

一种基于特征分析的强干扰抑制方法

金燕利¹, 章伟裕^{2,3}, 陈艳丽^{2,3}

(1. 海军驻沈阳地区电子系统军事代表室, 辽宁沈阳 110003;

2. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水声环境中微弱目标往往被掩盖在强干扰的旁瓣中而无法检测。研究如何抑制强干扰, 提高输出信噪比, 对提高声呐探测性能具有重要意义。假设干扰能量远大于目标信号能量。首先, 对接收数据协方差矩阵进行特征分解, 其中最大特征值对应的特征向量属于干扰特征向量。然后利用正交投影方法将阵列接收数据向干扰子空间的正交子空间投影, 将干扰数据去除, 从而达到抑制强干扰的目的。数值仿真和海试数据验证结果表明, 该强干扰抑制方法能够很好地抑制强干扰, 提高目标信号输出信噪比和目标方位估计可靠性, 可为后续的目标被动定位创造有利条件。

关键词: 特征分解; 正交投影; 干扰抑制

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-05-0469-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.05.016

A method of suppressing strong interference based on eigenanalysis

JIN Yan-li¹, ZHANG Wei-yu^{2,3}, CHEN Yan-li^{2,3}

(1. Shenyang Military Representative Office of Electronic System of Navy, Shenyang, Liaoning 110003, China;

2. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In shallow water environment, weak targets are always masked in the sidelobes of strong interference, thus the targets can not be detected. Studying how to suppress the strong interference and increase the output signal-to-noise ratio (SNR) is especially significant for improving the detection performance of sonar. In this paper, it is assumed that the interference energy is far greater than that of the target. Firstly, the eigen-decomposition of received data covariance matrix is made, and the eigenvector, which corresponds to the largest eigenvalue, is considered as the interference's eigenvector. Then the array received data are projected to the orthogonal subspace of interference subspace by using the orthogonal projection method. The data of interference is removed so that the purpose of suppressing strong interference can be achieved. Numerical simulation and experimental results show that this method can effectively suppress the strong interference, increase the output SNR, and enhance the reliability of directions of arrival (DOA) estimates of the targets. The performance of passive ranging will be possibly improved in this condition.

Key words: eigen-decomposition; orthogonal projection; interference suppression

0 引言

在复杂多变的水声环境中, 水听器阵列接收数据中真实的目标信号往往被强干扰所掩盖, 使得目标检测与跟踪非常困难。研究如何将强干扰进行抑制从而提高对微弱目标的检测能力显得尤为重要。

Capon^[1]于 1969 年提出了最小方差无失真响应波束形成方法(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR), 该方法通过约束在期望目标

方向增益一定的情况下, 最小化阵列输出功率, 从而达到抑制干扰的目的。但是, MVDR 方法在小快拍数或者存在阵元位置误差时会引起波束畸变, 严重时可能完全失效。

Cox^[2]于 2000 年提出了一种子空间的自适应干扰抑制方法。该方法假设干扰的能量远大于目标信号能量, 则较大特征值对应的特征向量都属于干扰子空间, 通过去除该特征值对应的特征向量从而达到抑制强干扰的目的。

本文只对阵列接收数据中能量最强的干扰进行抑制, 最大特征值对应的特征向量为干扰特征向量, 通过正交投影的方法来消除干扰的影响, 并通过数值仿真和海试数据对本文方法的可行性和有效性进行验证。

收稿日期: 2013-07-22; 修回日期: 2013-11-17

作者简介: 金燕利(1964—), 男, 河北泊头人, 高级工程师, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 章伟裕, E-mail: zwy@mail.ioa.ac.cn

1 基本数学模型

考虑一个 M 元均匀直线阵, 相邻阵元间距为 d , 假设期望目标从 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s$ 方向入射, 强干扰方位为 φ_D , 期望信号与干扰之间互相独立, 期望信号之间也互相独立, 噪声为均匀高斯白噪声, 则阵元接收数据^[3]中频率分量 f_i 对应的接收数据可以表示为:

$$\mathbf{X}(f_i) = \mathbf{A}_s(f_i)\mathbf{S}_s(f_i) + \mathbf{a}(f_i, \varphi_D)\mathbf{S}_I(f_i) + \mathbf{N}(f_i) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{a}(f_i, \varphi_D)$ 是强干扰导向矢量的频域表示; $\mathbf{S}_I(f_i)$ 是干扰数据的频域表示; $\mathbf{A}_s(f_i)$ 是期望目标导向矢量矩阵的频域表示; $\mathbf{S}_s(f_i)$ 是期望信号数据矢量的频域表示; $\mathbf{N}(f_i)$ 是噪声数据矢量的频域表示。

$$\mathbf{A}_s(f_i) = [\mathbf{a}(f_i, \theta_1), \mathbf{a}(f_i, \theta_2), \dots, \mathbf{a}(f_i, \theta_s)] \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{a}(f_i, \theta_i) = [1 \exp(-j\phi(f_i, \theta_i)) \cdots \exp(-j(M-1)\phi(f_i, \theta_i))],$$

$$\phi(f_i, \theta_i) = \frac{2\pi d \sin \theta_i}{\lambda(f_i)}, \quad \lambda(f_i) \text{ 是频率 } f_i \text{ 对应的波长。}$$

阵列接收数据的协方差矩阵可以表示为

$$\mathbf{R}(f_i) = E\{\mathbf{X}(f_i)\mathbf{X}^H(f_i)\} = \mathbf{R}_s(f_i) + \mathbf{R}_n(f_i) + \mathbf{R}_I(f_i) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}_s(f_i)$ 是频率为 f_i 的期望信号数据协方差矩阵; $\mathbf{R}_n(f_i)$ 是频率为 f_i 的噪声协方差矩阵; $\mathbf{R}_I(f_i)$ 是频率为 f_i 的干扰协方差矩阵。

2 强干扰抑制方法

首先对阵列接收数据协方差矩阵进行特征分解^[4], 有

$$\mathbf{R}(f_i) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \quad (4)$$

其中 λ_i 和 $\mathbf{e}_i$ 分别表示 $\mathbf{R}(f_i)$ 的第 i 个特征值以及对应的特征向量, 假设 λ_i 由小到大排列, 即 $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_M$ 。

在实际应用中, 由于强干扰影响, 微弱目标一般难以检测, 所以希望先通过干扰抑制方法将强干扰去除, 然后对微弱目标进行检测。由于干扰能量远大于目标信号能量, 则上述最大特征值对应的特征向量即为干扰特征向量 $\mathbf{e}_M$, 由此可以得到干扰子空间的正交投影算子为

$$\mathbf{P}_\perp = \mathbf{I} - \mathbf{e}_M \mathbf{e}_M^H \quad (5)$$

利用正交投影方法^[5]将干扰协方差矩阵 $\mathbf{R}_I(f_i)$ 从阵列接收数据协方差矩阵 $\mathbf{R}(f_i)$ 中去除, 从而得到净化后的数据协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}}(f_i) = \mathbf{P}_\perp \mathbf{R}(f_i) \mathbf{P}_\perp^H \quad (6)$$

之后使用波束形成方法(如 Conventional Beamformer, CBF)^[1,6]可以得到空间功率谱估计为

$$B(f_i, \theta) = \mathbf{w}^H(f_i, \theta) \hat{\mathbf{R}}(f_i) \mathbf{w}(f_i, \theta) \quad (7)$$

其中, CBF 方法的权值为

$$\mathbf{w}_{\text{CBF}}(f_i) = \mathbf{a}(f_i, \theta_s) \quad (8)$$

而 MVDR 方法的权值为

$$\mathbf{w}_{\text{MVDR}}(f_i) = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1}(f_i) \mathbf{a}(f_i, \theta_s)}{\mathbf{a}^H(\theta_s) \hat{\mathbf{R}}^{-1}(f_i) \mathbf{a}(f_i, \theta_s)} \quad (9)$$

频间非相干处理的宽带空间功率谱估计可以表示为

$$B(\theta) = \sum_{i=1}^L B(f_i, \theta) \quad (10)$$

3 数值仿真与分析

本节通过数值仿真来分析强干扰抑制方法的有效性。假设接收阵列为 48 阵元的均匀直线阵, 声速为 1500 m/s, 仿真采用单频信号, 频率为 100 Hz, 相邻阵元间距为半波长。阵元噪声为零均值的高斯白噪声, 各阵元间噪声相互独立, 噪声与信号、信号与干扰以及信号与信号之间都相互独立。两个信噪比为 0 dB 的目标分别位于 -30° 和 20° , 而干噪比为 40 dB 的强干扰位于 23° , 与其中一个微弱目标的角度非常靠近。干扰抑制前后 CBF 归一化空间功率谱估计结果对比如图 1 所示。

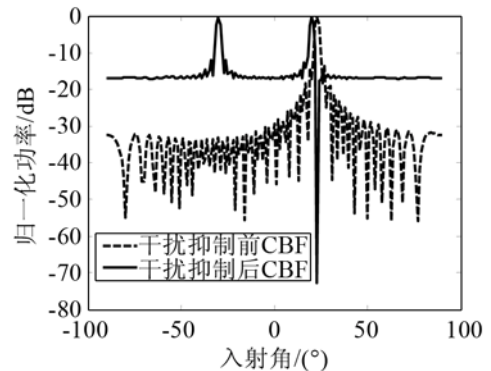


图 1 干扰抑制前后 CBF 归一化空间功率谱估计结果对比

Fig.1 Comparison of normalized spatial power spectrum estimation results before and after using interference suppression method

图 1 结果表明, 在采用干扰抑制方法处理之前, 干扰能量远大于目标信号能量, CBF 方位估计中的目标信号已经完全掩盖在干扰的旁瓣中而无法检测; 经过干扰抑制方法处理后, 23° 方向的干扰已经被完全抑制, -30° 和 20° 两个方向的微弱目标都被可靠地检测了出来。该数值仿真结果表明, 本文的强干扰抑制方法是有效的。

4 实验数据研究

2005年6月,在某海域进行了一次海底水平阵声学测量实验,实验海域水深约30 m,水中声速约为1493 m/s。海底水平阵位置如图2所示,阵列流形近似于直线阵,阵元数为43个,阵元是各向同性的,相邻阵元间距约为1.5 m,水听器信号的采样率为4000 Hz,数据处理频段为100~300 Hz,每8192个点做一次FFT变换,共412个频点,一次处理数据长度约为20 s,波束形成为360°全方位搜索,角度间隔为1°。

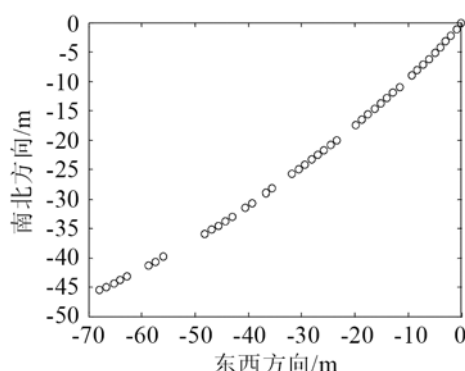


图2 水平阵阵元位置分布

Fig.2 The distribution of element positions along a horizontal array

图3(a)是干扰抑制前的CBF方位估计结果,可以看出在280°~340°角度范围内存在一个强干扰,该干扰强度远大于其他微弱目标的强度,微弱目标掩盖在其旁瓣中;而且在230°左右方位呈现出了一个干扰明显的镜像信号源现象,使得该角度范围内的微弱目标也被掩盖在镜像信号源的旁瓣中,从而导致这些微弱目标的检测与跟踪难以有效实现。图3(b)是经过强干扰抑制方法处理后的CBF方位估计结果,从图中可以看出,强干扰已经被有效抑制,干扰附近的微弱目标轨迹显现了出来,而且,干扰抑制前完全掩盖在强干扰镜像旁瓣中的128°左右角度的微弱目标也变得更加清晰了。

下面从图3某一时刻的方位估计结果来分析强干扰抑制方法的有效性。图4为图3虚线时间点对应的干扰抑制前后的方位功率谱估计结果。

图4结果表明,294°角度的强干扰被有效地抑制了,附近的几个微弱目标的输出信噪比提高了约3~6 dB,为后续的目标跟踪提供了有利条件。从图中还可以看出,由于强干扰的镜像也被抑制掉,所以远离干扰方位的145°角度左右的微弱目标也变得更加明显了。

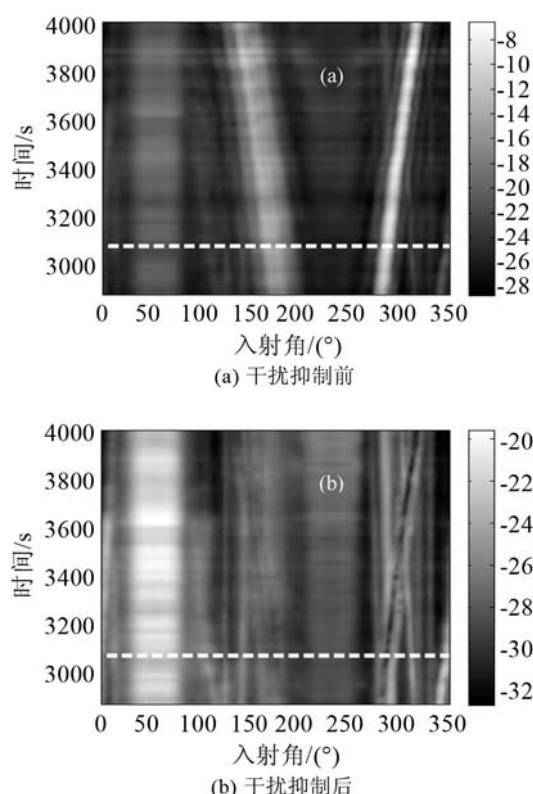


图3 干扰抑制前后的方位功率谱估计结果

Fig.3 Spatial power spectrum estimation results before and after using interference suppression method

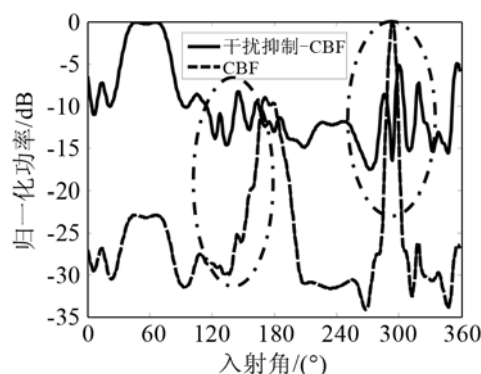


图4 图3虚线时间点对应的干扰抑制前后的方位功率谱估计结果

Fig.4 Spatial power spectrum estimation results before and after using interference suppression method at the time of the dotted line in Fig.3

5 结论

提出了一种基于特征分析的强干扰抑制方法,假设干扰能量远远大于目标信号能量,所以最大特征值所对应的特征向量即为强干扰的特征向量,通过正交投影方法将干扰的影响去除,从而达到抑制干扰的目的。数值仿真和一次浅海海底水平阵实验数据分析验证表明,本文方法可以有效地抑制强干扰和提高微弱目标的输出信噪

比,为微弱目标的检测与跟踪创造了有利条件。

本文方法的性能与干扰-目标之间的相关性有关,干扰与目标相关性越强,性能下降越明显,在后续研究中,我们将通过空间平滑处理等方法来解决干扰-目标间相关性的不利影响。实际应用中,环境因素和系统参数的获取精度对本文方法的性能也有影响,处理频率越低,影响越小。

本文的海试数据研究和数值仿真结果表明,该方法在目前所研究的工作频段内,对环境和系统参数具有较好的宽容性。后续还将研究干扰能量与微弱目标能量接近情况下的干扰抑制性能,以提高干扰抑制方法的适用范围和使用价值。

致谢:感谢参加 2005 年 6 月海试的全体人员,他们的实验为本文的科学研究工作提供了宝贵的实验数据。

参 考 文 献

- [1] Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analy-

sis[J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(8): 1408-1418.

- [2] Cox H. Multi-rate adaptive beamforming(MRABF)[J]. In: Proc. Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, Cambridge MA, 2000: 306-309.
- [3] 王永良,陈辉,彭应宁.空间谱估计与算法[M].北京:清华大学出版社,2004: 18-81.
- WANG Yongliang, CHEN Hui and PENG Yingning. Spatial spectrum estimation and algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 18-81.
- [4] 张贤达.矩阵分析与应用[M].北京:清华大学出版社,2004: 64-71.
- ZHANG Xianda. Matrix analysis and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 64-71.
- [5] Subbaram H, Abend K. Interference suppression via orthogonal projections: a performance analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(9): 1187-1194.
- [6] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research: the parametric approach[J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 1996, 13(4): 67-94.



“蛟龙”号载人潜水器控制与声学系统研究团队荣获 全国专业技术人才先进集体荣誉称号

2014 年,“蛟龙”号载人潜水器控制与声学系统荣获全国专业技术人才先进集体荣誉称号。“蛟龙”号载人潜水器在 2012 年海试中下潜深度达到 7062 米,创造了作业型载人潜水器下潜深度新的世界纪录,使我国成为世界上第五个掌握大深度载人深潜技术的国家,标志着我国载人深潜技术达到了国际先进水平,大大提高了我国深海科学考察和深海资源勘探能力。

“蛟龙”号载人潜水器包括结构、控制、声学等多个系统,控制与声学系统是“蛟龙”号载人潜水器的核心部分。中国科学院“蛟龙”号载人潜水器控制与声学系统研究集体成功研制了我国首套具有完全自主知识产权、性能国际领先的深海载人潜水器控制与声学系统,攻克了“高速水声通信”技术和“自动航行和悬停定位”技术,占据“蛟龙”号载人潜水器 3 大国际领先技术中的 2 项,为“蛟龙”号的成功研制做出了突出贡献。

该集体研制了“蛟龙”号载入潜水器航行控制系统、自主深海导航系统、作业深度不小于 7000 米的数字水声通信机、高分辨率测深侧扫声呐,以及融合载人潜水器及水面支持母船相关信息的综合信息显控、水面监控和数据分析平台。其中,数字水声通信机的高速图像传输功能是国际上其他载人潜水器的水声通信系统所不具备的;高分辨率测深侧扫声呐也是国际上其他同类载人潜水器不具备的。

在“蛟龙”号载人潜水器研制过程中,该研究集体提出了状态及参数联合估计算法、控制参数在线自动调整等先进航行控制算法,实现了“蛟龙”号的自动定高、定深、定向控制,保障了“蛟龙”号的近海底全自动驾驶以及精确悬停定位等同类潜水器不具备的先进功能;设计了独立的应急手操航行控制系统,在计算机的系统失效后仍能保证对“蛟龙”号三个自由度上的运动控制;提出了先进的水声通信和信号处理技术,采用这些技术研发的全数字水声通信机在通信过程中计算量小、误码率低、抗噪声能力强,处于国际领先水平;发展了多子阵子空间拟合波达方向估计方法,提出了特征空间信源数估计方法,在此理论基础上研制的高分辨率测深侧扫声呐具有更高的分辨率和适用性,使“蛟龙”号在海底精细地形测绘能力方面领先于国际其他同类载人潜水器;提出了基于网络结构的载人潜水器控制系统集成体系,以工业以太网为主干,将各子系统融为一体,使整个控制系统层次分明、逻辑清晰,系统可移植性及扩展性强,实现了较高的系统安全性、可靠性和可维护性。

2013 年“蛟龙”号转入试验性应用,并首次搭载科学家进行下潜,取得了大量宝贵样品,标志着我国已经具备了进行深海实地科学考察和研究的能力。