

基于时空级联自适应的多频信号混响抑制方法

詹昊可¹, 蔡志明², 苑秉成¹

(1. 海军工程大学兵器工程系, 武汉 430033; 2. 海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 针对使用多频信号的高速运动的前视主动声纳, 对运算量小、较为实用的降维时空自适应抑制混响方法进行了研究, 分析得出多频信号的混响空时二维分布特性, 在此基础上提出了基于时空级联自适应处理非相干叠加多频信号混响抑制方法, 仿真实验研究表明: 该方法具有较好的多频信号混响抑制性能, 而且大大降低了系统的维数和运算量, 便于实际工程实现。

关键词: 时空自适应; 时空级联; 混响; 多频信号

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-06-0803-04

A method of cascaded time-space adaptive multi-frequency reverberation suppression

ZHAN Hao-ke^{1,3}, CAI Zhi-ming², YUAN Bing-cheng³

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In multi-frequency condition, the space-time adaptive processing of less complexity (the cascaded time-space) is studied to suppress reverberation in active sonar. Based on which a method of noncoherent accumulation after space-time adaptive multi-frequency reverberation suppression is established. The simulation results show that the space-time adaptive approaches can suppress the multi-frequency reverberation effectively.

Key words: Space-time adaptive; The cascaded time-space; Multi-frequency; Reverberation

1 引言

混响抑制一直是水声信号处理的难题。为了提高混响背景下信号的检测性能, 抗混响技术研究主要集中在两个方面: 一是信号处理算法研究^[1], 二是发射波形设计。对于第一方面, 文献[2]研究表明对于窄带信号情形, 空时二维自适应(STAP)方法具有良好的混响抑制性能, 其基本思想是基于不同入射锥角的界面混响的多普勒频率是不同的原理, 来区分混响和目标回波信号的频谱。对于第二方面, 宽带信号的分析 and 处理已成为研究的热点。但宽带信号具有大的多普勒容限, 使得利用多普勒与空间锥角的关系来抑制混响的 STAP 方法出现困难。基于以上原因, 文献[3]针

对拖曳线阵研究了梳状谱信号混响的抑制方法, 指出基于空时二维最优处理(OPT)非相干叠加的方法对拖曳线阵具有较好的混响抑制性能。

虽然 OPT 方法拥有最佳性能, 但由于系统的维数较高, 对于实时性要求较高的场合, 难以实现。因此目前降低系统处理维数的准最优处理方法的研究成为了 STAP 处理研究的核心内容^[4]。其中较为典型是运算量小、较为实用的时空级联自适应(TSA)方法^[5]。

基于以上考虑, 本文针对高速运动的前视阵主动声纳, 分析得出其多频信号混响的空时二维分布, 在此基础上提出了基于 TSA 的非相干叠加混响抑制方法, 大大降低了系统的维数, 提高了计算速度, 便于实际工程实现, 最后结合仿真数据进行性能验证。

2 多频信号混响空时二维分布

混响就是主动声纳接收到的大量散射信号之和, 这些散射信号是由分布在海洋环境中的无数点

收稿日期: 2007-12-25; 修回日期: 2008-03-10

基金项目: 国家安全重大基础研究课题资助(613660202)

作者简介: 詹昊可(1977-), 男, 浙江诸暨人, 博士生, 研究方向为武器系统与运用工程。

通讯作者: 詹昊可, E-mail: hawkzhan@yahoo.com.cn

状散射体的反向散射所形成的,它的性质由声纳系统、海洋环境、声纳平台运动所决定。特别是在浅海,界面混响将成为运动的前向主动声纳主要的干扰。而且声纳波束触及界面,混响将从不同的锥角入射,造成多普勒的扩展,这种扩展具有空时耦合特性,在频域上与目标回波的频谱混叠在一起。文献[5]以海底混响为例,分析得出当斜距 $R \geq 5H$ (H 为声纳平台与海底的距离)时,海底某散射单元的多普勒频移为

$$f_d = \pm f_{d\max} \sqrt{\cos^2 \varphi - \cos^2 \alpha} \quad (1)$$

其中 $f_{d\max} = 2V/\lambda$, V 为声纳运动平台的速度, λ 为波长, α 为入射锥角, φ 为俯仰角。

对于多频信号情形,发射信号形式为

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \sum_{n=-N}^N \cos[2\pi(f_0 + n\Delta f)t] \quad (2)$$

其中: E 为发射能量, T 为发射脉宽, f_0 为发射中心频率, Δf 为频率间隔, N 为频点个数, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形包络。根据式(1)可得多频信号的混响空时二维分布,考虑实际情况,由于前向主动声纳基阵只向前辐射声能,因此实际的多频信号混响二维分布是一系列半圆。图1画出了 $H=30\text{m}$, 斜距 $R > 5H$ 时的多频信号混响空时二维分布情况。

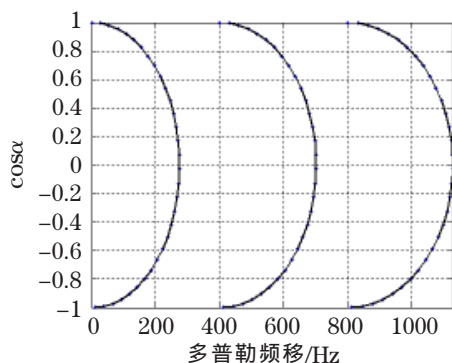


图1 多频信号混响空时二维分布 ($H=30\text{m}$)

Fig.1 Space-time multi-frequency reverberation trajectories ($H=30\text{m}$)

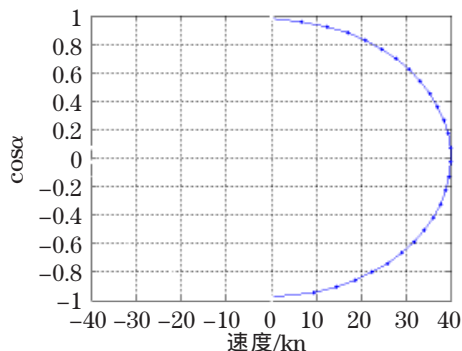


图2 多频信号混响空速二维分布

Fig.2 Space-velocity multi-frequency reverberation trajectories

由于每个频点下的空时二维分布都反映了同一平台的速度,因此多频信号混响在空间速度平面中的分布为一半圆,见图2。由于散射体随机起伏造成的多普勒展宽,使得实际的混响分布应为圆环状,因此对于多频信号混响的处理,可以先单独对每个频点进行混响抑制和目标检测,再根据平台运动速度进行非相干叠加。

进一步分析图1可知,当多频信号相邻两个频点距离过近时,在空时二维平面上这两频点对应的混响分布将会产生多普勒模糊,即无法分辨是由哪个频点产生的多普勒频移,这对非相干叠加的处理方法很不利。为避免多普勒模糊,两个频点之间的距离必须大于最大多普勒频移,可从一个频率带到另一个频率带设置一个过渡带。相邻两频点间距选择过小时,通过带通滤波器的过渡带也会产生多普勒模糊。为避免多普勒模糊,实际使用中相邻两频点之间的距离必须大于最大多普勒频移。

3 基于 TSA 非相干叠加空时处理

对于 CW 信号混响的处理, TSA 方法首先使用时域滤波器组对每个多普勒通道进行时域滤波处理,使每个多普勒通道输出的混响,在空域上仅位于一小锥角区,后续空域自适应处理将小锥角区的混响有效滤除^[6]。基于 TSA 非相干叠加空时处理方法相当于同时对多个 CW 信号混响进行空时处理,其原理如图3所示。其中 N 为阵元数, J 为多频信号总的频点数, Z_k 表示经 TSA 法处理后非相干叠加的第 k 个多普勒通道的输出。

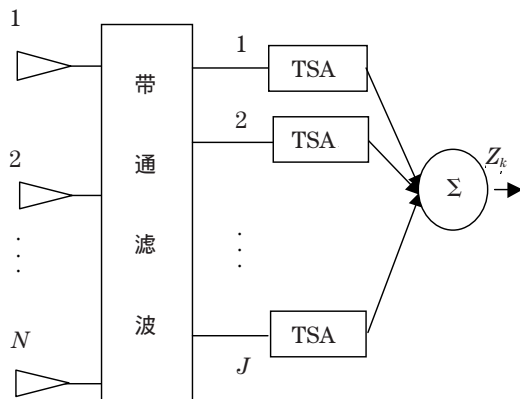


图3 基于 TSA 非相干叠加处理原理框图

Fig.3 The theory of noncoherent accumulation after TSA

设 $x_k(n)$ 为第 n 个阵元通道第 k ($k=1, 2, \dots, K$) 个样本, 则第 n 个阵元通道的数据矢量为 $X_t(n) = [x_1(n) \ x_2(n) \ \dots \ x_K(n)]^T$ 。这样实时二维数据矢量

$X(NK \times 1)$ 可表示为 $X = [X_t^T(1) \ X_t^T(2) \ \cdots \ X_t^T(N)]^T$ 。 $X(NK \times 1)$ 通过每个频点对应的多普勒带通滤波器, 则二维数据矢量可表示为

$$\bar{X} = [X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_J] \tag{3}$$

其中 $\bar{X}$ 的维数为 $(NK \times J)$, J 为多频信号总的频点数。设第 J 个频点下, 第 k 个多普勒通道中, 时域滤波器权矢量为 $W_t(f_{jk})$, 则各阵元通道第 k 个多普勒通道的输出为

$$Z_{jk} = [W_s^H \otimes W_t^H(f_{jk})] X_j \tag{4}$$

其中, $j=1, 2, \cdots, J$, $\otimes$ 表示 Kronecker 直积, $W_s(N \times 1)$ 为空域自适应权矢量, 通过最小方差无失真响应波束(MVDR)形成准则, 确定

$$W_s = \mu R_{jk}^{-1} S_s(\alpha) \tag{5}$$

其中 μ 为常数, $j=1, 2, \cdots, J$, $S_s(\alpha)$ 为归一化空域导向矢量, R_{jk} 为混响协方差矩阵。

于是对于整个多频信号, 则第 k 个多普勒通道的最后输出为

$$Z_k = 1/J \sum_{j=1}^J Z_{jk} \tag{6}$$

运算量的大小主要决定于自适应权的求解, 因此 TSA 方法的运算量约为 N^3K , 而 OPT 的运算量约为 $(NK)^3$ [4]。

4 处理性能分析

仿真试验中相关的参数：主动声纳阵型为半球阵, 直径为 430mm, 在半球的大圆上有一排共 14 个基元, 基元间隔的圆心角为 12°; 另一排有 13 个基元, 圆心角为 12.3°。整个声纳阵共有基元 27 个, 都为理想基元, 即没有幅度和相位误差, 阵距海底 30m。发射中心频率为 13kHz 多频信号, 带宽为 5kHz, 共六个频点, 脉宽为 43ms, 处于 $\alpha=\pi/2$ 方向, 平台运动速度为 $V=40\text{kn}$ 。仿真噪声混响比为 -20dB。时域滤波器阶数为 $K=20$ 。

为了对基于 TSA 非相干叠加空时处理性能分析有一参照, 本文还对基于 OPT 非相干叠加空时处理、基于自身多普勒抑制和基于常规非相干叠加空时处理(CST)进行了仿真分析, 其中自身多普勒抑制方法为常规波束形成后, 设置陷波器滤除每个方位所对应的自身多普勒, 再作匹配滤波处理(CST+ODN); CST 为常规波束形成后, 作匹配滤波处理。

图 4 表示由最小方差法计算的主动声纳多频

信号混响的空速二维功率谱图。从图 4 可知混响多普勒频率和 $\cos\alpha$ 的关系为一半环, 与理论分析相符。图 5 给出了在相同条件下四种方法的信号方向的处理增益(IF), 比较可得: 基于 OPT 非相干叠加空时方法具有最高的处理增益; 与其比较, 基于 TSA 非相干叠加空时方法损失最大不超过 3dB; 基于 CST 非相干叠加空时方法性能最差; 基于 CST+ODN 非相干叠加空时方法在主混响区有较大的性能改善, 其它区域则性能不佳。

图 6~9 分别给出了四种方法处理后, 输出功

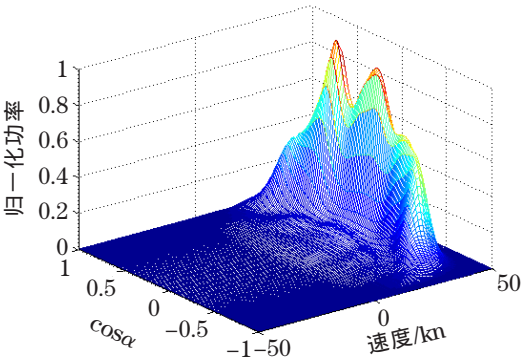


图 4 多频信号混响空速二维最小方差谱
Fig.4 Space-velocity multi-frequency reverberation spectrum

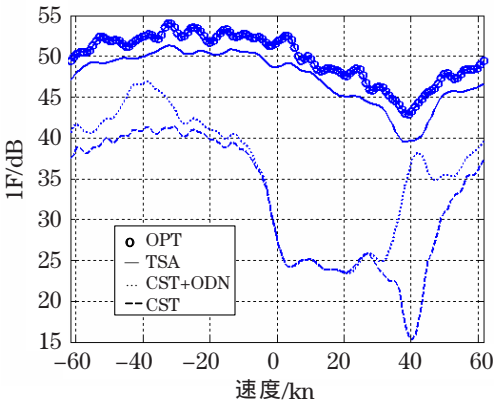


图 5 $\alpha=\pi/2$ 四种方法处理增益比较
Fig.5 Contrast of four improvement factors

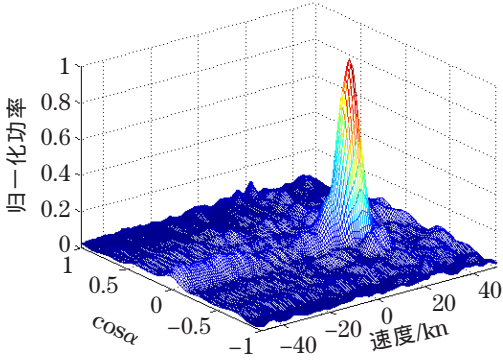


图 6 基于 OPT 非相干叠加空时处理结果
Fig.6 Output after processing of noncoherent accumulation after OPT

率的空时二维分布,结果表明:基于 OPT 非相干叠加空时处理的结果最好,混响抑制的较为彻底,目标清晰可见,但其代价是计算量太大,从仿真数据的处理来看,要比基于 TSA 非相干叠加空时处理方法大约大 $K^2=400$ 倍;从图 7 可看出,基于 TSA

非相干叠加空时处理方法也取得了较好的结果;基于 CST+ODN 非相干叠加空时处理后,不经指出难以判断目标的存在。而基于 CST 非相干叠加空时方法处理后,混响剩余较多,难以判断目标的存在。

5 结 论

本文研究了空时二维抑制多频信号混响方法在主动声纳中的应用。重点研究了基于 TSA 非相干叠加多频信号空时混响抑制方法。仿真数据处理结果表明,该方法具有较好的抑制多频信号混响性能,在处理性能损失不大的情况下,处理速度远远快于基于 OPT 非相干叠加空时处理方法,而且实际使用时,阵元端带通和时域滤波器组可用 FFT 代替,这便于大规模并行处理实现,因此在主动声纳中,基于 TSA 非相干叠加空时处理方法具有较好的混响抑制性能,且具有较低的系统维数,便于实际工程实现,在主动声纳目标检测中具有研究价值。

参 考 文 献

- [1] 向大威, 顾亚平, 李秀红, 等. 自适应声干扰抵消系统[J]. 声学技术, 1996, **15**(1): 10-17.
XIANG Dawei, GU Yaping, LI Xiuhong et al. Adaptive sound interfere suppression system[J]. Technical Acoustics. 1996, **15**(1): 10-17.
- [2] Kremm R. Principles of space-time adaptive processing[M]. The Institution of Electrical Engineers. London, 2002. 15-30.
- [3] Karine Mio, Yves Chocheyra, Yves Doisy. Space time adaptive processing for low frequency sonar[A]. Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition[C]. 2000. 1315-1319.
- [4] Brown R, Wicks M, ZHANG Q, WANG H. A space-time adaptive processing approach for improved performance and affordability[A]. 1996 IEEE National Radar Conf. MI [C]. USA, May 1996. 321-326.
- [5] WANG Yongliang, PENG Yingning. Configuration and performance analysis of space-time adaptive signal processor for airborne radar[A]. IEEE 1997 National Radar Conf. Syracuse[C]. New York, USA, 1997. 343-347.
- [6] 詹昊可, 蔡志明, 苑秉成. 一种共形阵主动声纳空时自适应混响抑制方法[J]. 声学技术, 2007, **26**(3): 488-492.
ZHAN Haoke, CAI Zhiming, YUAN Bingcheng. Space-time adaptive reverberation suppression in active conformal sonar[J]. Technical Acoustics. 2007, **26**(3): 488-492.

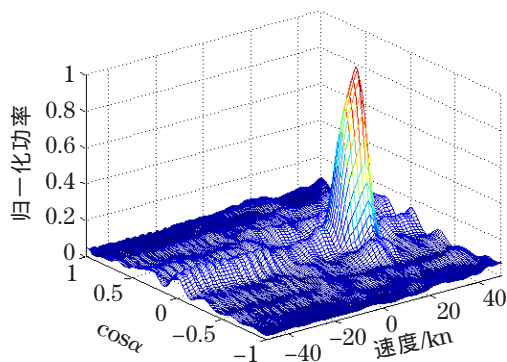


图 7 基于 TSA 非相干叠加空时处理结果
Fig.7 Output after processing of noncoherent accumulation after TSA

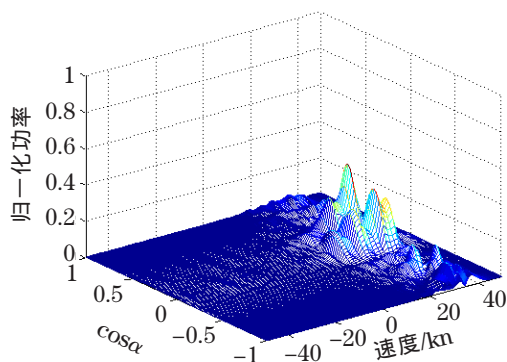


图 8 基于 CST+ODN 非相干叠加空时处理结果
Fig.8 Output after processing of noncoherent accumulation after CST+ODN

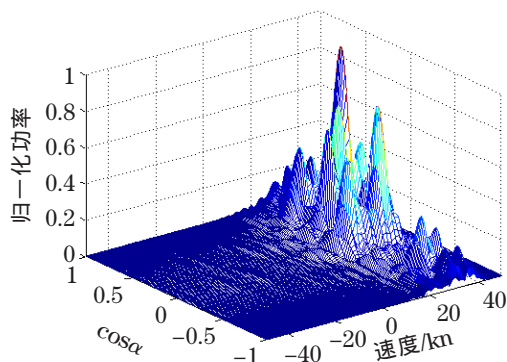


图 9 基于 CST 非相干叠加空时处理结果
Fig.9 Output after processing of noncoherent accumulation after CST