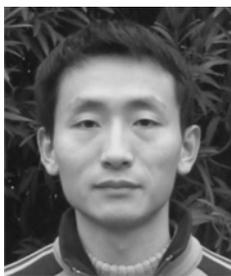


导读:导航、监视、搜索等岸基、船载和机载雷达在目标探测中均面临复杂场景,雷达处理技术的性能受强地/海杂波环境、雷达工作参数等诸多因素影响,性能呈现起伏特点,因此,掌握雷达处理技术在不同条件下的性能对于推进技术实现和应用有重要意义。为了促进雷达处理核心技术交流,《电子技术应用》特推出“雷达处理技术与评估”主题专栏。本专栏针对雷达探测中涉及的信道优化、杂波抑制、目标检测、目标跟踪、试验验证方法进行研究讨论,期待对雷达处理技术的研究和应用提供有益的借鉴。

特约主编:



刘宁波:海军航空大学副教授,中国电子学会青年科学家俱乐部会员。主要研究领域为海上目标探测、非线性信号处理、雷达目标特征检测。先后承担 973 项目、国家自然科学基金重点项目、军科委基础加强计划重点项目、装备预研等项目 20 余项,出版学术专著 2 部,以第一/通讯作者发表学术论文 56 篇,授权发明专利 19 项,曾获省部级科技进步一等奖、二等奖等科研奖励 5 项。



刘维建:空军预警学院副教授,中国电子学高级会员。主要研究方向为阵列信号处理、雷达目标检测和统计信号处理。主持国家自然科学基金面上等 5 项省部级以上项目,签订专著出版合同 2 份,以一作/通讯作者发表 SCI 论文 79 篇(IEEE 期刊 37 篇),以第一发明人获中国发明专利 14 项。《Signal Processing》《Digital Signal Processing》和《Circuits, Systems, and Signal Processing》编委/副主编,《太赫兹科学与电子信息学报》青年编委。

岸基对海雷达 STC 曲线设计与性能对比*

田凯祥¹,刘宁波²,王中训¹,刘言¹

(1.烟台大学 物理与电子信息学院,山东 烟台 264005;2.海军航空大学,山东 烟台 264005)

摘要:雷达对海探测过程中,近程海杂波回波功率大,严重影响雷达接收机工作和后续信号处理,为了平衡雷达接收机的增益和灵敏度,需要合理设计灵敏度时间控制(STC)曲线。介绍了利用 GARCH 模型、多项式函数、雷达距离方程和指数函数的四种 STC 设计曲线方法,采用高、低两种海况下实测数据对四种 STC 曲线的近程海杂波抑制性能进行了对比分析。实验结果表明,在高、低两种海况下,雷达距离方程形式的 STC 曲线抑制海杂波性能显著;GARCH 模型建模的 STC 曲线适用于低海况下;多项式形式和指数形式的 STC 曲线在不同海况下效果接近。

关键词:雷达;海杂波;灵敏度时间控制

中图分类号:TN951;TN957.51

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.222970

中文引用格式:田凯祥,刘宁波,王中训,等.岸基对海雷达 STC 曲线设计与性能对比[J].电子技术应用,2022,48(8):1-5,12.

英文引用格式:Tian Kaixiang,Liu Ningbo,Wang Zhongxun,et al. Comparison of STC curve design and performance of shore-based sea-to-sea radar[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(8): 1-5, 12.

* 基金项目:国家自然科学基金(61871392,62101583)

Comparison of STC curve design and performance of shore-based sea-to-sea radar

Tian Kaixiang¹, Liu Ningbo², Wang Zhongxun¹, Liu Yan¹

(1.School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China;

2.Naval Air University, Yantai 264005, China)

Abstract: In the process of radar to sea detection, the near-range sea clutter echo power is high, which seriously affects the radar receiver work and subsequent signal processing. In order to balance the gain and sensitivity of radar receiver, a reasonable design of sensitivity time control (STC) curve is needed. This paper introduces four STC design curve methods using GARCH model, polynomial function, radar distance equation and exponential function, and compares and analyzes the near-range sea clutter suppression performance of the four STC curves by using the measured data under high and low sea conditions. The experimental results show that the STC curves in the form of radar distance equation have significant performance in suppressing sea clutter in both high and low sea states; the STC curves modeled by GARCH model are suitable for low sea states; the STC curves in the form of polynomial and exponential are close to each other in different sea states.

Key words: radar; sea clutter; sensitivity time control

0 引言

对海雷达探测海上舰船、浮冰、航道浮标、渔船等目标时,容易受到海杂波的干扰。雷达探测目标接收信号过程中,近距离区域,海杂波干扰很强,需要对杂波信号进行抑制衰弱,否则将无法区分杂波信号和目标信号,在高海况背景下检测小目标尤为困难。为确保雷达接收机能在高、低海况下正常工作,准确显示出检测目标,需要使用灵敏度时间控制(Sensitivity Time Control, STC)进一步扩展动态范围,抑制近距离海杂波的强度,增强远距离目标的信号强度,保证接收机的灵敏度,提高接收机的性能^[1-6]。文献[7]论述了一种根据目标的回波电压随距离二次方变化的特性,设置数字信号实时控制大动态中频放大器的方法,用来解决目标信号强度随距离降低的问题。文献[8]提出一种自适应增益灵敏度控制的方法,通过统计距离维信息,对海杂波包络进行拟合,形成接收端的反馈来控制系统的灵敏度和视频画面质量。文献[9]中提出一种雷达接收机灵敏度时间控制方法,根据雷达距离方程中雷达回波功率与雷达距离四次方成反比的规律,对STC控制深度和控制距离分别分挡控制。许多文献对STC曲线的设计方法都有所提出或论述,但是,STC常规曲线和其他方式设计STC曲线的性能对比的相关研究较少,本文采用高、低两种海况的实测数据对四种STC设计曲线方式性能进行对比,希望能得到对高、低海况不同海杂波背景下有实用性的STC曲线,确保雷达接收机在不同海况下正常工作。

1 STC 原理

当雷达接收回波信号受到杂波影响时,会严重影响接收机输出端的目标信杂比(Signal to Clutter Ratio, SNR),尤其是岸基雷达检测近距离海上目标时,海杂波对雷达检测目标影响很大。当存在强海杂波时,如果接收机的

增益过高,灵敏度也过高,则近距离海杂波干扰会使接收机工作处于饱和状态甚至过载状态,导致无法检测到目标。如果接收机的增益和灵敏度过低,虽然近距离杂波信号的幅度会降低,但远距离的目标信号过于微小从而无法检测到。STC 又称近程增益控制,对近程海杂波信号强度有抑制作用,防止接收机过载饱和,同时保持接收机的增益和灵敏度,确保远距离的微小目标被探测到。STC 的原理参考图 1。距离计数器进行清零和计数,每一次计数都对应着一个距离单元。可编程逻辑器件会形成相对应时间序列的衰减控制离散量来控制接收端的信号功率^[10]。

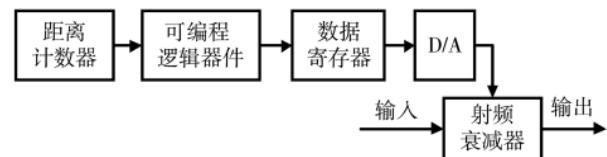


图 1 STC 原理框图

在雷达检测目标的过程中,海杂波不同于噪声,通常具有更高的回波能量,不能将其简单地作为白噪声处理。图 2 为理想情况下 STC 控制曲线,面对复杂海况下海杂波动态变化,其性能不够灵活,具有局限性。需要设计不同的 STC 控制曲线,对比分析其对不同海况的适

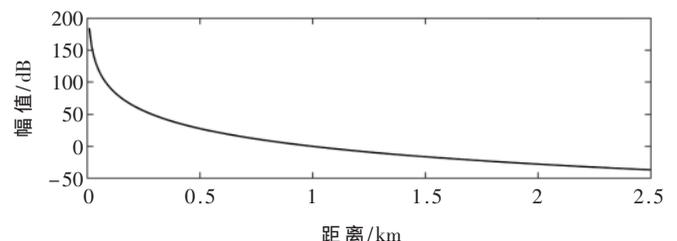


图 2 理想情况下 STC 控制曲线

应情况。

2 四种 STC 算法

为适用高低海况下海杂波的动态变化,本文总结以下四种 STC 算法。

(1) GARCH 模型建模的 STC 曲线

GARCH (Generalized AutoRegressive Conditional Heteroskedasticity) 模型,即广义自回归条件异方差模型^[11]。

$$y_t = x_t \gamma + u_t \quad (1)$$

$$\sigma_t^2 = \omega + \alpha u_{t-1}^2 + \beta \sigma_{t-1}^2 \quad (2)$$

其中,式(1)为均值方程, x_t 为 $(k+1) \times 1$ 维外生变量向量, γ 为 $(k+1) \times 1$ 维系数向量。式(2)为条件方差方程, ω 是常数项, u_{t-1}^2 为 ARCH 项, σ_{t-1}^2 为 GARCH 项。

通过 GARCH 模型研究海杂波实测数据的波动率,通过对其波动聚集建模,得到不同时间的海杂波波动率之间的关系。在实际雷达数据处理中,采用 GARCH 建模后,得到序列的平方不具有自相关性,有利于海杂波的抑制。

(2) 多项式形式拟合的 STC 曲线

多项式形式拟合 STC 曲线如式(3)所示:

$$y = b + B_1 \cdot x + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x^3 \quad (3)$$

式中, b 为常数项, B_1 、 B_2 、 B_3 为多项式系数。

该模型能够表现出海杂波实测数据沿距离维度变化的趋势。在实际雷达数据处理过程中,该模型具有能充分逼近复杂的非线性变化趋势关系的优点。

(3) 雷达距离方程形式拟合的 STC 曲线

海杂波在空间的分布范围一般要比雷达分辨单元的尺寸大,当海杂波足够强或足够广时,它将限制雷达接收机的灵敏度,并且影响雷达的作用距离。现有研究表明^[12-14]:以海杂波为背景,以不同的雷达擦地角观测目标,雷达距离方程有所不同。小擦地角下的杂波背景雷达距离方程参考式(4)。

$$P = \frac{P_r G A_e \sigma^0 \varphi_a \left| \frac{c\tau}{2} \right| \sec \varphi}{(4\pi)^3 R^3} \quad (4)$$

式中, P 为雷达接收功率, P_r 为发射功率, G 为天线增益, A_e 为天线有效孔径, R 为距离, σ^0 为雷达单位截面积, φ_a 为波束宽度, c 为传播速度, τ 为脉冲宽度。

该模型能够表现出理想情况下海杂波幅值沿距离维变化的趋势。在实际雷达数据处理过程,该模型具有易于理解、容易实现的优点。

(4) 指数形式拟合的 STC 曲线

指数形式拟合的 STC 曲线如式(5)所示:

$$y = y_0 + A_1 e^{-x/t_1} \quad (5)$$

其中, y_0 、 t_1 为常数项, A_1 为指数函数斜率。

该模型能够拟合出海杂波实测数据沿距离维度的变化趋势。但是在实际雷达数据处理中,容易欠拟合,准

确度欠佳。

3 数据测试

本文使用的是岸基架设的 X 波段固态导航雷达采集的海杂波数据^[15]。考虑到海杂波的动态变化,使用实测数据中的线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)回波数据。其中低海况为 2 级海况,高海况为 3 级海况。雷达技术参数如表 1 所示,雷达实测数据信息具体参考表 2。

表 1 X 波段实验雷达参数表

技术指标	参数
工作频段	X
工作频率范围/GHz	0.3~9.5
扫描带宽/MHz	25
脉冲重复频率/kHz	1.6, 3, 5, 10
天线工作模式	凝视、圆周扫描
天线转速/rpm	2, 12, 24, 48
天线水平波束宽度/(°)	1.2

表 2 雷达对海实测数据概况表

数据指标	参数
距离向采样率/MHz	60
扫描带宽/MHz	25
脉冲重复频率/kHz	1.6, 3, 5, 10
天线工作模式	圆周扫描
擦地角/(°)	0.3~6

对实测数据进行拟合,设计灵敏度时间控制曲线,抑制近程海杂波,观察雷达 B 显图前后变化,图 3 为 MATLAB 仿真流程图。具体步骤如下:

(1) 在 MATLAB 中导入 MAT 数据,读取 LFM 发射信号的 T2 脉冲的回波数据。

(2) 对每组脉冲数据求均值,减小强海杂波异常信号数据的干扰,得到距离维信息。

(3) 分别使用 GARCH 模型形式、多项式形式、雷达距离方程形式、指数形式函数对数据趋势进行拟合,设置合适的参数值,与距离维信息比较,形成当前的自适应灵敏度时间控制的连续序列 X 。

(4) 将连续序列 X 扩展成与实测数据维度相同的矩阵 M ,并作用于实测矩阵数据。

(5) 观察输出雷达 B 显图,对比四种拟合形式效果。

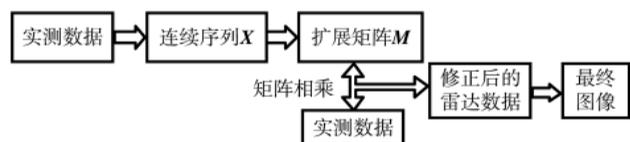


图 3 MATLAB 仿真流程图

4 结果分析

图 4 为 2 级低海况雷达实测数据下海杂波修正前后对比图。

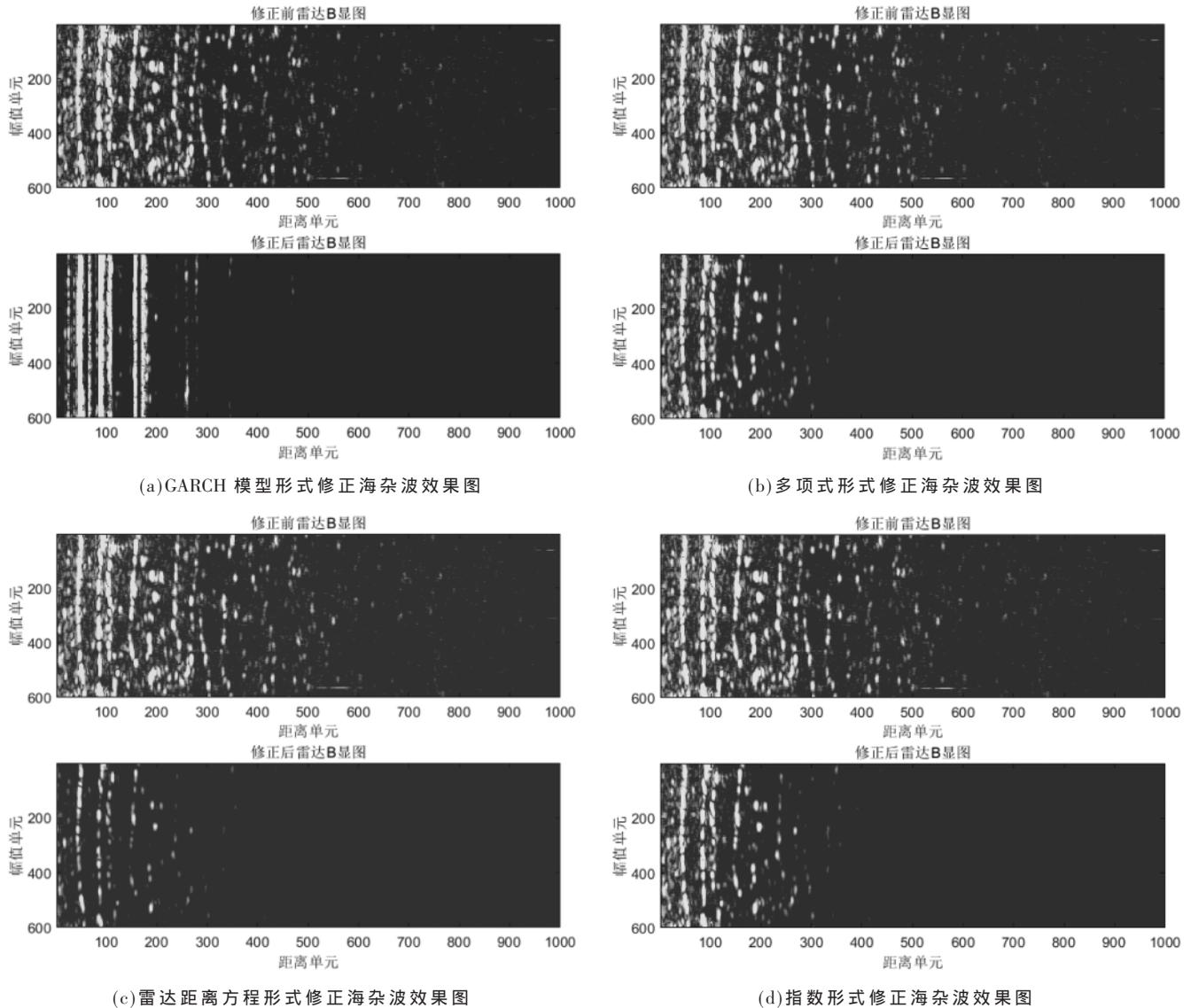


图 4 低海况下海杂波修正对比图

观察图 4 的效果,在低海况下,四种 STC 曲线对海杂波都有抑制效果。其中,对于近距离海杂波,雷达距离方程形式和 GARCH 模型建模的 STC 曲线抑制效果优于指数形式和多项式形式拟合的 STC 曲线效果。对于中远距离的海杂波,四种 STC 曲线抑制效果相同。

高海况下海杂波修正对比图如图 5 所示。

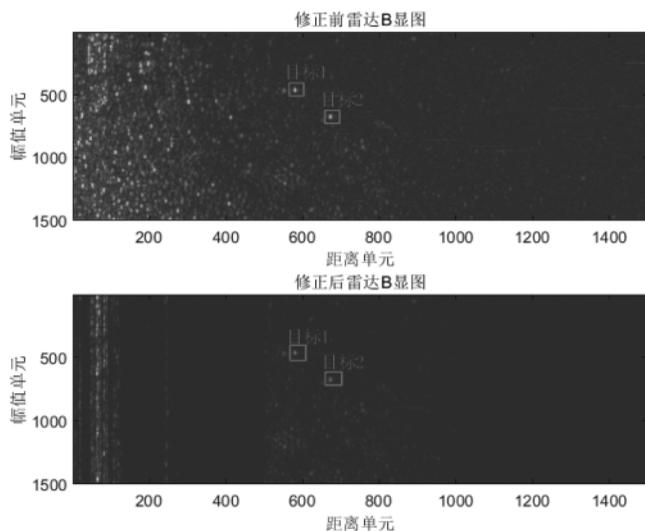
高海况雷达实测数据是海杂波+目标回波数据,经过四种 STC 曲线处理后,近距离海杂波幅值抑制,目标幅值保留。其中,对于近距离海杂波,雷达距离方程形式和 GARCH 模型建模的 STC 曲线抑制效果显著。

观察四种 STC 曲线在高、低海况下的拟合效果(参考图 6、图 7),四种 STC 曲线对近距离处海杂波幅度都有抑制效果。其中,雷达距离方程形式的 STC 曲线适用于高、低两种海况,GARCH 模型建模设计的 STC 曲线在低海况下抑制海杂波效果比高海况下抑制效果

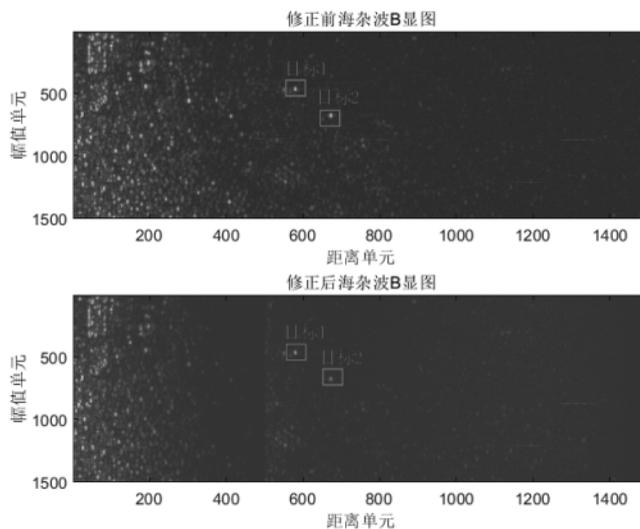
显著;指数形式和多项式形式的 STC 曲线在不同海况下效果接近。

5 结论

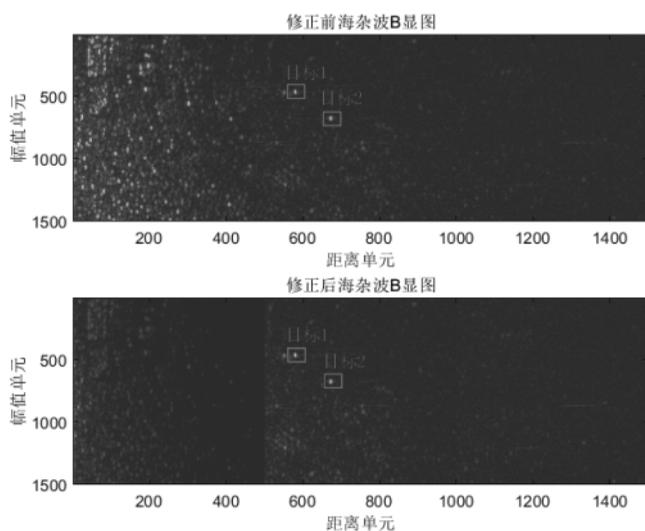
时间灵敏度控制在雷达信号处理系统中是十分关键的一步,本文利用不同海况的雷达实测数据,对 GARCH 模型建模、多项式形式拟合、雷达距离方程形式拟合、指数形式拟合的四种 STC 设计曲线方法抑制海杂波的性能进行对比,得到四种 STC 曲线在不同海况下的适应性。海况和雷达参数的变化,会对距离维信息产生影响,使得 STC 的性能大大减弱。本文总结的四种 STC 曲线设计方法,可以根据统计学中的均方误差或均方根误差,确定一种抑制效果良好的 STC 曲线,对雷达回波数据进行处理,产生符合特定规律的曲线对雷达回波数据进行处理,对高、低海况等不同海杂波背景有适应性,确保雷达接收机在不同海况下的正常工作。



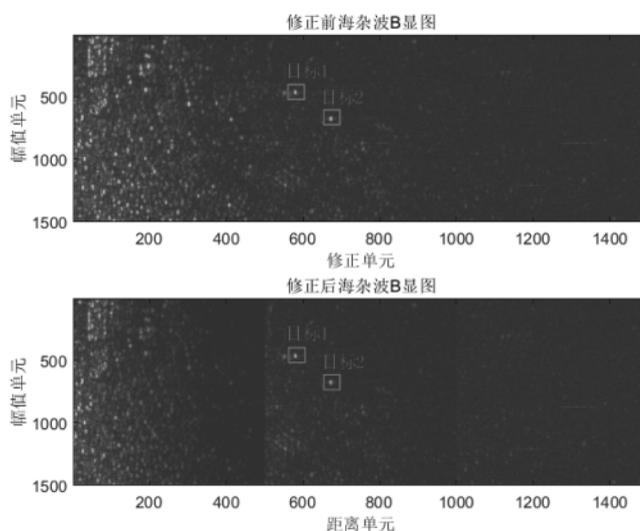
(a) GARCH 模型形式修正海杂波效果图



(b) 多项式形式修正海杂波效果图



(c) 雷达距离方程形式修正海杂波效果图



(d) 指数形式修正海杂波效果图

图5 高海况下海杂波修正对比图

参考文献

- [1] WARD K D, WATTS S, TOUGH R J A. Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance[M]. IET, 2006.
- [2] 许述文, 白晓惠, 郭子薰, 等. 海杂波背景下雷达目标特征检测方法的现状与展望[J]. 雷达学报, 2020, 9(4): 684-714.
- [3] 施赛楠, 杨静, 董泽远. 基于高维特征域随机森林的海面小目标检测[J]. 现代雷达, 2022, 44(3): 63-69.
- [4] 罗忠涛, 严美慧, 卢琨, 等. 超视距雷达海杂波与干扰信号的多域特征与海杂波检测[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 580-588.
- [5] 刘宁波, 姜星宇, 丁昊, 等. 雷达大擦地角海杂波特性与目标检测研究综述[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2771-2780.
- [6] 李悦丽, 薛国义. 雷达数字 AGC 技术的工程实现[J]. 电子工程师, 2004, 30(12): 15-17.
- [7] 张鹏. 灵敏度时间控制技术的研究[J]. 电子科技, 1997(4): 47-51.
- [8] 徐佳龙. 一种对海搜索雷达的增益灵敏度控制方法[J]. 现代雷达, 2011, 33(12): 68-71.
- [9] 李培, 周兴云, 金亭姝. 一种改进的雷达接收机灵敏度时间控制方法[J]. 数字技术与应用, 2017(4): 10-11.
- [10] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理(第四版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [11] 高雷阜, 李伟梅. 基于 Expectile 和 Realized GARCH 模型的波动率预测[J]. 运筹与管理, 2022, 31(2): 99-103.
- [12] SKOLNIK M I. 雷达系统导论(第3版)[M]. 左群声, 徐国良, 马林, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [13] BARTON D K. Radar equations for modern radar[M]. Fitch-

(下转第 12 页)

参考文献

[1] CHARVAT G L, WILLIAMS J H, FENN A J, et al. RES. LL-003 build a small radar system capable of sensing range, doppler, and synthetic aperture radar imaging Jan. IAP 2011. (MIT OpenCourseWare; Massachusetts Institute of Technology).

[2] CHARVAT G L, FENN A J, PERRY B T. The MIT IAP radar course: build a small radar system capable of sensing range, Doppler, and synthetic aperture (SAR) imaging [C]// Radar Conference (RADAR), 2012 IEEE, 2012.

[3] MELNIKOV A, KERNEC J L, GRAY D. FMCW rail-mounted SAR: porting spotlight SAR imaging from MATLAB to FPGA [C]// 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2014.

[4] MELNIKOV A, KERNEC J L, GRAY D. A case implementation of a spotlight range migration algorithm on FPGA platform [C]// International Symposium on Antennas & Propagation. IEEE, 2015.

[5] MELNIKOV A, KERNEC J L, GRAY D. Porting spotlight range migration algorithm processor from MATLAB to Virtex 6 [C]// 2015 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). IEEE, 2015.

[6] WANG R, LOFFELD O, NIES H, et al. Focus FMCW SAR data using the wave number domain algorithm [J]. IEEE Transac-

tions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 2109-2118.

[7] Liu Yue, Deng Yunkai, WANG R, et al. Bistatic FMCW SAR signal model and imaging approach [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 49(3): 2017-2018.

[8] 蔡永俊. 调频连续波合成孔径雷达成像研究与系统实现 [D]. 北京: 中国科学院国家空间科学, 2016.

[9] META A, HOOGEBOOM P, LIGHART L P. Correction of the effects induced by the continuous motion in airborne FMCW SAR [C]// IEEE Conference on Radar, 2006.

[10] META A. Signal processing of FMCW synthetic aperture radar data [D]. Holland Delft University of Technology, 2006.

(收稿日期: 2022-06-18)

作者简介:

蒋俊(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: FMCW SAR 成像。

穆文星(1997-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 海上信息获取。

刘涛(1978-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 雷达极化统计理论、极化信息处理、雷达极化检测与识别、电子战系统建模与仿真, E-mail: liutao1018@sina.com。



扫码下载电子文档

(上接第 5 页)

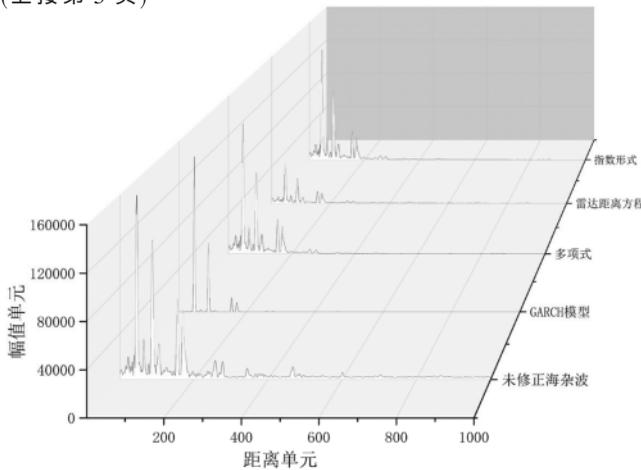


图 6 低海况下四种 STC 曲线修正效果对比图

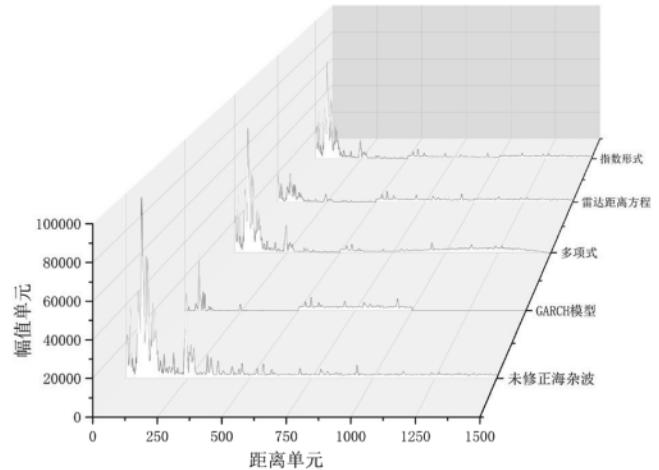


图 7 高海况下四种 STC 曲线修正效果对比图

burg, Artech House, 2013.

[14] 孔庆颜, 陈重, 胡冰. 地杂波背景中的雷达距离方程的研究 [J]. 兵工学报, 2006, 27(3): 442-445.

[15] 刘宁波, 董云龙, 王国庆, 等. X 波段雷达对海探测试验与数据获取 [J]. 雷达学报, 2019, 8(5): 656-667.

(收稿日期: 2022-05-14)

作者简介:

田凯祥(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 雷达

信号处理与目标检测。

刘宁波(1983-), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 雷达信号智能处理、海上目标探测技术, E-mail: ln198300@163.com。

王中训(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 信源信道编码。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所