

强海杂波背景下目标检测方法综述*

张先芝, 尚 尚[✉], 戴圆强, 刘 明
(江苏科技大学电子信息学院 镇江 212003)

摘要: 高频地波雷达被广泛应用于海面目标的检测, 而由于海杂波的分布散射具有很强的动态特性, 通常情况下成为了海面目标检测的主要干扰成分。因此, 在强海杂波背景下进行目标检测的关键在于如何有效抑制海杂波。从循环对消、子空间分解、模型预测以及分形特征这几方面对海杂波抑制技术进行综述、分析和总结, 为后续对海面目标检测提供参考。

关键词: 高频地波雷达; 海杂波抑制; 目标检测

中图分类号: TN957.54 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)01-0013-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210507001

引用格式: 张先芝, 尚尚, 戴圆强, 等. 强海杂波背景下目标检测方法综述[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 13–20.

Review on target detection in the background of strong sea clutter

ZHANG Xianzhi, SHANG Shang, DAI Yuanqiang, LIU Ming

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

Abstract: High-frequency ground wave radar is widely used in the detection of sea targets, and sea clutter has stronger dynamic characteristics due to distributed scattering, and usually becomes the main interference component of sea target detection. Therefore, the key to target detection under the background of strong sea clutter is how to effectively suppress sea clutter. This article summarizes the sea clutter suppression technology from the aspects of cyclic cancellation, subspace decomposition, model prediction and fractal features to provide a reference for subsequent sea surface target detection.

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

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210507001

Citation: ZHANG Xianzhi, SHANG Shang, DAI Yuanqiang, et al. Review on target detection in the background of strong sea clutter[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 13–20.

引 言

高频地波雷达 HFSWR (High Frequency Surface Wave Radar) 的工作频段在 3 MHz~30 MHz。辐射的高频电磁波不受地球曲率的影响, 具有探测距离远、探测精度高、实时性强、不易受恶劣天气影响等特点^[1]。高频地波雷达在两个方面发挥了重要作用, 其一是对海上目标信号的检测与跟踪, 可以得到目标的方位、距离等信息; 另一个是对于海洋环境的探测, 利用海杂波进行参数反演, 得到风速、风向、浪高、径向流速等海态信息, 为海洋灾害预防、海上活动提供可靠保障。

高频地波雷达的回波中存在着多种成分, 有海杂波、电离层杂波等。高频地波雷达在目标检测及跟踪这一应用中, 这些杂波的存在严重影响了对于目标信号的检测性能。海杂波的产生是由于电磁波和海浪的相互作用导致的。在海洋表面流的作用下, 加之受到雷达合成孔径的限制, 海杂波的一阶峰会在雷达回波频谱中展宽, 继而给海上目标的检测带来了巨大的挑战。因此, 要对海上目标进行检测, 首先要对雷达回波中的海杂波进行抑制。传统的海杂波抑制方法有循环对消法, 基于子空间分解的方法, 基于海杂波模型预测的方法, 基于分形特征的方法等。本文将对海杂波背景下的目标检测方法进行综述、分

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (61801196); 国防基础科研项目稳定支持专项项目 (JCKYS2020604SSJS010); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目 (KYCX21_3478)

[✉]通讯作者: 尚尚 (shangshang@just.edu.cn)

收稿日期: 2021-05-07

析及总结。

1 海杂波抑制技术

1.1 基于循环对消的海杂波抑制

对海杂波的主分量分析处理时, 可以将其近似看作正弦信号, 循环迭代对消方法^[2]以此为基础, 提出雷达回波在时域上逐次减掉估计的正弦信号来实现海杂波的对消, 该算法的流程图如图 1 所示。

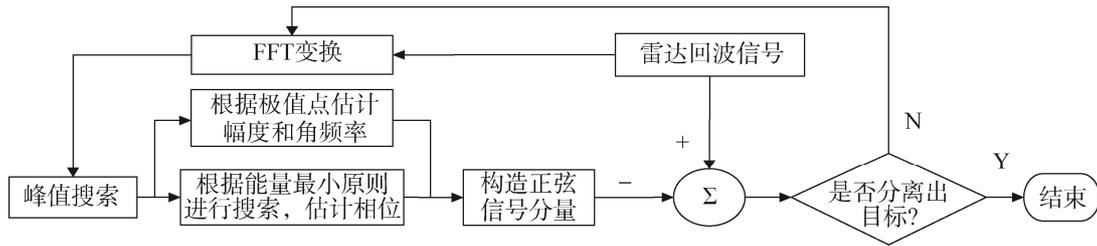


图 1 基于循环对消的海杂波背景下目标检测流程图

Fig. 1 Flowchart of target detection in the background of sea clutter based on cyclic cancellation

该方法对海杂波的抑制性能主要取决于对正弦信号频率、相位以及幅度信息的估计精确度。由于短时间序列的频率分辨率较低, 传统的循环对消方法仅利用频谱中的峰值进行估计, 容易引起栅栏效应。郭欣^[3]等人在循环对消中考虑到相位分析法, 利用相位信息对粗测频率进行补差, 直接得到估计信号的相位值, 无需根据最小化误差准则进行搜索, 提高了估计精度。为了提高循环对消的性能, 文献[4]提出用扩展 Prony 方法替代海杂波 FFT 进行频谱估计, 从而更加精确地估计出正弦信号的频率及相位信息, 得到了更好的对消性能。由于循环对消方法依赖于对极值的搜索, 即目标的幅度特性对海杂波对消性能有较大影响, 海杂波与目标的区分性很小, 容易导致误消目标, 文献[5]提出了一种边界约束对消方法, 总结归纳实际海杂波的特性, 将其作为边界条件约束循环对消过程, 该方法有效改善了循环对消方法的对消性能。

基于循环对消的海杂波抑制结果如图 2 所示。实验中所使用的雷达回波数据均为威海的实测数据, 均取第 30 个距离单元的数据, 雷达的工作频率为 3.7 MHz, 采样间隔为 0.149 s。

由图 2 可以看出, 传统对消方法的本质使它存在着一些问题, 故基于循环对消方法进行海杂波抑制的稳定性和有效性有待改善。海杂波这种多分量系统需要进行多次迭代对消, 对消的次数会影响对消处理后的信噪比, 图 2 中迭代次数太少时海杂波并没有完全被剔除。但由于海杂波比较复杂, 且目标信号未知, 所以很难确定循环对消的迭代次数。另外, 由于循环对消方法是对峰值进行搜索, 自动处理过程中逐次对能量最强的信号进行剔除, 这种方法对于回波中的目标和海杂波信号的区分性不强, 当目标信号的幅度与海杂波信号难以区分时, 容易造成误消目标信号, 导致漏警率上升。

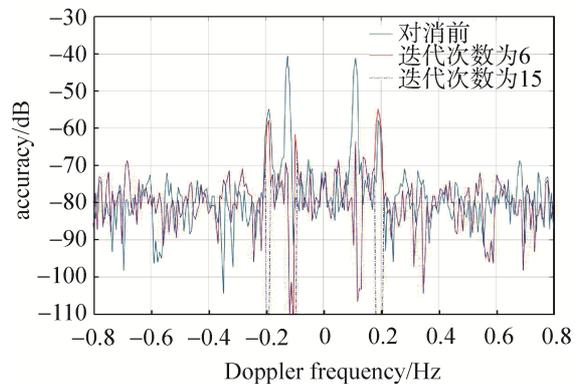


图 2 基于循环对消的海杂波抑制结果

Fig. 2 Sea clutter cancellation results based on cyclic cancellation

1.2 基于子空间分解

基于子空间分解的方法是以杂波在子空间的聚集特性为理论基础实现对海杂波的抑制。典型的方法有特征值分解 EVD (Eigen Value Decomposition) 方法^[6-8]以及奇异值分解 SVD (Singular Value Decomposition) 方法^[9-13]。

基于特征值分解的方法, 是根据协方差矩阵的特征值分布划分杂波子空间和目标子空间^[6], 从而实现海杂波的抑制, 将海杂波抑制后的序列进行目标检测。当海杂波与目标多普勒频率接近时, 可能会存在目标谱峰分裂或者目标谱偏移的情况, 为了解决这一问题, 赵志国^[7]等人提出了一种改进特征值分

解 (MEVD) 方法进行海杂波的抑制, 将特征值分解方法与空域主瓣干扰技术相结合, 提高了目标的信噪比。由于特征值分解算法在对高维的协方差矩阵进行处理时运算量很大, 刘定智^[8]等人提出了一种基于循环子空间投影的杂波抑制的快速方法, 利用特征值的差值对信号系空间的维数进行估计, 有效降低了目标的能量损失, 同时减小了计算量, 更有利于工程实现。

基于奇异值分解的海杂波抑制算法是将海杂波信号视为窄带信号进行处理, 将接收到的雷达回波时域数据进行奇异值分解, 然后将海杂波所对应的奇异值置零之后重新构造时域序列^[9]。对于强海杂波背景下的“低小慢”目标的检测, 吴琳拥^[10]将奇异值分解作为理论基础, 以奇异值一阶、二阶差分谱为依据, 对奇异值进行选择, 实现对海杂波的抑制。由于海杂波泄露到目标子空间会导致信噪比降低, 为减小这种泄露, 提高对海杂波的抑制性能, 薄超^[11]等人利用海杂波在距离维和角度维的相关特性, 从慢时间、距离维度以及角度维度三个方面对子空间进行估计, 有效地抑制了海杂波。为了更准确地对海杂波的奇异值进行判别, 王祎鸣^[12]等人综合利用多个处理域, 将时域分析与矩阵分解联合, 有效提高了海杂波的抑制性能。由于一阶海杂波的复杂性, 不容易准确分辨出信号子空间和噪声子空间, 王龙岗^[13]等人在 SVD 方法的基础上提出了空域奇异值分解, 在空域进行对海杂波子空间和噪声子空间的划分, 减小了奇异值的数目, 更容易对子空间进行划分。该方法流程图如图 3 所示。

以上基于子空间分解的海杂波抑制方法, 当目标处于海杂波的多普勒频率范围之内或者两者频率接近时, 会导致目标被误消。另外, 矩阵分解的计算量偏大, 实时效率较低, 这是该方法需要解决的问题。

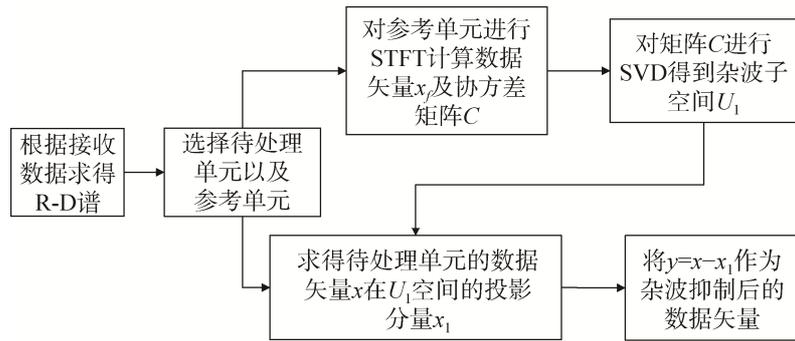


图 3 基于奇异值分解的海杂波抑制流程图

Fig. 3 Flow chart of sea clutter cancellation with singular value decomposition

1.3 基于海杂波模型预测的目标检测方法

由于海杂波信号具有随机起伏的特点, 所以传统的建模方法主要是根据概率统计模型对其隐含的统计规律进行研究分析。最常见的四种模型有瑞利分布、对数正态分布、韦布尔分布以及 K 分布^[14-17]。不同模型适用于不同的工作环境, 其中, 瑞利分布适用于低分辨率雷达以较大的人射角进行观测的工作环境。对于高分辨雷达以地入射角进行观测时, 海杂波的幅度分布大概率会存在很长的拖尾现象, 通常用对数正态分布对其进行描述, 但是对数正态分布可能会导致过拟合^[18]。韦布尔分布可以用于海杂波起伏较小的工作环境, 拟合范围在瑞利分布和对数正态分布之间^[19]。K 分布适用于高分辨率雷达对非均匀海杂波的建模。由于海况复杂, 从对这些典型模型的分析来看, 模型的参数估计复杂度高, 适应性低, 仅使用某种分布来描述海杂波并不具有普适性。

为了更加充分地描述海杂波, 便产生了一系列的非线性预测方法。这种非线性理论主要是为了描述复杂对象隐藏在其不规律表象之中的规律特性。此类方法有十分强大的非线性拟合能力, 因此能够更好地满足拟合海杂波的需求。常用的时域模型预测方法有支持向量机模型预测、径向基神经网络模型预测。

支持向量机 SVM (Support Vector Machine) 是将低维的数据通过一种非线性映射映射到高维空间之后再对其进行后续的线性回归^[20]。通过海杂波样本数据训练支持向量机预测器, 得到支持向量机预测器的模型参数, 将雷达回波通过支持向量机预测器, 实现对海杂波的预测, 从得到的预测误差信息中实现对目标的检测^[21]。由于参数的选取对支持向量机的性能影响较大, 文献[22]提出了基于新型 LS-SVM 模型的海杂波背景微弱信号检测, 提高了预测精度。文献[23]提出了一种基于 IA-SVM 模型的混沌小信号检测方法, 利用免疫算法对支持向量机的参数进行优化, 提高了预测性能。

由于海杂波具有混沌特性^[24], 径向基 RBF (Radial Basis Function) 神经网络对于混沌时间序列具有较好的拟合特性, 使用 RBF 神经网络对海杂波进行时间序列的预测^[25], 原理框图如图 4 所示。

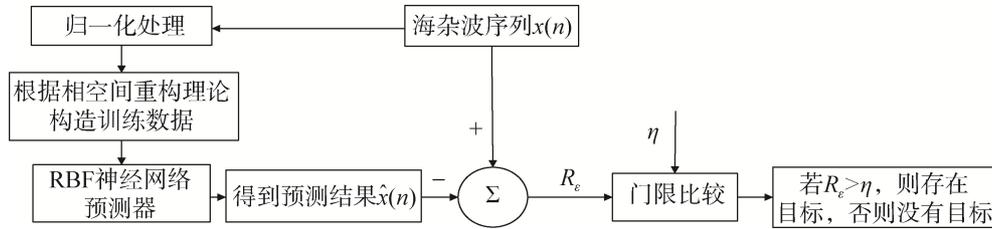
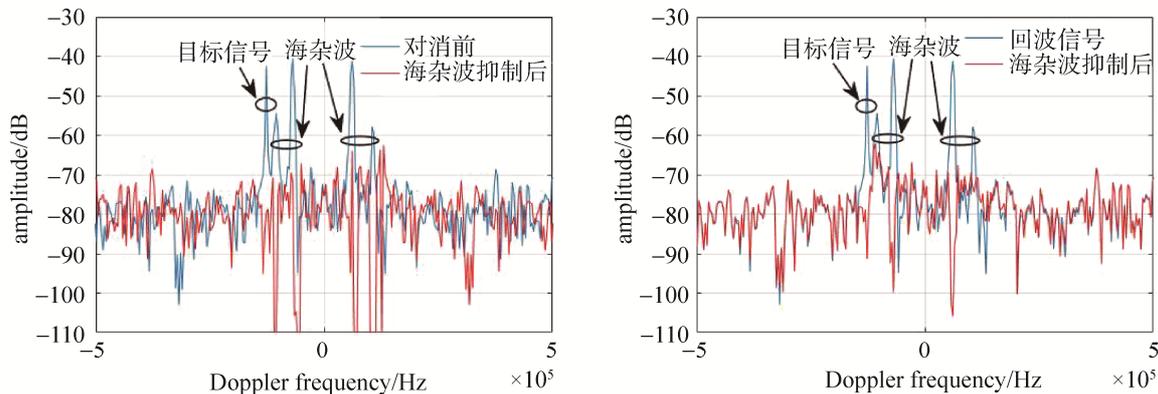


图 4 基于 RBF 神经网络的海杂波背景下目标检测流程图

Fig. 4 Flow chart of target detection in the background of sea clutter with RBF neural network

利用神经网络的拟合作用对具有混沌特性的海杂波序列进行建模, 然后对雷达回波序列进行预测, 根据预测误差实现对目标的检测。由于径向基神经网络的初始值对神经网络的训练有较大的影响, 为了进一步提高预测精度, 文献[26]将支持向量机算法和神经网络算法相结合, 通过 SVM 算法得到的支持向量的个数确定神经网络隐含层的个数。文献[27]通过粒子群算法对神经网络的核函数参数的初始化值进行寻优操作, 提高了神经网络的预测精度。

对传统的循环抵消方法、奇异值分解方法以及非线性模型预测方法进行仿真对比。实验中所使用的雷达回波数据为威海的实测数据, 取第 30 个距离单元的数据, 在靠近海杂波的多普勒频率范围附近加一个频率接近的目标信号, 雷达的工作频率为 3.7 MHz, 采样间隔为 0.149 s, 仿真结果如图 5 所示。

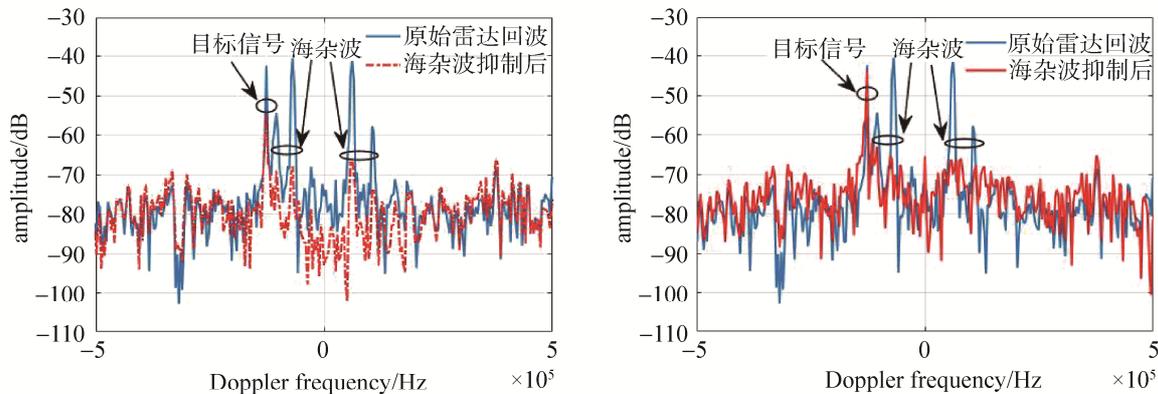


(a) 循环抵消方法进行海杂波抑制

(b) 奇异值分解方法进行海杂波抑制

(a) Circulation cancellation algorithm for sea clutter suppression

(b) SVD method for sea clutter suppression



(c) 支持向量机预测法进行海杂波抑制

(d) RBF神经网络方法进行海杂波抑制

(c) SVM method for sea clutter suppression

(d) RBF neural network method for sea clutter suppression

图 5 多种方法进行海杂波抑制

Fig. 5 Various methods for sea clutter suppression

从仿真结果可以看出，当目标信号与海杂波的多普勒频率范围很接近时，传统的循环对消方法以及子空间分解方法都不能很好地区分出海杂波与目标信号，在抑制海杂波的同时很容易导致目标信号被误消；而基于海杂波模型的非线性预测方法、支持向量机预测方法以及径向基神经网络预测方法能够比较好地抑制海杂波，并且保留目标信号。

对于一系列的非线性预测方法，能够实现对海杂波的预测，利用预测误差实现对目标的检测。但非线性预测方法仍然存在一些问题需要不断探索解决，对于各种训练网络的初始化不同，将直接影响到预测性能以及目标的检测能力。另外，对于神经网络的结构参数大多是出于经验人为选择，需要通过理论推导对其进一步研究，不断提高模型的预测精度，建立更加具有普适性的模型。

1.4 基于分形特征的目标检测

非线性理论的另一重大分支是分形理论，分形理论是从结构角度分析研究对象的不规则特性。由于海洋表面具有复杂性和多样性，为了能够提取更多信息特征，LO 等人引入分形理论对海杂波的特性进行分析^[28]，其原理是由于海杂波与目标回波的分形维数不同，当海杂波附近范围内出现人造目标时，Hurst 指数会受到影响，该算法即通过 Hurst 指数实现对目标信号的检测。文献[29]以离散分数布朗理论为基础，提出了一种快速计算 Hurst 指数的方法，提高了目标检测的效率。在实际应用中，仅用单一的分维数对其进行描述不能准确地反映其分形特征，文献[30]通过多重分形参数判定是否存在目标。多重分形参数是在分形理论的基础上，对于多个角度的奇异测度所组成的集合，可以实现对海杂波更加充分地描述。石志广^[31]等人通过实验对海杂波的多重特性进行分析，探讨了将其作为雷达目标检测方法的可行性，为后续研究提供了依据。

分形特征方法在目标检测领域不断发展，李秀友^[32]等人将模式识别中的分类方法与之结合，提出一种基于扩展分形多尺度 Hurst 参数的目标检测算法，有效提高了目标检测性能。行鸿彦^[33]等人结合多重分形去势波动分析法，提出了一种基于分形差量的小目标检测方法。为克服频谱傅里叶分析的缺点，获得更精确的频谱分辨率，范一飞^[34]等人提出一种基于自回归谱的多尺度 Hurst 指数的目标检测方法。由于分数阶傅里叶变换 FRFT (Fractional fourier transform) 能有效聚集目标的能力，而海杂波却难以得到有效峰值，顾智敏^[35]等人提出了分数傅里叶变换域内的海杂波多重分形特性与目标检测，增加了目标信号与海杂波在进行判决时的差异，提高了信号检测的能力，其流程图如图 6 所示。



图 6 基于分形特征的目标检测流程图

Fig. 6 Flow chart of target detection based on fractal features

如今，分形理论在信号检测这一领域内已广泛应用，但也存在一些缺陷有待改善。当维数升高后，计算量急剧增大，另外，随着海面状况越来越复杂，对于目标的检测仅仅依靠分形理论并不能完全满足需求。希望广大学者可以不断探索，将该理论与更多的方法相结合，更加深入地分析海杂波的特性，不断提高海杂波背景下的目标检测性能。

2 结束语

对于高频地波雷达在目标检测方面的应用，首要任务是抑制海杂波。目前，诸多海杂波抑制方法都存在着需要不断改进完善的地方。基于循环迭代的海杂波抑制方法，仅利用峰值搜索逐次剔除能量最强的信号，这种方法对于海杂波和信号的区分度不高，另外当目标信号与海杂波的多普勒谱接近时，抑制海杂波的同时容易误消目标，并且很难确定最优的迭代次数。基于子空间分解的海杂波抑制方法，当目标处于海杂波的多普勒频率内或者两者接近时，易导致目标信号衰减或者误消，漏警率上升。支持向量机进行海杂波模型预测的方法，对于损失函数参数、核函数的参数以及惩罚参数的确定有待进一步优化。利用神经网络进行海杂波模型预测的方法，神经网络结构的不同以及神经网络的初始化参数的选取都会直接影响对目标的检测性能。基于分形特征的目标检测，当检测区间受到海况以及雷达参数的影响时，

对海杂波在此区间的分形特征的估计误差较大,有待更加深入地分析海杂波的特性,提高目标检测性能。

当目标信号淹没在海杂波的多普勒谱中,如何有效抑制海杂波,检测目标信号仍然是有待攻克的难题。

参考文献

- [1] 王瑞富, 孔祥超, 纪永刚, 等. 基于 GIS 的高频地波雷达回波信号的表达处理与显示[J]. 海洋科学, 2015, 39(7): 86–92.
WANG Ruifu, KONG Xiangchao, JI Yonggang, et al. Expression, processing and display of high frequency ground wave radar echo signal based on GIS[J]. Marine Science, 2015, 39(7): 86–92.
- [2] ROOT B T. HF-over-the-horizon radar ship detection with short dwells using clutter cancelation[J]. Radio Science, 1998, 33(4): 1095–1111.
- [3] 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, (4): 613–618.
GUO Xin, NI Jinlin, LIU Guosui. Ship detection of sky-wave over-the-horizon radar under the condition of short-coherent accumulation[J]. Journal of Electronics and Information, 2004, (4): 613–618.
- [4] 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 circulation cancellation method based on extended Prony algorithm[J]. Modern Radar, 2011, 33(6): 53–57.
- [5] 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 in high-frequency ground wave radar[J]. Oceans and Lakes, 2015, 46(2): 278–284.
- [6] WANG G, XIA X G, ROOT B T, et al. Manoeuvring target detection in over-the-horizon radar using adaptive clutter rejection and adaptive chirplet transform[J]. IEEE proceedings-radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(4): 292–298.
- [7] 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]. System Engineering and Electronic Technology, 2012, 34(5): 909–914.
- [8] 刘定智, 王道乾. 基于循环子空间投影的杂波快速抑制方法[J]. 电视技术, 2018, 42(06): 58–63.
LIU Dingzhi, WANG Daoqian. Fast clutter suppression method based on cyclic subspace projection[J]. Television Technology, 2018, 42(06): 58–63.
- [9] POON M W Y, KHAN R H, LENGOC S. A singular value decomposition (SVD) based method for suppressing ocean clutter in high frequency radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing: A publication of the IEEE Signal Processing Society, 1993, 41(3): 1421–1425.
- [10] 吴琳拥, 毛谨, 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.
- [11] 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, 36(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 Electronic Technology, 2014, 36(5): 872–878.
- [12] 王祎鸣, 张杰, 纪永刚, 等. 高频地波雷达海杂波抑制的时频-矩阵联合法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 122–127.
WANG Yiming, ZHANG Jie, JI Yonggang, et al. Time-frequency-matrix joint method of sea clutter suppression for high-frequency ground wave radar[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2015, 45(3): 122–127.
- [13] 王龙岗, 岳显昌, 吴雄斌, 等. 基于奇异值分解的空域海杂波抑制算法[J]. 电波科学学报, 2021, 36(4): 645–652.
WANG Longgang, YUE Xianchang, WU Xiongbai, et al. An algorithm for suppression of sea clutter in spatial domain based on singular value decomposition[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(4): 645–652.
- [14] 张宝宝. 雷达杂波的建模仿真技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
ZHANG Baobao. Research on modeling and simulation technology of radar clutter[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
- [15] 曹艳霞, 李国君. 基于 K 分布舰载雷达海杂波仿真方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(1): 86–90.

- CAO Yanxia, LI Guojun. Research on sea clutter simulation method of shipborne radar based on K distribution[J]. Radar Science and Technology, 2016, 14(1): 86–90.
- [16] 宋莹, 姬光荣. 海杂波幅度分布模型的研究[J]. 现代电子技术, 2015, 38(19): 15–18.
SONG Ying, JI Guangrong. Research on the amplitude distribution model of sea clutter[J]. Modern Electronic Technology, 2015, 38(19): 15–18.
- [17] 刘宁波, 孙艳丽, 丁昊, 等. 基于实测海杂波的典型幅度分布模型对比分析[J]. 计算机仿真, 2017, 34(5): 448–452.
LIU Ningbo, SUN Yanli, DING Hao, et al. Comparative analysis of typical amplitude distribution models based on measured sea clutter[J]. Computer Simulation, 2017, 34(5): 448–452.
- [18] GEORGE S. The detection of nonfluctuating targets in log-normal clutter[R]. NRL Report, 1968:6796.
- [19] SEKINE M, MAO Y. Weibull radar clutter[M]. London: Peter Peregrinus, 1990.
- [20] SAPANKEVYCH N I, RAVI SANKAR. Time series prediction using support vector machines: A survey[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2009, 4(2): 24–38.
- [21] MUKHERJEE S, OSUNA E, GIROSI F. Nonlinear prediction of chaotic time series using a support vector machine[J]. Proceedings of the IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing, 1997 (7): 511–512.
- [22] 行鸿彦, 金天力. 基于对偶约束最小二乘支持向量机的混沌海杂波背景中的微弱信号检测[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 140–146.
XING Hongyan, JIN Tianli. Weak signal detection in the background of chaotic sea clutter based on dual-constrained least squares support vector machine[J]. Acta Phys. Sin, 2010, 59(1): 140–146.
- [23] 孙江, 行鸿彦, 吴佳佳. 基于 IA-SVM 模型的混沌小信号检测方法[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(3): 119–125.
SUN Jiang, XING Hongyan, WU Jiajia. Chaotic small signal detection method based on IA-SVM model[J]. Journal of Detection and Control, 2020, 42(3): 119–125.
- [24] 林三虎, 朱红, 赵亦工. 海杂波的混沌特性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(2): 178–180, 244.
LIN Sanhu, ZHU Hong, ZHAO Yigong. Analysis of chaotic characteristics of sea clutter[J]. System Engineering and Electronic Technology, 2004, 26(2): 178–180, 244.
- [25] 陈瑛, 罗鹏飞. 海杂波背景下基于 RBF 神经网络的目标检测[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(5): 271–275.
CHEN Ying, LUO Pengfei. Target detection based on RBF neural network under the background of sea clutter[J]. Radar Science and Technology, 2005, 3(5): 271–275.
- [26] 梁国良. 基于 RBF 神经网络的海杂波抑制算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
LIANG Guoliang. Research on sea clutter suppression algorithm based on RBF neural network[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [27] 石嘉, 夏德平. 海杂波背景下的 PSO-RBF 弱目标检测[J]. 电子测量技术, 2019, 42(7): 35–39.
SHI Jia, XIA Deping. PSO-RBF weak target detection under the background of sea clutter[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(7): 35–39.
- [28] LO T, LEUNG H, LITVA J, et al. Fractal characterization of sea scattered signals and detection of sea-surface targets[C]. IEE Proceedings F(Radar and Signal Processing). IET Digital Library, 1993, 140(4): 243–250.
- [29] CHANG Y C, CHANG S Y. A fast estimation algorithm on the Hurst parameter of discrete-time fractional Brownian motion[J]. IEEE Transactions on Signal Processing: A publication of the IEEE Signal Processing Society, 2002, 50(3).
- [30] HU J, TUNG W W, GAO J B. Detection of low observable targets within sea clutter by structure function based multifractal analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(1): 136–143.
- [31] 石志广, 周剑雄, 赵宏钟, 等. 海杂波的多重分形特性分析[J]. 数据采集与处理, 2006, (2): 168–173.
SHI Zhiguang, ZHOU Jianxiong, ZHAO Hongzhong, et al. Analysis of multifractal characteristics of sea clutter[J]. Data Acquisition and Processing, 2006, (2): 168–173.
- [32] 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, (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, (2): 10–13, 38.
- [33] 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 under the background of sea clutter[J].

Chinese Journal of Physics, 2012, 61(16): 70–79.

- [34] 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): 59–64.

FAN Yifei, LUO Feng, LI Ming, et al. Sea clutter AR spectrum extended fractal characteristics and weak target detection method[J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(1): 59–64.

- [35] 顾智敏, 张兴敢, 王琼. FRFT 域内的海杂波多重分形特性与目标检测[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017, 53(4): 731–737.

GU Zhimin, ZHANG Xinggan, WANG Qiong. Multifractal characteristics and target detection of sea clutter in the FRFT domain[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2017, 53(4): 731–737.

[作者简介]

张先芝 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为弱目标检测与海杂波抑制。

尚 尚 1982 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理与杂波抑制方法研究。

戴圆强 1997 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为弱目标检测与电离层杂波抑制。

刘 明 1997 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为信号预测。

(本文编辑: 杨秀丽)