

海面角反射体电磁散射特性与雷达鉴别研究进展与展望

李郝亮 陈思伟*

(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

摘要: 雷达导引头是精确制导武器末制导的核心设备, 具有作用距离远、不受天气影响等重要优点, 在保证导弹打击精度方面发挥着重要作用。海面角反射体具有与舰船目标散射逼真度高、作战效费比高等优良特性, 已成为雷达导引头的主要诱骗干扰手段之一, 严重影响雷达目标探测性能。因此, 如何准确高效地实现海面角反射体雷达鉴别是雷达导引头精确打击的难点和重点之一。角反射体电磁散射特性研究是提升角反射体雷达鉴别能力的基础。该文首先介绍了海面角反射体装备及战术运用; 针对海面角反射体的电磁散射特性研究进展进行了总结; 重点归纳梳理了海面角反射体雷达鉴别技术的两类主流方法, 总结其特点及存在的问题; 最后对海面角反射体雷达鉴别研究的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 电磁散射; 干扰鉴别; 海面角反射体; 舰船目标; 特征提取; 深度学习

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2023)04-0738-24

DOI: 10.12000/JR23100

引用格式: 李郝亮, 陈思伟. 海面角反射体电磁散射特性与雷达鉴别研究进展与展望[J]. 雷达学报, 2023, 12(4): 738-761. doi: 10.12000/JR23100.

Reference format: LI Haoliang and CHEN Siwei. Electromagnetic scattering characteristics and radar identification of sea corner reflectors: Advances and prospects[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(4): 738-761. doi: 10.12000/JR23100.

Electromagnetic Scattering Characteristics and Radar Identification of Sea Corner Reflectors: Advances and Prospects

LI Haoliang CHEN Siwei*

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: The radar seeker is the core equipment for the terminal guidance of precision-guided weapons. It has significant benefits, such as long range and weather resistance, and plays an important role in ensuring the accuracy of missile strikes. Sea corner reflectors have excellent characteristics, such as high scattering similarity of ship targets and combat effectiveness ratio, and they have emerged as one of the primary sources of interference for radar seekers with major consequences for radar detection performance. Therefore, a difficult and critical issue in ensuring the accuracy of radar seekers is accurately and efficiently identifying sea corner reflectors. Research on the electromagnetic scattering characteristics of corner reflectors is the foundation for improving radar identification capability. This paper first introduces sea corner reflector equipment and its tactical application. The research progress in elucidating the electromagnetic scattering characteristics of sea corner reflectors is then summarized. In addition, the research achievements in radar technology for identifying sea corner reflectors are summarized, and the characteristics of existing problems pertaining to various methods are presented. Simultaneously, their future development trends of the technology are discussed.

Key words: Electromagnetic scattering; Jamming identification; Sea corner reflector; Ship target; Feature extraction; Deep learning

收稿日期: 2023-05-31; 改回日期: 2023-07-05; 网络出版: 2023-07-27

*通信作者: 陈思伟 chenswudt@163.com *Corresponding Author: CHEN Siwei, chenswudt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(62122091, 61771480), 国家部委基金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62122091, 61771480), The National Ministries Foundation

责任编辑: 杨健 Corresponding Editor: YANG Jian

1 引言

精确制导武器的作战效能是决定战争胜败的关键，世界各军事强国都在大力加强精确制导技术的研究和应用。导引头是精确制导武器的“眼睛”，引导导弹实现对目标的精准打击。雷达作为一种主动传感器，可支持导引头在复杂战场环境下实现全天候、全天候、远距离、高精度制导和打击的作战需求^[1-5]。因此，雷达导引头成为精确制导武器末制导的核心设备，在保证现代导弹打击精度方面发挥着重要作用。

在对海攻击时，雷达导引头面临着复杂电磁干扰的严重威胁。除了拦截弹硬毁伤方案外，舰载/舷外有源诱饵^[6-8]、箔条^[9]和角反射体^[10-12]是3种最主要的诱骗干扰手段。其中，海面角反射体具有易携带、便于存储使用等优点，布放后能快速形成雷达假目标，且具有全角域稳定的电磁能量反射性能，覆盖频段广，干扰持续时间长^[3]，在散射特性、频谱特性、极化特性及抗相参性等方面均具有自身优势，可对雷达制导的武器系统产生明显的干扰、欺骗和诱偏作用。因此，海面角反射体得到了国际主要军事强国的高度重视和实际部署^[11-14]。例如，英国研制的海面角反射体干扰系统(又被称为“橡皮鸭”)，已出口至美国、法国、荷兰、西班牙等国家，并装备于“伯克”级等主战舰艇。

海面角反射体的应用对反舰导弹突防构成了极大威胁。作为攻击方的反舰导弹，抗干扰技术是其核心能力之一，是决定战场成败的关键^[4]。然而，由于角反射体信号与目标信号在时域、频域、空域的显性特征差异严重压缩，角反射体雷达鉴别成为反舰对抗中的重难点问题。因此，研究海面角反射体雷达鉴别技术意义重大。角反射体电磁散射特性研究是提升角反射体雷达鉴别能力的基础。通过揭示舰船和角反射体的电磁散射特性差异是实现角反射体雷达鉴别的重要途径，当前已经形成了一系列代表性方法。本文从海面角反射体装备与战术运用、电磁散射特性以及雷达鉴别3个方面，对海面角反射体雷达鉴别技术的研究进行全面综述，并总结出未来的技术发展趋势。

2 海面角反射体装备与战术运用

2.1 海面角反射体装备发展

在海战场中，角反射体装备大量涌现。海面角反射体的首次实战应用是在1982年的英阿马岛海战中^[12]。由于表现出良好的干扰性能，世界各国相继开始研制和部署海面角反射体，其中海面充气式角反射体成为主流装备。

海面充气式角反射体通常由轻质复合材料制成，表面涂覆金属，折叠收缩存放，使用时依靠自身重力或者高压气体进行布放，离舷后自动充气展开成型，漂浮于海面形成干扰诱饵。比较有代表性的是英国的DLF系列。20世纪80年代初，英国埃文宇航公司研发出舷外充气式角反射体干扰系统DLF-1^[15]。DLF-1系统采用在甲板上先充气后投放的方式，由于无法快速部署且性能不佳，该公司又先后研制出DLF-2和DLF-3等系统。DLF-2研制于20世纪80年代中期，该角反射体在结构上采用八象限三角形对称结构。DLF-2的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)相当于一艘护卫舰，可以在X波段形成2000~3000 m²的RCS，在4级海况条件下作用时间可达3小时^[12]。由于具有较强的作战性能，该系统已出口到美国、法国、意大利等海军。美国海军引进后命名为AN/SLQ-49(如图1所示)，并应用于1991年海湾战争。DLF-3于1996年开始投入使用，采用二十面体三角形结构，由60个大小相等的等腰直角三角形构成(如图2所示)。DLF-3的雷达回波反射能力更强，且RCS在全角域范围内更稳定，同时干扰频率范围可覆盖2~40 GHz^[4,6]。该系统采用高压气体弹射诱饵载荷的方式，并使用拉火索来激活内部充气系统为角反射体充气，可在数秒内快速成型部署。DLF-3目前仍在服役，并已装备于英海军护卫舰和驱逐舰等多型主战舰艇。2013年，DLF-3出口至美国，经改进后命名为MK-59充气式角反射体系统^[13]，并装备于“伯克”级等导弹驱逐舰上。DLF-3角反射体装备弥补了先前角反射体方向性、能量以及工作带宽的不足，能够更加逼真地模拟真实舰船目标的散射特征，欺骗作用更加明显。

2.2 海面角反射体战术运用研究

根据干扰原理与时机不同，海面角反射体可对末制导雷达形成冲淡式干扰和质心式干扰两种主要干扰样式^[16]：(1)冲淡式干扰应用于末制导雷达开机前。在末制导雷达的搜索范围内施放多个角反射体假目标，从而使雷达在搜索阶段捕捉舰船目标的概率降低。(2)质心式干扰应用于末制导雷达跟踪

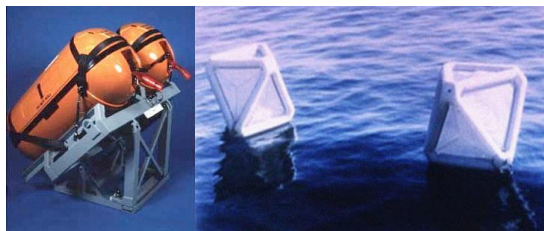


图1 AN/SLQ-49充气式角反射体系统^[6]

Fig. 1 AN/SLQ-49 inflatable corner reflector system^[6]

阶段。施放的角反射体与舰船同处在末制导雷达的波束内和距离波门内。此时末制导雷达因无法分辨两个目标，从而跟踪舰船和角反射体的能量质心。随着舰船的快速机动，末制导雷达的跟踪点逐渐落在角反射体上，最终丢失舰船目标。图3为冲淡式干扰和质心式干扰示意图。

海面角反射体的战术运用主要包括角反射体投放时机、投放距离、布放间隔、布放数量以及舰船机动方向、机动速度等因素，通常采用数据建模开展研究^[17]。当舰上电子战系统探测到雷达导引头威胁时，舰船需要在数秒内快速做出对抗策略。只有迅速获取敌方信息，准确把握角反射体投放时机，才能增加干扰的成功率^[18-23]。为增强角反射体阵列干扰效能，研究人员首先参照箔条开展了针对浮空式角反射体阵列布放寻优的研究^[24-27]。文献^[28]利用探索性分析方法建立了浮空式角反射体质心干扰的探索空间体系。针对海面角反射体，文献^[29]综合利用RCS，高分辨率距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)和极化特征，开展了角反射体阵列寻优研究。该研究结果表明，11个角反射体两两间隔5 m布放，能够发挥更好的干扰效果。为了更进一步优化角反射体干扰策略，文献^[17]仿真

模拟了舰船在面临导弹追踪时，角反射体投放和舰船规避的动态过程，为角反射体质心干扰的实际应用提供了理论依据。

除此之外，角反射体还通常与箔条等其他无源干扰和有源干扰配合使用。作为重要无源干扰手段之一，箔条在海上电子战中一直有着广泛的应用。利用角反射体和箔条组合干扰方式实现干扰互补，通过采取一种动静结合、隐透相称的质心式干扰策略，可以解决角反射体干扰效果受限于自身展开时间的问题^[30]。当前，世界上先进反舰导弹多采用复合制导方式以提高制导精度。针对主被动复合制导雷达，研究人员提出一种结合有源干扰的复合干扰策略^[31,32]。具体地，利用舰载有源干扰对末制导雷达实施距离波门拖引，同时在偏离舰船方向上投掷复合诱饵。该复合诱饵由充气式角反射体和有源干扰机组成，可使得主被动雷达均失去跟踪目标，从而保障我方舰船的安全。

因此，随着海面角反射体装备的不断改进以及战术运用，角反射体对抗难度越来越大。此时角反射体雷达鉴别技术尤为关键，这对提高雷达导引头系统在复杂电磁环境中的打击能力和实用效能，具有重要的理论价值和现实意义。

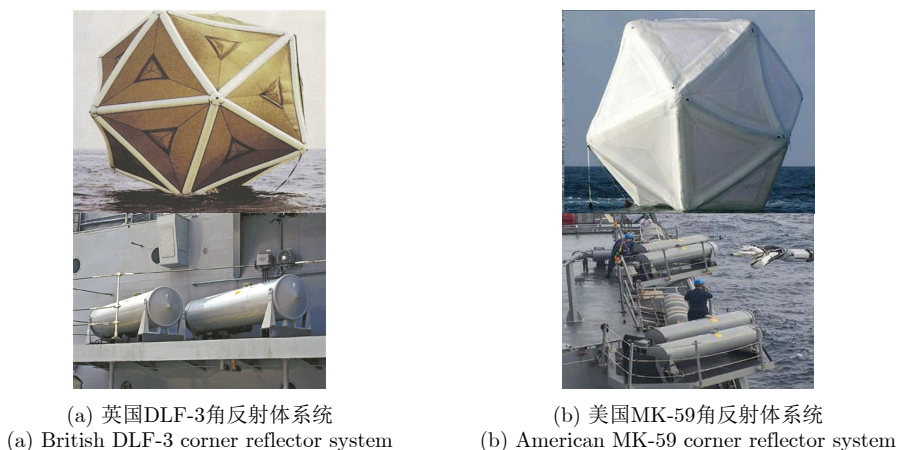


图 2 海面充气式角反射体系统^[12]

Fig. 2 Sea inflatable corner reflector system^[12]

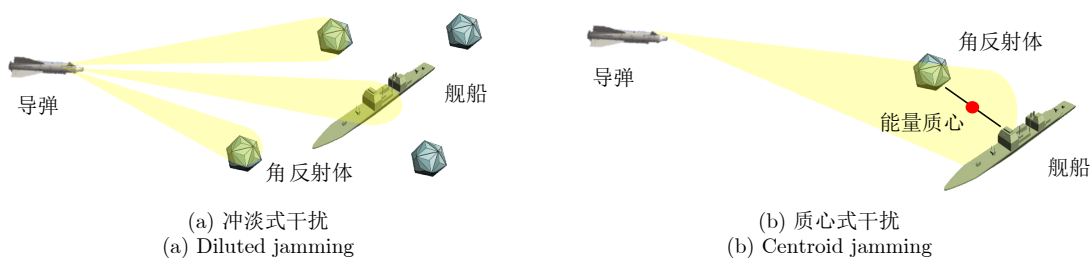


图 3 冲淡式干扰和质心式干扰示意图

Fig. 3 Diagram of diluted jamming and centroid jamming

3 海面角反射体电磁散射特性研究

电磁散射特性研究有助于准确解译目标的电磁散射机理，为雷达目标检测与识别提供必要的理论支撑^[33-36]。为实现对角反射体电磁散射特性的准确分析，首先需要获取高置信度的目标数据。相较于目标实验测量^[37,38]和微波暗室缩比测量^[17,39-41]，建模仿真具有低成本、易重复的优势，成为研究角反射体电磁散射特性的重要手段之一。建模仿真可分为理论建模仿真和电磁软件仿真两种主要方式。

(1) 理论建模仿真

基于理论建模仿真的电磁散射计算方法主要包括低频数值算法和高频近似算法。低频数值算法可以根据麦克斯韦方程组获得计算结果，通常具有较高的精度，如矩量法(Method of Moment, MoM)^[42]、有限元法(Finite Element Method, FEM)^[43]和时域有限差分法(Finite Difference Time-Domain, FDTD)^[44]等。但是上述低频数值算法计算过程复杂且难以求解大尺寸目标和高频散射。

高频近似算法是基于电磁学中的简化模型或者假设对求解参数进行近似，从而提高计算效率并降低内存需求。研究人员分别将几何光学法(Geometrical Optics, GO)^[45]、物理光学法(Physical Optics, PO)^[46-48]、迭代物理光学法(Iterative Physical Optics, IPO)^[49]、几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)^[50]、物理绕射理论(Physical Theory of Diffraction, PTD)^[51]和弹跳射线法(Shooting and Bouncing Rays, SBR)^[52-54]等高频近似算法用于角反射体的电磁散射计算。此外，研究人员尝试将不同算法特别是性能互补的算法进行融合，相继提出了基于GO-区域投影(Area Projection, AP)混合法^[55-58]、PO-AP混合法^[59,60]、SBR-MoM混合法^[61]、IPO-PTD混合法^[62]和基于PO-SBR^[63]混合法的角反射体电磁散射计算方法，有效提升了角反射体的电磁计算精度和计算效率。

在实际应用场景中，角反射体干扰漂浮于海面上，复杂海面与角反射体存在多次散射的耦合效应，这使得海面和角反射体的复合电磁散射建模成为需要解决的重要难题^[34,36,64]。4路径模型是模拟海面与目标之间多径效应的经典模型^[65]。文献^[66]利用PO算法和4路径模型计算了海面与目标的复合总散射场，图4为海面角反射体多路径散射示意图。路径1为目标单独的散射(根据目标结构考虑多次散射)；路径2为“雷达-海面-目标-雷达”的多次散射；路径3为“雷达-目标-海面-雷达”的多次散射；路

径4为“雷达-海面-目标-海面-雷达”的多次散射。同时结合目标在海面的6自由度运动模型和对应参数下的海杂波，实现了海面目标动态回波仿真。在此基础上，研究人员综合分析了角反射体和舰船目标的时域、频域和时频域特性。文献^[67]提出了一种基于PO-SBR的复合电磁散射建模方法，有效提高了海面和角反射体复合电磁散射的计算效率。基于该方法，研究人员分析了雷达参数和海面环境对海面角反射体复合电磁散射特性的影响。但是频域算法计算效率较低，而时域计算方法在宽频段和瞬态计算中具有天然优势。文献^[68]采用时域弹跳射线法(Time-Domain SBR, TDSBR)仿真了“海面-舰船-角反射体”复合模型的时域电磁散射特性。图5为入射角为45°，方位角为0°，脉冲中心频率为10 GHz，带宽4 GHz的TDSBR时域回波仿真结果。场景中角反射体阵列沿航行方向排列于舰船后方。从图5(a)可以看出，3个角反射体产生了3个离散的尖峰；舰船目标由于结构复杂，存在多个散射中心，因此其回波呈现为多峰。图5(b)为宽频带RCS结果。可以看出，RCS随频率变化呈现较大起伏，且RCS主要来源于舰船和角反射体的贡献。

(2) 电磁软件仿真

XPATCH, FEKO, CST等电磁计算仿真软件是获取雷达目标全极化数据的有效手段^[69-75]。基于电磁计算数据，研究人员开展了大量针对角反射体的电磁散射特性分析。文献^[69,76]仿真分析了制作偏差对三角形角反射体RCS的影响，为角反射体的生产加工和实际应用提供了指导。文献^[77]对二十面体角反射体的RCS进行统计分析，并验证了Burr模型对二十面体角反射体RCS具有较好的拟合效果。图6和图7为八面体角反射体和二十面体角反射体全空域RCS电磁仿真结果。仿真频率为10 GHz，俯仰角为0°~90°，方位角-45°~45°。可以看到，

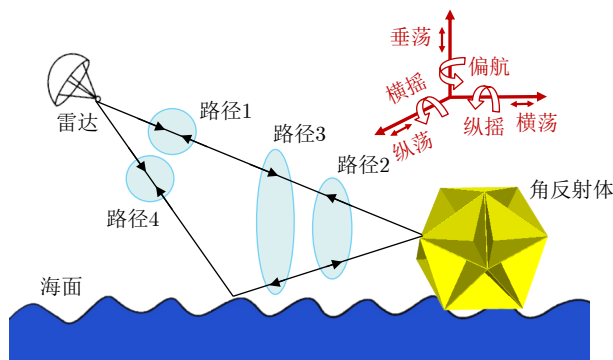


图4 海面角反射体多路径散射示意图

Fig. 4 Schematic of multipath scattering from sea corner reflector

两种角反射体的共极化通道的RCS明显高于交叉极化通道。二十面体角反射体的共极化通道的RCS在整个空域内变化更为稳定,覆盖范围更广。文献[78-81]进一步研究了角反射体双站RCS特性,揭示了双基地雷达与角反射体之间的几何关系对角反射体RCS的影响规律。文献[82]结合海面生成模型构建了角反射体/舰船与不同海况海面的复合三维模型并进行电磁计算,复合模型示意图如图8所示。图9和图10为仿真频率10 GHz时海面与角反射体复合模型的极化散射分布。从图中可以看出,海况对海面与角反射体的复合散射影响比较明显。随着海况等级的增大,共极化通道的RCS起伏加快,交叉极化通道的RCS增大。

基于电磁计算数据,还可以对“海面-舰船-角

反射体”复合场景进行HRRP和二维成像仿真。图11给出了“海面-舰船-角反射体”复合模型的HRRP仿真结果。其中,雷达入射俯仰角分别为 30° , 40° 和 50° ,雷达方位角为 20° ,中心频率10 GHz,带宽100 MHz。沿船头方向为方位角 0° ,垂直甲板向下为俯仰角 0° 。场景中设置了3个二十面体角反射体和一艘舰船,角反射体阵列沿舰船航行方向排列且与舰船相距一定间隔。海面大小 $300\text{ m}\times 200\text{ m}$ 。从图中可以看到,舰船目标HRRP与角反射体阵列都为离散的尖峰组成,两者较为相似且难以区分。随着俯仰角的变化,舰船目标HRRP各散射中心变化明显,而角反射体变化较小。图12给出了“海面-舰船-角反射体”复合缩比模型的二维成像仿真结果。其中雷达俯仰角为 30° ,中心频率为10 GHz,

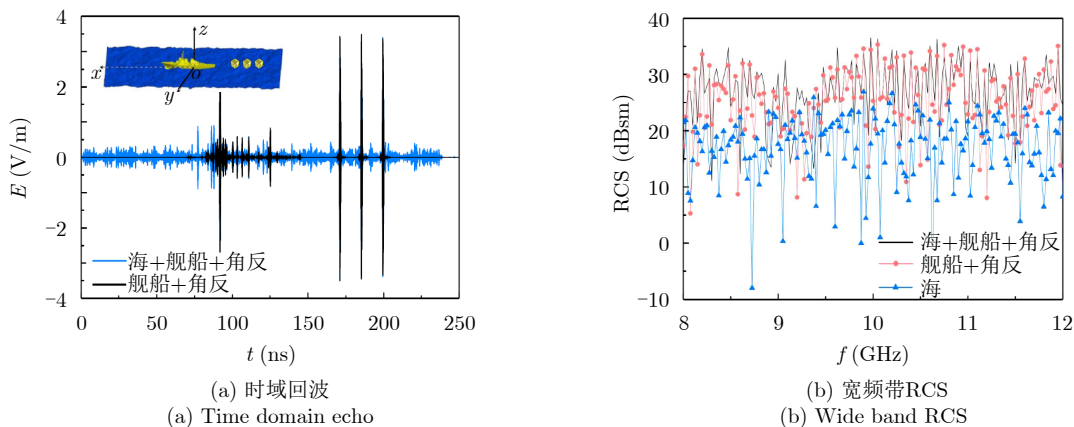


图5 TDSBR时域回波仿真结果^[68]

Fig. 5 Time domain echo simulation results by TDSBR^[68]

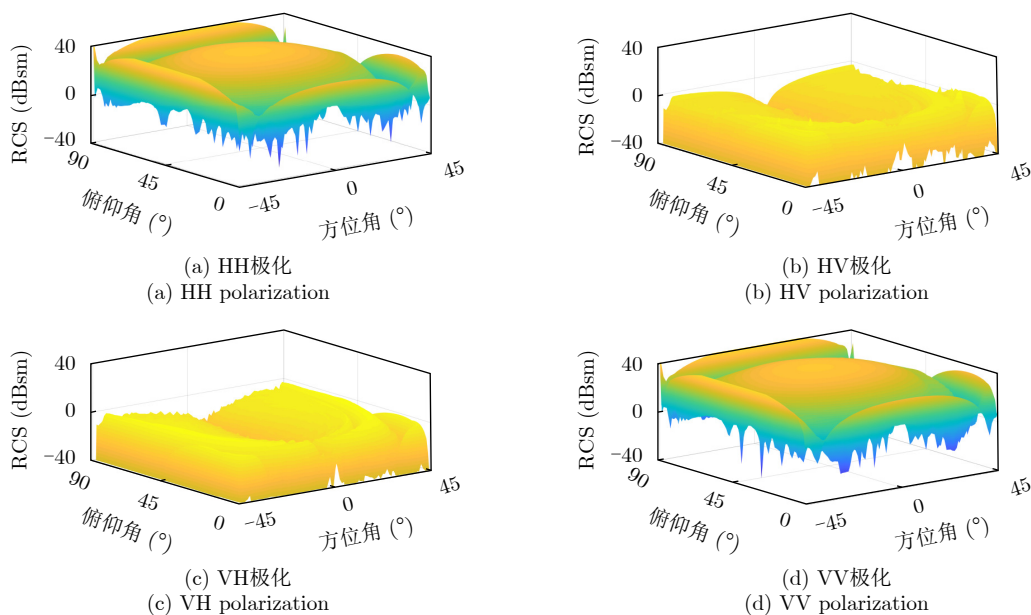


图6 八面体角反射体RCS仿真结果

Fig. 6 RCS simulation results from octahedral corner reflector

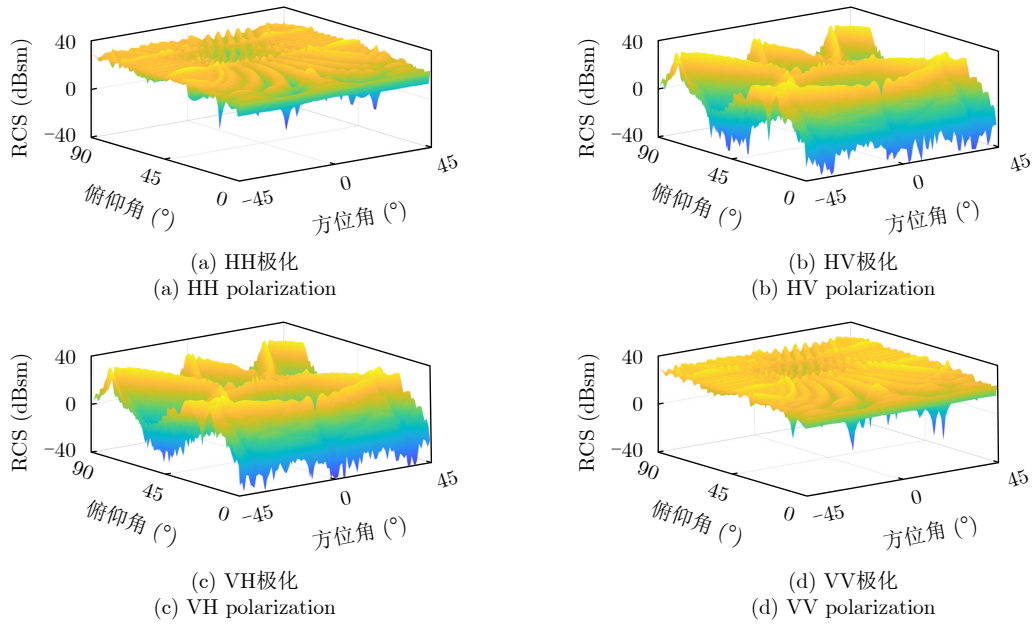


图7 二十面体角反射体RCS仿真结果

Fig. 7 RCS simulation results from icosahedral corner reflector

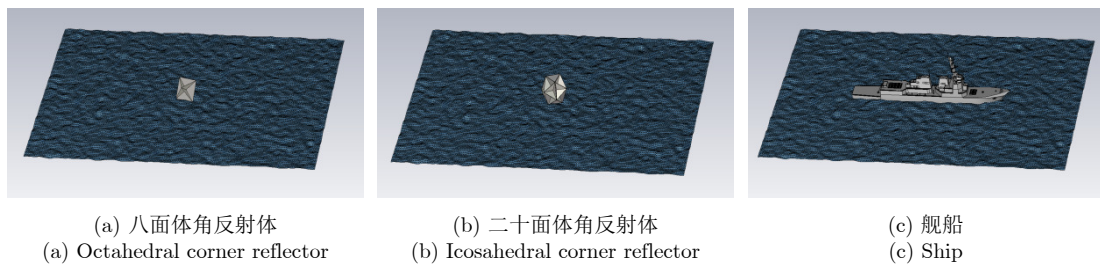


图8 海面与目标的复合模型^[82]

Fig. 8 Composite models from sea surface and target^[82]

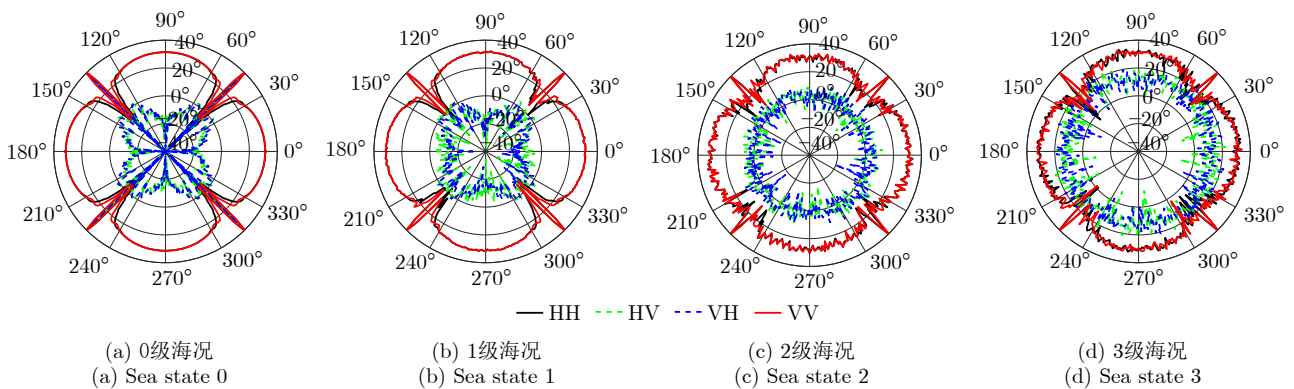


图9 海面与八面体角反射体复合模型的极化散射分布^[82]

Fig. 9 Polarimetric scattering distribution of composite model from sea surface and octahedral corner reflector^[82]

距离和方位分辨率为0.15 m。场景中设置了6对二十面体角反射体和一艘舰船，海面大小15 m×10 m。图12(a)和图12(b)分别为雷达入射方位角0°和45°的二维成像结果。可以看到入射方位角为0°时，舰船和角反射体散射较强；而当入射方位角为45°时，海面散射强度增大，海面与目标耦合作用增强。

此外，针对当前角反射体数据样本不足的问题，文献[14]结合实测极化雷达数据和典型角反射体电磁计算数据，通过信号级成像叠加仿真生成了不同场景的极化雷达角反射体干扰仿真数据，其构建流程如图13所示。电磁仿真计算为角反射体电磁散射特性分析与鉴别研究提供了丰富的数据样本。

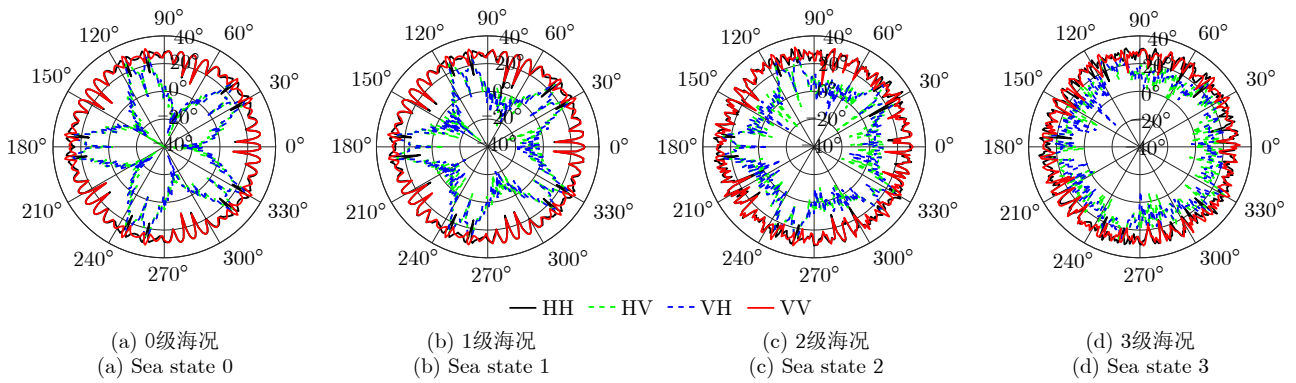


图 10 海面与二十面体角反射体复合模型的极化散射分布^[82]

Fig. 10 Polarimetric scattering distribution of composite model from sea surface and icosahedral corner reflector^[82]

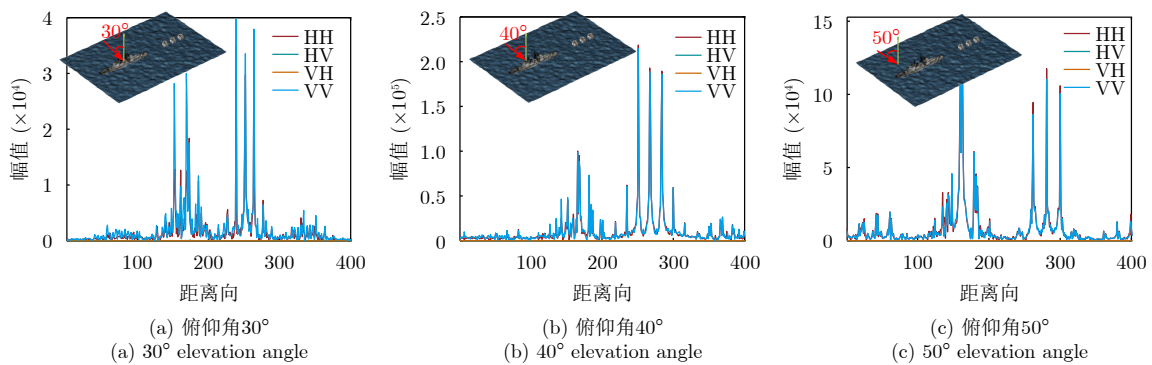


图 11 “海面-舰船-角反射体”复合模型的HRRP仿真结果

Fig. 11 HRRP simulation results of the ‘sea surface-ship-corner reflector’ composite model

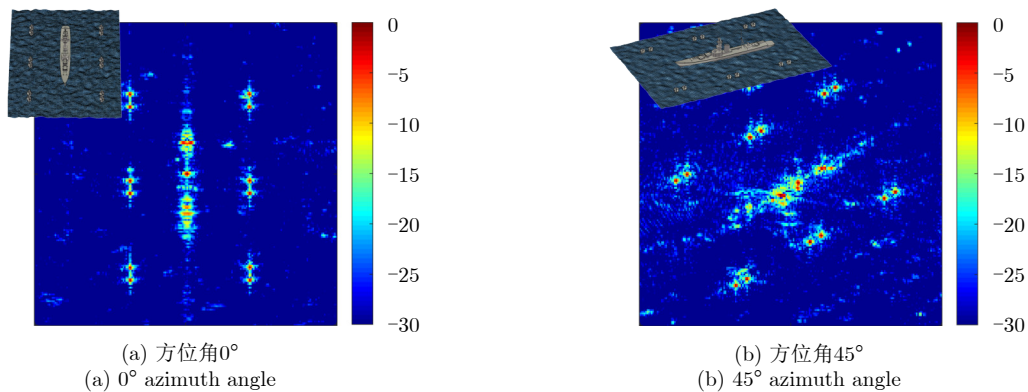


图 12 “海面-舰船-角反射体”复合模型的二维成像仿真结果

Fig. 12 2D imaging simulation results of the ‘sea surface-ship-corner reflector’ composite model

4 海面角反射体雷达鉴别方法

海面角反射体雷达鉴别的常用方法是利用舰船目标和角反射体干扰的散射特性差异，人工提取出具有鉴别能力的特征，并利用分类器来确定干扰和目标类型。该类方法包括了基于HRRP特征的鉴别方法、基于运动特征的鉴别方法和基于极化特征的鉴别方法。随着深度学习理论和方法的不断发展与应用，基于数据驱动的深度学习方法能够自动提取

特征，且可以获得更好的鉴别效果。目前，海面角反射体雷达鉴别方法大致分为基于特征提取的鉴别方法和基于深度学习的鉴别方法两类。

4.1 基于特征提取的角反射体鉴别方法

(1) HRRP特征

雷达通过发射大带宽信号，可以获得目标距离上的高分辨率。HRRP可以反映目标的几何形状、

尺寸大小、材料等信息^[83]。由于舰船目标结构复杂，在电磁波照射下等效于多散射中心组成的连续扩展分布，其回波呈现为多峰。角反射体干扰等效于离散的目标。通过提取HRRP的结构特征可以实现舰船目标和角反射体的有效辨识。受该思路启发，文献[84]基于强散射点包络特征提出了连续统计跟踪算法。通过连续统计相对最强散射点窗内高于阈值的单元数并与设定的单元数阈值进行比较，从而有效对抗角反射体质心干扰。文献[38]对舰船和单个角反射体HRRP实测数据进行分析，并结合支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类器开展了鉴别实验。针对角反射体阵列干扰，文献[66]提取了散射中心数目、径向尺寸和散射对称性值等3个HRRP特征对角反射体阵列和舰船目标的可分性进行对比分析。图14给出了上述3个特征在对海实测数据中的统计结果。数据中包含了角反射体阵列和一艘舰船，角反射体阵列由两个充气式二十面体角反射体组成。可以看到，舰船的散射中心数目、径向尺寸和散射对称性值都大于角反射体阵列，且都具有较好的可分性。文献[85]提取了7个与目标物理结构密切相关的平移不变特征构建特征向量，用于舰船目标和角反射体阵列的鉴别。随着压

缩感知技术的发展，文献[86]利用稀疏字典学习对目标HRRP进行重构，提出一种基于重构误差比值的角反射体鉴别方法。为便于研究人员参考，表1归纳了用于角反射体鉴别的HRRP特征。然而，由于HRRP敏感于雷达观测角度，且随着角反射体数量的增加，舰船与角反射体阵列在HRRP中的差异减小，进而导致上述基于HRRP特征的鉴别方法在实际角反射体阵列对抗应用中并不稳健。

(2) 运动特征

当投放角反射体后，舰船会进行合理的战术机动。角反射体和舰船目标运动速度的差异会导致多普勒谱的变化。基于上述原理，文献[66]对舰船目标和角反射体干扰的频域功率谱特性进行了仿真分析，指出角反射体干扰的多普勒展宽小于舰船目标，并提取了功率谱变化区间特征用于角反射体鉴别。文献[87]利用多普勒频移计算雷达与目标的相对径向速度，并提出了一种基于速度线性方程组总剩余范数的真假目标识别算法。文献[84]综合利用舰船和角反射体干扰的多普勒频移和多普勒展宽的特性差异进行角反射体干扰鉴别，并在车载实测数据上进行了验证，结果如图15所示。然而上述方法只适用于舰船目标和角反射体存在速度差异的情况下。

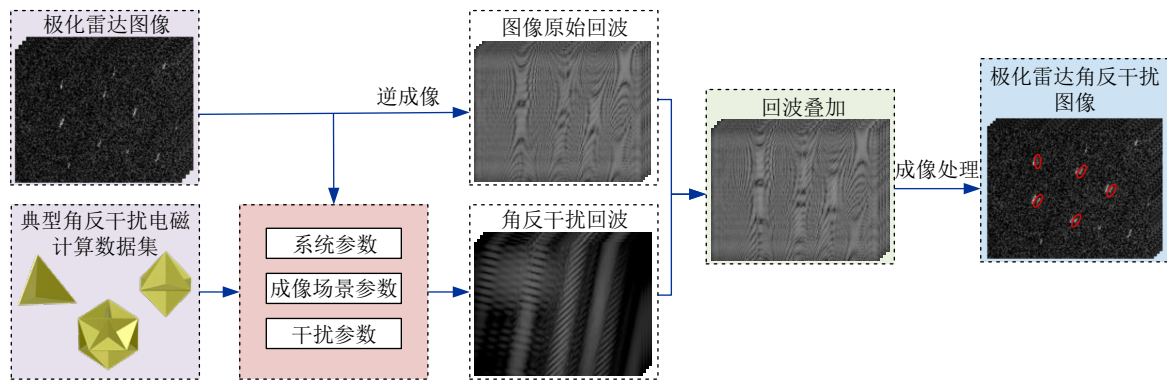


图 13 极化雷达角反射体干扰仿真数据构建流程

Fig. 13 Flowchart of polarimetric radar corner reflector jamming simulation data construction

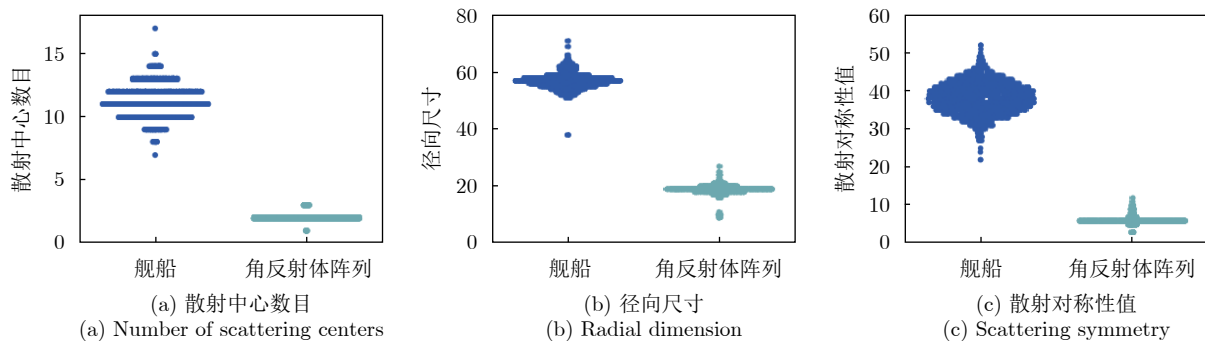


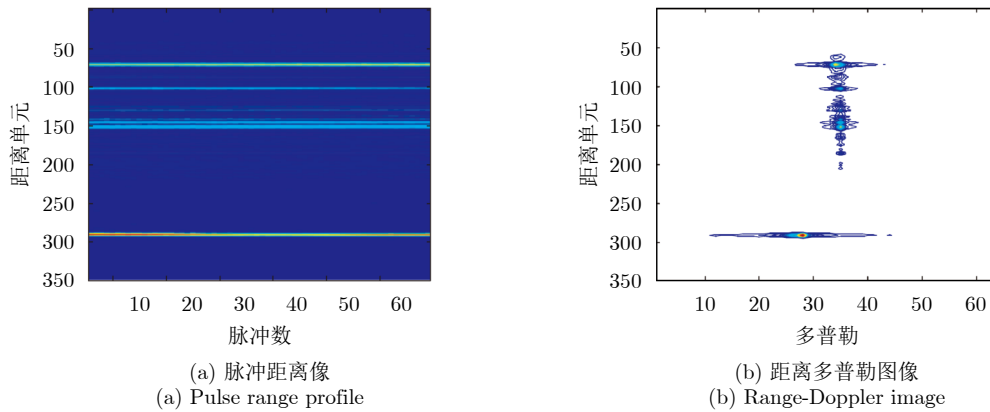
图 14 HRRP特征可分性

Fig. 14 Separability of HRRP features

表 1 用于角反射体雷达鉴别的HRRP特征归纳表

Tab. 1 Summary of HRRP features for corner reflector radar identification

特征	特征公式	变量含义
径向尺寸	$RL = \Delta d \cdot (n_2 - n_1)$	Δd 为距离分辨率, n_1 和 n_2 分别为目标第1个和最后一个距离单元序号
散射重心	$SM = \left(\left(\sum_{n=n_1}^{n_2} n \cdot x(n) / \sum_{n=n_1}^{n_2} x(n) \right) - n_1 \right) / (n_2 - n_1)$	$x(n)$ 为目标距离单元幅值
散射中心数目	$NP = \sum_{n_1}^{n_2} u(n)$	$u(n)$ 为散射中心标记
最强散射中心间距离	$DPK = \Delta d \cdot m_1 - m_2 $	m_1 和 m_2 为最强的两个散射中心对应的序号
最强散射中心距目标最前端的距离	$DEP = \Delta d \cdot (m_1 - n_1)$	/
散射中心幅值分布熵	$EA = - \sum_{i=1}^{NP} p_{m_i} \cdot \ln p_{m_i}$	p_{m_i} 为序号 m_i 的强散射中心幅值
散射中心位置分布熵	$EP = - \sum_{i=1}^{NP} m'_i \cdot \ln m'_i$	$m'_i = (m_i - n_1) / (n_2 - n_1)$
散射对称性值	$SYM = \sum_{n=n_1}^{n_0} x(n) ^2 / \sum_{n=n_0}^{n_2} x(n) ^2$	$n_0 = (n_1 + n_2) / 2$

图 15 基于多普勒特性鉴别角反射体干扰^[84]Fig. 15 Corner reflector jamming identification based on Doppler characteristics^[84]

拖曳式角反射体的运动方向和速度与舰船目标近似相同, 这种情况下上述方法将会失效^[16]。

此外, 目标会随海浪起伏伴有进动和摆动等形式的运动, 加之舰船自身产生微动的零部件多, 使舰船具有丰富的微动特性。微动会对电磁波频率进行调制, 从而引发不同目标回波具有不同的微多普勒^[88,89]。通过短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)、平滑伪魏格纳-维尔分布(Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution, SP-WVD)等时频分析方法可以提取目标微动信息。文献[66]对海面舰船和角反射体的时频特性开展了研究, 图16为3级海况下仿真的舰船和角反射体时频分布图。仿真的雷达中心频率为17 GHz, 带宽为100 MHz, 脉冲重复周期为150 μ s。可以看出, 角反射体的微多普勒频率随时间变化幅度较大, 且近似于正弦曲线; 而舰船的微多普勒频率随时间变

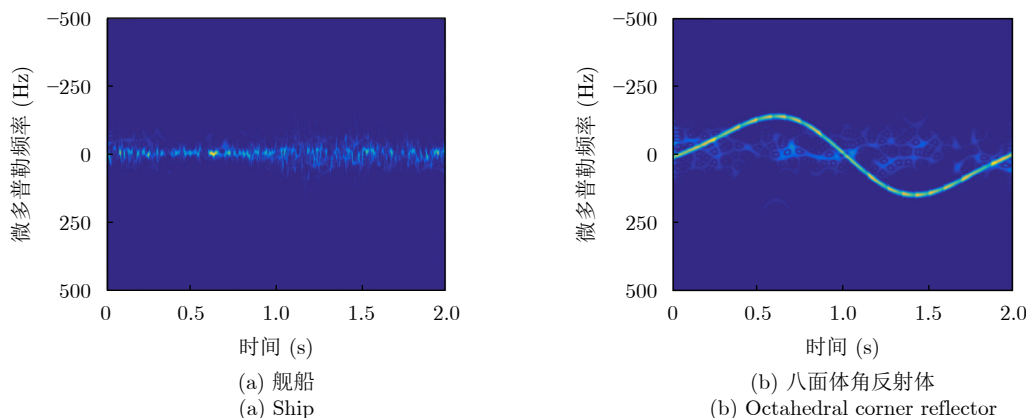
化幅度很小。两者微多普勒的差异源于舰船和角反射体本身尺寸和重量的不同。相比于舰船, 角反射体随海浪起伏较大且起伏速度快。文献[90]基于X波段雷达导引头实测数据开展分析并得到了相同的特性结果。由于目标的微动特征能反映目标结构、尺寸等内在属性, 且测量不受雷达信号带宽限制^[88], 因此微动特征可以作为角反射体干扰鉴别的又一重要特征参数。

文献[66]提取出用于度量瞬时微多普勒频率震荡幅度的瞬时微多普勒频率全变差:

$$VF = 10 \lg \left(\sum_n |f_N(n) - f_N(n-1)| \right) \quad (1)$$

其中, N 为蒙特卡罗实验次数, $f_N(n)$ 为第 N 次实验第 n 时刻的微多普勒频率。

文献[91]结合海况等级和角反射体载体的水动

图 16 舰船和角反射体时频分布图^[66]Fig. 16 Time-frequency distribution of ship and corner reflector^[66]

力系数，构建了不同海况下海面舰船目标和角反射体的运动仿真模型。通过对目标回波的微多普勒谱进行分析，提取出微多普勒主频率周期特征^[92]：

$$MF = \frac{\sum_{d=1}^D d \cdot MD(d)}{\sum_{d=1}^D MD(d)} \quad (2)$$

其中， $MD(d)$ 为微多普勒谱， D 为傅里叶变换的采样点数。MF表征了目标微多普勒的主频率分量，反映了目标的固有谐振频率大小。舰船目标由于尺寸和重量较大，摆动幅度小于角反射体，故二者的微多普勒主频率周期特征存在差异。通过设定鉴别阈值可有效区分舰船和角反射体干扰，鉴别结果如图17所示。可以看出，在信噪比大于0 dB的条件下，角反射体干扰的正确鉴别率大于95%。

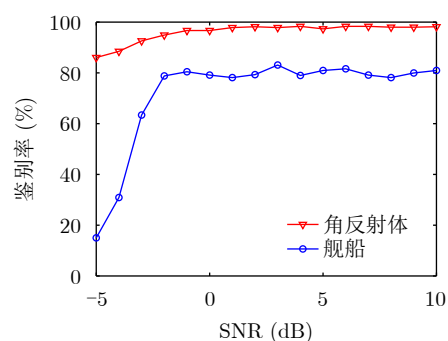
除上述特征外，文献^[37]还从目标回波的微多普勒谱中提取出时频谱熵和微多普勒半周期频差最大值用于描述目标的时频特性：

$$EF = - \sum_{t_m=1}^T \sum_{f=0}^{f_s} \rho(t_m, f) \lg(\rho(t_m, f)) \quad (3)$$

$$DF = \max_{t_m} \{ |f(t_m + T_m/2) - f(t_m) - \bar{f}_d/2| \} \quad (4)$$

其中， $\rho(t_m, f)$ 为微多普勒谱密度， $f(t_m)$ 为瞬时频率值， \bar{f}_d 为周期频差平均值。

基于MF、EF和DF 3种微多普勒特征，研究人员提出了一种结合三参数的角反射体干扰鉴别方法^[37]。然而，基于微多普勒特征的角反射体干扰鉴别方法受海面强杂波与目标运动影响较大，对目标微多普勒的观测本身需要的条件也非常苛刻，可能导致实际鉴别效果有限。

图 17 基于MF特征的鉴别结果^[92]Fig. 17 Identification results with MF feature^[92]

(3) 极化特征

极化是电磁波的本质属性，是幅度、频率、相位外又一可资利用的重要信息。雷达目标具有变极化效应，即目标回波的极化状态相对于入射波会发生改变，其与目标的姿态、尺寸、结构、材料等物理属性密切相关。在水平垂直极化基(H, V)下，极化雷达获取的目标全极化信息可以由极化散射矩阵表征：

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， S_{HV} 表示垂直极化发射、水平极化接收的复散射系数，矩阵中其他3个元素可类似定义。极化信息的处理和利用对提升雷达导引头的探测能力具有极大潜力。

极化目标分解是目标极化散射建模与解译的主流理论工具^[93-95]。相干极化目标分解通常被用于人造目标解译，代表性方法有Pauli分解^[96]、Krogager分解^[97]和Cameron分解^[98]。由于几何结构上具有显著不同的差异，舰船和角反射体具有不同的极化散射机理。角反射体主要以奇次散射为主，而舰船目标主要以偶次散射为主，且包含表面散射、体散

射、螺旋散射等多种散射机理。通过分解得到的极化参数可以用来区分舰船目标和角反射体。基于上述原理,文献[99,100]利用Krogager分解特征开展了角反射体干扰鉴别。考虑到海杂波对目标极化散射解译的影响,文献[101]优化了舰船的偶次散射模型和角反射体的奇次散射模型,并结合极化相似性参数实现了对角反射体和舰船的有效区分。然而,单独利用极化信息难以全面反映目标的散射特性,文献[102]利用4个HRRP特征和2个极化特征实现了双极化雷达的角反射体鉴别。文献[103]提出一种基于归一化互信息的全局最优特征选择算法,从39个全极化HRRP特征中优选出辨别力强、冗余度低的特征。图18为利用K最近邻(K-Nearest Neighbor, K-NN)分类器输出的不同特征集尺寸下的目标分类正确率。每条曲线表示不同方位角度域的目标数据。结果表明特征子集尺寸为25时可以达到最高的分类正确率。此外,针对Krogager分解受噪声影响大的问题,文献[104]提出了一种基于主极化的角反射体分解方法,可以在杂波中准确得到角反射体的奇次散射和偶次散射系数。在此基础上,通过构建描述时空特性的均方误差参数,提出了一种基于空-时-

极化联合域的角反射体鉴别方法。但是,雷达目标散射响应具有很强的方位敏感性,极化目标分解方法存在散射机理解译失真问题[93],其鉴别量性能不够稳健。

为了缓解雷达目标散射响应的方位敏感性,研究人员将极化旋转不变特征(Polarimetric Roll-Invariant, PRI)用于角反射体鉴别[105-107],其在绕雷达视线上具有与目标方向无关的重要特性[108]。文献[109]利用Cloude-Pottier极化分解和极化旋转不变特征构建特征向量,并结合SVM实现了较好的角反射体鉴别效果。但是部分极化旋转不变特征敏感于目标尺寸,进而会影响角反射体鉴别效果。

雷达目标的后向散射敏感于目标姿态与雷达视线的相对几何关系,这种散射多样性中也蕴含着丰富的极化散射信息,文献[110,111]提出一种在绕雷达视线旋转域解译目标散射机理的新思路,建立了极化旋转域解译理论,用于挖掘目标散射多样性中的隐含信息,近年来也得到研究人员的高度重视[112-117]。文献[82,118]利用极化旋转域相关方向图解译工具揭示了全方位角度下八面体角反射体和二十面体角反射体的极化旋转域特性演化规律。图19给出了角反射体与舰船的极化旋转域特征流形图。发现在整个俯仰角和方位角范围内,角反射体均有大量满足旋转不变性的区域;而舰船目标通常结构更为复杂,不具备几何结构的中心对称性,因此不具有极化旋转不变性。这给角反射体的准确鉴别提供了新途径。基于此,研究人员开展了角反射体干扰的极化旋转域鉴别研究[14,82,119-121]。通过优选高辨识度的极化鉴别特征量,提出了基于极化相关方向图特征(Polarimetric Correlation Pattern, PCP)的角反射体干扰鉴别方法,并利用极化雷达角反射体干扰仿真数据开展对比实验,鉴别结果如图20所示。图中绿色方框代表正确鉴别的舰船,红色方框代表正确

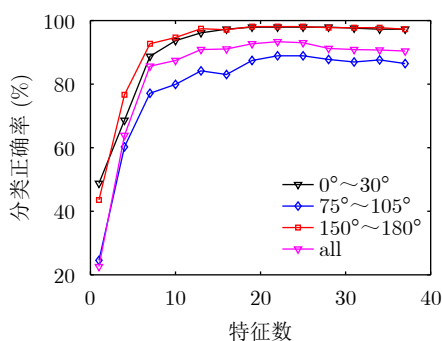


图 18 不同特征集尺寸下的分类正确率^[103]

Fig. 18 Classification accuracy with different feature set sizes^[103]

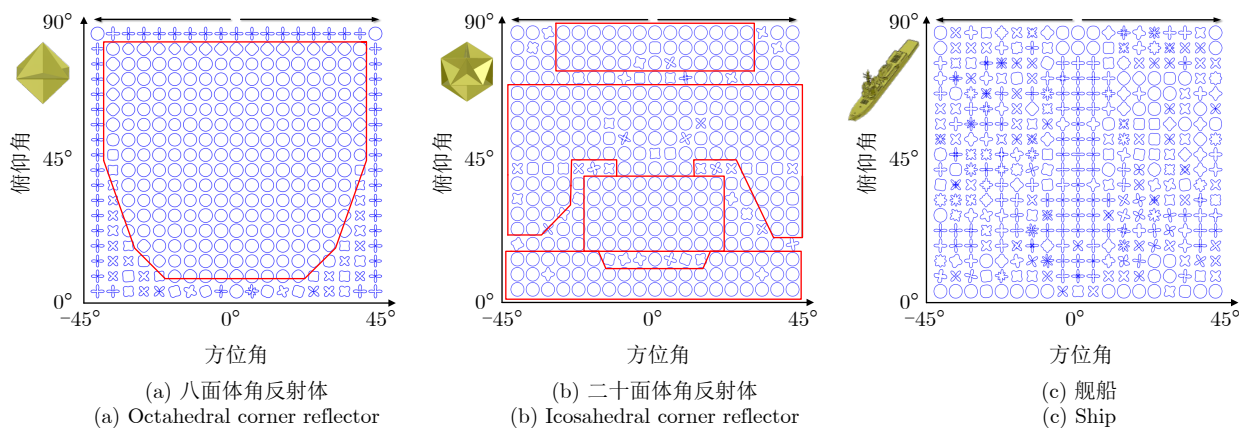


图 19 角反射体与舰船的极化旋转域特征流形图

Fig. 19 Characteristic manifold of corner reflector and ship in polarimetric rotation domain

鉴别的角反射体，黄色方框代表错误鉴别。对比结果验证了PCP方法优势明显。此外，最近有研究表明，通过极化域变焦处理调控雷达收发极化，可以有效提升雷达信息获取能力，从而增强角反射体干扰鉴别的能力^[122,123]。

表2归纳了用于角反射体干扰鉴别的极化特征，以便于研究人员参考。为了定量评估上述极化特征对角反射体干扰的鉴别性能，利用构建的极化雷达角反射体干扰仿真数据开展分析。一般来讲，信干比(Signal-to-Jamming Ratio, SJR)越大表示该极

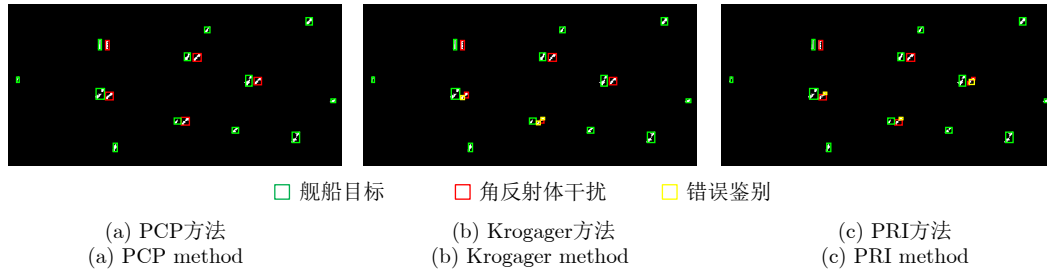


图 20 不同角反射体鉴别方法与PCP的对比结果^[14]

Fig. 20 Comparison results among different corner reflector identifier with PCP^[14]

表 2 用于角反射体雷达鉴别的极化特征归纳表

Tab. 2 Summary of polarimetric features for corner reflector radar identification

特征	特征公式	变量含义
Krogager分解特征	$k_S = S_{RL} , k_D = \min(S_{LL} , S_{RR}), k_H = S_{RR} - S_{LL} $	S_{LL}, S_{RR} 和 S_{RL} 为圆极化复散射系数
Pauli分解特征	$p_a = \frac{S_{HH} + S_{VV}}{\sqrt{2}}, p_b = \frac{S_{HH} - S_{VV}}{\sqrt{2}}, p_c = \frac{S_{HV} + S_{VH}}{\sqrt{2}}$	S_{HH}, S_{VV}, S_{HV} 和 S_{VH} 为线极化复散射系数
Cameron分解特征	$d(z_1, z_2) = \arccos \left(\frac{\max\{ 1 + z_1 z_2^* , z_1 + z_2^* \}}{\sqrt{1 + z_1 ^2} \cdot \sqrt{1 + z_2 ^2}} \right)$	z_1 和 z_2 分别为待分类散射体和典型散射体的散射类型参数, *表示共轭
Cloude-Pottier分解特征	$H = -\sum_{i=1}^3 P_i \log_3 P_i, \bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 P_i \alpha_i, \text{Ani} = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}$	P_i 为伪概率密度, α_i 为特征矢量的系数因子, λ_i 为特征值
行列式模	$ \Delta = S_{HH}S_{VV} - S_{HV}S_{VH} $	/
极化总功率	$\text{SPAN} = S_{HH} ^2 + S_{HV} ^2 + S_{VH} ^2 + S_{VV} ^2$	/
去极化因子	$D = 1 - \frac{ S_{HH} + S_{VV} ^2}{2(S_{HH} ^2 + S_{HV} ^2 + S_{VH} ^2 + S_{VV} ^2)}$	/
本征极化方位角	$\theta_d = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\text{Re}(\tilde{S}_1^* \tilde{S}_{12})}{\text{Re}(\tilde{S}_1^* \tilde{S}_2)}$	$\tilde{S}_1 = S_{HH} + S_{VV}, \tilde{S}_2 = S_{HH} - S_{VV}, \tilde{S}_{12} = S_{HV}$
本征极化椭圆度	$\alpha_d = \frac{1}{2} \arctan \frac{j2\tilde{S}'_{12}}{S_{HH} + S_{VV}}$	$\tilde{S}'_{12} = \tilde{S}_{12} \cos(2\theta_d) - \frac{1}{2}\tilde{S}_2 \sin(2\theta_d)$
目标纵横比	$\eta = \frac{ S_{HH} ^2 + S_{HV} ^2 + S_{VH} ^2 + S_{VV} ^2}{ S_{HH}S_{VV} - S_{HV}S_{VH} }$	/
目标极化形状因子	$\gamma = \frac{ S_{VV}S_{HH}^* - S_{VH}S_{HV}^* }{ S_{HH} ^2 + S_{HV} ^2 + S_{VH} ^2 + S_{VV} ^2}$	/
极化相关度	$ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{mean}} = \text{mean} \left\{ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) \right\}$	$ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) $ 为极化相关方向图, $\text{mean} \{ \cdot \}$ 为求均值
极化相关特征最小值	$ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{min}} = \min \left\{ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) \right\}$	$\min \{ \cdot \}$ 为求最小值
极化相关对比度	$ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{contrast}} = \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{max}} - \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{min}}$	$ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{max}}$ 为极化相关特征最大值
极化相关特征反熵	$ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\Lambda} = \frac{ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{max}} - \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{min}}}{ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{max}} + \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{min}}}$	/
极化相关起伏度	$ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) _{\text{std}} = \text{std} \left\{ \hat{\gamma}_{HH-VV}(\theta) \right\}$	$\text{std} \{ \cdot \}$ 为求标准差

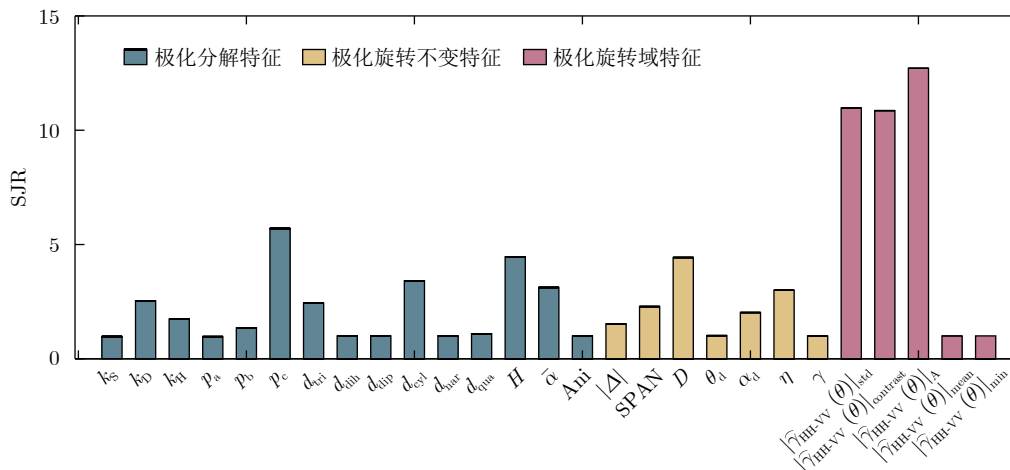


图 21 舰船和角反射体的极化特征信干比

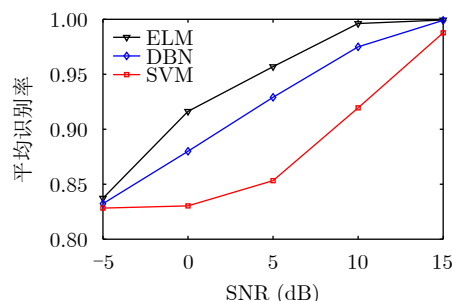
Fig. 21 SJR values of the polarimetric features of ships and corner reflectors

化特征对于角反射体干扰的抑制效果越好，能获得更好的鉴别性能。分别选取10个舰船样本和10个角反射体样本，得到的极化特征信干比均值如图21所示。可以看到，极化相关起伏度、极化相关对比度和极化相关特征反熵的信干比最高，在区分舰船和角反射体方面具有显著优势。

4.2 基于深度学习的角反射体鉴别方法

近年来，深度学习方法在光学目标检测和识别领域取得了巨大的成功，其核心是通过层次化的特征提取结构(即深层结构)来表征原始数据。相较于传统的人工特征提取方法，深度学习方法具有自动特征提取和深度数据挖掘的优点，能够克服手动设计特征和分类器带来的局限性，同时在目标分类和识别任务中能够获得更高的精度^[124-126]。研究人员也将深度学习推广应用于角反射体干扰雷达鉴别研究。文献^[127]提出了一种适用于浮空式角反射体识别的深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)优化模型，采用mini-batch梯度下降法和Adam优化算法分别提高模型训练效率和降低异常样本子集的干扰，同时引入L2正则化和随机Dropout方法提高网络在验证集上的泛化能力，鉴别效果明显。文献^[128]针对实时性和稳定性要求较高的角反射体干扰鉴别场景，提出一种基于极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)的角反射体干扰鉴别方法，通过挖掘目标HRRP的隐含相关性从而克服方位敏感问题。相较于深度置信网络(Deep Belief Network, DBN)和SVM分类器，该方法能够获得更好的鉴别性能，对比结果如图22所示。

除此之外，理论研究表明，分类器联合能够提高基分类器的泛化能力，由精确且互补的分类器组成的集成分类器将优于性能最好的基分类器^[10]。文

图 22 不同分类器与ELM的对比结果^[128]Fig. 22 Comparison results between different classifiers and ELM^[128]

献^[106]采用加权平均法联合极限梯度提升(eXtreme Gradient Boosting, XGB)分类器和长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)分类器。这种结合方式避免了单一算法陷入局部最小值，从而获得较高的角反射体鉴别率。文献^[85]通过集成学习的思想，提出了一种异构分类器联合的角反射体目标雷达识别方法，利用LM-BP (Levenberg Marquardt-Back Propagation)神经网络作为联合器对基分类器的输出进行融合。为了进一步提高目标识别的泛化能力，文献^[129]利用元学习(META-Learning)取代传统的分类器融合策略，对基分类器的结果进行“再学习”，从而使元分类器的分类精度优于所有基分类器。集成间隔与基分类器的多样性密切相关，传统集成间隔往往忽视了样本权值、分类器权值等影响集成性能的重要因素。针对这一问题，文献^[130]提出一种基于集成间隔优化的静态选择集成算法(Static Selection Ensemble based on Margin Optimization, SSE-MO)用于角反射体鉴别。为了进一步提高高复杂干扰环境下对海雷达目标识别的泛化性和实时性，文献^[131]提出一种基于聚类和随机参考分类器(K-Medoids Random Reference Classi-

fier, KMRRC)的角反射体目标雷达识别算法。但是原始基分类器数目较多且个体精度良莠不齐,往往会影响KMRRC算法的效率和性能。针对这一问题,文献[10]提出一种综合静态优化和动态选择的混合分类器集成选择算法(Optimization and Dynamic Selection, ODS)。图23给出了上述4种集成算法对于6种舰船和角反射体阵列仿真数据的分类结果,可以看出ODS方法鉴别性能最好。然而,有限的学习样本和难解释性严重制约着深度学习方法的实际应用。结合目标散射机理解译和极化特征挖掘的专家知识驱动网络模型优化,构建物理可解释深度学习是提高泛化性的可行途径^[14]。文献[132]利用Pauli极化分解特征驱动BP神经网络,从而达到了较好的角反射体干扰鉴别性能。

4.3 其他方法

除上述主流方法外,研究人员还利用新体制雷达或战术策略开展角反射体干扰雷达鉴别研究。文献[133]基于认知雷达的思想提出了雷达波形分集抗角反射体干扰的方法。其核心思想是通过脉内混合调制实现雷达波形在时间上的分集,并利用信息距离最大化的准则选择能够最大限度区分舰船目标与角反射体的波形,从而实现抗角反射体干扰的目的。多体制复合制导是当前精确制导技术发展的重要方向之一,复合制导能够充分利用多种制导模式的优点,实现对目标的精确捕获和跟踪^[134,135]。由于舰船上存在电子装备和动力系统等热辐射源,而角反射体作为无源干扰,一般没有热辐射特征,因此基于该特点可利用雷达/红外双模制导技术对抗角反射体干扰^[16,136,137]。此外,还可采用包括多平台多弹齐射、多种反舰导弹齐射和真假导弹次序攻击等战术策略,提升反舰导弹的角反射体鉴别能力^[4,16,138]。

本节详细梳理了角反射体雷达鉴别方法的技术途径及存在的问题,为了便于不同鉴别方法的比较,表3总结了各类方法的适用场景和优缺点。

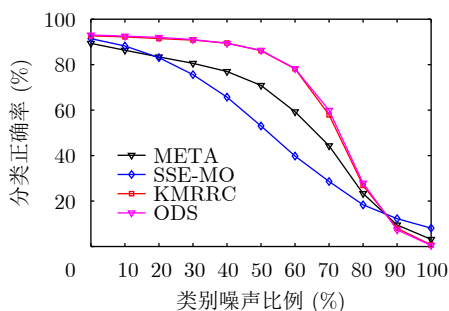


图 23 4种集成算法分类结果对比^[10]

Fig. 23 Comparison of classification results from four ensemble algorithms^[10]

5 海面角反射体雷达鉴别研究展望

近年来,随着海战场日趋复杂的电磁环境,如何实现角反射体的高效鉴别仍是一大挑战。面向海战场射频频制导攻击重大需求,以下方面仍需展开深入研究:

(1) 复杂场景下角反射体电磁散射特性研究

在实际应用场景中,充气式角反射体漂浮于随机时变的海面上,海洋表面包括毛细波、折浪、碎浪、泡沫等精细结构。海浪复杂多变的几何形态及其与电磁波的复杂相互作用机理是当前复合电磁散射建模需要解决的重要难题。此外,充气式角反射体是由复合材料、介质材料和金属涂层等组成,需要构建高置信目标电磁模型,研究不同材料和结构对电磁散射特性的影响。同时还需考虑舰载/舷外有源诱饵、箔条等多种干扰的影响,为以战场态势感知为特点的角反射体对抗策略提供理论基础。

(2) 角反射体实验研究与数据集构建

角反射体雷达数据资料的匮乏是制约角反射体雷达鉴别技术发展的重要原因。相比暗室缩比测量和电磁计算仿真,外场测量是获取目标电磁散射特性手段更直接、数据更真实的途径。但是由于实验测量成本昂贵、数据获取难度高,目前针对角反射体干扰与复杂海上环境的复合电磁散射的外场测量实验相对较少。因此,开展外场实验方案设计获取实验数据,并结合电磁计算仿真,构建实测数据与仿真数据的融合数据库,能够有效支撑角反射体干扰雷达鉴别技术的理论发展和应用验证。

(3) 角反射体高辨识度特征提取

雷达回波中蕴含着目标丰富的散射信息,利用时域、频域、空域及极化域等不同变化域和不同层面的目标散射信息,能够深入揭示角反射体电磁散射特性及演化规律,提取和设计适用于角反射体鉴别的高辨识度特征。此外,有限维度的信息难以反映目标真实的散射信息,应结合特征优选构建深层次多域多维特征集,增强干扰与目标在特征空间中的可分性,实现角反射体的准确鉴别。

(4) 角反射体鉴别与人工智能

随着深度学习技术的日趋成熟,结合深度学习技术可为角反射体的智能识别提供可行途径。然而受限于有效样本的数目和样本集构建的昂贵代价,在光学领域获得成功应用的深度学习模型难以直接应用于成像雷达领域。如何在训练样本有限的情况下,利用深度学习对角反射体进行智能识别,同时保持良好的泛化性能,是目前面临的一个重要挑战。传统的目标电磁散射机理解译方法具有清晰的物理可解释性。结合目标散射精细化解译专家知

表 3 角反射体雷达鉴别方法适用场景和优缺点总结

Tab. 3 Applicable scenarios and pros & cons summary of corner reflector radar identification

关键技术	鉴别分类	具体鉴别方法	适用场景	优点	缺点
基于特征提取的角反射体鉴别方法	HRRP 特征	连续统计跟踪算法	质心干扰 ^[84]	简单易实现, 计算效率高, 具有实时性	对目标信息利用不充分
		基于平移不变特征的角反鉴别	冲淡干扰 ^[85]	融合空间邻域信息, 提高目标鉴别能力	敏感于雷达观测角度且不适用于角反射体阵列
		基于稀疏表达的角反鉴别	冲淡干扰 ^[86]	模型简单, 受噪声影响小	对目标姿态的适应性有待研究
	运动特征	基于多普勒特征的角反鉴别	质心干扰 ^[84] / 冲淡干扰 ^[84,87]	增强了对运动目标鉴别能力	不适用于拖曳式角反射体
		基于微多普勒特征的角反鉴别	冲淡干扰 ^[37,91]	海面目标和角反射体由于结构和尺寸不同, 在微动特征上存在较大差异	对海面强杂波与目标运动变化敏感, 对目标微多普勒的观测本身需要的条件苛刻
	极化特征	基于极化目标分解的角反鉴别	冲淡干扰 ^[99,100,132]	具有较强的物理可解释性	存在散射机理解译失真
		基于极化旋转不变量的角反鉴别	冲淡干扰 ^[105,106]	可以避免雷达观测角度的依赖性	部分极化不变量敏感于目标尺寸
		基于极化旋转域的角反鉴别	冲淡干扰 ^[14,82,119-121]	充分利用了雷达目标的散射多样性中蕴含的丰富的极化散射信息	对海况状态的适应性需要提高
	基于深度学习的角反射体鉴别方法	基于极化域变焦的角反鉴别	质心干扰 ^[123] / 冲淡干扰 ^[122]	有效提升雷达信息获取能力	理论分析和方法实现复杂
		/	/	冲淡干扰 ^[10,85,106,127-132]	能够自动提取结构化特征, 鉴别率高
其他方法	/	基于波形选择的角反鉴别 基于复合制导的角反鉴别	冲淡干扰 ^[133] 质心干扰 ^[136] /冲淡干扰 ^[136]	可以自适应优化不同场景下的鉴别性能	复杂结构和成本限制工程应用

识, 开展融合物理模型机理的深度学习模型设计, 有望为小样本条件下雷达目标分类识别提供可行途径, 具有重要的科学和应用价值。

(5) 新型角反射体与雷达鉴别

常规角反射体一旦加工完成, 其电磁特性就很难改变, 且反射性能依赖于入射波长, 因此干扰效果受到限制。随着电子技术的发展, 精确制导武器的突防能力和打击精度不断提升。为制约导弹作战功效发挥, 角反射体在结构^[139-142]和材料^[143-147]等方面也在不断创新和发展, 特性灵活可调的新型角反射体是未来角反射体装备的发展趋势。与此同时, 也将涌现出诸如新型角反射体的特性与应用、新型角反射体雷达对抗技术等诸多新的值得深入探索的前沿性、基础性科学问题, 需要开展更深入的理论创新和实验研究。

参 考 文 献

- [1] 高烽. 雷达导引头概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
GAO Feng. Introduction to Radar Seeker[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [2] 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.

- HUANG Peikang, YIN Hongcheng, and XU Xiaojian. Radar Target Characteristics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [3] 陈静. 雷达无源干扰原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
CHEN Jing. Principles of Radar Passive Jamming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [4] 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. doi: 10.16358/j.issn.1009-1300.2020.1.538.
WEI Yiyin and 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. doi: 10.16358/j.issn.1009-1300.2020.1.538.
- [5] 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. doi: 10.12000/JR16039.
WANG Xuesong. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(2): 119-131. doi: 10.12000/JR16039.
- [6] 宫尚玉, 白梅, 王月悦. 美国海军软杀伤装备与技术发展研究[J]. 飞航导弹, 2021(10): 74-80. doi: 10.16338/j.issn.1009-1319.20200341.

- GONG Shangyu, BAI Mei, and WANG Yueyue. Research on the development of soft kill equipment and technology in US Navy[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(10): 74–80. doi: [10.16338/j.issn.1009-1319.20200341](https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.20200341).
- [7] 许海龙, 王隽, 张金华. 国外新型舰载诱饵发射系统发展研究[J]. *舰船电子对抗*, 2013, 36(2): 28–32. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2013.02.007](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2013.02.007).
- XU Hailong, WANG Jun, and ZHANG Jinhua. Research into the development of foreign new shipborne decoy launching systems[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2013, 36(2): 28–32. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2013.02.007](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2013.02.007).
- [8] 刘丽, 武坦然, 崔静. 外军舰载软杀伤武器系统发展概述[J]. *航天电子对抗*, 2018, 34(1): 60–64. doi: [10.16328/j.htdz8511.2018.01.014](https://doi.org/10.16328/j.htdz8511.2018.01.014).
- LIU Li, WU Tanran, and CUI Jing. A glimpse into the development of the ship-borne soft-killing weapon systems of foreign militaries[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2018, 34(1): 60–64. doi: [10.16328/j.htdz8511.2018.01.014](https://doi.org/10.16328/j.htdz8511.2018.01.014).
- [9] 陈静. 雷达箔条干扰原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- CHEN Jing. Principles of Radar Chaff Jamming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [10] 胡生亮, 范学满, 刘忠, 等. 基于集成学习的角反射体目标雷达识别理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- HU Shengliang, FAN Xueman, LIU Zhong, et al. Radar Recognition Theory and Method of Corner Reflector Target Based on Ensemble Learning[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [11] 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, 44(4): 64–70. doi: [10.16338/j.issn.1009-1319.2014.04.021](https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.2014.04.021).
- ZHANG Zhiyuan, ZHANG Jieqiu, QU Shaobo, et al. Research progress and prospect of radar corner reflector[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2014, 44(4): 64–70. doi: [10.16338/j.issn.1009-1319.2014.04.021](https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.2014.04.021).
- [12] 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. doi: [10.11809/bqzbgcxb2018.06.010](https://doi.org/10.11809/bqzbgcxb2018.06.010).
- ZHANG Lin, HU Shengliang, and HU Hai. 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. doi: [10.11809/bqzbgcxb2018.06.010](https://doi.org/10.11809/bqzbgcxb2018.06.010).
- [13] 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. doi: [10.13943/j.issn1671-4547.2018.02.12](https://doi.org/10.13943/j.issn1671-4547.2018.02.12).
- HU Hai, ZHANG Lin, and ZHANG Xiaodong. A study on equipment developments and operational using of ship born gas-filled anti-missile multi-corner reflector[J]. *National Defense Science Technology*, 2018, 39(2): 74–77. doi: [10.13943/j.issn1671-4547.2018.02.12](https://doi.org/10.13943/j.issn1671-4547.2018.02.12).
- [14] 李郝亮. 极化旋转域雷达目标辨识与干扰鉴别[D]. [硕士学位论文], 国防科技大学, 2022.
- LI Haoliang. Radar target recognition and jamming identification in polarimetric rotation domain[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2022.
- [15] 梅益超. “橡皮鸭”——一种被动式反导弹充气诱饵[J]. *国外导弹与航天*, 1986(4): 41–42.
- MEI Yichao. “Rubber Duck”—A passive anti-missile inflatable decoy[J]. *Foreign Missiles and Aerospace*, 1986(4): 41–42.
- [16] 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. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2015.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2015.05.008).
- TANG Guangfu, LI Hua, GAN Rongbing, et al. Analysis of corner reflector under naval battlefield[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2015, 30(5): 39–45, 84. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2015.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2015.05.008).
- [17] 骆颖. 基于TDSBR的海上目标与角反射器复合时域电磁散射及干扰分析研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2021. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2021.002354](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2021.002354).
- LUO Ying. TDSBR-based time-domain electromagnetic scattering and jamming analysis of marine targets and corner reflectors[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2021. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2021.002354](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2021.002354).
- [18] 赵宗顺, 胡生亮, 许江湖. 充气式雷达诱饵质心干扰样式研究[J]. *电子技术与软件工程*, 2015(11): 144–146.
- ZHAO Zongshun, HU Shengliang, and XU Jianghu. Research on centroid jamming pattern of inflatable radar decoy[J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2015(11): 144–146.
- [19] 王聘, 胡生亮, 张俊. 浮空式角反射体质心干扰使用时机研究[J]. *现代防御技术*, 2018, 46(5): 26–31, 68. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2018.05.05](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2018.05.05).
- WANG Pin, HU Shengliang, and ZHANG Jun. Using time of floating corner reflector centroid jamming[J]. *Modern Defense Technology*, 2018, 46(5): 26–31, 68. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2018.05.05](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2018.05.05).
- [20] 王涛, 胡生亮, 金嘉旺. 炮射雷达诱饵迷惑干扰使用研究[J]. *舰船电子对抗*, 2012, 35(4): 26–28. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2012.04.006](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2012.04.006).
- WANG Tao, HU Shengliang, and JIN Jiawang. Research into confusion jamming usage of radar decoy shot by guns[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2012, 35(4): 26–28. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2012.04.006](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2012.04.006).
- [21] 赵宗顺, 胡生亮, 许江湖. 充气式雷达诱饵质心干扰能力分析[J]. *电子技术与软件工程*, 2015(9): 38–40.
- ZHAO Zongshun, HU Shengliang, and XU Jianghu. Analysis of centroid jamming capability for inflatable radar decoy[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2015(9): 38–40.

- [22] WANG Liying, JIANG Ning, and SUN Yi. The mechanism analyzing and use of corner reflector against anti-ship missiles[C]. 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017), 2017: 998–1002. doi: [10.2991/icmmcce-17.2017.179](https://doi.org/10.2991/icmmcce-17.2017.179).
- [23] 卫鑫, 姜宁. 冲淡干扰在单舰反导作战中的作战运用[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(2): 17–20. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2018.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2018.02.005).
WEI Xin and JIANG Ning. Tactics usage of dilution jamming in single antimissile operation[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2018, 38(2): 17–20. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2018.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2018.02.005).
- [24] 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. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2018.7.167](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2018.7.167).
ZHANG Jun, HU Shengliang, FAN Xueman, 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. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2018.7.167](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2018.7.167).
- [25] 王聘, 胡生亮, 姚强, 等. 浮空式角反射体阵列布放间隔寻优研究[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(3): 32–35. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2018.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2018.03.008).
WANG Pin, HU Shengliang, YAO Qiang, et al. Optimal laying interval of the array of floating-type corner reflectors[J]. *Command Control & Simulation*, 2018, 40(3): 32–35. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2018.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2018.03.008).
- [26] 张俊, 胡生亮, 杨庆, 等. 基于RCS幅值特性相似度的浮空式角反射体布放态势寻优[J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(2): 32–36. doi: [10.7495/j.issn.1009-3486.2019.02.006](https://doi.org/10.7495/j.issn.1009-3486.2019.02.006).
ZHANG Jun, HU Shengliang, YANG Qing, et al. Optimization of position situation of air-floating corner reflectors based on similarity of RCS amplitude characteristic[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2019, 31(2): 32–36. doi: [10.7495/j.issn.1009-3486.2019.02.006](https://doi.org/10.7495/j.issn.1009-3486.2019.02.006).
- [27] ZHANG Jun, HU Shengliang, WU Lingang, et al. Air-floating corner reflectors dilution jamming placement position[C]. 2019 IEEE 8th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS), Dali, China, 2019: 993–997. doi: [10.1109/DDCLS.2019.8908939](https://doi.org/10.1109/DDCLS.2019.8908939).
- [28] 张俊, 胡生亮, 刘泰邑, 等. 基于探索性分析的浮空式角反射体质心干扰使用研究[J]. 战术导弹技术, 2019(4): 13–19, 75. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2019.9.021](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2019.9.021).
ZHANG Jun, HU Shengliang, LIU Taiyi, et al. Research on the use of centroid jamming of floating corner reflectors based on exploratory analysis[J]. *Tactical Missile Technology*, 2019(4): 13–19, 75. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2019.9.021](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2019.9.021).
- [29] 张俊, 胡生亮, 杨庆, 等. 异型角反射体阵列寻优研究[J]. 海军工程大学学报, 2019, 31(6): 46–50. doi: [10.7495/j.issn.1009-3486.2019.06.009](https://doi.org/10.7495/j.issn.1009-3486.2019.06.009).
ZHANG Jun, HU Shengliang, YANG Qing, et al. On optimization of heterotypic corner reflector arrays[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2019, 31(6): 46–50. doi: [10.7495/j.issn.1009-3486.2019.06.009](https://doi.org/10.7495/j.issn.1009-3486.2019.06.009).
- [30] 柴刚, 陆益敏, 陈晓明. 角反射器在海军中的战术使用[J]. 舰船电子对抗, 2006, 29(5): 11–14. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2006.05.003](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2006.05.003).
CHAI Gang, LU Yimin, and CHEN Xiaoming. Tactical usage of corner reflector in navy[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2006, 29(5): 11–14. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2006.05.003](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2006.05.003).
- [31] 谢伟, 徐波, 张亮. 对抗反舰导弹倾卸式复合干扰方法研究[J]. 战术导弹技术, 2022(1): 76–86. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.20220519](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.20220519).
XIE Wei, XU Bo, and ZHANG Liang. Research on anti-ship missile dumping compound jamming method[J]. *Tactical Missile Technology*, 2022(1): 76–86. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.20220519](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.20220519).
- [32] 王馨若. 基于反舰导弹的组合干扰技术研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2021. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2021.002532](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2021.002532).
WANG Xinruo. Research of compound jamming on anti-ship missile[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2021. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2021.002532](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2021.002532).
- [33] 郭立新, 魏仪文. 复杂动态海面与目标电磁散射及回波仿真研究现状与展望[J]. 雷达学报, 2023, 12(1): 76–109. doi: [10.12000/JR22202](https://doi.org/10.12000/JR22202).
GUO Lixin and WEI Yiwen. Status and prospects of electromagnetic scattering echoes simulation from complex dynamic sea surfaces and targets[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(1): 76–109. doi: [10.12000/JR22202](https://doi.org/10.12000/JR22202).
- [34] 郭立新, 魏仪文, 柴水荣. 目标与复杂地海面复合电磁散射研究现状综述[J]. 电波科学学报, 2020, 35(1): 69–84. doi: [10.13443/j.cjors.2019090204](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019090204).
GUO Lixin, WEI Yiwen, and CHAI Shuirong. A review on the research of composite electromagnetic scattering from target and rough surface[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2020, 35(1): 69–84. doi: [10.13443/j.cjors.2019090204](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019090204).
- [35] 殷红成, 郭琨毅. 目标电磁散射特性研究的若干热点和难点问题[J]. 电波科学学报, 2020, 35(1): 128–134. doi: [10.13443/j.cjors.2019100401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019100401).
YIN Hongcheng and GUO Kunyi. Hot-topics and difficult problems in the research filed of electromagnetic scattering characteristics of targets[J]. *Chinese Journal of Radio*

- Science*, 2020, 35(1): 128–134. doi: [10.13443/j.cjors.2019100401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2019100401).
- [36] 关键. 雷达海上目标特性综述[J]. 雷达学报, 2020, 9(4): 674–683. doi: [10.12000/JR20114](https://doi.org/10.12000/JR20114).
GUAN Jian. Summary of marine radar target characteristics[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(4): 674–683. doi: [10.12000/JR20114](https://doi.org/10.12000/JR20114).
- [37] ZHU Hong, WANG Qingping, PAN Yujian, *et al.* A sea corner-reflector jamming identification method based on time-frequency feature[C]. 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Ningbo, China, 2015: 1–6. doi: [10.1109/ICSPCC.2015.7338803](https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2015.7338803).
- [38] TAO Zhiyu, GUO Yu, and FU Qiang. Discrimination method of ship and corner reflector based on SVM[C]. 2016 Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Harbin, China, 2016: 699–702. doi: [10.1109/IMCCC.2016.157](https://doi.org/10.1109/IMCCC.2016.157).
- [39] ÜNAL İ, GULUM T O, and BAYRAMOĞLU E Ç. Investigations of electrical size effects on radar cross section for orthogonally distorted corner reflectors[C]. 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon), Arlington, USA, 2015: 1515–1519. doi: [10.1109/RADAR.2015.7131236](https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7131236).
- [40] 来庆福. 反舰导弹雷达导引头抗舷外干扰技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2011.
LAI Qingfu. Study on countering off-board interference for radar seeker of anti-ship missile[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2011.
- [41] PALADINI R, MARTORELLA M, and BERIZZI F. Classification of man-made targets via invariant coherency-matrix eigenvector decomposition of polarimetric SAR/ISAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 3022–3034. doi: [10.1109/TGRS.2011.2116121](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2116121).
- [42] GENG N, RESSLER M A, and CARIN L. Wide-band VHF scattering from a trihedral reflector situated above a lossy dispersive halfspace[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2609–2617. doi: [10.1109/36.789655](https://doi.org/10.1109/36.789655).
- [43] 金建铭, 王建国译. 电磁场有限元方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
JIN Jianming. WANG Jianguo. translation. Finite Element Method for Electromagnetic Field[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998.
- [44] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
GE Debiao and YAN Yubo. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves[M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2011.
- [45] ALGAFSH A, INGGIS M, and MISHRA A K. The effect of perforating the corner reflector on maximum radar cross section[C]. 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2016: 1–4. doi: [10.1109/MMS.2016.7803815](https://doi.org/10.1109/MMS.2016.7803815).
- [46] POLYCARPOU A C, BALANIS C A, and BIRTCHER C R. Radar cross section of trihedral corner reflectors using PO and MEC[J]. *Annales Des Télécommunications*, 1995, 50(5): 510–516. doi: [10.1007/BF02995750](https://doi.org/10.1007/BF02995750).
- [47] LI Chengfan, YIN Jingyuan, ZHAO Junjuan, *et al.* The selection of artificial corner reflectors based on RCS analysis[J]. *Acta Geophysica*, 2012, 60(1): 43–58. doi: [10.2478/s11600-011-0060-y](https://doi.org/10.2478/s11600-011-0060-y).
- [48] SHAN Xinjian, YIN Jingyuan, YU Danlin, *et al.* Analysis of artificial corner reflector's radar cross section: A physical optics perspective[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(8): 2755–2765. doi: [10.1007/s12517-012-0582-x](https://doi.org/10.1007/s12517-012-0582-x).
- [49] 郭涛. 拖曳式无源假目标的RCS计算[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.003095](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.003095).
GUO Tao. RCS computation of towed passive false target[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.003095](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.003095).
- [50] POTTER L C, CHIANG D M, CARRIERE R, *et al.* A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(10): 1058–1067. doi: [10.1109/8.467641](https://doi.org/10.1109/8.467641).
- [51] GRIESSER T and BALANIS C. Backscatter analysis of dihedral corner reflectors using physical optics and the physical theory of diffraction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, 35(10): 1137–1147. doi: [10.1109/TAP.1987.1143987](https://doi.org/10.1109/TAP.1987.1143987).
- [52] BALDAUF J, LEE S W, LIN L, *et al.* High frequency scattering from trihedral corner reflectors and other benchmark targets: SBR versus experiment[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1991, 39(9): 1345–1351. doi: [10.1109/8.99043](https://doi.org/10.1109/8.99043).
- [53] ZHOU Xiao, ZHU Jiyue, YU Weming, *et al.* Time-domain shooting and bouncing rays method based on beam tracing technique[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(9): 4037–4048. doi: [10.1109/tap.2015.2448757](https://doi.org/10.1109/tap.2015.2448757).
- [54] ZAN Guocai, GUO Lixin, LIU Songhua, *et al.* Scattering characteristics of the multi-corner reflector based on SBR method[C]. 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), Hangzhou, China, 2018: 1–4. doi: [10.1109/ISAPE.2018.8634124](https://doi.org/10.1109/ISAPE.2018.8634124).
- [55] GROOT J. Letter: Cross section computation of trihedral corner reflectors with the geometrical optics

- approximation[J]. *European Transactions on Telecommunications*, 1992, 3(6): 637–642. doi: [10.1002/ett.4460030618](https://doi.org/10.1002/ett.4460030618).
- [56] 范学满, 胡生亮, 贺静波. 一种角反射体雷达散射截面积的高频预估算法[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(2): 331–335, 362. doi: [10.13443/j.cjors.2015061401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2015061401).
- FAN Xueman, HU Shengliang, and HE Jingbo. High-frequency method for the evaluation of the radar cross section of corner reflectors[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(2): 331–335, 362. doi: [10.13443/j.cjors.2015061401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2015061401).
- [57] 范学满, 胡生亮, 罗亚松, 等. 海上角反射体群的RCS快速混合预估算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(11): 2462–2467. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.02](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.02).
- FAN Xueman, HU Shengliang, LUO Yasong, *et al.* Hybrid RCS evaluation method for maritime multi-corner reflectors[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(11): 2462–2467. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.02](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.02).
- [58] 胡生亮, 范学满, 贺静波. 基于改进GO/AP法的三面角反射体RCS预估[J]. *雷达科学与技术*, 2017, 15(2): 185–190. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.02.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.02.013).
- HU Shengliang, FAN Xueman, and HE Jingbo. Evaluation of radar cross section of trihedral corner reflectors based on improved GO/AP method[J]. *Radar Science and Technology*, 2017, 15(2): 185–190. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.02.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.02.013).
- [59] 赵维江, 葛德彪. 三面角反射器的高频电磁散射分析[J]. *电波科学学报*, 1998(3): 301–303. doi: [10.13443/j.cjors.1998.03.016](https://doi.org/10.13443/j.cjors.1998.03.016).
- ZHAO Weijiang and GE Debiao. High-frequency electromagnetic scattering by a square trihedral corner reflector[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1998(3): 301–303. doi: [10.13443/j.cjors.1998.03.016](https://doi.org/10.13443/j.cjors.1998.03.016).
- [60] 张俊, 胡生亮, 王聘, 等. 基于PO/AP的角反射体RCS模型构建及分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(7): 1478–1485. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.07.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.07.10).
- ZHANG Jun, HU Shengliang, WANG Pin, *et al.* RCS model construction and analysis for corner reflector based on PO/AP algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(7): 1478–1485. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.07.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.07.10).
- [61] JIN Jianming, LING Feng, CAROLAN S T, *et al.* A hybrid SBR/MoM technique for analysis of scattering from small protrusions on a large conducting body[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, 46(9): 1349–1357. doi: [10.1109/8.719979](https://doi.org/10.1109/8.719979).
- [62] SHAH M A, TOKGÖZ Ç, and SALAU B A. Radar cross section prediction using iterative physical optics with physical theory of diffraction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(6): 4683–4690. doi: [10.1109/TAP.2021.3137202](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3137202).
- [63] HE Yaomin, HE Huaifeng, HU Changhua, *et al.* Polarization analysis of trihedral corner reflector with high-frequency approximation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(10): 9607–9620. doi: [10.1109/TAP.2022.3177536](https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3177536).
- [64] 许小剑, 李晓飞, 刁桂杰, 等. 时变海面雷达目标散射现象学模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- XU Xiaojian, LI Xiaofei, DIAO Guijie, *et al.* Radar Phenomenological Models for Ships on Time-evolving Sea Surface[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [65] JOHNSON J T. A numerical study of scattering from an object above a rough surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, 50(10): 1361–1367. doi: [10.1109/TAP.2002.802152](https://doi.org/10.1109/TAP.2002.802152).
- [66] 吕方方. 海面目标动态回波仿真与特性分析[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.002034](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.002034).
- LV Fangfang. Dynamic echo simulation and characteristic analysis of sea surface targets[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.002034](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.002034).
- [67] 咎国才. 基于SBR方法的角反射器与海面复合散射及多普勒特性研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2020.
- ZAN Guocai. SBR algorithm for study of composite scattering and doppler characteristics from the corner reflector and sea surface[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2020.
- [68] LUO Ying, GUO Lixin, ZUO Yanchun, *et al.* Time-domain scattering characteristics and jamming effectiveness in corner reflectors[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 15696–15707. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3053116](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053116).
- [69] 帅超, 廖贵超, 张阳新, 等. 充气式角反射器制作偏差对RCS特性影响的仿真研究[J]. *南京理工大学学报*, 2019, 43(2): 193–198. doi: [10.14177/j.cnki.32-1397n.2019.43.02.011](https://doi.org/10.14177/j.cnki.32-1397n.2019.43.02.011).
- SHUAI Chao, LIAO Guichao, ZHANG Yangxin, *et al.* Simulation on effect of manufacturing deviation of inflatable corner reflector on monostatic RCS[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2019, 43(2): 193–198. doi: [10.14177/j.cnki.32-1397n.2019.43.02.011](https://doi.org/10.14177/j.cnki.32-1397n.2019.43.02.011).
- [70] 葛尧, 王硕, 郭京. 基于FEKO计算的异型结构三面角反射器RCS特性分析[J]. *战术导弹技术*, 2021(1): 121–125. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.509](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.509).
- GE Yao, WANG Shuo, and GUO Jing. Analysis on RCS of the abnormal shape triangular trihedral corner reflector based on FEKO software[J]. *Tactical Missile Technology*, 2021(1): 121–125. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.509](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.509).

- [71] 赵俊娟, 尹京苑, 李成范. 基于FEKO平台的人工角反射器 RCS模拟[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(8): 79–81, 85. doi: [10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2013.08.019](https://doi.org/10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2013.08.019). ZHAO Junjuan, YIN Jingyuan, and LI Chengfan. RCS simulation of corner reflector based on FEKO[J]. *Microelectronics & Computer*, 2013, 30(8): 79–81, 85. doi: [10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2013.08.019](https://doi.org/10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2013.08.019).
- [72] MIANROODI R Y, HEIDAR H, and ARMAKI H M. Expandable shipboard decoy including adequate RCS by using trihedral corner reflectors[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2016, 10(5): 485–491. doi: [10.1049/iet-smt.2015.0228](https://doi.org/10.1049/iet-smt.2015.0228).
- [73] 刘良. 雷达宽角无源反射器的研究与设计[D]. [硕士学位论文], 南昌航空大学, 2014. LIU Liang. Research and design for RADAR passive reflector of wide-angle[D]. [Master dissertation], Nanchang Hangkong University, 2014.
- [74] 孟凯, 马武举. 海面漂浮二十面角反射器电磁散射特性研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(5): 437–442. doi: [10.19838/j.issn.2096-5753.2020.05.013](https://doi.org/10.19838/j.issn.2096-5753.2020.05.013). MENG Kai and MA Wujun. Research on electromagnetic scattering characteristics of sea floating icosahedrons triangular trihedral corner reflectors[J]. *Digital Ocean & Underwater Warfare*, 2020, 3(5): 437–442. doi: [10.19838/j.issn.2096-5753.2020.05.013](https://doi.org/10.19838/j.issn.2096-5753.2020.05.013).
- [75] LUO Ying, GUO Lixin, and ZUO Yanchun. Investigations of effects of geometric characteristics on RCS for corner reflectors[C]. 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), Shanghai, China, 2019: 1–2. doi: [10.1109/COMPEM.2019.8779187](https://doi.org/10.1109/COMPEM.2019.8779187).
- [76] 胡生亮, 范学满, 张俊, 等. 顶角切除和角度公差对角反射体雷达散射截面积的影响分析[J]. 战术导弹技术, 2017(6): 89–93. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2017.06.15](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2017.06.15). HU Shengliang, FAN Xueman, ZHANG Jun, et al. Effects analysis of removal of vertices and angle tolerance on RCS of TTCR[J]. *Tactical Missile Technology*, 2017(6): 89–93. doi: [10.16358/j.issn.1009-1300.2017.06.15](https://doi.org/10.16358/j.issn.1009-1300.2017.06.15).
- [77] 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. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2018.04.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2018.04.030). ZHANG Zhiyuan and ZHAO Yuanyuan. Analysis of electromagnetic scattering characteristic for new type icosahedrons triangular trihedral corner reflectors[J]. *Command Control & Simulation*, 2018, 40(4): 133–137. doi: [10.3969/j.issn.1673-3819.2018.04.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3819.2018.04.030).
- [78] KUBICKE G, BOURLIER C, and SAILLARD J. High-frequency bistatic scattering by depolarizing, nearly omnidirectional reflectors: Higher order polyhedral reflectors[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(9): 3029–3035. doi: [10.1109/TAP.2008.9287779](https://doi.org/10.1109/TAP.2008.9287779).
- [79] 赵锋, 邱梦奇, 艾小锋, 等. 典型角反射器单/双基地RCS特性对比分析[J]. 现代防御技术, 2023, 51(1): 50–58. doi: [10.3969/j.issn.1009-086X.2023.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086X.2023.01.007). ZHAO Feng, QIU Mengqi, AI Xiaofeng, et al. Comparative analysis of monostatic and bistatic RCS characteristics for typical corner reflectors[J]. *Modern Defence Technology*, 2023, 51(1): 50–58. doi: [10.3969/j.issn.1009-086X.2023.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086X.2023.01.007).
- [80] QIU Mengqi, AI Xiaofeng, XU Zhiming, et al. Comparative analysis of monostatic and bistatic RCS scattering characteristics for corner reflector[C]. 2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China), Xuzhou, China, 2022: 1–3. doi: [10.1109/ACES-China56081.2022.10065107](https://doi.org/10.1109/ACES-China56081.2022.10065107).
- [81] LUO Ying, ZUO Yanchun, GUO Lixin, et al. Bistatic RCS characteristics of corner reflector in time domain[C]. 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Guangzhou, China, 2019: 1–3. doi: [10.1109/ICMMT45702.2019.8992350](https://doi.org/10.1109/ICMMT45702.2019.8992350).
- [82] 李郝亮, 陈思伟, 王雪松. 海面角反射器的极化旋转域特性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(7): 2065–2073. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2022.07.01](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2022.07.01). LI Haoliang, CHEN Siwei, and WANG Xuesong. Study on characterization of sea corner reflectors in polarimetric rotation domain[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(7): 2065–2073. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2022.07.01](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2022.07.01).
- [83] 郭雷. 宽带雷达目标极化特征提取与核方法识别研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2009. GUO Lei. Wideband radar target polarimetric feature extraction and recognition method based on kernel method[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2009.
- [84] CUI Kaibo, WANG Wei, CHEN Xi, et al. A kind of method of anti-corner reflector interference for millimeter wave high resolution radar system[C]. 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai, China, 2016: 1900–1906. doi: [10.1109/PIERS.2016.7734824](https://doi.org/10.1109/PIERS.2016.7734824).
- [85] 范学满, 胡生亮, 陈鹏, 等. 基于分类器联合的反舰导弹HRRP目标识别与拒判研究[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(4): 14–20. doi: [10.7495/j.issn.1009-3486.2017.04.003](https://doi.org/10.7495/j.issn.1009-3486.2017.04.003). FAN Xueman, HU Shengliang, CHEN Peng, et al. HRRP recognition and rejection of anti-ship missile based on classifier combination[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2017, 29(4): 14–20. doi: [10.7495/j.issn.1009-3486.2017.04.003](https://doi.org/10.7495/j.issn.1009-3486.2017.04.003).
- [86] 袁伟. 基于一维距离像稀疏表达的无源假目标识别[J]. 电讯技术, 2018, 58(7): 798–804. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2018.07.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2018.07.009).

- YUAN Wei. Passive fake target recognition based on one-dimensional distance image sparse representation[J]. *Telecommunication Engineering*, 2018, 58(7): 798–804. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2018.07.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2018.07.009).
- [87] 潘哲. 一种反舰导弹抗无源假目标干扰算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(3): 285–288. doi: [10.3969/j.issn.1673-1522.2010.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1522.2010.03.011).
- PAN Zhe. An anti-jamming algorithm for passive false targets of anti-ship missile[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2010, 25(3): 285–288. doi: [10.3969/j.issn.1673-1522.2010.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1522.2010.03.011).
- [88] 张群, 胡健, 罗迎, 等. 微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 531–547. doi: [10.12000/JR18049](https://doi.org/10.12000/JR18049).
- ZHANG Qun, HU Jian, LUO Ying, *et al.* Research progresses in radar feature extraction, imaging, and recognition of target with micro-motions[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(5): 531–547. doi: [10.12000/JR18049](https://doi.org/10.12000/JR18049).
- [89] 陈小龙, 关键, 何友. 微多普勒理论在海面目标检测中的应用及展望[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 123–134. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20102](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20102).
- CHEN Xiaolong, GUAN Jian, and HE You. Applications and prospect of micro-motion theory in the detection of sea surface target[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 123–134. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20102](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20102).
- [90] TAO Zhiyu and FU Qiang. Discrimination method of ship and corner reflector based on micro-doppler feature[C]. International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology (ICCIA 2016), Guilin, China, 2016: 324–329. doi: [10.2991/iccia-16.2016.92](https://doi.org/10.2991/iccia-16.2016.92).
- [91] 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. doi: [10.3969/j.issn.1001-506x.2012.09.06](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506x.2012.09.06).
- HUANG Mengjun, CHEN Jianjun, ZHAO Hongzhong, *et al.* Micro-doppler modeling and simulating of corner reflector in sea surface[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(9): 1781–1787. doi: [10.3969/j.issn.1001-506x.2012.09.06](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506x.2012.09.06).
- [92] 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. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.018](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.018).
- HUANG Mengjun, ZHAO Hongzhong, FU Qiang, *et al.* A sea corner-reflector jamming identification method based on micro-doppler feature[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(10): 1486–1491. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.018](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.018).
- [93] 王雪松, 陈思伟. 合成孔径雷达极化成像解译识别技术的发展与展望[J]. 雷达学报, 2020, 9(2): 259–276. doi: [10.12000/JR19109](https://doi.org/10.12000/JR19109).
- WANG Xuesong and CHEN Siwei. Polarimetric synthetic aperture radar interpretation and recognition: Advances and perspectives[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(2): 259–276. doi: [10.12000/JR19109](https://doi.org/10.12000/JR19109).
- [94] CHEN Siwei, WANG Xuesong, XIAO Shunping, *et al.* Target Scattering Mechanism in Polarimetric Synthetic Aperture Radar: Interpretation and Application[M]. Singapore: Springer, 2018. doi: [10.1007/978-981-10-7269-7](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7269-7).
- [95] LEE J S and POTTIER E. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [96] CLOUDE S R and POTTIER E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 498–518. doi: [10.1109/36.485127](https://doi.org/10.1109/36.485127).
- [97] KROGAGER E. New decomposition of the radar target scattering matrix[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(18): 1525–1527. doi: [10.1049/el:19900979](https://doi.org/10.1049/el:19900979).
- [98] CAMERON W L, YOUSSEF N N, and LEUNG L K. Simulated polarimetric signatures of primitive geometrical shapes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(3): 793–803. doi: [10.1109/36.499784](https://doi.org/10.1109/36.499784).
- [99] 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. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.002).
- TU Jianhua, TANG Guangfu, XIAO Huaitie, *et al.* A study of anti-corner reflector based on polarization decomposition[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(2): 85–90. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.002).
- [100] 朱珍珠, 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. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2010.06.022](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2010.06.022).
- ZHU Zhenzhen, TANG Guangfu, CHENG Zhu, *et al.* Discrimination method of ship and corner reflector based on polarization decomposition[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2010, 33(6): 15–21. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2010.06.022](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2010.06.022).
- [101] FANG Maojin, ZHU Yongfeng, HUANG Mengjun, *et al.* Sea surface target polarization feature extraction based on modified odd-time and even-time scattering models[C]. 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control, Harbin, China, 2013: 500–504. doi: [10.1109/MIC.2013.6758013](https://doi.org/10.1109/MIC.2013.6758013).
- [102] 李伯达, 张志俊, 蒋洁, 等. 一种基于极化特性辅助的海面角反射器干扰对抗方法[P]. 中国, CN110865340A, 2020.
- LI Boda, ZHANG Zhijun, JIANG Jie, *et al.* An anti-sea corner reflector jamming method with polarization characteristics[P]. China, CN110865340A, 2020.
- [103] 范学满, 胡生亮, 贺静波. 对海雷达目标识别中全极化HRRP的特征提取与选择[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12):

- 3261–3268. doi: [10.11999/JEIT160722](https://doi.org/10.11999/JEIT160722).
- FAN Xueman, HU Shengliang, and HE Jingbo. Feature extraction and selection of full polarization HRRP in target recognition process of maritime surveillance radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3261–3268. doi: [10.11999/JEIT160722](https://doi.org/10.11999/JEIT160722).
- [104] HE Yaomin, YANG Huizhang, HE Huafeng, et al. A ship discrimination method based on high-frequency electromagnetic theory[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3893. doi: [10.3390/rs14163893](https://doi.org/10.3390/rs14163893).
- [105] WANG Miao, XIE Min, SU Qinning, et al. Identification of ship and corner reflector based on invariant features of the polarization[C]. IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), Wuxi, China, 2019: 545–549. doi: [10.1109/SIPROCESS.2019.8868738](https://doi.org/10.1109/SIPROCESS.2019.8868738).
- [106] LIANG Zhuorui, WANG Yong, ZHANG Xiaofeng, et al. Identification of ship and corner reflector in sea clutter environment[C]. 15th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), Beijing, China, 2020: 622–626. doi: [10.1109/ICSP48669.2020.9321063](https://doi.org/10.1109/ICSP48669.2020.9321063).
- [107] WANG Wenqing, LI Shuangshuang, LI Mengyan, et al. A method of radar target recognition based on polarization invariant feature[C]. 4th Seminar on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application, Nanjing, China, 2017: 106970P. doi: [10.1117/12.2309487](https://doi.org/10.1117/12.2309487).
- [108] CHEN Siwei, WU Guoqing, DAI Dahai, et al. Roll-invariant features in radar polarimetry: A survey[C]. 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019: 5015–5018. doi: [10.1109/IGARSS.2019.8900035](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8900035).
- [109] 陈伯孝, 郎思呈. 基于极化不变量和极化分解的海面角反射器干扰鉴别方法[P]. 中国, CN113759325A, 2021.
- CHEN Boxiao and LANG Sicheng. Sea corner reflector jamming identification method based on polarization invariants and polarization decomposition[P]. China, CN113759325A, 2021.
- [110] CHEN Siwei, WANG Xuesong, and SATO M. Uniform polarimetric matrix rotation theory and its applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4756–4770. doi: [10.1109/TGRS.2013.2284359](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2284359).
- [111] CHEN Siwei. Polarimetric coherence pattern: A visualization and characterization tool for PolSAR data investigation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(1): 286–297. doi: [10.1109/TGRS.2017.2746662](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2746662).
- [112] CUI Xingchao, TAO Chensong, SU Yi, et al. PolSAR ship detection based on polarimetric correlation pattern[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(3): 471–475. doi: [10.1109/LGRS.2020.2976477](https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2976477).
- [113] LI Haoliang, CUI Xingchao, and CHEN Siwei. PolSAR ship detection with optimal polarimetric rotation domain features and SVM[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3932. doi: [10.3390/rs13193932](https://doi.org/10.3390/rs13193932).
- [114] CHEN Siwei and TAO Chensong. PolSAR image classification using polarimetric-feature-driven deep convolutional neural network[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(4): 627–631. doi: [10.1109/LGRS.2018.2799877](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2799877).
- [115] CHEN Siwei, LI Yongzhen, and WANG Xuesong. Crop discrimination based on polarimetric correlation coefficients optimization for PolSAR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(16): 4233–4249. doi: [10.1080/01431161.2015.1079345](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1079345).
- [116] LI Haoliang, LI Mingdian, CUI Xingchao, et al. Man-made target structure recognition with polarimetric correlation pattern and roll-invariant feature coding[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1–5. doi: [10.1109/LGRS.2021.3121100](https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3121100).
- [117] WU Guoqing, CHEN Siwei, LI Yongzhen, et al. Null-pol response pattern in polarimetric rotation domain: Characterization and application[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1–5. doi: [10.1109/LGRS.2021.3139889](https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3139889).
- [118] LI Haoliang, YANG Chengli, and CHEN Siwei. Characterization of complex corner reflectors in polarimetric rotation domain[C]. 2021 CIE International Conference on Radar (Radar), Haikou, China, 2021: 590–593. doi: [10.1109/Radar53847.2021.10028511](https://doi.org/10.1109/Radar53847.2021.10028511).
- [119] 陈思伟, 李永祯, 王雪松, 等. 一种对三面角角反射器干扰的极化鉴别方法[P]. 中国, ZL201518004597.2, 2017.
- CHEN Siwei, LI Yongzhen, WANG Xuesong, et al. A polarization identification method for trihedral corner reflector jamming[P]. China, ZL201518004597.2, 2017.
- [120] 李郝亮, 陈思伟. 基于极化旋转域特征的角反射器干扰鉴别方法[C]. 第十七届全国电波传播年会会议论文集, 延安, 2022: 207–210. doi: [10.26914/c.cnkihy.2022.035629](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2022.035629).
- LI Haoliang and CHEN Siwei. Corner reflector jamming identification with polarimetric rotation domain feature[C]. 17th Chinese National Symposium on Radio Propagation, Yan'an, China, 2022: 207–210. doi: [10.26914/c.cnkihy.2022.035629](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2022.035629).
- [121] 李郝亮, 王国玉, 张慧, 等. 简缩极化雷达导引头极化旋转域自适应角反射器鉴别方法[C]. 2022年度导弹突防技术学术年会, 北京: 2022: 477–486.
- LI Haoliang, WANG Guoyu, ZHANG Hui et al. Adaptive corner reflector identification method in polarimetric rotation domain for compact polarimetric radar seeker[C]. 2022 Missile Penetration Technology Symposium, Beijing, China, 2022: 477–486.
- [122] 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. doi: [10.12263/DZXB.20220979](https://doi.org/10.12263/DZXB.20220979).

- 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. doi: [10.12263/DZXB.20220979](https://doi.org/10.12263/DZXB.20220979).
- [123] 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. doi: [10.12263/DZXB.20221139](https://doi.org/10.12263/DZXB.20221139).
- 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. doi: [10.12263/DZXB.20221139](https://doi.org/10.12263/DZXB.20221139).
- [124] 刘涛, 杨子渊, 蒋燕妮, 等. 极化SAR图像舰船目标检测研究综述[J]. 雷达学报, 2021, 10(1): 1–19. doi: [10.12000/JR20155](https://doi.org/10.12000/JR20155).
- LIU Tao, YANG Ziyuan, JIANG Yanni, *et al.* Review of ship detection in polarimetric synthetic aperture imagery[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(1): 1–19. doi: [10.12000/JR20155](https://doi.org/10.12000/JR20155).
- [125] 陈思伟, 崔兴超, 李铭典, 等. 基于深度CNN模型的SAR图像有源干扰类型识别方法[J]. 雷达学报, 2022, 11(5): 897–908. doi: [10.12000/JR22143](https://doi.org/10.12000/JR22143).
- CHEN Siwei, CUI Xingchao, LI Mingdian, *et al.* SAR image active jamming type recognition based on deep CNN model[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(5): 897–908. doi: [10.12000/JR22143](https://doi.org/10.12000/JR22143).
- [126] 黄钟冷, 姚西文, 韩军伟. 面向SAR图像解译的物理可解释深度学习技术进展与探讨[J]. 雷达学报, 2022, 11(1): 107–125. doi: [10.12000/JR21165](https://doi.org/10.12000/JR21165).
- HUANG Zhongling, YAO Xiwen, and HAN Junwei. Progress and perspective on physically explainable deep learning for synthetic aperture radar image interpretation[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(1): 107–125. doi: [10.12000/JR21165](https://doi.org/10.12000/JR21165).
- [127] 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. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.04.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.04.12).
- ZHANG Jun, HU Shengliang, YANG Qing, *et al.* RCS statistical features and recognition model of air-floating corner reflector[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(4): 780–786. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.04.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.04.12).
- [128] YUAN Haodong, FU Xiongjun, ZHAO Congxia, *et al.* Ship and corner reflector identification based on extreme learning machine[C]. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), Chongqing, China, 2019: 1–5. doi: [10.1109/ICSIDP47821.2019.9173150](https://doi.org/10.1109/ICSIDP47821.2019.9173150).
- [129] 胡生亮, 范学满, 贺静波. 基于元学习的反舰导弹目标识别研究[J]. 海军工程大学学报, 2018, 30(1): 1–6. doi: [10.7495/j.issn.1009-3486.2018.01.001](https://doi.org/10.7495/j.issn.1009-3486.2018.01.001).
- HU Shengliang, FAN Xueman, and HE Jingbo. Target recognition of anti-ship missile based on meta-learning[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2018, 30(1): 1–6. doi: [10.7495/j.issn.1009-3486.2018.01.001](https://doi.org/10.7495/j.issn.1009-3486.2018.01.001).
- [130] 范学满, 胡生亮, 贺静波. 基于集成间隔优化的对海雷达目标识别算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(12): 73–79. doi: [10.13245/j.hust.171212](https://doi.org/10.13245/j.hust.171212).
- FAN Xueman, HU Shengliang, and HE Jingbo. Target recognition method for maritime surveillance radars based on ensemble margin optimization[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(12): 73–79. doi: [10.13245/j.hust.171212](https://doi.org/10.13245/j.hust.171212).
- [131] 范学满, 胡生亮, 贺静波. 基于聚类和随机参考分类器的对海雷达目标识别算法[J]. 模式识别与人工智能, 2017, 30(11): 983–994. doi: [10.16451/j.cnki.issn1003-6059.201711003](https://doi.org/10.16451/j.cnki.issn1003-6059.201711003).
- FAN Xueman, HU Shengliang, and HE Jingbo. Target recognition algorithm for maritime surveillance radars based on clustering and random reference classifier[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2017, 30(11): 983–994. doi: [10.16451/j.cnki.issn1003-6059.201711003](https://doi.org/10.16451/j.cnki.issn1003-6059.201711003).
- [132] 梁子尧. 反舰雷达导引头极化抗干扰技术研究[D]. [硕士论文], 中国运载火箭技术研究院, 2021. doi: [10.27096/d.cnki.ghtdy.2021.000010](https://doi.org/10.27096/d.cnki.ghtdy.2021.000010).
- LIANG Ziyao. Research on polarization anti-jamming technology of anti-ship missile Seeker[D]. [Master dissertation], China Academy of Launch Vehicle Technology, 2021. doi: [10.27096/d.cnki.ghtdy.2021.000010](https://doi.org/10.27096/d.cnki.ghtdy.2021.000010).
- [133] 张荣文, 李彦鹏, 教亚飞. 主动雷达导引头波形选择抗角反射器干扰方法研究[J]. 电光与控制, 2015, 22(9): 20–24. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2015.09.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2015.09.005).
- ZHANG Rongwen, LI Yanpeng, and JIAO Yafei. Waveform selection of active radar seeker for anti-corner-reflector-interference[J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(9): 20–24. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2015.09.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2015.09.005).
- [134] 陈浩川, 张彬, 张振华. 精确制导多体制探测技术新进展[J]. 遥测遥控, 2017, 38(6): 23–29. doi: [10.13435/j.cnki.ttc.002896](https://doi.org/10.13435/j.cnki.ttc.002896).
- CHEN Haochuan, ZHANG Bin, and ZHANG Zhenhua. New development of multi-system and multi-band detection technology for precision guidance[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2017, 38(6): 23–29. doi: [10.13435/j.cnki.ttc.002896](https://doi.org/10.13435/j.cnki.ttc.002896).
- [135] 袁华, 严必虎. 外军反舰导弹装备使用现状及发展趋势研究[J]. 国防科技, 2014, 35(6): 46–50. doi: [10.13943/j.issn1671-4547.2014.06.10](https://doi.org/10.13943/j.issn1671-4547.2014.06.10).
- YUAN Hua and YAN Bihu. The use of anti-ship missiles and developing trend in foreign military[J]. *National Defense Technology*, 2014, 35(6): 46–50. doi: [10.13943/j.issn1671-4547.2014.06.10](https://doi.org/10.13943/j.issn1671-4547.2014.06.10).

- issn1671-4547.2014.06.10.
- [136] 王永. 雷达/红外成像复合制导面临的干扰及对抗[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(4): 13-17. doi: 10.3969/j.issn.1627-9730.2010.04.004.
WANG Yong. Analysis on interference and anti-interference to radar/IR-imaging anti-ship missile[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2010, 30(4): 13-17. doi: 10.3969/j.issn.1627-9730.2010.04.004.
- [137] 张晓瑜, 欧阳中辉, 杨玉彬, 等. 被动雷达/红外复合制导抗干扰性能分析[J]. 兵工自动化, 2012, 31(4): 61-64. doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.017.
ZHANG Xiaoyu, OUYANG Zhonghui, YANG Yubin, et al. Anti-jamming effectiveness analysis of passive radar/IR compound guidance[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2012, 31(4): 61-64. doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.017.
- [138] 邢世其, 刘业民, 李永祯, 等. 箔条在现代海战场中的应用及现状[J]. 航天电子对抗, 2021, 37(2): 58-64. doi: 10.16328/j.htdz8511.2021.02.014.
XING Shiqi, LIU Yemin, LI Yongzhen, et al. Application and status of chaff in modern sea battlefield[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2021, 37(2): 58-64. doi: 10.16328/j.htdz8511.2021.02.014.
- [139] 李有才, 郑春弟, 黄强. 旋转式RCS可变角反射器的结构与可行性研究[J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(3): 106-109, 120. doi: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2011.03.014.
LI Youcai, ZHENG Chundi, and HUANG Qiang. Structural design and feasibility study of rotary corner with variable RCS[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2011, 34(3): 106-109, 120. doi: 10.16426/j.cnki.jcdzdk.2011.03.014.
- [140] 祝寄徐, 裴志斌, 屈绍波, 等. 一种旋转型的角反射器的设计[J]. 现代电子技术, 2013, 36(11): 1-4. doi: 10.16652/j.issn.1004-373x.2013.11.026.
ZHU Jixu, PEI Zhibin, QU Shaobo, et al. Design of rotary-type corner reflector[J]. *Modern Electronics Technique*, 2013, 36(11): 1-4. doi: 10.16652/j.issn.1004-373x.2013.11.026.
- [141] 郝炎祯, 诸德放, 陈朋, 等. GO/AP法角反射器可变RCS模拟技术[J]. 现代防御技术, 2017, 45(6): 138-144. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2017.06.23.
HAO Yanzhen, ZHU Defang, CHEN Peng, et al. Variable RCS simulation technology for airborne corner reflector[J]. *Modern Defence Technology*, 2017, 45(6): 138-144. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2017.06.23.
- [142] 赵虎辰. 一种X波段全向雷达角反射器阵列设计[J]. 河北省科学院学报, 2019, 36(1): 26-29. doi: 10.16191/j.cnki.hbkx.2019.01.005.
ZHAO Huchen. Design of an X-band omnidirectional radar angular reflector array[J]. *Journal of the Hebei Academy of Sciences*, 2019, 36(1): 26-29. doi: 10.16191/j.cnki.hbkx.2019.01.005.
- [143] 冯德军, 谢前朋, 王俊杰, 等. 对雷达回波的无源电磁调控技术及其发展[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(6): 1236-1241. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2019.06.10.
FENG Dejun, XIE Qianpeng, WANG Junjie, et al. Passive electromagnetic manipulation technology to radar echo and its development[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(6): 1236-1241. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2019.06.10.
- [144] FERRER P J, LOPEZ-MARTINEZ C, AGUASCA A, et al. Transpolarizing trihedral corner reflector characterization using a GB-SAR system[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 774-778. doi: 10.1109/LGRS.2011.2113313.
- [145] 祝寄徐, 裴志斌, 屈绍波, 等. 一种加载超材料吸波体的新型三面角反射器设计[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(10): 52-54, 58. doi: 10.3969/j.issn.1001-2028.2013.10.014.
ZHU Jixu, PEI Zhibin, QU Shaobo, et al. Design of novel trihedral corner reflector loaded with meta-material absorbing body[J]. *Electronic Components and Materials*, 2013, 32(10): 52-54, 58. doi: 10.3969/j.issn.1001-2028.2013.10.014.
- [146] 张泽奎, 王东红, 雷忆三, 等. 基于超材料的RCS增强器设计[J]. 无线电工程, 2017, 47(5): 67-70. doi: 10.3969/j.issn.1003-3106.2017.05.16.
ZHANG Zekui, WANG Donghong, LEI Yisan, et al. A novel RCS enhancing device based on metamaterial[J]. *Radio Engineering*, 2017, 47(5): 67-70. doi: 10.3969/j.issn.1003-3106.2017.05.16.
- [147] 刘蕾. 电控可调无源散射体雷达特性研究[D]. [硕士学位论文], 国防科技大学, 2019. doi: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2019.001066.
LIU Lei. Research on radar characteristics of electrically tunable passive scatterers[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2019. doi: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2019.001066.

作者简介

李郝亮, 博士生, 主要研究方向为极化雷达成像与目标识别。

陈思伟, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为极化雷达成像与目标识别、机器学习、电子对抗等。

(责任编辑: 高山流水)