基于频谱细化和二阶同步压缩变换的船载地波雷达目标检测方法

刘亚春[1,2], 王祎鸣[2*], 杨俊钢[2]

（1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院，山东 青岛 266590；
2. 自然资源部 第一海洋研究所，山东 青岛 266061）

摘　要：受船载平台运动、海杂波、多目标聚集以及环境干扰等的影响，海上船只目标的雷达回波极易被遮蔽和淹没，导致船载地波雷达的目标监视监测能力大幅减弱。为提高船载地波雷达对船只目标的检测与发现性能，提出了一种基于频谱细化和二阶同步压缩变换的目标检测方法。该方法首先对船载地波雷达的回波信号进行频率细化处理，提高频率分辨率；然后，通过二阶同步压缩变换的时频分析方法来提取目标的时频分布特征；最终，根据得到的时频分布特征来实现目标检测。实验结果表明：与短时傅里叶变换、小波变换等传统的时频分析方法相比，本文提出的方法不仅具有更好的时频聚集性，而且能有效检测海杂波附近的运动目标以及回波多普勒频率相近的多船只聚集目标。

关键词：高频地波雷达；目标检测；时频分析；频谱细化；同步压缩变换

中图分类号：TN958.93　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671-6647(2024)01-0116-10

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20221130001

引用格式： 刘亚春, 王祎鸣, 杨俊钢, 2024. 基于频谱细化和二阶同步压缩变换的船载地波雷达目标检测方法[J]. 海洋科学进展, 42(1): 116-125. LIU Y C, WANG Y M, YANG J G, 2024. Ship target detection method of shipborne surface wave radar based on spectrum refinement and second-order synchrosqueezing transform[J]. Advances in Marine Science, 42(1): 116-125.

高频地波雷达（High Frequency Surface Wave Radar, HFSWR），简称地波雷达（王祎鸣等, 2015; Yao et al, 2017; Wang et al, 2021; Zhao et al, 2021），利用垂直极化高频电磁波（3～30 MHz）沿海面绕射传播的特点对海面目标进行检测。凭借其超视距探测（能探测到视距以外的飞机、船只、导弹等运动目标）的优势，可实现对海上目标的大范围、远距离探测，并且能够提供目标的径向距离、径向速度、方位等信息，最远作用距离能够达到 300 km 以上。高频地波雷达具有超视距、大面积、低成本、全天候以及实时监测等特点，是目前进行远距离海事监测的有效手段（付尚生等, 2021）。

然而，地波雷达目标检测受到复杂的海杂波环境以及高频段各种背景噪声的影响，大幅降低了雷达对海面目标的检测和识别能力。尤其是回波信号中海浪与电磁波谐振产生的海洋表面回波信号占很大的比重，造成了多普勒（Doppler）域中占优势的一阶海杂波（又称 Bragg 峰）展宽，严重影响了对海上船只目标的检测。作为地波雷达信号处理中极其重要的一部分，目标检测的准确性将直接影响整个雷达系统的探测性能，因此，亟须发展有效的地波雷达目标检测方法，提高在复杂情况下的目标检测能力。

收稿日期：2022-11-30
资助项目：国家重点研发计划项目（2017YFC1405202 和 2016YFC1401103）
作者简介：刘亚春（1997—），女，硕士研究生，主要从事地波雷达目标检测方面研究.
E-mail: chun123@fio.org.cn
*** 通信作者：**王祎鸣（1981—），男，副研究员，博士，硕士生导师，主要从事地波雷达海洋探测方面研究.
E-mail: wangyiming@fio.org.cn

（王　燕　编辑）

在地波雷达目标检测方面，国内外有代表性的研究方法有：基于常规噪声背景下的恒虚警（Constant False Alarm Rate, CFAR）方法及其改进算法（Jan et al, 2012; 梁建, 2014; 严俊坤等, 2014; 王雨阳等, 2016）、基于短时分数阶傅里叶变换（Short-Time Fractional Fourier Transform, STFRFT）的弱目标检测方法（陈小龙等, 2011, 2014; 田玉芳等, 2013; Chen et al, 2014; 范一飞等, 2016），以及基于时频分析的海面目标检测方法（严颂华等, 2006; 黄小红等, 2010; 奚刚等, 2012; 胡进峰等, 2015; 李庆忠等, 2015）。

基于常规噪声背景下的恒虚警（Constant False Alarm Rate, CFAR）方法及其改进算法（Jan et al, 2012; 梁建, 2014; 严俊坤等, 2014; 王雨阳等, 2016）应用较广，能够定量分析目标检测时的检测率和虚警率，但船载地波雷达中船只平台运动以及一阶海杂波展宽都会使得目标的存在环境更加复杂，容易将海杂波、电离层中某些干扰识别为目标，或者将干扰附近的目标判别为干扰，造成大量的虚警和漏警发生。因此，此类方法比较适用于海况相对稳定、运动目标的多普勒频率远离海杂波区域的情况。

基于短时分数阶傅里叶变换（Short-Time Fractional Fourier Transform, STFRFT）的弱目标检测方法（田玉芳等, 2013; Chen et al, 2014; 陈小龙等, 2011, 2014; 范一飞等, 2016）将微多普勒（Micro-Doppler, m-D）理论引入到海面目标检测领域，使用分数阶傅里叶变换（Fractional Fourier Transform, FRFT）将时域回波信号转换到时频联合域，能够在有效抑制背景杂波和噪声的同时实现强海杂波背景下缓慢运动目标的检测。但对于距离分辨率不高的 HFSWR 而言，由于海面目标的 m-D 信号特征比较微弱，会导致目标检测难以实现。

基于时频分析的海面目标检测方法（严颂华等, 2006; 黄小红等, 2010; 奚刚等, 2012; 胡进峰等, 2015; 李庆忠等, 2015），通过使用一定的时频变换手段，将相干积累时间内的一维时间信号转变为二维的时间-频率图像，被广泛用于描述非平稳信号的时变特性。在高频雷达中通过根据目标与海杂波能量聚集区域持续时间的不同特征，来实现海面目标检测。目前常用的时频分析方法包括短时傅里叶变换（Short Time Fourier Transform, STFT）、Wigner-Ville 分布（WVD）、连续小波变换（Continuous Wavelet Transform, CWT）和希尔伯特黄变换（Hilbert-Huang Transform, HHT）（Huang et al, 1998）等。虽然理论上此类算法拥有较好的应用前景，但当目标的多普勒频移与海杂波接近或多目标间的多普勒频移相差很小时，在时频图上无法实现邻近频率信号间的区分，导致常规的时频分析方法不能实现有效的目标检测。

在船载地波雷达中，由于船载平台运动，海杂波展宽程度更大，另外，区域海上船只目标较多时，在地波雷达回波谱中存在目标回波聚集或者重叠的情况，更增加了目标检测的难度。为克服以上时频分析方法在海面目标检测中面临的难题，本文提出一种基于频谱细化和二阶同步压缩变换（李振春等, 2019; 何周杰等, 2021）的运动目标检测方法，解决海杂波附近运动目标以及多普勒频率相差很小的运动目标的有效检测问题。

1　目标检测方法

船载地波雷达一阶海杂波的多普勒频率 f_d 为：

$$f_d = \pm f_B + 2v_p\cos(\varphi)/\lambda, \tag{1}$$

式中：f_B 为一阶 Bragg 峰对应的多普勒频率，$f_B = \pm 2V_B/\lambda = \pm 2/\lambda\sqrt{g\lambda/4\pi} = \pm\sqrt{g/\pi\lambda} \approx 0.102\sqrt{f_0}$，其中 V_B 为海浪重力波的波速，g 为重力加速度，λ 为雷达波长，f_0 为雷达发射频率；v_p 为船载平台运动速度；φ 为一阶海杂波回波方向与船载平台运动方向的夹角。

若雷达发射频率为 4.7 MHz，其对应的地波雷达一阶海杂波峰的多普勒频率 f_B 约为 0.221 Hz，海面运动目标的多普勒频率大约在 [−0.3, 0.3] Hz 以内。从多普勒频率轴上看，海面船只目标与海杂波

皆处于该低频范围。且在实际情况下，船载平台航速航向具有时变性，因此对于同一块海杂波区，会出现信号展宽现象；另外，不同区域一阶海杂波回波具有不同的方向性，船载平台的运动会对不同回波方向的一阶海杂波引入不同的附加多普勒频移。平台的运动性和海杂波的多向性都会导致一阶海杂波谱发生展宽，进而导致检测运动目标困难。

严颂华等(2006)研究表明，目标和海杂波在时频域具有较好的区分潜力。但是，需要提高雷达回波的时频分辨率，同时改善对信号分量的准确定位能力和对交叉干扰的抑制能力。因此，本文提出了基于频谱细化和二阶同步压缩变换的船载地波雷达目标检测方法。方法流程如图 1 所示，主要包括频率细化处理和能量重分配两个步骤。

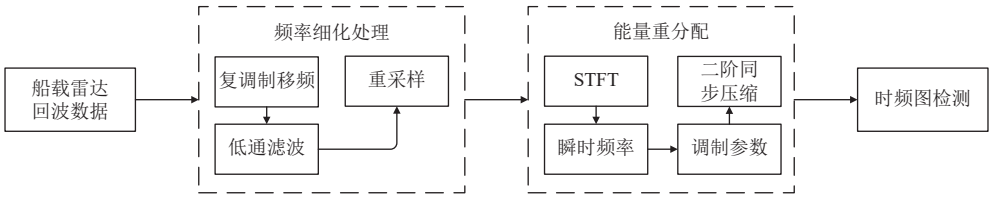


图 1 基于频谱细化和二阶同步压缩变换的目标检测方法流程

Fig. 1 Flow chart of the target detection method based on spectrum refinement and second-order synchrosqueezing transform

1.1 频率细化处理

对于海上低速运动目标，其回波多普勒频移恰好位于地波雷达海杂波之内的多普勒区域，使得低速运动目标的多普勒频移极易靠近或被淹没在海杂波的多普勒区内，导致检测较困难。另外，当多个目标间的距离和径向速度相接近时，在 RD 谱上会显示为一个大的目标区而无法区分。为了能够实现上述情况下的目标检测，本文拟通过对船载雷达回波数据做频谱细化(李庆忠等, 2015)处理，提高目标与海杂波间以及多目标回波间的频率区分度，从而有利于在后期时频分析中目标回波的精细识别。

设雷达回波信号离散时间序列为$X(n)$，其中$n=1,2,\cdots,N$，N为时频分析的数据点数。该离散时间序列的采样频率为f_s，待细化即感兴趣的频带范围为f_1～f_2，该频带的中心频率为$f_0=(f_1+f_2)/2$，设将原来的频率分辨率提高 D 倍，则频谱细化的具体步骤如下。

1)复调制移频处理。引入一个调制因子$\mathrm{e}^{-j2\pi n f_0/f_s}$，然后将离散信号$X(n)$与调制因子相乘，实现将关注频段的起点坐标移动到频域坐标零频率位置。

2)数字低通滤波。设定低通滤波器的截止频率为$f_c=f_s/2D$，对复调制频移处理后的离散信号进行低通滤波处理，只留下感兴趣频段的信号，避免重采样时出现频谱谱线混叠的情况。

3)信号重采样。经过步骤 1)和步骤 2)后得到的信号不仅频带范围变窄，而且位于感兴趣的频率范围内。此时，采用比较低的采样频率$f_{s0}=f_s/D$对得到的信号再进行一次抽样，即重采样。

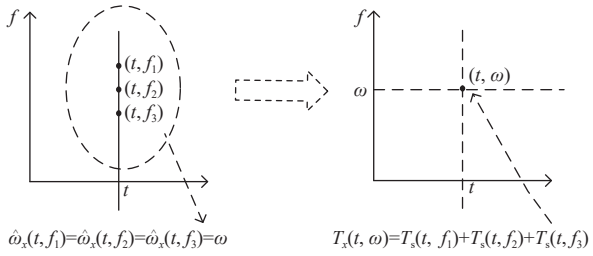
4)对重采样信号进行时频分析处理。经过上述重采样操作后，即可得到一个采样点数与原来一致的信号，然后对其进行后续的时频分析，即可使其频率分辨率比原先提高 D 倍。

1.2 能量重分配

采用二阶同步压缩变换来重新分配能量以提高时频分布图的区分度，进而提高目标检测能力。该方法以短时傅里叶变换得到的初始瞬变系数为基础，通过引入二阶相位差分和调制参数得到瞬时频率，然后经过同步压缩使得时频图中局部范围内的能量重新归位到合理的重心位置，提高时频分

布图中的时频集聚性，从而提高目标检测的准确度。能量重分配（韩红霞, 2018）示意图如图 2 所示。

图 2 显示了在t时刻频率点f到ω的映射过程，即频率点能量重新分配的过程。能量重分配的具体步骤如下。



(a) 瞬时频率估计　　(b) f 到 ω 的映射

注：ω为t时刻各个点的瞬时频率估计结果，$T_X(t, \omega)$为点(t, ω)的能量重分配结果。

图 2　能量重分配示意图

Fig. 2　Schematic diagram of energy redistribution

对于海面上慢速移动的船只目标，假设目标在相干积累时间内的运动距离小于等于一个距离分辨单元，目标回波信号$x(t)$可表示为：

$$x(t)=A(t)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi(t)}=A(t)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi f_d t}=A(t)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi\int_0^t 2v(t)/\lambda \mathrm{d}\tau}, \tag{2}$$

式中：$A(t)$是瞬时幅度；$\varphi(t)$是瞬时相位；$v(t)$是船只运动的瞬时速度；λ是波长。当雷达目标满足单成分信号模型时，目标回波信号$x(t)$的短时傅里叶变换表达式为：

$$S_x^g(t,f)=\int_R X(\xi)g^*(\xi-f)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi\xi t}\mathrm{d}\xi。 \tag{3}$$

式中：$S_x^g(t,f)$为短时傅里叶变换的时频系数；$X(\xi)$为$x(t)$在频率域的傅里叶变换形式；$g^*(\xi-f)$为窗函数。但受到测不准原理的限制，STFT 的时频能量聚集性较差，时频脊线模糊，不利于后续的目标检测。因而，引入同步压缩变换，即利用对时频面上各点瞬时频率的估计值来压缩细化 STFT 结果，从而达到增强时频聚集性的效果。

首先，求瞬时频率，即对短时傅里叶变换$S_x^g(t,f)$求时间t的偏导，则其瞬时频率估计$\widetilde{\omega}(t,f)$为：

$$\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{-\mathrm{i}\partial_t S_x^g(t,f)}{2\pi S_x^g(t,f)} \qquad S_x^g(t,f)\neq 0。 \tag{4}$$

然后，将 STFT 的时频系数$S_x^g(t,f)$沿频率轴方向按照$(t,f)\to(t,\widetilde{\omega}(t,f))$的映射关系对频率变量进行压缩重排，可得到同步压缩变换表达式如下：

$$T_x(t,f)=\frac{1}{g(0)}\int_R S_x^g(t,f)\delta(f-\widetilde{\omega}(t,f))\mathrm{d}f \qquad g(0)\neq 0。 \tag{5}$$

式中：$T_x(t,f)$是同步压缩变换的时频系数；$\delta(\cdot)$是狄拉克函数。考虑到船载地波雷达回波信号形式为线性调频信号，同步压缩变换虽然在 STFT 的基础上提高了时频分布的能量聚集程度，但是仅能够在频率方向进行压缩重排，并不能有效改善时域的能量溢出现象。此时需要引入一个调制参数$\widetilde{q}(t,f)=\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)/\partial_t\widetilde{\tau}(t,f)$来考虑短时傅里叶变换相位的二阶差分，研究更精确的瞬时频率估计的二阶变换$\widetilde{\omega}^{(2)}(t,f)$。此时，瞬时频率估计算子在同步压缩变换的基础上减去了一个频率调制项，能够较好地适应因船载地波雷达线性调频信号频率变化过快而引起的脊线聚集性差的问题。

引入群延迟参量$\widetilde{\tau}(t,f)$，上述调制参数$\widetilde{q}(t,f)$求解过程如下。

因为：

$$\begin{aligned}\partial_t S_x^g&=\partial_t\left[\int_R X(\xi)g^*(\xi-f)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi\xi t}\mathrm{d}\xi\right]\\&=2\pi\mathrm{i}\int_R \xi X(\xi)g^*(\xi-f)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi(\xi-f)t}\mathrm{d}\xi-2\pi\mathrm{i}f\int_R X(\xi)g^*(\xi-f)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi(\xi-f)t}\mathrm{d}\xi\\&=2\pi\mathrm{i}S_x^{\xi g}-2\pi\mathrm{i}fS_x^g,\end{aligned} \tag{6}$$

所以：

$$\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{-\mathrm{i}\partial_t S_x^g}{2\pi S_x^g}=\frac{2\pi\mathrm{i}S_x^{\xi g}-2\pi\mathrm{i}fS_x^g}{2\pi\mathrm{i}S_x^g}=\frac{S_x^{\xi g}}{S_x^g}-f。 \tag{7}$$

同理可得：

$$\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)=\frac{2\pi\mathrm{i}[S_x^{\xi^2 g}S_x^g-(S_x^{\xi g})^2]}{(S_x^g)^2}。 \tag{8}$$

又有：

$$\begin{aligned}\partial_f S_x^g &= \partial_f\left[\int_R X(\xi)g^*(\xi-f)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi\xi t}\mathrm{d}\xi\right]\\ &= -\int_R X(\xi)[g^*(\xi-f)\mathrm{e}^{\mathrm{i}2\pi\xi t}]'\mathrm{d}\xi\\ &= -S_x^{g'},\end{aligned} \tag{9}$$

所以：

$$\widetilde{\tau}(t,f) = t + \frac{\mathrm{i}\partial_f S_x^g}{2\pi S_x^g} = t + \frac{S_x^{g'}}{2\pi\mathrm{i}S_x^g}。 \tag{10}$$

同理可得：

$$\partial_t\widetilde{\tau}(t,f) = \frac{(S_x^g)^2 + S_x^{\xi g'}S_x^g - S_x^{\xi g}S_x^{g'}}{(S_x^g)^2}。 \tag{11}$$

因此，得到调制参数：

$$\widetilde{q}(t,f) = \frac{\partial_t\widetilde{\omega}(t,f)}{\partial_t\widetilde{\tau}(t,f)} = \frac{2\pi\mathrm{i}[S_x^{\xi^2 g}S_x^g - (S_x^{\xi g})^2]}{(S_x^g)^2 + S_x^{\xi g'}S_x^g - S_x^{\xi g}S_x^{g'}}。 \tag{12}$$

于是，有二阶瞬时频率估计$\widetilde{\omega}^{(2)}(t,f)$为：

$$\widetilde{\omega}^{(2)}(t,f) = \widetilde{\omega}(t,f) + \widetilde{q}(t,f)(t-\widetilde{\tau}(t,f))。 \tag{13}$$

最终，二阶同步压缩变换可表示为：

$$T_x^{(2)}(t,f) = \frac{1}{g(0)}\int_R S_x^g(t,f)\delta(f-\widetilde{\omega}^{(2)}(t,f))\mathrm{d}f \qquad g(0)\neq 0。 \tag{14}$$

式(6)至式(14)中：∂_t是对时间求偏导；∂_f是对频率求偏导；S_x^g、$S_x^{\xi g}$、$S_x^{\xi^2 g}$、$S_x^{g'}$、$S_x^{\xi g'}$分别为不同窗函数下的短时傅里叶变换时频系数；$T_x^{(2)}(t,f)$是二阶同步压缩变换的时频系数。对上式的处理，不仅能够提高瞬时频率估计的精度，而且极大地改善了时频能量模糊的不足，进一步提升了时频分布的聚集表达，有利于后续船载地波雷达的目标检测。

2 实验结果及分析

2.1 仿真分析

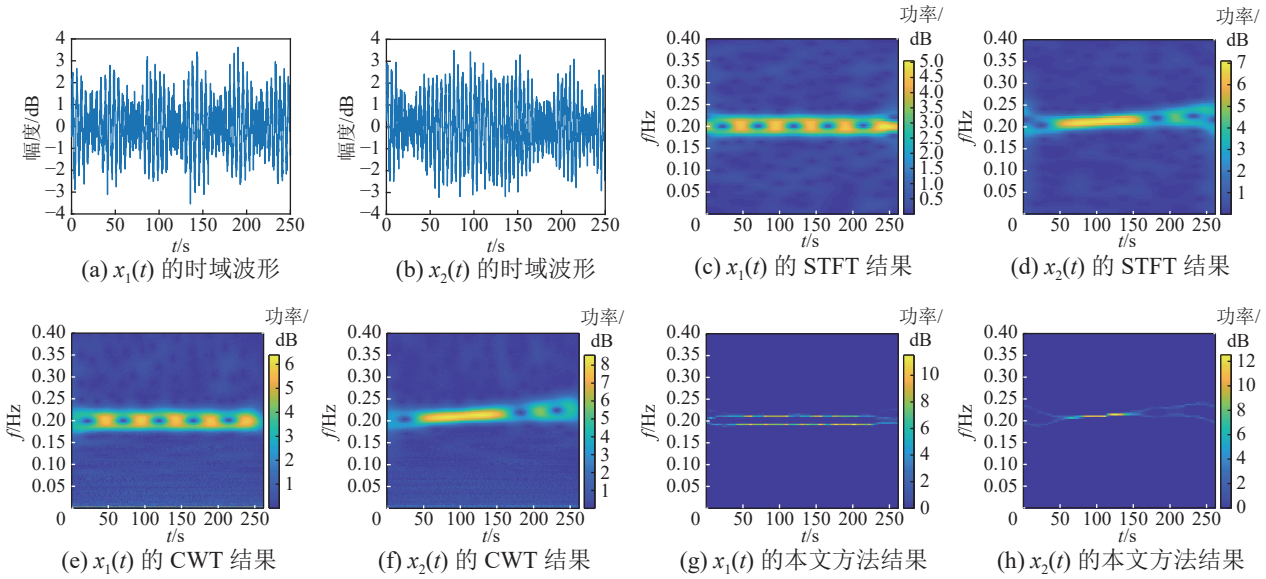
采用仿真信号来考察本文算法对相近频率信号时频分析的有效性，并将各算法进行了性能对比。为了确保仿真数据和实际船载地波雷达数据采样点的一致性，仿真数据选取 2 048 个数据点。为了与实际船载地波雷达回波信号的多普勒频率范围相接近，首先构造了含有 2 个平稳分量的仿真信号$x_1(t)$，其分量频率分别为 0.190 Hz 和 0.211 Hz。此外，为了与实际船载雷达数据特征相似，加入了随机噪声干扰$n(t)$，如式(15)所示。仿真信号$x_2(t)$由非平稳分量与平稳分量组成(式(16))，且第一项为线性调频信号，其频率由 0.190 Hz 开始线性调频；第二项为平稳分量信号，其频率为 0.211 Hz；第三项为加入的随机噪声。具体计算式为：

$$x_1(t) = \sin(0.38\pi t) + \sin(0.422\pi t) + n(t), \tag{15}$$

$$x_2(t) = \sin[2\pi(0.19 + 0.000\,1t)t] + \sin(0.422\pi t) + n(t)。 \tag{16}$$

从时域波形图中很难得到与目标有关的有效信息(图 3a 和图 3b)，因此，对仿真信号$x_1(t)$和$x_2(t)$分别采用 STFT、CWT 和本文方法进行处理，结果如图 3c 至图 3h 所示。由图 3c 和图 3e 可知，STFT 和 CWT 并没有把仿真信号$x_1(t)$中 2 个频率接近的信号分离开，且 2 个信号的时频线发生重叠，难以分辨出频率接近的多个信号或多普勒频率相接近的匀速目标，不利于目标检测。由图 3d 和图 3f 可知，虽然从 STFT 和 CWT 的结果中能够大致确定线性调频信号的趋势，但是无法明显地将两者区分开，并且时频图的时频集聚性较差，目标检测效果也不好。由图 3g 和图 3h 可知，本文提

出的时频分析方法不仅能够将仿真信号 $x_1(t)$ 中 2 个频率相差很小的平稳信号分离开，而且对仿真信号 $x_2(t)$ 中平稳信号和非平稳信号也有较好的区分效果。



(a) $x_1(t)$ 的时域波形　(b) $x_2(t)$ 的时域波形　(c) $x_1(t)$ 的 STFT 结果　(d) $x_2(t)$ 的 STFT 结果

(e) $x_1(t)$ 的 CWT 结果　(f) $x_2(t)$ 的 CWT 结果　(g) $x_1(t)$ 的本文方法结果　(h) $x_2(t)$ 的本文方法结果

图 3　采用 STFT、CWT 和本文提出方法的仿真实验结果对比

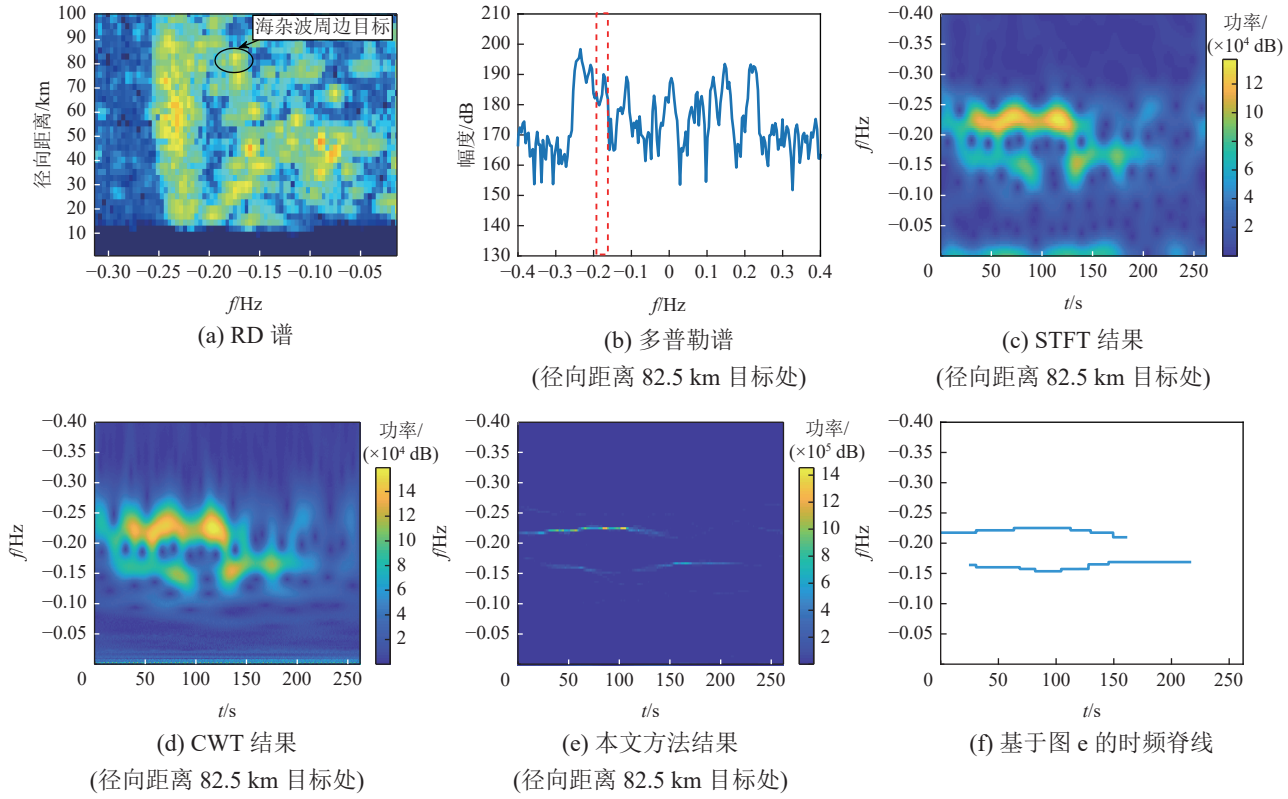
Fig. 3　The simulation results of STFT, CWT and the proposed method are compared

2.2　实测数据验证

采用 2019 年在山东渤海海域开展的船载地波雷达目标探测实验数据，验证本文提出的基于频谱细化和二阶同步压缩变化的船载地波雷达目标检测方法。船载地波雷达工作的载频为 4.7 MHz，距离分辨率为 2.5 km，相干积累时间为 262.144 s。基于对多批实验数据的分析，利用本文方法对距离多普勒（Range Doppler, RD）谱图像上的可疑目标区进行精细检测，并与实际的船舶自动识别系统（Automatic Identification System, AIS）信息做比对，以验证本文方法的有效性。

选取了 2 种典型情况的船载地波雷达探测数据进行分析。一种是运动目标的多普勒频移极易靠近或被淹没在海杂波的多普勒区内的情景；另一种是多个目标间的距离和径向速度相接近时的情况。针对这 2 种情况，分别用 STFT、CWT 和本文方法对船载雷达回波信号进行处理，以考察 3 种方法对目标识别的能力，实验结果如图 4 和图 5 所示。

当目标多普勒频移靠近或被淹没在海杂波的多普勒区时，目标检测较困难（即海杂波周边目标），如图 4 所示。在 RD 谱（图 4a）中，有 1 个位于负一阶峰右侧的杂波边缘目标（图 4a 黑色椭圆内），标记为海杂波周边目标，其位于 RD 谱图像上第 33 个距离单元，即径向距离 82.5 km 处。从 82.5 km 处的多普勒频谱（图 4b）可见，在−0.17 Hz 附近存在 1 个目标信号（图 4b 中红色虚线矩形）。然而，由 STFT、CWT 的分析结果（图 4c、图 4d）可知，STFT、CWT 的分辨率有限，导致时频谱的能量发散，从中无法得到有效的目标信息。由于目标的非平稳运动，目标的多普勒频谱会发生明显的展宽和分裂。经检测可知，传统检测方法会产生误报或难以检测到目标，仅有本文方法成功提取到了船只目标的时频脊。由本文提出方法的检测结果（图 4e）及提取的时频脊线（图 4f）可以清晰地显示，在第 82.5 km 距离处存在多普勒频率以−0.17 Hz 为起点且线性变化的运动目标，在该运动目标时频线的上方为海杂波的时频分布。AIS 数据表明，此处存在 1 个目标，本文方法的检测结果与 AIS 一致。故本文方法能有效区分多普勒频率在海杂波周边的目标。



(a) RD 谱

(b) 多普勒谱 (径向距离 82.5 km 目标处)

(c) STFT 结果 (径向距离 82.5 km 目标处)

(d) CWT 结果 (径向距离 82.5 km 目标处)

(e) 本文方法结果 (径向距离 82.5 km 目标处)

(f) 基于图 e 的时频脊线

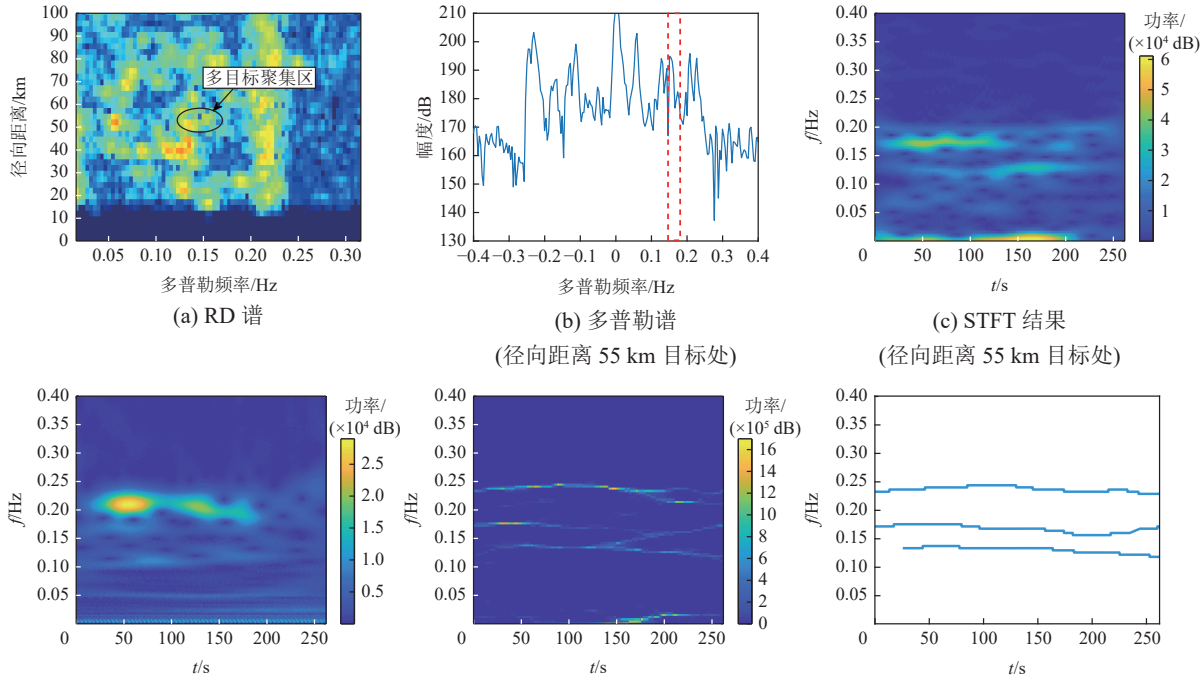
注：图 b 中红色虚线矩形表示目标。

图 4 利用不同方法检测海杂波周边目标的结果对比

Fig. 4 Comparison of detection results of sea clutter surrounding targets by different methods

当多个目标间的距离和径向速度接近时，在 RD 谱上会显示为一大片连起来的强回波区而无法区分多个目标(即多目标聚集区)，如图 5 所示。在 RD 谱(图 5a 黑色椭圆内)中，即图像上第 22 个距离单元，径向距离 55 km 处，有 1 个面积较大的可疑目标区域，标记为多目标聚集区。但其中究竟包含多少个目标，用常规的 CFAR 和图像检测等方法是无法判定的。从 55 km 处的多普勒频谱(图 5b)可见，在 0.15 Hz 附近存在目标信号(图 5b 红色虚线矩形)。由 STFT、CWT 得到的结果(图 5c、图 5d)可见，该时频图只得到一片模糊区域，无法实现目标的识别。由本文方法的检测结果(图 5e)可见，提取的时频脊线(图 5f)有 3 条，其中下面 2 条时频线为检测到的 2 个潜在目标，分别对应多普勒频率为 0.146 Hz、0.175 Hz 左右的 2 个变速目标，最上面的时频线为海杂波的时频分布。AIS 信息表明此处存在 2 个目标，本文方法的检测结果与 AIS 数据结果相吻合，即使当 2 个目标的回波多普勒频率相差很小，依然可以清晰地区分开来。故本文方法可以对可疑目标区进行精细检测，确定其中的目标数目。

综上可以看出，本文方法不仅提高了时频分布图的时频聚集性，而且增加了时频分布图的可读性，进而有效实现了海杂波附近目标的准确判断。对于 RD 谱中多目标聚集区域的目标，常规检测方法检测为 1 个目标，而本文提出的方法可以将聚集的目标回波分离，能有效检测出多普勒频率相接近的目标，提高了目标检测的准确率。



(a) RD 谱

(b) 多普勒谱 (径向距离 55 km 目标处)

(c) STFT 结果 (径向距离 55 km 目标处)

(d) CWT 结果 (径向距离 55 km 目标处)

(e) 本文方法 (径向距离 55 km 目标处)

(f) 基于 e 的时频脊线

注：图 b 中红色虚线矩形表示目标。

图 5　利用不同方法检测多目标聚集情况的结果对比

Fig. 5　Comparison of detection results of multi-target aggregation by different methods

3　结　语

本文提出了一种基于频谱细化和二阶同步压缩变换的船载地波雷达目标检测方法。该方法通过频谱细化处理，仅使用少量数据就可大幅提高频率相接近的目标信号的区分性；经过二阶同步压缩变换，得到了更有利于船载地波雷达目标检测的时频图。经仿真分析和实测船载地波雷达数据检验，本文方法在目标回波间的频率相差 0.02 Hz 左右时，依然可以将各个回波分量清晰地区分开，进而实现海杂波周边以及多目标聚集情况下的目标检测。与短时傅里叶变换和小波变换方法进行性能对比表明，提出的检测方法具有更好的时频集聚性，提高了船载地波雷达的目标检测能力。

参考文献 (References):

陈小龙, 刘宁波, 宋杰, 等, 2011. 海杂波 FRFT 域分形特征判别及动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 33(4): 823-830. CHEN X L, LIU N B, SONG J, et al, 2011. Fractal feature discriminant of sea clutter in FRFT domain and moving target detection algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 33(4): 823-830.

陈小龙, 刘宁波, 王国庆, 等, 2014. 基于高斯短时分数阶Fourier变换的海面微动目标检测方法[J]. 电子学报, 42(5): 971-977. CHEN X L, LIU N B, WANG G Q, et al, 2014. Gaussian short-time fractional Fourier transform based on detection algorithm of target with micro-motion at sea[J]. Acta Electronica Sinica, 42(5): 971-977.

范一飞, 罗丰, 李明, 等, 2016. 海杂波 AR 谱多重分形特性及微弱目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 38(2): 455-463. FAN Y F, LUO F, LI M, et al, 2016. The multifractal properties of AR spectrum and weak target detection in sea clutter back-

ground[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 38(2): 455-463.

付尚生, 纪永刚, 黎明, 等, 2021. 地波雷达目标检测跟踪联合处理粒子滤波方法[J]. 海洋科学进展, 39(1): 128-135. FU S S, JI Y G, LI M, et al, 2021. Jiont processing method based on adaptive particle filter for target detection and tracking by high frequency surface wave radar[J]. Advances in Marine Science, 39(1): 128-135.

韩红霞, 2018. 基于时频同步压缩变换的多分量信号分离研究[D]. 西安: 西安电子科技大学. HAN H X, 2018. Research on multicomponent signal separation based on synchrosqueezing transform[D]. Xi'an: Xidian University.

何周杰, 涂晓彤, 王凯, 等, 2021. 频率同步压缩与时间同步压缩的对比和应用[J]. 振动测试与诊断, 41(2): 354-361. HE Z J, TU X T, WANG K, et al, 2021. Comparison and application of frequency-reassigned synchrosqueezing transform and time-reassigned synchrosqueezing transform[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 41(2): 354-361.

胡进峰, 李万阁, 艾慧, 等, 2015. 基于改进时频分析方法的天波雷达机动目标检测算法研究[J]. 电子与信息学报, 37(8): 1843-1848. HU J F, LI W G, AI H, et al, 2015. Maneuvering target detection algorithm based on improved time-frequency analysis method in skywave radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 37(8): 1843-1848.

黄小红, 贺夏, 辛玉林, 等, 2010. 基于时频特征的低分辨雷达微动多目标分辨方法[J]. 电子与信息学报, 32(10): 2342-2347. HUANG X H, HE X, XIN Y L, et al, 2010. Resolving multiple targets with micro-motions based on time-frequency feature with low-resolution radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 32(10): 2342-2347.

李庆忠, 李瑞芹, 黎明, 等, 2015. 基于时频分析的高频地波雷达目标检测算法[J]. 电波科学学报, 30(5): 943-950. LI Q Z, LI R Q, LI M, et al, 2015. A target detection algorithm of HFSWR based on time-frequency analysis[J]. Chinese Journal of Radio Science, 30(5): 943-950.

李振春, 孙苗苗, 王姣, 等, 2019. 时间域和频率域二阶同步压缩变换及其在储层识别中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 43(3): 36-44. LI Z C, SUN M M, WANG J, et al, 2019. Second-order synchrosqueezing transform in time domain and frequency domain and its application in reservoir identification[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 43(3): 36-44.

梁建, 2014. 高频地波雷达目标二维 CFAR 检测及软件实现[D]. 青岛: 中国海洋大学. LIANG J, 2014. Target CFAR detection method and software implementation with two-dimension data for HFSWR[D]. Qingdao: Ocean University of China.

田玉芳, 姬光荣, 尹志盈, 等, 2013. 基于FRFT域空间分形特征差异的海面弱目标检测[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 43(3): 92-97. TIAN Y F, JI G R, YIN Z Y, et al, 2013. Weak targets detection in sea clutter based on modified fractal character differences[J]. Periodical of Ocean University of China, 43(3): 92-97.

王祎鸣, 张杰, 纪永刚, 等, 2015. 利用现场海态观测信息的地波雷达一阶海杂波内的目标检测方法[J]. 海洋科学进展, 33(2): 239-245. WANG Y M, ZHANG J, JI Y G, et al, 2015. Ship detection in first order sea clutter of HFSWR using sea state observation information[J]. Advances in Marine Science, 33(2): 239-245.

王雨阳, 魏明珠, 徐修峰, 2016. 基于实际采集海杂波数据的雷达恒虚警检测方法分析[J]. 雷达与对抗, 36(1): 27-31. WANG Y Y, WEI M Z, XU X F, 2016. Analysis of radar CFAR detection methods based on real sea clutter data[J]. Radar & ECM, 36(1): 27-31.

奚刚, 肖春生, 2012. 基于时频分布的海杂波环境下目标检测[J]. 舰船电子工程, 32(8): 77-79. XI G, XIAO C S, 2012. Targets detection in sea clutter based on time-frequency distribution[J]. Ship Electronic Engineering, 32(8): 77-79.

严俊坤, 刘红亮, 戴奉周, 等, 2014. 一种具有恒虚警性质的检测跟踪联合处理算法[J]. 电子与信息学报, 36(11): 2666-2671. YAN J K, LIU H L, DAI F Z, et al, 2014. Joint detection and tracking processing algorithm with constant false alarm rate property[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 36(11): 2666-2671.

严颂华, 吴世才, 文必洋, 2006. 基于时频二维图像的高频雷达低速目标检测[J]. 电波科学学报, 21(3): 391-396. YAN S H, WU S C, WEN B Y, 2006. Low velocity target detection based on time-frequency imag for HFSW radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 21(3): 391-396.

CHEN X L, GUAN J, BAO Z H, et al, 2014. Detection and extraction of target with micromotion in spiky sea clutter via short-time fractional Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(2): 1002-1018.

HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al, 1998. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear

and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 454(1971): 903-995.

JAN O H, MARTIN H, UDO Z, et al, 2012. Presegmentation-based adaptive CFAR detection for HFSWR[C]//Proceedings of IEEE National Radar Conference. Atlanta, GA, USA.

WANG X Y, LI Y, ZHANG N, et al, 2021. CFAR detection based on the nonlocal low-rank and sparsity-driven laplacian regularization for HFSWR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 57(6): 4472-4484.

YAO G W, XIE J H, JI Z Y, et al, 2017. The first-order ocean surface cross section for shipborne HFSWR with rotation motion[C]//IEEE Radar Conference. Seattle, WA, USA, 447-450.

ZHAO J R, TIAN Y W, WEN B Y, et al, 2021. Coherent DOA estimation in sea surface observation with direction-finding HF radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 59(8): 6651-6661.

Ship Target Detection Method of Shipborne Surface Wave Radar Based on Spectrum Refinement and Second-Order Synchrosqueezing Transform

LIU Yachun[1,2], WANG Yiming[2], YANG Jungang[2]

（1. *College of Geodesy and Geomatics*, *Shandong University of Science and Technology*, Qingdao 266590, China；
2. *First Institute of Oceanography*, *MNR*, Qingdao 266061, China）

Abstract: Due to the influence of the movement of shipborne platform, sea clutter, multi-target aggregation and environmental interference, the radar echo of ship targets on the sea surface are easily obscured and submerged, which results in the greatly weakened target monitoring capability of shipborne surface wave radar. In order to improve the detection and discovery performance of shipborne surface wave radar, a target detection method based on spectrum refinement and second order synchrosqueezing transform is proposed. Firstly, the frequency refinement of shipborne surface wave radar echo signal is carried out to improve the frequency resolution. Then, the time-frequency distribution characteristics of the target are extracted by the time-frequency analysis method of second-order synchrosqueezing transform. Finally, target detection is realized according to the time-frequency distribution characteristics obtained. The experimental results show that compared with the traditional time-frequency analysis methods such as short-time Fourier transform and wavelet transform, the proposed method not only has better time-frequency aggregation, but also can effectively detect moving targets near sea clutter and multi-ship aggregation targets with small echo Doppler frequency difference.

Keywords: High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR)；target detection；time frequency analysis；spectrum refinement；synchrosqueezing transform

Received: November 30, 2022