

稳健的机载预警雷达多通道海杂波抑制方法研究

黄鹏辉^① 邹子豪^{*①} 刘兴钊^① 廖桂生^② 王志城^③ 陈药力^④ 刘艳阳^④

^①(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

^②(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^③(上海无线电设备研究所 上海 200090)

^④(上海航天技术研究院 上海 201109)

摘要: 在机载预警雷达对海洋背景运动目标的探测过程中, 雷达平台的高速运动状态使得海杂波多普勒谱发生严重展宽现象, 影响目标的检测性能。针对此问题, 空-时自适应处理是一种有效的杂波抑制技术, 该技术利用杂波的空-时2维耦合特性进行杂波抑制。但相对于陆地杂波而言, 海杂波的内部复杂运动特性使得杂波空-时谱发生展宽现象, 导致杂波多普勒频率与空间锥角不再保持一一对应关系, 从而影响杂波抑制效果。针对海杂波的运动特性, 该文提出一种稳健的基于子空间投影的杂波抑制处理算法, 所提算法通过滤波凹口自适应展宽技术和先滑窗滤波后自适应处理技术来提高杂波抑制的稳健性。最后通过仿真的海杂波数据和实测海杂波数据验证了所提算法的有效性。

关键词: 机载预警雷达; 杂波抑制; 空-时自适应处理; 子空间投影法; 海杂波

中图分类号: TN957.51; TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)09-2680-08

DOI: 10.11999/JEIT200411

Robust Sea Clutter Suppression Method for Multichannel Airborne Radar

HUANG Penghui^① ZOU Zihao^① LIU Xingzhao^① LIAO Guisheng^②
WANG Zhicheng^③ CHEN Junli^④ LIU Yanyang^④

^①(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

^②(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^③(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

^④(Shanghai Academy of Space Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: During the marine moving target detection for airborne early warning radar, the high-speed movement of the radar platform causes the serious broadening of the sea clutter Doppler spectrum, which affects the target detection performance. To solve this problem, a clutter suppression method called Space-Time Adaptive Processing (STAP) is effective, which exploits the space-time coupling characteristics of clutter. However, compared with the land clutter, the motion characteristics of sea clutter lead to the broadening of the clutter space-time spectrum, resulting in the clutter Doppler frequency and the spatial cone angle no longer maintaining a one-to-one correspondence; thus the clutter suppression performance significantly degrades. According to the motion characteristics of sea clutter, a robust subspace projection method is proposed in this paper. This method improves the robustness of clutter suppression by using the adaptive notch broadening technique and the filter then adapt technique. Finally, the effectiveness of this method is verified through the simulation results and the real-measured sea clutter data.

Key words: Airborne early warning radar; Clutter suppression; Space-Time Adaptive Processing (STAP); Subspace projection method; Sea clutter

收稿日期: 2020-05-26; 改回日期: 2020-12-10; 网络出版: 2021-01-05

*通信作者: 邹子豪 zouzihao@sjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发项目基金(2017YFB0502700), 国家自然科学基金青年基金(61801289), 上海航天科技创新基金(SAST2019-071)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2017YFB0502700), The National Natural Science Youth Foundation of China (61801289), The Shanghai Space Science and Technology Innovation Fund (SAST2019-071)

1 引言

机载预警雷达基于其平台高度优势，可大范围地探测目标，具备早期军事预警侦察能力，具有重要的研究价值^[1]。由于机载预警雷达工作于下视模式，接收到的目标回波往往淹没在强烈的杂波当中，因此稳健的杂波抑制方法是机载预警雷达目标检测中的一个关键问题。机载预警雷达平台的高速运动状态使得杂波多普勒谱发生严重展宽现象，传统的脉冲相消技术难以对消展宽的杂波^[2]。空-时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)则利用杂波空-时2维耦合特性进行杂波抑制^[3]，通过杂波协方差矩阵得到自适应杂波抑制权，在保留目标的同时有效滤除杂波分量。常见的STAP方法包括多通道联合自适应处理法^[4]、先滑窗滤波后空时自适应处理法^[5]、局域联合处理法^[6]、和差通道空时自适应处理法^[7]、空时相邻多波束法^[8]、互谱尺度法^[9]、直接数据域法^[10]、知识辅助空时自适应处理法^[11]、子空间投影法^[12,13]等。其中，子空间投影法通过计算杂波子空间正交补上的投影矩阵，得到杂波抑制权。这一方法具有较低的运算复杂度，适用于机载雷达动目标检测的实时处理，且无需训练样本的挑选，处理非均匀杂波时具有一定优势。

相对于陆地杂波而言，海杂波的运动特性使得杂波空-时谱发生展宽现象，杂波多普勒频率不再与空间锥角一一对应，这将影响到多通道杂波的抑制效果。Gracheva等人^[14-16]通过仿真和机载实测数据研究了不同海况下的海杂波和陆地杂波之间的空-时谱、特征值谱、通道间相关性以及杂波抑制效果的差异。Xin等人^[17]根据海杂波运动模型研究了海杂波建模方法并对仿真结果进行了分析。针对海杂波运动特性造成的海杂波非均匀的情况，文献^[18]提出基于广义内积的训练样本挑选法，来剔

除非均匀样本。文献^[19]提出相位和功率选择训练法，根据功率和相位分布挑选训练样本。这些方法对于海杂波运动造成的非均匀情况有所改善，但均存在运算复杂度较高的情况。

基于前人的工作，本文在机载多通道预警雷达的背景下，提出一种稳健的子空间投影杂波抑制方法，通过滤波凹口自适应展宽技术和先滑窗滤波后自适应处理技术来提高杂波抑制的稳健性。与传统STAP方法相比，该算法具有较低的运算复杂度，且无需挑选训练样本；与传统的子空间投影法相比，该算法在抑制具有复杂运动特性的海杂波时更加稳健。本文将通过仿真数据和实测海杂波数据来检验所提算法的有效性。

本文第2节建立机载多通道杂波信号模型，第3节提出一种稳健的子空间投影杂波抑制方法，第4节通过仿真数据和实测数据验证所提算法的有效性，并与传统的子空间投影法进行对比分析，第5节将给出结论。

2 信号模型

机载多通道预警雷达平台与海面运动散射点的3维空间关系如图1所示。图中， $O-xyz$ 为左手笛卡儿直角坐标系， x 轴与平台运动方向重合， z 轴方向垂直于地面向上。 H 为平台高度， v_p 为平台运动速度， d_T 为发射通道与第1个方位接收通道间的距离， $d_n = (n-1)d$, $n = 1, 2, \dots, N$ 为第 n 个方位接收通道与第1个方位接收通道间的距离， d 为相邻方位接收通道间的距离， N 为雷达方位接收通道数， $v_{cx,i,k}$ 、 $v_{cy,i,k}$ 和 $v_{cz,i,k}$ 分别为第 k 时刻海面散射点 P_i^{sea} 在 x 、 y 、 z 3轴上的速度， φ_i 和 θ_i 分别为海面散射点 P_i^{sea} 相对于雷达阵列的下视角和方位角。

通过泰勒展开，在 t_m 时刻，海面运动散射点 P_i^{sea} 与发射通道和第 n 个方位接收通道的发射-接收双程瞬时斜距为

$$\begin{aligned}
 R_{n,i}(t_m) \approx & R_0 - \sin \varphi_i \cos \theta_i v_p t_m + \sin \varphi_i \cos \theta_i \sum_{k=1}^m v_{cx,i,k} \cdot \text{PRT} + \sin \varphi_i \sin \theta_i \sum_{k=1}^m v_{cy,i,k} \cdot \text{PRT} \\
 & - \cos \varphi_i \sum_{k=1}^m v_{cz,i,k} \cdot \text{PRT} - \frac{\sum_{k=1}^m v_{cx,i,k} \cdot \text{PRT}}{R_0} \left(v_p t_m + \frac{d_T + d_n}{2} \right) \\
 & + \frac{\left(\sum_{k=1}^m v_{cx,i,k} \cdot \text{PRT} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^m v_{cy,i,k} \cdot \text{PRT} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^m v_{cz,i,k} \cdot \text{PRT} \right)^2}{2R_0} \\
 & - \frac{\sin \varphi_i \cos \theta_i (d_T + d_n)}{2} + \frac{(v_p t_m + d_T)^2}{4R_0} + \frac{(v_p t_m + d_n)^2}{4R_0}
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $R_0 = H/\cos \varphi_i$ 为初始时刻的斜距历程，PRT为脉冲重复时间。令式(1)中与海面散射点随机运动速度相关的项之和为 $R_{\text{random},i}^{\text{sea}}(t_m)$ ，即

$$\sin \varphi_i \cos \theta_i = \frac{\lambda f_a + 2v_{c,i}}{2v_p} \quad (7)$$

从式(7)可见, 由于不同海面散射点的随机运动速度 $v_{c,i}$ 各不相同, 使得杂波多普勒频率与空间锥角无法一一对应, 杂波抑制效果将受到影响。

距离为 r 的距离环处多普勒频率为 f_a 的杂波矢量为

其中, \mathbf{T} 表示转置操作, $\mathbf{s}_s(r, f_a) = \left[1, \exp\left(\frac{j2\pi d \sin \varphi_i \cos \theta_i}{\lambda}\right), \dots, \exp\left(\frac{j2\pi(N-1)d \sin \varphi_i \cos \theta_i}{\lambda}\right) \right]^T$ 。由式(7)可知, $\mathbf{s}_s(r, f_a)$ 受到海杂波随机运动速度的影响。杂波协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_c(r, f_a) = \mathbf{X}(r, f_a) \mathbf{X}^H(r, f_a) = |\mathbf{S}_1(r, f_a)|^2 \mathbf{s}_s(r, f_a) \mathbf{s}_s^H(r, f_a) \quad (9)$$

其中, \mathbf{H} 表示共轭转置操作。

3 稳健的子空间投影法

3.1 传统STAP算法

STAP算法利用杂波空-时2维耦合特性进行杂波抑制, 在保留目标的同时有效滤除杂波分量。可将其描述为

$$\begin{cases} \min \mathbf{w}^H \mathbf{R}_c \mathbf{w} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}^H \mathbf{s}_{\text{target}} = 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中, \mathbf{w} 为杂波抑制权矢量, $\mathbf{s}_{\text{target}}$ 为目标导向矢量。根据式(10), 基于线性约束最小方差准则, 杂波抑制权矢量可表示为

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{s}_{\text{target}}}{\mathbf{s}_{\text{target}}^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{s}_{\text{target}}} \quad (11)$$

由于杂波协方差矩阵 \mathbf{R}_c 是未知的, 传统STAP方法通常将样本挑选后得到的样本协方差矩阵作为杂波协方差矩阵的估计值^[20], 即

$$\mathbf{R}_c = \frac{1}{N_X} \sum_{i=1}^{N_X} \mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H \quad (12)$$

其中, \mathbf{X}_i 为第 i 个训练样本, N_X 为挑选得到的训练样本数。然而, 在处理非均匀杂波时, 非均匀杂波样本的干扰导致样本协方差矩阵与待检测距离单元的杂波特性失配, 从而使得STAP性能下降^[20]。

3.2 基于多普勒频率扩展的子空间投影法

子空间投影法通过计算杂波子空间正交补上的投影矩阵, 来得到杂波抑制权。这一方法具有较低的运算复杂度, 并且无需挑选训练样本。

由于海杂波存在运动速度, $\mathbf{s}_s(r, f_a)$ 受到海杂波随机运动速度的影响。根据式(7), $\mathbf{s}_s(r, f_a)$ 可表示为

$$\mathbf{s}_s(r, f_a) = \left[1, \exp\left(\frac{j\pi d (f_a + 2v_{c,i}/\lambda)}{v_p}\right), \dots, \exp\left(\frac{j\pi(N-1)d (f_a + 2v_{c,i}/\lambda)}{v_p}\right) \right]^T \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(r, f_a) &= [\mathbf{S}_1(r, f_a), \mathbf{S}_2(r, f_a), \dots, \mathbf{S}_n(r, f_a)]^T \\ &= \mathbf{S}_1(r, f_a) \cdot \left[1, \exp\left(\frac{j2\pi d \sin \varphi_i \cos \theta_i}{\lambda}\right), \dots, \right. \\ &\quad \left. \exp\left(\frac{j2\pi(N-1)d \sin \varphi_i \cos \theta_i}{\lambda}\right) \right]^T \\ &= \mathbf{S}_1(r, f_a) \cdot \mathbf{s}_s(r, f_a) \end{aligned} \quad (8)$$

因此可得到多普勒频率扩展^[12]后的杂波协方差矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_c(r, f_a) &= \frac{|\mathbf{S}_1(r, f_a)|^2}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \\ &\quad \times \int_{f_a + \delta_{\min}}^{f_a + \delta_{\max}} \exp\left(\frac{j\pi f \cdot d}{v_p} [0, 1, \dots, N-1]^T\right) \\ &\quad \times \exp\left(\frac{-j\pi f \cdot d}{v_p} [0, 1, \dots, N-1]\right) df \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\delta_{\min} = \min\{2v_{c,i}/\lambda\}$, $\delta_{\max} = \max\{2v_{c,i}/\lambda\}$ 。

因此, 具有滤波凹口展宽效应的海杂波子空间投影矩阵^[13]为

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(f_a) &= \frac{1}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \\ &\quad \times \int_{f_a + \delta_{\min}}^{f_a + \delta_{\max}} \exp\left(\frac{j\pi f \cdot d}{v_p} [0, 1, \dots, N-1]^T\right) \\ &\quad \times \left[\exp\left(\frac{-j\pi f \cdot d}{v_p} [0, 1, \dots, N-1]\right) \right. \\ &\quad \times \exp\left(\frac{j\pi f \cdot d}{v_p} [0, 1, \dots, N-1]^T\right) \left. \right]^{-1} \\ &\quad \times \exp\left(\frac{-j\pi f \cdot d}{v_p} [0, 1, \dots, N-1]\right) df \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(15), 通过杂波子空间正交补上的投影矩阵可得到子空间投影法的杂波抑制权矢量

$$\mathbf{w}(f_a) = [\mathbf{I} - \mathbf{P}(f_a)] \mathbf{s}_{\text{target}} \quad (16)$$

其中, \mathbf{I} 为 N 阶单位矩阵。

因此杂波抑制结果为

$$\mathbf{X}_{\text{res}}(r, f_a) = \mathbf{w}^H(f_a) \mathbf{X}(r, f_a) \quad (17)$$

3.3 先滑窗滤波后子空间投影法

本节先将滑窗滤波后自适应处理的思想应用到子空间投影法当中。假设共发射 M 个脉冲, 进行 K 次时域滑窗, 则可得到 K 组数据, 分别由第 $1 \sim M-K+1$ 个脉冲、第 $2 \sim M-K+2$ 个脉冲、...、第 $K \sim M$ 个脉冲的数据组成。构造距离为 r 的距离环处多普勒频率为 f_a 的数据矢量 $\tilde{\mathbf{X}}(r, f_a)$ 为

$$\tilde{\mathbf{X}}(r, f_a) = [\mathbf{X}_1^T(r, f_a), \mathbf{X}_2^T(r, f_a), \dots, \mathbf{X}_K^T(r, f_a)]^T \quad (18)$$

其中, $\mathbf{X}_k(r, f_a) = [S_{k,1}(r, f_a), S_{k,2}(r, f_a), \dots, S_{k,n}(r, f_a)]^T$, $S_{k,n}(r, f_a)$ 为第 k 组、第 n 个方位接收通道、距离为 r 、多普勒频率为 f_a 处的数据。

因此, 根据式(15), 可得到杂波子空间上的投影矩阵为

$$\tilde{\mathbf{P}}(f_a) = \frac{1}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \int_{f_a + \delta_{\min}}^{f_a + \delta_{\max}} \mathbf{a}_c (\mathbf{a}_c^H \mathbf{a}_c)^{-1} \mathbf{a}_c^H df \quad (19)$$

$$\mathbf{a}_c = \exp(j2\pi f \cdot \text{PRT}[0, 1, \dots, K-1]^T) \odot \exp\left(\frac{j\pi f \cdot d}{v_p} [0, 1, \dots, N-1]^T\right) \quad (20)$$

其中, \odot 为 Kronecker 积。

则杂波抑制权矢量为

$$\tilde{\mathbf{w}}(f_a) = [\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{P}}(f_a)] \tilde{\mathbf{s}}_{\text{target}} \quad (21)$$

其中, \mathbf{I} 为 KN 阶单位矩阵, $\tilde{\mathbf{s}}_{\text{target}} = \exp(j2\pi f_a \cdot \text{PRT}[0, 1, \dots, K-1]^T) \odot \mathbf{s}_{\text{target}}$ 。

因此杂波抑制结果为

$$\mathbf{X}_{\text{res}}(r, f_a) = \tilde{\mathbf{w}}^H(f_a) \tilde{\mathbf{X}}(r, f_a) \quad (22)$$

相比于传统子空间投影法只取单一多普勒通道数据进行处理, 所提算法通过时域滑窗扩大了系统自由度, 使得杂波抑制性能得以改善。

本文所提的稳健的子空间投影杂波抑制算法流程图如图2所示。

3.4 多普勒频率扩展量的确定

杂波的空-时2维功率谱反映了杂波多普勒频率与空间锥角的对应情况, 从谱中可以看到海杂波的多普勒频率扩展情况, 由此得到所提算法中的多普勒频率扩展量。

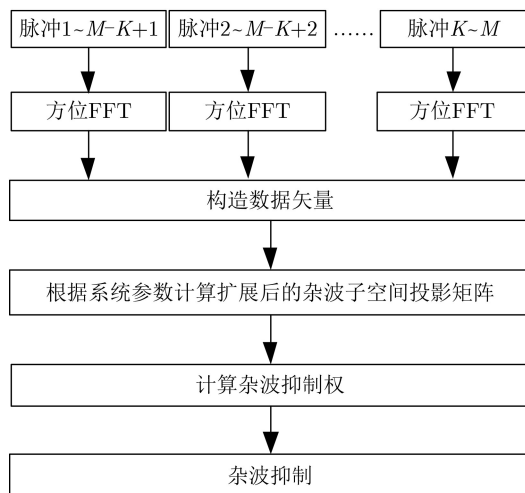


图2 稳健的子空间投影杂波抑制算法流程图

借助空-时导向矢量进行2维搜索可估计杂波的空-时2维功率谱, 其数学模型为^[21]

$$P(f_a, \psi) = \frac{1}{\mathbf{s}^H(f_a, \psi) \mathbf{R}_{\text{ct}}^{-1} \mathbf{s}(f_a, \psi)} \quad (23)$$

$$\mathbf{y}(r, t_m) = [S_1(r, t_m), S_2(r, t_m), \dots, S_N(r, t_m)]^T \quad (24)$$

$$\mathbf{Y}(r) = [\mathbf{y}^T(r, t_1), \mathbf{y}^T(r, t_2), \dots, \mathbf{y}^T(r, t_M)]^T \quad (25)$$

$$\mathbf{R}_{\text{ct}} = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \mathbf{Y}(r_i) \mathbf{Y}^H(r_i) \quad (26)$$

$$\mathbf{s}(f_a, \psi) = \exp\left(\frac{j2\pi f_a}{\text{PRF}} [0, 1, \dots, M-1]^T\right) \odot \exp\left(\frac{j2\pi d \cos \psi}{\lambda} [0, 1, \dots, N-1]^T\right) \quad (27)$$

其中, r_i 为第 i 个距离单元对应的斜距, N_r 为距离单元数, M 为脉冲数, ψ 为空间锥角, $\cos \psi = \sin \varphi \cos \theta$, PRF 为脉冲重复频率。确定归一化多普勒频率 $2f_a/\text{PRF}$ 和空间锥角余弦值 $\cos \psi$ 的取值范围后, 通过2维搜索可以得到杂波的空-时2维功率谱。由式(7)可得, 当 $f_a = 0$ 时, 对应的空间锥角余弦值 $\cos \psi = v_{c,i}/v_p$ 。取归一化功率为 -3 dB 作为门限, 可得到 $v_{c,i}$ 的范围, 由此可得到多普勒频率扩展量 δ_{\min} 和 δ_{\max} 。

4 杂波抑制性能分析

4.1 仿真结果分析

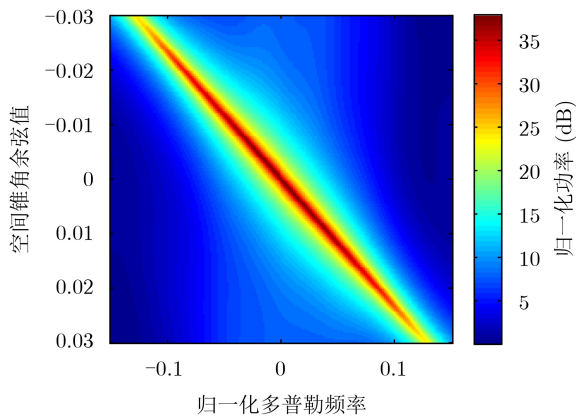
本节将根据仿真结果比较传统的子空间投影法与所提算法的杂波抑制效果。仿真所用的机载预警雷达系统仿真参数如表1所示。仿真的杂波类型为4级海况海杂波, 采用海杂波 Morchin 模型^[22]和K分布^[23]进行仿真。作为对比的陆地杂波采用沙漠背景, 通过陆地杂波 Morchin 模型^[24]和瑞利分布进行仿真。

图3为仿真得到的陆地杂波和海杂波的空-时2维功率谱。图4为对海杂波回波数据进行方位傅里叶变换可得到杂波距离-多普勒谱。从图中可见, 由于海杂波的运动特性, 海杂波空-时2维功率谱发生了展宽现象, 杂波多普勒频率与空间锥角不再一一对应, 传统子空间投影法的杂波抑制性能将受到影响。以归一化功率为 -3 dB 作为门限, 从图中可得到 $f_a = 0$ 时 $\delta_{\min} = \min\{2v_{c,i}/\lambda\} \approx -42.5$ Hz, $\delta_{\max} = \max\{2v_{c,i}/\lambda\} \approx 42.0$ Hz。

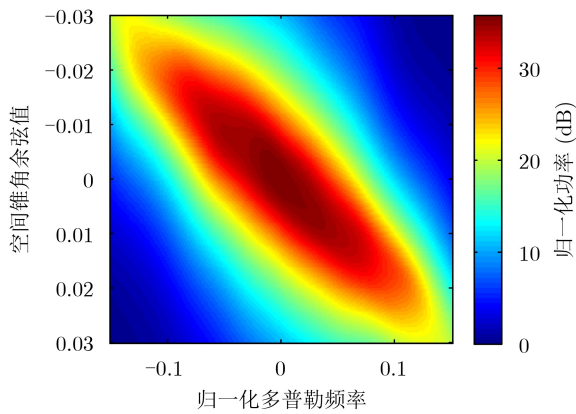
图5为分别用1DT^[4]、传统的子空间投影法、 K 取3和5时的稳健的子空间投影法对海杂波仿真数据进行杂波抑制后得到的输出信杂噪比损失曲线图。从图中可见, 传统的子空间投影法杂波抑制性能与1DT接近, 而相比于传统的子空间投影法, 所提稳健的子空间投影法在非主瓣杂波区域的杂波抑制性能更优。对于主瓣杂波区域, 由于多普勒频率

表 1 系统仿真参数

参数	值
平台高度	4000 m
平台运动速度	100 m/s
雷达频率	9.6 GHz
信号带宽	30 MHz
采样频率	36 MHz
接收机噪声带宽	36 MHz
脉冲重复频率	3000 Hz
脉冲数	90
波束中心下视角	60°
波束中心方位角	90°
方位通道数	8
天线方位维长度	1.000 m
天线俯仰维长度	0.125 m
发射增益	42.1 dB
接收增益	42.1 dB
发射天线方位和距离向加权	-13 dB/-13 dB(等幅加权)
接收天线方位和距离向加权	-40 dB/-20 dB(切比雪夫加权)
系统噪声	2 dB
系统损耗	11 dB



(a) 陆地杂波空-时2维功率谱



(b) 海杂波空-时2维功率谱

图 3 仿真杂波空-时2维功率谱

扩展技术本身会导致滤波凹口展宽，因此在主瓣杂波区域杂波抑制性能不会有明显改善。相比于1DT，所提算法不仅杂波抑制性能更优，运算复杂度也更低。此外，更多的时域滑窗次数可以带来更好的杂波抑制性能，但同时运算量也会提升。

4.2 实测数据处理

本节对一组单通道机载海杂波实测数据进行分析，数据处理时根据多通道杂波空-时特性将该实测数据扩展为多通道数据，其中考虑了杂波空间通道间去相关特性，空间通道数设置为8，通道间距设置为0.14 m。该实测数据的系统参数如表2所示。

图6(a)为距离脉压处理后海杂波的距离-多普勒谱，从图中可见，受天线双程方向图的影响，杂波

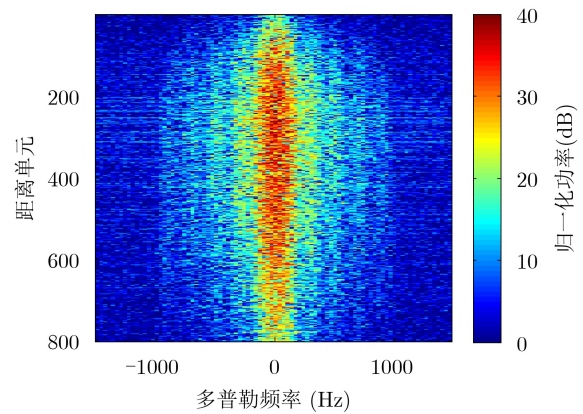


图 4 仿真海杂波距离-多普勒谱

表 2 实测数据系统参数

参数	值
平台高度	3100 m
平台运动速度	80 m/s
雷达频率	9.6 GHz
脉冲重复频率	4000 Hz

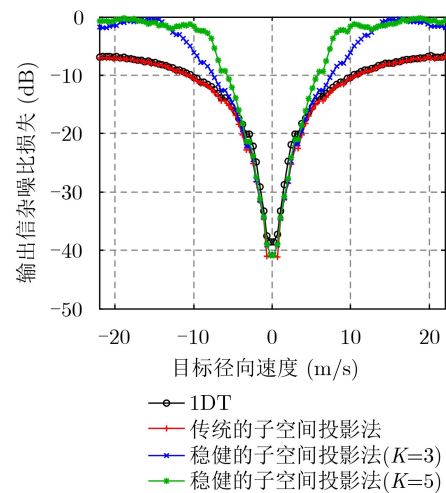


图 5 杂波抑制后输出信杂噪比损失曲线图

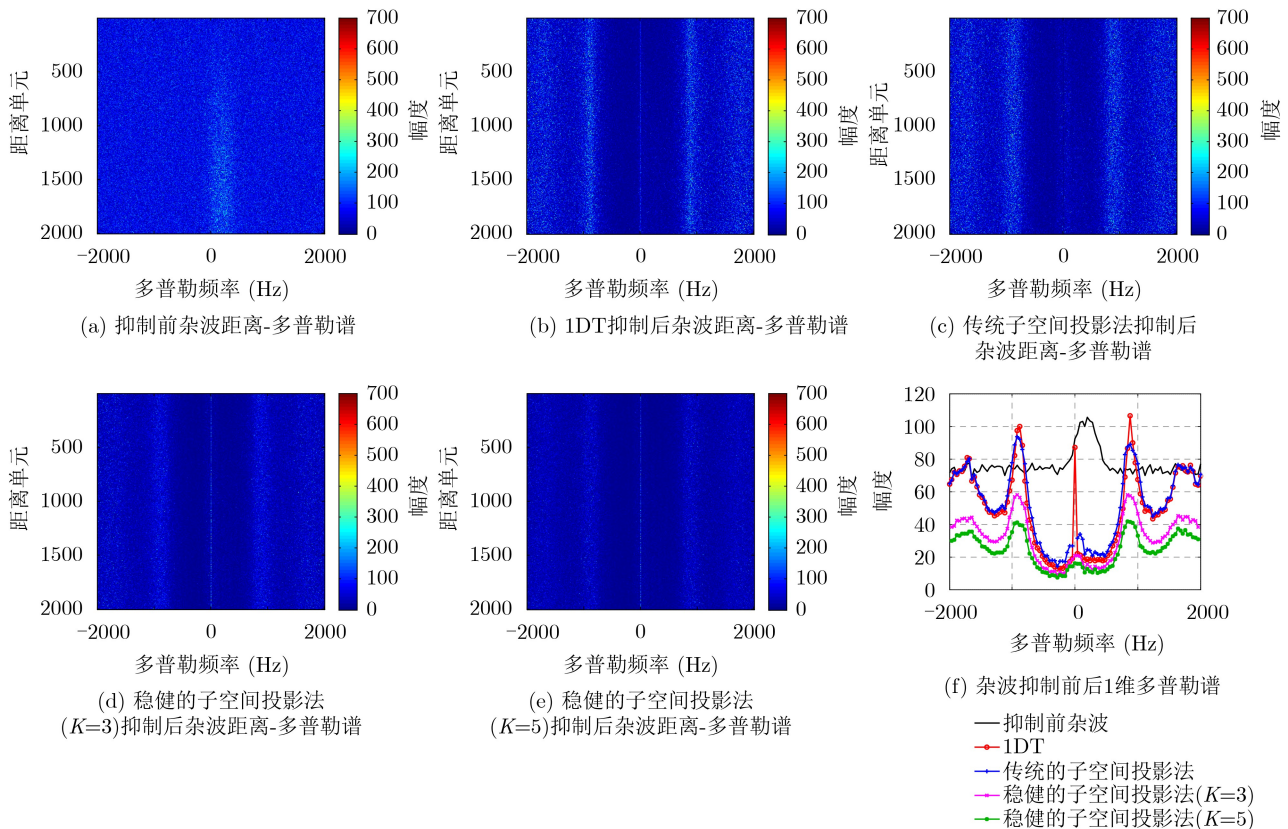


图6 杂波抑制前后距离-多普勒谱和1维多普勒谱

主要集中在主瓣内。图6(b)–图6(e)分别为通过1DT、传统的子空间投影法、 K 取3和5时稳健的子空间投影法进行杂波抑制后得到的杂波距离-多普勒谱。图6(f)为这几种方法的1维对比切片图。从图中可见,相比于传统的子空间投影法和1DT,所提算法的杂波抑制性能更优。

5 结论

本文针对海杂波的运动特性,提出一种稳健的子空间投影杂波抑制算法,该算法通过滤波凹口自适应展宽技术和先滑窗滤波后自适应处理技术来提高杂波抑制的稳健性。通过仿真海杂波数据检验了这一算法的杂波抑制效果。通过杂波抑制后输出信杂噪比损失曲线图可知,对于具有运动特性的海杂波,所提稳健的子空间投影法的杂波抑制性能更优。通过对某机载海杂波实测数据的处理同样验证了所提算法的性能。

参考文献

- [1] 蒋千, 吴昊, 王燕宇. 机载多功能海上监视雷达系统设计与关键技术研究[J]. 雷达学报, 2019, 8(3): 303–317. doi: 10.12000/JR19045.
JIANG Qian, WU Hao, and WANG Yanyu. Airborne multi-functional maritime surveillance radar system design and key techniques[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(3):

- 303–317. doi: 10.12000/JR19045.
- [2] GUERCI J R. Space-Time Adaptive Processing for Radar[M]. London: Artech House, 2003: 1–3.
- [3] 谢文冲, 段克清, 王永良. 机载雷达空时自适应处理技术研究综述[J]. 雷达学报, 2017, 6(6): 575–586. doi: 10.12000/JR17073.
XIE Wenchong, DUAN Keqing, and WANG Yongliang. Space time adaptive processing technique for airborne radar: An overview of its development and prospects[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(6): 575–586. doi: 10.12000/JR17073.
- [4] DIPIETRO R C. Extended factored space-time processing for airborne radar systems[C]. 1992 Conference Record of the Twenty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, Pacific Grove, USA, 1992: 425–430. doi: 10.1109/ACSSC.1992.269236.
- [5] BRENNAN L E, PIWINSKI D J, and STAUDAHER F M. Comparison of space-time processing approaches using experimental airborne radar data[C]. The Record of the 1993 IEEE National Radar Conference, Lynnfield, USA, 1993: 176–181. doi: 10.1109/NRC.1993.270470.
- [6] WANG Hong and CAI Lujing. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 660–670. doi: 10.1109/7.303737.
- [7] BROWN R D, WICKS M C, ZHANG Q, et al. A space-time adaptive processing approach for improved performance and affordability[C]. Proceedings of the 1996

- IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, USA, 1996: 321–326. doi: [10.1109/NRC.1996.510701](https://doi.org/10.1109/NRC.1996.510701).
- [8] 王永良, 吴志文, 彭应宁. 适于非均匀杂波环境的空时自适应处理方法[J]. 电子学报, 1999, 27(9): 56–58. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1999.09.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1999.09.017).
WANG Yongliang, WU Zhiwen, and PENG Yingning. A STAP approach for the non-homogeneous radar clutter environment[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(9): 56–58. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1999.09.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1999.09.017).
- [9] GOLDSTEIN J S and REED I S. Reduced-rank adaptive filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(2): 492–496. doi: [10.1109/78.554317](https://doi.org/10.1109/78.554317).
- [10] SARKAR T K, WANG Hong, PARK S, *et al.* A deterministic least-squares approach to space-time adaptive processing (STAP)[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(1): 91–103. doi: [10.1109/8.910535](https://doi.org/10.1109/8.910535).
- [11] 侯静, 胡孟凯, 王子微. 一种改进的知识辅助MIMO雷达空时自适应处理方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 795–800. doi: [10.11999/JEIT180557](https://doi.org/10.11999/JEIT180557).
HOU Jing, HU Mengkai, and WANG Ziwei. An improved knowledge-aided space-time adaptive signal processing algorithm for MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 795–800. doi: [10.11999/JEIT180557](https://doi.org/10.11999/JEIT180557).
- [12] YANG Zhiwei, SHU Yuxiang, and LIAO Guisheng. Robust ambiguous clutter suppression for the near-shore water areas with spaceborne multichannel SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(2): 319–323. doi: [10.1109/LGRS.2014.2337653](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2337653).
- [13] LI Boyu, SUN Guangcai, XING Mengdao, *et al.* Clutter suppression via subspace projection for spaceborne HRWS multichannel SAR system[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(9): 1538–1542. doi: [10.1109/LGRS.2019.2951198](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2951198).
- [14] GRACHEVA V and CERUTTI-MAORI D. Multi-channel analysis of sea clutter for STAP applications[C]. EUSAR 2012; The 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Nuremberg, Germany, 2012: 195–198.
- [15] GRACHEVA V and ENDER J. Multichannel analysis of medium grazing angle sea clutter[C]. EUSAR 2014; The 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, Germany, 2014: 1065–1068.
- [16] GRACHEVA V and ENDER J. Multichannel analysis and suppression of sea clutter for airborne microwave radar systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(4): 2385–2399. doi: [10.1109/TGRS.2015.2500918](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2500918).
- [17] XIN Zhihui, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, *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. doi: [10.1109/TGRS.2016.2587739](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2587739).
- [18] MELVIN W L, WICKS M C, and BROWN R D. Assessment of multichannel airborne radar measurements for analysis and design of space-time processing architectures and algorithms[C]. The 1996 IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, USA, 1996: 130–135. doi: [10.1109/NRC.1996.510669](https://doi.org/10.1109/NRC.1996.510669).
- [19] KOGON S M and ZATMAN M A. STAP adaptive weight training using phase and power selection criteria[C]. Conference Record of Thirty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, USA, 2001: 98–102. doi: [10.1109/ACSSC.2001.986887](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2001.986887).
- [20] 许华健, 杨志伟, 廖桂生, 等. 一种稳健的非均匀杂波协方差矩阵估计方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1036–1043. doi: [10.11999/JEIT160747](https://doi.org/10.11999/JEIT160747).
XU Huajian, YANG Zhiwei, LIAO Guisheng, *et al.* Robust approach for clutter covariance matrix estimation with STAP in heterogeneous environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1036–1043. doi: [10.11999/JEIT160747](https://doi.org/10.11999/JEIT160747).
- [21] 熊绍华. 机载雷达空时二维海杂波特征谱和功率谱研究[D]. [硕士论文], 桂林电子科技大学, 2015. doi: [10.7666/d.D790913](https://doi.org/10.7666/d.D790913).
XIONG Shaohua. Research on eigenspectrum and power spectrum of airborne radar spatial-temporal sea clutter[Master dissertation], Guilin University of Electronic Technology, 2015. doi: [10.7666/d.D790913](https://doi.org/10.7666/d.D790913).
- [22] XIE Mingchi, YI Wei, and KONG Lingjiang. Knowledge-aided space-time adaptive processing based on Morchin model[C]. The 2015 IET International Radar Conference, Hangzhou, China, 2015: 1–6. doi: [10.1049/cp.2015.1268](https://doi.org/10.1049/cp.2015.1268).
- [23] WARD K, TOUGH R, and WATTS S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance[M]. 2nd ed. London: IET, 2013: 54–55.
- [24] ZHAO Peng, WU Zhensen, ZHANG Yong, *et al.* The theoretical and experimental study on backscattering from arable land[C]. The 2012 International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Xi'an, China, 2012: 845–848. doi: [10.1109/ISAPE.2012.6408904](https://doi.org/10.1109/ISAPE.2012.6408904).
- 黄鹏辉: 男, 1990年生, 讲师, 研究方向为天基预警、机载/星载多通道SAR-GMTI、新体制星载SAR成像、弱小目标探测跟踪。
- 邹子豪: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为空-时自适应处理、多通道雷达海杂波信号处理。
- 刘兴钊: 男, 1962年生, 教授, 研究方向为雷达信号处理。
- 廖桂生: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为雷达信号处理。
- 王志城: 男, 1982年生, 副研究员, 研究方向为雷达信号处理。
- 陈筠力: 男, 1971年生, 研究员, 研究方向为雷达信号处理。
- 刘艳阳: 男, 1987年生, 副研究员, 研究方向为雷达信号处理。