

# 雷达极化域变焦角反组合体对抗方法： 抗冲淡式干扰

吴国庆, 王罗胜斌, 庞 晨, 李永祯, 王雪松

(国防科技大学电子科学学院电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 雷达导引头末制导阶段易被角反干扰诱偏, 导致对海精确打击效能急剧下降, 导引头抗角反干扰能力提升需求迫切. 新型充气式角反覆盖频段广, 散射截面积大, 多个角反阵列排布可模拟类似于舰船的假目标, 形成冲淡式干扰态势, 需要对角反阵列进行辨识. 常用的对抗手段包括一维距离像特征鉴别和极化分解特征鉴别, 前者受限于空间几何关系, 后者受限于极化测量精度, 抗干扰效能皆有限. 物理上, 舰船为包含复杂结构的连续刚体, 角反阵列为散射结构一致的多个离散点, 两者回波的极化特性存在显著差异. 本文从极化域变焦超分辨原理出发, 建立了角反阵列和舰船的极化雷达信号模型, 通过调控收发极化改变散射点的相干叠加效果, 构建极化-距离二维图像并提取相关性特征参数表征目标差异, 结合支持向量机提出角反阵列辨识算法, 实现抗冲淡式角反干扰. 仿真实验结果表明, 所提算法角反鉴别性能鲁棒性强, 可有效对抗冲淡式干扰, 鉴别精度优于极化特征分解方法, 在低信噪比条件下平均提升 7.5%, 在交叉极化隔离度高于 -25 dB 条件下平均提升 27.3%.

**关键词:** 角反阵列; 冲淡式干扰; 极化域变焦; 极化-距离二维像; 支持向量机

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2022)12-2969-15

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

**DOI:** 10.12263/DZXB.20220979

## Radar Polarization Modulation Countermeasures for Combined Corner Reflector: Anti Diluted Jamming

WU Guo-qing, WANG Luo-sheng-bin, PANG Chen, LI Yong-zhen, WANG Xue-song

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Under the stage of terminal guidance, radar seeker can be easily deflated by corner reflector, which will lead to the sharp decline of the precision attack efficiency on the sea. It is urgent to improve the capability of anti corner reflector jamming. The new inflatable corner reflector works in wide frequency band with large radar cross section. Proper assignment of corner reflector array can simulate false targets similar with ships and form diluted jamming. Therefore, corner reflector array should be distinguished from ships. The common countermeasure is to recognize corner reflectors with HRRP and polarization decomposition. However, the former is constrained by spatial geometry, while the latter is affected by the accuracy of polarization measurement, both of which have limited anti-jamming performance. Physically, ships are continuous rigid bodies containing complex structures, and corner reflectors arrays are discrete points with uniform structures. The polarization characteristics of their echoes has significant difference. In this paper, based on the principle of polarization modulation technology, the signal models of corner reflector arrays and ships are established. With modulating the transmitting and receiving polarization, the coherent superposition effect among scatters is changed. The polarization-range 2D image is established and the correlation characteristic parameters are extracted to characteristic target's difference. Finally, combined with support vector machine, a corner reflector array recognition method is proposed. The results of simulation experiments show that proposed method has stable recognition performance and can effectively combat the diluting jamming. Compared with polarization decomposition method, the recognition accuracy of proposed algorithm improves 7.5% under the low SNR condition, while improves 27.3% when the cross-polarization isolation is higher than -25 dB.

**Key words:** corner reflector array; diluted jamming; polarization modulation; polarization-range 2D image; support vector machine

## 1 引言

角反射器是雷达电子对抗中一种重要的无源干扰装备<sup>[1]</sup>, 具有较大的雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS), 组合使用可形成与真实目标相似的假目标, 降低雷达的检测、识别和跟踪性能<sup>[2,3]</sup>. 长期以来, 抗角反干扰一直是对海攻击、精确打击等领域的难点问题<sup>[4,5]</sup>. 近年来, 随着新型充气式角反材质和结构的不断改进<sup>[4]</sup>, 其覆盖频段更宽, 全向性更好, 干扰费效比更高. 在海面战场环境下, 角反射器通常采用漂浮式或拖曳式布设, 对末制导雷达可形成冲淡式和质心式两种干扰态势<sup>[6]</sup>. 冲淡式干扰是指在雷达搜索阶段投放角反射器或角反阵列, 形成多假目标覆盖雷达探测区域, “冲淡”真实舰船目标. 质心式干扰是指在雷达跟踪阶段舰船和角反射器位于同一分辨单元, 单脉冲测量角度指向两者质心, 导致跟踪失败. 形成质心式干扰的空间几何关系较为严格, 冲淡式干扰更为常见.

对抗角反射器冲淡式干扰的关键在于准确鉴别角反射器和舰船目标, 从而消除角反射器的影响. 基于一维距离像特征的角反鉴别方法主要通过发射大带宽信号, 获得距离上的高分辨, 得到目标散射结构的径向分布, 依据一维距离像的强度、宽度、饱和度等特征辨识目标<sup>[6]</sup>. 然而, 一维距离像随观测角度伸缩变化, 导致该方法在实际应用中并不稳健<sup>[7,8]</sup>. 除一维距离像外, 距离多普勒、微动多普勒<sup>[9,10]</sup>等特征也用来进行角反辨识. 由于海面起伏以及拖曳式角反射器的存在, 舰船和角反阵列在多普勒域也难以有效分辨. 另外, 角反射器和舰船均为刚体目标, 具有相近的频谱展宽特性<sup>[7]</sup>. 总之, 在高动态的观测条件下, 仅依赖时、频、空域特征鉴别角反较为困难.

极化是电磁波除幅度、频率和相位之外的另一重要属性<sup>[11,12]</sup>. 雷达天线发射的电磁波照射到目标后, 由于目标具有变极化效应<sup>[13]</sup>, 其散射回波的极化状态相对于入射波会发生改变, 这种变化与目标的结构、材质等属性密切相关<sup>[14-18]</sup>. 极化分解方法是当前对角反和箔条等无源干扰进行极化鉴别的主流手段<sup>[7,19,20]</sup>. 角反射器一般表现为奇次散射, 而舰船结构复杂, 表现为二次散射、奇次散射和体散射等多种复杂散射特性的相互耦合<sup>[21]</sup>. 根据极化分解结果中各特征分量的比例关系就可以实现角反射器的鉴别. 然而, 极化分解的前提是准确测量目标的极化散射矩阵. 实际探测过程中, 雷达测量系统存在极化通道不平衡和极化通道耦合等非理想因素, 难以实现对极化散射矩阵的精密测量, 导致实际应用中效能有限. 近期, 本文研究团队提出了一种

全新的极化信息处理手段<sup>[22]</sup>——“极化域变焦处理”: 通过改变收发极化状态调控目标相对幅相关系, 获得多种相干叠加效果, 增强目标信息获取能力. 极化域变焦处理一方面可获得超分辨效果, 极大提升雷达分辨能力, 另一方面可放大目标间的极化散射特性差异, 增加雷达目标识别能力, 对于解决角反辨识问题具有独特优势. 早在 20 世纪 90 年代, 孙见彬等人<sup>[23]</sup>就提出了利用金属栅网和电机改变天线极化对抗箔条干扰, 并通过外场试验进行了验证. 这是变极化技术的早期实践, 但受限于当时的工程技术, 并且缺乏理论支撑, 相关研究未能深入. 随着变极化技术不断发展, 虚拟极化自适应技术可在接收端数字化形成多种极化, 降低系统复杂度. 在此基础上发展了最优极化接收技术和极化滤波技术, 然而由于极化域信息没有得到充分利用且需要干扰或杂波先验信息, 发挥效能有限.

极化域变焦处理立足于现有全极化测量体制提出, 发射一组正交极化状态的电磁波, 采用水平/垂直双通道接收, 数字化形成多种接收极化状态, 实现雷达的收发极化联合调控. 角反射器结构简单, 角反射器阵列上的各散射点散射机理相似, 随极化状态调控变化的差异不大, 而舰船的结构复杂, 各散射点随极化状态调控的差异较大, 通过极化域变焦处理可以放大二者之间的差异, 实现角反射器的鉴别.

本文首先介绍极化域变焦技术的基本原理, 在此基础上建立角反和舰船的信号模型, 分析舰船和角反阵列极化维和距离维的差异; 而后构建一组相关性特征参数进行表征, 并结合支持向量机提出一种角反阵列辨识方法; 最后, 利用电磁仿真数据验证本文所提方法的鉴别性能.

## 2 极化域变焦基本原理

### 2.1 极化雷达的信号模型

对于同一距离分辨单元的双点目标, 极化雷达发射线性调频信号带宽为  $B$ , 经过匹配滤波后, 接收到的回波为

$$x(t) = A_1 e^{j\varphi_1} \mathbf{h}_R^T \mathbf{S}_1 \mathbf{h}_T \text{sinc} \left[ \pi B \left( t - \Delta t_1 / 2 \right) \right] + A_2 e^{j\varphi_2} \mathbf{h}_R^T \mathbf{S}_2 \mathbf{h}_T \text{sinc} \left[ \pi B \left( t - \Delta t_2 / 2 \right) \right] + n(t) \quad (1)$$

其中,  $\text{sinc}(x) = (\sin x)/x$  为“辛克”函数;  $A_i$  和  $\varphi_i$  分别为匹配滤波输出的幅度和相位;  $n(t)$  为雷达接收机的热噪声, 在高信噪比条件下, 可以忽略噪声的影响;  $\Delta t_i$  为目标与雷达间的距离产生的时延;  $\mathbf{h}_T$  和  $\mathbf{h}_R$  分别为发射和接收极化矢量;  $\mathbf{S}_i$  为目标的极化散射矩阵<sup>[24]</sup>, 可以表示为

$$\mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在单站互易性条件下,满足  $S_{12} = S_{21}$ . 采用 Jones 矢量表征电磁波的极化,极化状态矢量写为

$$\mathbf{h}(\phi, \tau) = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \tau - j \sin \phi \sin \tau \\ \sin \phi \cos \tau + j \cos \phi \sin \tau \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $(\phi, \tau)$  为极化椭圆几何描述子,并且有  $\phi \in (-\pi/2, \pi/2]$ ,  $\tau \in (-\pi/4, \pi/4]$ . 假设发射和接收极化的椭圆几何描述子分别为  $(\phi_T, \tau_T)$  和  $(\phi_R, \tau_R)$ , 则有  $\mathbf{h}_T = \mathbf{h}(\phi_T, \tau_T)$ ,  $\mathbf{h}_R = \mathbf{h}(\phi_R, \tau_R)$ . 可知,当目标的极化散射矩阵确定时,雷达的接收回波受到收发极化状态的调控.

### 2.2 极化域变焦超分辨原理

目标的相对幅相关系对分辨的效果影响极大,文

献[22]指出,模糊函数仅考虑了不利于分辨的两目标“等幅同相”情况,导致传统分辨率反映的是雷达分辨性能的下界,而两目标“等幅反相”则可突破这一极限,达到超分辨的效果. 极化雷达可调控收发极化状态,从而调节目标回波的幅度和相位,实现“等幅反相”. 如图 1 所示,采用  $45^\circ$  线极化发射,双目标分别为二面角和三面角,在庞加莱球上遍历不同的接收极化. 可以看到,两目标时域回波的峰值受到极化状态的调控出现高低起伏,叠加得到的回波主瓣形状也发生变化. 调节收发极化状态的操作与光学中调节焦点使图像的清晰度改变具有相同的效果,因此本文研究团队提出“极化域变焦”的概念<sup>[22]</sup>,即通过改变收发极化状态调控目标相对幅相,改变相干叠加效果,增强目标信息获取能力.

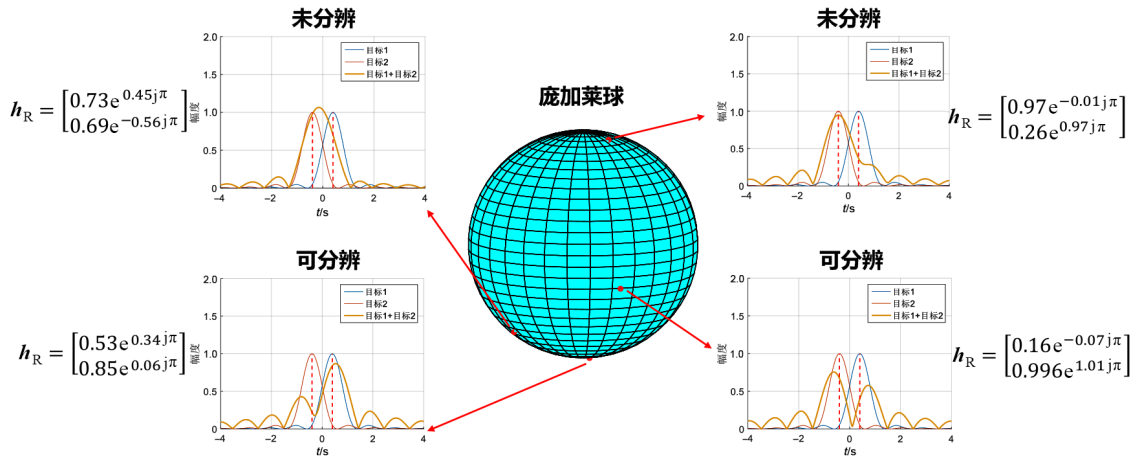


图 1 不同接收极化状态下的距离像<sup>[22]</sup>

根据式(1)中的信号模型,极化雷达距离像可写为

$$\begin{aligned} \gamma &= |x(t)|^2 \\ &= A_1^2 |g_1|^2 \text{sinc}^2(t_1) + A_2^2 |g_2|^2 \text{sinc}^2(t_2) \\ &\quad + 2A_1 A_2 \cos \Delta\varphi \text{Re}\{g_1 g_2^*\} \text{sinc}(t_1) \text{sinc}(t_2) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $g_1 = \mathbf{h}_R^T \mathbf{S}_1 \mathbf{h}_T$ ;  $g_2 = \mathbf{h}_R^T \mathbf{S}_2 \mathbf{h}_T$ ;  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ;  $t_1 = \pi B(t - \Delta t_1/2)$ ;  $t_2 = \pi B(t - \Delta t_2/2)$ . 因此,距离像是关于时间和极化椭圆几何描述子的多元函数,可以表示为  $\gamma(t, \phi_T, \tau_T, \phi_R, \tau_R)$ . 式(4)表征了用任意极化激励目标的时域波形,包含了“可分辨”和“未分辨”两类,综合处理所有结果,可以实现极化域变焦的超分辨能力.

### 2.3 极化-距离二维像

在不同收发极化状态的调控下,目标的一维距离像会产生显著起伏,而这种起伏蕴含了目标丰富的极化散射信息,需要将多种极化下的一维距离像组合起来进行综合处理,从而更加直观地反映目标受收发极化状态调控的变化情况.

假设采用  $L$  种接收极化状态获取目标的一维距离像,第  $l$  种接收极化为  $\mathbf{h}_R$ , 由式(4)得到的一维距离像  $\gamma_l$  为  $M$  点序列. 将  $L$  种接收极化下的一维距离像组合可以得到一个  $L \times M$  的二维矩阵  $\Gamma$ , 即

$$\Gamma = [\gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \dots \quad \gamma_L]^T \quad (5)$$

则  $\Gamma$  即为目标的极化-距离二维像,其横向为距离维,表征了回波幅度随距离的变化情况,纵向为极化维,表征了回波幅度随极化状态调控的变化情况,类比于距离像,可称之为“极化像”. 极化-距离二维像表征了目标不同距离单元的散射点随极化调控的幅度变化情况.

考虑两类双点目标场景,假设场景 1 的两个散射点极化散射特性不同,其极化散射矩阵分别为  $\mathbf{S}_1$  和  $\mathbf{S}_2$ , 场景 2 的两个散射点极化散射特性相同,其极化散射矩阵均为  $\mathbf{S}_2$ .  $\mathbf{S}_1$  和  $\mathbf{S}_2$  的表达式如下:

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.3e^{0.3j\pi} \\ 0.3e^{0.3j\pi} & 0.9e^{0.4j\pi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

在接收极化中,对极化椭圆几何描述子参数采样得到 400 种极化状态,得到两类场景的极化-距离二维

像以及距离维和极化维的幅度变化分别如图 2 和图 3 所示. 其中,图 2 为极化-距离二维像和不同极化态的距离像,图 3 为极化-距离二维像和不同距离单元的极化像.

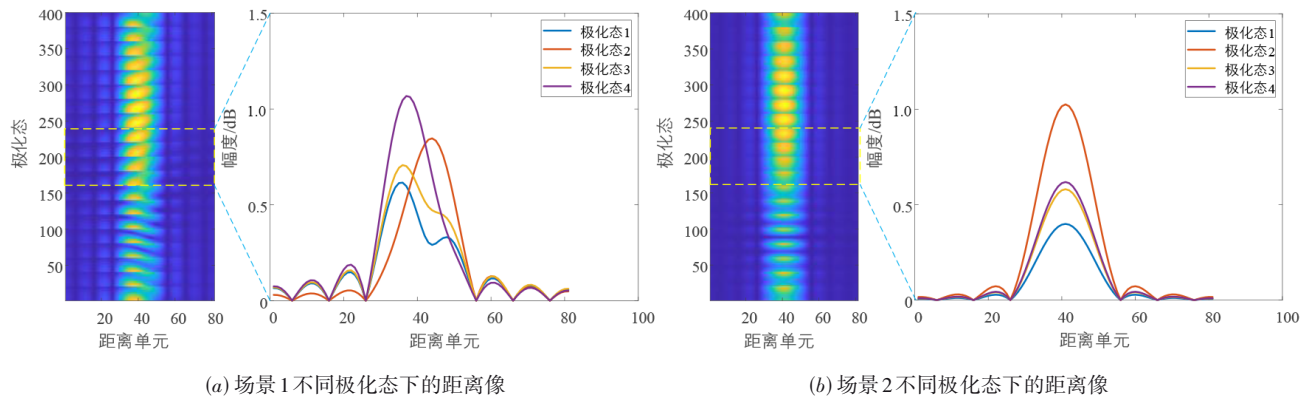


图 2 不同场景的极化-距离二维像及不同极化态的距离像

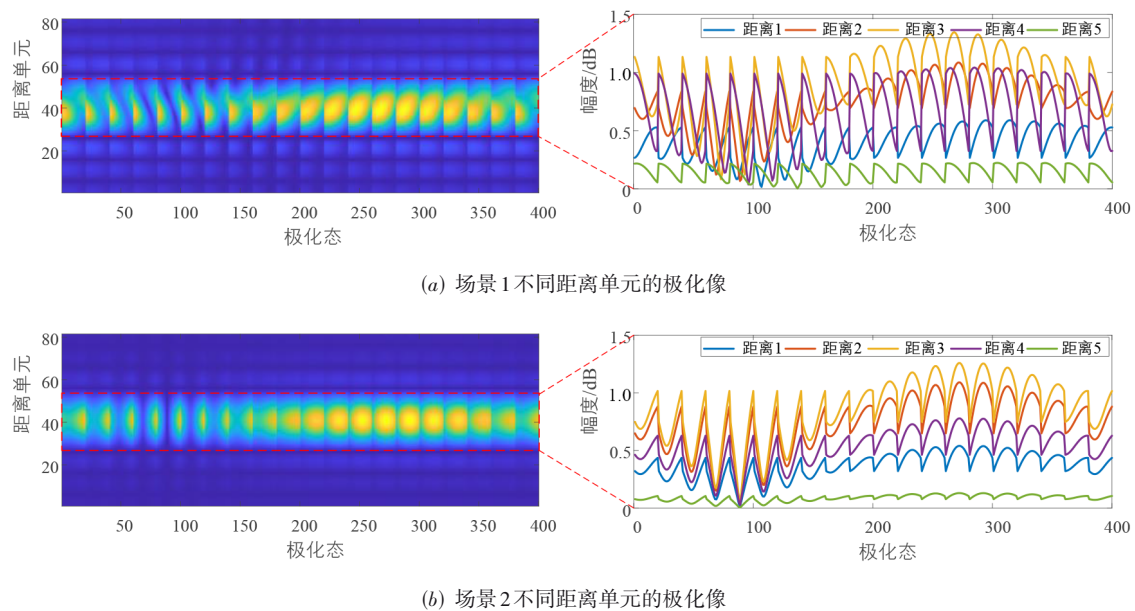


图 3 不同场景的极化-距离二维像及不同距离单元的极化像

从距离维分析,如果各距离单元散射点具有不同的极化散射特性,其幅相叠加效果受极化调控影响会发生显著变化,不同极化状态下的一维距离像会发生明显起伏,表现为一维距离像峰值点位置的移动,如图 2(a)所示. 反之,若不同散射点的极化散射特性相似,不同极化态下的幅相叠加效果相同,具有相同的起伏情况,如图 2(b)所示.

从极化维考虑,各个距离单元散射点的极化散射特性不同,受到极化调控的幅度变化也会不同. 从图 3(a)和(b)可以看到,场景 1 中的两个散射点的极化像均随着极化状态周期性变化,不同位置的散射点的

变化趋势不一致,出现重叠现象. 而对于场景 2,两个散射点的极化像变化趋势一致,只存在幅度上的区别.

综上,极化-距离二维像反映了极化域变焦条件下目标各散射点之间的相对极化散射特性差异,可以通过极化和距离两个维度的幅度进行表征.

### 3 角反射器和舰船信号模型

#### 3.1 角反射器信号模型

为了使角反射器具有全方位覆盖,实际使用的充气式角反等通常由多个三面角反射器的基本单元组合而成. 常见的三面角反射器基本单元根据组成三面角

平面形状的不同,主要分为三种:三角形角反射器、圆形角反射器和正方形角反射器. 其中,三角形角反射器能够在较大的角度范围内获得较强的回波功率,是目前应用最为广泛的一类角反射器<sup>[2]</sup>. 常见的角反射器基本单元的组合方式如图4所示,分别为八面体角反射器和二十面体角反射器. 文献[25]指出,对于八面体角反射器,仅在雷达发射的平面波沿腔体边缘入射时,才会出现二次散射,包括两种情况:①雷达入射的俯仰角为90°,即平行于上下两部分的交界面入射,方位角介于±45°之间;②雷达入射方位角正好为±45°,即平行于一个角反单元的两个侧边入射,俯仰角介于0°和90°之间. 对于二十面体角反射器,同样只有沿腔体边缘入射才会出现二次散射. 然而,由于二十面体角反射器的各个腔体的顶点并不是对齐的,当沿一个腔体的边缘入射时,该腔体中产生二次散射,而其他腔体中产生一次或三次散射.

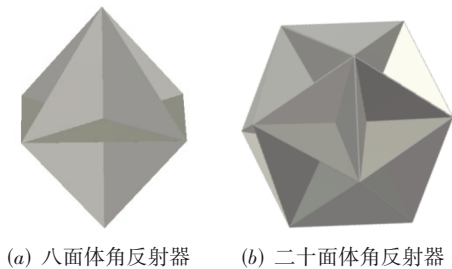


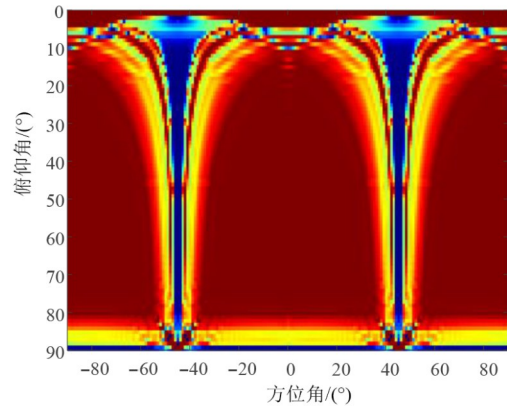
图4 典型角反射器模型

为了验证上述结论的正确性,利用极化相似性参数<sup>[26]</sup>分析角反射器在不同俯仰角和方位角下的极化散射特性的稳定程度. 假设任意两个目标的极化散射矩阵分别为 $S_1$ 和 $S_2$ ,则相似性参数 $\eta(S_1, S_2)$ 定义为

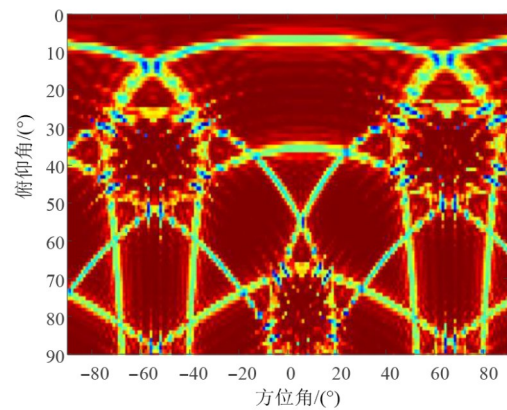
$$\eta(S_1, S_2) = \frac{|k_1^H k_2|^2}{\|k_1\|_2^2 \|k_2\|_2^2} \quad (8)$$

其中, $\|\cdot\|_2$ 表示矢量的二范数,即各元素模值的平方和; $k_1$ 和 $k_2$ 为与 $S_1$ 和 $S_2$ 对应的Pauli矢量,即 $k = (1/\sqrt{2}) \times [S_{11} + S_{22} \quad S_{11} - S_{22} \quad 2S_{12}]$ . 利用电磁仿真软件,获取角反射器全方位的极化散射矩阵数据. 分析不同角度下组合角反射器与理想三面角散射体之间的极化相似性参数,结果如图5所示. 可以发现,八面体和二十面体角反射器在较大的俯仰角和方位角范围内均有比较稳定的散射特性,与理想三面角散射体的极化相似性大于0.8的角度范围分别为71%和78%. 八面体出现二次散射的区域(即蓝色区域)与前述分析一致,二十面体中颜色较浅的位置即沿腔体边缘入射的位置.

综上,角反的极化散射特性比较稳定,在不同观测角度下均表现为奇次散射. 因此,考虑实际情况中角反射器漂浮在海面受海浪的影响,姿态发生改变,相对于



(a) 八面体三面角角反射器



(b) 二十面体三面角角反射器

图5 不同类型角反射器与理想三面角极化相似性参数

雷达入射角方向会产生不同程度的倾斜或者旋转,将角反射器建模为旋转的二次散射和奇次散射(一次或三次散射)的组合<sup>[27]</sup>,即

$$S = f_s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + f_d \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $f_s$ 和 $f_d$ 分别为奇次散射和二次散射的散射系数; $\theta$ 为角反射器绕雷达视线方向旋转的角度. 则角反阵列的一维距离像可以表示为

$$\gamma_l(t) = \left| \sum_{i=1}^{N_c} A_i e^{j\theta_i} h_{R_i}^T S_i^C h_{T_i} \text{sinc}[\pi B(t - \Delta t_i/2)] \right|^2 \quad (10)$$

其中, $N_c$ 为角反阵列散射点数目; $S_i^C$ 为角反阵列各点的极化散射矩阵,对应不同的入射角度 $\theta_i^C$ 以及散射系数 $f_{s_i}^C$ 和 $f_{d_i}^C$ . 由于角反阵列各点始终满足 $f_{s_i}^C \gg f_{d_i}^C$ ,因此角反阵列各散射点的极化散射矩阵 $S_i^C$ 基本相似.

### 3.2 舰船信号模型

舰船种类多样,结构复杂,雷达发射的电磁波照射到舰船目标后,会在舰船本身结构之间以及舰船与海面之间形成多种复合散射. 其主要散射机理表现为二

次散射、奇次散射和螺旋散射等. 舰船的奇次散射组成复杂, 主要来自于船身、甲板、舰桥侧壁、舰上的天线罩等镜面反射结构, 可用金属平板或金属球的奇次散射矩阵来近似. 舰船目标具有较强的二次散射, 主要来自于船身与海面之间、舰桥与甲板之间形成强散射的二面角结构. 由于观测角度的变化, 舰船上的二面角结构会发生不同程度的倾斜, 交叉极化分量会显著增大, 可用旋转二面角的极化散射矩阵进行表征. 另外, 舰船上由塔台、天线和护栏等复杂结构会产生螺旋散射<sup>[19]</sup>. 然而, 螺旋散射的能量较低. 因此, 舰船也可采用式(9)中的模型进行表征, 然而模型系数与角反射器不同, 舰船的二次散射系数一般高于奇次散射系数, 并且不同散射点之间存在显著差异. 类似地, 舰船的一维距离像可

以表示为

$$\gamma_l(t) = \left| \sum_{i=1}^{N_s} A_i e^{j\varphi_i} \mathbf{h}_{R_i}^T \mathbf{S}_i^S \mathbf{h}_T \text{sinc}[\pi B(t - \Delta t_i/2)] \right|^2 \quad (11)$$

其中,  $N_s$  为舰船散射点数目;  $\mathbf{S}_i^S$  为各散射点的极化散射矩阵, 对应不同的入射角度  $\theta_i^S$  以及散射系数  $f_{s_i}^S$  和  $f_{d_i}^S$ . 由于舰船各点的散射系数各不相同, 舰船各散射点的极化散射矩阵  $\mathbf{S}_i^S$  差异较大.

### 3.3 角反和舰船的极化-距离二维像分析

为了验证上述信号模型, 利用电磁仿真软件仿真一组角反阵列和舰船的全极化一维距离像. 利用式(9)求得奇次散射系数  $f_{s_i}^C$  和  $f_{s_i}^S$  和二次散射系数  $f_{d_i}^C$  和  $f_{d_i}^S$ , 利用式(10)和(11)得到一维距离像计算结果, 如图6所示.

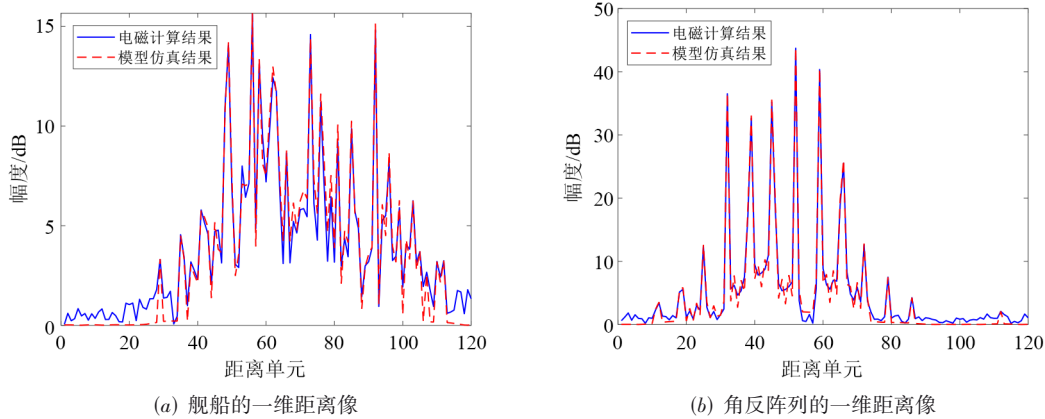


图6 舰船和角反阵列的一维距离像电磁计算结果和模型仿真结果

从幅度上看, 舰船和角反阵列的一维距离像均为一个个起伏的尖峰. 模型仿真结果与电磁计算结果只在幅度较弱的杂波位置存在差异, 峰值点位置的幅度基本一致, 说明了上述模型的有效性. 设  $\lambda$  为奇次散射系数占总的散射系数的比值, 即  $\lambda = f_s / (f_s + f_d)$ . 统计多

组数据中奇次散射系数的占比  $\lambda$  分布情况, 如图7所示. 可以看到, 舰船的奇次散射系数占比分布相对分散, 呈均匀分布; 而角反阵列分布相对集中, 基本分布在1附近. 这说明舰船各散射点的极化散射特性存在较大差异, 角反阵列各散射点的极化特性几乎相同.

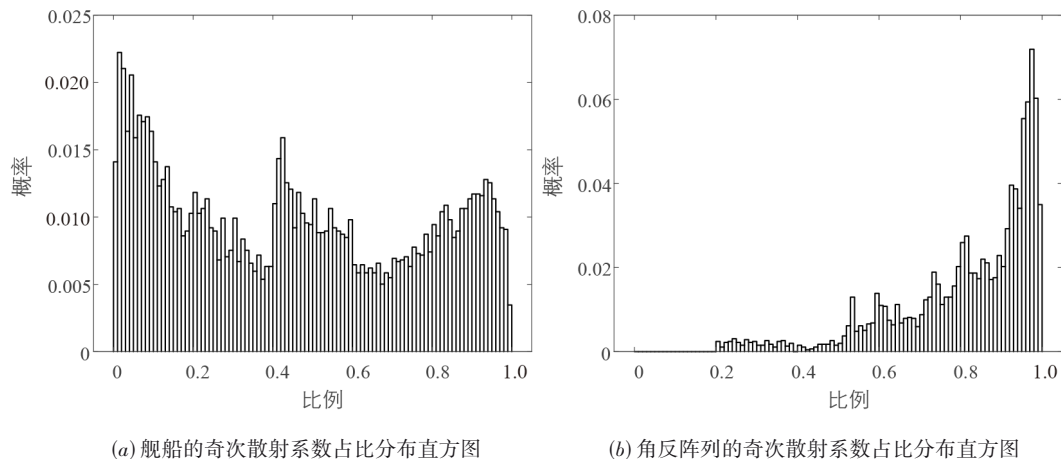


图7 舰船和角反阵列奇次散射系数占比分布情况

分析二者的极化-距离二维像,如图8所示.可以看到舰船的极化-距离二维像在距离维和极化维出现明显起伏,而角反阵列的极化-距离二维像起伏较小,为多条

连续的光滑直线.通过极化域变焦构建极化-距离二维像使舰船和角反阵列的差异得到显著放大,从而更加有利于后续的角反辨识.

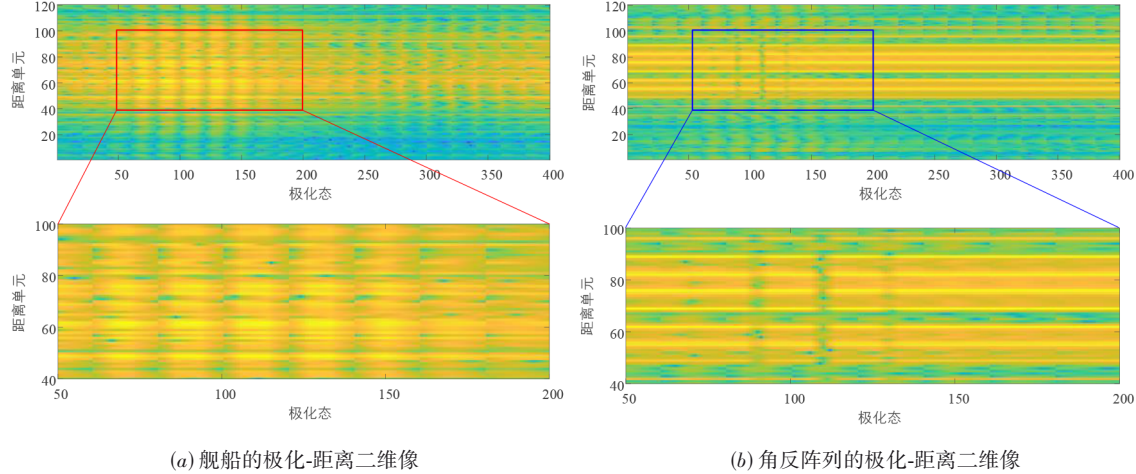


图8 舰船和角反阵列的极化-距离二维像

#### 4 极化域变焦角反鉴别方法

极化域变焦技术可调控散射点间相对幅相关系,增强目标信息获取能力.极化域变焦一方面可以实现目标的超分辨效果,另一方面可以增强不同目标的极化散射特性差异,实现目标的识别.角反射器结构简单,角反射器阵列上各散射点散射机理相似,随极化状态调控的变化不大,而舰船的结构复杂,各散射点随极化状态调控的变化较大.利用极化域变焦的手段可以放大二者之间的差异,从而实现角反射器的鉴别.本节将介绍一种基于支持向量机的极化域变焦角反射器鉴别方法.

##### 4.1 极化域变焦相关特征提取

通过3.3节的分析,可以得知舰船和角反阵列的极化-距离二维像在极化维和距离维存在显著差异.为了表征目标不同散射点的幅度随极化调控的变化情况,本节提出极化像相关特征参数 $\bar{C}_p$ 和距离像相关特征参数 $\bar{C}_r$ 来表征目标差异.

假设一个扩展目标包含 $M$ 个距离单元,对于第 $m$  ( $m=1, 2, \dots, M$ )个距离单元,采用 $N$ 种数字极化接收通道,可以得到该距离单元的极化像 $\Gamma_m^p$ .可知 $\Gamma_m^p$ 是一个 $N$ 点序列,即

$$\Gamma_m^p = [\gamma_{1,m}, \gamma_{2,m}, \dots, \gamma_{n,m}, \dots, \gamma_{N,m}]^T \quad (12)$$

其中, $\gamma_{n,m}$ 表示第 $n$  ( $n=1, 2, \dots, N$ )种接收极化状态下第 $m$ 个距离单元的幅度.为了比较不同距离单元的极化像序列的相关性,本文采用皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient, PCC).假设任意两个距离单元的极化像序列之间的相关系数为 $r_{(x,y)}$ ,则

$$r_{(x,y)} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N (\gamma_{n,y} - \bar{\gamma}_y)(\gamma_{n,x} - \bar{\gamma}_x) \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (\gamma_{n,y} - \bar{\gamma}_y)^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (\gamma_{n,x} - \bar{\gamma}_x)^2}} \quad (13)$$

其中, $\bar{\gamma}_x$ 和 $\bar{\gamma}_y$ 分别为第 $x$ 和第 $y$ 个距离单元的极化像均值,并且 $r_{(x,y)} \in [0, 1]$ .因此,该目标的极化像相关特征参数 $\bar{C}_p$ 可以表示为该目标所有距离单元两两之间极化像相关系数的均值,即

$$\bar{C}_p = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=x+1}^M r_{(x,y)} \quad (14)$$

可知, $\bar{C}_p \in [0, 1]$ .

同理,对于具有 $M$ 个散射点的扩展目标,采用 $N$ 种数字极化接收通道,可以得到第 $n$  ( $n=1, 2, \dots, N$ )种极化态下的距离像 $\Gamma_n^r$ . $\Gamma_n^r$ 是一个 $M$ 点序列,即

$$\Gamma_n^r = [\gamma_{n,1}, \gamma_{n,2}, \dots, \gamma_{n,m}, \dots, \gamma_{n,M}] \quad (15)$$

任意两种极化态下目标距离像序列之间的相关系数为 $s_{(x,y)}$ ,则

$$s_{(x,y)} = \frac{\left| \sum_{m=1}^M (\gamma_{x,m} - \bar{\gamma}_x)(\gamma_{y,m} - \bar{\gamma}_y) \right|}{\sqrt{\sum_{m=1}^M (\gamma_{x,m} - \bar{\gamma}_x)^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M (\gamma_{y,m} - \bar{\gamma}_y)^2}} \quad (16)$$

其中, $\bar{\gamma}_x$ 和 $\bar{\gamma}_y$ 分别为第 $x$ 和第 $y$ 种极化状态的距离像均值.可知, $s_{(x,y)} \in [0, 1]$ .因此,该目标的距离像相关特征参数 $\bar{C}_r$ 可以表示为

$$\bar{C}_r = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{x=1}^{N-1} \sum_{y=x+1}^N s_{(x,y)} \quad (17)$$

同理易知,  $\bar{C}_R \in [0, 1]$ .

目标极化相关特征参数由极化特征的差异决定. 假设两个散射点 1 和 2, 其散射矩阵分别为  $\mathbf{S}_1$  和  $\mathbf{S}_2$ . 进行极化域变焦处理, 假设  $\gamma_{l,1}$  为目标 1 在第  $l$  种极化状态下的回波幅度, 根据式(1)可知

$$\begin{aligned} \gamma_{l,1} &= \mathbf{h}_R^T \mathbf{S}_1 \mathbf{h}_T \\ &= \begin{bmatrix} \cos \phi_l \cos \tau_l - j \sin \phi_l \sin \tau_l \\ \sin \phi_l \cos \tau_l + j \cos \phi_l \sin \tau_l \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} S_{HH}^1 & S_{HV}^1 \\ S_{VH}^1 & S_{VV}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{TH} \\ h_{TV} \end{bmatrix} \\ &= (\cos \phi_l \cos \tau_l - j \sin \phi_l \sin \tau_l) (S_{HH}^1 h_{TH} + S_{HV}^1 h_{TV}) \\ &\quad + (\sin \phi_l \cos \tau_l + j \cos \phi_l \sin \tau_l) (S_{VH}^1 h_{TH} + S_{VV}^1 h_{TV}) \end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $S_{HH}^1, S_{HV}^1, S_{VH}^1, S_{VV}^1$  为散射矩阵元素;  $h_{TH}, h_{TV}$  为接收矢量权值; 设  $H_1, V_1$  和  $H_2, V_2$  分别为散射点 1 和 2 的散射回波水平和垂直通道的幅度, 则有

$$\begin{cases} H_1 = S_{HH}^1 h_{TH} + S_{HV}^1 h_{TV} \\ V_1 = S_{VH}^1 h_{TH} + S_{VV}^1 h_{TV} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} H_2 = S_{HH}^2 h_{TH} + S_{HV}^2 h_{TV} \\ V_2 = S_{VH}^2 h_{TH} + S_{VV}^2 h_{TV} \end{cases} \quad (20)$$

则两个极化像之间的相关系数  $r_{(1,2)}$  可以表示为

$$r_{(1,2)} = \frac{|\sigma_1^2 H_1 H_2 + \sigma_2^2 V_1 V_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 H_1^2 + \sigma_2^2 V_1^2} \sqrt{\sigma_1^2 H_2^2 + \sigma_2^2 V_2^2}} \quad (21)$$

其中,  $\sigma_1^2$  和  $\sigma_2^2$  分别为  $\cos \phi_l \cos \tau_l - j \sin \phi_l \sin \tau_l$  和  $\sin \phi_l \cos \tau_l + j \cos \phi_l \sin \tau_l$  的方差,  $l = 1, 2, \dots, L$ , 积分求解可得  $\sigma_1^2 = 1/2 - 32/\pi^4, \sigma_2^2 = 1/2$ . 一般固定发射极化为 45 度线极化即  $\mathbf{h}_T = [1, 1]^T$ , 则散射回波主要由目标的极化散射矩阵决定. 令  $\rho_1 = |V_1|/|H_1|$  和  $\rho_2 = |V_2|/|H_2|$  为目标 1 和 2 散射回波垂直和水平极化通道的幅度比,  $\Delta\rho = \rho_2/\rho_1$  为幅度比的差异, 得到相关系数  $r_{(1,2)}$  与  $\rho_1$  和  $\Delta\rho$  关系, 如图 9 所示.

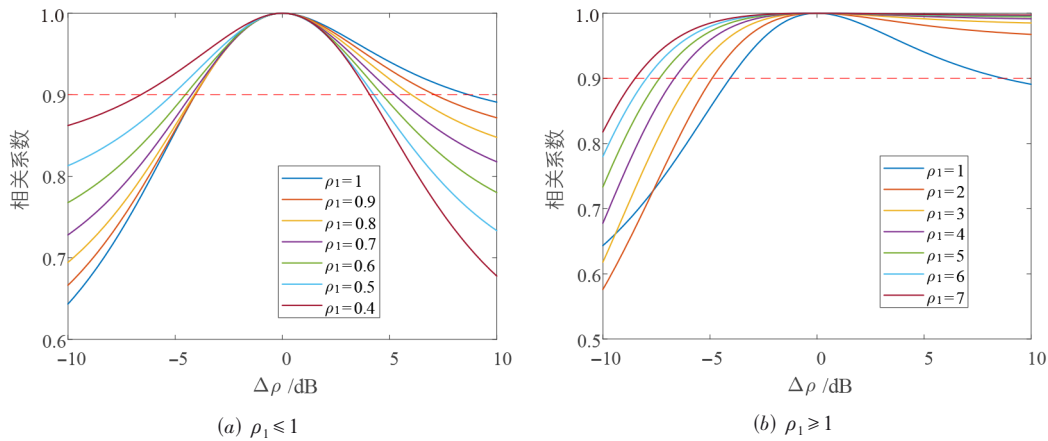


图9 相关系数与幅度比的关系

可以看到, 相关系数的大小与散射回波通道幅度比和散射点之间的幅度比差异有关. 若考虑相关系数, 其高于 0.9 时认为两个极化像的相关程度较高, 即图中红色虚线与曲线的两个交点的上方区域, 且  $\Delta\rho$  的动态范围越大, 说明受幅度比影响越小. 可知, 当幅度比  $\rho_1 < 1$  时,  $\Delta\rho$  的动态范围相差不大,  $\rho_1$  接近于 0.6 时动态范围最小. 而当幅度比  $\rho_1 > 1$  时, 随  $\rho_1$  的增大,  $\Delta\rho$  动态范围逐渐变大, 相关系数对散射矩阵变化越不敏感. 以上结论说明, 极化域变焦调控对散射矩阵的主极化通道之间存在一定比例关系的结构 (如圆柱体、窄二面角等) 或产生较大交叉极化的结构 (如旋转二面角等) 比较敏感, 而对偶极子等结构的差异不敏感. 在实际对海场景中, 舰船的复杂散射结构使其易满足相关性小于 0.9 的条件. 而对于标准角反 ( $\rho_1 = 1$ ), 若要求极化像相关性大于 0.9, 则相邻角反散射点的幅度比满足  $0.398 \leq \rho_2 \leq 7.465$ .

对于舰船目标, 其物理结构复杂, 各散射点的极化散射特性差异较大, 受不同极化状态调控的变化较大, 极化维和距离维的相关性均较弱; 而对于角反阵列, 各散射点的极化散射特性基本相似, 受极化状态调控的差异较小, 极化维和距离维的相关性较强, 均趋近于 1. 利用极化域变焦得到相关性特征参数可以表征目标各散射点之间的散射特性差异, 从而实现角反鉴别.

#### 4.2 基于支持向量机角反射器鉴别方法

支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 是一种解决二分类问题的分类器<sup>[28]</sup>, 通过核函数进行高维映射实现非线性分类, 求解能够正确划分训练数据集并且几何间隔最大的分离超平面. 它在解决小样本、非线性及高维模式识别中表现出许多特有的优势. 与传统的线性 SVM 分类器相比, 带有高斯径向基核函数的 SVM 分类器具有很强的泛化能力、很快的收敛速率, 并且只需要很少的训练样本就可以获得很好的训练效

果. 本文方法将使用常规的基于高斯径向基核函数的 SVM 分类器.

首先对获取的舰船和角反射器仿真数据进行极化域变焦处理, 然后提取特征参数, 构建训练数据集:  $T = \{(\mathbf{x}_1, y_1), \dots, (\mathbf{x}_N, y_N)\}$ . 其中,  $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^2$  为特征向量  $[\bar{C}_p \ \bar{C}_r]^T$ ;  $y_i \in \{+1, -1\}$  为样本类别标记, +1 为正样本, 表示舰船, -1 为负样本, 表示角反射器阵列. 选取适当的核函数和惩罚函数, 构造并求解凸二次规划问题, 得到训练好的 SVM 二分类模型. 利用 SVM 模型对测试数据进行分类, 得到角反射器阵列鉴别结果.

### 4.3 极化域变焦角反鉴别流程

基于极化域变焦的角反射器鉴别流程如图 10 所示. 它主要分为两个部分.

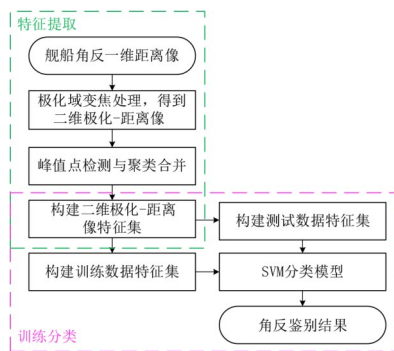


图 10 角反鉴别方法流程图

第一部分是特征参数提取, 具体步骤如下.

步骤 1: 在舰船和角反射器一维距离像的基础上, 通过在接收端形成多个数字极化接收通道, 利用极化域变焦, 得到极化-距离二维像.

步骤 2: 利用恒虚警检测 (CFAR) 算法, 得到各极化状态下峰值点位置. 由于舰船和角反阵列均为扩展目标, 在不同极化状态调控下, 一维距离像存在多个峰值点. 为了将同一目标的峰值点合并, 采用密度聚类方法对峰值点进行聚类, 聚类的搜索邻域半径为目标最大尺寸的二分之一, 得到每一类别的峰值点集合即为一个目标.

步骤 3: 构建极化-距离二维像特征集, 提取不同类别的距离像和极化像相关性特征. 首先在距离维提取目标不同极化态下距离像的相关性特征参数; 然后在极化维分析峰值点的分布情况, 提取不同距离单元的极化像相关特征参数.

第二部分是模型的训练与分类. 采用支持向量机分类器, 通过对海面舰船角反场景的样本数据进行训练, 得到最优 SVM 分类模型, 从而实现对海面舰船角反数据的实时鉴别.

## 5 仿真数据处理分析

本节主要介绍利用电磁仿真数据开展角反阵列鉴

别实验及结果分析.

### 5.1 仿真数据

由于海面角反射器和舰船场景的实测数据较少, 本实验利用 CST 电磁仿真软件进行仿真, 考虑 X 波段雷达对海探测场景. 仿真中心频率为 10 GHz, 带宽为 150 MHz. 仿真场景中角反阵列在海面沿雷达航行方向排布, 角反阵列与舰船相距一定间隔, 根据舰船尺寸选择设置一组或者两组角反阵列. 仿真时设置沿船头方向为方位角  $0^\circ$ , 垂直甲板向下为俯仰角  $0^\circ$ . 每组角反阵列包含三个八面体角反射器 (三角型或直线型排列, 见图 11(e) 和 (f)), 其中每个角反射器边长为 3 m. 考虑冲淡式干扰场景, 舰船和角反阵列相距较远, 在观测得



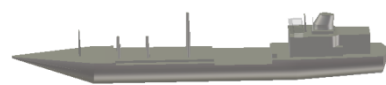
(a) 舰船一



(b) 舰船二



(c) 舰船三



(d) 舰船四



(e) 角反阵列一



(f) 角反阵列二

图 11 舰船和角反阵列模型示意图

到的一维距离像中可以清楚分辨,将俯仰角范围设置为 $20^\circ \sim 90^\circ$ ,方位角范围设置为 $0^\circ \sim 70^\circ$ .四种舰船模型以及两种角反阵列模型如图11所示,舰船的尺寸参数如表1所示.仿真得到舰船和角反射器的512组全极化一维距离像数据.其中,图12展示了四种不同类型的舰船和角反在俯仰角为 $40^\circ$ 且方位角为 $50^\circ$ 时的全极化一维距离像.距离雷达入射方向较近的为舰船目标,较远一侧目标为角反阵列.

表1 舰船模型尺寸参数 单位:m

舰船	参数		
	长度	宽度	高度
舰船一	169.69	22.90	56.25
舰船二	145.36	17.74	34.27
舰船三	107.74	11.39	29.14
舰船四	130.80	10.00	23.30

## 5.2 角反阵列鉴别实验

本实验采用上述仿真数据进行角反鉴别实验,对比方法为基于极化目标分解方法的角反鉴别方法.主要采用相干分解中常用的Krogager分解方法<sup>[29]</sup>进行对比.Krogager分解将散射点的极化散射矩阵分解为奇次散射、旋转角为 $\theta$ 的二次散射以及螺旋散射三种分量之和.在基于极化目标分解的角反鉴别中,一般认为角反射器或角反阵列结构简单,多为奇次散射,而舰船结构复杂,由多个形状各异的子散射体组成,包含多种复杂散射.假设分解得到三种分量对应的能量分别为 $K_s$ 、 $K_d$ 、 $K_h$ ,将三种散射分量的占比 $P_s$ 、 $P_d$ 、 $P_h$ 作为特征量,利用SVM等分类器实现角反鉴别.其中,三种散射分

量占比可以表示为

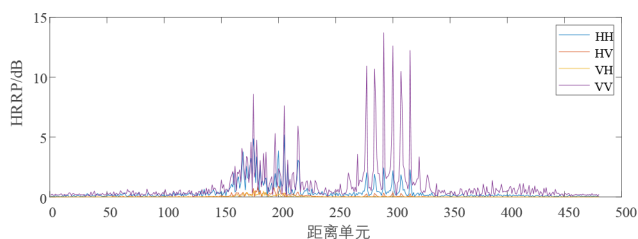
$$P_s = \frac{K_s}{K_s + K_d + K_h} \quad (22)$$

$$P_d = \frac{K_d}{K_s + K_d + K_h} \quad (23)$$

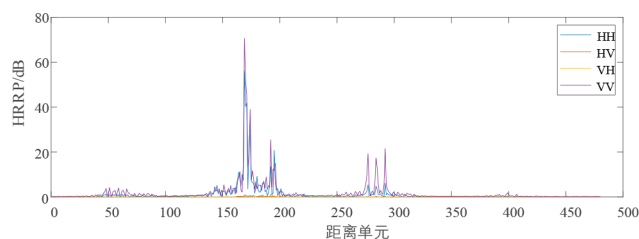
$$P_h = \frac{K_h}{K_s + K_d + K_h} \quad (24)$$

可知 $P_s$ 、 $P_d$ 、 $P_h$ 的取值范围均为 $[0, 1]$ ,并且三者之和为1.因此,本实验中考虑将不同散射点的散射分量占比构成的二维特征矢量 $[P_s, P_d]^T$ 作为SVM分类器的角反鉴别特征量.

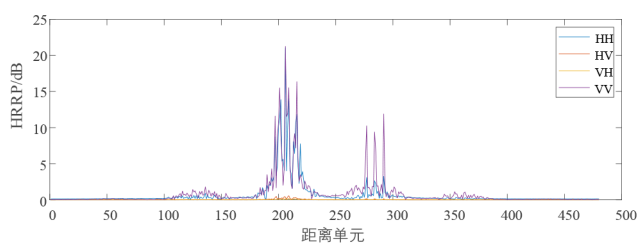
考虑无噪声条件下的一维距离像数据,对仿真得到的512组数据,提取舰船和角反阵列的极化域变焦相关特征参数( $\bar{C}_p, \bar{C}_R$ )和极化目标分解的参数( $P_s, P_d$ )进行二维表征,如图13所示.图中红色圆圈表示的是舰船目标的特征点,蓝色星号是角反阵列特征点.可以看到在图13(a)中,对于极化域变焦相关性特征参数,由于角反的极化像相关性和距离像相关性特征参数取值均较高,角反特征点分布相对集中,集中在(1,1)点附近.而舰船特征点分布相对分散,极化像的相关性参数在 $[0, 1]$ 区间均有分布.对于极化目标分解的参数,如图13(b)所示,由于舰船和角反的螺旋散射分量均较低,二次散射分量占比和奇次散射分量占比之和近似为1,极化目标分解特征点分布近似在一条直线上.对于角反阵列,奇次散射分量占比较高,主要集中在直线右下侧,而舰船目标相对分散,主要分布在左侧.两种方法得到的舰船和角反特征点在二维空间均有不同程度的重叠,而极化域变焦相关性参数重叠程度显著低



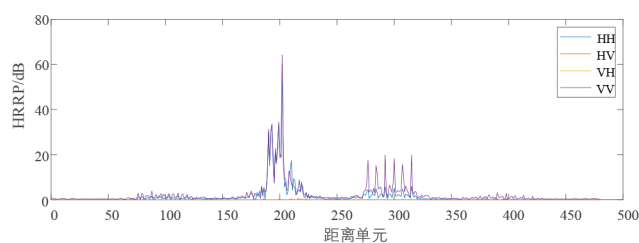
(a) 舰船一和角反阵列



(b) 舰船二和角反阵列



(c) 舰船三和角反阵列



(d) 舰船四和角反阵列

图12 不同舰船和角反阵列仿真得到的全极化一维距离像

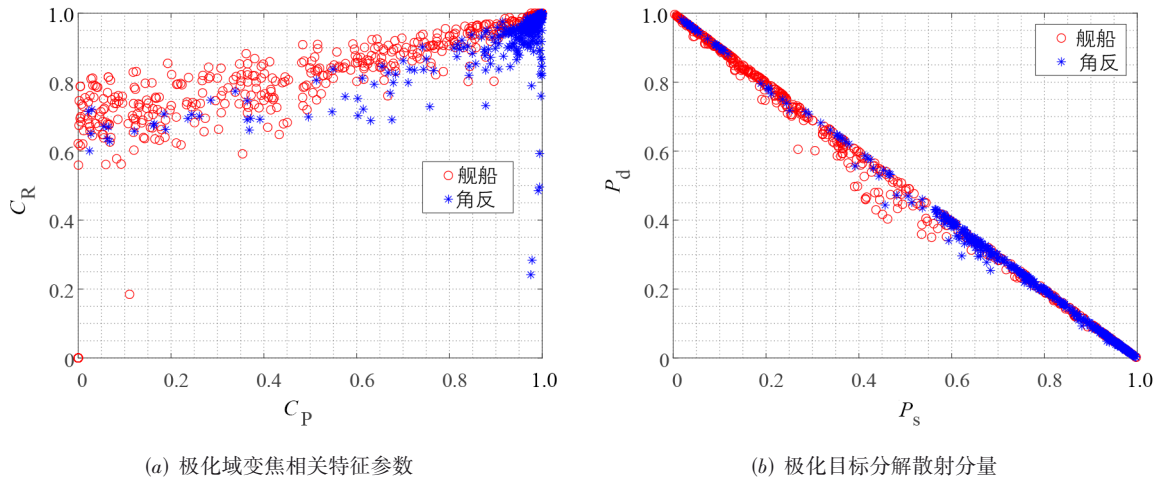


图 13 极化域变焦方法和极化分解方法的特征点分布

于极化目标分解方法. 如果在二维空间中直接对舰船和角反特征点进行分类, 则会出现较高的误判概率. 然而, 利用SVM分类器, 通过核函数进行高维映射实现非线性分类, 求解几何间隔最大的分离超平面, 可以实现角反射器的准确鉴别. 将两种方法得到的特征参数分别利用SVM分类器进行训练, 将得到的分类器模型用于后续实验.

5.2.1 噪声条件下角反鉴别分析

为了考虑不同噪声对角反鉴别率的影响, 本实验在原始电磁计算数据的基础上叠加不同信噪比的高斯白噪声. 利用无噪声的 512 组数据提取的相关性特征和极化分解特征作为训练样本得到的分类模型进行测试, 测试样本为信噪比 SNR 取值 5~30 dB 时提取的特征量. 不同信噪比条件下角反的鉴别率如图 14 所示. 图 15 展示了信噪比为 10 dB 条件下两种方法的特征点二维分布情况.

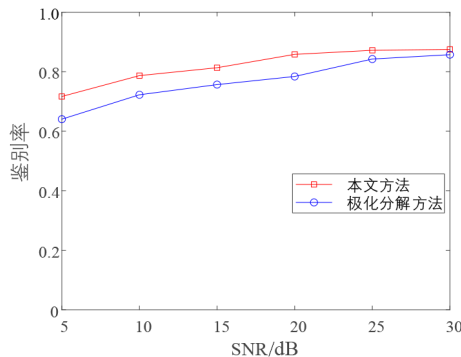


图 14 不同信噪比下的角反鉴别率

从角反鉴别率随信噪比变化情况(表 2)可以看到, 噪声影响下两种方法的鉴别率均有一定程度下降, 但极化域变焦的相关性特征参数始终高于极化分解方法, 并且随着信噪比降低, 二者鉴别率的差距逐渐变

大. 分析图 15 可知, 在噪声影响下舰船和角反阵列的特征点重叠程度显著增加, 导致二者的区分度降低. 在 SNR 为 30 dB 时, 两种方法的鉴别率分别为 87.6% 和 85.6%. 当 SNR 降为 5 dB 时, 极化域变焦角反鉴别率下降为 73.7%, 而极化目标分解角反鉴别率下降为 65.1%. 从上述分析可知, 极化域变焦角反鉴别方法相比于极化目标分解方法, 在不同信噪比下性能更加稳健, 受噪声影响程度显著低于极化目标分解方法.

表 2 不同信噪比下鉴别率

SNR/dB	5	10	15	20	25	30
极化分解方法	65.1%	72.5%	76.2%	79.6%	83.2%	85.6%
本文提出方法	73.7%	80.4%	83.8%	85.4%	86.3%	87.6%
精度提升	8.6%	7.8%	7.6%	5.8%	3.1%	2.0%

5.2.2 极化测量误差条件下角反鉴别分析

为了验证极化域变焦角反鉴别方法在不同极化测量误差下的鉴别性能, 本节在原始数据的基础上设置不同极化测量误差做进一步分析. 在极化测量误差的模型中, 测量的极化散射矩阵  $S_m$  和真实的极化散射矩阵  $S$  之间的关系满足

$$S_m = RST + N \tag{25}$$

其中,  $N$  表示雷达回波信号中的加性噪声;  $T$  和  $R$  分别表示雷达发射路径和接收路径引入的极化失真, 有

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \delta \\ \delta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \delta \\ \delta & 1 \end{bmatrix} \tag{27}$$

其中,  $\delta$  是发射和接收天线的极化隔离度;  $k_t$  和  $k_r$  表示幅度和相位的通道不平衡.

考虑极化通道串扰影响, 设交叉极化隔离度为  $-45 \sim -5$  dB, 不同交叉极化隔离度下的角反鉴别率如表 3 所示. 图 16 展示了鉴别率的变化情况. 当交叉极

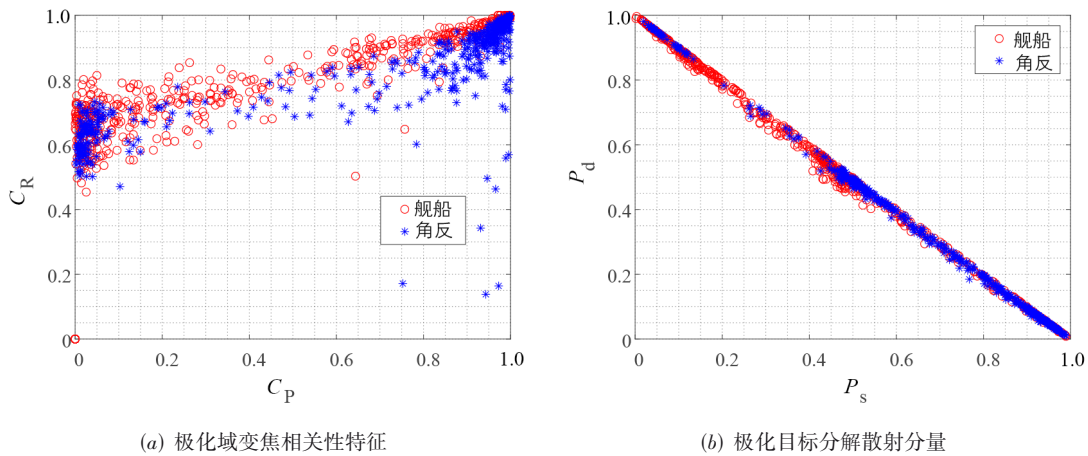


图 15 信噪比为 10 dB 时不同方法的特征点分布

化隔离度小于  $-30$  dB 时,两种方法的鉴别率几乎相当.随着交叉极化隔离度逐渐增大,极化分解方法的鉴别率显著下降,而极化域变焦方法的鉴别率受交叉极化隔离度的影响较小,始终维持在  $85\% \sim 87\%$  之间.当交叉极化隔离度  $\delta = -10$  dB 时,极化分解方法的角反鉴别率最低为  $50.8\%$ ,极化域变焦方法角反鉴别率为  $85.0\%$ ,相比极化分解方法提升了  $34.2\%$ .这是由于交

叉极化隔离度的增加,测得的角反阵列和舰船的极化散射矩阵发生显著改变,但是并不会改变角反阵列各点散射特性基本相似的本质.角反阵列不再是奇次散射,基于极化目标分解的方法鉴别性能受到显著影响.而极化域变焦方法反映了角反阵列和舰船各散射点之间的散射特性的相似程度,受到极化串扰测量误差的影响较小.

表 3 不同交叉极化隔离度下的鉴别率

方法	隔离度/dB								
	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5
极化分解方法	86.8%	86.9%	87.0%	85.4%	78.2%	60.7%	52.0%	50.8%	53.5%
本文提出方法	87.1%	87.8%	87.1%	87.4%	87.3%	87.0%	86.4%	85.0%	85.8%
精度提升	0.3%	0.9%	0.1%	2.0%	9.1%	26.3%	34.5%	34.2%	32.3%

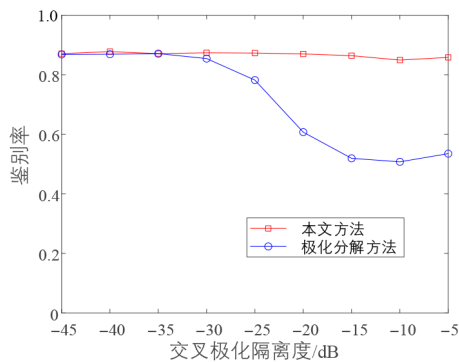


图 16 不同交叉极化隔离度下的角反鉴别率

考虑极化通道的幅度和相位不平衡误差对角反鉴别率的影响,分别设置极化通道幅度不平衡为  $0 \sim 2$  dB,相位不平衡为  $0^\circ \sim 20^\circ$ ,得到角反鉴别率随极化测量误差的变化关系如图 17 和图 18 所示.可以看到极化域变焦角反鉴别方法受通道幅度不平衡和相位不平衡的影响较小,始终维持在  $83\%$  左右.而极化分解方法的鉴别率受极化通道不平衡的测量误差影响较大.在没有极

化测量误差的情况下,两种方法的鉴别率几乎相当,随着通道幅度不平衡和相位不平衡的增加,极化分解方法的角反鉴别率显著低于极化域变焦方法,当通道幅度不平衡为  $0.6$  dB 时,极化域变焦角反鉴别性能提升最明显,平均提升约  $19.7\%$ ,当相位不平衡为  $12$  dB 时,性能提升最明显为  $17.0\%$ .

从上述分析可知,极化域变焦的角反鉴别方法相

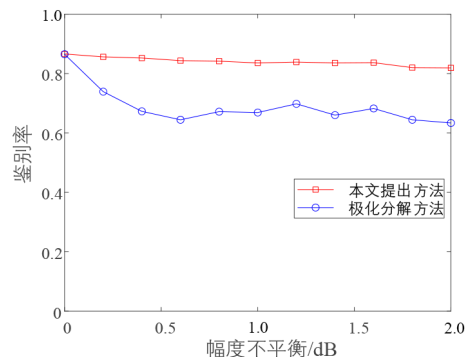


图 17 不同幅度不平衡误差下的角反鉴别率

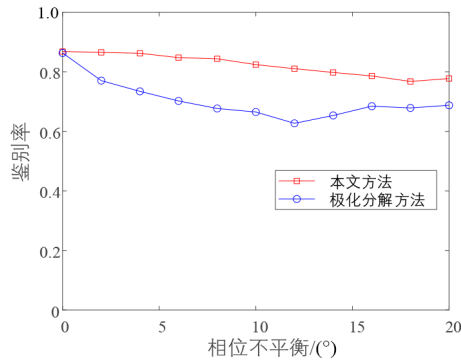


图 18 不同相位不平衡下的角反鉴别率

比于极化分解方法鉴别精度更高,在不同测量误差下的性能更加稳定.特别地,在交叉极化隔离度误差下,极化分解方法的性能下降最为显著,而极化域变焦几乎不受极化测量误差的影响.

## 6 总结与展望

针对末制导雷达抗角反射器无源干扰的难题,本文首先分析了极化域变焦条件下舰船和角反射器极化特征的差异,构造一种表征目标回波幅度特征受极化调控变化情况的极化-距离二维像,在此基础上提出极化像和距离像相关特征参数,通过SVM分类器对舰船和角反射器进行了分类鉴别.利用电磁计算数据开展的实验表明,该方法利用了舰船和角反射器散射点特征差异的本质区别,角反鉴别精度相比极化分解方法在低信噪比条件下平均提升7.5%,在交叉极化隔离度高于-25 dB条件下平均提升27.3%.该方法受噪声和极化测量误差的影响较小,性能更优.本文从理论和实验的角度验证了极化域变焦方法鉴别角反射器的可能性,为从根本上解决舰船和角反射器的鉴别问题提供了一个可行的思路.在实际场景下,算法的性能和雷达的CPI、频段以及海浪起伏等都有一定的关系,需要结合实际情况具体考虑,这将是本文研究团队后续研究的重点内容.

### 参考文献

[1] 陈静. 雷达无源干扰原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
CHEN J. Principles of Radar Passive Jamming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)

[2] 张志远, 张介秋, 屈绍波, 等. 雷达角反射器的研究进展及展望[J]. 飞航导弹, 2014(4): 64-70.

[3] 张志远, 赵原源. 新型二十面体三角形角反射器的电磁散射特性分析[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(4): 133-137.  
ZHANG Z Y, ZHAO Y Y. Analysis of electromagnetic scattering characteristic for new type icosahedrons triangu-

lar trihedral corner reflectors[J]. Command Control & Simulation, 2018, 40(4): 133-137. (in Chinese)

[4] 张林, 胡生亮, 胡海. 舰载充气式角反射体装备现状与战术运用研究现状[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 48-51.  
ZHANG L, HU S L, HU H. Research on current equipment situation and tactical application of ship-born inflatable corner reflector[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(6): 48-51. (in Chinese)

[5] 胡海, 张林, 张小东. 舰载充气式角反射体反导装备发展及运用[J]. 国防科技, 2018, 39(2): 74-77.  
HU H, ZHANG L, ZHANG X D. A study on equipment developments and operational using of ship born gas-filled anti-missile multi-corner reflector[J]. Defense Technology Review, 2018, 39(2): 74-77. (in Chinese)

[6] 汤广富, 李华, 甘荣兵, 等. 海战场环境下角反射器干扰分析[J]. 电子信息对抗技术, 2015, 30(5): 39-45, 84.  
TANG G F, LI H, GAN R B, et al. Analysis of corner reflector under naval battlefield[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2015, 30(5): 39-45, 84. (in Chinese)

[7] 朱珍珍, 汤广富, 程翥, 等. 基于极化分解的舰船和角反射器鉴别方法[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(6): 15-21.  
ZHU Z Z, TANG G F, CHENG Z, et al. Discrimination method of ship and corner reflector based on polarization decomposition[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2010, 33(6): 15-21. (in Chinese)

[8] 张俊, 胡生亮, 范学满, 等. 基于HRRP和PA的浮空式角反射体布放态势寻优[J]. 战术导弹技术, 2018(3): 105-109.  
ZHANG J, HU S L, FAN X M, et al. Optimization of the position situation of the air-floating corner reflector based on HRRP and PA[J]. Tactical Missile Technology, 2018 (3): 105-109. (in Chinese)

[9] 黄孟俊, 赵宏钟, 付强, 等. 一种基于微多普勒特征的海面角反射器干扰鉴别方法[J]. 宇航学报, 2012, 33(10): 1486-1491.  
HUANG M J, ZHAO H Z, FU Q, et al. A sea corner-reflector jamming identification method based on micro-Doppler feature[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(10): 1486-1491. (in Chinese)

[10] 黄孟俊, 陈建军, 赵宏钟, 等. 海面角反射器干扰微多普勒建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1781-1787.  
HUANG M J, CHEN J J, ZHAO H Z, et al. Micro-Doppler modeling and simulating of corner reflector in sea

- surface[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(9): 1781-1787. (in Chinese)
- [11] 王雪松. 雷达极化技术研究现状与展望[J]. *雷达学报*, 2016, 5(2): 119-131.  
WANG X S. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(2): 119-131. (in Chinese)
- [12] 庄钊文,肖顺平,王雪松. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.  
ZHUANG Z W, XIAO S P, WANG X S. *Radar Polarization Information Processing and Application*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [13] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [14] 曾勇虎,王雪松,肖顺平,等. 基于瞬态极化时频分布及奇异值特征提取的雷达目标识别[J]. *电子学报*, 2005, 33(3): 571-573.  
ZENG Y H, WANG X S, XIAO S P, et al. Radar target recognition based on instantaneous polarization time-frequency distribution and singular values feature extraction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 571-573. (in Chinese)
- [15] 王雪松,徐振海,李永祯,等. 高分辨雷达目标极化检测仿真实验与结果分析[J]. *电子学报*, 2000, 28(12): 60-63.  
WANG X S, XU Z H, LI Y Z, et al. High-resolution radar target detection simulation experiments and results analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(12): 60-63. (in Chinese)
- [16] 王雪松,庄钊文,肖顺平,等. 光学区雷达目标空间极化结构特性描述及识别研究[J]. *电子学报*, 1998, 26(6): 36-41.  
WANG X S, ZHUANG Z W, XIAO S P, et al. The study of recognition and description of space polarization structure characteristic of radar target in the optics region[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(6): 36-41. (in Chinese)
- [17] 肖顺平,郭桂蓉,庄钊文,等. 基于含参最小二乘估计曲线拟合的极化雷达目标识别方法[J]. *电子学报*, 1997, 25(3): 32-36, 54.  
XIAO S P, GUO G R, ZHANG Z W, et al. A method of polarization radar target recognition based on curve fitting by means of the least square estimation of parameters [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1997, 25(3): 32-36, 54. (in Chinese)
- [18] 何松华,郭桂蓉,庄钊文. 雷达目标高分辨率距离一极化结构成像方法研究[J]. *电子学报*, 1994, 22(7): 1-8.  
HE S H, GUO G R, ZHUANG Z W. A study of high resolution range-polarization reconstructing of radar target[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1994, 22(7): 1-8. (in Chinese)
- [19] 全斯农,范晖,代大海,等. 一种基于精细极化目标分解的舰船箔条云识别方法[J]. *雷达学报*, 2021, 10(1): 61-73.  
QUAN S N, FAN H, DAI D H, et al. Recognition of ships and chaff clouds based on sophisticated polarimetric target decomposition[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(1): 61-73. (in Chinese)
- [20] 涂建华,汤广富,肖怀铁,等. 基于极化分解的抗角反射器干扰研究[J]. *雷达科学与技术*, 2009, 7(2): 85-90.  
TU J H, TANG G F, XIAO H T, et al. A study of anti-corner reflector based on polarization decomposition[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(2): 85-90. (in Chinese)
- [21] 张俊,胡生亮,杨庆,等. 浮空式角反射体 RCS 统计特征及识别模型研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(4): 780-786.  
ZHANG J, HU S L, YANG Q, et al. RCS statistical features and recognition model of air-floating corner reflector [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(4): 780-786. (in Chinese)
- [22] 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/OL]. *中国科学: 信息科学*, (2022)[2022]. <https://doi.org/10.1360/SSI-2022-0141>.
- [23] 孙见彬. 天线变极化技术抗无源质心干扰研究[J]. *电子对抗*, 1992(1): 27-30.
- [24] 柯有安. 雷达散射矩阵与极化匹配接收[J]. *电子学报*, 1963(3): 1-11.
- [25] 吴林罡,胡生亮,张俊,等. 双棱锥型角反射器 RCS 快速预估方法[J]. *战术导弹技术*, 2021(5): 29-35.  
WU L G, HU S L, ZHANG J, et al. Fast RCS estimation method for bipyramid corner reflector[J]. *Tactical Missile Technology*, 2021(5): 29-35. (in Chinese)
- [26] YANG J, PENG Y N, LIN S M. Similarity between two scattering matrices[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(3): 193-194.
- [27] 房茂金. 基于极化相参雷达的抗组合干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.  
FANG M J. *Study on the Suppression of Compound Jamming Based on Polarization Coherent Radar*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [28] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

ZHOU Z H. Machine Learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)

- [29] KROGAGER E. New decomposition of the radar target scattering matrix[J]. Electronics Letters, 1990, 26(18): 1525-1532.

#### 作者简介



**吴国庆** 男,1997年8月出生于湖北省随州市. 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: guoqing51001@163.com



**王罗胜斌(通讯作者)** 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讲师. 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

**庞晨** 男,1986年10月出生于湖北省汉川市. 现为国防科技大学电子科学学院副研究员. 主要研究方向为极化相控阵雷达系统、极化精密测量.

E-mail: tg20462046@163.com

**李永祯** 男,1977年12月出生于内蒙古化德县. 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

**王雪松** 男,1972年10月出生于内蒙古包头市. 现为国防科技大学电子科学学院教授,博士生导师,中国电子学会高级会员. 主要研究方向为雷达极化信号处理、雷达电子战等.

E-mail: wxs\_1019@vip.sina.com