

## 基于锥形尺度变换的弱小舰船目标检测

刘亚波 李亚超 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文提出一种低信杂噪比下弱小舰船目标的检测方法。该方法对回波的慢时间瞬时自相关函数进行锥形尺度变换(Taper Scale Transform, TST), 解除时延和慢时间的耦合。然后将 TST 后的信号相干积累, 达到很好的检测效果。另外, 该文分析了交叉项对检测的影响以及尺度因子的选择标准。实测数据的处理结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 目标检测; 锥形尺度变换(TST); 相干积累; 尺度因子

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)11-2575-06

## Detection of Weak Ship Target Based on Taper Scale Transform

Liu Ya-bo Li Ya-chao Xing Meng-dao Bao Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In this paper, a new approach based on Taper Scale Transform (TST) is presented for weak ship target detection in the circumstance of strong clutter and noise. By scaling the coordinate of signal instantaneous correlation function, the coupling between slow time and lag time is removed, thus fully coherent integration can be achieved for target detection. The determination of scaling factor and the interference of cross terms related to detection are analyzed. Real data result verifies the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Target detection; Taper Scale Transform (TST); Coherent integration; Scaling factor

### 1 引言

合成/逆合成孔径雷达是一种高分辨的微波成像系统, 已经在军事和民用上得到广泛的应用。雷达对运动目标的检测与成像是当前研究的热点领域, 机动小型舰船的雷达反射截面积(RCS)很小, 在距离较远时其回波通常淹没在杂波和噪声中。因此, 对此类高机动弱小目标的检测和参数估计正受到广泛的关注。

当前对舰船目标的检测方式包括图像域和数据域的检测。在图像域, 可以认为舰船检测是暗背景条件下的亮目标检测问题, 此时通常采用基于雷达恒虚警(CFAR)的检测算法, Wavelet transform 和 Multilook cross-correlation 等算法对舰船目标进行检测<sup>[1]</sup>。此外, 文献[2]采用Radon变换检测运动舰船的尾迹。上述检测算法适用于大型平稳的舰船目标, 而对于成像后的机动弱小目标, 其图像散焦严重, 采用上述算法进行检测时, 效果不是很明显。事实上, 正是由于数据域未能实现信号的相干积累, 使得图像域的检测效果受到限制, 因而最好是在数据域将信号相干积累, 提高检测概率。在数据域, 对于高分辨雷达而言, 机动目标会造成回波的包络

走动和方位二次项相位, 此时可以采用keystone<sup>[3]</sup>变换校正回波的包络走动并对其进行距离脉冲压缩, 然后在其方位慢时间域进行检测, 这相当于对线性调频信号的检测。文献[4]采用Hough变换对线性调频信号的Wigner-Ville分布(WVD)进行检测。WVD对线性调频信号具有理想的时频聚集性, 但对于多分量信号其交叉项不可避免<sup>[5]</sup>, 若采用Hough变换检测, 一方面会将噪声积累起来, 另一方面会导致虚假目标的产生。短时傅里叶变换(STFT)则不存在交叉项, 但其频率分辨率将会由于谱窗的存在而降低<sup>[6]</sup>, 从而降低检测性能。对于非平稳信号, 其局部频谱是时变的, 窗宽应与信号的局域平稳长度相适应, 通常采用自适应加窗的办法来求信号的时频分布<sup>[6]</sup>。自适应算法决定了信号时频分布的性能, 从而影响目标检测效果。文献[7]将STFT和WVD的结果按照与的规则进行综合, 以改善时频分布性能, 从而提高检测概率。倘若信噪比较低, STFT方法不能检测出明显的时频分布斜线时, 该方法的效果就不明显了。此外, 分数阶傅里叶变换也是一种常用的检测工具<sup>[8-10]</sup>, 它是一种线性检测工具, 不存在交叉项的干扰, 可以实现对线性调频信号(LFM)的检测和参数估计。

为了实现信号的相干积累, 获得高的检测概率, 本文提出一种类似 keystone 变换的锥形尺度变换

(Taper Scale Transform, TST) 算法: 在对回波 keystone 变换校正目标径向运动引入的回波包络走动并且对其距离向脉冲压缩后, 首先按距离单元求信号的慢时间瞬时相关函数; 然后对瞬时相关函数进行锥形尺度变换, 解除相关时间和慢时间的耦合; 最后将变换后的信号二维相干积累(FFT), 从而获得高的检测概率。采用快速算法<sup>[11]</sup>可以有效提高 TST 的运算效率。文中分析了交叉项对算法性能的影响和尺度因子的选择标准。最后通过实测数据的处理, 对比 Radon 变换的目标检测结果, 验证了 TST 算法的有效性。

## 2 回波信号的模型

雷达发射线性调频信号

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) e^{j2\pi(f_c t + \frac{1}{2}\gamma t^2)} \quad (1)$$

其中  $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & |u| > 1/2 \end{cases}$ ,  $t_m$  为慢时间,  $\hat{t}$  为快时间,  $t = t_m + \hat{t}$ ,  $f_c$  为中心频率,  $\gamma$  为调频率,  $T_p$  为脉冲宽度。

如图 1 所示, 假设  $O$  点为一散射点,  $t_m = 0$  时距雷达  $R_0$ ,  $O$  沿雷达射线方向的径向速度和加速度分别为  $v_r$  和  $a_r$ , 垂直于雷达射线的横向速度和加速度分别为  $v_a$  和  $a_a$ 。

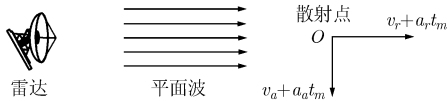


图 1 目标回波示意图

雷达到  $O$  点的瞬时距离为

$$R(t_m, R_0) = \sqrt{\left(R_0 + v_r t_m + \frac{a_r t_m^2}{2}\right)^2 + \left(v_a t_m + \frac{a_a t_m^2}{2}\right)^2} \quad (2)$$

式(2)在  $t_m = 0$  处二阶泰勒展开, 得

$$R(t_m, R_0) \cong R_0 + v_r t_m + \frac{v_r^2 + v_a^2 + a_r R_0}{2R_0} t_m^2 \quad (3)$$

雷达接收到的该目标回波基频信号  $s_r(\hat{t}, t_m)$  为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R(t_m; R_0)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi f_c R(t_m; R_0)}{c} + j\pi\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_0)}{c}\right)^2\right\} \quad (4)$$

其中  $c$  为光速,  $A$  为该点目标回波的幅度。对式(4)进行距离向匹配滤波和 keystone<sup>[3]</sup>变换, 得到  $O$  点

的距离频率-方位时间域的信号形式

$$S_r(f, \tau_m) \cong |P(f)|^2 \tilde{A} \exp\left(-j\frac{4\pi}{c} f(R_0 - a_i \tau_m^2)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c} v_r f_c \tau_m\right) \exp\left(-j\frac{4\pi a_i f_c \tau_m^2}{c}\right) \quad (5)$$

其中  $\tilde{A} = A \exp\left(-j\frac{4\pi f_c R_0}{c}\right)$ ,  $f_c \tau_m = (f_c + f)t_m$ ,  $a_i = \frac{v_r^2 + v_a^2 + a_r R_0}{2R_0}$ ,  $\text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp(j\pi\gamma \hat{t}^2) \xrightarrow{FT} P(f)$ 。

## 3 锥形尺度变换

式(5)中第 1 个指数项表示目标到雷达的距离, 第 2 个指数项包含了目标的径向速度信息, 第 3 个指数项会影响方位聚焦的效果, 必须消除。从式(5)可看出, 包络走动已经被消除了。由于舰船类目标的惰性较大, 加速度一般不大, 相干时间较短时, 径向加速度造成的回波包络弯曲可以忽略, 因此只考虑回波方位向相位的 1 次项及 2 次项。对式(5)距离脉冲压缩,  $O$  点的回波信号被压缩成为一条平行于慢时间轴的直线, 转到方位向处理。由于只有方位向相位影响相干积累效果, 为了方便分析, 可只取式(5)的第 2 和第 3 个指数项进行分析。为了符合习惯使用, 将新时间  $\tau_m$  重新记为  $t_m$ , 得

$$s_p(t_m) = \exp(j2\pi(f_p t_m + (1/2)\gamma_p t_m^2)) \quad (6)$$

其中  $f_p = -2f_c v_r/c$ ,  $\gamma_p = -2f_c a_i/c$ 。求式(6)的瞬时自相关函数

$$R_p(t_m, \tau) = s_p(t_m + \tau/2) s_p^*(t_m - \tau/2) = \exp(j2\pi\tau f_p) \cdot \exp(j2\pi\gamma_p \tau t_m) \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 第 2 个指数项的  $\tau$  和  $t_m$  是相互耦合的, 由于信号散射点调频率的存在, 信号  $s_p(t_m)$  在时频平面内将呈斜线分布。如果能消除这一耦合项的影响, 使得时频分布呈水平直线, 就可以对信号进行相干积累了。为了实现这一目的, 可以做如下的尺度变换

$$\tau t_m = A t'_m \Rightarrow t'_m = \tau t_m / A \quad (8)$$

式(8)中  $\tau/A$  为尺度变换的因子,  $A$  为常数, 它的大小会影响尺度变换对信号的检测性能。由于  $\tau$  是确定的变化量, 只需确定因子  $A$  的选取, 因而也称  $A$  为尺度因子, 具体的尺度变换特性和  $A$  的选取将在后面的第 5 节和 6.1 节中分析。把式(8)代入式(7)可以得到

$$R_p(t'_m, \tau) = \exp(j2\pi\tau f_p) \cdot \exp(j2\pi\gamma_p A t'_m) \quad (9)$$

经过变量代换后,  $\tau$  和  $t_m$  的耦合已经消除了, 取而代之的是尺度因子  $A$  调节的新时间量  $t'_m$ 。选取适当的尺度因子  $A$ , 对式(9)进行 2 维傅里叶变换,

得到

$$R_P(f'_b, f_a) = \delta(f_a - f_P) \cdot \delta(f'_b - A\gamma_P) \quad (10)$$

式(10)在信号的 2 维频谱域将其压缩成一个尖峰, 从而实现对目标的检测。实际中, 信号都是有限长度的, 式(10)应该是两个 sinc 函数的乘积, 这里将其写成冲激函数只是为了表达的方便, 不会影响分析。

以上只是理论推导, 计算机处理时需要将信号离散化。如图 2(a)所示, 在 $(\tau - t_m)$ 平面, 信号是以矩形格式采样的, 采样点用“o”表示, 菱形框内则是自相关函数真正存在的范围。在 $(\tau - t'_m)$ 平面, 原来的信号采样点将变成锥形格式, 在图 2(b)中用“o”表示。为了能用 FFT 快速处理, 需要将 $(\tau - t'_m)$ 平面的采样点插值成为矩形格式, 如图 2(b)“•”所示。正因为如此, 把锥形格式数据转换成矩形格式数据称为锥形尺度变换(Taper Scale Transform, TST)。由于新的时间支撑区与原时间支撑区尺度差别较大, 插值误差不可避免, 不过 6.1 节中的仿真结果验证了在尺度因子选取适当的时候, 插值误差的影响是可以忽略的。

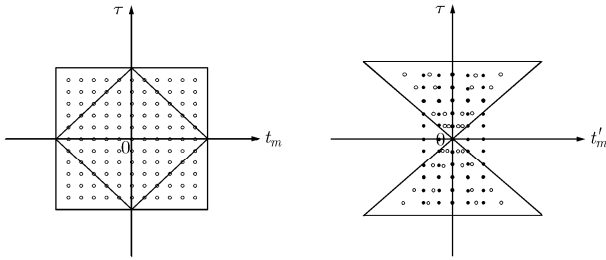


图 2  $(\tau - t_m)$  和  $(\tau - t'_m)$  平面插值变换示意图

将式(7)中 $\tau$ 和 $t_m$ 分别离散化为 $n$ 和 $m$ , 它们的点数是一样的, 设为 $N$ 。从式(8)可以看出, 尺度变换后的时间采样仍是等间隔的, 只是采样的间隔尺度有所变化, 其变化的尺度因子为 $\tau/A$ 。把式(9)离散化为

$$R_P(m, n) = \exp(-j2\pi f_P n) \cdot \exp(-j2\pi \gamma_P A m), \quad m = -N/2, \dots, N/2 - 1, n = -N/2, \dots, N/2 - 1 \quad (11)$$

设信号时间 $m$ 对应的频率为 $k$ , 通过尺度变化后, 新的信号时间和频率与原来的时间和频率有不同的尺度。设新的信号时间和对应的频率分别为 $m'$ 和 $k'$ , 这些变量的离散点数都是一样多的。由 $R_P(m, n)$ 变换到 $R_P(k', n)$ 时, 因为 $m$ 和 $k'$ 对应不同的尺度空间, 不能用 FFT 实现, 只能对其做 DFT 实现, 而 $k'$ 和 $m'$ 对应相同的尺度空间, 可以用 IFFT 实现。整个变换过程为

$$R_P(m', n) = \text{IFFT} \left[ \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} R_P(m, n) e^{-j\frac{2\pi n k' m}{N}} \right], \quad m = -N/2, \dots, N/2 - 1, n = -N/2, \dots, N/2 - 1 \quad (12)$$

其中 $\eta = \tau/A$ 为尺度变换的因子。实际处理时, 由于式(12)每次都要对各个 $k'$ 的值逐个计算, 效率较低, 通常采用文献[11]的快速算法实现尺度变换, 可以极大地提高运算效率。这时只需要将其中的权换成本文的 $\eta$ , 图 3 给出了针对本文的快速算法的流程图。

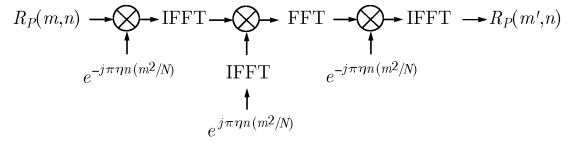


图 3 锥形尺度变换快速算法流程图

### 4 交叉项的影响

实际上, 弱小目标的回波信号中可能包含几个散射点。对回波求瞬时自相关时, 其相关函数除了散射点分量自身的自相关分量外, 还有散射点两两之间的交叉项(互相关项)。假设信号有两个散射点分量

$$s(t_m) = s_P(t_m) + s_Q(t_m) \quad (13)$$

其中  $s_P(t_m) = \exp(j2\pi(f_P t_m + (1/2)\gamma_P t_m^2))$ ,  $s_Q(t_m) = \exp(j2\pi(f_Q t_m + (1/2)\gamma_Q t_m^2))$ 。

对信号 $s(t_m)$ 做式(7)-式(10)的变换后, 可以得到两个散射点分量 $s_P(t_m)$ 和 $s_Q(t_m)$ 各自对应的自相关项和它们互相关项的 2 维频谱

$$R_s(f'_b, f_a) = \delta(f_a - f_P)\delta(f'_b - A\gamma_P) + \delta(f_a - f_Q) \cdot \delta(f'_b - A\gamma_Q) + R_{s_{PQ}}(f'_b, f_a) + R_{s_{QP}}(f'_b, f_a) \quad (14)$$

其中

$$R_{s_{PQ}}(f'_b, f_a) = \int \int \exp \left[ j2\pi(f_P - f_Q) \frac{A t'_m}{\tau} + j\pi(f_P + f_Q) \tau + j\pi(\gamma_P - \gamma_Q) \frac{A^2 t_m'^2}{\tau^2} + j\frac{\pi}{4}(\gamma_P - \gamma_Q) \tau^2 + j\pi(\gamma_P + \gamma_Q) A t'_m \right] \cdot \exp(-j2\pi f_a \tau) \cdot \exp(-j2\pi f'_b t'_m) d\tau dt'_m$$

$$R_{s_{QP}}(f'_b, f_a) = \int \int \exp \left[ j2\pi(f_Q - f_P) \frac{A t'_m}{\tau} + j\pi(f_Q + f_P) \tau + j\pi(\gamma_Q - \gamma_P) \frac{A^2 t_m'^2}{\tau^2} + j\frac{\pi}{4}(\gamma_Q - \gamma_P) \tau^2 + j\pi(\gamma_Q + \gamma_P) A t'_m \right] \cdot \exp(-j2\pi f_a \tau) \cdot \exp(-j2\pi f'_b t'_m) d\tau dt'_m$$

从式(14)可以看出, 经过尺度变换后, 散射点信号分量  $s_p(t_m)$  和  $s_q(t_m)$  在其 2 维频谱上各自对应一个尖峰, 它们在频率轴上的投影就是它们各自的多普勒中心。各散射点分量两两作用的互相关项由于相位高次项的影响, 不能像单分量信号那样沿时间轴实现相干积累, 其输出能量较低, 可以利用这一特性来实现对目标的检测。

## 5 尺度因子选择

为了最大限度的减小插值误差, 积累能量, 改善检测性能, 在进行锥形尺度变换时必须选取适当的尺度因子  $A$ 。这里只考虑  $A$  取正数的情况,  $A$  取负数会导致伪频率域峰值位置与原峰值位置对称, 这里把式(10)中的  $f'_b$  称为伪频率。 $A$  的选取需要考虑以下因素:

(1) 选取的  $A$  应该使得在  $\tau$  的取值范围内满足  $\tau/A = 1$ , 即某个新时间支撑区同原时间支撑区大小一致。此时该时间支撑区插值无误差, 它附近的时间支撑区插值误差相对较小。反之, 若任意一个新时间支撑区都与原时间支撑区大小不同, 则所有的时间支撑区插值都会有较大误差, 因而  $A$  的取值应该在  $(0, T_a]$  内。

(2)  $A$  的选取还应该使得尺度变换后的新时间支撑区在  $[-T_a/2, T_a/2]$  附近越多越好, 这可以进一步减小新时间支撑区的剧烈变化导致的插值误差。也就是说, 应选取  $A$  使得  $\tau$  变化时,  $\tau/A = 1$  的附近的值越多越好。假设处理点数为  $N$ , 相关时间间隔为  $2T_a/N$ , 则每当  $\tau$  变化一次时, 支撑区变化  $2T_a/AN$ 。可见为了使支撑区变化尽量小, 在满足 1 的条件下,  $A$  越大越好。

(3)  $A$  的选取还应考虑新时间域信号变换到伪频率域的主瓣展宽问题。当  $\tau/A < 1$  时, 尺度变换后新时间支撑区变小, 式(9)经过 FFT 变换到伪频率域后, 信号变成 sinc 函数形式, 其主瓣宽度为  $A/T_a\tau$ , 主瓣峰值展宽, 不利于信号的提取; 当  $\tau/A > 1$  时, 尺度变换后新时间支撑区变大, 式(9)经过

FFT 变换到伪频率域时, 主瓣峰值变窄, 有利于信号的提取。因此在满足 1 的条件下,  $A$  越小越好。

后两条是矛盾的, 而他们的影响也是相当的, 为了兼顾这两个因素,  $A$  的取值范围应该在  $T_a/2$  附近。此时支撑区变化比较小, 主瓣展宽也不严重, 效果比较好。

## 6 仿真及实测数据分析

本节首先采用线性调频信号的仿真数据验证上述对尺度因子  $A$  选取的论断, 然后采用实测数据对 TST 算法进行验证。

### 6.1 尺度因子 $A$ 的选取

仿真的线性调频信号中心频率  $f_c = -100$  Hz, 调频率为  $\gamma = 30$  Hz/s, 信号时长为  $T_a = 1.024$  s, 采样频率  $F_s = 1000$  Hz。根据第 5 节的结论, 最优的  $A = T_a/2 = 0.512$ 。

当  $A = 0.05$  时, 最后压缩的点如图 4(a)所示, 峰值点在(513, 404), 峰值点沿频率轴有展宽, 分辨率下降, 额外产生的能量沿着频率轴散布较强。当  $A = 0.512$  时, 最后压缩的点如图 4(b)所示, 峰值点在(517, 411), 峰值点能量聚集较好。当  $A = 5$  时, 最后压缩的点如图 4(c)所示, 峰值点在(551, 411), 峰值点能量沿伪频率轴展宽严重, 分辨率下降, 额外产生的能量沿着伪频率轴散布较强。

可见, 当  $A = T_a/2 = 0.512$  时, 检测效果最好, 验证了上面关于  $A$  的选取的论断。实际中只要  $A$  的选取在  $T_a/2$  附近, 检测效果都很好。

### 6.2 实测数据分析

实际中, 微弱舰船目标的检测问题, 其“强、弱”体现在舰船回波能量相对于背景杂波能量的大小, 同时包含了一定的噪声影响。为了真实的反映该算法在杂波和噪声同时存在情况下的检测效果, 下面使用实测数据检验 TST 算法。

图 5 是某所机载雷达对长江上的舰船成像图像。本文截取其中部分图像, 图中所圈之处有一段若隐若现的线段, 这里可能存在一个弱小目标。

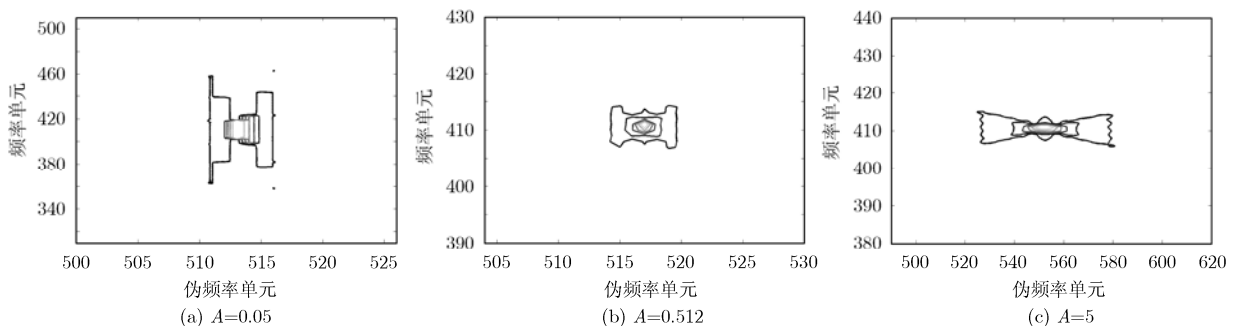


图4 尺度因子  $A$  的选取对检测效果的影响



图 5 机载雷达对江面舰船成像图像

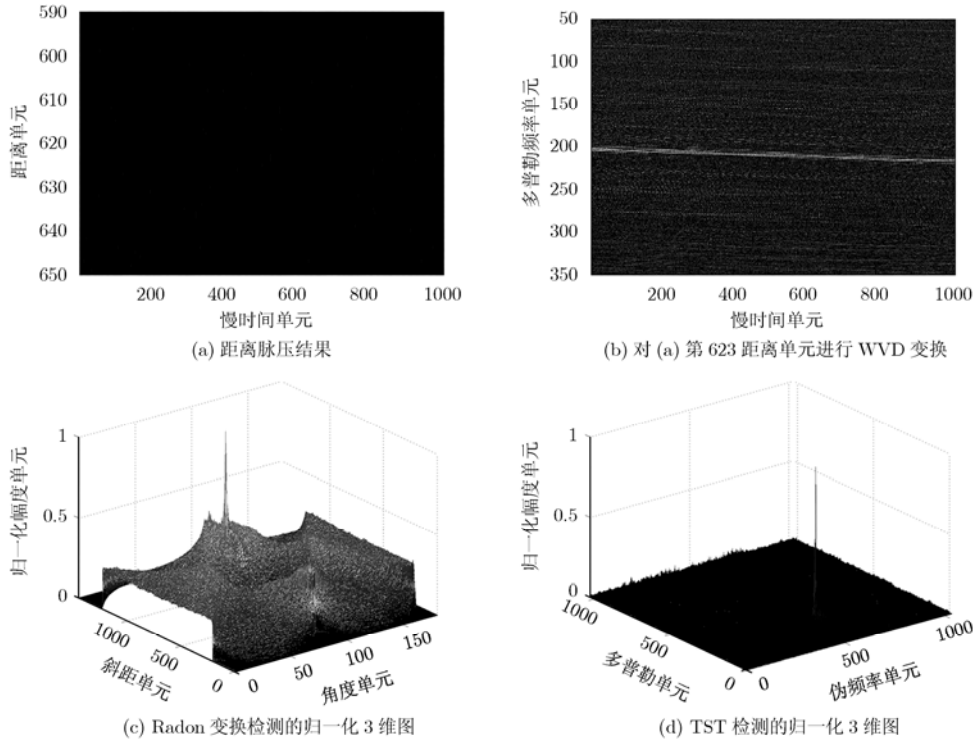


图 6 实测数据的检测结果

将该图像重新变回数据域, keystone 校正包络走动后并进行距离脉压后得到图 6(a)所示结果, 从图中看不到该段数据脉冲压缩后的直线。图 6(b)为对第 623 距离单元 WVD 后的结果, 可以看到一条斜线。图 6(c)是用 Radon 变换对其检测的归一化 3 维图, 峰值点为(90, 1029)。图 6(d)是锥形尺度变换 (TST)算法检测的归一化 3 维图, 峰值点在(510, 211)。

Radon 变换检测的噪声门限为峰值的 0.42 左右, TST 算法检测的噪声门限为峰值的 0.1 左右, TST 算法的检测效果明显优于 Radon 变换。文献[12]指出当采用快速算法实现 KWT 时, 若其循环次数和 Radon-Wigner 变换的旋转搜索次数相等, 则它们的运算复杂度是一样的。TST 快速算法的实现流程同 KWT 一样, 所以它同 Radon-Wigner 变换的运算复杂度也是一致的, 因而采用 TST 算法不会导致运算效率的过度下降。

### 7 结束语

本文提出一种基于锥形尺度变换(TST)的低信噪比下弱小舰船目标的检测算法, 该算法可以将

时频面上的信号相干积累, 达到很好的检测效果。采用快速算法后可以有效提高该算法的运算效率。锥形尺度变换(TST)插值误差不可避免, 不过在尺度因子选取适当的时候误差的影响可以忽略。本文主要研究弱小目标的检测, 事实上当目标上的散射点较多, 回波也较强的时候, 已经有类似的方法实现对目标高分辨的 ISAR 成像<sup>[13]</sup>。作者将对雷达波束照射范围内存在弱小目标和大型船只时, 锥形尺度变换(TST)同时对大型船只的成像和弱小目标的检测进行进一步的研究。

### 参考文献

- [1] Zhang Xi, Zhang Jie, and Ji Yong gang. Comparison and evaluation of ship target detection algorithm with SAR images[C]. The 2nd International Workshop on Advance in SAR Oceanography From ENVISAT and ERS MISSIONS, Rome Italy, 21-25 January 2008, special publication.
- [2] Copeland A C. Localized radon transform-based detection of ship wakes in SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(1): 35-45.
- [3] Perry R P, Dipietro R C, and Fante R L. SAR imaging of

- moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188-200.
- [4] Bararossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(6): 1511-1515.
- [5] 张贤达, 保铮. 非平稳信号处理[M]. 第一版, 北京: 国防工业出版社, 2001: 20-22, 53-56.
- [6] Czerwinski R N and Jones D L. Adaptive short-time Fourier analysis[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1997, 4(2): 42-45.
- [7] Shu Ting and Liu Xing zhao. Moving target detection in airborne SAR by a combined Wigner-STFT transform[C]. 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings. Huangshan, China. 5-9 Nov 2007: 298-301.
- [8] Akay O and Faye Boudreaux-Bartels G. Fractional autocorrelation and its application to detection and estimation of linear FM signals[C]. Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, Pittsburgh USA, 1998: 213-216.
- [9] Sun H B, Liu G S, and Gu H, *et al.*. Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(4): 1416-1424.
- [10] Qazi S, Georgakis A, and Stergioulas L K, *et al.*. Interference suppression in the wigner distribution using fractional Fourier transform and signal synthesis[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(6): 3150-3154.
- [11] Zhu Dai yin, Li Yong, and Zhu Zhao da. A keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 18-22.
- [12] Lv Xiao lei, Xing Meng dao, and Zhang Shou hong, *et al.*. Keystone transformation of the Wigner-Ville distribution for analysis of multicomponent LFM signals[J]. *Signal Processing*, 2009, 89(5): 791-806.
- [13] Xing Meng dao, Wu Ren biao, and Li Ya chao, *et al.*. New ISAR imaging algorithm based on modified Wigner-Ville distribution[J]. *IEE Proceedings Radar Sonar & Navigation*, 2009, 3(1): 70-80.
- 刘亚波: 男, 1984年生, 博士, 从事目标检测及ISAR成像方面的研究工作.
- 李亚超: 男, 1981年生, 博士, 讲师, 从事雷达信号处理及SAR/ISAR成像方面的研究工作.
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达成像和目标识别.