

基于幅空联合分布的高分辨距离像检测方法

汤留阳^{1,2} 齐向阳¹ 范怀涛¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘要:传统的高分辨距离像检测法本质上是将检测窗内大于固定门限值的距离单元积累,从而确定目标的有无,这些方法忽略了目标散射点在空间中连续分布的特点,易将检测窗内明显远离目标的强噪声点积累,造成检测率下降。针对这个问题,提出一种基于幅空联合分布的高分辨距离像检测方法,该方法联合目标散射点幅值空间分布两个维度的信息,使用迭代聚类对检测窗内高分辨距离像分割,并结合虚警率计算检测门限。通过积累目标能量来确定检验统计量,将其与检测门限对比判断目标有无。使用了4种典型的散射点分布模型和一个实测目标的距离像进行 Monte Carlo 试验,验证了提出的检测器比传统检测器有更好的检测性能。

关键词:高分辨距离像;目标检测;幅空联合分布;聚类

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

High-resolution range profile detection method based on joint amplitude and space distribution

Tang Liuyang^{1,2} Qi Xiangyang¹ Fan Huaitao¹

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Conventional high-resolution range profile detection methods essentially accumulate distance units within the detection window that are larger than a fixed threshold value to determine the presence or absence of a target. These methods ignore the characteristics of the continuous distribution of target scattering points in space and tend to accumulate strong noise points within the detection window that are obviously far from the target, resulting in a decrease in detection rate. To address this problem, this paper proposes a high-resolution range profile detection method based on the joint amplitude-space distribution, which combines the information of two dimensions of the spatial distribution of the target scattering point amplitude, uses iterative clustering to segment the high-resolution range profile within the detection window, and combines the false alarm rate to calculate the detection threshold. This method determines the test statistic by accumulating the target energy, and compares it with the detection threshold to determine the presence or absence of the target. In this paper, four typical scattering point distribution models and a range profile of a real target are used for Monte Carlo tests to verify that the proposed detector has better detection performance than conventional detectors.

Keywords: high-resolution range profile; target detection; magnitude and space joint distribution; clustering

0 引言

相比于低分辨率雷达所得到的点目标回波,在高分辨率雷达中,由于测距单元的大小明显小于目标的大小,一个目标被分解为多个散射体,因此会得到不同距离单元中

散射体的回波矢量和^[1],即高分辨距离像(high resolution range profile, HRRP)。高分辨距离像可以提供关于目标散射体的多种信息^[2],如强度、位置和散射点分布等,因此被广泛地用于目标检测、识别和分类等^[3]。近年来对于不同场景下的高分辨距离像检测问题,国内外学者已经提出

了许多不同的检测算法,对于高斯白噪声背景下的检测问题,Hughes^[4]提出了能量检测器,也被称为积分检测器,其通过累积检测窗口内信号的能量并与门限值比较进行检测,能量检测器对散射点均匀分布的目标有着良好的检测性能,但当目标的散射点分布稀疏时,检测性能会有明显下降。Gerlach等^[5]提出了一种基于先验空间散射点密度的广义似然比检测器(spatial scattering density generalized likelihood ratio test, SSD-GLRT),通过已知的目标空间密度,对高分辨距离像进行非线性收缩来降低噪声从而提高检测性能,但目标距离像的空间密度往往不可预知。Hughes^[4]同年提出了二进制积分器,先对检测窗内的强散射点进行累加再与门限值进行对比,二进制积分器虽然实现简单,但不仅需要目标先验强散射点中心数量,同时在二进制量化的过程中损失了目标能量。戴奉周等^[6]使用顺序统计量(Order statistic range spread target detector, OSRSTD)进行检测,首先将检测窗口内的信号按照幅值进行降序排序,从最大值开始依次向后非相参积累,每次积累后与门限值进行对比,当目标散射点稀疏的时候OSRSTD检测性能较好,但检测门限公式过于复杂不易计算。Long等^[7]针对二进制积分器量化所造成的能量损失,提出了基于双阈值的广义似然比检测器(GLRT-DT),通过Akaike信息准则(Akaike information criterion, AIC)确定第1门限,再将超过第1门限的散射点累加从而避免能量损失,并通过强散射体的平均虚警率确定第二门限;郭鹏程等^[8]使用K-means聚类将强散射点估计出来后进行累加(range spread target detection based on online estimation of strong scattering points, OESS-RSTD),同样使用强散射体的平均虚警率来确定第2门限。Chen等^[9]使用在线梯度下降法,对双阈值广义似然比检测器的第2门限求解过程进行优化,得到了更高的检测概率,但缺点是在线梯度下降的求解过程过于复杂。

上述传统的幅度域高分辨距离像检测算法中,仅考虑了散射点的幅值信息,而没有考虑到目标空间分布情况。在高分辨率雷达中,飞机、舰船等人造目标在回波中占据的距离单元往往是连续的^[10],因此只通过提取高分辨距离像中的强散射点来判断目标的存在时,容易受到非连续单元外的强噪声点影响,将强噪声点判定为目标散射点,从而造成检测概率的下降。因此,针对传统强散射点估计或者门限值划分的高分辨距离像检测方法,本文提出一种基于幅空联合分布的高分辨距离像检测方法(joint amplitude and space distribution range profile detector, JASRPD)。本文方法在GLRT-DT的基础上进行改进,针对GLRT-DT仅考虑高分辨距离像幅值分布而忽略了空间相关性的缺点,使用空间幅值联合分布聚类的方法,有效消除了孤立强噪声点干扰。本文联合目标幅值分布和空间分布两个维度的特征,利用空间连续分布的强散射点连续分布特点来改善检测性能;使用分块迭代聚类的算法,有效且易实现;使用聚类算法得到的连续分布散射点计算

检测门限,具有恒虚警的性质。

1 问题描述

在高分辨率雷达处理中,将回波信号与发射波形进行匹配滤波,得到高分辨距离像。本文考虑的背景是复高斯白噪声下的高分辨距离像检测,检测问题的描述^[11]为:

$$\begin{cases} H_0: x_n = \omega_n \\ H_1: x_n = s_n + \omega_n \end{cases} \\ n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

对于 H_0 的假设下,信号 x_n 仅包含噪声,每个距离单元是独立的且服从于参数为 $(0, \sigma^2)$ 的复高斯白噪声 ω_n ,而在 H_1 的假设下, s_n 是长度为 N 代表目标的HRRP。匹配滤波器输出的是信号和加性复高斯白噪声的混合。实际中,对于每个脉压后的距离单元通常使用平方律检波器,因此检波器的输出与输入的平方成正比,定义新的变量 $y_n = |x_n|^2, n = 1, 2, \dots, N, |\cdot|$ 为取模运算。可以从检验模型中看到, H_0 假设很简单,但对 H_1 假设而言,由于目标散射体的数量、位置和振幅信息是未知的, H_1 假设可以被看作是一个复合假设,因此幅度域的高分辨距离像检测问题的主要难点在于将集中连续分布的强散射点与弱噪声点区分出来。

2 基于幅空联合分布的高分辨距离像检测设计方法

本文使用回波信息来完成连续分布的强散射点提取和噪声功率的估计,并使用噪声功率估计值及提取到的散射点数量计算检测门限,最后通过判决来完成检测,如图1所示。

1) 输入信号 x_n ,对平方律检波器输出信号 y_n 进行分块迭代聚类预处理,提取出连续分布的相对强散射点簇 P , P 包含的散射点数量为 K 。

2) 根据回波信号估计出噪声的功率估计 $\hat{\sigma}^2$,结合预

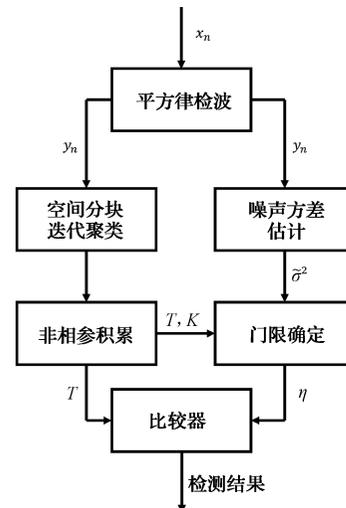


图1 幅空联合分布检测法流程

先设定的虚警率 P_{fa} 及散射点数 K 计算出检测门限 η 。

3) 对簇 P 内的强散射点进行非相参积累, 得到检验统计量 $D = \sum_{i \in P} y_i - K\hat{\sigma}^2$ 。

4) 对比检验统计量 D 和检测门限 η , 如果 $D > \eta$, 则判断为有目标存在, 否则无目标存在。

3 空间分块迭代聚类方法及检测门限的计算

传统的幅度域高分辨距离像检测算法如双阈值广义似然比检测器、顺序统计量检测器和强散射点在线估计检测器, 本质上都是通过设置门限值实现高分辨距离像的检测, 一个受噪声污染的典型舰船目标 HRRP 及门限值划分如图 2 所示。

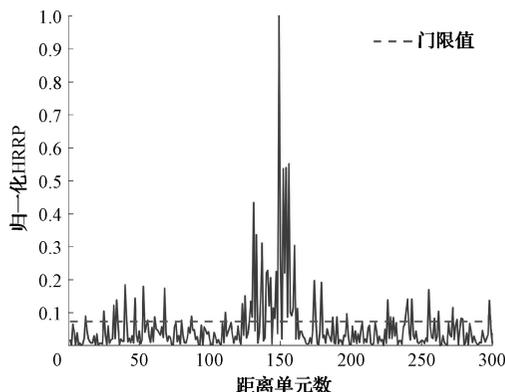


图2 传统门限值划分检测器

基于门限值划分的检测器, 虽然能够将高分辨距离像的强散射点区分出来, 但同时也会将明显远离目标的强噪声点误判为目标点, 造成检测概率的下降。在高分辨距离像中, 人造目标如飞机、舰船等的散射点分布往往具有空间连续性^[12], 占据若干各相邻的距离单元, 因此将目标的空间分布信息考虑在内, 通过对 HRRP 预处理的方法将连续分布的相对强散射点提取出来后再进行检测, 能够提高 HRRP 的检测性能。

3.1 空间分块迭代聚类法

对于平方律检波器输出得到的信号 $y_n, n = 1, 2, \dots, N$, 首先将信号等间隔分为 M 块, 每一块的长度为 $S = \frac{N}{M}$, 然后使用的空间分块迭代聚类流程如下。

- 1) 初始化每个块的聚类中心 $C_k = [y_k, k], k = 1, \dots, M$ 。
- 2) 将每个距离单元的标签设置为 -1 , 即 $l(i) = -1, i = 1, \dots, N$, 距离设为 ∞ , 即 $d(i) = \infty$ 。
- 3) 对于每个聚类中心 C_k , 将处于其邻域 $N_{2S}(C_k)$ 内的距离单元内的元素 i , 计算 i 与 C_k 之间的距离 D 。
- 4) 如果 $D < d(i)$, 那么将 $d(i)$ 设为 D , 标签 $l(i)$ 设置为 k 。
- 5) 计算每一簇的新聚类中心和上一次迭代的聚类中

心之间的距离 E , 如果 E 小于预先设定的阈值或迭代次数达到预先设定的值, 结束迭代聚类, 否则回到步骤 3)。

在空间分块迭代聚类算法过程中, 通常迭代 20 次以内便能获得理想的结果, S 的值设为检测窗长度的 $1/10$ 。在聚类的过程中, 合适的距离度量定义对最终分块的结果至关重要, D 计算了每个距离单元中的元素 i 和聚类中心 C_k 之间的差异, 每个距离单元中的元素幅值 y_i , 取决于目标散射点散射特性, 一般为较大的值, 每个元素的空间位置 i 会根据不同长度的信号从 $1 \sim N$ 变化, N 为信号的长度。为了消除量纲的影响, 将空间距离和幅值距离合并为同一个距离标准, 即将幅值和空间坐标归一化, 距离度量变为 D' 。

$$\begin{aligned} d_a &= |y_i - y_j| \\ d_s &= |i - j| \\ D' &= \sqrt{\left(\frac{d_a}{N_a}\right)^2 + \left(\frac{d_s}{N_s}\right)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: d_a 是元素 i 和元素 j 之间的幅值差; d_s 是元素 i 和元素 j 之间的空间距离; N_a 为检测窗口内最强散射点和最弱散射点的幅值差; N_s 设为初始化时每个块的大小, 即 $N_s = S$ 。

空间分块迭代聚类算法的初始化如图 3 所示, 将高分辨距离像划分为若干块, 位于每块中间位置的元素为初始化的聚类中心。如图 4 所示, 由于高分辨距离像在空间的分布具有一定的相关性, 为了提高聚类的计算效率, 相比于传统的 K-means 聚类算法需要计算所有元素到每个聚类中心的距离, 本文将每个簇的聚类搜索范围限制在聚类中心 C_k 的 $N_{2S}(C_k)$ 邻域内, 不仅减少了计算的复杂度, 同时消除了与聚类中心 C_k 空间位置较远距离单元的影响。

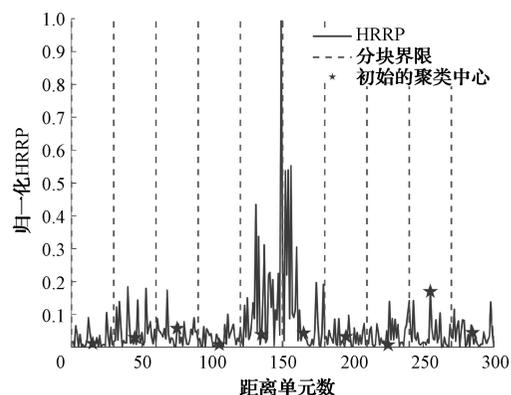


图3 分块迭代聚类的初始化

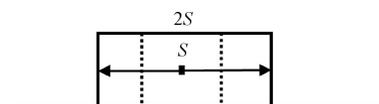


图4 块内搜索范围示意图

在分块迭代聚类处理后, 由于目标所占距离单元的个

数即目标的尺寸往往是未知的,同时预先设置分块的数目也会对聚类处理结果造成一定的影响,因此在迭代聚类后可能产生孤立的、散射点数目较小的块,如果不对这些孤立的块进行合并处理的话,将会影响到后续的检测性能。因此,本文对这些孤立的块进行合并处理^[13],对于两个相邻的块 W_1 和 W_2 ,其边界处的距离单元分别记为 v_1 和 v_2 ,如果两个相邻块边界处的两个距离单元之间的距离 $D'(v_1, v_2)$,小于两个块各自内部的最大距离差,即边界处的微弱差异不影响块内的差异,因此可将这两个块合并为一类,即:

$$D'(v_1, v_2) < \min(\max(\text{In}D(W_1)), \max(\text{In}D(W_2))) \quad (3)$$

式中: $\text{In}D(W_1)$, $\text{In}D(W_2)$ 代表块 W_1 和块 W_2 内部不同距离单元之间的距离集合。

如图5所示,间隔虚线实线代表不同标签的块,在该高分辨距离像中,使用传统的基于阈值划分的检测器,会将两端的强噪声点误判为目标散射点,而经过方位分块迭代聚类算法处理后的结果,不仅考虑了高分辨距离像的幅值信息,同时也考虑了散射点的幅值信息和空间联合分布特征,消除了空间距离较远的强散射点的干扰,从而提高检测性能。

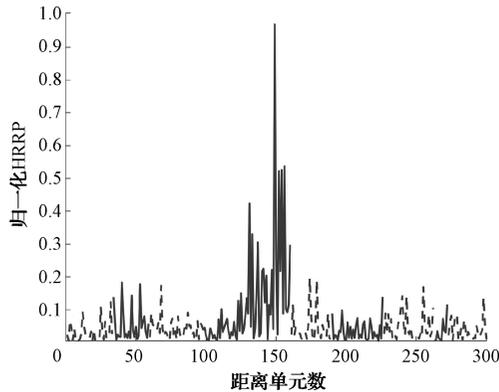


图5 分块迭代聚类的结果

在初始化聚类中心并分块的时候,存在可能将 HRRP 目标分割的情况,但经过后处理的合并相邻块的操作,可以有效地避免将目标过分割。经过分块迭代聚类处理后将每块的能量累加,取能量最大的块,进行 HRRP 目标的检测。

3.2 噪声功率的估计

本文使用全部的回波信号进行高分辨距离像的检测,检测窗口比 HRRP 的持续距离单元数宽得多,因此脉冲输出的信号中只有一部分的噪声样本被目标信号影响,比如本文实验将使用到的实测高分辨雷达数据中,高分辨率雷达回波具有 300 个距离单元,然而目标的高分辨距离像仅占 30 个样本,在这种情况下,噪声的方差可以使用中位绝对偏差估计器^[14]来有效地估计,它对消除这种离群值的影响十分有效,估计公式如下:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_r &= \frac{\text{median}\{|\text{real}(x_n)|, n = 1, 2, \dots, N\}}{0.6745} \\ \hat{\sigma}_i &= \frac{\text{median}\{|\text{imag}(x_n)|, n = 1, 2, \dots, N\}}{0.6745} \\ \hat{\sigma}^2 &= \frac{(\hat{\sigma}_r^2 + \hat{\sigma}_i^2)}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

3.3 检测门限的计算

为了保持检测器的恒虚警特性,检测门限 $\eta_{\hat{K}}$ 应该由虚警率 P_{fa} 及散射点估计数 \hat{K} 控制,在 H_0 假设下,距离单元中的每一个散射点 x_n 服从均值为 0,方差为 σ^2 的复数高斯分布,因此 $|x_n|$ 服从瑞利分布,平方律检波器的输出 y_n 服从指数分布,即:

$$p(y_n; H_0) = \frac{1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{y_n}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

因此可以得到 T 的概率密度函数为:

$$\begin{aligned} p(T; H_0) &= \left(\frac{1}{\sigma^2}\right)^{\hat{K}} \frac{\left(\sum_{i \in P} y_i - \hat{K} \hat{\sigma}^2\right)^{\hat{K}-1}}{(\hat{K}-1)!} \cdot \\ &\exp\left(-\frac{\sum_{i \in P} y_i - \hat{K} \hat{\sigma}^2}{\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

即非相参积累的检验统计量 T 服从形状参数为 \hat{K} ,尺度参数为 σ^2 的伽马分布^[7],记为 $T = \sum_{i \in P} y_i - \hat{K} \hat{\sigma}^2 \sim \Gamma\left(\sum_{i \in P} y_i - \hat{K} \hat{\sigma}^2; \hat{K}; \hat{\sigma}^2\right)$,对于预先设定的虚警率 P_{fa} ,可以得出其与检测门限的关系:

$$P_{fa} = \int_{\eta}^{+\infty} p(T; H_0) dT \quad (7)$$

因此检测门限的计算为:

$$\eta = \Gamma^{-1}(1 - P_{fa}; \hat{K}; \hat{\sigma}^2) \quad (8)$$

在实际检测应用中,根据 3.2 节所实时估计出的噪声功率 $\hat{\sigma}^2$ 和空间分块聚类提取出的簇散射点数量 \hat{K} ,通过查询伽马分布的累积分布函数表来计算检测门限的值。

4 仿真实验及检测性能验证

使用典型的散射点模型和机载实测高分辨距离像数据,在预设虚警率保持不变的条件下,对 JAS-RPD 的检测性能进行验证,同时与典型检测器的检测性能曲线进行对比。

4.1 仿真数据介绍

在实际应用中,目标的散射点模型与雷达的视线有关^[15],如飞机的平板机身与雷达视线垂直的时候会产生很强的后向镜面反射,而当视线偏开一定角度时,后向散射就会变小,散射点模型也会发生变化。目标的散射点虽然会随着视角的改变而变化,但当视角变化较小时,可认为目标上的散射点分布近似不变。对于飞机这类有着机首和机翼典型特征的目标^[16],其一维距离像呈现一个主峰和两个旁峰的特征,对于舰船目标,由于舰船大面积的平板散

射、上层建筑与甲板之间所形成的二面角散射以及桅杆与平面形成的二面角散射^[17], 回波具有一定长度连续分布的

较平坦散射点和一个强散射点的特征。采用4种典型的散射点模型进行仿真, 散射模型的特点如表1所示。

表1 4种典型的散射点模型

模型编号	模型分布特征	名称
模型1	1个强散射点, 占全部能量	单散射点模型
模型2	10个散射点, 1个强散射点占50%能量, 其余各占5.556%	稀疏多散射点
模型3	10个散射点, 两个强散射点各占25%能量, 其余各占6.25%	密集非均匀多散射点
模型4	连续均匀分布的10个散射点, 各占10%能量	密集均匀多散射点

实测数据为机载雷达平台所采集的实际回波, 目标为经过距离脉压后的海面舰船, 雷达平台的高度为5.27 km, 飞行速度为75 m/s。发射信号的形式为线性调频信号, 其中载波频率为9.6 GHz/s, 带宽为5 MHz, 线性调频率为-83.3 GHz/s, 图6所示为典型的舰船目标高分辨距离像。

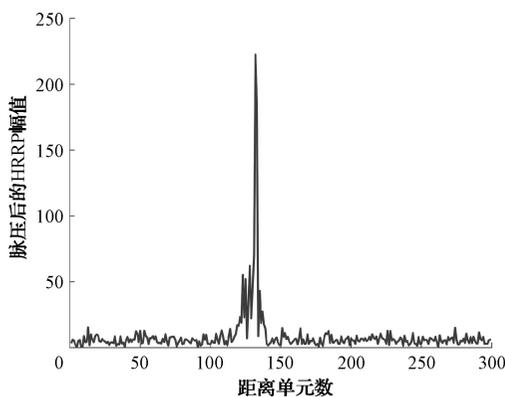


图6 实测数据的高分辨距离像

4.2 参与对比的方法

参与对比的传统高分辨距离像检测器主要有能量检测器、基于双阈值的广义似然比检测器、基于先验空间散射点密度的广义似然比检测器和基于强散射点在线估计的距离扩展目标检测器。

上述方法在仿真实验中使用4种散射点模型和实测数据进行对比, 仿真实验的虚警率设置为 $P_{fa} = 10^{-4}$, 检测窗口的长度为300。

实测数据的舰船目标高分辨距离像具有较高的信噪比(SNR), 因此对其添加不同功率的噪声来验证不同信噪比条件下的检测性能。

本文使用的信噪比定义为:

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{E}{\sigma^2} \right) \quad (9)$$

式中: σ^2 为噪声的功率; E 为目标的能量。计算每个信噪比下的检测概率所使用蒙特卡洛实验次数为 10^6 。

4.3 仿真实验结果

本文所使用的基于幅空联合分布的高分辨距离像检测算法与其他传统的检测算法检测性能如图7所示, 对于

仅有一个能量点的单散射点模型1, 由于受到最小划分间隔 S 的限制, JAS-RPD 的检测性能在 10 dB 信噪比略高于 OESS-RSTD, 而信噪比变大后略低于 OESS-RSTD, 之后检测性能从好到差的排序为 GLRT-DT、SSD-GLRT ($\alpha=0.05$)、SSD-GLRT ($\alpha=0.1$) 和能量检测器; 对于模型2、模型3和模型4, 检测器的性能从优到差依次排序为 JAS-RPD、OESS-RSTD、GLRT-DT、SSD-GLRT ($\alpha=0.05$)、SSD-GLRT ($\alpha=0.1$) 和能量检测器。相比于基于单阈值划分的检测器, JAS-RPD 优势尤为突出, 在信噪比为 15 dB 附近, 即随机噪声点的幅值大于散射点模型中的弱散射点而小于强散射点, 此时传统的 GLRT-DT 等单阈值划分操作会将这些随机噪声点误判为目标散射点, 而本文能够较好地去除这些随机噪声点的影响, 提高检测概率。

实测舰船高分辨距离像的检测性能曲线对比结果如图8所示, 本文所提出的 JAS-RPD 方法相比与其他传统的方法有着明显的检测概率的提升, 可以看出, 在检测概率 0.5 附近, JAS-RPD 相比于传统的 GLRT-DT 有着约 4 dB 的增益, 而相比于 SSD-GLRT 有着约 5 dB 的增益, 对比能量检测器有约 10 dB 的增益。

在检测概率 0.9 附近, JAS-RPD 相比于传统的 GLRT-DT 有着约 3 dB 的增益, 相比 SSD-GLRT 有着约 4 dB 的增益, 对比能量检测器有约 7 dB 的增益。

综合上述理想散射点模型和实测舰船高分辨距离像的蒙特卡洛实验结果, 可以得出, 本文在 GLRT-DT 基础上所提出的 JAS-RPD 检测方法, 能够有效地消除孤立强噪声点的影响, 同时相比于传统的仅考虑了高分辨距离像幅值分布特性的检测方法, JAS-RPD 能够有效地利用目标散射点的空间相关性, 有效地提高了检测正确率。

5 结论

针对高分辨雷达获取到的高分辨距离像检测问题, 本文提出了一种基于幅空联合分布的高分辨距离像检测器, 传统的对幅值进行单一阈值划分的检测方法容易将检测窗内远离目标的强噪声点误判为目标, 从而造成检测概率的下降。针对这一缺点, 本文将目标具有连续分布关联性的散射点这一空间分布性质考虑在内, 对脉压后的信号进行分块迭代聚类, 能够有效地将空间位置相邻并且幅值接

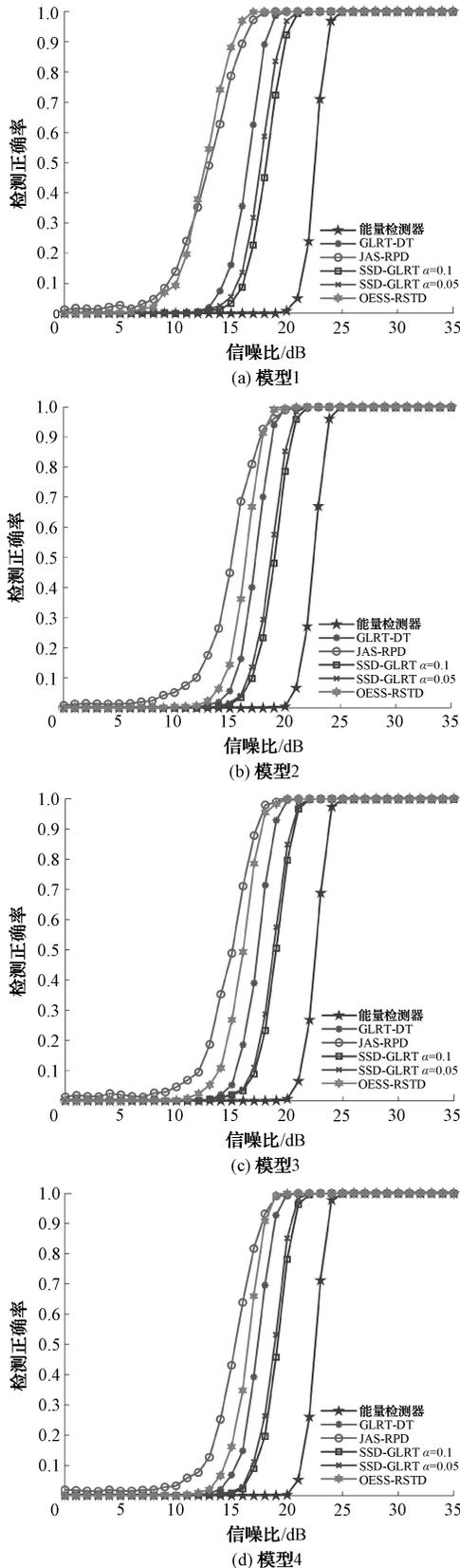


图7 4种散射模型的检测算法性能对比

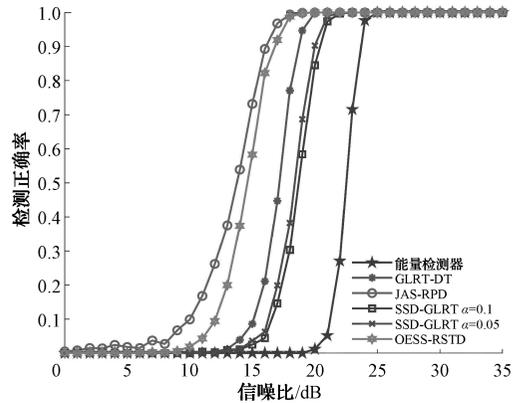


图8 实测数据的检测算法性能对比

近的回波信号分离出来。同时本文使用一种稳健的中位绝对偏差估计器估计噪声功率,结合噪声功率估计值和预先设定的虚警率计算检测门限值,使用能量最大的块计算检验统计量,并通过门限检测来进行目标有无的判决。本文通过4种理想散射点模型以及实测舰船高分辨距离像的仿真试验对比,验证了本文所提出的高分辨距离像检测算法有着良好的检测性能。

参考文献

- [1] 袁家雯,刘文波,杨孟交,等. 基于希尔伯特黄变换的雷达 HRRP 目标识别[J]. 电子测量技术, 2018, 41(14):78-82.
- [2] 俞鼎峰,喻荣梅,马超,等. 基于一维距离像序列的导弹目标进动参数估计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2):55-59,63.
- [3] 朱丰,张群,罗迎,等. OFD-LFM 信号 MIMO 高分辨雷达一次快拍稀疏成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(5):1076-1085.
- [4] HUGHES P K. A high-resolution radar detection strategy[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983 (5): 663-667.
- [5] GERLACH K, STEINER M J. Adaptive detection of range distributed targets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(7): 1844-1851.
- [6] 戴奉周,刘宏伟,吴顺君. 一种基于顺序统计量的距离扩展目标检测器[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10):2488-2492.
- [7] LONG T, ZHENG L, LI Y, et al. Improved double threshold detector for spatially distributed target [J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, 95(4): 1475-1478.
- [8] 郭鹏程,刘峥,罗丁利,等. 基于强散射点在线估计的距离扩展目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(4):910-916.
- [9] CHEN X, GAI J, LIANG Z, et al. Adaptive double

- threshold detection method for range-spread targets[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021, 29: 254-258.
- [10] 傅翀,雷斌,韩冰,等.基于切比雪夫多项式的 HRWS 星载 SAR 成像算法[J].国外电子测量技术,2015, 34(8):40-46.
- [11] 李燕,何怡刚,于文新,等.广义 S 变换多分量 LFM 信号检测及参数估计[J].电子测量与仪器学报, 2017,31(12):2056-2062.
- [12] 卢艳,潘英俊,陶荣辉,等.基于轮廓波降噪的 ISAR 目标轮廓特征提取方法[J].仪器仪表学报,2012, 33(10):2293-2300.
- [13] FELZENSZWALB P F, HUTTENLOCHER D P. Efficient graph-based image segmentation [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(2): 167-181.
- [14] ROUSSEEUW P J, CROUX C. Alternatives to the median absolute deviation [J]. Journal of the American Statistical Association, 1993, 88(424): 1273-1283.
- [15] 唐禹,郭亮,邢孟道,等.合成孔径成像激光雷达高分辨的一维距离像[J].红外与激光工程,2010,39(2): 227-231.
- [16] 符吉祥,邢孟道,徐丹,等.一种基于微波光子超高分辨雷达机翼振动参数估计方法[J].雷达学报,2019, 8(2):232-242.
- [17] 席泽敏,卢建斌,赵文强,等.舰船目标一维距离像的非相干建模计算方法[J].现代雷达,2011, 33(7): 40-44.

作者简介

汤留阳,硕士研究生,主要研究方向为雷达信号数据处理。

E-mail:tangliuyang20@mails.ucas.ac.cn

齐向阳,博士,研究员,主要研究方向为星载 SAR 系统仿真、高分辨率成像技术和成像新体制。

范怀涛,博士,副研究员,主要研究方向为高分辨率宽幅星载 SAR 成像。