

# 用 MUSIC 算法解决海杂波背景下相干源探测问题

康春梅, 袁业术

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 强海杂波背景下进行相干源检测是舰载高频地波雷达(HFSWR)进行海上目标探测面临的一个主要问题. 本文利用对称阵列法对阵列输出信号的协方差矩阵进行了重构, 以解决相干源引起的降秩问题, 在此基础上通过对背景噪声的预白化处理来抑制一、二阶海杂波. MUSIC 算法对实录海杂波数据处理结果表明, 这种方法可以从展宽的一阶海浪谱中分辨出各相干信号源的方位信息.

关键词: 协方差矩阵; 相干源; 预白化; 海杂波; 高频地波雷达

中图分类号: TN955 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2004) 03-0502-03

## The Application of MUSIC Method to Detect the Coherent Sources on the Background of Ocean Clutter

KANG Chunmei, YUAN Yeshu

(Institute of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Coherent sources detection on the background of strong ocean clutter is a main problem for high frequency surface wave ship-mounted over-the-horizon radar to detect signals on the surface of the ocean. In this paper, a method of reconstructing the covariance matrix of the array data is presented, and then preprocessing the reconstructed matrix with prewhitened MUSIC algorithm to get the azimuth information of the coherent sources from the widened first order spectra. From results of the experiment on the collected data this processing method is effective.

Key words: covariance matrix; coherent sources; prewhitened MUSIC; ocean clutter; HFSWR

### 1 引言

高频地波雷达(HFSWR)发射的无线电波与海浪相互作用会在朝向或背离雷达的方向产生很强的后向散射, 对应于回波 Doppler 谱上能量很强但谱宽很窄(0.01~0.03Hz)的正负一阶 Bragg 峰<sup>[1]</sup>. 由于目标径向速度与谐振海浪的径向速度不同, 目标回波的 Doppler 谱线落在一阶海浪谱(Bragg 峰)外, 通常用波束形成法就可以获得目标的水平方位角. HFSWR 移植到军舰上后, 由于雷达平台的运动, 对不同方向海浪引入不同的附加多普勒频移, 这样表现在回波的多普勒谱上, 就得到具有一定带宽的一阶海杂波谱. 展宽谱将覆盖大部分的舰船检测区, 使得舰船目标的检测与估值变得非常困难. 除了一阶海杂波谱, 电磁波与海浪作用还会在雷达回波谱上形成连续的二阶海杂波谱, 由于一定海域内的海浪在短时间内具有很强的相关性, 因此反映到接收阵元就会形成各接收阵元之间空间相关的色噪声, 对于舰船目标, 空间相关的二阶海浪构成了目标检测的主要背景噪声<sup>[2]</sup>. 舰载 HFSWR 目标检测的主要任务就是将淹没在展宽的一阶海浪中的目标分离出来, 抑制二阶海杂波谱, 然后进行方位估值.

基于以上分析, 在此检测背景下的相干源检测主要面临两个问题: 展宽谱下的解相干处理以分离出一阶海浪和各信号源, 抑制空间色噪声的影响. 在过去的 20 年里, 人们对解相干技术做了大量的研究, 主要分为两大类: 一类是降维处理. 即采用牺牲有效阵元数来换取信号的不相关性. 例如, 空间平滑法, 前/后向预测投影矩阵法, 数据矩阵分解法等. 另一种是

非降维处理, 将去相关与空间谱估计结合起来处理, 例如, 空域滤波法, 频率平滑法, ESPRIT, 加权子空间拟合(WSF)等<sup>[3,4]</sup>. 降维处理以牺牲阵列孔径为代价, 不仅使阵列能够处理的最大信号源数减少, 同时也增大了有效阵列纳波束宽度. 而空域滤波法和频率平滑法不损失阵列孔径, 但必须具有信号大致方向和信源数的先验知识, 而且计算量比较大. 本文在深入研究阵列输出信号的协方差矩阵的结构基础上, 提出了一种利用对称阵列法<sup>[5]</sup>来重构协方差矩阵的解相关方法. 这种方法不牺牲阵列孔径, 且不需要信号方向的先验知识, 简单易行. 在此基础上本文对重构的协方差矩阵进行预白化处理<sup>[6]</sup>来从展宽的一阶谱中分辨出目标信号, 并抑制二阶海杂波的影响. 在数据处理的过程中, 本文在实际录取的海洋回波数据中加入了在特定距离以特定径向速度运动的仿真的相干信号源, MUSIC 谱分析结果表明, 改进的算法能够从雷达回波中提取目标的方位信息.

### 2 对称阵列法重构阵列输出信号的协方差矩阵

MUSIC 是特征结构类空间谱估计的典型代表, 这类方法是通过对阵元信号协方差阵作特征分解, 利用噪声子空间、信号子空间的正交特性实现空间谱估计. 假设阵元数为  $M$ , 存在  $D$  个独立的空间信号源, 噪声场为空间白噪声. 对协方差阵做特征分解, 将分解出  $D$  个较大的特征值, 其对应的特征向量张成信号子空间; 以及  $M-D$  个较小的特征值, 其对应的特征向量张成与信号子空间正交的噪声子空间. 进行谱峰搜索时, 在与噪声子空间正交的  $D$  个波达方向向量处将出现

峰值, 从而完成空间谱估计. 而当信号源相干时, 信号协方差矩阵的秩小于  $D$ , 则信号子空间的维数将小于信号源的个数. 某些相干源的方向向量将不再与噪声子空间正交, 这些信号源的空间谱线将不再出现峰值. 因此直接对协方差矩阵进行特征分解无法实现对相干信号源的空间分辨. 下面通过对协方差矩阵重构来使得其秩恢复为信号源数.

假设  $M$  元均匀直线阵的阵元间距为  $d$ . 空间信号源数为  $K+J$  个 ( $K+J < M$ ), 前  $K$  个信号源是相干的, 而后  $J$  个信号源是不相干的. 信号入射方向与天线阵轴向夹角为  $H_k$  ( $k = 1, \dots, K, \dots, K+J$ ). 从各信号源来的辐射信号到达天线时均可看作是平面波. 以第一个阵元为参考点, 则第  $i$  个阵元接收到的信号可以表示为:

$$X_i(t) = S(t) \sum_{k=1}^K A_k e^{-j d_i \sin(H_k)} + \sum_{k=K+1}^{K+J} S_k(t) e^{-j d_i \sin(H_k)} + n_i(t) \quad (1)$$

其中各相干信号源可用幅度相差复常数的同一个信号源来表示, 记为  $S(t)$ , 第  $k$  个相干源的复幅度记为  $a_k$ .  $S_k(t)$  是第  $k$  个信号源辐射到达天线阵参考点的波前信号.  $d_i$  是第  $i$  个阵元相对于参考阵元距离.  $n_i(t)$  是阵元噪声, 这里指二阶海杂波.

第  $i$  阵元和参考阵元之间的相关函数记为  $r(i)$

$$\begin{aligned} r(i) &= E[X_0(t) X_i^*(t)] \\ &= E \left\{ \left[ S(t) \sum_{k=1}^K A_k + \sum_{k=K+1}^{K+J} S_k(t) + n_0(t) \right] \right. \\ &\quad \left. \# \left[ S^*(t) \sum_{k=1}^K A_k^* e^{-j d_i \sin(H_k)} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{k=K+1}^{K+J} S_k^*(t) e^{-j d_i \sin(H_k)} + n_i^*(t) \right] \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

由于  $E[S(t) S_k(t)] = 0, k = K+1, \dots, K+J$ , 且阵元噪声和信号是不相关的, 所以  $r(i)$  可以展开为

$$\begin{aligned} r(i) &= \sum_{k=1}^K (a_k^* \sum_{i=1}^K A_i E[S(t) S^*(t)]) e^{j d_i \sin(H_k)} \\ &\quad + \sum_{k=K+1}^{K+J} \{ E[S_k(t) S_k^*(t)] \} e^{j d_i \sin(H_k)} + E[n_0(t) n_i^*(t)] \\ &= \sum_{k=1}^{K+J} b_k e^{j d_i \sin(H_k)} + R c_i, \quad i = 0, \dots, M-1 \quad (3) \end{aligned}$$

其中

$$b_k = \begin{cases} \sum_{i=1}^K A_i^* A_i E[S(t) S^*(t)], & k = 1, \dots, K \\ E[S_k(t) S_k^*(t)], & k = K+1, \dots, K+J \end{cases} \quad (4)$$

$$R c_i = E[n_0(t) n_i^*(t)], \quad i = 0, \dots, M-1 \quad (5)$$

由  $r(i)$  按下式形式排列成阵列输出信号的协方差矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(M-1) \\ r^*(1) & r(0) & \dots & r(M-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r^*(M-1) & r^*(M-2) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$R$  是 Toeplitz 矩阵, 由式(6)看出  $R$  可以分解为

$$R = A^* B A^T + R_c \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & & & \\ & b_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & w \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A = [a(H_1), a(H_2), \dots, a(H_{K+J})] \quad (9)$$

$$a(H_k) = [1, e^{j d_1 \sin(H_k)}, \dots, e^{j d_{M-1} \sin(H_k)}]^T \quad (10)$$

其中,  $R_c$  是重构的噪声协方差矩阵.  $A$  是信号方向向量, 是范德蒙矩阵, 只要各信号源方向不同,  $A$  的各列就不相关, 就是说  $A$  是列满秩的, 秩为  $K+J$  个, 所以  $A^* B A^T$  的秩为  $K+J$ .

可以看出, 重构后的协方差矩阵, 不会由于相干源的存在而引起降秩, 因此对于基于特征值分解进行空间超分辨处理的算法来说, 这种重构达到了解相关的目的.

### 3 预白化 MUSIC 处理

由于二阶海浪的相互作用, 各阵元间的雷达回波信号将是空间相关的. 随着阵元间噪声的空间相关性的增强, 在回波谱上将表现为零度方位的越来越尖锐的峰值, 从而使得 MUSIC 算法的分辨性能下降. 针对海杂波的这种回波特性, 我们可以先对噪声的阵列协方差矩阵进行预白化, 去掉噪声的空间相关性, 再进行 MUSIC 处理.

事实上, 我们无法得到噪声的协方差矩阵  $R_c$ , 但是可以根据具体情况预先进行估计, 假设估计的噪声协方差矩阵为  $R_c$ .  $R_c$  也是按照式(11)所示的形式构造的, 可以看出,  $R_c$  是正定阵<sup>[7]</sup>, 因此可以进行 Cholesky 分解. 记为

$$R_c = C^H C \quad (11)$$

其中,  $C$  是上三角阵, 上角标  $H$  表示共轭转置.

在式(7)两边分别左乘  $C^{-H}$ , 右乘  $C^{-1}$ , 得到转换的阵列协方差矩阵为

$$R = R_s + I_M \quad (12)$$

$$R_s = C^{-H} A^* B A^T C^{-1} \quad (13)$$

其中,  $I_M$  是  $M \times M$  的单位阵, 且  $R_s$  的秩仍然是  $K+J$  个.

对式(12)进行特征分解, 将分解出  $K+J$  个比较大的特征值和  $M - J - K$  个比较小的特征值, 记为  $K_1 \setminus K_2 \setminus \dots \setminus K_M$ . 令对应于特征值  $K_i$  ( $i = K+J+1, \dots, M$ ) 的特征向量为  $E_i$ .

定义阵列的方向向量为  $a(H) = [a(H_1), \dots, a(H_{K+J})]^T$ , 且  $\hat{a}(H) = C^{-1} a(H)$ , 则 MUSIC 空间谱估计函数定义为

$$P(H) = \frac{1}{\hat{a}^H(H) \left( \sum_{i=K+J+1}^M E_i E_i^H \right) \hat{a}(H)} \quad (14)$$

### 4 数据处理结果与分析

本文采用哈尔滨工业大学 1998 年海上试验的实录海杂波数据进行处理. 雷达平台采用 7 阵元的均匀直线天线阵, 阵元间距  $d = 14m$ . 载频  $f_0 = 51283MHz$ . 雷达平台运动速度  $v_p = 5m/s$ . 采样频率  $f_s = 97615625Hz$ , 每个调频周期采 256 点, 连续积累 256 个周期做一次距离 2 速度分辨. 为了验证理论分析的结果, 我们在第 16 个距离门第 143 个速度门加入两个仿真的相干信号源. 对于发射信号形式为线性调频伪码调幅连续波 (LFMCW) 的 HFSWR<sup>[8]</sup>, 如果不考虑伪码调幅及电磁波传播过程中的距离衰减因子, 其第  $m$  个距离门第  $n$  个速度分辨单元上的阵元接收目标信号的仿真模型为<sup>[4]</sup>:

$$s_0(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) \# e^{j 2 \pi f_c t} e^{j \pi S U_k t} e^{j \pi \nu_k t} \quad (15)$$

其中  $K$  为信号源数,  $\nu_k$  为目标的径向速度产生的多普勒频

率, 对应到第 143 个速度门为  $0.1283\text{Hz}$   $U_{kl} = -\frac{\#2\#d\#\sin H_k}{K}$  是波达方向  $H_k$  的信号在第 1 个阵元输出端形成的相位延迟, 本次实验中目标来向分别为  $40^\circ$  和  $60^\circ$ .  $A_k(t)$  和  $\angle_k$  分别为第  $k$  个信号源的随机幅度和随机相位. 当两个信号源的幅度成正比, 相位延迟为常数时可以认为它们是相干的. 最后调整目标和二阶海浪的信噪比为  $15\text{dB}$ . 图 1 给出了加入仿真目标后第 16 个距离门的海杂波谱, 其中目标位于第 143 个速度门, 经计算该速度门内一阶海杂波空间方位约为  $-91.5^\circ$ .

图 2 给出了该速度门内的海浪回波在各接收阵元间引起的空间相关系数. 阵元序列号  $i$  表示第  $i$  个阵元和参考阵元接收到的海浪回波信号的空间相关系数. 可见, 海杂波是空间相关的色噪声, 并且随阵元间距增大, 相关性变弱.

图 3~5 分别给出了解相干、预白化处理前、后的 MUSIC 谱图. 其中预白化处理时, 取信号所在的距离、速度单元以外

的与信号处海态基本相同的单元的采样数据作为估计的噪声的协方差矩阵. 从图中可以看出在相干源、空间色噪声的影响下直接 MUSIC 谱已经完全不能分辨出信号的空间方位. 而解相干处理后 MUSIC 算法的分辨力显著提高了, 但是由于一阶海杂波的影响, 空间谱图上出现了 3 个谱峰. 在此基础上的预白化处理由于对色噪声场的白化处理而使得一、二阶海浪都得到了一定程度的抑制, 从而使得两个相干信号源的分辨力得到进一步的改善.

以上分析也可以从图 6 中三种方法所得的协方差矩阵的特征值分布来得到验证. 解相干以及预白化处理后的特征值分布的差异变得更加明显, 这更有利于信号源数的判定以及使得信号子空间和噪声子空间的正交性更强, 从而信号方向向量在 MUSIC 谱上的谱线将变得更加尖锐, 这就相当于提高了分辨力.

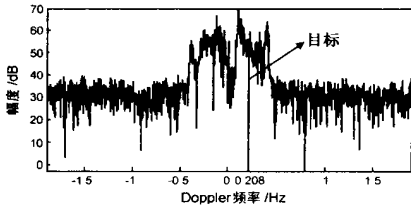


图 1 第 16 个距离门的回波谱图

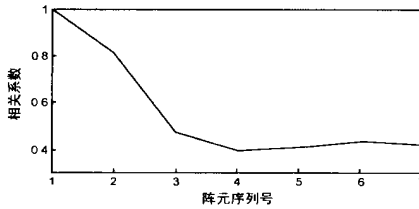


图 2 海浪回波在接收阵元间引起的空间相关系数

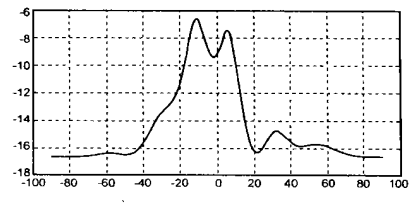


图 3 直接 MUSIC 谱估计图

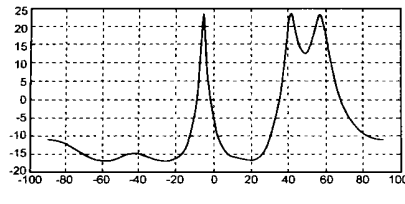


图 4 解相干处理后的 MUSIC 谱估计图

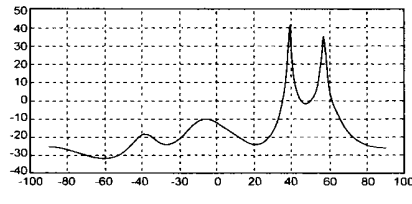


图 5 解相干+预白化处理后的 MUSIC 谱图

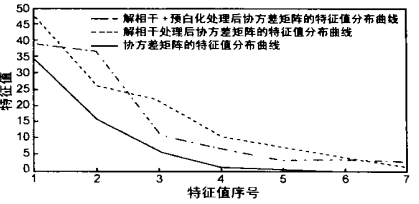


图 6 预处理前后协方差矩阵的特征值分布曲线

## 5 结论

本文针对探海雷达在海杂波背景下进行相干源探测的问题, 对传统的 MUSIC 算法进行了改进. 首先, 对空间信号的协方差矩阵进行了重构, 然后进行预白化处理. 数据处理结果表明这两种方法的结合可以较好地抑制海杂波的同时, 对相干信号源进行分辨.

### 参考文献:

[ 1 ] Donald E Barrick. The statistics of HF seaecho doppler spectra [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation. 1977, 25( 1 ): 19- 28.  
 [ 2 ] 谢俊好. 舰载高频地波雷达目标检测与估值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002. 23- 27.  
 [ 3 ] 刘德树, 罗景青, 张剑云. 空间谱估计及其应用[M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 1997. 8:41- 71.  
 [ 4 ] 陈辉, 王永良. 空间谱估计算法结构及仿真分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23( 8 ): 76- 79.  
 [ 5 ] 赵汉青, 文必洋, 吴敏. MUSIC 算法在相干探海雷达中的应用[J]. 武汉大学学报(理学版), 2001, 10: 649- 652.  
 [ 6 ] Junhao Xie, Yeshu Yuan, Yongtan Liu. Super2Resolution Processing for

HF Surface Wave Radar Based on Pre2Whitened MUSIC [ J ]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1998, 23( 4 ): 313- 321.

[ 7 ] 杨克勤. 矩阵分析[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 1986. 15- 18.  
 [ 8 ] 冀振元, 孟宪德, 周和秘. 高频地波超视距雷达海杂波信号分析[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22( 5 ): 12- 15.

### 作者简介:



康春梅 女, 1979 年 9 月生于黑龙江哈尔滨市, 2001 年毕业于哈尔滨工业大学电子与通信工程系, 现为哈尔滨工业大学信息与通信系统专业硕士研究生, 主要研究方向: 阵列信号处理, 空间超分辨技术, 基于高阶累计量的互谱估计.

袁业术 男, 1951 年生于黑龙江省绥化地区, 1978 年毕业于哈尔滨工业大学无线电工程系雷达专业, 1993- 1994 年在英国 Leeds 大学访问学者, 主要研究方向: 雷达总体设计, 雷达信号处理与检测, 目前从事高频地波舰载 OTH 雷达的研究工作.