

# 一种雷达极化域变焦前视成像方法

刘奕彬<sup>1</sup>, 王罗胜斌<sup>1,2</sup>, 吴国庆<sup>1</sup>, 宋志勇<sup>1</sup>, 王平<sup>1\*</sup>, 李永祯<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 先进制导与控制技术国家级重点实验室, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 弹载末制导雷达在跟踪阶段利用单脉冲测角对舰船目标进行精确角跟踪。质心式角反干扰利用单脉冲测角指向回波能量质心而非目标几何中心的固有缺陷, 将高雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的角反布设于舰船同一距离分辨单元内, 诱偏跟踪点, 致使导弹脱靶。在距离-多普勒图像中, 舰船与质心式角反处于同一距离-多普勒单元, 角反的辨识与抑制极为困难, 根本原因在于二者在距离-方位参数域邻近混叠, 而雷达的极化、空域等多维特征长期被孤立处理, 联合辨识能力不足。前视成像可联合距离-方位-极化信息, 有望在图像域实现目标与干扰的辨识与定位。然而, 在前视条件下, 平台运动方向与波束指向接近一致, 目标多普勒频率变化极小, 依赖多普勒效应的合成孔径、多普勒波束锐化等高分辨方法失效; 单脉冲成像、扫描波束解卷积成像和阵列谱估计成像等方法, 在近距离末端质心式干扰场景中分别面临指示错误、扫描依赖和低信杂比等性能瓶颈。极化作为电磁波的矢量属性, 蕴含目标几何结构与散射机理的丰富信息, 舰船与角反在极化域的散射特性差异天然存在, 但极化匹配、极化滤波等经典极化处理以回波能量的增强或抑制为设计准则, 未能充分挖掘极化域中目标间信号成分的可分性差异。本文立足极化域变焦超分辨理论, 推导了极化阵列回波模型, 建立了自适应变焦准则, 提出了基于极化态筛选的并行迭代优化方法; 在此基础上, 结合舰船与角反的极化散射特性差异, 提出了基于极化主成分的角反抑制方法, 形成了抗质心式角反干扰的前视成像方法。仿真结果表明, 在 10 dB 信杂比下, 对于间隔 0.2 倍波束宽度的三面角与二面角组合目标, 本文方法测角精度达到 0.05 倍波束宽度; 在 8 km 弹目距和 20 dB 信杂比条件下, 所提前视成像方法相比单极化方法和极化-空域联合方法, 舰船-角反信干比在舰船机动前分别提升 23.3 dB 和 11.4 dB, 在舰船机动后分别提升 14 dB 和 2.4 dB。

**关键词:** 极化域变焦; 前视成像; 超分辨; 质心式干扰; 角反抑制

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.62171447, No.62301571)

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(XXXX)XX-0001-14

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

**DOI:** 10.12263/DZXB.20260375

## Radar Polarization Modulation for Forward-Looking Imaging

LIU Yibin<sup>1</sup>, WANG Luoshengbin<sup>1,2</sup>, WU Guoqing<sup>1</sup>, SONG Zhiyong<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1\*</sup>, LI Yongzhen<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. National Key Laboratory of Advanced Guidance and Control Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The missile-borne terminal guidance radar employs monopulse angle measurement to achieve precise angle tracking of a ship target during the tracking phase. Centroid corner reflector jamming exploits the inherent limitation of monopulse angle measurement — that it points to the energy centroid of the echo rather than the geometric center of the target — by deploying corner reflectors with high radar cross section (RCS) in the same range resolution cell as the ship, thereby decoying the tracking point and causing the missile to miss. In the range-Doppler image, the ship and the centroid corner reflector occupy the same range-Doppler cell, making identification and suppression of the corner reflector extremely difficult. The fundamental reason is that the two are closely spaced and aliased in the range-azimuth parameter domain, while polarization, spatial, and other multi-dimensional radar features have long been processed in isolation, leading to insufficient joint identification capability. Forward-looking imaging can integrate range-azimuth-polarization information and offers the potential to identify and localize the target and the jammer in the image domain. However, under forward-looking conditions, the platform motion direction is nearly aligned with the beam pointing direction, so the target Doppler frequency variation is minimal, rendering high-resolution methods that rely on the Doppler effect, such as synthetic aperture and Doppler beam sharpening, ineffective. Methods such as monopulse imaging, scanned beam deconvolution imaging, and array spectral estimation imaging face performance bottlenecks in close-range terminal centroid jamming scenarios, including pointing errors, scan dependence, and low signal-to-clutter ratio, respectively. Polarization, as a vector property of electromagnetic waves, contains rich information about the target's geometric structure and scattering mechanisms. The polariza-

tion scattering characteristics of a ship and a corner reflector are inherently different. However, classical polarization processing methods such as polarization matching and polarization filtering are designed based on the enhancement or suppression of echo energy and fail to fully exploit the separability differences of signal components between targets in the polarization domain. This paper, grounded in the polarization modulation super-resolution theory, derives a polarization array echo model, establishes an adaptive modulation criterion, and proposes a parallel iterative optimization method based on polarization state screening. On this basis, by exploiting the differences in polarization scattering characteristics between the ship and the corner reflector, a corner reflector suppression method based on polarization principal components is proposed, thus forming a forward-looking imaging method against centroid corner reflector jamming. Simulation results show that at a signal-to-clutter ratio of 10 dB, for a combined target consisting of a trihedral and a dihedral corner reflector separated by 0.2 times the beamwidth, the proposed method achieves an angle measurement accuracy of 0.05 times the beamwidth. Under conditions of an 8 km missile-to-target range and a 20 dB signal-to-clutter ratio, the proposed forward-looking imaging method improves the ship-to-corner-reflector signal-to-interference ratio by 23.3 dB and 11.4 dB compared with the single-polarization method and the polarization-spatial joint method, respectively, before ship maneuvering, and by 14 dB and 2.4 dB, respectively, after ship maneuvering.

**Keywords:** polarization modulation; forward-looking; super-resolution; centroid-based jamming; corner reflectors suppression

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62171447, No.62301571)

## 0 引言

在现代对海作战中,反舰导弹作为精确打击的核心力量,其末制导雷达系统的性能直接影响武器系统的突防概率与打击精度。随着舰载电子对抗技术的快速发展,质心式角反干扰已成为反舰导弹导引头面临的最严峻挑战之一。该干扰方式通过将结构简单、成本低廉但雷达散射截面极高的角反射器与舰船目标布设在同一距离分辨单元内,利用单脉冲测角原理的缺陷,诱导雷达跟踪点偏离舰船目标,导致导弹脱靶。角反射器的全向、宽频段、高 RCS 等特性使其干扰效果显著,已成为现代舰艇对抗反舰导弹的核心手段之一<sup>[1]</sup>。

在经典的雷达信号处理产物——距离-多普勒图像中,舰船与质心式角反处于同一距离-多普勒单元,角反的辨识与抑制难以实现。因此,研究人员将思路转向雷达前视探测,通过舰船与角反在方位维的差异实现目标的辨识与定位。尽管已有研究尝试采用回波特征<sup>[2-3]</sup>、统计建模<sup>[4]</sup>、极化滤波<sup>[5]</sup>等思路对抗质心式干扰,但这些方法普遍面临鲁棒性不强、模型复杂、先验信息强依赖等问题,难以在复杂战场环境中实现高可靠、实时的干扰抑制。前视成像是前视探测中的典型处理之一,然而,在雷达前视工作状态下,平台运动方向与波束指向接近一致,目标多普勒频率变化极小,传统依赖多普勒效应的合成孔径、多普勒波束锐化等高分辨成像方法失效。此时,雷达方位分辨率主要由物理孔径决定,而弹载平台受限于尺寸,天线孔径较小,前视成像分辨率天然受限<sup>[6-7]</sup>。在此条件下,质心式干扰利用雷达分辨能力的不足,使得目标与干扰在同一波束宽度之内混叠,成像结果的峰

值仍不指向任一真实目标,难以支撑识别与定位任务。现有的前视成像技术,如单脉冲成像<sup>[8-9]</sup>、扫描波束解卷积成像<sup>[10-11]</sup>与阵列谱估计成像<sup>[12-13]</sup>等,虽相较实孔径成像具备成像质量优势,但面对近距离末端制导的质心式干扰场景,分别存在指示错误、扫描依赖与低信杂比等导致的分辨性能瓶颈。因此,如何在条件前视条件下实现高分辨成像与角反干扰对抗,已成为雷达末制导领域亟待突破的关键技术瓶颈<sup>[14]</sup>。

极化是电磁波除幅度、相位、频率之外的又一重要信息维度,随着极化能力在装备上的普及,一个尚未被充分回答的科学问题在上述制导困境中浮现:雷达极化信息能否为突破前视成像性能瓶颈、对抗质心式角反干扰提供增益?传统雷达前视成像方法重点关注目标的幅度与相位,而极化信息作为电磁波的矢量属性,蕴含了目标丰富的几何结构与散射机理信息。近期,笔者团队创新地提出“极化域变焦”理论<sup>[15-16]</sup>,从雷达分辨基础理论出发,发现调控极化可改变雷达匹配滤波输出的峰值位置,即“聚焦点”,如图1所示,在特定收发极化组合下,可改善分辨效果。物理含义上,极化域变焦的实现途径是极化滤波器组构造,这一点与“极化匹配”“极化滤波”等经典极化信号处理思想一致。不同之处在于,经典极化信号处理思路通常面向回波能量的增强与抑制设计滤波器构造准则,极化域变焦处理则围绕信号成分间差异的放大开展滤波器设计,旨在改善目标辨识、目标分辨性能。基于该思想,团队通过调控雷达的收发极化状态,利用了舰船与角反在极化散射特性上的本质差异,主动“放大”目标与干扰的可分性,进而改善了成像分辨与角反对抗的效果<sup>[17-18]</sup>。然而,伴随着多种极

态的引入,处理效率常成为此类方法走向实际应用的瓶颈。

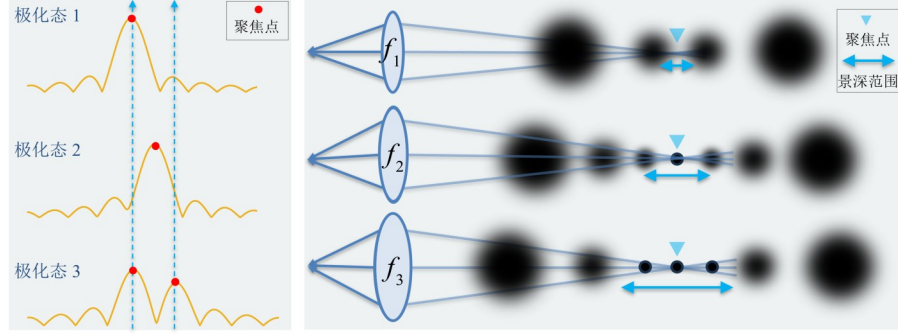


图1 极化域变焦与光学变焦

Figure 1 Polarization modulation and optical zoom

为此,本文提出一种基于极化域变焦思想的高效前视成像新方法,旨在利用目标与干扰在极化散射特性上的差异,通过极化雷达的后端信号处理改善前视条件下的成像性能,获取质心式角反干扰抑制能力。所提方法将极化从传统的辅助鉴别维度提升为主动优化的重要信息维度,改善了现有方法的成像分辨率,拓展了雷达抗干扰的技术途径。

本文首先建立了极化阵列雷达回波模型,然后分析了单极化与极化-空域联合成像方法存在的问题,进而基于极化域变焦处理的思想,提出了极化自适应变焦准则与极化态筛选的并行优化迭代优化方法,最后总结形成了具备质心式角反抑制能力的极化域变焦前视成像方法。仿真实验表明,本文提出的极化域变焦方法在改善分辨率的同时,能够抑制质心式角反干扰能量,为末制导角反质心式干扰对抗提供了有益参考。

## 1 极化阵列回波模型

考虑一个极化雷达系统,如图2所示,采用一维均匀线阵进行信号收发,各阵元由H/V正交天线构成,阵元数为 $N$ ,阵元间距为 $d$ ,假设远场有个点目标,相对于阵列法线的方位角分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K$ 。第 $n$ 个阵元发射的信号在基带表示为 $s_n(t)$ ,信号发出后将引入空间相位差,对于 $\theta_k$ 方向的目标,第 $n$ 个阵元相对于参考阵元的相位差为

$$\varphi_{r,n}(\theta_k) = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)d \sin \theta_k \quad (1)$$

目标将入射信号反射回雷达。假设第 $k$ 个目标的极化散射矩阵为 $\mathbf{S}_k$ ,第 $n$ 个阵元发射信号的极化状态为 $\mathbf{h}_{T,n}$ ,则对于具体的距离-多普勒单元,第 $k$ 个目标的反射回波为

$$s(t) = \sum_{n=1}^N e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(n-1)d \sin \theta_k} \cdot \mathbf{S}_k \mathbf{h}_{T,n} s_n(t) \quad (2)$$

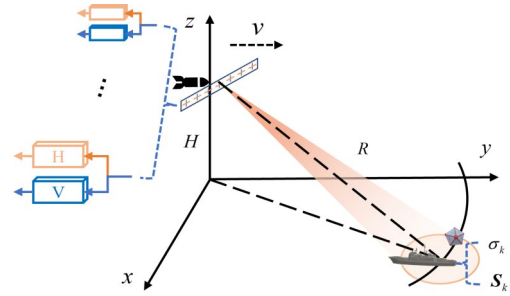


图2 前视探测示意图

Figure 2 Forward-looking detection schematic diagram

其中,

$$\mathbf{S}_k = \begin{bmatrix} S_k^{(11)} & S_k^{(12)} \\ S_k^{(21)} & S_k^{(22)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

在单站观测条件下满足互易性 $S_k^{(12)} = S_k^{(21)}$ ,极化状态可采用Jones矢量表征为

$$\mathbf{h}(\gamma, \phi) = [\cos \gamma \quad \sin \gamma e^{j\phi}]^T \quad (4)$$

其中, $(\gamma, \phi)$ 为极化相位描述子, $\gamma \in (0, \pi]$ , $\phi \in (0, \pi]$ 。发射信号被 $N$ 个阵元捕获,对于 $\theta_k$ 方向的来波,第 $m$ 个阵元相对于参考阵元的相位差为

$$\varphi_{r,n}(\theta_k) = \frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \sin \theta_k, m=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

因此,在第 $m$ 个阵元上,考虑单个极化天线的接收极化状态为 $\mathbf{h}_R$ ,接收到来自目标反射的回波信号 $x_m(t)$ 为

$$x_m(t) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \sin \theta_k} \cdot \sum_{n=1}^N e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(n-1)d \sin \theta_k} \cdot \mathbf{h}_R^T \mathbf{S}_k \mathbf{h}_{T,n} s_n(t-\tau) + w_m(t) \quad (6)$$

其中, $\tau$ 是信号往返时延; $w_m(t)$ 是第 $m$ 个阵元的加性噪声。将所有 $N$ 个阵元的信号堆叠成向量 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ ,可得接收信号模型:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(\theta_k) \cdot \sigma_k \cdot \mathbf{s}(t-\tau) + \mathbf{w}(t) \quad (7)$$

其中,

$$\mathbf{a}(\theta_k) = \left[ 1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta_k}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(N-1)d\sin\theta_k} \right]^T \quad (8)$$

$$\sigma_k = \mathbf{h}_R^T \mathbf{S}_k \sum_{n=1}^N e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(n-1)d\sin\theta_k} \mathbf{h}_{T,n} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{s}(t)$  为信号矢量;  $\mathbf{w}(t)$  为噪声矢量。考虑雷达采用  $45^\circ$  线极化发射, H/V 双天线接收的模式, 目标复系数  $\sigma_k$  可简化为

$$\sigma_k = G_k \cdot B(\theta_k) \quad (10)$$

其中,  $G_k = (\mathbf{h}_T^T \otimes \mathbf{h}_R^T) \vec{\mathbf{S}}_k$  为极化复系数;  $\vec{\mathbf{S}}_k$  为极化散射矩阵矢量化的结果;  $B(\theta_k) = \sum_{n=1}^N e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(n-1)d\sin\theta_k}$  为发射增益系数。因此, 极化阵列回波信号可由矩阵形式表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [\mathbf{x}_H \quad \mathbf{x}_V] \\ &= [\mathbf{A}\sigma_H + \mathbf{n}_H \quad \mathbf{A}\sigma_V + \mathbf{n}_V] \\ &= [\mathbf{A}_s\sigma_{s,H} + \mathbf{A}_c\sigma_{c,H} + \mathbf{n}_H \quad \mathbf{A}_s\sigma_{s,V} + \mathbf{A}_c\sigma_{c,V} + \mathbf{n}_V] \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 下标  $s$  与  $c$  分别代表目标与杂波。需要指出的是, 在近距离末端探测时, 目标信噪比极大提升, 已不再是制约成像性能的瓶颈。相较之下, 由海浪复杂结构形成的海杂波, 在场景矢量  $\sigma$  中体现为若干幅相随机的散射点, 将对关键目标的成像质量造成影响。需要指出的是, 雷达的角分辨率由孔径决定, 对于主瓣内处在同一距离分辨单元的角反质心式干扰场景, 基于傅里叶变换的方位向匹配滤波难以分辨舰船与角反, 需要对回波数据进行超分辨处理。而在前视成像领域, 突破瑞利限的目标复系数反演是一个病态逆问题, 需要设计相应成像算法进行求解。

## 2 问题提出

### 2.1 迭代自适应方法

雷达回波数据构成“快时间-慢时间-通道”三维信号, 经快时间维脉冲压缩与慢时间维相参积累后, 对目标距离-多普勒单元进行检测, 过检单元中, 多通道信号的信噪比显著改善, 可用于方位维成像。考虑 H 极化接收的阵列信号, 采用基于加权最小二乘准则的迭代自适应方法进行成像反演<sup>[19]</sup>, 目标函数可表示为

$$\min_{\sigma_H} (\mathbf{x}_H - \mathbf{A}\sigma_H)^H \mathbf{W} (\mathbf{x}_H - \mathbf{A}\sigma_H) \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{W}$  为加权矩阵。复系数可求解为

$$\hat{\sigma}_k = \frac{\mathbf{a}_k^H \mathbf{W} \mathbf{x}}{\mathbf{a}_k^H \mathbf{W} \mathbf{a}_k} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{a}_k$  为各方位单元对应的导向矢量。在信号均方

误差最小的约束下, 加权矩阵  $\mathbf{W}$  可设置为

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= (\mathbf{R} - p\mathbf{A}\mathbf{A}^H)^{-1} \\ &= \mathbf{R}^{-1} + \frac{p\mathbf{R}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{A}^H\mathbf{R}^{-1}}{1 - p\mathbf{A}^H\mathbf{R}^{-1}\mathbf{A}} \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $p$  为各方位单元对应的功率。回波的自相关矩阵为

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^H \quad (15)$$

其中, 由散射点功率构成的对角矩阵  $\mathbf{P}$  为

$$\mathbf{P} = \text{diag} \left\{ |\sigma_1|^2, |\sigma_2|^2, \dots, |\sigma_K|^2 \right\} \quad (16)$$

复系数的更新公式可改写为

$$\hat{\sigma}_k = \frac{\mathbf{a}_k^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x}}{\mathbf{a}_k^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_k} \quad (17)$$

回波的自相关矩阵随复系数一同更新。令  $i$  表示迭代序数, 迭代过程可表示为

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_{i,k} = \frac{\mathbf{a}_k^H \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{x}}{\mathbf{a}_k^H \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{a}_k} \\ \mathbf{R}_{i+1} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{P}}_i\mathbf{A}^H \end{cases} \quad (18)$$

其中, 回波的自相关矩阵的初始值  $R_0$  可由延迟求和波束形成器提供, 迭代过程在收敛后, 输出方位维的谱估计结果  $\hat{\sigma}(\theta_k)$ 。输出的散射点方位角位于估计结果的局部最大值:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta_{k,loc}} |\hat{\sigma}(\theta_k)| \quad (19)$$

通过上述过程可实现对同一分辨单元内目标的角度估计。然而专著[20]指出, 第二个目标的相对相位/幅度会影响目标的分辨过程。一方面, 迭代自适应方法的初始值由波束形成器提供, 且具备局部收敛性, 而波束形成结果受目标幅相关系影响显著<sup>[21]</sup>, 因此方法的输出同样受目标幅相关系影响, 存在稳健性问题, 如图3所示为等幅目标在不同相位关系下的分辨效果, 可以看出, 目标的相位关系对目标分辨效果影响显著; 另一方面, 受杂波影响, 迭代自适应的成像效果受到制约。极化雷达具备获取电磁波矢量信息的能力, 因此, 对于回波极化状态存在差异的目标, 双极化接收的后端信号处理可达到改变目标幅相关系、抑制杂波的效果, 为改善成像质量提供了潜力。

### 2.2 极化-空域联合迭代方法

极化阵列回波信号可改写为

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{A}[\sigma_H \quad \sigma_V] \\ &= \mathbf{A}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{H} \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 2}$  由各散射点回波的归一化 Jones 矢量构成,  $\boldsymbol{\Sigma} = \text{diag} \{s\}$  为归一化系数构成的对角矩阵, 回波信号矩阵经矢量化后可表示为

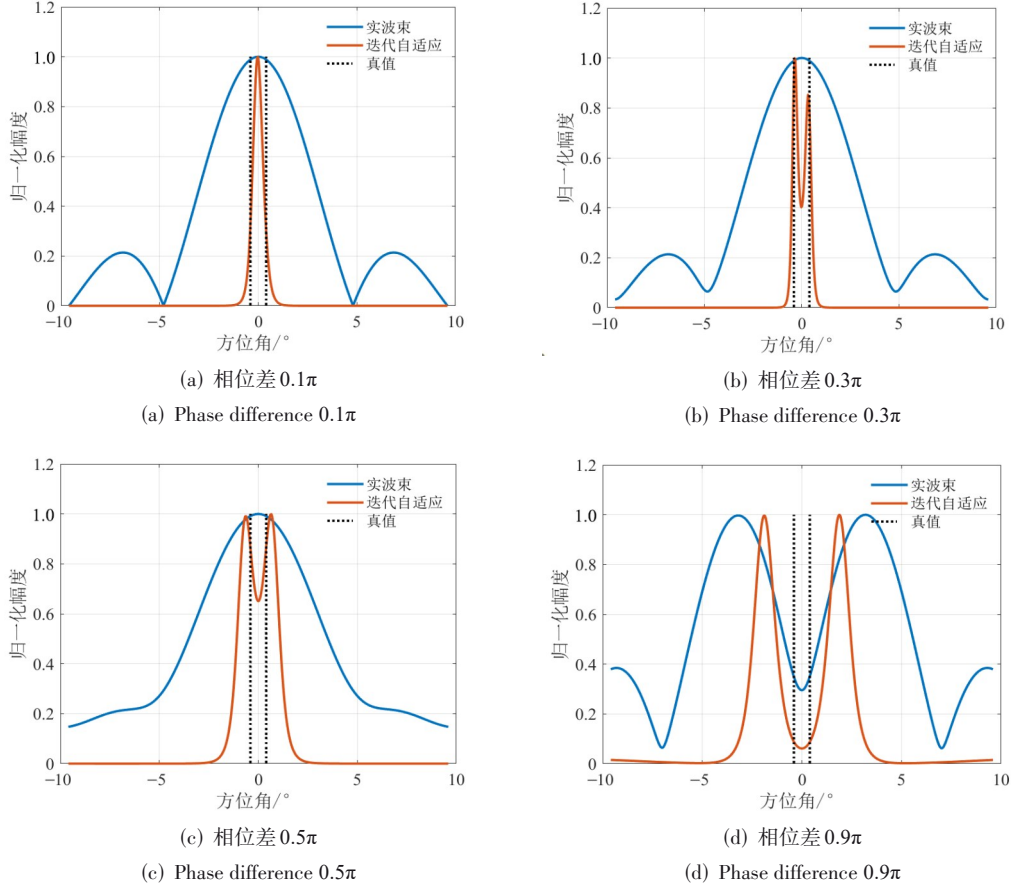


图3 分辨效果受目标相位关系的影响

Figure 3 The effect of the phase relationship of the target on the resolution

$$\begin{aligned}\vec{X} &= \text{vec}(\mathbf{X}) \\ &= (\mathbf{H}^T \odot \mathbf{A})\mathbf{s}\end{aligned}\quad (21)$$

其中,  $\text{vec}(\cdot)$  为矢量化算子;  $\odot$  表示 Khatri-Rao 积。为控制求解维度, 通常将信号模型限制在 Poincare 球面同一大圆轨道上<sup>[22]</sup>, 此时反演问题扩展至极化域-空域二维:

$$\vec{X} = (\mathbf{E}^T \otimes \mathbf{A})\mathbf{v}\quad (22)$$

其中,  $\otimes$  表示 Kronecker 积。

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\pi/Q) & \cdots & \cos[2(Q-1)\pi/Q] \\ 0 & \sin(2\pi/Q) & \cdots & \sin[2(Q-1)\pi/Q] \end{bmatrix}^T \in \mathbb{C}^{Q \times 2}\quad (23)$$

为完备的极化角字典矩阵,  $\mathbf{v}$  为联合域的待估计结果。于是, 极化阵列回波的迭代过程可改写为

$$\begin{cases} \hat{v}_{i,k,q} = \frac{(\mathbf{e}_q^T \otimes \mathbf{a}_k)^H \mathbf{R}_i^{-1} \vec{X}}{(\mathbf{e}_q^T \otimes \mathbf{a}_k)^H \mathbf{R}_i^{-1} (\mathbf{e}_q^T \otimes \mathbf{a}_k)} \\ \mathbf{R}_{i+1} = (\mathbf{E}^T \otimes \mathbf{A}) \text{diag}\{\hat{v}_i\} (\mathbf{E}^T \otimes \mathbf{A})^H \end{cases}\quad (24)$$

结合联合域谱估计峰值与双极化回波信号, 利用最小二乘估计可获取关键散射点的极化信息, 为前视成像下的目标识别提供了信息增量。复系数估计过程可表示为

$$\begin{aligned}[\hat{s}_H \ \hat{s}_V] &= \arg \min_{s_H, s_V} \left\| [\mathbf{x}_H \ \mathbf{x}_V] - \mathbf{A}(\hat{\theta}) [\hat{s}_H \ \hat{s}_V] \right\|^2 \\ &= [\mathbf{A}^H(\hat{\theta}) \mathbf{A}(\hat{\theta})]^{-1} \mathbf{A}^H(\hat{\theta}) [\mathbf{x}_H \ \mathbf{x}_V]\end{aligned}\quad (25)$$

然而, 联合域处理将导致复杂度极大提升, 主要体现在自相关矩阵求逆: 在单次迭代中, 单极化阵列自相关矩阵构造的复杂度为  $O(N^3)$ , 双极化阵列联合处理时, 自相关矩阵构造的复杂度为  $O(8N^3)$ 。

### 3 提出方法

#### 3.1 极化域变焦处理

“极化域变焦”一词源于光学变焦的概念, 在光学成像中, 有限的景深范围限制了成像清晰的区间, 因而可通过调整焦距改善目标的成像效果。极化域变焦则是对调控雷达收发极化状态, 改善雷达成像效果的形象描述。前文的极化阵列雷达可通过信号处理

的方式等效改变雷达接收极化状态,达到调节目标回波的幅相关系、改善成像质量的效果。

### 3.2 自适应变焦准则

极化域变焦处理的核心思想在于以接收端信号处理的方式等效调控雷达的接收极化状态,达到改善成像质量的效果。处理的本质在于构造极化滤波器组,滤波器输出的信号可用数学语言表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{w} \quad (26)$$

其中,  $\mathbf{w}$  为双极化通道的权矢量,同样可用 Jones 矢量表征,将信号  $\mathbf{y}$  代入迭代自适应方法可获取当前极化状态下的估计结果。在标准的极化域变焦处理中,权矢量  $\mathbf{w}$  在整个 Poincare 球上离散选取,这将导致调控效果与处理复杂度之间的矛盾。具体而言,为保证选取到有利于成像的极化状态,权矢量需要在 Poincare 球上致密采样,大量极化状态下的成像处理将导致方法的复杂度显著提升,同时存在冗余的极化状态,反之,有效的极化状态则难以被准确调控。为解决这一问题,提出基于最小二乘的自适应极化域变焦准则如下,权矢量可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(\theta) &= \arg \min_{\mathbf{w}} \|\mathbf{X}\mathbf{w} - \mathbf{a}(\theta)\|^2 \\ &= (\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H \mathbf{a}(\theta) \end{aligned} \quad (27)$$

其中,  $\theta$  可依据观测范围进行设置,可将调控极化态的数量控制在有限范围,如图 4 所示。一般地,将  $\theta$  设置为 3 dB 主瓣范围。该准则的优势在于,极化滤波器会最大程度抑制方位角在  $\theta$  以外的回波功率,对于邻近目标场景而言,回波的混叠程度降低,可改善迭代自适应方法的收敛速度与锐化效果。由于当前体制为双极化阵列,构造的极化滤波器仅能滤除 1 个目标,因此,当前思路仅能为同一距离单元内目标数  $\leq 2$  的场景提供分辨性能增益,若需适用于更多目标的场景,则需采用全极化、多极化等极化分集体制。对于该准则下  $Q$  种极化态信号,处理复杂度将是单极化阵列的  $Q$  倍,为满足平台的实时处理需求,需结合工作模式与信号模型,为极化域变焦前视成像方法设计加速策略。

### 3.3 基于极化态筛选的并行迭代优化方法

由上述分析可知,方法的复杂度主要来源于  $Q$  个

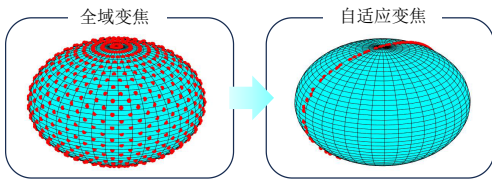


图 4 自适应变焦示意图

Figure 4 Adaptive modulation schematic

极化态的重复处理与迭代过程中的矩阵求逆,因此考虑对这两方面进行优化。

对于双极化阵列,  $Q$  个极化态中真正能滤除目标的极化态仅有 2 个,因此考虑通过筛选的方式滤除冗余极化态,筛选的准则具体如下:在滤除目标的极化态下,迭代自适应方法具有更佳的收敛速度与锐化效果,因此,采用式(17)对  $Q$  个极化态下的信号进行一步并行的更新,得到  $Q$  个功率谱并计算 1 范数,将 1 范数值按由小至大排列,保留排名靠前  $p^{(i)}$  个极化态信号,进入下一轮迭代,直至算法收敛,此时收敛准则改为  $Q$  个极化态中的最小值小于收敛门限。具体而言,设第  $i$  次迭代后极化态集合为  $Q^{(i)}$ ,对其中任一极化态的信号  $\mathbf{y}$ ,以其功率谱的 1 范数度量稀疏度:

$$\eta_y^{(i)} = \sum_{k=1}^K \frac{\sigma_{y,k}^{(i)}}{\max \sigma_{y,k}^{(i)}} \quad (28)$$

其中,  $\eta_y^{(i)}$  越小表示谱越稀疏、收敛越充分。极化态保留比例采用单调递增的启发式调度策略:

$$\psi^{(i)} = \psi_0 + (1 - \psi_0) \tanh[\alpha(i - 1)] \quad (29)$$

设置调度参数为  $\psi_0 = 0.1$ ,  $\alpha = 0.5$ ,每次迭代的  $p_i$  值可表示为  $p^{(i)} = \lceil p^{(i-1)} \cdot \psi^{(i)} \rceil$ 。这一极化态筛选的并行迭代优化方法可极大降低待处理的极化态数量,提升方法处理效率。需要承认的是,基于稀疏度的筛选方式仅在目标稀疏的对海场景下效果显著,面向要素更为复杂的对陆场景,筛选策略设计值得进一步探索。

在近距离末端探测时,雷达波束处于跟踪状态,雷达主要获取来自主瓣波束内的散射点回波,因此,成像的方位不混叠范围仅需覆盖主瓣区域即可,因此,可采取回波信号子阵级处理的形式降低复杂度<sup>[23]</sup>,考虑将阵列均匀划分为  $N_p$  个子阵,仅需满足约束条件:

$$\frac{N_p}{N} > \sin\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right) \quad (30)$$

为便于峰值提取,将输出结果一范数的倒数作为权值,凸显有利于分辨的极化态,得到新的二维输出:

$$\mathbf{G} = \left[ \frac{\hat{\sigma}_1}{\|\hat{\sigma}_1\|_1}, \frac{\hat{\sigma}_2}{\|\hat{\sigma}_2\|_1}, \dots, \frac{\hat{\sigma}_Q}{\|\hat{\sigma}_Q\|_1} \right] \quad (31)$$

### 3.4 基于极化主成分的角反抑制方法

迭代自适应方法主要获取目标的方位信息,利用最小二乘估计可恢复目标回波的极化状态,角反结构简单,散射机理接近三面角;舰船结构复杂,散射成分多样<sup>[17]</sup>。因此,可基于上述差异对角反能量进行抑制,改善舰船的成像效果。

在各过检的距离-多普勒单元下,由阵列信号处

理得到的目标方位可构成一个集合:

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M\} \quad (32)$$

其中,  $M$  表示获取方位角的总数。通过聚类分析, 可将目标方位分为若干个类别:

$$[\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_L] = C(\Theta) \quad (33)$$

其中,  $L$  为聚类得到的类别数, 与使用的聚类方法  $C(\cdot)$  有关。对于任一类别中的方位角, 均可通过最小二乘估计获取对应的极化状态矢量, 可构成矩阵:

$$\mathbf{B}_l = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_{M_l}]^T \in \mathbb{C}^{M_l \times 2} \quad (34)$$

其中,  $\sum_{l=1}^L M_l = M$ 。由主成分分析原理可得, 极化自相关矩阵可由特征值分解展开为

$$\mathbf{B}_l^H \mathbf{B}_l = \beta_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^H + \beta_2 \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^H \quad (35)$$

其中, 下标 1 与 2 分别表示极化的主分量与次分量。对于舰船, 由于结构复杂, 次分量仍保留了舰船较多能量; 而角反结构单一, 能量主要集中于主分量。因此, 依据主成分分析原理, 可通过特征向量  $\mathbf{u}_2$  获取分

量抑制后的复系数  $\mathbf{B}_l \mathbf{u}_2$ , 达到角反抑制的效果。

综上, 提出极化域变焦前视成像方法, 算法流程如图 5 所示, 主要分为以下步骤。

步骤 1: 获取双极化阵列雷达回波数据, 进行下变频、脉冲压缩、相参积累、R-D 图像检测等预处理;

步骤 2: 对过检分辨单元的多通道信号进行子阵合成, 依据成像的方位区间获取  $Q$  个极化调控的权矢量;

步骤 3: 对各极化态下的信号进行一次迭代处理, 形成多极化态下的迭代结果;

步骤 4: 根据迭代结果的 1 范数进行极化态筛选, 将筛选出的信号返回步骤 3 进行下一轮迭代, 重复步骤 3 与步骤 4 直至收敛;

步骤 5: 对估计结果进行峰值提取, 通过最小二乘估计获取双极化通道下的复系数, 直至对所有过检单元完成处理;

步骤 6: 对所有散射点的方位信息进行聚类分析, 对不同类的散射点进行极化分量抑制, 抑制后的复系数投影至对应距离-方位单元, 得到前视图像。

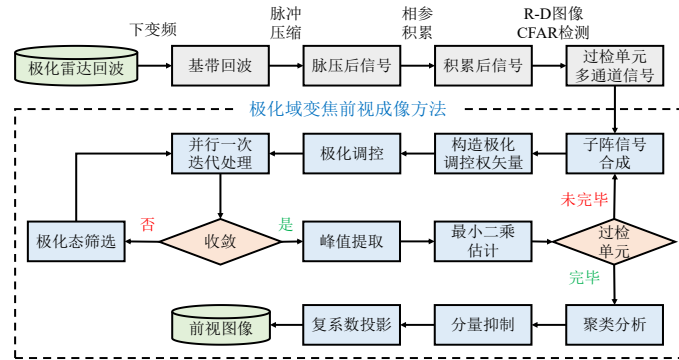


图5 极化域变焦前视成像算法流程

Figure 5 Algorithm flow of polarization modulation forward-looking imaging

从不同约束维度审视, 所提方法存在以下适用性边界与实现考量。

信号层面, 方法要求各极化通道与空域通道信号严格对齐, 通道间的幅相误差及极化隔离度应满足基本工程阈值。目标层面, 方法基于单发双收极化阵列雷达提出, 主要针对同一距离单元内存在两类目标的场景, 例如无源角反质心式干扰; 当面临更为复杂的多源情形时, 性能将出现恶化, 但可通过引入更多处理自由度加以改善。杂波环境层面, 在低掠射角海杂波背景下, 杂波的非高斯尖峰特性易导致成像结果出现虚警。系统约束层面, 方法借助极化差异实现成像结果扩维, 而极化态数量与空域网格规模直接决定了系统资源的占用比例, 需在系统设计时统筹规划。计算资源层面, 迭代自适应处理涉及矩阵求逆运算, 尽管可面向单快拍信号处理, 但在现有 FPGA 平台上仍

难以实时实现, 实际部署中须采用降维手段。

## 4 仿真验证与性能分析

### 4.1 点目标仿真

首先采用点目标场景验证本文所提方法对分辨性能的提升。考虑均匀半波长一维线阵, 设阵元数为 24, 波束宽度为 4.2 度, 均匀划分为 4 个子阵进行处理, 发射极化为 45 度线极化。场景中, 假设方位向的杂波散射点  $\sigma_c$  服从复高斯分布, 构造杂波矢量  $\mathbf{c} = \mathbf{A}_c \sigma_c$ , 定义阵元级信杂比:

$$\text{SCR} = 10 \lg \frac{P_s}{P_c} \quad (36)$$

其中,  $P_s$  为目标在双极化接收下的平均功率;  $P_c$  为双极化接收下杂波矢量  $\mathbf{c}$  的平均功率。考虑方位角位于  $-0.4$  度与  $0.4$  度的双目标, 目标的极化散射矩阵分

别为  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  与  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ , 目标相位服从  $(0, 2\pi]$  内的均匀分布, 信杂比为 20 dB, 为便于对比展示, 二维结果采用  $\max$  算子投影至方位维。图 6 给出了不同方法得到的 4 次实验的方位维切片, 除单极化以外, 另两种方法均实现对双目标的稳健分辨, 这得益于极化信息的利用。单极化方法仅在后 2 组实验中完成了对目标的分辨, 原因在于迭代自适应方法的初始输入会影响方法的求解效果, 而用于初始输入的周期图法处

理结果受目标幅相关系影响显著, 致使在杂波环境下, 单极化方法难以收敛至全局最优, 对分辨效果与目标定位精度均存在影响。极化域变焦方法相较极化域空域联合方法, 能够在目标间形成更深的凹口, 具备更强的分辨潜力。图 7 给出了 128 种极化态下两种联合极化信息方法的二维输出结果, 极化域变焦方法的峰值指示更为准确。表 1 给出了三种方法在 1 000 次蒙特卡罗仿真下的平均运行时间对比, 极化域变焦方法的运行时间仅为单极化方法的 2 倍, 处理效率显著改善。

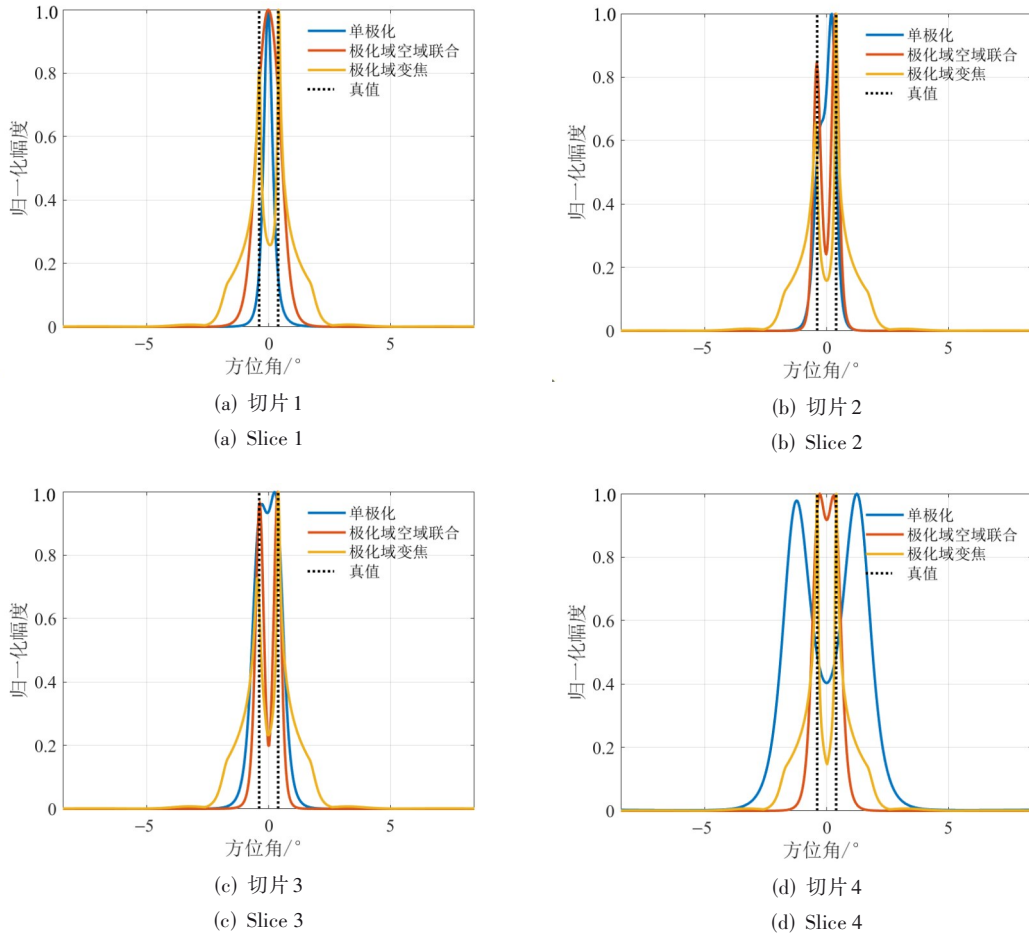


图 6 点目标仿真剖面

Figure 6 Simulation profile of point target

## 4.2 分辨效果分析

除目标组合 1 中散射矩阵为  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  与  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$  的两目标外, 额外引入目标组合 2 的  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  与  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j0.5\pi} \end{bmatrix}$  来分析极化差异对方法的影响。图 8 给出了不同方法下不同信杂比的 1 000 次蒙特卡罗仿真下获得的分辨概率曲线, 其中成功分辨判决采用文献[24]的准则。在阵元级信杂比 10 dB 的条件下, 单极化方法、

极化-空域联合方法与极化域变焦方法对目标组合 1 实现百分百分辨概率的目标间隔分别为 0.55、0.3 与 0.2 倍波束宽度, 目标组合 2 对极化特性的改变不会影响单极化方法的性能, 而极化-空域联合方法与极化域变焦方法百分百分辨的目标间隔分别恶化至 0.5 与 0.25 倍波束宽度, 说明引入极化信息的方法性能依赖于目标极化特性的差异, 总体而言, 所提的极化域变焦方法具备更优的分辨性能。

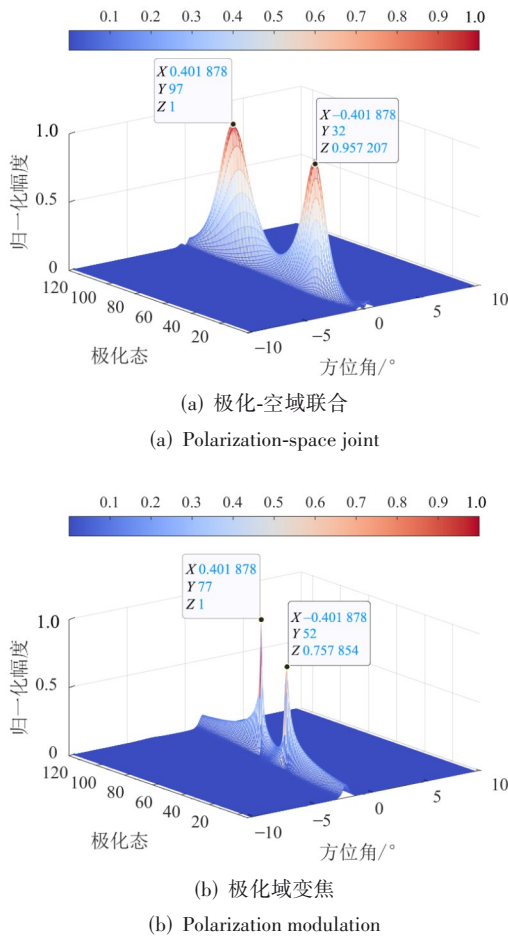


图7 极化-空域二维输出

Figure 7 Polarization-space two-dimensional output

表1 方法平均运行时间对比 单位:ms

Table 1 Comparison of average running time of methods unit:ms

方法	平均运行时间
单极化	10.9
极化-空域联合	136.8
极化域变焦	20.9

### 4.3 测角误差分析

图9给出了不同方法下不同信杂比的1000次蒙特卡罗仿真下的测角误差曲线。同一信杂比条件下,极化域变焦方法的测角精度优于极化-空域联合方法优于单极化方法;目标间隔越大,各方法的测角性能越佳;在10 dB信杂比条件下,三种方法对目标组合1的测角误差分别在目标间隔为0.9、0.3、0.2倍波束宽度时控制在 $0.2^\circ$ 之内,小于3 dB波束宽度的1/20;当考虑目标组合2时,极化-空域联合方法的这一指标恶化至0.5倍波束宽度,极化域变焦方法则无明显恶化,说明了极化域变焦方法对目标极化差异缩小的鲁

棒性,但需要指出的是,在目标的极化特性完全相同时,基于滤波器构造的极化域变焦方法将完全失效,而极化-空域联合方法的性能将退化至与单极化方法相同。总体而言,极化域变焦方法具备更佳的测角精度,有利于质心式干扰场景下对舰船的定位。

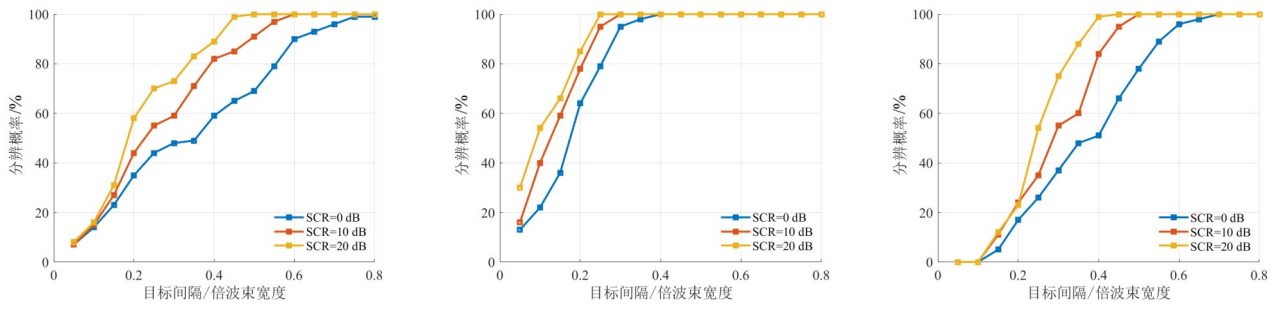
### 4.4 基于电磁仿真数据的成像性能分析

为进一步验证本文方法的有效性,结合CST电磁仿真软件开展海面场景仿真,测试极化域变焦方法成像性能。设置中心频率为16 GHz,带宽为4 GHz,获取阿利伯克级驱逐舰Flight III全方位极化散射数据与散射点分布,构造如图10所示的两类典型质心式干扰场景,分别对应舰船布设质心角反干扰的“机动前”与“机动后”两种状态,由4个充气角反构成的角反阵列距舰船的远端140 m,角反幅度高于舰船最强点10 dB,主要仿真参数如表2所示,处理过程中考虑的极化态数量为128。

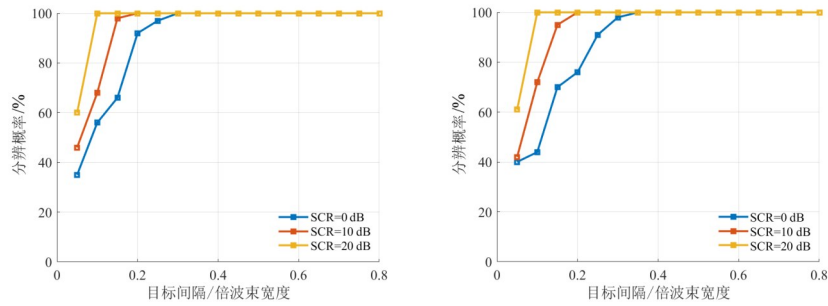
利用本文方法进行前视成像,成像结果如图11所示。由于角反与舰船的幅度差异,标准迭代自适应方法主要对角反阵列进行了成像,舰船难以被检测识别。极化域空域联合方法除了分辨舰船与角反外,还可利用极化信息对角反能量进行抑制,舰船位置得以凸显;但在舰船机动 $90^\circ$ 后,舰船的距离维特征消失,角反抑制环节的聚类效果恶化,进而导致舰船成像效果不佳。通过引入舰船角反信干比指标来量化成像方法的角反对抗性能,舰船角反信干比指标依据舰船区域与角反区域的功率计算,如图12所示。图中的红色区域为舰船区域,黄色区域为角反区域,可通过计算两块区域的平均功率比得到舰船角反信干比,计算公式为

$$SJR = 10 \lg \frac{\|I_s\|_1}{\|I_{cr}\|_1} \quad (37)$$

其中, $\|\cdot\|_1$ 表示1范数算子; $I$ 代表成像结果;下标s代表舰船区域;下标cr代表角反区域。值得注意的是,该指标围绕“分辨-成像-抑制”的三阶段处理提出,不局限于目标间是否分辨,转而面向质心式干扰下的舰船检测与定位能力增益开展评估。经计算,各处理结果的舰船角反信干比如表3所示。极化域变焦方法因反演精度更高,可获取更佳的角反抑制效果,在“机动前”场景,角反得到充分抑制,在“机动后”场景,横向舰船的多个散射点得到恢复,有利于该极端条件下的舰船检测识别。综上,可达到三方面结论:(1)质心式干扰场景下舰船的转向机动使距离维特征严重压缩,有利于舰船规避雷达的成像、检测与识别;(2)更高的方位分辨率有助于恢复质心式干扰场景下的关键散射点,可应对更多的角反布设情况;



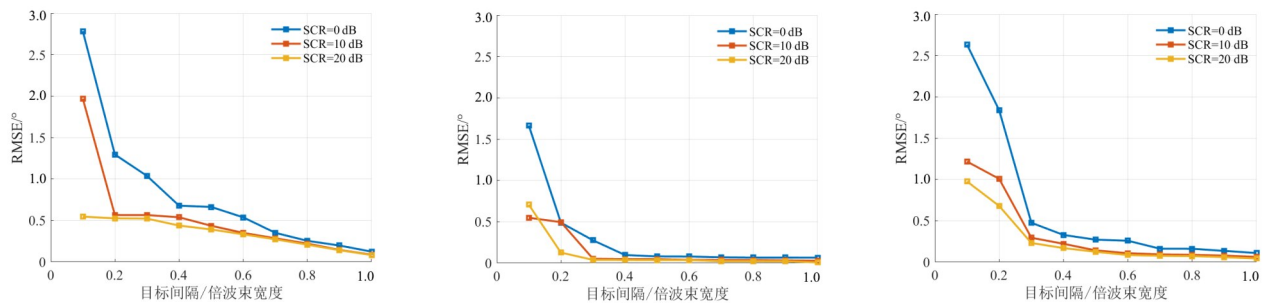
(a) Single polarization (target combination 1) (b) Polarization-space joint (target combination 1) (c) Polarization-space joint (target combination 2)



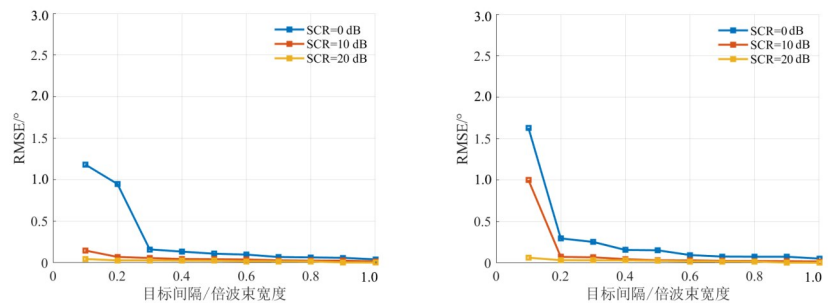
(d) Polarization modulation (target combination 1) (e) Polarization modulation (target combination 2)

图8 分辨概率曲线

Figure 8 The curve of resolution probability



(a) Single polarization (target combination 1) (b) Polarization-space joint (target combination 1) (c) Polarization-space joint (target combination 2)



(d) Polarization modulation (target combination 1) (e) Polarization modulation (target combination 2)

图9 测角精度曲线

Figure 9 The curve of angle measurement accuracy

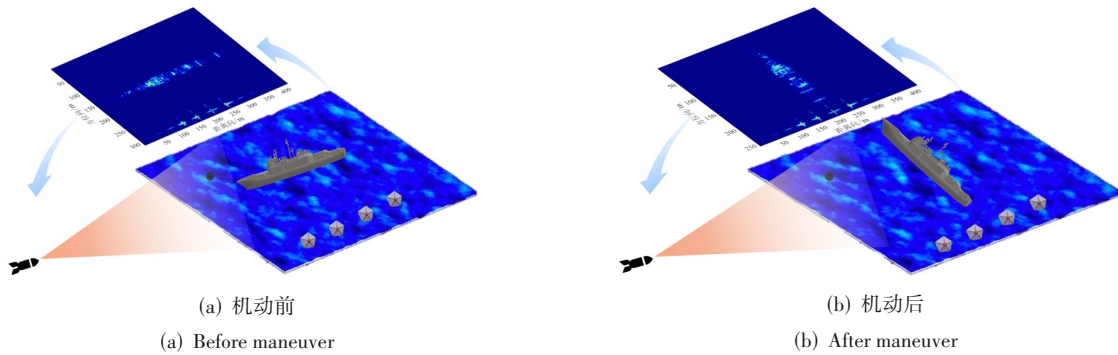


图 10 质心式干扰场景  
Figure 10 Centroid jamming scene

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数	数值
载频	16 GHz
信号带宽	50 MHz
信号时宽	10 $\mu$ s
弹目距	8 km
阵元数量	24
波束宽度	4.2°
信杂比	20 dB

反能量、保留舰船能量的效果。

需要指出的是,本节主要利用单一视角的电磁仿真数据进行场景构设与回波仿真,所得结论仅能说明在当前视角下,场景的极化散射特性足以支撑算法效能的发挥。在实际探测过程中,场景内各点源的极化散射矩阵通常随观测视角变化而敏感,这意味着引入极化信息的分辨性能本身也会呈现视角依赖性。就本文所提方法而言,其核心优势在于:通过极化域变焦处理,无需依赖极化信息的实时测量,仅利用点源间的极化差异即可获得分辨性能增益。在质心式干扰场景中,同一距离单元内多个散射点的极化散射矩

(3) 利用舰船与角反的极化特性差异,可达到抑制角

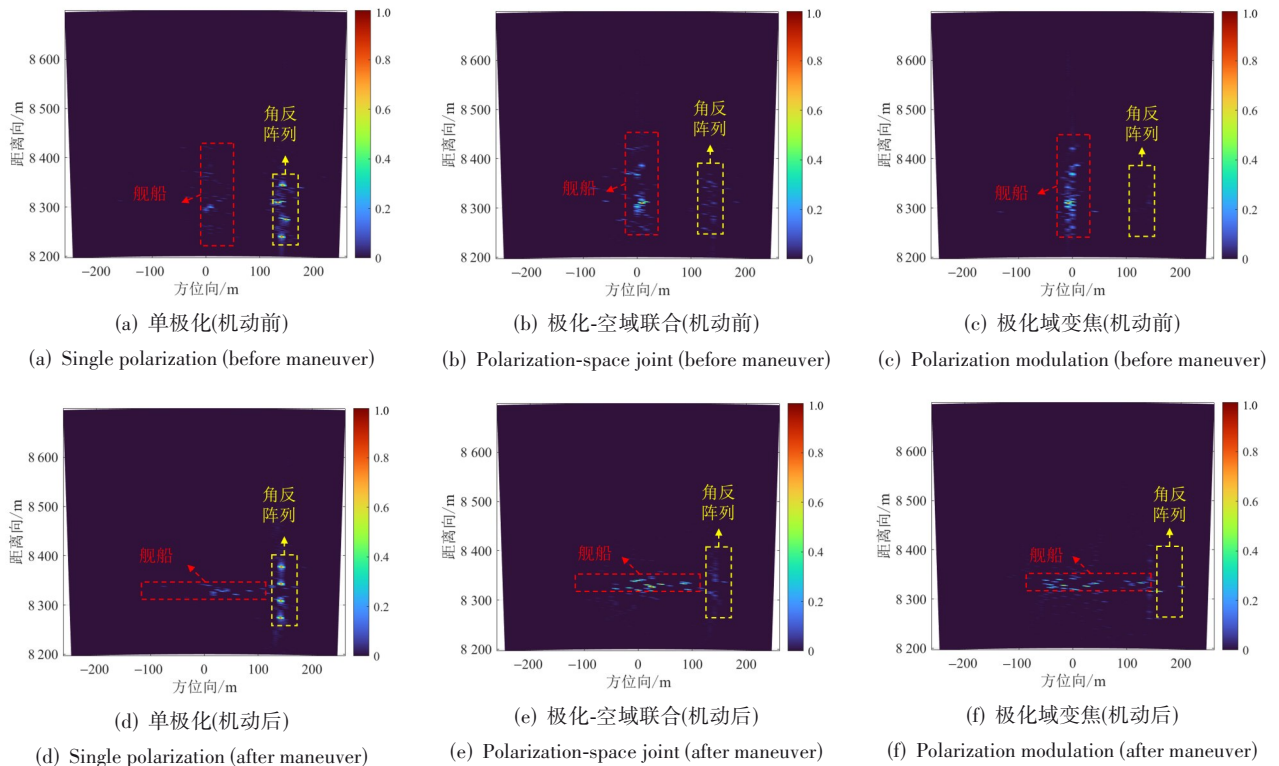


图 11 质心式干扰场景成像结果

Figure 11 Imaging results of centroid jamming scene

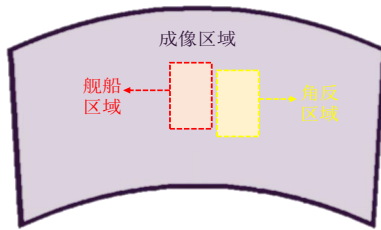


图 12 区域划分示意

Figure 12 Regional division schematic

表 3 指标对比

单位: dB

Table 3 Comparison of indicators

unit: dB

方法	舰船角反信干比	
	机动前	机动后
单极化	-9.68	-10.21
极化-空域联合	2.19	1.43
极化域变焦	13.63	3.78

阵完全一致属于小概率事件,这为方法应用提供了合理的先验基础。但同时也应看到,“机动后”场景中性能指标的恶化表明,方法在应对同一距离单元内存在较多点源的复杂情形时,分辨能力存在上限。这一限制并非源于极化散射矩阵的起伏,而是因为点源数量超过了方法本身的分辨能力阈值。因此,针对此类密集多源场景,仍需进一步研究更为稳健的分辨与成像方法。

## 5 总结与展望

针对雷达导引头对抗角反质心干扰难题,本文结合极化域变焦理论提出了一种前视成像方法,针对迭代自适应方法与极化-空域联合方法存在的问题,提出了自适应变焦准则、基于极化态筛选的并行迭代优化方法与基于极化主成分的角反抑制方法,实现了角反能量的抑制与舰船目标的前视成像。仿真结果表明,本文方法在 10 dB 信杂比下,对于间隔 0.2 倍波束宽度的“三面角+二面角”目标组合,测角精度达到 0.05 倍波束宽度;舰船的战术性机动对隐蔽自身有益,在舰船机动前后,本文方法对舰船角反信干比的改善均优于单极化方法、极化-空域联合方法。

本文仅考虑了具体距离-多普勒单元下的空域信号模型,而对距离-多普勒-方位-极化信息进行联合利用有望进一步提升干扰对抗性能。此外,本文仅考虑了无源角反的干扰场景,而实际场景中,箔条、有源干扰同时存在,充分利用弹上资源对抗组合干扰态势是下一步的研究方向。

### 参考文献

[1] 魏毅寅,杨文华. 海战场典型干扰对抗场景及反舰导弹

应对策略研究[J]. 战术导弹技术, 2020(5): 1-8.

Wei Yiyin, Yang Wenhua. Study on typical jamming scenes in naval battle field and countermeasures of anti-ship missile[J]. Tactical Missile Technology, 2020(5): 1-8. (in Chinese)

[2] 蔡天一,赵峰民,曾维贵. 基于分形维数的质心干扰对抗方法[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(2): 173-176.

Cai Tianyi, Zhao Fengmin, Zeng Weigui. Anti-jamming method for centroid based on fractal dimension[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(2): 173-176. (in Chinese)

[3] 李伟,贾惠波,顾启泰. 抗箔条质心干扰的一种方法[J]. 舰船电子对抗, 2000(5): 11-13.

Li Wei, Jia Huibo, Gu Qitai. A method to resist chaff centroid interference[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2000(5): 11-13. (in Chinese)

[4] 来庆福,赵晶,冯德军,等. 单脉冲雷达导引头质心干扰检测方法[J]. 现代雷达, 2011, 33(11): 40-44.

Lai Qingfu, Zhao Jing, Feng Dejun, et al. A detection method of centroid jamming in monopulse radar seeker[J]. Modern Radar, 2011, 33(11): 40-44. (in Chinese)

[5] 赵宜楠,金铭,乔晓林. 利用极化单脉冲雷达抗质心干扰的研究[J]. 现代雷达, 2006, 28(12): 45-46.

Zhao Yinan, Jin Ming, Qiao Xiaolin. Study on suppressing centroid interference using polarized monopulse radar[J]. Modern Radar, 2006, 28(12): 45-46. (in Chinese)

[6] 毛德庆,杨建宇,杨明杰,等. IAA-Net: 一种实孔径扫描雷达迭代自适应角超分辨成像方法[J]. 雷达学报, 2024, 13(5): 1073-1091.

Mao Deqing, Yang Jianyu, Yang Mingjie, et al. IAA-Net: An iterative adaptive approach for angular super-resolution imaging of real aperture scanning radar[J]. Journal of Radars, 2024, 13(5): 1073-1091. (in Chinese)

[7] 陈洪猛,余继周,张文杰,等. 基于概率模型驱动的机载贝叶斯前视超分辨多目标成像方法[J]. 雷达学报, 2023, 12(6): 1125-1137.

Chen Hongmeng, Yu Jizhou, Zhang Wenjie, et al. Probability model-driven airborne Bayesian forward-looking super-resolution imaging for multitarget scenario[J]. Journal of Radars, 2023, 12(6): 1125-1137. (in Chinese)

[8] 吴迪,朱岱寅,田斌,等. 单脉冲成像算法性能分析[J]. 航空学报, 2012, 33(10): 1905-1914.

Wu Di, Zhu Daiyin, Tian Bin, et al. Performance evaluation for monopulse imaging algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(10): 1905-1914. (in Chinese)

- [9] 吴迪, 朱岱寅, 朱兆达. 机载雷达单脉冲前视成像算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 462-469.  
Wu Di, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda. Research on nomopulse forward-looking imaging algorithm for airborne radar[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 462-469. (in Chinese)
- [10] 张寅, 张平, 虞兴宇, 等. 扫描雷达未知天线方向图误差下的稀疏目标角超分辨重建方法[J]. 雷达学报, 2024, 13(3): 646-666.  
Zhang Yin, Zhang Ping, Xingyu Tuo, et al. Sparse targets angular super-resolution reconstruction method under unknown antenna pattern errors for scanning radar[J]. Journal of Radars, 2024, 13(3): 646-666. (in Chinese)
- [11] 杨志伟, 贺顺, 廖桂生. 机载单通道雷达实波束扫描的前视探测[J]. 航空学报, 2012, 33(12): 2240-2245.  
Yang Zhiwei, He Shun, Liao Guisheng. Forward-looking detection for airborne single-channel radar with beam scanning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(12): 2240-2245. (in Chinese)
- [12] 唐军奎, 刘峥, 冉磊, 等. 基于稀疏和低秩先验的雷达前视超分辨成像方法[J]. 雷达学报, 2023, 12(2): 332-342.  
Tang Junkui, Liu Zheng, Ran Lei, et al. Radar forward-looking super-resolution imaging method based on sparse and low-rank priors[J]. Journal of Radars, 2023, 12(2): 332-342. (in Chinese)
- [13] Liu Ke, Li Yueli, Xu Zhou, et al. Airborne multi-channel forward-looking radar super-resolution imaging using improved fast iterative interpolated beamforming algorithm[J]. Remote Sensing, 2024, 16(22): 4121.
- [14] 李亚超, 王家东, 张廷豪, 等. 弹载雷达成像技术发展现状与趋势[J]. 雷达学报, 2022, 11(6): 943-973.  
Li Yachao, Wang Jiadong, Zhang Tinghao, et al. Present situation and prospect of missile-borne radar imaging technology[J]. Journal of Radars, 2022, 11(6): 943-973. (in Chinese)
- [15] 王罗胜斌, 王雪松, 徐振海. 雷达极化域调控超分辨的原理与方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(5): 993-1007.  
Wang Luoshengbin, Wang Xuesong, Xu Zhenhai. Principle and approach to polarization modulation for radar super-resolution[J]. Scientia Sinica Informationis, 2023, 53(5): 993-1007. (in Chinese)
- [16] 王罗胜斌, 吴国庆, 宋志勇, 等. 目标极化特性对雷达分辨效果的影响分析[J]. 电波科学学报, 2025, 40(5): 958-969.  
Wang Luoshengbin, Wu Guoqing, Song Zhiyong, et al. Influence analysis of target polarization characteristic on radar resolution effect[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2025, 40(5): 958-969. (in Chinese)
- [17] 王罗胜斌, 吴国庆, 徐振海, 等. 雷达极化域变焦角反组合体对抗方法: 抗质心式干扰[J]. 电子学报, 2022, 50(12): 2957-2968.  
Wang Luoshengbin, Wu Guoqing, Xu Zhenhai, et al. Radar polarization modulation countermeasures for combined corner reflector: Anti centroid jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(12): 2957-2968. (in Chinese)
- [18] 吴国庆, 王罗胜斌, 庞晨, 等. 雷达极化域变焦角反组合体对抗方法: 抗冲淡式干扰[J]. 电子学报, 2022, 50(12): 2969-2983.  
Wu Guoqing, Wang Luoshengbin, Pang Chen, et al. Radar polarization modulation countermeasures for combined corner reflector: Anti diluted jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(12): 2969-2983. (in Chinese)
- [19] Yardibi T, Li Jian, Stoica P, et al. Source localization and sensing: A nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(1): 425-443.
- [20] Barton D K. Radar system analysis and modeling[M]. Boston: Artech House, 2005.
- [21] 徐振海, 杨功清, 刘煜孜, 等. 复幅度比对雷达目标分辨的影响[J]. 现代雷达, 2021, 43(9): 1-5.  
Xu Zhenhai, Yang Gongqing, Liu Yuzi, et al. Influence of relative complex amplitude on radar targets resolutions[J]. Modern Radar, 2021, 43(9): 1-5. (in Chinese)
- [22] 徐振海. 极化敏感阵列信号处理的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.  
Xu Zhenhai. Signal processing based on polarization sensitive array[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [23] 任凌云, 吴迪, 朱岱寅, 等. 基于机载多通道雷达迭代超分辨估计的前视成像[J]. 雷达学报, 2023, 12(6): 1166-1178.  
Ren Lingyun, Wu Di, Zhu Daiyin, et al. Forward-looking imaging via iterative super-resolution estimation in airborne multi-channel radar[J]. Journal of Radars, 2023, 12(6): 1166-1178. (in Chinese)
- [24] Zhou C, Haber F, Jaggard D L. A resolution measure for the MUSIC algorithm and its application to plane wave arrivals contaminated by coherent interference[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, 39(2): 454-463.

## 作者简介



**刘奕彬** 男,1998年8月出生于江西省南昌市。博士研究生。主要研究方向为雷达信号处理、雷达极化信息处理。

E-mail: lyb\_nudt@163.com



**王罗胜斌** 男,1992年1月出生于江西省吉安市。现为国防科技大学电子科学学院副研究员。主要研究方向为雷达系统、阵列信号处理和雷达信号处理。

E-mail: wangluoshengbin@163.com



**吴国庆** 男,1997年8月出生于湖北省随州市。现为国防科技大学电子科学学院讲师。主要研究方向为雷达信号处理、雷达极化信息处理。

E-mail: guoqing51001@163.com



**宋志勇** 男,1983年1月出生于湖南省长沙市。现为国防科技大学电子科学学院副教授。主要研究方向为自动目标识别、雷达信号与信息处理、雷达抗干扰。

E-mail: zhiyongsong@163.com



**王平** 男,1976年5月出生于湖北省公安县。现为国防科技大学电子科学学院研究员、博士生导师。主要研究方向为精确制导。

E-mail: 760521407@qq.com



**李永祯** 男,1977年12月出生于内蒙古自治区化德县。现为国防科技大学电子科学学院研究员、博士生导师。主要研究方向为极化雷达信号处理、雷达电子对抗。

E-mail: e0061@sina.com