

# 基于海杂波稀疏性与非均匀度的样本挑选方法

韩超垒<sup>1</sup>, 杨志伟<sup>1</sup>, 田 敏<sup>1</sup>, 孙永岩<sup>2</sup>, 曾 操<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071; 2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

**摘要:**针对预警雷达对海监视面临海杂波分布非均匀与杂波样本受目标污染, 导致自适应杂波抑制性能恶化和目标能量损失的问题, 提出了一种基于海杂波稀疏性与非均匀度的样本挑选方法。该方法将目标的导向约束与广义内积样本挑选方法结合, 先利用海杂波在空时二维平面上的稀疏分布特性, 根据海杂波与目标空时二维分布差异剔除被目标污染的样本, 再利用广义内积准则衡量海杂波分布的非均匀程度, 并获取均匀样本, 以提高杂波协方差矩阵的估计精度。仿真结果表明: 所提方法能在提高杂波抑制性能的同时, 减小目标信号能量损失。该方法可广泛应用于海面预警监视雷达系统。

**关键词:**空时自适应处理; 样本挑选; 非均匀杂波; 样本污染; 稀疏性

中图分类号: TN959.73 文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.05.004

## Sample Selection Method Based on Sparse Characteristic and Heterogeneous Degree of Sea Clutter

HAN Chaolei<sup>1</sup>, YANG Zhiwei<sup>1</sup>, TIAN Min<sup>1</sup>, SUN Yongyan<sup>2</sup>, ZENG Cao<sup>1</sup>

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China;  
2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** As for the early-warning radars in sea surveillance, the heterogeneous and target-contaminated clutter samples may lead to a poor performance of adaptive clutter suppression processing and target energy loss. To address this problem, a sample selection method is proposed based on the sparse characteristic and heterogeneous degree of sea clutter in this paper, which creatively combines the constraint of the target vector with the generalized inner product (GIP) criterion. Firstly, based on the sparse distribution of sea clutter on two-dimensional space-time plane, the samples contaminated by moving targets are eliminated according to the diversity of space-time distribution between sea clutter and moving targets. Subsequently, the heterogeneous degrees of remaining samples are measured by GIP criterion, and on this basis, the estimation accuracy can be improved on clutter covariance matrix constructed by the obtained homogeneous samples. Finally, the simulation results show that the proposed method can improve the clutter suppression performance as well as reduce the energy loss of the target. The method can be widely applied to the early-warning radars in sea surveillance.

**Keywords:** space-time adaptive processing; sample selection; non-uniform clutter; sample contamination; sparse characteristic

## 0 引言

运动平台雷达对海探测在战态感知、预警监视、渔业管理、海面救援等方面具有重要地位。不同于

地面, 海面会随时间波动起伏, 海杂波同时面临空间和时间去相关问题。另外, 平台运动将导致海杂波多普勒谱展宽, 此时慢速运动目标不可避免地会被

收稿日期: 2018-06-04; 修回日期: 2018-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(61671352); 国家自然科学基金青年科学基金(61501471); 教育部重点实验室基金(CRKL160206); 上海航天科技创新基金(SAST2016027, SAST2016033)

作者简介: 韩超垒(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理和地面动目标检测。

杂波淹没,因此,海杂波抑制成为提升慢速运动目标检测性能的有效手段。

BRENNAN 等<sup>[1]</sup>首次提出了空时自适应处理技术,该技术能大幅提升运动平台雷达的海杂波抑制性能。但是,全维空时自适应处理系统自由度大,计算复杂度高。另外,实际场景中杂波呈非均匀非平稳分布,训练样本不满足独立同分布(IID)的条件,这会造成对杂波协方差矩阵估计不准确,进而导致空时自适应处理系统的杂波抑制性能严重下降。针对上述问题,国内外学者通过降维空时自适应处理减少处理维数,在降低计算复杂度的同时减少了对独立同分布训练样本的需求<sup>[1-5]</sup>。

在实际应用中,保证自适应处理性能的关键在于较准确地估计杂波协方差矩阵,这是因为杂波协方差矩阵直接决定了自适应处理滤波器的凹口宽度与深度。

在均匀高斯背景下,杂波协方差矩阵的最大似然(ML)估计是背景的样本协方差矩阵<sup>[6]</sup>,但这种估计方法仅适用于高斯杂波背景,而在非高斯杂波背景下,杂波协方差矩阵的 ML 估计不存在闭合形式。文献[7-8]提出杂波协方差矩阵的渐进最大似然估计法,以归一化采样协方差矩阵作为初始化矩阵进行迭代估计,但该方法收敛速度慢,实时处理应用受限。文献[9-10]提出基于先验知识的杂波协方差矩阵估计方法,利用雷达工作参数、待检测区域的地形、气象状况等信息构造杂波协方差矩阵,然后用接收的数据协方差矩阵进一步修正构造的杂波协方差矩阵,得到最终的估计结果。该方法虽能提高杂波协方差矩阵的估计精度,但需准确知道实际环境的先验知识。文献[11-14]基于广义内积(GIP)准则,将训练样本中的非均匀样本检测出来并剔除,用剩余样本估计杂波协方差矩阵。基于 GIP 准则的样本挑选方法虽能在非均匀杂波背景下获取均匀样本,但当杂波背景中存在目标污染时,由于缺乏对杂波样本的直接约束,因而不能有效剔除被目标污染的样本,这导致自适应处理后,目标信号能量损失严重。

为解决上述问题,本文提出了一种基于海杂波稀疏性与非均匀度的样本挑选方法。该方法首先利用海杂波在空时二维平面上的稀疏分布特性,对目标进行有效的导向约束,剔除被目标污染的样本;然后基于 GIP 准则衡量海杂波的非均匀度并剔除非均匀样本,得到估计杂波协方差矩阵所需的均匀样

本。针对典型海况的仿真结果表明:本文所提方法不仅能有效抑制海杂波,还能减小目标信号的能量损失。

## 1 多通道空时回波信号模型

海杂波由于时变性,存在时间去相关和空间去相关特性。其时间去相关性使海杂波的空时谱展宽,空间去相关性使训练样本呈非均匀分布,这造成杂波协方差矩阵难以准确估计,最终导致杂波抑制性能下降。因此,在建立海杂波信号模型时,要考虑时间去相关和空间去相关的影响。

以预警雷达正侧视均匀阵列为例,观测几何构型如图 1 所示。设平台以速度  $v_p$  沿  $x$  轴航行,空域通道数为  $N$ ,通道间距为  $d$ ,海面上任意一个散射点  $P$  相对于雷达平台的方位角与俯仰角分别为  $\alpha$  和  $\varphi$ ,径向速度为  $v_r$ ,观测时间内积累脉冲数为  $K$ 。

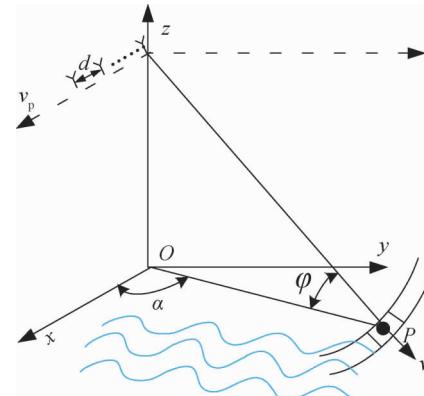


图 1 侧视阵列观测几何示意

Fig. 1 Side-view antenna geometry

在无模糊距离范围内,任意一个距离单元的回波数据由同距离环的不同杂波块叠加得到。对于一个距离环,将  $N$  个通道  $K$  个脉冲的接收数据排成列矢量,记作  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{KN \times 1}$ 。海杂波的相关矩阵可表示为

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\} = \mathbf{A} \odot (\mathbf{S}\mathbf{S}^H) \odot (\mathbf{g}_s \otimes \mathbf{g}_t) + \sigma_n \mathbf{I} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为海杂波的复散射系数矩阵;  $\mathbf{S}$  为空时导向矢量,  $\mathbf{S} = \mathbf{s}_s \otimes \mathbf{s}_t$ ;  $\mathbf{g}_s$  和  $\mathbf{g}_t$  分别为海杂波空间去相关因子和时间去相关因子;  $\sigma_n$  为噪声能量;  $\mathbf{I}$  为单位对角矩阵; “ $E$ ”表示取均值; 上标“ $H$ ”表示矩阵或向量的共轭转置; “ $\odot$ ”表示矩阵点乘; “ $\otimes$ ”表示 Kronecker 积。

海杂波的时域导向矢量与空域导向矢量分别表示为

$$\mathbf{s}_t = [1 \quad e^{j2\pi f_d(2) \cdot T_r} \quad \dots \quad e^{j2\pi f_d(k) \cdot (k-1) \cdot T_r}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{s}_s = [1 \quad e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos \theta \cos \varphi} \quad \dots \quad e^{j2\pi \frac{(N-1)d}{\lambda} \cos \theta \cos \varphi}]^T \quad (3)$$

式中:  $T_r$  为脉冲重复间隔;  $\lambda$  为工作波长; 上标“T”表示矩阵或向量的转置;  $f_d(k)$  为第  $k$  个脉冲的归一化多普勒频率, 表示为

$$f_d(k) = \frac{2v_p}{\lambda} \cos \theta \cos \varphi + \frac{2\bar{v}_r}{\lambda} + \frac{2(\sum_{i=1}^k v_r(i) - k\bar{v}_r)}{\lambda(k-1)} \quad (4)$$

式中: 第一项表示平台运动带来的多普勒频率; 第二项表示由海杂波平均速度  $\bar{v}_r$  引起的多普勒频率; 第三项表示由海杂波瞬时速度  $v_r$  引起的时变等效多普勒频率<sup>[15]</sup>。

## 2 mDT 算法

全维空时自适应计算复杂度大, 需要大量的均匀样本。为减少对均匀样本的需求和减轻计算量, 需要对回波数据进行降维处理。*mDT-SAP* 算法是一种被广泛使用的方法。*mDT-SAP* 算法是将等效阵元接收的数据进行多普勒滤波后集中在几个多普勒通道内, 然后对其中若干个通道进行自适应处理, 如果仅取目标所在通道, 则称为 1DT, 如果取目标所在通道及其左右相邻的  $m-1$  个通道, 则称为 *mDT*。以 3DT 法为例, 原理如下。

假设有  $N$  个通道,  $K$  个脉冲, 3DT 法的降维变换矩阵表示为

$$\mathbf{T}_{3dt} = [\mathbf{g}(k-1), \mathbf{g}(k), \mathbf{g}(k+1)] \otimes \mathbf{I}_N \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{g}(k-1)$ 、 $\mathbf{g}(k)$ 、 $\mathbf{g}(k+1)$  分别为对应多普勒通道的加权系数向量;  $\mathbf{I}_N$  为  $N$  阶单位阵。经 3DT 算法降维后的数据协方差矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_{3dt} = \mathbf{T}_{3dt}^H \mathbf{R} \mathbf{T}_{3dt} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{R}$  为降维前的样本协方差矩阵。空时导向矢量为

$$\mathbf{S}_{3dt} = \mathbf{T}_{3dt}^H \mathbf{S} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{S}$  为降维前的空时导向矢量。

## 3 算法处理流程

海杂波分布情况如图 2 所示。杂波散射体空间频率和多普勒频率的耦合关系使得杂波分布在杂波脊附近。相比于整个空时二维平面, 海杂波呈稀疏分布<sup>[16]</sup>, 为利用目标导向约束的污染目标剔除方法

提供了理论依据。运动目标的多普勒偏移使得目标在空时二维平面上的分布与海杂波不同, 杂波样本与目标导向矢量的夹角较大, 污染目标与目标导向矢量的夹角较小。基于此, 设置夹角门限, 可挑选并剔除污染目标, 提高杂波协方差矩阵估计精度。

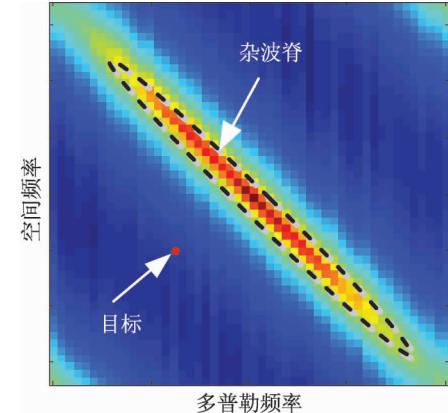


图 2 海杂波稀疏分布示意

Fig. 2 Sparse distribution of sea clutter

基于上述分析, 本文提出一种基于海杂波稀疏性与非均匀度的样本挑选方法。首先利用海杂波在空时二维平面上的稀疏分布特性, 根据海杂波与目标空时二维分布差异快速、准确地挑选并剔除被目标污染的样本; 然后利用 GIP 准则衡量海杂波分布的非均匀程度并进行 GIP 样本挑选, 剔除非均匀样本; 最后用剩余样本精确估计杂波协方差矩阵, 进一步提高海杂波抑制性能。该方法的具体实施方式如图 3 所示。

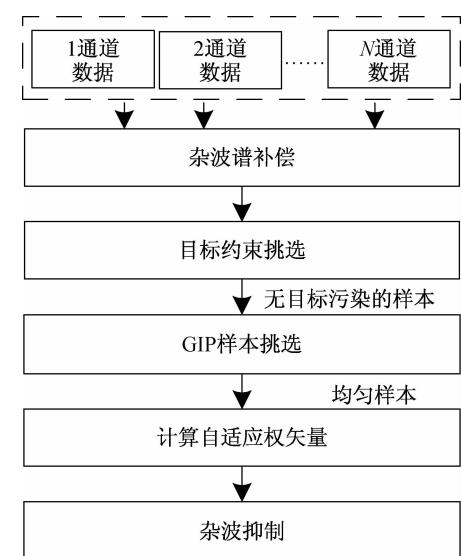


图 3 算法流程框图

Fig. 3 Block diagram of proposed algorithm

结合流程框图,以后多普勒处理方法 3DT-SAP 为例,设一个 CPI 内的脉冲个数为  $K$ ,回波数据作  $K$  点离散傅里叶变换,当取一个多普勒通道作为检测通道时,还需取其左右 2 个通道作为辅助通道,进行空时自适应处理。为得到高精度的估计杂波协方差矩阵,需对检测通道及辅助通道的训练样本进行挑选,具体步骤如下。

1) 对接收数据进行杂波谱补偿<sup>[17]</sup>。在平台运动过程中,由于受外界条件(气流、地球自转等)的影响,运动平台的姿态是变化的。此时,天线的布局方向和平台运动方向的不同会导致杂波多普勒频率随距离发生变化,杂波谱在距离上呈现严重的非平稳性,得到的杂波协方差矩阵误差较大。因此,需对接收数据进行杂波谱补偿并将其变换到多普勒域。

2) 根据海杂波与目标空时二维分布差异特性,应用目标导向约束进行样本挑选,将与目标导向相近的污染样本剔除。为快速、高效地进行样本挑选,取检测通道及辅助通道的任意一个训练样本,排成  $3N \times 1$  维列矢量  $\mathbf{x}$ ,第  $i$  个空域通道数据与参考通道(第一通道)的干涉相位为

$$\theta_i = \text{angle}(x_i x_1^*) \quad (8)$$

式中:“angle”表示取相位。样本  $\mathbf{x}$  的空域导向估计为

$$\mathbf{C} = e^{j\theta} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{\theta}$  为样本  $\mathbf{x}$  与参考通道数据的干涉相位矢量, $\mathbf{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_{3N}]^T$ 。

3) 采用 3DT 法进行降维处理。由式(7)、(9)计算训练样本与目标导向矢量的夹角  $\gamma$ ,即

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\mathbf{C}^H \mathbf{S}_{3dt}}{|\mathbf{C}| \cdot |\mathbf{S}_{3dt}|}\right) \quad (10)$$

式中:“||”表示向量取模。给定夹角门限,一般取  $0.25\pi \sim 0.35\pi$ ,剔除小于该门限的样本(注意:对于零多普勒及靠近零多普勒通道的训练样本,认为其是杂波,无需对其进行目标导向约束挑选,例如,无需对径向速度小于  $\pm 3 \text{ m/s}$  所对应的多普勒通道进行步骤 2 的挑选)。剔除与目标导向约束近似的样本后进行步骤 4,剔除非均匀样本。

4) 按照 GIP 样本挑选公式,剔除大于门限的奇异样本,即

$$\mathbf{x}^H \mathbf{R}_{cn}^{-1} \mathbf{x} \geq \eta_1 \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{R}_{cn}$  为采样样本经步骤 3 挑选后估计的杂波加噪声协方差矩阵;  $\eta_1$  为判定门限, 取为  $\alpha L_m N$ , 其中,  $\alpha$  为大于 1 的系数,  $N$  为空域通道数,  $L_m$  为联合

处理的多普勒通道数,在试验中取 3。

5) 根据剩余的训练样本精确估计杂波加噪声协方差矩阵,即

$$\tilde{\mathbf{R}}_{cn} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^H \quad (12)$$

式中:  $L$  为剩余训练样本个数。

6) 根据线性约束最小均方误差(LCMV)准则,得到自适应权,即

$$\mathbf{W}_{3dt} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}_{cn}^{-1} \mathbf{S}_{3dt}}{\mathbf{S}_{3dt}^H \tilde{\mathbf{R}}_{cn}^{-1} \mathbf{S}_{3dt}} \quad (13)$$

为评估本文所提方法的杂波抑制性能,定义输出信噪比(SCNR)损失为经过杂波抑制后的输出 SCNR 与最优情况下将杂波抑制到噪声水平时的信噪比之间的比值。将上文求得的自适应权带入,可得输出 SCNR 损失的计算式为<sup>[18]</sup>

$$\begin{aligned} R_{SCN-loss} &= \frac{R_{SCN-out}}{R_{SN-opt}} \\ &= \frac{|\mathbf{W}_{3dt}^H \mathbf{S}_{3dt}|^2}{|\mathbf{W}_{3dt}^H \mathbf{R} \mathbf{W}_{3dt}|} \frac{\sigma_n^2}{(\mathbf{S}_{3dt}^H \mathbf{S}_{3dt})} \\ &= \frac{\sigma_n^2 |\mathbf{S}_{3dt}^H \tilde{\mathbf{R}}_{cn}^{-1} \mathbf{S}_{3dt}|^2}{\mathbf{S}_{3dt}^H \tilde{\mathbf{R}}_{cn}^{-1} \tilde{\mathbf{R}}_{cn}^{-1} \mathbf{S}_{3dt} (\mathbf{S}_{3dt}^H \mathbf{S}_{3dt})} \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $R_{SCN-out}$  为杂波抑制后的输出 SCNR;  $R_{SN-opt}$  为高斯白噪声背景下杂波抑制后的输出信噪比;  $\sigma_n^2$  为噪声能量;  $\mathbf{R}$  为样本协方差矩阵;  $\tilde{\mathbf{R}}_{cn}$  为估计的杂波加噪声协方差矩阵。

## 4 仿真实验及结果分析

仿真实验采用文献[18]提出的基于物理海平面模型的空时海杂波模型。该模型以多个谐波对海浪进行建模,谐波幅度可由与海况相关的海浪谱求得。该文献提出,在中等入射角下,海面微波后向散射主要为 Bragg 散射,海面的速度除包含海表面流场速度分量外,还包含 Bragg 相速度和大尺度波轨道速度。海杂波分布与海况有关,海况级别越高,杂波的非均匀分布越明显。另外,在不同海况下,海杂波在二维平面上的功率谱展宽不同,但相比于整个空时二维平面,功率谱展宽很小,海杂波分布仍具稀疏性。

假设天基脉冲式多通道雷达共有 12 个通道,通道之间无误差且沿航迹等间距排布,采用一发多收模式,位于中心位置的一个通道发射雷达信号,所有通道接收信号。在探测区域内设置多个速度不同的

点目标及污染点目标。雷达采样样本足够多,系统噪声为白噪声。仿真参数见表1。

基于以上参数,对雷达接收回波数据进行仿真,仿真结果如图4所示。

图4为2级海况下,有点目标污染的距离-多普勒图。图4(a)、(b)、(c)、(d)分别为杂波抑制前的结果、不进行样本挑选的杂波抑制结果、仅利用GIP样本挑选的杂波抑制结果及采用本文方法的杂波抑制结果。

图4(a)表明:杂波抑制前,运动目标被淹没在海杂波中,目标位置无法辨别。图4(b)表明:如果

不对数据进行样本挑选,则海杂波的非均匀性会影响背景协方差的估计,杂波抑制性能并不理想。图4(c)表明:在有目标污染的情况下,GIP样本挑选方法虽提高了杂波抑制性能,但目标信号能量被削弱。图4(d)表明:本文方法既具有良好的杂波抑制能力,还能减小信号能量损失。

为直观地比较不同方法对海杂波的抑制能力,本文给出了在不同海况下,采用不同杂波抑制方法后,目标所在距离单元的信号能量输出,如图5、6所示。

由图可知,在同一距离单元,本文方法明显比不进行样本挑选及GIP样本挑选方法的海杂波抑制

表1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

工作波长/m	脉冲重复频率/Hz	脉冲个数	通道数
0.23	4 000	120	12
通道间距/m	波束中心方位角/(°)	波束中心俯仰角/(°)	单通道信噪比/dB
3.3	90	45	30
单通道杂噪比(2级)/dB	单通道杂噪比(4级)/dB	目标1速度/(m·s <sup>-1</sup> )	目标2速度/(m·s <sup>-1</sup> )
30	38	15	80

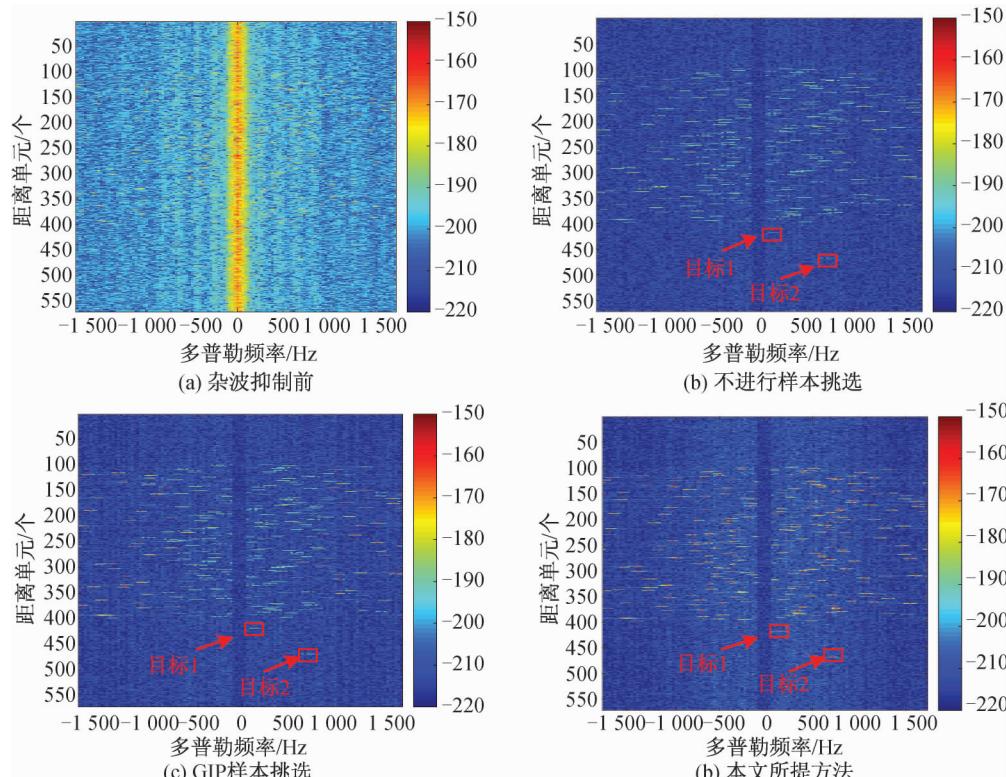


图4 2级海况下存在400个点目标污染的距离-多普勒图

Fig. 4 Range-Doppler images contaminated by 400 point targets in level-2 sea state

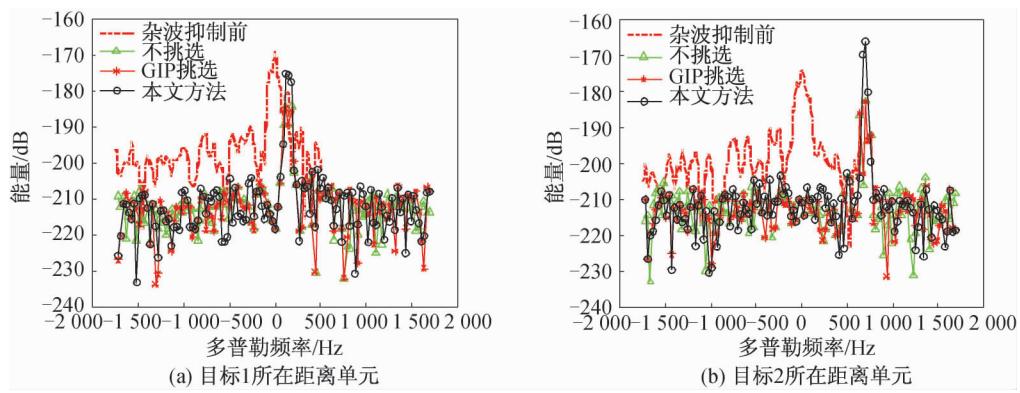


图 5 2 级海况下杂波抑制结果

Fig. 5 Results of clutter suppression in level-2 sea state

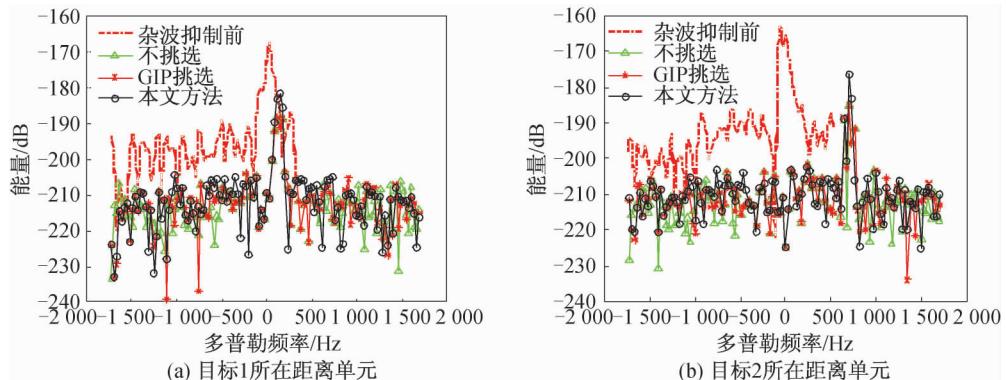


图 6 4 级海况下杂波抑制结果

Fig. 6 Results of clutter suppression in level-4 sea state

性能更加优越。本文方法使得杂波抑制剩余更小，目标信号能量输出更大，解决了在有目标污染的情况下传统 GIP 样本挑选方法导致目标信号能量损失的问题。同时可以看出，在不同距离单元和不同海况下，本文方法都具有很好的稳健性。

为进一步比较不同方法的杂波抑制性能，本文

仿真了在不同海况下，采用不同样本挑选方法处理后的输出 SCNR 损失。仿真结果如图 7 所示。

由图可知，在不同海况下，在输出 SCNR 方面，与不进行样本挑选和 GIP 样本挑选方法相比，本文方法更加稳健。同时，在多普勒旁瓣区域能改善约 5~10 dB 的输出 SCNR 损失。

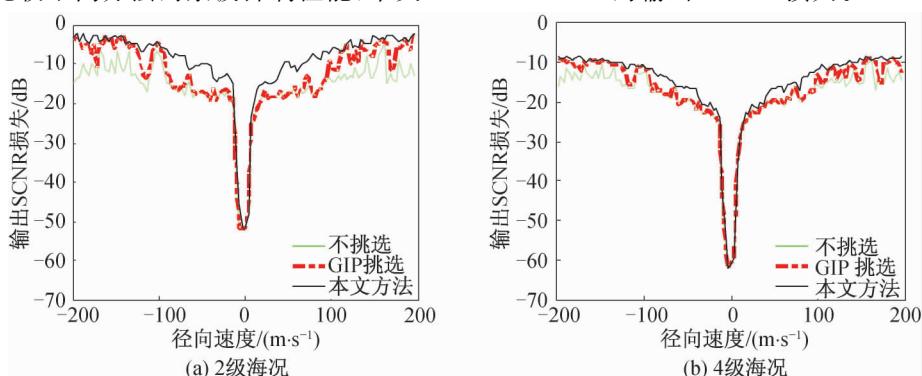


图 7 不同挑选方法输出 SCNR 损失

Fig. 7 Output SCNR loss with different selection methods

## 5 结束语

本文在多通道信号模型的基础上提出了一种基于海杂波稀疏性与非均匀度的样本挑选方法。仿真结果表明:在海杂波相关特性不同及采样样本受目标污染的情况下,传统GIP挑选方法虽能提高杂波抑制性能,但对一些多普勒频率单元的输出SCNR损失的改善并不明显。对比传统样本挑选方法,本文方法能快速高效地挑选出有效样本,在提高杂波抑制性能的同时保证目标信号能量尽可能大地输出,输出SCNR损失改善约为5~10 dB。同时,在不同距离单元和不同海况下,本文方法都具有稳健性。本文方法解决了海杂波分布不均匀与杂波样本受海面目标污染造成的杂波协方差矩阵估计不准,导致杂波抑制性能下降和目标信号能量损失的问题,可广泛应用于海面监视雷达系统。本文将污染样本和非均匀样本剔除,造成有效样本数减少。因此,在小样本数据情况下,如何有效利用挑选出的样本进行杂波抑制和目标检测,需要进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] BRENNAN L E, PIWINSKI D J, STAUDAHER F M. Comparison of space-time processing approaches using experimental airborne radar data [C]//IEEE National Radar Conference. Lynnfield: IEEE, 1993: 176-181.
- [2] 保铮,张玉洪,廖桂生,等.机载雷达空时二维信号处理[J].现代雷达,1994,16(1): 38-48.
- [3] DIPIETRO R C. Extended factored space-time processing for airborne radar systems [C]//26th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1992: 425-430.
- [4] WANG H, CAI L. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1994, 30(3): 660-670.
- [5] 张良,保铮,廖桂生.降维空时自适应处理研究[J].电子与信息学报,2001,23(3): 261-267.
- [6] KELLY E J. An adaptive detection algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 22(2): 115-127.
- [7] PASCAL F, CHITOUR Y, OVARLEZ J P, et al. Covariance structure maximum-likelihood estimates in compound Gaussian noise: existence and algorithm analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(1): 34-48.
- [8] CHITOUR Y, PASCAL F. Exact maximum likelihood estimates for SIRV covariance matrix: existence and algorithm analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(10): 4563-4573.
- [9] SANCHEZ-FERNANDEZ M, AGUILERA-FOREIRO M, GARCIA-ARMADA A. Performance analysis and parameter optimization of DLL and MEDLL in fading multipath environments for next generation navigation receivers [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1302-1308.
- [10] FENTON P C, JONES J. The theory and performance of NovAtel Inc.'s vision correlator [C]//19th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. [S. l.]: ION GNSS, 2005: 1-9.
- [11] WU Y, WANG T, WU J, et al. Training sample selection for space-time adaptive processing in heterogeneous environments [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 12(4): 691-695.
- [12] YANG X, LIU Y, HU X, et al. Robust generalized inner products algorithm using prolate spheroidal wave functions [C]//IEEE Radar Conference. [S. l.]: IEEE, 2012: 581-584.
- [13] MELVIN W L, WICKS M C. Improving practical space-time adaptive radar [C]//IEEE National Radar Conference. New York: IEEE, 1997: 48-53.
- [14] WICKS M C, MELVIN W L, CHEN P. An efficient architecture for nonhomogeneity detection in space-time adaptive processing airborne early warning radar [C]//RADAR. Edinburgh: The Institution of Electrical Engineers, 1997: 295-299.
- [15] MONTUORI A, NUNZIATA F, MIGLIACCIO M, et al. X-band two-scale sea surface scattering model to predict the contrast due to an oil slick [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(11): 4970-4978.
- [16] 阳召成.基于稀疏性的空时自适应处理理论和方法 [D].长沙:国防科学技术大学,2013.
- [17] JIANG H, LIAO G, QU Y. Compensation of clutter spectrum for airborne forward-looking radar based on the clutter subspace transformation [C]//International Radar Conference. Bordeaux: IEEE, 2010: 1-4.
- [18] XIN Z, LIAO G, YANG Z, et al. A deterministic sea-clutter space-time model based on physical sea surface [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(11): 6659-6673.