

高频地波雷达海杂波背景下目标检测研究综述*

杨 童, 尚 尚, 刘 明, 何康宁
(江苏科技大学电子信息学院 镇江 212003)

摘要: 高频地波雷达探测距离远、全天候、实时准确探测等优点在目标检测领域广泛应用。针对海杂波会干扰目标检测的问题, 分别从非线性预测类、分形类、子空间分解类、对消类等方面对海杂波背景下目标检测方法进行了综合评估。归纳总结国内外相关文献, 并对目前方法存在的不足进行总结。为以后深入研究海杂波干扰问题提供参考。

关键词: 高频地波雷达; 海杂波; 目标检测

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)06-0039-07

A review of research on target detection in the background of high frequency ground wave radar and sea clutter

YANG Tong, SHANG Shang, LIU Ming, HE Kangning

(School of Electronic and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The advantages of high-frequency ground wave radar with long detection range, all-weather, and real-time accurate detection are widely used in the field of target detection. Aiming at the problem that sea clutter can interfere with target detection, this paper comprehensively evaluates the target detection method in the background of sea clutter from the aspects of nonlinear prediction, fractal, subspace decomposition, and cancellation. Summarize relevant domestic and foreign literature, and put forward the prospects of the current methods. It provides a reference for further research on the problem of sea clutter interference in the future.

Key words: High frequency ground wave radar; Sea clutter; Target detection

引 言

高频地波雷达 (HF Surface Wave Radar) 作为一种新兴的海面目标探测雷达, 辐射高频电磁波, 利用短波 (3MHz~30MHz) 沿导电海洋平面绕射传播衰减且不受地球曲率影响等特点, 实现对雷达站水平视线以下舰船、导弹和低空飞机等目标的超视距探测^[1]。因其具有探测距离远、全天候、实时准确探测等优点被人们广泛应用于目标检测的两大方向: 一是海面移动目标探测与跟踪; 二是从雷达回波中提取现场海态信息。

在高频地波雷达对海面移动目标进行探测时, 许多干扰信号混杂在回波中, 其中, 谐振产生的强一阶回波称为“海杂波”^[2]。海杂波会淹没周围的目标信息, 进而影响目标检测的精度。当高频电磁波以趋于零的擦地角入射时, 只有高频无线电波长一半的正弦海浪与雷达发射的高频电磁波谐振产生的一阶回波占海杂波主要分量。因此, 本文研究对象主要是一阶海杂波。海杂波会受洋流切变等因素影响, 出现频谱展宽现象, 这也成为有效目标检测的一大挑战。

近年来, 国内外开展了很多海杂波抑制方面的研究, 主要有非线性预测类、分形类、子空间分解类、对消类等方法。本文将在海杂波背景下目标检测问题进行深入探讨, 并对前人提出的相关方法进行综述, 最后, 总结目前算法存在的缺陷, 并对研究前景进行展望。

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (61801196); 国防基础科研计划稳定支持专项项目 (JCKYS2020604SSJS010); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目 (KYCX20_3139, KYCX20_3142)

收稿日期: 2020-06-04 收修改稿日期: 2020-09-28

1 海杂波背景下目标检测方法

1.1 非线性预测类

最初的研究中, 海杂波被假设为平稳的随机过程, 但实际海杂波会更加复杂。针对海杂波的内在特性进行线性建模, 涌现出如正态分布、韦伯分布、复合 K 分布等统计分布的海杂波模型^[3-6]。由于海洋环境复杂, 线性建模难以契合地描述海杂波的特征, 不具有普适性。随着非线性概念引入海杂波建模中, 为海杂波内在特性研究另辟蹊径。近年来, 将海杂波的非线性预测应用于目标检测的方法已风起泉涌, 取得了一定进展。

由于神经网络具有较强的学习和非线性逼近能力, 基于神经网络的非线性预测方法应运而生。传统的神经网络预测方法, 如 RBF (Radial Basis Function) 和 SVM (Support Vector Machine), 其训练时间长且预测精度不高, 导致应用不广。韩长喜^[7]等人基于混沌理论, 用 RBF 对海杂波进行建模, 提出基于预测误差对微弱目标进行检测, 对信噪比有一定的改善。司文涛^[8]等人提出 RBFRW (Radial Basis Function With Regression Weight) 网络预测误差方法, 在低信噪比情况下也能使用, 优于传统 RBF 网络。由于 GRNN (General Regression Neural Network) 网络具有更强的运算速度和预测能力, 卢宁^[9]等学者将其引入到混沌背景下进行目标检测。但只使用 GRNN 对回波中的海杂波分量预测抵消, 会有短时尖峰出现。文献[10]加入时间窗方差滤波, 在提高信噪比的同时解决尖峰问题。回声状态网络凭借计算时间短、不易于陷入局部最优等优势, 被郑红利^[11]等人用于目标检测, 该算法流程如图 1 所示。同时, 用遗传算法对网络参数进行优化, 实验结果表明, 该算法

优于其他传统神经网络算法。徐婷^[12]等人对遗传小波神经网络的混沌时间预测进行了相关研究。随着研究进一步深入, 深度学习为海杂波中目标检测拓宽了思路。楼奇哲^[13]等人将卷积神经网络和定向惩罚方法相结合用于多目标检测, 不仅加快了网络学习效率还改善了目标检测效果。基于混沌理论或神经网络的非线性预测方法, 模型参数的选择问题一直是其未攻克的难题, 参数选择不当, 模型预测的效果将受到限制。另外, 神经网络需要对参数进行训练, 计算量较高, 未来需要在训练时间上做进一步提升, 增加时效性。

1.2 分形类

分形理论能够直观地反映海杂波的内在特性, 在雷达信号处理研究中广泛运用。Lo^[14]等人首次采用单一分形维数反映海杂波非线性特征, 检测目标的局部区域相对纯海杂波区域的分形维数出现变化, 根据这一差异实现海杂波背景下的目标检测。海情不同分形特性也会随之改变, 单一分形维数在高海情条件下难以将海杂波背景下的目标检测出来。

由于单一分形适用的局限性, Kaplan^[15]等人首次提出扩展自相似过程, 即创建一个参数化的结构

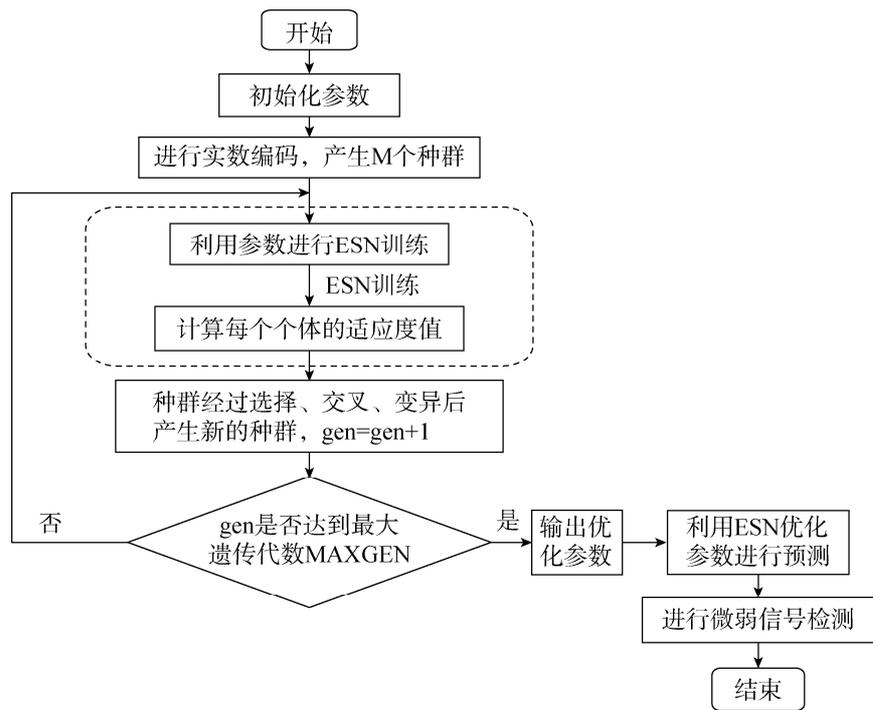


图 1 基于 GA-ESN 的混沌背景下微弱信号检测流程

Fig. 1 Weak signal detection process under chaotic background based on GA-ESN

函数以得到多尺度 Hurst 参数。鉴于扩展分形参数比单一分形维数值信息量多，许多相关学者提出基于扩展分形的目标检测方法（DBEFT）来对海杂波中微弱目标进行检测。李秀友^[16]等人从时域角度研究海杂波的扩展分形特性，把多尺度 Hurst 指数作为区分目标和海杂波的特征矢量，并通过模式识别中 Bayes 方法较大地提升了目标检测效果。但其只是从时域上进行分析，没有涉及到相干积累，信噪比提升效果受到限制。文献[17]在最优频域尺度下，利用海杂波单元和目标单元频谱的 Hurst 指数差异明显的特点来实现目标检测，但傅里叶变换只对匀速运动目标才产生较好的 SCR（Signal-to-Clutter Ratio）提升效果。在此基础上，刘宁波^[18]等人将扩展分形方法运用到海杂波 FRFT 谱分析中，对具有加速度的运动目标进行能量聚集，有效提升其信噪比，进一步提高海杂波和目标的区分精度。为克服傅里叶分析将观测序列以外数据默认为零所导致频谱分辨率低的缺点，范一飞^[19]等人提出基于 AR 谱扩展分形的目标检测方法，适用于低信噪比条件下微弱目标检测，该算法流程由图 2 给出。

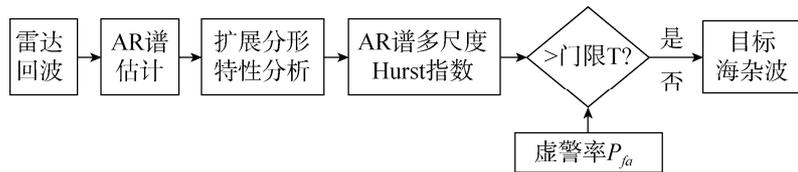


图 2 基于 AR 谱多尺度 Hurst 指数的目标检测

Fig. 2 Target detection based on multi-scale Hurst index of AR spectrum

将多重分形理论引入到海杂波背景下的目标检测中，为深刻揭示非线性信号内在结构提供又一思路，进一步提升了目标检测概率。文献[20]改良了海杂波无标度范围客观自动确定方法，减少了依靠人的经验观察等不确定因素，同时能够自动估算多重分形维数。但时域多重分形运用到目标检测时，在低 SCR 情况下目标检测较差。为此，刘宁波^[21,22]等人在频域和 FRFT 域中研究海杂波多重分形特征并提出目标检测方法。多重分形关联在单点多重分形基础上研究了奇异性强度的空间关联特征。关键^[23]等学者利用多重分形关联谱和 SVM 联合来进行目标检测，计算量较大导致实时性不强，且未考虑到海情的多变因素。行鸿彦^[24,25]提出通过分形差量来实现目标检测，将多重分形尺度进一步扩大，解决了复杂海情下的目标检测难题。

1.3 子空间分解类

子空间分解类方法是将雷达回波信号投影到海杂波子空间的空集抑制海杂波^[26]，可分为特征值分解（EVD）和奇异值分解（SVD）方法。

雷达信号进行时域采样构造 Hankel 矩阵 H ，对其奇异值分解得

$$H = USV^T \quad (1)$$

$S = \text{diag}[\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_c]$ 为奇异值矩阵， U 和 V 为左右奇异矢量。奇异值映射出矩阵能量在各个子空间上的聚集比重。奇异值越大，相应的子空间能量越多。奇异值大的对应一阶海杂波，奇异值小的对应噪声，剩下的对应小目标、海杂波的二阶分量或其他杂波。传统的 SVD 的海杂波抑制算法，将海杂波对应的大奇异值清零，保留目标信号，以此来进行目标检测。但是，只适合对大奇异值的海杂波进行抑制，很容易误消目标。为此，吴琳拥^[27]等人利用奇异值差分谱将奇异值进行划分，并对雷达回波信号进行分解，从而达到目标和杂波分离的目的，流程如图 3 所示。现有的子空间分解方法使用相邻海杂波的相关性将雷达回波用二维矩阵表示，

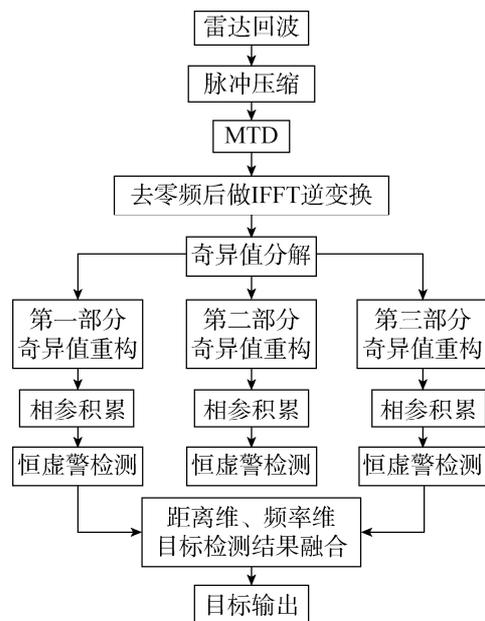


图 3 基于奇异值分解的微小目标检测流程
Fig. 3 Small target detection process based on singular value decomposition

以估计海杂波的子空间。但是由于数据有限, 海杂波会泄漏到目标子空间中, 并且在抑制海杂波后, SCNR 会降低。薄超^[28]等人提出利用高阶奇异值分解 (HOSVD) 来进行海杂波抑制, 该方法分别从相干积累脉冲、距离和角度三个层面对海杂波子空间做出估计, 提高了信干噪比, 比 SVD 抑制效果更好。但该方法的参数需要根据以往经验设定, 不利用工程应用。关译文^[29]等人将参数峰值信噪比 (PSNR) 引入 HOSVD 算法中, 自适应选择能将海杂波抑制后 PSNR 最大化的参数进行预设, 在 HOSVD 算法的基础上有效减少计算量, 同时, 在海杂波抑制方面有较好地提升。

基于 EVD 的海杂波抑制方法, 是将估计的协方差矩阵进行 EVD, 通过特征值的函数来划分数据投影到各个特征子空间的大小, 进而使海杂波得到抑制。当目标频率接近杂波多普勒频率时, 为抑制杂波必须在杂波频率上设置零点。为此, 傅里叶谱会产生目标谱峰分裂或偏移的问题, 虚警概率和速度测量误差也会受到影响。文献[30]引入一种基于数据阻塞预处理的空域主瓣干扰抑制技术, 优化改进得到 MEVD 海杂波抑制方法, 较好地解决了目标谱峰分裂或偏移问题。蔚娜^[31]等人根据相邻群距离单元上回波时域信号矢量的相关系数大小来选择群距离单元构造协方差矩阵, 并结合 EVD 和滑动模板滤波方法抑制海杂波。该方法针对杂波谱展宽严重问题有一定效果, 且方法简单易于在工程中应用。

子空间分解类方法在海杂波展宽与目标多普勒谱区发生混叠时, 目标检测效果不佳。当前空间分解要求目标与海杂波空间要满足正交的关系, 不然效果会相应地发生下降。另外, 子空间抑制效果也会由相关参数选择直接影响。

1.4 对消类

对消类根据处理域不同, 分为时域对消和谱图对消。时域对消将海杂波近似用复正弦信号表征, 通过对正弦信号参数的估计, 选择性地循环迭代抵消掉海杂波。该类方法一直致力于提高正弦信号的参数估计精度来改善对消效果。传统的对消法只利用傅里叶谱的幅度参数来估计正弦信号, 效果不好。郭欣^[32]等人提出 FFT 相位分析对消法, 考虑了海杂波分量的幅度和相位参数, 提高目标检测效果。但是该方法需要全局搜寻对消最强信号, 易将与海杂波幅度相近的目标误消。另外, 在短相干积累时间内, FFT 不能使多普勒分辨率达到较高的标准。为此, 文献[33]提出边界约束循环对消方法, 将海杂波理论与实测雷达回波特性相结合作为边界条件, 较好地解决目标误消的问题。同时, 提高 SCR 对海杂波抑制的效果更加明显。杨炼^[34]等人提出基于扩展 Prony 对消法, 取代传统 FFT 取用扩展 Prony 进行多普勒分析, 较好地抵消掉海杂波分量, 提高了目标检测精度。当目标与海杂波多普勒频移相近时, 对消后目标分量也会部分减弱, 进而海杂波背景下的目标难以被检测出来。尹德强^[35]等人鉴于海杂波的 FRFT 模函数在 FRFT 域中都有分布, 利用回波的 FRFT 模值减去移位后的值, 并通过构造检测统计量来确定是否有目标。该方法可以在不削减信号的情况下使海杂波的幅度显著降低, 在低 SCR 条件下同样有效。

谱图对消是在图像域对不同单元的海杂波进行对消。不同于时域对消需要短相干积累时间内优化正弦信号的参数估计精度提高对消成效, 谱图对消就海杂波的幅度分布有一定限制, 需随着频谱多普勒和距离近似或缓慢变化。陈多芳^[36]等人提出将空时二维谱变换成图像, 再在图像域对消海杂波, 该流程如图 4 所示。

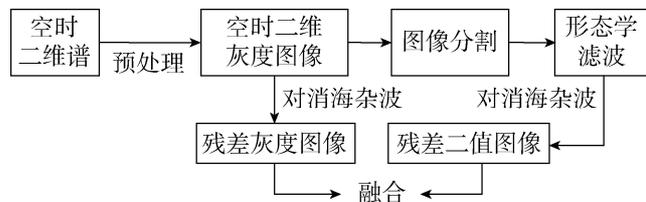


图 4 图像域海杂波抑制流程

Fig. 4 Sea clutter suppression process in the image domain

时域对消法在用正弦信号近似表示海杂波分量时, 需要对正弦信号的幅度、频率和相位参数进行精准估计, 否则海杂波抑制不充分会使杂波剩余并发生扩散, 降低目标检测性能。此外, 判断循环迭代次数的门限由以往经验得出, 门限参数选择不当会造成目标误消, 导致海杂波背景下目标检测性能变差。

2 结束语

①当前海杂波背景下目标检测方法, 仅在目标位于海杂波谱区外时, 才具有较好的海杂波抑制效果。当目标与海杂波回波参数相同时, 单一域的信号差异不足以检测出目标, 目前, 还没有提出行之有效的海杂波谱内目标算法。因此, 未来将结合多个域处理、引入现场海态信息等来提高目标检测效果。

②子空间抑制效果会受到矩阵维数等参数选择直接影响, 相关参数优化还需深入探讨。循环迭代次数的门限由以往经验得出, 门限参数选择不当会导致目标也会被剔除。非线性预测方法中, 模型参数的自适应选择问题还需解决。因此, 有必要对海杂波理论进行深入研究, 优化参数以减少海杂波对目标的干扰作用。

参考文献

- [1] 高火涛, 周林, 赵华侨, 等. 高频地波海态探测雷达天线技术[J]. 电波科学学报, 2013, 28(5): 999–1009.
GAO Huotao, ZHOU Lin, ZHAO Huaqiao, et al. High-frequency ground wave sea state detection radar antenna technology[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(5): 999–1009.
- [2] 何康宁, 尚尚. 高频地波雷达海杂波抑制方法研究综述[J]. 遥测遥控, 2019, 40(4): 10–16.
HE Kangning, SHANG Shang. Research review of sea clutter suppression methods for high frequency ground wave radar[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(4): 10–16.
- [3] SEKINE M, MUSHA T, TOMITA Y, et al. Weibull-Distributed sea clutter[J]. Iee Proceedings F Communications Radar & Signal Processing, 1983, 130(5): 476.
- [4] 高铮, 张安清. 海杂波典型幅度分布模型的仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(9): 76–78, 94.
GAO Zheng, ZHANG Anqing. Simulation analysis of the typical amplitude distribution model of sea clutter[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(9): 76–78, 94.
- [5] WATTS S. Radar detection prediction in sea clutter using the compound K-distribution model[J]. Iee Proceedings F Communications Radar & Signal Processing, 1985, 132(7): 613.
- [6] 孙康, 金钢, 朱晓华. 基于波动分析的海上小目标检测[J]. 电子与信息学报, 2013, (4): 882–887.
SUN Kang, JIN Gang, ZHU Xiaohua. Detection of small marine targets based on wave analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, (4): 882–887.
- [7] 韩长喜, 李宗武, 武楠, 等. 海杂波背景下基于混沌理论的目标检测[J]. 微型机与应用, 2010, 29(5): 45–48.
HAN Changxi, LI Zongwu, WU Nan, et al. Target detection based on chaos theory under the background of sea clutter[J]. Microcomputer & Its Applications, 2010, 29(5): 45–48.
- [8] 司文涛, 童宁宁, 王强. 海杂波背景中小目标检测算法研究[J]. 信号处理, 2014, 30(1): 106–111.
SI Wentao, TONG Ningning, WANG Qiang. Research on small target detection algorithm in sea clutter background[J]. Journal of Signal Processing, 2014, 30(1): 106–111.
- [9] 卢宁, 于才, 唐伟. 海杂波背景下的 GRNN 小目标检测[J]. 火控雷达技术, 2012, (2): 4–7.
LU Ning, YU Cai, TANG Wei. GRNN small target detection in the background of sea clutter[J]. Fire Control Radar Technology, 2012, (2): 4–7.
- [10] 毕井章, 刘溶, 周希辰, 等. 基于 GRNN 和时间窗方差滤波的海杂波抑制[J]. 电讯技术, 2014, (7): 72–76.
BI Jingzhang, LIU Rong, ZHOU Xichen, et al. Sea clutter suppression based on GRNN and time window variance filtering[J]. Telecommunication Engineering, 2014, (7): 72–76.
- [11] 郑红利, 行鸿彦, 徐伟. 混沌背景中微弱信号检测的回声状态网络方法[J]. 信号处理, 2015, (3): 336–345.
ZHENG Hongli, XING Hongyan, XU Wei. Echo state network method for weak signal detection in chaotic background[J]. Journal of Signal Processing, 2015, (3): 336–345.
- [12] 徐婷. 基于遗传小波神经网络的海杂波预测[J]. 电子设计工程, 2015, 23(18): 34–37.
XU Ting. Sea clutter prediction based on genetic wavelet neural network[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(18): 34–37.
- [13] 楼奇哲, 刘乐, 姚元. 采用卷积神经网络的海面多目标检测研究[J]. 信号处理, 2018, 34(9): 1053–1059.

- LOU Qizhe, LIU Le, YAO Yuan. Research on sea surface multi-target detection using convolutional neural network[J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(9): 1053–1059.
- [14] KAPLAN L M, KUO C J. Extending self-similarity for fractional Brownian motion[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(12): 3526–3530.
- [15] LO T, LEUNG H, LITVA J, et al. Fractal characterisation of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets[J]. IEE Proceedings F Radar and Signal Processing, 1993, 140(4): 243.
- [16] 李秀友, 关键, 黄勇, 等. 海杂波中基于扩展分形的目标检测方法[J]. 火控雷达技术, 2008, 37(2): 10–13, 38.
LI Xiuyou, GUAN Jian, HUANG Yong, et al. Target detection method based on extended fractal in sea clutter[J]. Fire Control Radar Technology, 2008, 37(2): 10–13, 38.
- [17] 宋杰, 刘宁波, 王国庆, 等. 海杂波 FRFT 谱的多重分形特性与目标检测[J]. 信号处理, 2013, 29(1): 1–9.
SONG Jie, LIU Ningbo, WANG Guoqing, et al. Approximate fractality of sea clutter FRFT spectrum and target detection[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(1): 1–9.
- [18] 刘宁波, 关键, 王国庆, 等. 基于海杂波 FRFT 谱多尺度 Hurst 指数的目标检测方法[J]. 电子学报, 2013, 41(9): 1847–1853.
LIU Ningbo, GUAN Jian, WANG Guoqing, et al. Target detection method based on multi-scale Hurst index of sea clutter FRFT spectrum[J]. Chinese Journal of Electronics, 2013, 41(9): 1847–1853.
- [19] 范一飞, 罗丰, 李明, 等. 海杂波 AR 谱扩展分形特性及微弱目标检测方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(1): 65–70.
FAN Yifei, LUO Feng, LI Ming, et al. The extended fractal characteristics of AR spectrum of sea clutter and weak target detection method[J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(1): 65–70.
- [20] 刘宁波, 关键. 海杂波的多重分形判定及广义维数谱自动提取[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(2): 126–131.
LIU Ningbo, GUAN Jian. Multifractal determination of sea clutter and automatic extraction of generalized dimension spectrum[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2008, 23(2): 126–131.
- [21] 刘宁波, 关键, 宋杰, 等. 海杂波频谱的多重分形特性分析[J]. 中国科学(信息科学), 2013, 43(6): 768–783.
LIU Ningbo, GUAN Jian, SONG Jie, et al. Multifractal characteristics analysis of sea clutter spectrum[J]. Science in China (Information Science), 2013, 43(6): 768–783.
- [22] 刘宁波, 王国庆, 包中华, 等. 海杂波 FRFT 谱的多重分形特性与目标检测[J]. 信号处理, 2013, 29(1): 1–9.
LIU Ningbo, WANG Guoqing, BAO Zhonghua, et al. Multifractal characteristics and target detection of FRFT spectra of sea clutter[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(1): 1–9.
- [23] 关键, 刘宁波, 张建, 等. 海杂波的多重分形关联特性与微弱目标检测[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 54–61.
GUAN Jian, LIU Ningbo, ZHANG Jian, et al. Multifractal correlation characteristics of sea clutter and weak target detection[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(1): 54–61.
- [24] 行鸿彦, 龚平, 徐伟. 海杂波背景下小目标检测的分形方法[J]. 物理学报, 2012, 61(16): 70–79.
XING Hongyan, GONG Ping, XU Wei. Fractal method for small target detection in the background of sea clutter[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(16): 70–79.
- [25] 行鸿彦, 杨岑睿. 基于高尺度分形差量的海杂波背景下小目标检测[J]. 现代雷达, 2017, 39(3): 29–33.
XING Hongyan, YANG Cenrui. Small target detection under sea clutter based on high-scale fractal difference[J]. Modern Radar, 2017, 39(3): 29–33.
- [26] 王伟鸣, 张杰, 纪永刚, 等. 高频地波雷达海杂波背景下的船只目标检测研究进展[J]. 海洋科学, 2016, 40(9): 140–144.
WANG Yiming, ZHANG Jie, JI Yonggang, et al. Research progress of ship target detection under the background of sea clutter by high frequency ground wave radar[J]. Marine Science, 2016, 40(9): 140–144.
- [27] 吴琳拥, 毛瑾, 白渭雄. 基于奇异值分解的雷达微小目标检测方法[J]. 电子科技大学学报, 2019, 48(3): 326–330.
WU Linyong, MAO Jin, BAI Weixiong. Radar small target detection method based on singular value decomposition[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2019, 48(3): 326–330.
- [28] 薄超, 顾红, 苏卫民. 基于高阶奇异值分解的 OTHR 海杂波抑制算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, (5): 872–878.
BO Chao, GU Hong, SU Weimin. OTHR sea clutter suppression algorithm based on high-order singular value

- decomposition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, (5): 872–878.
- [29] 关泽文, 陈建文, 鲍拯. 一种改进的基于峰值信噪比-高阶奇异值分解的天波超视距雷达自适应海杂波抑制算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(7): 1743–1750.
GUAN Zewen, CHEN Jianwen, BAO Zheng. An improved sky-wave over-the-horizon radar adaptive sea clutter suppression algorithm based on peak signal-to-noise ratio-high-order singular value decomposition[J]. *Journal of Electronics and Information*, 2019, 41(7): 1743–1750.
- [30] 赵志国, 陈建文, 鲍拯. 一种改进的 OTHR 自适应海杂波抑制方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(5): 909–914.
ZHAO Zhiguo, CHEN Jianwen, BAO Zheng. An improved OTHR adaptive sea clutter suppression method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 909–914.
- [31] 蔚娜, 李雪, 李铁成. 基于特征分解的多模杂波抑制方法[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(1): 85–90.
WEI Na, LI Xue, LI Tiecheng. Multi-mode clutter suppression method based on eigen-decomposition[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(1): 85–90.
- [32] 郭欣, 倪晋麟, 刘国岁. 短相干积累条件下天波超视距雷达的舰船检测[J]. *电子与信息学报*, 2004, 26(4): 613–618.
GUO Xin, NI Jinlin, LIU Guosui. Ship detection of sky-wave over-the-horizon radar under short-coherent accumulation conditions[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(4): 613–618.
- [33] 王祎鸣, 毛兴鹏, 张杰, 等. 高频地波雷达海杂波的边界约束循环对消[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(2): 278–284.
WANG Yiming, MAO Xingpeng, ZHANG Jie, et al. Boundary-constrained cyclic cancellation of sea clutter from high-frequency ground wave radar[J]. *Oceanologia et Limnologica Sinica*, 2015, 46(2): 278–284.
- [34] 杨炼, 孙合敏, 潘新龙. 基于扩展 Prony 算法的海杂波循环对消法[J]. *现代雷达*, 2011, 33(6): 53–57.
YANG Lian, SUN Hemin, PAN Xinlong. Sea clutter cancellation method based on extended Prony algorithm[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(6): 53–57.
- [35] 尹德强, 李文海. 基于 FRFT 移位对消的海面运动目标检测[J]. *电路与系统学报*, 2012, (6): 61–63.
YIN Deqiang, LI Wenhai. Detection of sea surface moving targets based on FRFT shift cancellation[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2012, (6): 61–63.
- [36] 陈多芳, 陈伯孝, 秦国栋. 岸-舰双基地波超视距雷达图像域海杂波抑制方法[J]. *电子学报*, 2010, 38(2): 387–392.
CHEN Duofang, CHEN Boxiao, QIN Guodong. Sea clutter suppression method for shore-to-ship bistatic over-the-horizon radar image domain[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2010, 38(2): 387–392.

[作者简介]

杨 童 1997 年生, 硕士, 主要研究方向为高频地波雷达信号处理和目标检测。

尚 尚 通讯作者, 1982 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为高频地波雷达信号处理和电离层杂波抑制。

刘 明 1997 年生, 硕士, 主要研究方向为毫米波雷达信号处理和弯道检测。

何康宁 1996 年生, 硕士, 主要研究方向为高频地波雷达信号处理和海杂波抑制。