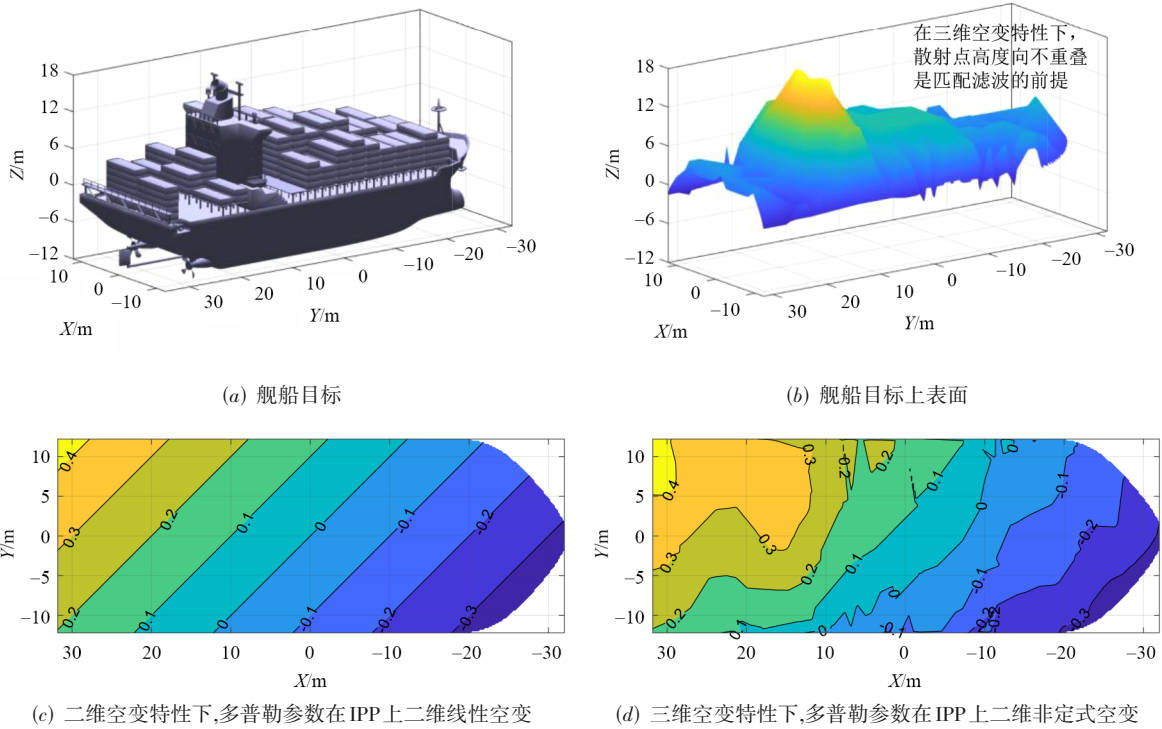


图4 多普勒参数在IPP的分布情况,说明二维区域化补偿必要性

FFT(2D-FFT)得到式(14):

$$s_{KT} = KT \{s_1(D_t, D_\eta)\} \quad (13)$$

$$I_1(D_x, D_y) = \text{FFT}_{D_x} \{ \text{FFT}_{D_y} \{s_{KT}\} \} \quad (14)$$

其中, $I_1(D_x, D_y)$ 为平动补偿后粗成像结果; D_x 和 D_y 是 x 和 y 的离散形式; $KT\{\}$ 表示对 $\{\}$ 的方位向做一阶 KT,

其变换关系为

$$\eta = \frac{4\pi}{\lambda K_R} \eta_1 \quad (15)$$

其中, η_1 为变换后的方位时间.

图5展示了平动补偿前后的距离多普勒(Range Doppler, RD)图像,其中图5(b)明显更加聚焦,说明平动补偿的必要性.

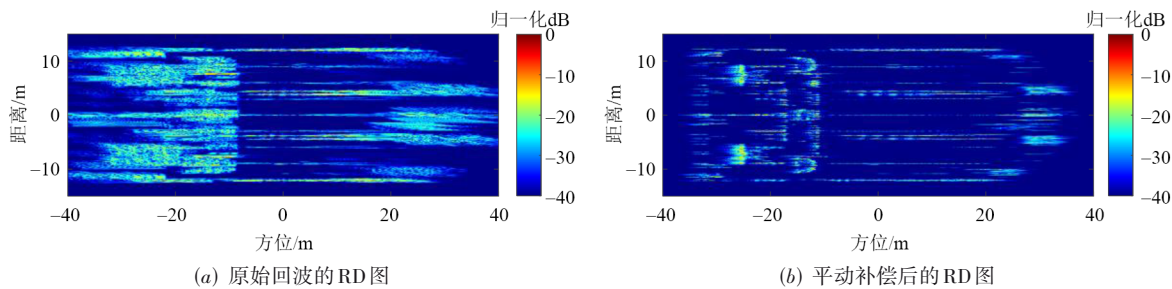


图5 平动补偿前后对比

3.2 空变多普勒参数估计

在做二维区域化补偿处理前,未知空变多普勒参数必须要得到估计,本小节通过强散射点回波分离、多普勒参数的自适应估计及插值等处理,建立了目标各散射点与二维多普勒参数之间的映射关系,为二维多

普勒参数域聚类奠定基础.

3.2.1 强散射点回波分离

提取各强散射点回波任务可分解为先提取各强散射点位置,然后设置提取的矩形块范围,前者的确定需要满足两个准则,第一条是为了减少噪声的影响,需要

选取幅度较大的散射点,其幅度大于给定的阈值(此处示例说明时,本文取最强点幅度的 10%);第二条是密集的选点会造成信息冗余,使得算法效率降低,通过对强散射点设置矩形保护区域以解决该问题。

基于以上两个基本要求,给出强散射点位置确定的算法步骤。

步骤 1:在粗图像 $I_1(D_x, D_y)$ 中选择一个幅度最强的散射点。

步骤 2:排除上一次选择的最强散射点的保护区域,图像中剩余部分为可选区域。

步骤 3:在可选区域中继续寻找最强散射点。若最强散射点的幅度小于等于阈值,强散射点位置查找完毕,算法终止;否则转步骤 2。

通过上述算法过程可以自动确定大部分强散射点位置,剩余少量强散射点位置可手动选定,有助于提高聚焦性能和算法效率。而提取回波所需的矩形块范围与矩形保护区域只需要包含散射点散焦部分所在范围即可。

接下来我们讨论阈值的影响,在实际应用中如果阈值偏低,则容易选择弱散射点甚至是噪点,造成参数估计精度下降,影响后续成像效果;如果阈值偏高,则散射点数量可能不足,不利于目标整体参数的充分估计,因此实际应用中要根据目标大致的散射特性与回波信噪比进行选择,本文在进行示例说明时使用的阈值,是根据最强点 sinc 函数第一旁瓣的幅度大致取得的。

对粗图像选择强散射点的结果示意图如图 6,红圈基本均匀分布在目标上,有利于对目标各部分的多普勒参数进行充分估计。

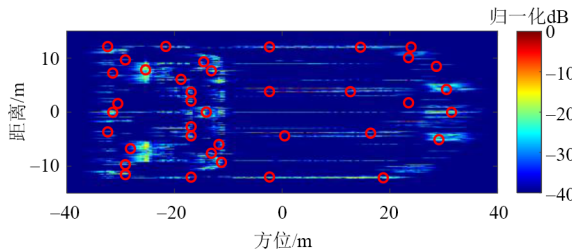


图 6 强散射点选取结果示意图,红圈为图像域中选择的强散射点

对于每一个强散射点分别提取回波用于后续多普勒参数估计,首先需要将粗图像 $I_1(D_x, D_y)$ 滤除块外的信号,获得 $I_{\text{part}}(D_x, D_y)$,此时矩阵维度为 $N_{\text{slow}} \times N_{\text{fast}}$,由于滤除后距离向存在零元,对多普勒参数估计没有贡献,因此在随后参数估计前,对距离向做裁剪,使得后续运算量得到简化,裁剪后点数为 $N_{\text{fast-part}}$,矩阵维数为 $N_{\text{slow}} \times N_{\text{fast-part}}$ 通过式(16)得到强散射点回波

$$s_{\text{part}}(D_t, D_\eta) = \text{IFFT}_{D_t} \left\{ \text{IFFT}_{D_\eta} \left\{ I_{\text{part}}(D_x, D_y) \right\} \right\} \quad (16)$$

其中, $\text{IFFT}_{D_t} \{ \}$ 表示对 $\{ \}$ 的方位向做快速傅里叶逆变换; $\text{IFFT}_{D_\eta} \{ \}$ 表示对 $\{ \}$ 的距离向做快速傅里叶逆变换。

s_{part} 为强散射点一阶 KT 后的回波,具体分析信号表达式有利于对其误差相位进行充分补偿,其形式约为

$$s_{\text{part}} \approx \exp \left\{ -j \cdot K_R \cdot A_0 - j \cdot A_1 \frac{4\pi}{\lambda} \eta \right\} \cdot \exp \left\{ -j \cdot K_R \cdot \left(\frac{4\pi}{\lambda K_R} \right)^2 \cdot \left[A_2 \eta^2 + A_3 \frac{4\pi}{\lambda K_R} \eta^3 \right] \right\} \quad (17)$$

其中,第一个指数项为强散射点有用信息,用于恢复散射点的二维坐标; A_1 为强散射点的一阶多普勒参数;第二个指数项是强散射点的二、三阶相位在一阶 KT 后的表示形式; λ 为波长。

3.2.2 多普勒参数自适应估计

不同强散射点的多普勒参数是不同的,造成了各异的徙动与相位误差,因此强散射点多普勒参数估计需要满足自适应的要求,本小节利用图像熵(IE)对多普勒参数进行自适应优化求解。

首先,对矩形块的强散射点 (D_{xc}, D_{yc}) 提取的回波为 $s_{\text{part}}(D_t, D_\eta)$,通过补偿强散射点的二阶多普勒参数 $A_2(D_{xc}, D_{yc})$ 与三阶多普勒参数 $A_3(D_{xc}, D_{yc})$ 对应的相位,得到回波:

$$s_{2,3}(D_t, D_\eta) = s_{\text{part}}(D_t, D_\eta) \cdot \exp \left\{ j \cdot K_R \cdot \left(\frac{4\pi}{\lambda K_R} \right)^2 \cdot \left[A_2 \eta^2 + A_3 \frac{4\pi}{\lambda K_R} \eta^3 \right] \right\} \quad (18)$$

需要估计未知二、三阶多普勒参数,而 IE 在多普勒参数估计中应用广泛,能够衡量图像的聚焦效果^[20-22],其值越小,图像越聚焦,为了计算 IE,首先对回波 $s_{2,3}(D_t, D_\eta)$ 利用 2D-FFT 得到图像:

$$I_{2,3}(D_x, D_y) = \text{FFT}_{D_x} \left\{ \text{FFT}_{D_\eta} \left\{ s_{2,3}(D_t, D_\eta) \right\} \right\} \quad (19)$$

对图像能量归一化得到

$$\tilde{I}_{2,3}(D_x, D_y) = \frac{|I_{2,3}(D_x, D_y)|^2}{\sum_{D_x=1}^{N_{\text{slow}}} \sum_{D_y=1}^{N_{\text{fast}}} |I_{2,3}(D_x, D_y)|^2} \quad (20)$$

目标函数 IE 为

$$\text{IE} \{ I_{2,3} \} = - \sum_{D_x=1}^{N_{\text{slow}}} \sum_{D_y=1}^{N_{\text{fast}}} \tilde{I}_{2,3}(D_x, D_y) \cdot \log \left[\tilde{I}_{2,3}(D_x, D_y) \right] \quad (21)$$

其中, $\text{IE} \{ \}$ 表示对 $\{ \}$ 计算图像熵。

当 $A_2(D_{xc}, D_{yc})$ 和 $A_3(D_{xc}, D_{yc})$ 的估计值准确时, IE 达到最小,即

$$\left[\tilde{A}_2(D_{xc}, D_{yc}), \tilde{A}_3(D_{xc}, D_{yc}) \right] = \text{argmin IE} \{ I_{2,3} \} \quad (22)$$

粒子群(PSO)算法^[23]是单目标多决策优化问题的常用算法,该算法的估计结果稳健,且由于回波提取后数据量较少,PSO的运行时间较短,因此使用PSO算法估计二、三阶多普勒参数。

3.2.3 基于插值反演多普勒参数空间分布

通过强散射点估计得到多普勒参数的局部信息,然而剩余散射点的多普勒参数仍需得到估计,受启发于PFA的线性空变规律模型,本节利用线性插值进行多普勒参数空间分布重建。

将强散射点估计得到的二、三阶多普勒参数集合分别记为

$$S_k = \left\{ \tilde{A}_k(D_{xc}, D_{yc}) \right\}, k=2,3 \quad (23)$$

其中,考虑到 (D_{xc}, D_{yc}) 是散焦图像中提取的强散射点位置,受到三阶多普勒参数影响可能发生偏移,造成后续处理的不准确,为了避免该问题,应该将 (D_{xc}, D_{yc}) 修正为3.2.2节中聚焦图像的最值散射点位置。

利用邻近散射点多普勒参数的连续性,通过二维线性插值获得所有散射点的多普勒参数, (D_x, D_y) 处散射点对应的二、三阶多普勒参数记为 $A_k(D_x, D_y), k=2,3$,一共有 $N_{\text{slow}} \times N_{\text{fast}}$ 个。

图7表示二维线性插值后,图像域各散射点多普勒参数的分布情况,观察发现,图6中左右两侧部分较为散焦,而在图7中,左右两侧的二、三阶多普勒参数值都不为零,这侧面验证了参数估计的准确性。

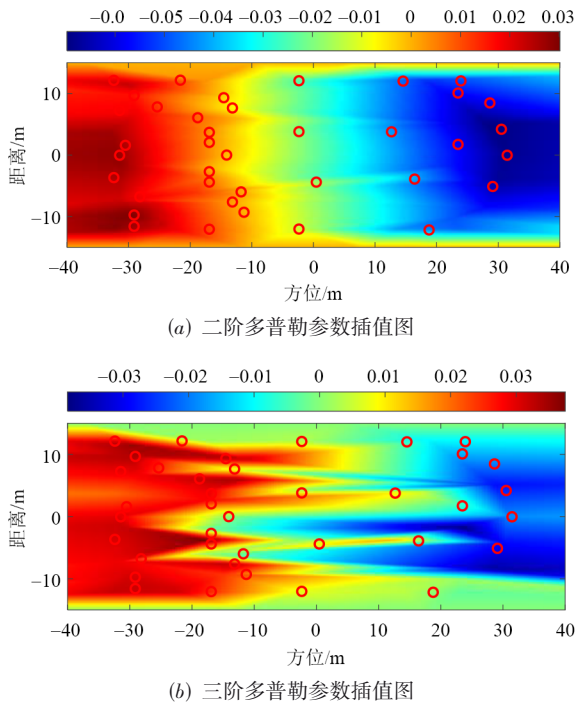


图7 二、三阶多普勒参数插值示意图,红圈表示强散射点在图像域的位置

到此,完成未知空变多普勒参数的估计任务,实现每一个散射点 (D_x, D_y) 与其多普勒参数 (A_2, A_3) 的映射,为二维多普勒参数域聚类提供理论基础。

3.3 二维多普勒参数域聚类约束优化

在三维空变特性下,对二维回波数据成像必须要进行自适应的区域化补偿处理,然而现有方法均不能实现自适应的最优分割,针对该问题,本节通过在二维多普勒参数域聚类实现散射点的自适应最优分割,首先通过分析传统方法多普勒参数补偿效率低下,说明多普勒参数聚类的必要性,其次建立基于多普勒参数聚类的约束优化模型,最后给出算法步骤与结果示意图,为高精度的区域化补偿处理奠定了基础。

基于多普勒参数的空间分布情况,对平动粗补偿后的回波 $s_{\text{KT}}(D_t, D_\eta)$ 通过传统2D-DFT成像:

$$I_2(D_x, D_y) = \sum_{D_t=1}^{N_{\text{slow}}} \sum_{D_\eta=1}^{N_{\text{fast}}} s_{\text{KT}}(D_t, D_\eta) \cdot \exp \left\{ \begin{aligned} & j \cdot \frac{16\pi^2}{\lambda^2 K_R} \cdot A_2(D_x, D_y) \eta^2 \\ & + j \cdot \frac{64\pi^3}{\lambda^3 K_R^2} \cdot A_3(D_x, D_y) \eta^3 \end{aligned} \right\} \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi D_t}{N_{\text{fast}}} \cdot D_x \right) \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi D_\eta}{N_{\text{slow}}} \cdot D_y \right) \quad (24)$$

其中, $I_2(D_x, D_y)$ 为RD图像.由于多普勒参数是空变的,因此式(24)逐散射点进行二、三阶多普勒参数的匹配滤波,每次只能得到一个散射点的图像值,一共需要做 N 次,其中 $N=N_{\text{slow}} \cdot N_{\text{fast}}$,同时为了联合补偿徙动与方位相位,对一个散射点匹配滤波需要补偿二维相位,因此传统算法复杂度为 $o(N^2)$ 。

传统空变多普勒补偿方法效率低下,需要对多普勒参数进行自适应的区域化分割处理,针对该问题,本小节基于多普勒参数聚类,通过每个类别中平均多普勒参数一致性补偿以及FFT算法,实现多散射点并行成像,这使得 N 次成像降低为 U 次, U 为聚类类别总数,且 $U \ll N$,则新成像方法复杂度显著降低为 $o(U \cdot N \log N)$ 。

一致性补偿会造成类内散射点出现徙动残差与方位相位残差,两个残差必须要分别小于徙动精度与相位精度,这是一致性补偿的必要前提,基于该约束条件,建立基于多普勒参数聚类约束优化模型,为了叙述简便,定义在第 u 类别中二阶多普勒参数的平均值为 $A_{2,u,\text{ave}}$,其最大残差为 $\Delta A_{2,u} = \max_i |A_{2,u,i} - A_{2,u,\text{ave}}|$,同理三阶多普勒参数的平均值为 $A_{3,u,\text{ave}}$,最大残差为 $\Delta A_{3,u} = \max_i |A_{3,u,i} - A_{3,u,\text{ave}}|$,定义 $T=N_{\text{slow}} \cdot \text{PRI}/2$,那么结合式(24),

对二阶多普勒参数残差项,利用一阶泰勒公式展开,得到

$$\frac{16\pi^2}{\lambda^2 K_R} \cdot \Delta A_{2,u} T^2 \approx \frac{4\pi}{\lambda} T^2 \cdot \Delta A_{2,u} - \frac{4\pi}{c} T^2 \cdot \Delta A_{2,u} \cdot k_r t \quad (25)$$

其中,前一项是方位相位残差项,后一项是徙动残差项.

方位相位精度为 $\pi/4$,而徙动精度为 $1/B$,其中 B 为信号带宽.二阶多普勒参数残差必须同时满足这两者精度,得到

$$|\Delta A_{2,u}| < \varepsilon_2 = \min \left\{ \frac{\lambda}{16T^2}, \frac{\lambda}{4T^2} \cdot \frac{f_c}{\pi B} \right\} \quad (26)$$

其中,前者是方位相位精度约束项,后者是徙动精度约束项, ε_2 是二阶多普勒参数精度.

同理,三阶多普勒参数残差项约为

$$\frac{64\pi^3}{\lambda^3 K_R^2} \cdot \Delta A_{3,u} T^3 \approx \frac{4\pi}{\lambda} T^3 \cdot \Delta A_{3,u} - \frac{8\pi}{c} T^3 \cdot \Delta A_{3,u} \cdot k_r t \quad (27)$$

三阶多普勒参数残差需满足条件为

$$|\Delta A_{3,u}| < \varepsilon_3 = \min \left\{ \frac{\lambda}{16T^3}, \frac{\lambda}{8T^3} \cdot \frac{f_c}{\pi B} \right\} \quad (28)$$

其中, ε_3 是三阶多普勒参数精度.

为了使成像复杂度最低,目标函数应为最小化聚类类别数 U ,并且为了使得成像精度更高,另一个目标函数应为最小化多普勒参数残差和,其中通过比较式(27)与式(25),三阶多普勒参数的加权系数近似为 T .每个散射点所属类别为待求解变量,结合式(26)与式(28),建立多普勒参数聚类约束优化模型为

$$\begin{aligned} & \min U = \\ & \min \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^{N_u} \left(T \cdot A_{3,u,i} - T \cdot A_{3,u,ave} \right)^2 + \left(A_{2,u,i} - A_{2,u,ave} \right)^2 \quad (29) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} |\Delta A_{2,u}| < \varepsilon_2, u = 1, 2, \dots, U \\ |\Delta A_{3,u}| < \varepsilon_3, u = 1, 2, \dots, U \end{cases} \end{aligned}$$

该模型存在两个目标函数,其中最大类别数 U 可以先近似得到,利用多普勒参数变化范围除以多普勒参数精度,可以得到 U 的估计值为

$$\begin{cases} \hat{U} = \text{ceil} \left\{ M_2 \cdot M_2 / (\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3) \right\} \\ M_2 = \max \left(A_2(D_x, D_y) \right) - \min \left(A_2(D_x, D_y) \right) \\ M_3 = \max \left(A_3(D_x, D_y) \right) - \min \left(A_3(D_x, D_y) \right) \end{cases} \quad (30)$$

其中, $\text{ceil} \{ \cdot \}$ 表示向上取整.

对于第二个优化目标,使用K均值(K-means)聚类算法^[24-25]求解,这是因为散射点数量一般在百万级别,使得优化问题对算法的时空复杂度有较高要求,而K-mean聚类算法收敛速度快,可解释性强,在无监督学习中得到了广泛的应用,因此选用K-mean求解式(29).

聚类前,将所有散射点映射为二维多普勒参数域

中的多普勒参数点,以 A_2 参数为横轴, A_3 参数为纵轴,建立二维多普勒参数域,利用K-means聚类方法将多普勒参数点分类为若干个集合,需根据式(29)中第二个优化目标对 A_2, A_3 做标准化,以去除量纲对聚类的影响:

$$\tilde{A}_k = A_k T^{k-2}, k = 2, 3 \quad (31)$$

根据式(29),两个多普勒参数点的距离定义为

$$\tilde{A}_k = A_k T^{k-2}, k = 2, 3 \quad (32)$$

其中, $\tilde{A}_{2,i}, \tilde{A}_{3,i}$ 分别为第 i 个多普勒参数点的二、三阶多普勒参数.

聚类的步骤如下.

步骤1:初始随机选择 U 个聚类中心.

步骤2:将多普勒参数点分配到距离最近的聚类中心,得到 U 个集合.

步骤3:对每个集合,重新计算聚类中心.当式(29)中第二个优化目标变化不大,或者迭代次数超过指定次数时,迭代结束,否则回到步骤2.

聚类结束后得到 U 个多普勒参数点的集合,根据多普勒参数点和图像域散射点的映射关系,得到图像域散射点的 U 个集合,记为 $S_u, u = 1, 2, \dots, U$, 每个集合的元素数量为 $N_{\text{card},u} = \text{card}(S_u)$.

到此,多普勒参数域聚类完成,将多普勒参数点的分类结果映射到图像域,实现了图像中散射点的自适应最优划分,结果如图8,由于在各个划分子图像内散射点的多普勒参数是相近的,因此可进行一致性补偿处理,奠定了区域化非空变二维相位一致性补偿的理论基础.

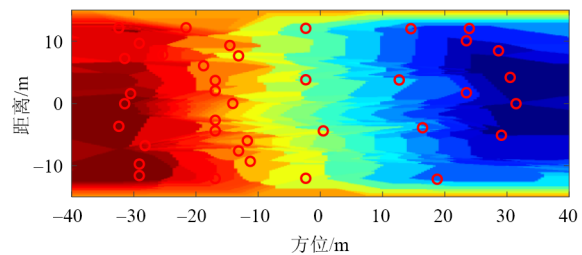


图8 散射点自适应最优划分示意图

注:用不同颜色块表示散射点划分类别,红圈为强散射点

3.4 区域化非空变二维相位一致性补偿

徙动与方位相位的联合补偿是高精度 ISAR 成像的核心之一,基于多普勒参数聚类的散射点自适应划分结果,本小节对各个子区域散射点通过一致性非空变二维相位补偿,实现微波光子 ISAR 超高分辨成像.

在式(24)基础上,对划分到同一子区域 S_u 的散射点补偿平均的多普勒参数,实现徙动与相位的联合补偿,得到

$$s_2(D_t, D_\eta) = s_{KT}(D_t, D_\eta) \cdot \exp \left\{ \begin{array}{l} j \frac{16\pi^2}{\lambda^2 K_R} A_{2,u,ave} \eta^2 \\ + j \frac{64\pi^3}{\lambda^3 K_R^2} A_{3,u,ave} \eta^3 \end{array} \right\} \quad (33)$$

其中, $A_{2,u,ave}$ 和 $A_{3,u,ave}$ 分别为第 u 个子区域中散射点的平均二、三阶多普勒参数.

通过 2D-FFT 得到 S_u 中所有散射点的图像复数值

$$I_2(D_x, D_y) = \text{FFT}_{D_x} \left\{ \text{FFT}_{D_y} \left\{ s_2(D_t, D_\eta) \right\} \right\}, \quad (34)$$

$$(D_x, D_y) \in S_u$$

对于每一个散射点集合,应用式(33)和(34),最终得到所有散射点的图像值,实现 ISAR 图像的高精度聚焦,如图 9 所示.

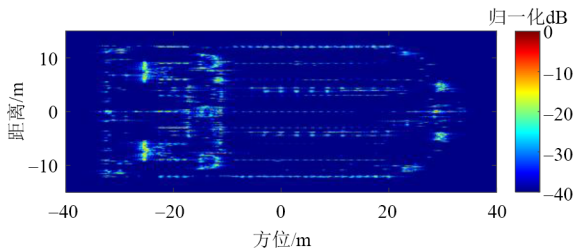


图9 本文所提算法输出图像

该算法通过迭代增加强散射点可以得到更高的聚焦性能,具体描述:根据上一次迭代时输出图像的散焦情况,确定需要新增的强散射点位置,只需要估计新增的强散射点的二、三阶多普勒参数,通过插值聚类步骤得到这一次迭代输出的图像.一般迭代不超过 3 次,即可完成图像聚焦.

综上所述,通过强散射点的分离、多普勒参数的自适应估计及插值等处理,建立了目标各散射点与二维多普勒参数之间的映射关系,通过对二维多普勒参数进行聚类处理,完成空变多普勒参数的自适应最优分割,最后,通过区域化非空变二维相位一致性补偿处理,实现了微波光子 ISAR 超高分辨成像,整体算法流程如图 10.

4 仿真实验与实测数据验证

本节通过仿真和实测数据处理,验证上述微波光子 ISAR 成像方法的可行性,首先通过仿真实验,分析回波的三维空变特性与成像方法性能,进一步通过实测数据处理效果对比,验证了算法的有效性.

4.1 仿真实验验证

微波光子雷达照射舰船目标的几何构型如图 1 所示,舰船目标平动加速度为 0.05 m/s,转速设置为 0.025 rad/s,转加速设置为 0.001 6 rad/s,转轴在 0 时刻指向 Z 轴方向,以 0.15 rad/s 绕 RLOS 转动,合成孔径时间为 1.28 s,对距离历史按式(6)分析波数的非线性分

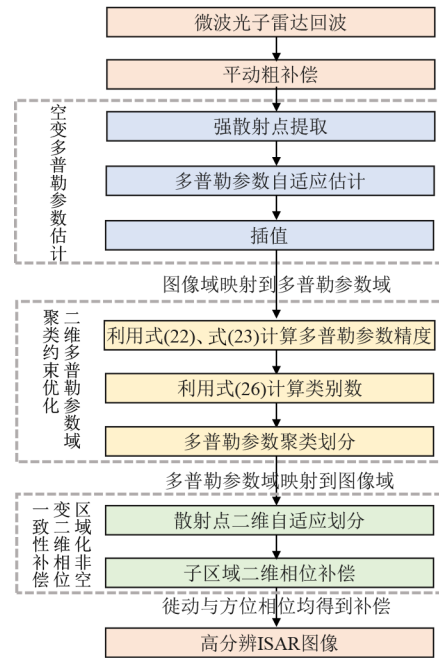


图10 算法流程图

量,得到图 11,由于转速导致距离维波数存在高阶分量,转加速导致方位维波数存在高阶分量,而时变转轴导致目标高度维波数存在高阶分量,因此在图 11 中, $k_x(\eta)$ 、 $k_y(\eta)$ 、 $k_z(\eta)$ 均随方位时间存在高阶项,造成回波存在三维空变特性.

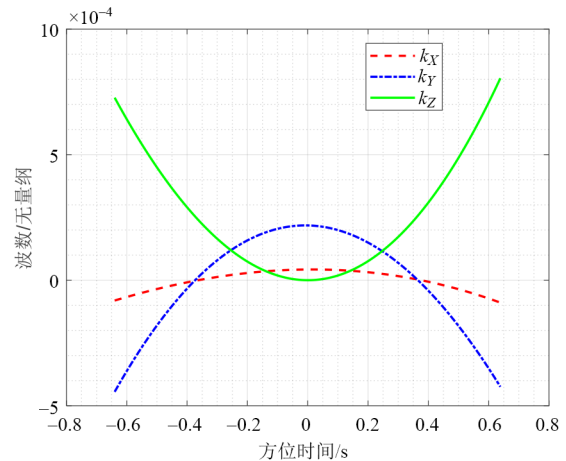


图11 三维波数时变情况图

在三维空变特性下,比较 RD 算法^[26]、相位梯度自聚焦算法(Phase Gradient Autofocus, PGA)^[27]、极坐标格式两维自聚焦算法(两维自聚焦 PFA)^[28]以及本文所提方法的聚焦表现,得到图 12. RD 图像中目标存在散焦,说明需要进一步的聚焦处理;PGA 可以补偿空不变相位,实现部分聚焦,但仍然剩余空变的徙动与相位误差;两维自聚焦 PFA 可以联合迭代补偿平动与转动,实现二维空变的徙动校正与相位误差补偿,但由于回波

中存在三维空变多普勒参数,因此该算法无法实现全局聚焦;最后是本文所提算法,借助图像熵准则与二维

区域自适应最优划分,能够联合补偿空变徙动与相位误差,实现了三维空变舰船目标的全局聚焦.

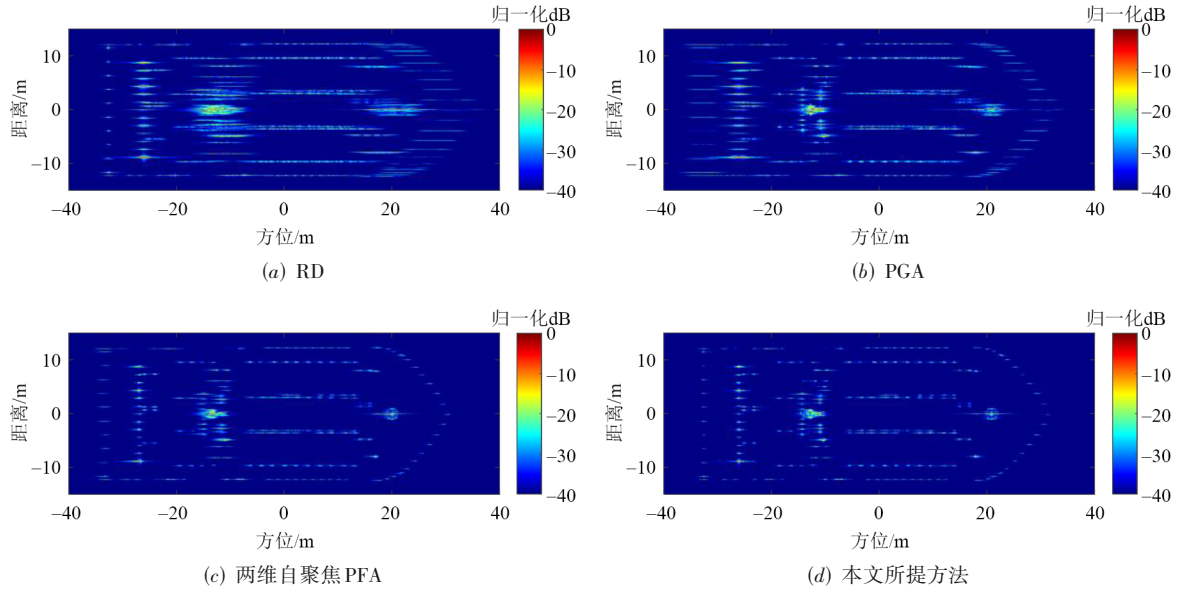


图 12 仿真实验成像结果对比

各算法的定量比较如表 1 所示,其中图像熵指标越小说明图像聚焦效果越好,而图像对比度^[29]与图像锐度越大,说明图像聚焦效果越好,根据表格可知本文所提算法在各项指标下均达到最优,这定量说明了本方法的有效性.

表 1 仿真实验各算法聚焦性能对比

算法	图像熵	图像对比度	图像锐度/ $\times 10^{-3}$
RD	7.70	26.93	1.80
PGA	7.26	36.08	3.20
二维自聚焦 PFA	6.95	48.57	5.70
本文所提算法	6.49	63.70	9.90

为了便于研究人员参考,本文给出算法效率的对比,在平动距离包络补偿后进行算法复杂度分析, RD 方法直接进行方位向 FFT,乘法运算次数约为 $O(N_{\text{fast}} N_{\text{slow}} \log N_{\text{slow}})$, PGA 需要进行方位向 FFT、加窗、计算相位、相位补偿并且进行迭代估计,主要考虑其 FFT 与 U_{iter} 次迭代的运算量,乘法运算次数约为 $O(U_{\text{iter}} \cdot N_{\text{fast}} N_{\text{slow}} \log N_{\text{slow}})$, 二维自聚焦 PFA 需要进行平动粗补偿、PFA 转动粗校正、剩余平动估计、剩余转动估计并且进行迭代估计,主要考虑其 PFA、剩余平动估计与 U_{iter} 次迭代的运算量,乘法运算次数约为

$$O \left(U_{\text{iter}} \cdot \begin{pmatrix} 2L_{\text{sinc}} N_{\text{slow}} N_{\text{fast}} \\ + U_{\text{est}} N_{\text{slow}} N_{\text{fast}} \log N_{\text{fast}} \\ + 2U_{\text{est}} N_{\text{slow}} N_{\text{fast}} \log N_{\text{slow}} \end{pmatrix} \right) \quad (35)$$

其中, U_{est} 为剩余平动估计的迭代次数. 本文所提算法需要进行强散射点回波提取、多普勒参数估计、插值、聚类、相位补偿并且需要少量的迭代估计,主要考虑多普勒参数估计、聚类与 U_{iter} 次迭代的运算量,乘法运算次数约为

$$O \left(U_{\text{iter}} \cdot \begin{pmatrix} K_{\text{pso}} N_{\text{pso}} \cdot N_{\text{fast-part}} N_{\text{slow}} \log(N_{\text{fast-part}} N_{\text{slow}}) \\ + 3U_{\text{cluster}} N_{\text{slow}} N_{\text{fast}} T_{\text{cluster}} \end{pmatrix} \right) \quad (36)$$

其中, K_{pso} 为 PSO 搜索的迭代次数; N_{pso} 为 PSO 搜索的粒子数; $N_{\text{fast-part}}$ 是强散射点距离向回波点数; U_{cluster} 为聚类别数; T_{cluster} 为聚类迭代次数; 3 是指计算聚类距离时进行了 3 次乘法运算.

仿真实验中预处理后 $N_{\text{slow}}=400, N_{\text{fast}}=1024$, RD 算法的运行时间为 0.007 s, PGA 设置迭代次数为 5, 运行时间为 0.7 s, 二维自聚焦 PFA 的迭代次数为 6 次, 运行时间为 13.4 s, 本文所提算法设置迭代次数为 1 次, 聚类数 50, 聚类迭代次数 100, 运行时间为 38.8 s, 以上表明 RD 方法与 PGA 的运算复杂度是最低的, 但是它们的结果中也存在明显散焦, 二维自聚焦 PFA 具备一定的运算量与聚焦能力, 本文所提算法的主要目的是解决微波光子雷达三维空变带来的散焦问题, 能够取得雷达图像较好的聚焦效果, 而所提算法在算法效率上没有明显的优势, 在未来我们会进一步开展算法效率提升的工作.

4.2 实测数据验证

对一艘轮渡通过 ISAR 和 Dechrip 的方式获得微波光子实测数据,其系统参数如表 2. 系统带宽为 10 GHz,使得距离分辨力可达 0.015 m,小于 0.1 m,属于超高分辨力,此时多普勒的三维空变特性会较大地影响图像聚焦质量.

在距离时域方位时域,对回波进行平动粗补偿,然后对未知空变多普勒参数进行估计,得到的二、三阶多普勒参数聚类情况如图 13,在该图中,红圈是选择的强散射点,共选择 67 个,分析可知右上角的散射点需要补偿的二、三阶多普勒参数较大,说明右上角散焦情况比较严重,同时多普勒参数随散射点位置变化,具有明显

参数	值
载波频率 f_c/GHz	35
信号带宽 B_p/GHz	10
信号时宽 $T_p/\mu\text{s}$	1 200
脉冲重复频率 PRF/Hz	6 667
采样率 f_s/MHz	500
距离分辨力 ρ_r/m	0.015

的空变性.

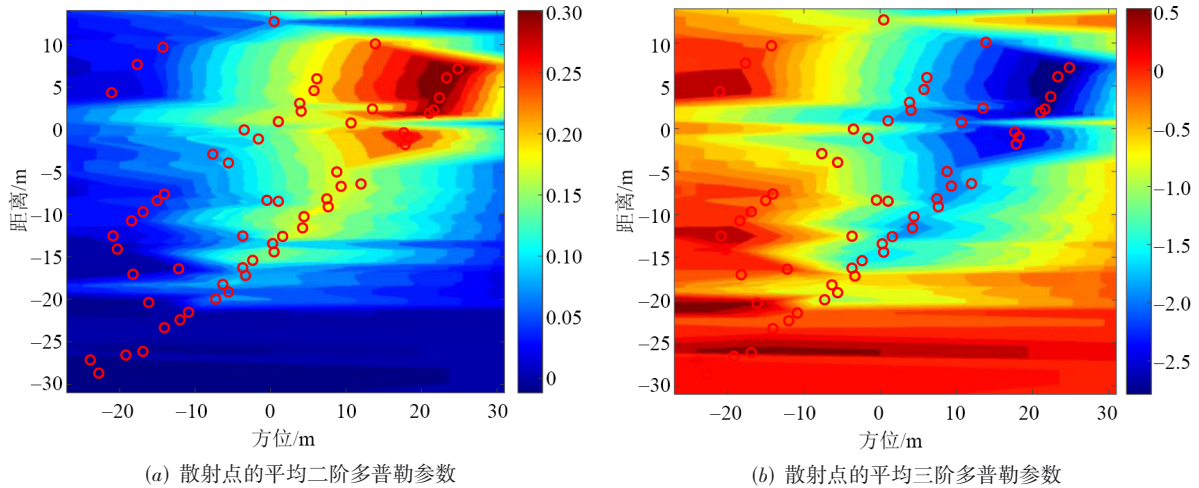


图 13 散射点的平均多普勒参数,红圈标记 3.2.2 节中选择的强散射点

图 14 对比了四种成像结果,图 14(a)是传统 RDA^[26]结果,由于该算法只适用于小转角运动情况,因此无法补偿回波中明显的散焦现象;图 14(b)是 PGA^[27]的结果,与仿真结论一致,舰船目标仍然剩余空变的徙动与相位误差;图 14(c)为两维自聚焦 PFA^[28]结果,该方法通过迭代估计残余未知平动和未知二维转动参数,完成图像聚焦,能够解决大转角运动导致的二维空变问题,然而船头仍存在散焦;图 14(d)是本文所提方法结果,船头区域能够完成聚焦,并且舰船细节信息得到保留. 为了使得对比效果更清晰,对比舰船局部结果如图 15 所示,与图 15(a)相比,图 15(b)明显更加聚焦,比较 4 种算法的图像熵、图像对比度与图像锐度指标,得到表 3,可知本文所提算法在三种指标下都存在明显优势,从数值上验证了本文所提算法的有效性.

最后给出 4 种算法的运行时间,在进行预处理后 $N_{\text{slow}}=447, N_{\text{fast}}=4413$, RD 算法的运行时间为 0.012 s,

PGA 运行时间为 3.02 s,两维自聚焦 PFA 运行时间为 36.6 s,本文所提算法运行时间为 160.9 s,虽然运算复杂度较高,但是本文所提算法的主要目的是解决微波光子雷达三维空变带来的散焦问题,我们将在未来开展算法效率提升的工作.

最后,将几何旋转后的成像结果与舰船实物图像对比,得到图 16,观察可知舰船轮廓得到恢复.

5 总结

微波光子雷达回波存在三维空变特性,必须要得到自适应区域化二维补偿,而传统方法难以实现. 针对该问题,本文创新性地提出一种基于空变多普勒参数聚类的微波光子 ISAR 高精度成像方法. 首先,建立微波光子雷达回波模型,分析回波的三维空变特性与二维区域化补偿必要性;其次,通过强散射点分离、多普勒参数自适应估计及插值等处理,建立了目标各散射点与二维多普勒参数之间的映射关系,并

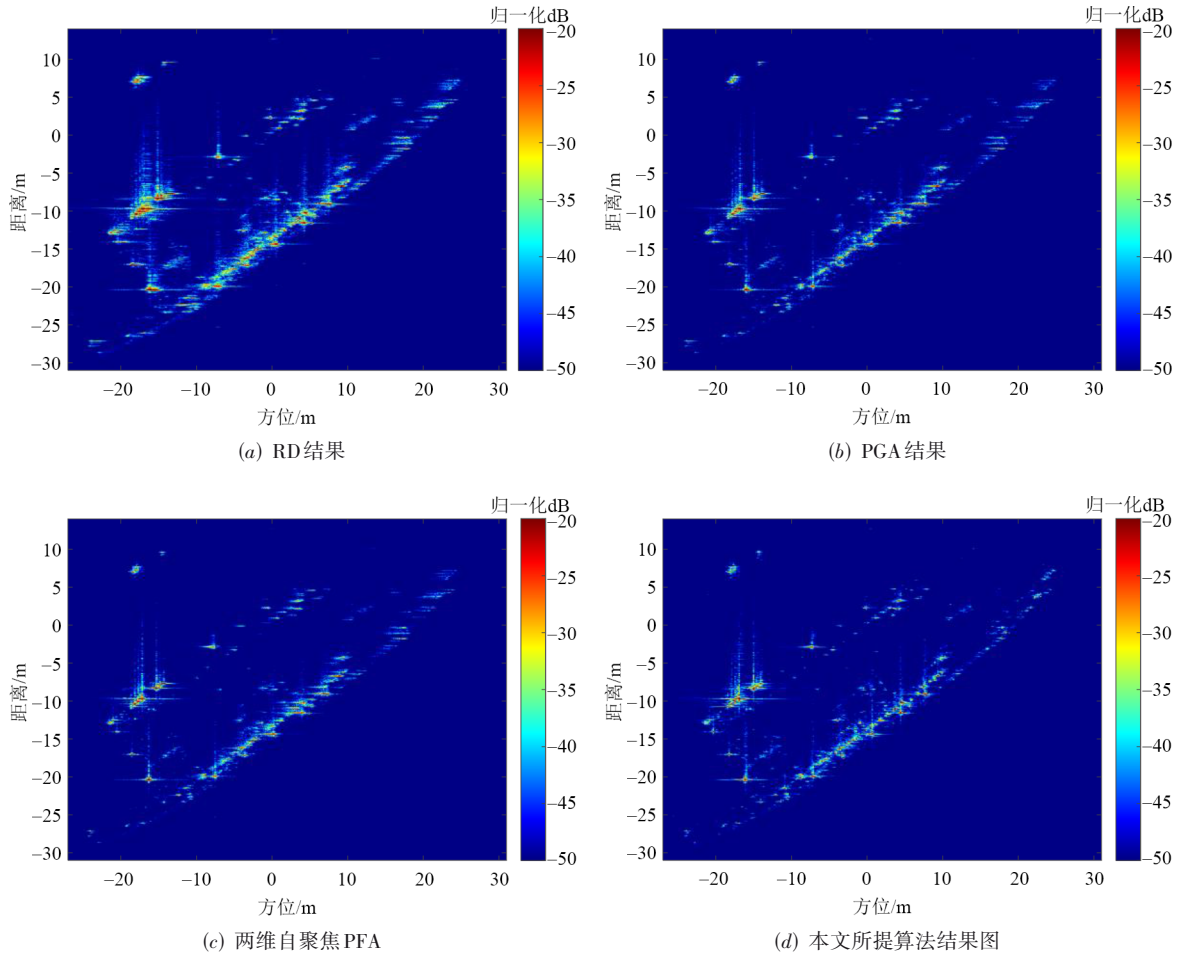


图 14 成像结果对比

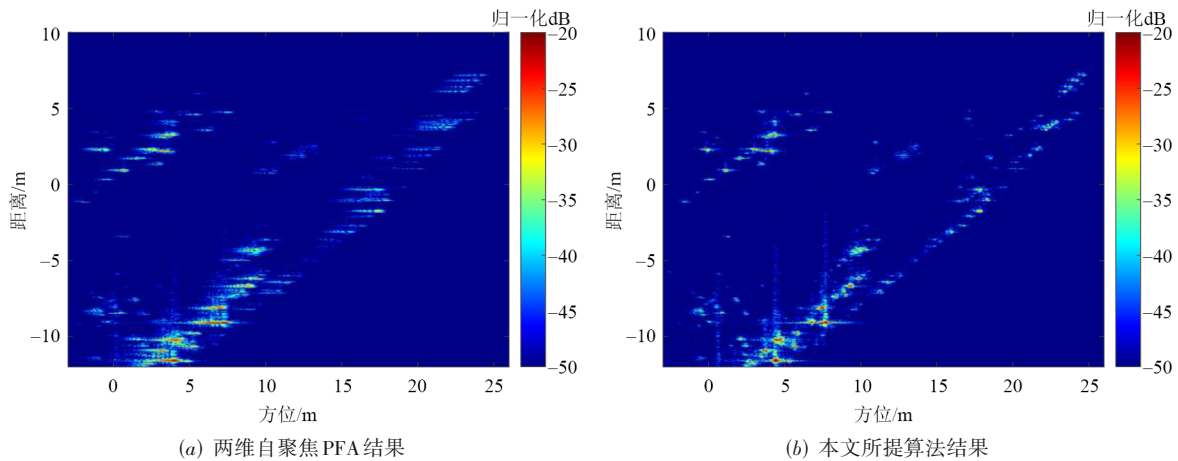


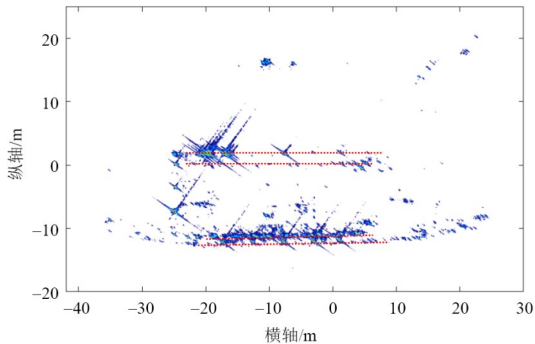
图 15 舰船局部结果对比

表 3 各算法聚焦性能对比

算法	图像熵	图像对比度	图像锐度/ $\times 10^{-3}$
RD	7.94	73.15	2.7
PGA	7.57	99.56	5.0
两维自聚焦PFA	7.51	110.58	6.2
本文所提算法	7.13	132.86	8.9



(a) 轮渡舰船的实物图像



(b) 通过几何旋转得到的舰船 ISAR 图像,红色辅助线用于描绘船舷

图 16 舰船实物图像与 ISAR 图像对比

通过二维多普勒参数域聚类,完成空变多普勒参数的自适应最优分割;最后,通过区域化非空变二维相位一致性补偿处理,实现了微波光子 ISAR 超高分辨成像,并通过仿真和实测数据处理,验证了本方法的有效性.

致谢 感谢王浩宇博士给本文提出的参考意见.

参考文献

- [1] 梁丁丁, 陈阳. 微波光子四倍频复合雷达信号生成及目标多维度探测[J]. 电子学报, 2022, 50(4): 796-803.
LIANG D, CHEN Y. Frequency-quadrupled radar composite signal generation and multi-dimensional target detection enabled by microwave photonics[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(4): 796-803. (in Chinese)
- [2] CUMMING G L, WONG H F. 合成孔径雷达成像: 算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 141-142.
CUMMING G L, WONG H F. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 141-142. (in Chinese)
- [3] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 70-82.
BAO Z, XING M D, WANG T. Radar Imaging Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 70-82. (in Chinese)
- [4] YANG Q, LI Z, LI J, et al. Bistatic SAR maritime ship target 3-d image reconstruction method without distortion in local cartesian coordinate[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1-18.
- [5] DJUROVIĆ I, SIMEUNOVIĆ M, WANG P. Cubic phase function: A simple solution to polynomial phase signal analysis[J]. Signal Processing, 2017, 135: 48-66.
- [6] LIU Z, JIANG Y, WANG Y, et al. A novel ISAR imaging and scaling approach for maneuvering targets based on high-accuracy phase parameter estimation algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-19.
- [7] LI D, GUI X, LIU H, et al. An ISAR imaging algorithm for maneuvering targets with low snr based on parameter estimation of multicomponent quadratic FM signals and nonuniform FFT[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(12): 5688-5702.
- [8] HAI Y, WANG H, WU J, et al. High-resolution imaging of maneuvering targets in microwave photonic ISAR with improved variable mode decomposition techniques[J]. IEEE Transactions on Radar Systems, 2024, 2: 535-548.
- [9] XIA X G, WANG G, CHEN V C. Quantitative SNR analysis for ISAR imaging using joint time-frequency analysis-short time Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 649-659.
- [10] BERIZZI F, MESE E D, DIANI M, et al. High-resolution ISAR imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous doppler technique: modeling and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(12): 1880-1890.
- [11] GUO J, YANG W, CHEN J, et al. Refocusing of moving ship targets in SAR images with long synthetic aperture time[C]//IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE, 2022: 2079-2082.
- [12] SOMMER A, OSTERMANN J. Backprojection subimage autofocus of moving ships for synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(11): 8383-8393.
- [13] 杨利超, 高悦欣, 邢孟道, 等. 基于广义 keystone 和频率变标的微波光子 ISAR 高分辨实时成像算法[J]. 雷达学

- 报, 2019, 8(2): 215-223.
- YANG L C, GAO Y X, XING M D, et al. High resolution microwave photonics radar real-time imaging based on generalized keystone and frequency scaling[J]. Journal of Radars, 2019, 8(2): 215-223. (in Chinese)
- [14] SHAO S, LIU H, YAN J. Integration of imaging and recognition for marine targets in fast-changing attitudes with multistation wideband radars[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(2): 1692-1710.
- [15] SHAO S, LIU H, ZHANG L, et al. Integration of super-resolution ISAR imaging and fine motion compensation for complex maneuvering ship targets under high sea state[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-20.
- [16] LIU W, SUN G C, XIA X G, et al. Focusing challenges of ships with oscillatory motions and long coherent processing interval[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(8): 6562-6572.
- [17] 刘志凌, 廖桂生, 杨志伟. 低信噪比条件下一种迭代加权拟合的 ISAR 包络对齐方法[J]. 电子学报, 2012, 40(4): 799-804.
- LIU Z L, LIAO G S, YANG Z W. A range alignment method with iterative weighted least squares fitting for ISAR under low SNR[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(4): 799-804. (in Chinese)
- [18] ZHU D, WANG L, YU Y, et al. Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 204-208.
- [19] 李东, 赵婷, 宋伟, 等. 一种低信噪比下稳健的 ISAR 平动补偿方法[J]. 电子学报, 2018, 46(9): 2049-2056.
- LI D, ZHAO T, SONG W, et al. A robust translational motion compensation method for ISAR imaging under low SNR environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(9): 2049-2056. (in Chinese)
- [20] SHAO S, ZHANG L, LIU H. High-resolution ISAR imaging and motion compensation with 2-d joint sparse reconstruction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(10): 6791-6811.
- [21] ZHANG S, LIU Y, LI X. Fast entropy minimization based autofocus technique for ISAR imaging[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(13): 3425-3434.
- [22] 胡长雨, 陈春风, 易文忆, 等. 结合最近邻图模型的稀疏 ISAR 成像方法[J]. 电子学报, 2024, 52(1): 170-180.
- HU C Y, CHEN C F, YI W Y, et al. Sparse ISAR imaging combined with nearest neighbor graph model[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(1): 170-180. (in Chinese)
- [23] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE, 2002: 1942-1948.
- [24] BANERJEE S, CHOUDHARY A, PAL S. Empirical evaluation of k-means, bisecting k-means, fuzzy c-means and genetic k-means clustering algorithms[C]//2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE). Piscataway: IEEE, 2015: 168-172.
- [25] SHI G, GAO B, ZHANG L. The optimized k-means algorithms for improving randomly-initialed midpoints[C]//Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. Piscataway: IEEE, 2013: 1212-1216.
- [26] 周万幸. ISAR 成像系统与技术发展综述[J]. 现代雷达, 2012, 34(9): 1-7.
- ZHOU W X. Development and prospect of ISAR imaging system and imaging technique[J]. Modern Radar, 2012, 34(9): 1-7. (in Chinese)
- [27] MIAO Y, WU J, YANG J. Azimuth migration-corrected phase gradient autofocus for bistatic SAR polar format imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(4): 697-701.
- [28] 符吉祥. 大转角 ISAR 运动补偿和成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [29] 邵帅. 高分辨 ISAR 成像与精细化运动补偿技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

作者简介



李俊颜 男, 2001 年出生于四川省遂宁市. 现为电子科技大学信息与通信工程学院硕士研究生. 主要研究方向为 SAR/ISAR 对舰船目标成像.

E-mail: li_junyan20242024@163.com



杨青 男. 现为电子科技大学信息与通信工程学院博士后. 主要研究方向为双基地海面动目标成像.

E-mail: yang_qing@uestc.edu.cn



李中余 男. 教授, 博士生导师. 主要研究方向为新体制雷达成像技术等. 中国电子学会会员编号: E190018239M.

E-mail: zhongyu_li@uestc.edu.cn



武俊杰 男. 教授, 博士生导师. 主要研究方向为合成孔径雷达成像、双/多基合成孔径雷达、雷达信号处理等. 中国电子学会会员编号: E190021240S.

E-mail: junjie_wu@uestc.edu.cn



王安乐 男. 副教授. 主要研究方向为微波光子雷达等. 中国电子学会会员编号: E190025037M.

E-mail: anlehit@163.com



王党卫 男. 教授. 主要研究方向为新体制雷达与信号处理等.

E-mail: wdwjane@tom.com



杨建宇 男. 教授, 博士生导师. 主要研究方向为雷达探测与成像、信号检测与估计等. 中国电子学会会员编号: E190002905F.

E-mail: jyyang@uestc.edu.cn