

## 基于改进 Hough 变换的海面微弱目标检测

左磊\* 李明 张晓伟 罗小云

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 海杂波背景下的微弱目标检测是一个具有挑战性的难题。该文提出一种应用改进 Hough 变换检测海面微弱目标的方法。对海面的距离-时间像进行时间向二次采样, 并平滑得到的子图, 对平滑图应用边缘检测然后进行 Hough 变换, 在 Hough 域通过两级门限检测出微弱目标。该方法不依赖海杂波模型, 具有通用性, 可以在没有海面先验信息的情况下检测微弱目标。实测海杂波数据的处理结果验证了该方法的正确性和实用性。

**关键词:** 微弱目标检测; 距离-时间像; 二次采样; Hough 变换

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0923-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00373

## Small-target Detection in Sea Clutter Based on Improved Hough Transform

Zuo Lei Li Ming Zhang Xiao-wei Luo Xiao-yun

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Small target detection in sea clutter is a challenging problem. This paper proposes a novel approach to solve it. Edge detection and improved Hough transform are applied to a set of range profiles, which are resulted from re-sampling and smoothing the range-time profiles in time direction. Using the two-step masks, the moving small target can be figured out in Hough domain. This approach has a wide application due to the independence on the model of sea clutter, and can be used to detect target without prior knowledge of the ocean and environment conditions. Real sea clutter data is used to illustrate the effectiveness and the practicability of the novel approach.

**Key words:** Small target detection; Range-time profiles; Re-sampling; Hough transform

### 1 引言

雷达检测海面目标时不可避免地受到海杂波的干扰, 当待检测目标很大时, 海杂波的干扰可以忽略; 但当目标很小时, 尤其是高度很低时, 海杂波的存在使得雷达对目标的检测能力明显下降, 这主要是因为海杂波的平均功率很大, 小目标信号经常淹没在杂波中。在雷达发射窄波束, 且入射角极小的情况下, 海杂波的纹理特征变为“尖峰”回波, 容易出现虚假目标<sup>[1,2]</sup>。

近年来, 随着海面舰艇隐身技术的发展, 海面目标回波信号变得越来越弱, 对其检测变得越来越困难。传统的检测方法是建立精确的海杂波模型, 主要的海杂波建模方法包括基于统计理论的方法<sup>[3-6]</sup>和基于分形理论的方法<sup>[7-9]</sup>。但精确的模型不仅需要大的运算量, 而且不具有通用性, 这种不通用性不仅在于不同海面的精确模型不同, 还在于同

一海面对不同分辨率雷达而言其模型也不同。近年来人们对海杂波的研究主要集中在高分辨雷达下, 不断有新方法被提出<sup>[10,11]</sup>。文献[10,11]在高分辨率雷达下提出了一种应用Radon变换检测海面微弱目标的方法, 该方法不严格依赖于海杂波模型, 颇具启发性, 但不适合低分辨雷达。

当没有海面或周围环境的先验信息时, 传统的海面目标检测方法检测性能不再稳定。针对这种情况, 本文提出一种应用改进Hough变换检测海面微弱目标的方法, 该方法首先对海面距离-时间像沿时间向进行二次采样得到多幅子图, 然后将这些子图在幅度上平均得到平滑图, 再对平滑图进行Hough变换, 最后通过两级门限在Hough域检测微弱目标。本文方法不依赖于海杂波的模型, 通用性较好。实测海杂波数据的检测结果验证了该方法的正确性和实用性。

### 2 海杂波背景下的微弱目标检测

雷达发射线性调频脉冲, 回波经海面目标散射后返回, 雷达将接收到的回波经过脉冲压缩处理得到海面区域的1维距离像。在此距离像上, 目标和海

2011-04-17 收到, 2012-02-20 改回

国家部委基金, 国家自然科学基金(60872137)和长江学者创新团队发展计划(IRT 0954)资助课题

\*通信作者: 左磊 lzuo@mail.xidian.edu.cn

尖峰都呈现为大能量的一小片区域。将得到的1维距离像按接收顺序排列得到距离-时间像。

在传统雷达信号处理中,应用距离-时间像中多普勒信息的动目标检测(MTD)算法往往被用来检测运动目标。但该方法在检测海杂波中的运动目标时存在诸多缺点。对低分辨雷达而言,在目标回波的相干积累时间内,目标和海尖峰都处于运动状态且海尖峰能量较大,MTD 算法对目标的检测概率很低。对高分辨雷达而言,目标回波的相干积累时间很短,使 MTD 算法的速度分辨力太低以致算法失效。另外,MTD 算法属于频域检测,其不模糊多普勒频率范围是 $(-f_r/2, f_r/2)$ ,其中 $f_r$ 是雷达脉冲重复频率,但对于海面监视雷达而言,为了具有远距离探测能力,重频通常是比较低的,此时 MTD 算法很容易出现多普勒频率模糊,不同径向速度的目标可能出现在同一频点上。

在距离-时间像中,目标的运动轨迹表现为连续的直线,在信号积累过程中,运动目标可能会出现跨距离单元走动,使得运动目标的轨迹表现为一条倾斜的直线。如何从图像中检测出直线,并根据倾斜度对它们做出正确判定,是目前要解决的首要问题。Hough 变换<sup>[12]</sup>专门用来检测图像中的直线,但传统的 Hough 变换检测方法不适合低分辨雷达,不具有通用性。因此本文提出了改进 Hough 变换检测方法,该方法不受海况和雷达分辨率的限制,不依赖海杂波模型,具有通用性。为了算法描述的需要,下面首先对实测海杂波数据进行说明与分析。

### 2.1 实测海杂波数据说明与分析

本文所用实测数据是在中国某城市东海岸使用一部脉冲多普勒线性调频信号雷达测得的低掠海角海杂波,雷达参数和环境参数如表 1 所示。将长为  $K$  的  $L$  个 1 维距离像按时间顺序排列成距离-时间像  $C_{k,l} = \{z_k(l)\}$ ,  $z_k(l)$  表示第  $l$  个回波中第  $k$  个距离像点,其中  $l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, K$ 。本次实验中,在不同海面区域采集了 9 组数据,分别命名为 Data $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 9$ ),每组数据包含按时间排列的 23760 个距离像。

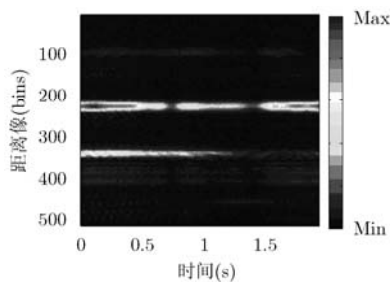


图 1 海杂波图

表 1 雷达参数和环境参数

极化方式	HH	积累时间(s)	90
载频(GHz)	10	风速(Kn)	5
脉冲重复频率(Hz)	264	天线高度(m)	200
距离分辨率(m)	30	波束宽度(°)	1
距离像点数(bins)	512	波长(m)	0.03
掠海角(°)	1.15	目标位置(km)	10

图 1 所示的是由 Data1 的前 512 个回波组成子距离-时间像  $C'_{k,l} = \{z_k(l); l = 1, \dots, 512; k = 1, \dots, 512\}$ 。从图 1 中可以看出海面漂浮(静态)目标和海杂波的运动轨迹都表现为沿时间向分布的直线,各条直线能量大小不同,持续时间也不同。图 1 中能量较大,持续整个时间段的直线是海面静态目标的运动轨迹,其余为海杂波轨迹。

现实中海面目标速度不会太高,假设最大为 50 Kn(节)。在实测海杂波  $C'_{k,l}$  中人工地加入一速度为 50 Kn 的运动目标,目标模型服从马克姆(Marcum)分布,如图 2 所示。

为了说明本文提出方法相对于传统检测方法的优越性,下面简要介绍传统的 Hough 变换检测方法对于海面运动目标的检测性能。

### 2.2 Hough 变换检测方法

为了方便显示和运算,首先对图 1 旋转  $60^\circ$ ,再通过角度分辨率为  $0.1^\circ$  的 Hough 变换得到 Hough 域矩阵,并在  $(\rho, \theta)$  平面中表示(图 3),其中  $\rho$  表示矢径,  $\theta$  表示极角。对图 2 进行同样的处理得到其 Hough 域矩阵,如图 4 所示。通过 Hough 变换峰值检测算法自动检测出图 3 和图 4 中的峰值点并用圆圈标出。对比图 4 和图 3,可以人工地识别出运动目标所对应的峰值点。

从图 3 中可以看出,经 Hough 变换后,海杂波和静态目标运动轨迹对应峰值点的  $\theta$  坐标全部位于  $59.9^\circ$  到  $60.2^\circ$  之间。而图 4 中微弱目标运动轨迹在 Hough 域中对应峰值点的  $\theta$  坐标为  $60.2^\circ$ 。在没有先验信息的情况下,无法判断该峰值点是由微弱目标产生,还是由静态目标或海杂波产生。因此本文提

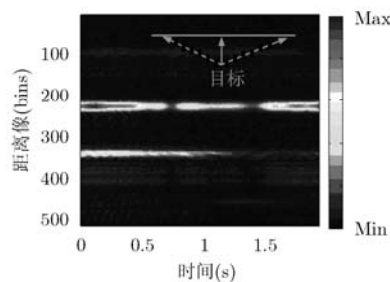


图 2 含目标的海杂波

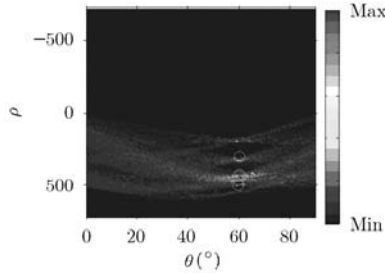


图 3 海杂波的 Hough 变换

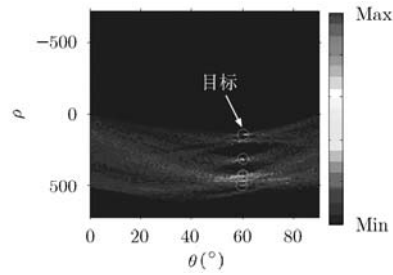


图 4 含目标海杂波的 Hough 变换

出改进 Hough 变换检测方法，下面对该方法进行详细说明。

### 2.3 改进 Hough 变换检测方法

在信号积累时间内，海面漂浮目标的速度很小，且不规则，因此其基本不会出现跨距离单元走动，相应的其运动轨迹在距离-时间像中表现为一条连续的能量很大的水平直线；海杂波速度与海况有关且持续时间较短<sup>[13]</sup>，其运动轨迹在距离-时间像中表现为一些持续时间较短，倾斜程度在一定范围，能量较大的短线段；在较短的积累时间内运动目标一般可以认为是匀速运动的，其运动轨迹在距离-时间像中是一条随积累时间一直持续的倾斜的直线。

对距离-时间像进行 Hough 变换后，目标的运动轨迹在 Hough 域的极角  $\theta$  与其倾斜程度有关，可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\theta = 60 - \arctan\left(\frac{V_r \cdot 0.5144}{f_r \cdot \Delta r}\right) \quad (1)$$

式中  $f_r$  是雷达脉冲重复频率， $\Delta r$  是雷达距离分辨单元， $V_r$  是目标径向速度，以 Kn 为单位，当目标远离雷达时速度取正值，反之取负值。当  $V_r = 0$  时，目标运动轨迹在 Hough 域中的  $\theta$  坐标位于中心角度  $60^\circ$ ，目标速度越大，雷达脉冲重复频率越低或距离分辨单元越小，目标运动轨迹的  $\theta$  坐标相对于中心角度的偏移量越大。

本文方法通过在图像域沿时间向二次采样降低脉冲重复频率，并将采样得的子图取幅度平均，然后进行边缘检测后的 Hough 变换，在 Hough 域通过两级门限检测微弱目标。该方法在增大微弱目标运动轨迹在 Hough 域对应峰值点的  $\theta$  坐标相对于中心角度的偏移量的同时减小了海杂波在 Hough 域的幅度。根据幅度从海杂波中检测出目标，再根据  $\theta$  坐标的偏移量区分静态目标和运动目标。本文提出方法的具体流程如下：

(1)对距离-时间像  $Data_i (i = 1, 2, \dots, 9)$  沿时间向进行  $N$  倍二次采样，得到  $N$  幅子图：

$$C(n) = C_{k, n+mN} \quad (2)$$

式中  $m = 0, 1, \dots, 511$ ， $n = 1, 2, \dots, N$ 。每一幅子图的脉冲重复频率变为  $f_r / N$ 。由式(1)看出，微弱目标运动轨迹对应的  $\theta$  坐标与目标速度，雷达脉冲重复频率和距离分辨单元有关，对于实测数据，目标速度和距离分辨单元是固定，降低脉冲重复频率可以增大微弱目标运动轨迹在 Hough 域对应峰值的  $\theta$  坐标相对于中心角度的偏移量，该过程虽然也增大了海杂波运动轨迹在 Hough 域对应峰值的  $\theta$  坐标相对于中心角度的偏移量，但减少了海杂波持续时间内的采样点数，使其在 Hough 域对应峰值点的幅度减小，而微弱目标运动轨迹对应峰值点的幅度不变。

(2)将二次采样后的  $N$  幅子图在幅度上对应相加后取平均，得到平滑后的子图  $C$ ：

$$C = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C(n) \quad (3)$$

由于海杂波的幅度具有随机性，该过程可以平滑掉  $C(n)$  中的高斯噪声，使海杂波的轨迹在 Hough 域对应峰值点的幅度进一步减小，而微弱目标运动轨迹对应峰值点的幅度不受影响。

(3)将  $C$  经过边缘检测处理<sup>[14]</sup>，把强度图转化成二进制图，消除直线的能量因素对其在 Hough 域中对应峰值点能量的影响并降低运算量。将  $C$  旋转  $60^\circ$ ，再对变换后的二进制图像进行角度分辨率为  $0.1^\circ$  的 Hough 变换，得到变换后的 Hough 域矩阵

$R(\rho, \theta)$ ：

$$C \xrightarrow{\text{Hough变换}} R(\rho, \theta) \quad (4)$$

$R(\rho, \theta)$  中峰值点能量大小，只与其在图像域对应直线的长度有关。Hough 变换实际上是在距离-时间平面沿着目标的准确路径进行非相干积累，运用目标所有可以运用的能量。理论上，Hough 域的信干噪比会比图像域提高  $M$  倍， $M$  为积累时间内的回波个数。但实际中由于海杂波的遮挡，经边缘检测处理提取的微弱目标运动轨迹是断断续续的直线，使信干噪比的提高率降低。

(4)选取合适的幅度门限(第 1 门限)，从  $R(\rho, \theta)$  中抽取出运动目标和静态目标所对应的峰值点。第 1 门限  $T_1$  计算如式(5)所示<sup>[10]</sup>。

$$T_1 = \text{mean}(\mathbf{R}(\rho, \theta)) + K \text{std}(\mathbf{R}(\rho, \theta)) \quad (5)$$

其中  $\text{mean}(\mathbf{R}(\rho, \theta))$  和  $\text{std}(\mathbf{R}(\rho, \theta))$  是  $\mathbf{R}(\rho, \theta)$  的全局均值和标准差,  $K$  是修正系数, 由实验方法确定。  $T_1$  应该大于海杂波峰值小于目标峰值, 应用第 1 门限在 Hough 域滤除海杂波:

$$R(\rho_i, \theta_j) < T_1 \rightarrow R(\rho_i, \theta_j) = 0 \quad (6)$$

其中  $R(\rho_i, \theta_j)$  是  $\mathbf{R}(\rho, \theta)$  中的峰值点。

(5) 微弱目标和静态目标的运动轨迹都是持续整个观测时间的, 在 Hough 域无法从能量上区分, 但微弱目标运动轨迹的  $\theta$  坐标相对中心角度偏移量较大, 因此通过合适的角度偏移量门限(第 2 门限  $\theta_{\text{thr}}$ )可以检测出微弱目标。静态目标的最大漂流速度小于风速, 将风速 5 Kn 代入式(1)可以得到其  $\theta$  坐标相对于中心角度的偏移量:  $\theta_w = 0.82^\circ$ , 为了降低虚警率, 第 2 门限通常略大于  $\theta_w$ , 故本文中取第 2 门限  $\theta_{\text{thr}} = \pm 1^\circ$ 。应用第 2 门限从经第 1 门限滤除海杂波后的 Hough 域数据中检测出微弱目标运动轨迹对应的峰值点, 根据其  $\theta$  坐标还原微弱目标的运动信息。

该方法在运算量不变(相比 Hough 变换检测方法)的前提下, 在 Hough 域, 增大微弱目标的  $\theta$  坐标相对中心角度的偏移量, 同时降低了海杂波能量, 可以方便地从海杂波和静态目标中检测出微弱目标。本方法的流程图如图 5 所示。

从以上分析可知, 二次采样率  $N$  越高微弱目标运动轨迹的  $\theta$  坐标相对中心角度偏移量越大, 但  $N$  不能无限大, 需受到一定条件限制,  $N$  应该满足:

$$N \leq \frac{\Delta r}{V_r T_r} \quad (7)$$

其中  $T_r$  是脉冲重复周期。式(7)保证了平滑时间内运动目标不会出现跨距离单元走动。

综上所述, 本文方法不受海况和雷达分辨率的限制, 不依赖海杂波模型, 具有通用性, 可以在没有海面先验信息的情况下检测微弱目标。

### 3 实验结果及分析

为了验证本文所提方法的正确性和有效性, 我们利用实测海杂波数据对本文方法的性能进行实验验证。向实测海杂波数据 Data1 中嵌入两个具有不同速度的微弱目标来仿真有运动目标的海面场景,

两目标的模拟速度分别为 50 Kn(目标 1)和 15 Kn(目标 2), 且方向不同。对加入目标的海杂波距离-时间像沿时间向进行 44 倍二次采样, 记录下采样后的 44 幅子图, 并通过将这些子图在幅度上平均的方法进行平滑处理, 得到一幅低脉冲重复频率的含有两个运动目标的海杂波图像, 该平滑图如图 6 所示, 为了使目标运动轨迹能够肉眼识别出来, 此处加入目标的信干噪比为 3 dB。二次采样后雷达信号的脉冲重复频率  $f_r$  变为 6 Hz, 图 6 中目标 1 的倾斜度远大于其在图 2 中的表现。图 6 和图 2 具有相同的大小, 因而具有相同的运算量, 但该过程将信号积累时间增加到了 85.3 s。由于大多数海面目标的航速较低, 机动性能较差, 可以认为在 85.3 s 内目标是处于匀速运动状态, 而海尖峰的持续时间较短, 远小于 85.3 s, 所以此积累时间即能保证目标匀速运动又能使海尖峰不会持续整个观测时间。

对平滑图边缘检测后再进行 Hough 变换, 其  $(\rho, \theta)$  平面如图 7 所示。通过 Hough 变换峰值检测算法将图 7 中的峰值检测出来并用圆圈标出。根据加入目标的信息, 人工地将  $\theta$  坐标相对于  $60^\circ$  偏移量较大的两个峰值点判定为目标, 并在图中标出, 以此作为目标检测算法的参照。

对二次采样后得到的一幅子图进行 Hough 变换, 将 Hough 域的数据映射到幅度-极角平面, 如图 8 所示; 同时将平滑图的 Hough 域数据也映射到幅度-极角平面上, 如图 9 所示。

在图 8 和图 9 中都可以人工地区分出两个动目标, 静态目标和海杂波。由于海杂波具有随机性, 所以在单次采样时其在  $\theta$  维分布范围广, 出现一些尖锐的峰值, 如图 8 所示。将多次采样的海杂波进行平均, 可以平滑掉一些尖锐的峰值并使海杂波趋于平稳, 因此图 9 中的海杂波所产生的小尖峰在  $\theta$  维分布范围较小, 幅度较低, 且目标 2 附近的干扰明显变弱。而此过程中, 目标能量保持不变。

将所有测得的 9 组海杂波数据经时间向二次采样, 平滑处理后变换到 Hough 域, 统计所有的 Hough 域数据, 发现海杂波产生的峰值与静态目标的峰值差距明显, 在第 1 门限中, 将  $K$  设为 3.2 可以滤除海杂波。同时统计发现经第 1 门限检测后的静态目标的  $\theta$  坐标全部位于  $59.5^\circ$  到  $60.5^\circ$  之间, 与 2.3 节步

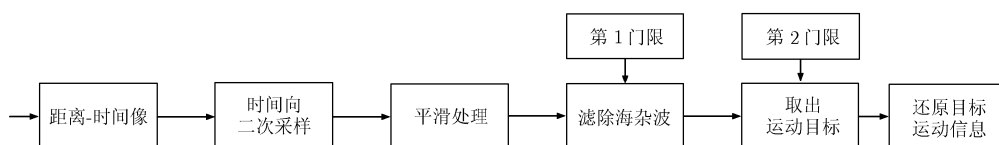


图 5 算法流程图

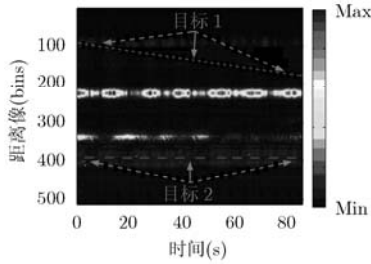


图 6 Data1 数据平滑图

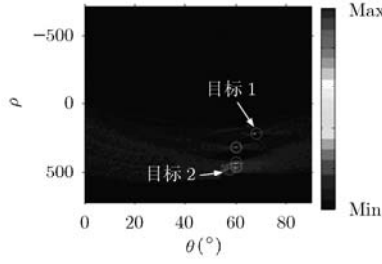


图 7 Data1 平滑图的 Hough 变换

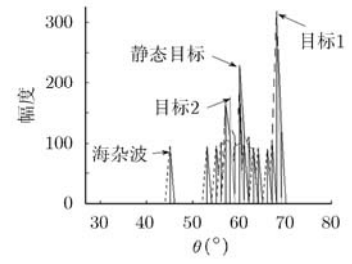


图 8 一幅子图的幅度-极角图

骤(5)中的分析吻合。

向实测海杂波数据 Data3 中嵌入两个速度分别为 50 Kn(目标 1)和 15 Kn(目标 2)的目标信号，两目标具有不同的运动方向，信干噪比为-2 dB。由于加入目标的信干噪比较小，所以其在二次采样后的平滑图(图 10)中无法用肉眼区分，其 Hough 变换如图 11 所示。对图 7 和图 11 中所示的平滑图的 Hough 域数据，应用两级门限检测后的结果分别如图 12 和如图 13 所示。从两图中可以看出运动目标都被准确地检测出来，验证了改进 Hough 变换方法的有效性。

该方法不仅可以在强海杂波中检测出微弱的运动目标，而且还能够检测出其运动速度和方向。根据图 12 和图 13 中的检测结果还原目标的速度情况，如表 2 所示。检测出运动目标的速度的最大相对误差为 2.2%。增加 Hough 变换的分辨率可以减小检测速度的相对误差，但同时带来大的计算增量。

在没有海面或周围环境的先验信息的情况下，传统运动目标检测往往是通过 MTD 算法进行的。根据表 1 中的参数可以计算出传统 MTD 算法可以测量的最大不模糊速度大约为 8 Kn，而具有较高能量的海尖峰的运动速度也恰好处在这一范围内。图 14 是将一速度为 15 Kn 的目标加入到 Data1 的第 400 个距离单元中，经 MTD 处理后抽取出的此距离单元所对应的数据。

从图 14 可以看到信号的频域有 4 个明显的尖峰，它们分别是由目标和海尖峰产生。应用单元平均恒虚警(CA-CFAR)检测会造成虚警率增大，目标的检测概率变低。而且目标存在速度模糊，MTD 算

法无法检测出目标的实际速度。而本文中提出的方法不受这些条件的限制，能够正确地检测出运动目标，并估计其速度。

本文提出的微弱目标检测方法中影响检测概率的主要因素是第 1 门限，当门限过低时，目标检测概率增大，而虚警率也随之增加。文中将虚警率定为 0.05%，将不同信干噪比目标加入海杂波图中不同的位置，在每种信干噪比情况下进行 4000 次检测。检测概率与信干噪比的关系如图 15 所示。从图中可以看出，当信干噪比为-9 dB 时，检测概率达到 96.8%，当信干噪比为-3 dB 时，检测概率达到 100%，此方法表现出良好的微弱目标检测能力。

对于以同样速度运动的微弱目标运动轨迹，在低分辨雷达图像中的倾斜度远小于其在高分辨雷达图像中的表现，因而在低分辨雷达下，其在 Hough 域中对应的  $\theta$  坐标相对于中心角度的偏移量更小，检测难度更大。因此本文中应用实测低分辨雷达海杂波数据进行算法验证的结果可以证明该方法的有效性和通用性。

### 4 结论

本文提出了一种不依赖于海杂波模型的海面微弱目标检测方法。根据海面微弱目标运动轨迹具有连续性且幅度变化不大，而海杂波的持续时间较短且幅度是随机分布这一特点，对回波数据的距离-时间像进行时间向二次采样，并对二次采样后的子图像进行幅度相加取均值得到平滑图，该过程降低雷达脉冲重复频率的同时还降低了海杂波运动轨迹在平滑图中的持续点数，平滑图中目标轨迹变成了倾斜度更大的直线，而海杂波的轨迹则变成一些较短

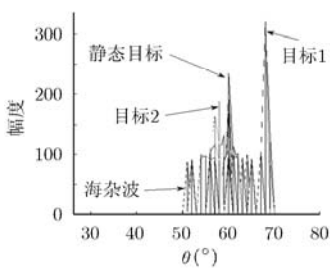


图 9 平滑图的幅度-极角图

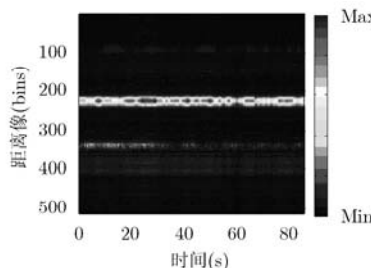


图 10 Data3 数据平滑图

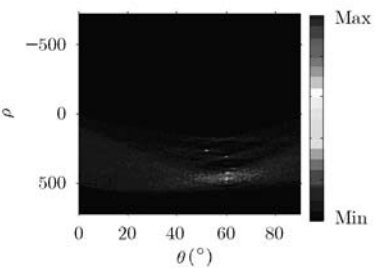


图 11 Data3 平滑图的 Hough 变换

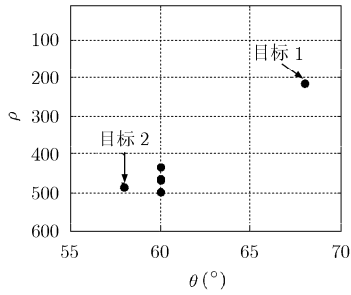


图 12 Data1 的检测结果

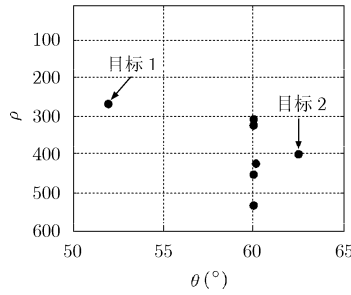


图 13 Data3 的检测结果

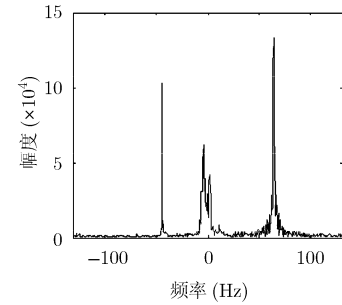


图 14 MTD 结果

表 2 检测结果

		$\theta$ (°)	极角偏移(°)	目标速度(Kn)	相对误差(%)	运动方向
Data1	目标 1	68	+8	49.18	1.64	朝向雷达
	目标 2	57.5	-2.5	15.28	1.87	背向雷达
Data3	目标 1	51.9	-8.1	49.80	0.40	背向雷达
	目标 2	62.4	+2.4	14.67	2.20	朝向雷达

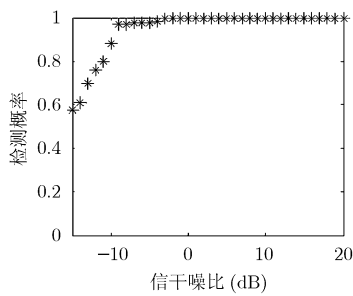


图 15 检测概率与信干噪比的关系

的线段。对平滑图边缘检测后进行 Hough 变换，由于运动目标轨迹在 Hough 域中幅度比海杂波大，相对角度中心偏移量比静态目标大，通过两级门限就可以从海杂波中检测出微弱目标。应用该方法可以在未知海面上检测运动的微弱目标，不受海况和雷达分辨率的限制。实测数据的处理结果验证了该方法的有效性和实用性。

参 考 文 献

[1] Melief H W, Greidanus H, van Genderen P, et al. Analysis of sea spikes in radar sea clutter data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(4): 1289-1310.

[2] Greco M, Stinco P, and Gini F. Identification and analysis of sea radar clutter spikes[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(2): 239-250.

[3] Davidson G and Griffiths H D. Wavelet detection scheme for small targets in sea clutter[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(19): 1128-1130.

[4] Greco M, Bordoni F, and Gini F. X-band sea-clutter nonstationarity: influence of long waves[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(2): 269-283.

[5] Hu Jing, Tung Wen-wen, and Gao Jian-bo. A new way to model nonstationary sea clutter[J]. *IEEE Signal Processing*

*Letters*, 2009, 16(2): 129-132.

[6] Carretero-Moya J, Gismero-Menoyo J, Blanco-del-Campo A, et al. Statistical analysis of a high-resolution sea-clutter database[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2024-2037.

[7] Hu Jing, Tung Wen-wen, and Gao Jian-bo. 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.

[8] Berizzi F, Greco M, and Verrazzani L. Fractal approach for sea clutter generation[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar & Navigation*, 2000, 147(4): 189-198.

[9] 刘宁波, 关键, 张建. 基于分形可变步长LMS算法的海杂波中微弱目标检测[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(2): 371-376.

[10] Carretero Moya J, Gismero Menoyo J, and Asensio Lopez A. Small-target detection in sea clutter based on the radon transform[C]. *International Conference on Radar*, Adelaide, Australia, 2008: 610-615.

[11] Carretero-Moya J, Gismero-Menoyo J, Asensio-Lopez A, et al. Application of the radon transform to detect small targets in sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 3(2): 155-166.

[12] Hough P V C. Methods and means for recognizing complex patterns[P]. US, 3069654, 1962-12-18.

[13] Panagopoulos S and Soraghan J J. Small-target detection in sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1355-1361.

[14] John C. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.

左 磊: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为微弱目标检测.

李 明: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带信号实时处理与检测及多源信息融合.

张晓伟: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理.

罗小云: 女, 1986年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理.