

一种改进的基于峰值信噪比-高阶奇异值分解的天波超视距 雷达自适应海杂波抑制算法

关泽文 陈建文* 鲍拯
(空军预警学院 武汉 430019)

摘要: 天波超视距雷达(OTHR)舰船目标的检测性能受目标区海杂波的影响严重, 准确且自适应的海杂波抑制效能对改善低可探测舰船目标的检测性能意义重大。该文针对基于高阶奇异值分解(HOSVD)的海杂波抑制算法非自适应机制的不足, 通过引入峰值信噪比(PSNR), 提出一种改进的基于PSNR-HOSVD的自适应算法。该算法仅利用第3等效模式展开矩阵的左奇异向量构造一个投影矩阵, 相比于HOSVD算法, 该文算法可有效降低计算复杂度, 同时由于海杂波仅在第3等效模式展开矩阵的列空间中具有聚集特性, 因此该文算法具有比HOSVD算法更好的海杂波抑制性能。实测数据处理结果表明, 在电离层状态理想和非理想的情况下, 该文PSNR-HOSVD自适应算法的性能均优于EVD自适应算法和HOSVD非自适应算法。

关键词: 天波超视距雷达; 海杂波抑制; 峰值信噪比; 高阶奇异值分解

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)07-1743-08

DOI: 10.11999/JEIT180707

A Modified Adaptive Sea Clutter Suppression Algorithm Based on PSNR-HOSVD for Skywave OTHR

GUAN Zewen CHEN Jianwen BAO Zheng
(Wuhan Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: The detection performance of ship targets by skywave Over-The-Horizon Radar (OTHR) is affected by the sea clutter seriously. Accurate and adaptive suppression of sea clutter is significant for improving the detection performance of ship target. To solve the non-adaptive shortness of the sea clutter suppression algorithm based on High-Order Singular Value Decomposition (HOSVD), a modified adaptive algorithm based on Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)-HOSVD is proposed by introducing the PSNR. The modified algorithm has a smaller computational complexity than the one based on HOSVD, since only one projection matrix is established from the left singular vectors of the third-mode unfolding matrix. Meanwhile, the modified algorithm has a better performance than the HOSVD based one, because the components of sea clutter are only aggregated in the column space of the third-mode unfolding matrix. Experimental results based on two sets of measured data received in ideal and non-ideal situations in respective show that, the modified adaptive algorithm based on PSNR-HOSVD has a better performance than the peer algorithms.

Key words: Skywave Over-The-Horizon Radar (OTHR); Sea clutter suppression; Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR); High-Order Singular Value Decomposition (HOSVD)

1 引言

工作在高频(High Frequency, HF)频段的天波超视距雷达(Over-The-Horizon Radar, OTHR)利用电离层对HF电磁波的折射效应, 实施视距范围

外的海态监测和大中型舰船目标检测等任务, 相比于常规微波雷达, 可将海面目标的预警时间提升30~50倍, 在军事领域和民用领域均具有巨大的潜在应用价值^[1-3]。OTHR舰船目标检测是以严重的海杂波为背景的, 且经一次相干积累处理后, 接收到多通道、多距离分辨单元的回波信号, 因此, 准确且自适应的海杂波抑制对改善舰船目标检测性能意义重大。

典型的OTHR海杂波抑制算法可分为两大类, 即时域对消类算法和子空间分解类算法。通常, 时

收稿日期: 2018-07-16; 改回日期: 2019-01-17; 网络出版: 2019-01-31

*通信作者: 陈建文 cjwll8217@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471391)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61471391)

域对消类算法^[4-6]适用于短相干积累时间(Coherent Integration Time, CIT)的情况,而在长CIT条件下,OTHR接收信号中多普勒频率分量数增加,导致该类算法需要对消的多普勒频率分量数增加而容易出错。子空间分解类算法中典型的算法有基于奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)的海杂波抑制算法^[7-9]、基于特征值分解(Eigen Value Decomposition, EVD)的海杂波抑制算法^[10,11]和基于高阶奇异值分解(High-Order Singular Value Decomposition, HOSVD)的海杂波抑制算法^[12,13],以及结合动目标显示(Moving Target Indication, MTI)技术和EVD的基于改进的EVD(Modified EVD, MEVD)的海杂波抑制算法^[14]。值得指出的是,EVD算法可以是自适应的,但就海杂波抑制效果而言,性能更优的是HOSVD算法,然而该算法需要根据经验预设参数的非自适应机制严重地限制了算法在工程上的应用。

针对HOSVD算法存在的不足,本文提出一种改进算法,即基于峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)-HOSVD的OTHR自适应海杂波抑制算法。PSNR-HOSVD算法将图像处理中的PSNR参数引入HOSVD算法,通过将各备选参数下海杂波抑制结果的PSNR最大化,自适应地选取最优预设参数。需要指出的是,PSNR-HOSVD算法虽然也用到了HOSVD构建投影矩阵,但区别于文献^[12,13]中的HOSVD算法,PSNR-HOSVD算法在海杂波抑制过程中仅利用数据张量的第3等效模式展开矩阵的左奇异向量构造投影矩阵,相比于HOSVD算法可以有效地降低计算复杂度,同时还可以改善海杂波抑制的效果。本文结构安排如下:第2节阐述OTHR回波信号的结构及特性;第3节提出基于PSNR-HOSVD的自适应海杂波抑制算法;第4节基于实测数据,对所提算法的性能进行验证分析;第5节总结全文。

2 OTHR回波信号结构及特性

OTHR单个分辨单元的回波信号主要包括海杂波分量和可能存在的舰船目标信号分量和噪声。其中,海杂波主要包括1阶和2阶分量。1阶海杂波在多普勒频域表现为两个尖峰,它们的多普勒频率为 $f_B = \pm 102\sqrt{f_R} \cos \beta + 2v_c/\lambda_R$,其中 f_R 和 λ_R 分别表示OTHR工作频率和波长, β 表示入射电磁波与海面间的夹角, v_c 表示海面洋流的径向速度。2阶海杂波在多普勒频域呈现为1阶海杂波附近的带状分布^[15]。舰船目标则表现为单个尖峰,其多普勒频率与其径向速度成线性关系。在功率方面,通常1阶海杂波最强,大中型舰船目标与2阶海杂波相当。

综上,OTHR检测子区内任意一个海面分辨单元的回波信号 $\mathbf{x}_{\theta,r}$, $1 \leq \theta \leq \Theta, 1 \leq r \leq R$ 均可表示为多个(假设为 M 个)多普勒频率分量之和加噪声的形式,即

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{\theta,r} &= \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ e^{j\omega_{\theta,r}^1 T_s} & \cdots & e^{j\omega_{\theta,r}^M T_s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j\omega_{\theta,r}^1 (N-1) T_s} & \cdots & e^{j\omega_{\theta,r}^M (N-1) T_s} \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} a_{\theta,r}^1 \\ \vdots \\ a_{\theta,r}^M \end{bmatrix} + \mathbf{n}_{\theta,r} \\ &= \Phi \mathbf{a}_{\theta,r} + \mathbf{n}_{\theta,r} \\ &= \mathbf{c}_{\theta,r} + \mathbf{s}_{\theta,r} + \mathbf{n}_{\theta,r} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, Θ 和 R 分别表示检测子区内的通道数和距离分辨单元数, $\{\omega_{\theta,r}^1, \omega_{\theta,r}^2, \dots, \omega_{\theta,r}^M\}$ 和 $\{a_{\theta,r}^1, a_{\theta,r}^2, \dots, a_{\theta,r}^M\}$ 分别表示 M 个多普勒频率分量的多普勒频率和幅度, T_s 表示慢时间采样间隔, $\mathbf{c}_{\theta,r}$, $\mathbf{s}_{\theta,r}$ 和 $\mathbf{n}_{\theta,r}$ 分别表示海杂波分量、舰船目标信号分量和噪声分量,上标“T”表示矩阵或向量的转置运算。

在一段CIT内,通常电离层状态和海面检测子区内的海态都是平稳的,且海面检测子区内不同海面分辨单元处的海态是相近的。因此,一次相干积累处理后,OTHR接收到的同一检测子区内不同海面分辨单元信号中的海杂波具有较强的相关性,文献^[16]的研究指出相邻海面分辨单元间的相关系数可达0.8~0.9,而舰船目标仅存在于某一个(电离层理想的情况下)或若干个相邻(电离层非理想的情况下)海面分辨单元中,因此舰船目标信号分量的空间相关性较差。舰船目标信号分量和海杂波分量的空间相关性的差异,是子空间分解类海杂波抑制算法能够利用多个海面分辨单元信号有效地进行海杂波抑制的基础。

3 基于PSNR-HOSVD的自适应海杂波抑制算法

基于PSNR-HOSVD的OTHR海杂波抑制方法的基本思路是设置备选参数集,然后利用基于HOSVD的海杂波抑制方法(详见3.1节)分别计算各个备选参数下的海杂波抑制结果,再将其变换到多普勒频域得到不同参数下海杂波抑制后的距离多普勒谱,最后计算它们的PSNR,对应于PSNR最大值的备选参数即最优参数 λ_3 ,并且与其对应的数据张量即最终的海杂波抑制结果。

3.1 基于HOSVD的海杂波抑制方法

OTHR接收信号经过波束形成和脉冲压缩后,构成一个3阶的数据张量 $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{\Theta \times R \times N}$,其中 Θ ,

R 和 N 分别表示方位(通道)数、距离分辨单元数和相干积累脉冲数。根据多重线性代数理论,张量 \mathbf{Y} 的HOSVD可表示为^[17,18]

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C} \times_1 \mathbf{U}_1 \times_2 \mathbf{U}_2 \times_3 \mathbf{U}_3 \quad (2)$$

其中, $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{\Theta \times R \times N}$ 表示核张量, $\times_k (1 \leq k \leq 3)$ 表

示张量与矩阵的模 k 乘积, 即 $\mathbf{A} = \mathbf{B} \times_k \mathbf{C} \Leftrightarrow \mathbf{A}_{(k)} = \mathbf{C} \mathbf{B}_{(k)}$, ($\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \mathbb{C}^{\Theta \times R \times N}$), $\mathbf{U}_k (1 \leq k \leq 3)$ 表示张量 \mathbf{Y} 的第 k 等效模式展开矩阵 $\mathbf{Y}_{(k)}$ 的左奇异向量矩阵。张量 \mathbf{Y} 和其第3等效模式展开矩阵 $\mathbf{Y}_{(3)} \in \mathbb{C}^{N \times \Theta R}$ 的结构如图1所示。

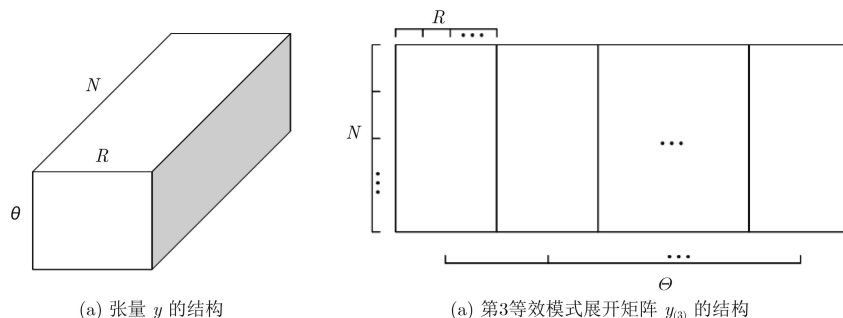


图1 张量 \mathbf{Y} 和其第3等效模式展开矩阵 $\mathbf{Y}_{(3)}$ 的结构

由图1(b)可见, 第3等效模式展开矩阵 $\mathbf{Y}_{(3)}$ 的各列为各个海面分辨单元的回波信号, 结合式(2)可知, $\mathbf{Y}_{(3)}$ 的左奇异向量矩阵 \mathbf{U}_3 为各个海面分辨单元回波信号的标准正交基, 与式(1)中的 Φ 相似。 \mathbf{U}_3 中的各列, 即左奇异向量 $\mathbf{u}_{3,i} (1 \leq i \leq N)$, 按照其对应奇异值的大小降序排列, 而奇异值的大小正是整个接收数据中各分量的功率的正平方根。根据第2节中海杂波特性的分析, 由于海杂波在整个检测子区内是强相关的, 而舰船目标信号分量则相反, 所以可利用式(1)进行海杂波抑制

$$\mathbf{Y}' = \mathbf{Y} \times_3 \mathbf{P}_{\lambda_3} = \mathbf{Y} \times_3 \left(\mathbf{I} - \sum_{i=1}^{\lambda_3} \mathbf{u}_{3,i} \mathbf{u}_{3,i}^H \right) \quad (3)$$

其中, \mathbf{P}_{λ_3} 表示投影矩阵, \mathbf{Y}' 表示海杂波抑制后的数据张量, λ_3 表示海杂波分量的左奇异向量数, 直接控制海杂波子空间的构成。

PSNR-HOSVD算法中基于HOSVD的海杂波抑制方法仅利用第3等效模式展开矩阵的左奇异向量构造投影矩阵, 区别于文献[12,13]中基于HOSVD的海杂波抑制方法中利用3个等效模式展开矩阵的左奇异向量分别构造3个投影矩阵。事实上, 海杂波分量在另外两个等效模式展开矩阵的列空间中并不具有聚集特性, 所以由另外的两个等效模式展开矩阵的左奇异向量构造的投影矩阵不能够对海杂波进行针对性的抑制。

3.2 基于PSNR的自适应参数选取方法

由式(3)可见, 如何选取参数 λ_3 , 将直接影响海杂波抑制的效果。为了获取最优参数 λ_3 , 引入常应用于图像处理中的PSNR^[19]。PSNR在图像处理中常用于描述滤波处理前后两幅图像的相似性, 其定义为

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{(\max(I_2))^2}{\|I_2 - I_1\|_F^2} \right) \quad (4)$$

其中, I_1 和 I_2 分别表示处理前和处理后的两帧图像, “ $\max(\cdot)$ ”表示求最大值运算, “ $\|\cdot\|_F$ ”表示矩阵的Frobenius范数运算。在本文应用环境中, 计算不同备选参数下海杂波抑制结果的PSNR时, 根据矩阵奇异值特性, 为减小计算复杂度, 式(4)改写为

$$\text{PSNR}_{\lambda'_3} = 10 \lg \left(\frac{\max \left(\left| \mathcal{F} \left(\mathbf{Y}'_{\lambda'_3} \right) \right|^2 \right)}{\sum_{i=1}^{\lambda'_3} \sigma_{3,i}^2} \right) \quad (5)$$

其中, λ'_3 表示备选参数, $\sigma_{3,i}^2$ 为第3等效模式展开矩阵 $\mathbf{Y}_{(3)}$ 的第 i 个奇异值, $\mathbf{Y}'_{\lambda'_3}$ 表示与备选参数 λ'_3 对应的海杂波抑制结果, “ $|\cdot|$ ”表示取绝对值运算, “ $\mathcal{F}(\cdot)$ ”表示傅里叶变换。

通过令PSNR最大选取最优参数 λ_3 的合理性在于, 在备选参数逐渐增大的过程中, 张量 \mathbf{Y} 中被抑制的主分量逐渐从强海杂波分量过渡到包括舰船目标信号分量在内的弱噪声分量。在强海杂波分量抑制阶段, 式(5)等号右边取对数项中分子的减小速度远小于分母的减小速度, 因此PSNR具有增大的趋势, 而随着备选参数的继续增大, 当舰船目标信号分量也被抑制后, 张量 \mathbf{Y} 中仅剩噪声, 此时式(5)中取对数项中分子大幅下降, 此后PSNR明显减小。因此, 随着备选参数的逐渐增大, PSNR有先增大后减小的趋势, 而令PSNR最大的备选参数, 即能够使海杂波充分抑制、同时舰船目标尽量保留的最优参数。需要说明和指出的是, 在PSNR达到最大值之前和之后, 均不具有单调性, 因此选取其最大值不能用找拐点的方式。

3.3 基于PSNR-HOSVD的自适应海杂波抑制算法步骤

步骤1 构造备选参数集 $\lambda'_3 = [\lambda'_{3,1}, \lambda'_{3,2}, \dots, \lambda'_{3,\text{int}(N/2)}] = [1, 2, \dots, \text{int}(N/2)]$ ，并将其中的每一个参数分别代入式(3)，计算出与各个备选参数相对应的海杂波抑制后的数据张量 $\mathbf{Y}'_{\lambda'_{3,j}}$ ，($1 \leq j \leq \text{int}(N/2)$)；

步骤2 利用傅里叶变换将各个 $\mathbf{Y}'_{\lambda'_{3,j}}$ 变换到多普勒频域，得到 $\mathcal{F}(\mathbf{Y}'_{\lambda'_{3,j}})$ ；

步骤3 按式(5)计算各个备选参数 $\lambda'_{3,j}$ 对应的 $\text{PSNR}_{\lambda'_{3,j}}$ ；

步骤4 在所有的 $\text{PSNR}_{\lambda'_{3,j}}$ 中选出最大值，并选取其对应的 $\lambda'_{3,j}$ 和 $\mathbf{Y}'_{\lambda'_{3,j}}$ 分别作为最优参数 λ_3 和最终的海杂波抑制后的数据张量 \mathbf{Y}' 。

在以上过程中有以下两点需要说明：(1)在步骤1中，由于海杂波的聚集特性，所以备选参数集中元素个数用 $\text{int}(N/2)$ 代替 N ，以减少计算量；(2)，式(3)和式(5)中第3等效模式展开矩阵 $\mathbf{Y}_{(3)}$ 的左奇异向量矩阵 \mathbf{U}_3 和奇异值 $\sigma_{3,i}$ ，($1 \leq i \leq N$) 可通过对 $\mathbf{Y}_{(3)}$ 进行SVD一次获得。

3.4 基于PSNR-HOSVD的自适应海杂波抑制算法计算复杂度分析

基于子空间分解的海杂波抑制算法，构造投影矩阵和对数据进行海杂波抑制(即投影)的过程仅涉及简单的矩阵(包括向量和张量)间的乘法，并且不同方法在海杂波抑制的过程中计算量是一致的(平均到单个海面分辨单元信号)，因此对该类算法计算复杂度的分析集中在它们所采用的子空间分解方法上。EVD和HOSVD算法的计算复杂度分别为 $R^2N + O(R^3)$ 和 $8(\Theta^3 R^3 + R^3 N^3 + N^3 \Theta^3) + O(R^6)$ ，基于PSNR-HOSVD的海杂波抑制算法在子空间分解过程中仅对第3等效模式展开矩阵 $\mathbf{Y}_{(3)}$ 进行SVD，因此该算法在该过程中计算复杂度能够减少 $2/3$ ，为 $8(\Theta^3 R^3 + R^3 N^3 + N^3 \Theta^3)/3 + O(R^6)$ ；而在确定最优参数 λ_3 的过程中，需要多计算 $\text{int}(N/2)$ 个PSNR，计算复杂度约为 $\text{int}(N/2) \cdot 2N^2 \Theta R \approx N^3 \Theta R$ 。因此，基于PSNR-HOSVD的海杂波抑制算法的计算复杂度为 $8(\Theta^3 R^3 + R^3 N^3 + N^3 \Theta^3)/3 + O(R^6)$ 。

4 实测数据验证分析

为了验证提出的基于PSNR-HOSVD的OTHR自适应海杂波抑制算法的性能，本节以已有的EVD和HOSVD两种同类算法作为比较，采用OTHR在对海工作模式下接收的两组实测数据，对

3种算法的性能进行比较分析。两组实测数据经过波束形成和脉冲压缩处理后，形成通道数 $\Theta=5$ 、距离分辨单元数 $R=40$ 和相干积累脉冲数 $N=128$ 的两个张量，分别应用于两组实验中。为验证电离层状态理想的情况下，PSNR-HOSVD算法对存在具有不同多普勒频率和不同信杂噪比(Signal-to-Clutter-plus-Noise Ratio, SCNR)舰船目标情况下的海杂波抑制性能，同时考虑到实测数据的局限性，实验1中采用的实测数据原本不含有舰船目标，而是人为地随机添加6个目标(用复正弦信号模拟)，且为方便讨论，均添加在第3通道内。实验2所采用的实测数据中，在通道1距离单元31中存在一个舰船目标，该数据受电离层状态非理想的影响，舰船目标在多普勒频率上和距离上均发生了展宽，因此该实验可验证在电离层状态非理想情况下PSNR-HOSVD算法的性能。在算法性能分析中，采用处理后舰船目标的SCNR改善(Improvement of SCNR, ISCNr)比较各算法的性能，可以综合地反映舰船目标被保留的程度和海杂波被抑制的程度，其定义为

$$\text{ISCNR} = \text{SCNR}_{\text{out}} - \text{SCNR}_{\text{in}} \quad (6)$$

其中，下标“out”和“in”分别表示输出和输入，3个量均在对数尺度上(单位为dB)。需要指出的是，鉴于最终的舰船目标检测在多普勒域中进行，所以SCNR中的杂波噪声功率以多普勒谱中除舰船目标信号外的最大谱峰为代表。

4.1 实验1 电离层状态理想情况下的算法性能验证

在该实验中实测数据的第3通道内随机加入的6个舰船目标的参数由表1给出，该通道的距离多普勒谱如图2(a)所示，该实测数据分别经EVD, HOSVD(3个预设参数分别2, 15和36，第3个参数与PSNR-HOSVD算法中自适应选取的参数相同)和PSNR-HOSVD 3种算法处理的结果如图2(b)，图2(c)和图2(d)所示，处理后各舰船目标的输出SCNR和ISCNR由表2给出。由图2可见，EVD算法的处理结果中海杂波剩余较强，存在大量的比舰船目标强的海杂波剩余谱峰，而另外两种算法的处理结果中海杂波剩余较弱，不存在明显的海杂波剩余谱峰。由表2可知，EVD, HOSVD和PSNR-HOSVD

表1 实验1各舰船目标参数

序号	1	2	3	4	5	6
距离分辨单元	8	10	12	24	35	38
多普勒频率(Hz)	-0.55	-0.88	-0.64	0.96	0.72	0.88
SCNR _{in} (dB)	-11.49	-28.31	-18.85	-24.75	-22.44	-19.24

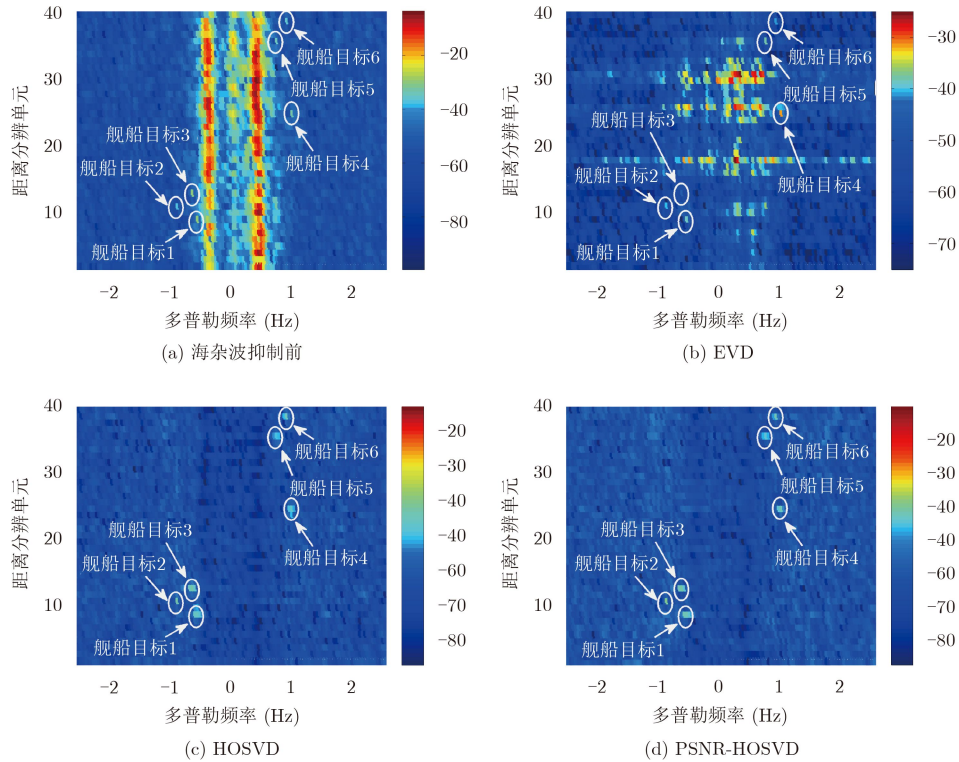


图2 电离层状态理想时实测数据通道3处理前后的距离多普勒谱

表2 电离层状态理想时3种算法的处理结果中各舰船目标的输出SCNR和ISCNR (dB)

序号		1	2	3	4	5	6	均值
EVD算法	SCNR _{out}	3.94	-4.15	6.00	1.77	-0.32	1.76	1.50
	ISCNR	15.43	24.16	24.85	26.52	22.12	21.00	22.35
HOSVD算法	SCNR _{out}	8.43	13.54	12.80	9.40	4.87	10.43	9.91
	ISCNR	19.92	41.85	31.65	34.15	27.31	29.67	30.76
PSNR-HOSVD算法	SCNR _{out}	9.06	13.89	12.48	10.56	5.66	8.72	10.06
	ISCNR	20.55	42.20	31.33	35.31	28.10	27.96	30.91

3种算法的处理结果中舰船目标的平均输出SCNR依次分别为1.50 dB, 9.91 dB和10.06 dB, 它们的平均ISCNR分别为22.35 dB, 30.76 dB和30.91 dB。可见, PSNR-HOSVD自适应算法在海杂波抑制效果方面明显优于EVD自适应算法, 也优于HOSVD非自适应算法。

该实验中舰船目标1的多普勒频率为-0.55 Hz, 靠近负1阶海杂波, 属于低可探测舰船目标。为进一步分析PSNR-HOSVD算法对存在低可探测舰船目标时的海杂波抑制性能(要有效保留低可探测舰船目标), 将舰船目标1的输入SCNR改变为-35 dB~-10 dB, 分别应用3种算法对该数据进行处理, 3种算法的ISCNR如图3所示。由于舰船目标1靠近强大的负1阶海杂波, 所以导致该舰船目标信号分量的空间相关性提升, 进而在海杂波抑制过程中导致了该分量的功率有所损失。尽管该情况下

PSNR-HOSVD算法的ISCNR仅有20~25 dB, 但相比EVD算法和HOSVD算法, 仍保持有更好的性能。

需要指出的是, 在本小节的实验中, 为令HOSVD算法的性能达到最优, 其第3个预设参数与PSNR-HOSVD算法中自适应选取的参数是一致的。

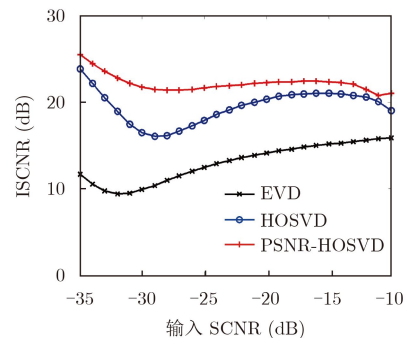


图3 存在不同输入SCNR的低可探测舰船目标时3种算法的ISCNR

的。由3种算法的处理结果可见，PSNR-HOSVD算法的性能优于HOSVD算法，其原因是HOSVD算法将舰船目标信号分量也进行了一定程度的抑制，从而间接地验证了第3.1节中提出的“由第1和第2等效模式展开矩阵的左奇异向量构造的投影矩阵并不能够对海杂波进行针对性地抑制”的判断。

4.2 实验2 电离层状态非理想情况下的算法性能验证

该实验中采用的实测数据通道1的距离多普勒谱如图4所示，受非理想电离层状态的影响，舰船目标在多普勒频率上和距离分辨单元上都呈现出了展宽，各通道中各距离分辨单元信号与舰船目标所在距离分辨单元(通道1、距离分辨单元31)信号的相关系数如图5所示，平均相关系数为0.59。舰船目标的多普勒频率和输入SCNR分别为-0.64 Hz和-12.68 dB，分别应用EVD, HOSVD(3个预设参数分别2, 10和15, 第3个参数与PSNR-HOSVD算法中自适应选取的参数相同)和PSNR-HOSVD 3种算法对该数据进行处理，所得结果分别如图6(a), 6(b)和6(c)所示，处理前后舰船目标所在海面分辨单元的多普勒谱如图7所示。3种算法的处理结果与实验1中的处理结果相似。3种算法的处理结果中舰船目标的输出SCNR依次分别为-8.04 dB, 14.20 dB和16.36 dB，因此它们的ISCNR分别为4.64 dB,

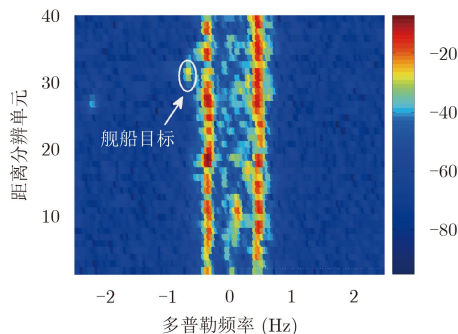


图4 通道1处理前的距离多普勒谱

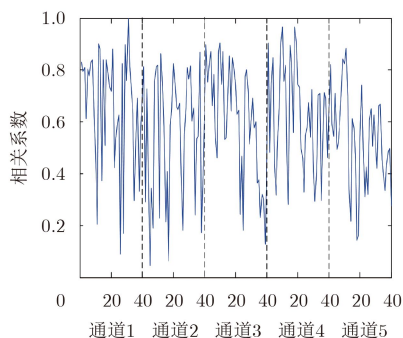


图5 各空间分辨单元与目标所在分辨单元的相关系数

26.88 dB和29.04 dB。由舰船目标的ISCNR所得的结论与实验1所得结论一致。

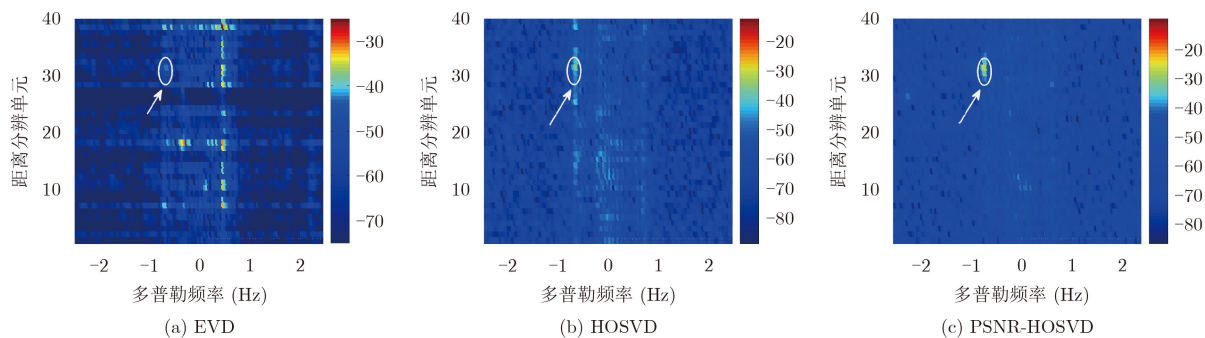


图6 电离层状态非理想时实测数据通道1处理后的距离多普勒谱

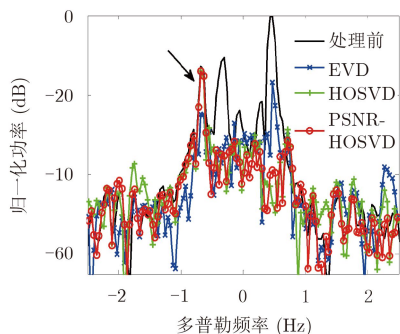


图7 电离层状态非理想时舰船目标所在分辨单元处理前后的多普勒谱

5 结束语

针对OTHR舰船目标检测中海杂波抑制的经典难题，本文提出一种改进的基于PSNR-HOSVD的自适应海杂波抑制算法。相比于已有的基于HOSVD的非自适应海杂波抑制算法，本文算法仅利用接收数据张量的一个等效模式展开矩阵的左奇异向量构建投影矩阵，有效地减小计算复杂度并提高海杂波抑制性能，同时通过引入PSNR参数，实现海杂波的自适应抑制。实测数据的实验结果表明，与同类算法相比，本文算法具有显著的优势。然而也注意到，运用PSNR-HOSVD算法进行海杂波抑制

时,低可探测舰船目标信号分量也会受到一定程度的抑制,如何在充分抑制海杂波的前提下更有效地保留低可探测舰船目标信号分量,有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 周文瑜,焦培南.超视距雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2008:6-10.
ZHOU Wenyu and JIAO Peinan. Technology for Over-the-Horizon Radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 6-10.
- [2] LUO Zhongtao, HE Zishu, CHEN Xuyuan, *et al.* Target location and height estimation via multipath signal and 2D array for sky-wave over-the-horizon radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(2): 617-631. doi: [10.1109/TAES.2015.140046](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140046).
- [3] WU Xia, CHEN Jianwen, and LU Kun. Investigation of system structure and information processing mechanism for cognitive skywave over-the-horizon radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2016, 27(4): 797-806. doi: [10.21629/JSEE.2016.04.08](https://doi.org/10.21629/JSEE.2016.04.08).
- [4] 李雪,郭晓彤,王岳松,等.基于已知传播模式数目的海杂波抑制方法研究[J].电波科学学报,2016,31(4):700-706. doi: [10.13443/j.cjors.2015110902](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2015110902).
LI Xue, GUO Xiaotong, WANG Yuesong, *et al.* Sea clutter suppression algorithm based on ionospheric propagation mode number[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(4): 700-706. doi: [10.13443/j.cjors.2015110902](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2015110902).
- [5] 关泽文,陈建文,鲍拯.一种改进的天波雷达海杂波循环对消方法[J].空军预警学院学报,2014,28(5):318-322. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2014.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2014.05.002).
GUAN Zewen, CHEN Jianwen, and BAO Zheng. Modified method of sea clutter cancellation for sky wave radar[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2014, 28(5): 318-322. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2014.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2014.05.002).
- [6] 严韬,陈建文,鲍拯.一种基于压缩感知的天波超视距雷达短时海杂波抑制方法[J].电子与信息学报,2017,39(4):945-952. doi: [10.11999/JEIT160576](https://doi.org/10.11999/JEIT160576).
YAN Tao, CHEN Jianwen, and BAO Zheng. Sea clutter suppression method for over-the-horizon radar with short coherent integration time based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(4): 945-952. doi: [10.11999/JEIT160576](https://doi.org/10.11999/JEIT160576).
- [7] 王春雨,卢庆广,左雷,等.小型化地波雷达海杂波散射系数仿真及SVD抑制方法研究[J].舰船电子工程,2013,33(1):86-93. doi: [10.3969/j.issn.1627-9730.2013.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1627-9730.2013.01.030).
WANG Chunyu, LU Qingguang, ZUO Lei, *et al.* Simulation of sea clutter scattering coefficient in miniaturized H-F surface radar and SVD method for suppressing[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013, 33(1): 86-93. doi: [10.3969/j.issn.1627-9730.2013.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1627-9730.2013.01.030).
- [8] POON M W Y, KHAN R H, and LE-NGOC S. A singular value decomposition (SVD) based method for suppressing ocean clutter in high frequency radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(3): 1421-1425. doi: [10.1109/78.205747](https://doi.org/10.1109/78.205747).
- [9] 陈俊斌,卢琨,刘兴钊.天波雷达短驻留时间下海杂波抑制的改进算法[J].上海交通大学学报,2004,38(S1):95-99. doi: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2004.s1.024](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2004.s1.024).
CHEN Junbin, LU Kun, and LIU Xingzhao. An improved ocean clutter cancellation algorithm with short dwells in sky-wave radars[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2004, 38(S1): 95-99. doi: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2004.s1.024](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2004.s1.024).
- [10] WANG G, XIA X G, ROOT B T, *et al.* Manoeuvring target detection in over-the-horizon radar using adaptive clutter rejection and adaptive chirplet transform[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 292. doi: [10.1049/ip-rsn:20030700](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20030700).
- [11] 蔚娜,李雪,李铁成.基于特征分解的多模杂波抑制方法[J].电波科学学报,2016,31(1):85-90. doi: [10.13443/j.cjors.2015021301](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2015021301).
WEI Na, LI Xue, and LI Tiecheng. An eigenvalue decomposition based method for suppressing multi-mode clutter[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2016, 31(1): 85-90. doi: [10.13443/j.cjors.2015021301](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2015021301).
- [12] 薄超,顾红,苏卫民,等.基于高阶奇异值分解的天波雷达海杂波抑制算法[J].电波科学学报,2014,29(4):715-722. doi: [10.13443/j.cjors.2013083001](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2013083001).
BO Chao, GU Hong, SU Weimin, *et al.* Over-the-horizon radar sea clutter suppression algorithm based on higher order singular value decomposition[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(4): 715-722. doi: [10.13443/j.cjors.2013083001](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2013083001).
- [13] 薄超,顾红,苏卫民.基于高阶奇异值分解的OTHR海杂波抑制算法[J].系统工程与电子技术,2014,36(5):872-878. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.10).
BO Chao, GU Hong, and SU Weimin. OTHR sea clutter suppression algorithm based on higher order singular value decomposition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(5): 872-878. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.10).
- [14] 赵志国,陈建文,鲍拯.一种改进的OTHR自适应海杂波抑制方法[J].系统工程与电子技术,2012,34(5):909-914. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2012.05.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2012.05.10).
ZHAO Zhiguo, CHEN Jianwen, and BAO Zheng. Modified adaptive ocean clutter suppression approach in OTHR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 909-914. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2012.05.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2012.05.10).
- [15] 关泽文,陈建文,鲍拯.天波超视距雷达海杂波模型修正与特

- 性分析[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(12): 2881–2888. doi: [10.11999/JEIT170224](https://doi.org/10.11999/JEIT170224).
- GUAN Zewen, CHEN Jianwen, and BAO Zheng. Model modifying and characteristics analyzing of ocean clutter in skywave over-the-horizon radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(12): 2881–2888. doi: [10.11999/JEIT170224](https://doi.org/10.11999/JEIT170224).
- [16] 严韬, 陈建文, 鲍拯. 基于WLS的OTHR短时自适应海杂波抑制方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2017, 45(8): 20–25. doi: [10.13245/j.hust.170805](https://doi.org/10.13245/j.hust.170805).
- YAN Tao, CHEN Jianwen, and BAO Zheng. Adaptive sea clutter suppression method for OTHR with short coherent integration time based on weighted least square[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2017, 45(8): 20–25. doi: [10.13245/j.hust.170805](https://doi.org/10.13245/j.hust.170805).
- [17] DE LATHAUWER L, DE MOOR B, and VANDEWALLE J. A multilinear singular value decomposition[J]. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 2000, 21(4): 1253–1278. doi: [10.1137/S0895479896305696](https://doi.org/10.1137/S0895479896305696).
- [18] XU Yangyang. Fast algorithms for higher-order singular value decomposition from incomplete data[J]. arXiv: 1411.4324.
- [19] LI Qingzhong, ZHANG Wandong, LI Ming, et al. Automatic detection of ship targets based on wavelet transform for HF surface wavelet radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(5): 714–718. doi: [10.1109/LGRS.2017.2673806](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2673806).
- 关泽文: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为天波超视距雷达信号处理研究.
- 陈建文: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为天波超视距雷达信号处理、机载预警雷达信号处理、阵列信号处理等研究.
- 鲍拯: 男, 1977年生, 博士, 讲师, 研究方向为天波超视距雷达信号处理、阵列信号处理等研究.