DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.01.008

基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测方法

王 威,杨 勇,韩静雯

(国防科技大学电子科学学院,湖南长沙 410073)

摘 要:针对海杂波背景下雷达弱小目标检测问题,提出了一种基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测 方法。该方法利用多极化通道回波数据计算极化相干矩阵的最大特征值,然后将待检测单元的最大特征值与参 考单元最大特征值、最小特征值、算数平均值和几何平均值的算数平均之比分别作为检验统计量实现检验判决。 仿真和实测数据处理结果表明:基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测方法较基于特征值的检测方法性能提 高2dB,较极化检测最优滤波器性能提高1.5dB,较功率最大综合检测方法、SPAN检测方法性能提高5dB,极化 联合最大特征值-几何平均方法综合检测效果最好。

关键词: 雷达目标检测; 极化相干矩阵; 协方差矩阵; 特征值

中图分类号:TN957.51 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2024)01-0057-06

引用格式:王威,杨勇,韩静雯.基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测方法[J].雷达科学与技术, 2024,22(1):57-62.

WANG Wei, YANG Yong, HAN Jingwen. Radar Weak Target Detection Method Based on Polarization Joint Eigenvalues[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(1):57-62.

Radar Weak Target Detection Method Based on Polarization Joint Eigenvalues

WANG Wei, YANG Yong, HAN Jingwen

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

Abstract: A radar weak target detection method based on polarization joint eigenvalues is proposed to address the issue of detecting weak targets in sea clutter background. This method utilizes multi-polarization channel echo data to calculate the maximum eigenvalue of the polarization coherence matrix. Then, the ratio between the maximum eigenvalue of the target cell and the arithmetic average of the maximum eigenvalue, minimum eigenvalue, arithmetic mean, and geometric mean of the reference cell is used as a test statistic for decision-making. Simulation and experimental results of data processing demonstrate that the radar weak target detection method based on polarization joint eigenvalues outperforms the eigenvalue-based detection method by 2 dB, the polarimetric detection optimization filter by 1.5 dB, and the power maximization synthesis detection method and the span detection method by 5 dB. The polarimetric joint maximum eigenvalue-geometric mean method achieves the best overall detection performance.

Key words: radar target detection; polarization coherent matrix; covariance matrix; eigenvalue

0 引 言

随着无人化作战装备的发展,无人机、无人艇 等装备在现代战争中开始崭露头角^[12]。在复杂多 变的海杂波影响下,无人机、无人艇等具有较低雷 达散射截面积的目标回波信号常常淹没在杂波背 景中,在观测时间较短的情况下,脉冲积累数较 少,造成雷达短脉冲积累下目标检测概率下降,给 海面弱小目标的检测带来了严峻的挑战^[34]。因 此,为了提高海面弱小目标的检测能力,需要针对 海杂波背景中短脉冲积累条件下雷达目标检测问 题开展深入研究。

海杂波背景下的目标检测问题核心在于提高 目标与杂波信号之间的差异,在恒定的虚警率下 提高检测概率。恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)技术的主要目的是在背景噪声较强的 情况下,通过自适应地调整阈值来保持相对恒定 的虚警概率^[5]。CFAR检测主要从时域^[6-7]、频域^[8-9] 和极化域^[10-11]进行设计,但在雷达短脉冲积累条件 下的检测性能不佳。针对雷达短脉冲积累下表现

收稿日期: 2023-07-22; 修回日期: 2023-08-21

较好的方法有从信息几何角度设计的矩阵 CFAR 检测方法^[12-13]和近些年提出的特征值 CFAR 检测 方法^[14-15]。

特征值 CFAR 检测方法在矩阵 CFAR 检测方 法的基础上作了改进,利用信号协方差矩阵的特 征值运算代替复杂的矩阵运算。文献[14]利用信 号协方差矩阵的最大特征值设计了基于最大特征 值的检测算法(Maximum Eigenvalue-based Matrix CFAR Detector, MEMD),论证了所构建的检验统 计量的恒虚警性质,并通过仿真和实测数据验证 了其性能优于经典信息几何方法:文献[15]利用 信号协方差矩阵的全部特征值,提出了三种新的 特征值检测器:最大特征值-算数平均(Maximum eigenvalue to Arithmetic Mean, MAM)、最大特征值-几何平均(Maximum eigenvalue to Geometric Mean, MGM)、最大特征值-最小特征值(Maximum eigenvalue to Minimum Eigenvalue, MME),该三种检测 器的优点是可以利用三参数 Burr 分布从理论上推 导出虚警概率、所选阈值和检测概率的解析表达 式,但这三种方法仅在一组实测数据上进行了验 证。此外,基于特征值的检测方法仅使用了单极 化通道的数据,且在不同极化方式上的数据检测 性能差异明显,鲁棒性不强,对于多极化体制的雷 达并不适用,如何将极化信息引入特征值检测方 法来提升检测性能值得研究。

为此,本文基于特征值检测方法,并结合全极 化体制雷达的多极化通道数据,利用目标与杂波 的极化相干矩阵的特征值信息差异,提出了一种 基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测方法。 最后,通过对多组实测数据的验证,证实了所提方 法的有效性。

1 雷达信号模型

不失一般性, 雷达信号 CFAR 检测问题可以表 示为二元假设检验模型:

$$H_{0}:\begin{cases} \mathbf{y} = \mathbf{c} \\ \mathbf{y}_{l} = \mathbf{c}_{l}, \quad l = 1, 2, \cdots, L \end{cases}$$

$$H_{1}:\begin{cases} \mathbf{y} = \mathbf{s} + \mathbf{c} \\ \mathbf{y}_{l} = \mathbf{c}_{l}, \quad l = 1, 2, \cdots, L \end{cases}$$
(1)

式中, $y = \begin{bmatrix} y^{hh} & y^{hv} & y^{vh} & y^{vv} \end{bmatrix}$ 表示待检测单元全极

化接收信号, $y_i = [y_i^{ht} y_i^{ht} y_i^{th} y_i^{r}]$ 表示参考单 元全极化接收信号,L表示参考单元个数; αH_0 假 设下,接收信号矢量中只含有海杂波c, αH_1 假设 下,接收信号中除了海杂波外,还含有回波信号s, 假设回波信号s和杂波c是统计独立的。

对于海面静止或慢动目标,各极化通道接收 信号可以建模为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{s}_{\mathrm{hh}} & \mathbf{s}_{\mathrm{hv}} \\ \mathbf{s}_{\mathrm{vh}} & \mathbf{s}_{\mathrm{vv}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{\mathrm{hh}} \mathbf{p} & a_{\mathrm{hv}} \mathbf{p} \\ a_{\mathrm{vh}} \mathbf{p} & a_{\mathrm{vv}} \mathbf{p} \end{bmatrix}$$
(2)

式中a_{hh},a_h,a_{vh},a_{vv}表示各极化通道目标信号的复幅度,p为多普勒导向矢量,可以表示为^[16]

$$\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} 1 \ e^{(j2\pi f_d f_r)} \cdots e^{(j2\pi (N-1)f_d f_r)} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(3)

式中,*f*_a为目标信号的多普勒频率,*f*_r为雷达脉冲重 复频率,*N*为单个相干处理间隔中发射的脉冲数, 上标T表示转置运算。

基于K分布假设,海杂波c的幅度PDF可以表示为^[17]

$$f_{\kappa}(c) = \frac{2}{\alpha \Gamma(v)} \cdot \left(\frac{c}{2\alpha}\right)^{v} \cdot \mathbf{K}_{\nu-1}\left(\frac{c}{\alpha}\right), c > 0, v > 0$$
(4)

式中,v和 α 分别为形状参数和尺度参数, Γ 是伽马函数, $K_{\nu-1}$ 是第二类v - 1阶修正贝塞尔函数。

2 基于极化联合特征值的检测方法

对于特征值检测方法,其仅针对单极化通道数据进行处理,若利用全极化通道数据,可能会提高检测性能。因此,下面提出了一种基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测方法。

2.1 多极化通道联合处理

当满足互易性假设条件*X*^{HV} = *X*^{VH}时,可以计算得到极化相干矩阵^[18]:

$$\boldsymbol{T} = \left\langle \boldsymbol{k}_{\mathrm{P}} \boldsymbol{k}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{H}} \right\rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}$$
(5)

式中, $\boldsymbol{k}_{\mathrm{P}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} X^{\mathrm{HH}} + X^{\mathrm{VV}} & X^{\mathrm{HH}} - X^{\mathrm{VV}} & 2X^{\mathrm{HV}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ 为

Pauli散射矢量,上标H表示共轭转置,〈 〉表示取 集合平均。

极化相干矩阵为3×3维半正定厄米特阵,具有

非负实特征值 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$,可推导得出^[18]

$$\lambda_{1} = \frac{1}{2} \left(\left\langle |X^{\text{HH}}|^{2} \right\rangle + \left\langle |X^{\text{VV}}|^{2} \right\rangle - \lambda_{2} \right) \tag{6}$$

式中,极化相干矩阵的第二个特征值代表了HH、 VV的相干强度,最大特征值即为两同极化通道的 总强度之和减去相干强度^[18]。可将极化相干矩阵 最大特征值作为多极化通道联合处理的输出,并 基于此进一步计算联合特征值,多极化通道联合 处理流程见图1。



图1 多极化通道联合处理流程图

2.2 基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测方法

下面介绍基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测方法的具体步骤。

 1)首先对待检测单元和参考单元接收到的回 波数据进行多极化通道联合处理得到
 [x x₁ x₂ … x_L]。

2) 计算多极化通道联合处理后的数据构成的 协方差矩阵{*R*,*R*₁,*R*₂,…,*R*_{*L*}}。

协方差矩阵用 *R*表示,*x*表示多极化通道联合处理得到的信号矢量,则协方差矩阵*R*可以由下式计算:

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{E} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \boldsymbol{x}^{\mathrm{H}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_{0} & \boldsymbol{\bar{r}}_{1} & \cdots & \boldsymbol{\bar{r}}_{n-1} \\ \boldsymbol{r}_{1} & \boldsymbol{r}_{0} & \cdots & \boldsymbol{\bar{r}}_{n-2} \\ \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{r}_{n-1} & \cdots & \boldsymbol{r}_{1} & \boldsymbol{r}_{0} \end{bmatrix}$$
(7)

式中, r_k 表示相关系数, $r_k = E[x_i \bar{x}_{i+k}], 0 \le k \le n - 1, 1 \le i \le n, n$ 为脉冲积累个数,上标 \bar{x} 表示取共轭。实际应用中,相关系数通常由时间平均代替统计平均计算:

$$\hat{r}_{k} = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{n-1-|k|} x(n) \bar{x}(n+k), |k| \le n-1$$
(8)

3) 分别求解待检测数据构成的协方差矩阵*R* 的最大特征值 λ_{max} 和参考单元接收到的数据构成的协方差矩阵{ R_1, R_2, \dots, R_L }的特征值组 $\lambda_c^1, \lambda_c^2, \dots, \lambda_c^L$, 每个特征值组 $\lambda_c = {\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k}$ 包含对应协方差矩阵的全部特征值, *k* 为协方差矩阵的秩。

4) 分别计算特征值组的极大值 λ_{max} 、极小值 λ_{min} 、 算数平均 $\lambda_{mean} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \lambda_k$ 和几何平均 $\lambda_{ave} = \left(\prod_{k=1}^{K} \lambda_k\right)^{\frac{1}{K}}$ 。 基于极化联合特征值的检测方法判决式可

举于 饭 化 联 合 苻 և 值 的 检 侧 万 法 判 厌 式 可 写为

$$\begin{cases} \text{PMAM:} \frac{\lambda_{\max}}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \lambda_{\max}^{i}} \overset{H_{i}}{\gtrless} \eta \\ \text{PMGM:} \frac{\lambda_{\max}}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \lambda_{\text{ave}}^{i}} \overset{H_{i}}{\gtrless} \eta \\ \text{PMGM:} \frac{\lambda_{\max}}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \lambda_{\max}^{i}} \overset{H_{i}}{\gtrless} \eta \\ \text{PMME:} \frac{\lambda_{\max}}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \lambda_{\min}^{i}} \overset{H_{i}}{\gtrless} \eta \\ \text{PMEMD:} \frac{\lambda_{\max}}{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \lambda_{\max}^{i}} \overset{H_{i}}{\Re} \eta \end{cases} \end{cases}$$
(9)

式中, η 表示由虚警概率确定的判决门限, λ_{max} , λ_{min} , λ_{mean} , λ_{ave} 分别表示由特征值组计算得到的极大值、 极小值、算数平均和几何平均。

基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测方 法原理图可用图2表示,其中算法选择模块表示根 据不同的算法计算特征值组的极大值、极小值、算 数平均和几何平均。

3 实验验证

本文使用了加拿大McMaster大学提供的1998 年 IPIX 雷达(Ice Multi-parameter Imaging X-Band Radar)海杂波数据作为实测数据。雷达架设高度 为20m,雷达工作频率为9.3 GHz,波束宽度为0.9°,



图 2 基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测方法 原理框图

距离分辨率为30m,脉冲重复频率为f_r = 1000 Hz, 包含28个距离单元。IPIX 雷达采用双发射/接收 极化,在进行数据采集时可以得到HH,HV,VH和 VV 4个极化通道的回波数据^[19]。

选取第185号文件进行分析,其中,第1~13个 距离单元为纯杂波数据,在第7个距离单元中加入 了多普勒频率f_d = 150 Hz的全极化目标信号^[20]。 采用基于特征值的检测方法(MEMD、MAM、MGM、 MME)和基于极化联合特征值的检测方法 (PMEMD、PMAM、PMGM、PMME),并进行了比较。

图3为上述方法的CFAR归一化检验统计量,



信噪比为6dB。可以看出,基于极化联合特征值 的检测方法相比基于特征值的检测方法的归一化 检验统计量区分度有了一定的提升。

图4展示了原始数据、多极化通道联合处理后的数据以及使用SPAN检测器(Span Detector, SD)、 功率最大综合检测器(Power Maximization Synthesis detector, PMS)和极化检测最优滤波器(Polarimetric Detection Optimization Filter, PDOF)的检测 效果^[11-12],信噪比设置为6 dB。可以看出两种极化 检测器在低信杂比条件下检测性能较弱。



图4 实测数据检测效果

图 5 绘制了基于极化联合特征值的检测方法 (PMAM、PMGM、PMME、PMEMD)与极化检测方法 (SPAN、PMS、PDOF)的检测性能曲线,信噪比设置 为-5~15 dB。从结果可以看出,检测概率为0.8 时 基于极化联合特征值的检测方法与三种极化检测 方法性能相比提升1.5~5 dB。

图 6 对比了基于极化联合特征值的检测方法 与基于特征值的检测方法的检测效果, 信噪比设 置为 6 dB。可以看出, 基于极化联合特征值的检 测方法的检测性能相比基于特征值的检测方法检 测性能有了一定的提高。



图 7 绘制了基于特征值的检测方法(MAM、 MGM、MME、MEMD)与基于极化联合特征值的检 测方法(PMAM、PMGM、PMME、PMEMD)的检测性 能曲线,信噪比设置为-5~15 dB。从结果可以看 出,PMGM、PMME与PMEMD性能相近,检测概率 为0.8时基于极化联合特征值的检测方法的检测性 能与基于特征值的检测方法性能相比提升约2 dB。



为了验证所提算法稳健性,从1998年IPIX数据集中选取了另外10组数据文件(167,169,170,171,172,173,174,176,177,183)进行测试,信噪比设置为6dB。结果如图8所示,上方4条曲线代表了基于极化联合特征值的检测方法的检测概率。从图中可以看出,所提方法在检测效果上优于基于特征值的检测方法。



4 结束语

本文提出了一种基于极化联合特征值的雷达 弱小目标检测方法,该算法应用于多极化体制雷 达检测中。本文通过实测数据对基于极化联合特 征值的雷达弱小目标检测方法、基于特征值的检 测方法和极化检测方法进行了性能比较。实验结 果显示,基于极化联合特征值的雷达弱小目标检测 方法优于基于特征值的检测方法2dB,优于PDOF 极化检测方法1.5dB,优于SPAN、PMS方法5dB。

参考文献:

- [1] 王石,张建强,杨舒卉,等.国内外无人艇发展现状及典型作战应用研究[J].火力与指挥控制,2019,44(2): 11-15.
- [2] 天鹰.无人危机中国海军领加快开展无人装备攻防的 战法研究与实践[J].舰载武器,2023(3):39-45.
- [3] SEVGI L. Modeling and Simulation Challenges in Wide Ocean Area Surveillance [J]. IEEE Access, 2019, 7: 117692-117698.
- [4] 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.
- [5] 秦天慈,王中训,黄勇,等.雷达恒虚警目标检测处理技术综述[J].探测与控制学报,2023,45(3):1-11.
- [6] HERMANN R. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(4): 608-621.
- [7] 邹俊杰,程丰,万显荣.外源雷达空时联合恒虚警检测 分析与实验[J].雷达科学与技术,2022,20(4):415-420.
- [8] 陈建军,黄孟俊,赵宏钟,等.相参雷达时频域CFAR检测门限获取方法研究[J].电子学报,2013,41(8):1634-1639.
- [9] 杨勇,王雪松,张斌.基于时频检测与极化匹配的雷达 无人机检测方法[J].电子与信息学报,2021,43(3): 509-515.
- [10] 肖顺平,杨勇,冯德军,等.雷达极化检测器性能对比 分析[J].宇航学报,2014,35(10):1198-1203.
- [11] LIU Tao, JIANG Yanni, MARINO A, et al. The Polarimetric Detection Optimization Filter and Its Statistical

Test for Ship Detection [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60:1-18.

- [12] 华小强,程永强,王宏强,等.结合流形滤波的矩阵信 息几何检测器[J].国防科技大学学报,2022,44(6): 51-60.
- [13] 李君豪. 基于预处理的矩阵 CFAR 检测方法[D]. 南京:南京邮电大学, 2021.
- [14] ZHAO Wenjing, LIU Chang, LIU Wenlong, et al. Maximum Eigenvalue-Based Target Detection for The K-Distributed Clutter Environment [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(11):1294-1306.
- [15] ZHAO Wenjing, JIN Minglu, CUI Guolong, et al. Eigenvalues-Based Detector Design for Radar Small Floating Target Detection in Sea Clutter [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19:1-5.
- [16] 徐友根,刘志文.阵列信号处理基础[M].北京:北京理 工大学出版社,2020.
- [17] WARD K D, TOUG R J A, WATTS S. Sea Clutter: Scattering, The K Distribution and Radar Performance [M]. UK:The Institution of Engineering and Technology, 2006.
- [18] 陈体刚,李彦佐.全极化 SAR 图像中相干矩阵特征值 及其应用[J].信息与电子工程,2005,3(3):161-166.
- [19] 王鹏.极化IPIX 雷达回波数据处理与分析[D].哈尔 滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [20] 束宇翔,金术玲,王凯,等.多极化数据空时协方差矩 阵融合方法[J].雷达科学与技术,2015,13(5):508-514.

作者简介:

王 威 男,硕士研究生,主要研究方向为海杂波背 景下目标检测。

杨 勇 男,博士,教授,主要研究方向为极化雷达低 空目标检测。

韩静雯 女,硕士研究生,主要研究方向为极化雷达 抗无源干扰。