

一种改进的被动合成孔径算法用于舰船辐射噪声检测

赵 闪^{*①②} 孙长瑜^① 陈新华^① 余华兵^①

^①(中国科学院声学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘 要: 舰船辐射噪声在低频段具有稳定的线谱成分, 利用该线谱成分可以实现对水下目标的检测。被动合成孔径声呐(Passive Synthetic Aperture Sonar, PSAS)技术是对小孔径基阵沿直线运动接收到的信号进行孔径合成处理, 以时间增益换取空间增益, 进而提高对弱目标信号的检测能力。该文中提出一种改进的被动合成孔径算法较之常规孔径合成算法不要求阵元相互重叠, 综合考虑接收阵元在时间域和空间域上变化, 分时间段进行处理, 继而可直接进行时延补偿, 理论分析结合实际仿真、海试数据综合验证算法及其性能。研究表明: 改进的被动合成孔径算法具有一定有效性和可行性, 且便于工程实际应用。

关键词: 被动合成孔径声呐; 舰船辐射噪声; 时延补偿

中图分类号: TB565

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)02-0426-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00879

An Improved Passive Synthetic Aperture Sonar Algorithm Application for Detecting of the Ship Radiated Noise

Zhao Shan^{①②} Sun Chang-yu^① Chen Xin-hua^① Yu Hua-bing^①

^①(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The ship radiated noise is provided with a stable part of line-spectrum, and the underwater target can be effectively detected by using the line-spectrum signal. The technology of Passive Synthetic Aperture Sonar (PSAS), processing for space gain exchange by time gain, which is used for synthetic processing the receiving signal of small aperture array along the linear motion, thereby the detection ability of the weak target is more excellent. An improved PSAS algorithm is proposed in this paper, compared to conventional aperture synthesis algorithm, it does not require the array element to overlap, and it processes the received signals in a segment of time by the overall valuation array element changes on the time domain and the spatial domain, then it can directly carry out delayed compensation. Through theoretical analysis and actual simulation on ocean-trial, the validity and feasibility of the algorithm are proved. Moreover, it is suitable enough for practical engineering.

Key words: Passive Synthetic Aperture Sonar (PSAS); Ship radiated noise; Delayed compensation

1 引言

被动声呐是根据目标航行时发出的辐射噪声来检测目标并判别目标类型^[1]的, 利用舰船辐射噪声对目标进行检测^[2]提取是水声理论中很重要的研究的内容。纵观声呐发展史, 高分辨和高增益一直是声呐领域追求的目标, 提高距离分辨力通常是利用匹配滤波技术去完成, 而为了提高方位分辨力, 常规声呐系统是通过提高发射信号频率和增加接收阵元数来达到此目的。被动合成孔径声呐(Passive Synthetic Aperture Sonar, PSAS)技术是一种被动接

收目标噪声^[3]、通过阵列的运动和信号处理方法对小孔径基阵进行孔径合成处理^[4], 利用时空等价关系可得到将较长时间的时间增益转换为因物理尺度受限而难以获得的较大空间增益, 从而使得阵的总增益得到提高。PSAS 处理依靠短阵的机动突破孔径阵列的限制, 获得更高的增益, 进而提高对弱目标信号的检测能力。

舰船辐射噪声在低频段具有稳定的线谱^[5]成分, 其特征信息丰富, 利用该线谱成分可以实现对水下目标的检测。受平台机动等因素限制, 根据已有小孔径阵列虚拟出大孔径阵列随着被动合成孔径技术的发展已经成为可能。常规被动合成孔径算法在阵列做匀速运动时利用其在不同时间间隔上接收到信号存在的相位差, 进行相位补偿及信号相关融合, 从而生成一个虚拟大孔径阵列。

2012-07-09 收到, 2012-09-13 改回

中科院创新基金项目和国家海洋公益性行业科研专项经费项目(20100500106)资助课题

*通信作者: 赵闪 zhaoshan09@mails.gucas.ac.cn

由于常规 PSAS 算法相位修正补偿时考虑间隔时间固定的两个连续观测位置上, 阵元移动前后完全重合, 而实际水下复杂环境下介质和路径扰动会引起的阵列移动偏差, 利用常规被动合成孔径声呐算法相位修正补偿在间隔时间固定的两个连续位置上, 阵元孔径前后不完全重合, 使得相位估计因子出现误差甚至错误, 即 PSAS 算法如扩展拖曳尺寸算法进行阵列扩展中存在有重叠阵元位置约束问题, 导致不能有效检测水下目标信号, 实用性较差。改进的被动合成孔径算法充分考虑水声信道等复杂因素影响, 分时间段处理子模块可以直接用于相位延时补偿, 不用考虑阵元相互完全重叠, 且由于在波束域代替其在阵元域处理, 无需知道辐射噪声信号源的方位角、确切频率和准确的拖曳阵速度, 通过时间延迟及空间位置移动可获得相位修正因子, 进一步结合相位估计补偿修正即能合成水听器的接收数据, 该算法应用于信号检测不受孔径位置的约束限制, 对微弱目标信号的检测能力优异, 速度较快, 其具有一定的工程实用性。

2 舰船辐射噪声概述

舰船辐射噪声根据谱特性划分, 包括平稳连续谱、线谱和时变调制谱^[6]等。研究表明, 由于螺旋桨桨叶切割水体会产生单频分量等原因, 水下目标具有丰富的线谱成分, 特别是在低频段, 该线谱具有相当好的稳定性, 在数百秒内变化小于 1 Hz, 在频率范围 50~1500 Hz, 海洋声信号的空间相关长度达到了 300 个波长, 对于单频信号, 时间相关长度不小于几分钟, 甚至可达十几分钟, 此稳定强线谱的空间相关长度和时间相干长度为合成一个比物理孔径大得多的有效孔径提供了可能, 而且提取这些线谱成分对水下低噪声、安静型目标的识别和研究具有十分重要的意义。

舰船辐射噪声检测^[7]是水下大型目标的总体技术、声呐技术、隐身和反隐身技术及目标分类与识别等众多领域的一个基础性问题。通常情况下辐射噪声线谱具有频率低和相对强的宽带背景噪声的弱信号特点, 对舰船辐射噪声需要将阵元接收到的目标辐射信号以具有较高的空间增益的相应算法进行检测, 在同样信噪比条件下, 利用大孔径阵列检测出小孔径阵列所检测不准确的弱目标信号, 进而判断辐射噪声的舰船类型。

3 PSAS 的数学模型及扩展拖曳阵 ETAM (Extended Towed Array of Moving) 算法

声呐系统中, 高分辨力及信号的处理增益是非

常重要的指标, 进行水下舰船辐射噪声检测时, 线列阵被广泛地应用。声呐系统对水下舰船辐射等目标信号检测主要靠常规波束形成来实现, 基阵的处理增益和方位分辨力取决于线列阵阵元的个数。实际上, 线列阵受平台机动及造价成本等多因素影响, 线列阵不能设计太长。被动合成孔径处理技术^[8]是一种通过接收声呐阵的运动来增加线列阵有效孔径的技术, 其主要优点就是通过一个短的拖曳线列阵的匀速直线运动获得与长阵相同的增益, 从而降低造价成本及控制难度。

图 1 为被动合成孔径声呐数学模型, 考虑 N 个等间距为 d 的各向同性线列阵, 基阵做匀速直线运动, 速度为 v , 以 $t=0$ 时刻第 1 阵元接收到舰船辐射噪声信号为参考标准, 第 2 个阵元相对于第 1 阵元传播时延为 $\Delta\tau$, 则第 n 阵元接收到信号为

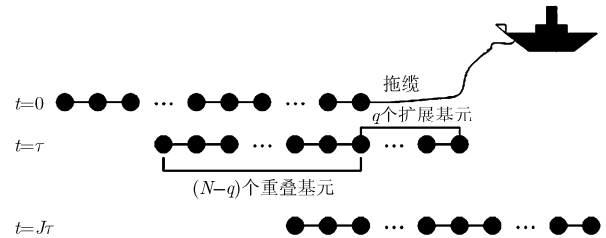


图 1 被动合成孔径声呐原理示意图

$$x_n(t_i) = A \exp[j2\pi f(t_i - \tau_n)] + \xi_n(t_i) \quad (1)$$

式中 A 为幅度; f 为频率; t_i 为第 i 个采样时间; τ_n 为第 n 号水听器阵元相对于第 1 阵元传播时延 $(n-1) \cdot \Delta\tau$; $\xi_n(t_i)$ 表示独立零均值海洋环境噪声。

$$\begin{aligned} \text{以速度 } v \text{ 运动 } \tau \text{ s 后, 第 } n \text{ 阵元接收到信号为} \\ x_n(t_i + \tau) = A \exp[j2\pi f(t_i + \tau - \tau_n(t_i + \tau))] \\ + \xi_n(t_i + \tau) \end{aligned} \quad (2)$$

阵列移动前后有阵元相互重叠, 通过相位修正, 可以得到虚拟阵元的扩展。拖船继续按速度 v 运动, 可连续不断地将空间信息合成为虚拟阵元, 当相位修正因子估计精确时, 虚拟得到的合成孔径可以等效为实际阵元构成的物理孔径。

PSAS 算法一般通过合理选择参数 v 和 τ , 可以使得相邻两个时间间隔阵元相互重叠, 如当接收阵和声源间移动的相对距离满足 $v\tau = qd$, 其中 q 表示每次扩展阵元个数。即 0 时刻第 $n+q$ 阵元和 τ 时刻第 n 个阵元在空间位置上重叠, 有如下关系式:

$$\tau_n(t_i + \tau) = \tau_{n+q}(t) \quad (3)$$

扩展拖曳阵算法采用阵列运动时相继两个空间位置上的基阵重叠部分^[9]的水听器信号互相关来估计基阵两相邻位置的相位修正因子, 把这一相位修正因子运用于运动阵相继位置上的波束输出的相干

组合得到扩展的拖线阵等效长度。

ETAM 算法最优重叠阵元数为 $N/2$ ，考虑相邻两次移动前后阵元重叠，取上述 0 时刻 $x_n(t_i)$ 中 $n=N/2+1, \dots, N$ ， τ s 后 $x_n(t_i + \tau)$ 中 $n=1, \dots, N/2$ ，求接收信号相位补偿因数为

$$\psi_p = \arg \{x_n(t_i)x_n^*(t_i + \tau)\} \quad (4)$$

其中 $p=1, \dots, N/2$ ，空间上重叠阵元的相位补偿因数的均值为

$$\tilde{\psi} = \frac{1}{N/2} \sum_{p=1}^{N/2} \psi_p \quad (5)$$

在阵元域对信号进行相关补偿，合成 $t=0$ 时刻的虚拟阵元为

$$x_m(t_i) = \exp(j\tilde{\psi})x_n(t_i + \tau) \quad (6)$$

式中 $m=N+1, \dots, N+N/2$ 。以此在运动 $J\tau$ s 后， N 阵元基阵可以扩展为 $(N+J \cdot N/2)$ 个阵元基阵。

4 改进的被动合成孔径算法原理

拖线阵被动合成孔径方法中重叠阵元数目直接决定相位修正因子的估计结果，ETAM 算法要求阵列相继两次运动时对空间位置上重叠部分的水听器接收信号做互相关平均^[10]，阵元应完全重叠以精确作为后次未重叠水听器上接收信号的相位修正因子，最优重叠阵元数目为 $N/2$ 。实际基阵在运动时由于受水下复杂环境介质和路径的扰动^[11]的影响，不可能使阵列相继两次运动前后精确地达到重合。改进的被动合成孔径算法可以直接用于相位延时补偿，在波束域代替其在阵元域上进行相位修正，不必细化考虑阵列移动重合位置，更不要求阵列孔径完全重合，避免由于阵元位置移动偏差孔径未完全重合而导致的检测信号目标方位不精确。改进被动合成孔径算法较之常规算法的拖线阵移动对接收信号分时间段处理，对不同时间段拖线阵基阵各阵元接收信号进行频域波束形成处理，并对频域波束形成后的输出分频带进行能量积分即可得到波束输出。

$t=0$ 时刻 n 阵元接收到信号 $x_n(t_i)$ ，对其作 M 点 FFT，对应第 k 阵元为 $X_0(k, K)$ ， $K=1, \dots, M$ ，进一步作频域波束形成^[12]后各阵元输出累加，将各阵元输出作累加将其由阵元域转换为波束域：

$$S_0 = \sum_{k=1}^N X_0(k, K) \exp[-j2\pi(K-1)(f_s/M)(k-1)\Delta\tau] \quad (7)$$

f_s 为采样频率，同样将运动 τ s 后的信号 $x_n(t_i + \tau)$ ，对其作 M 点 FFT，对应第 k 阵元为 $X_1(k, K)$ ， $K=1, \dots, M$ ，进一步作频域波束形成后各阵元输出累加，有

$$S_1 = \sum_{k=1}^N X_1(k, K) \exp[-j2\pi(K-1)(f_s/M)(k-1)\Delta\tau] \quad (8)$$

为保持相位一致，分别对空间位置移动及时间延迟变化予以考虑，对运动 τ s 后 S_1 进行补偿，空间移动补偿，运动距离为 $v\tau$ ，在此 $v\tau$ 可以为各阵元间距 d 的非整数倍，

$$P_1 = S_1 \exp\left[-j2\pi(K-1) \frac{f_s}{M} \cdot \frac{v\tau}{d} \Delta\tau\right] \quad (9)$$

时间延迟补偿，运动 τ s，有

$$P_2 = S_1 \exp\left[-j2\pi(K-1) \frac{f_s}{M} \tau\right] \quad (10)$$

综合考虑空间及时间上变化，

$$P_0 = P_1 + P_2 \quad (11)$$

将式(7)和式(11)相加，累加得到对应合成输出与角度有关，虚拟阵元长度为 $v\tau$ ，即扩展后阵元总长度为 $Nd + v\tau$ ，以此在运动 $J\tau$ s 后， N 阵元基阵扩展为长度为 $Nd + vJ\tau$ 的线列阵。改进的被动合成孔径算法对各时间段的信号进行处理得到对应的波束输出，在移动前后不用考虑阵元相互完全重叠，可直接进行相位修正补偿，再对补偿后的波束输出进行相干组合累加进而获得时间方位历程图。

对时间方位历程图波束输出进行检测，将各波束对应的检测方位进行记录，对存储的方位进行二次拟合，根据计算结果计算方位估计误差，将计算的方位估计误差与设定的检测方差门限进行比较，若小于门限，则检测到的水声目标结果属实，接收到的水下辐射信号确实含有水声目标信号，否则检测结果为虚警，综合验证完成对舰船辐射目标的有效检测。

5 改进的被动合成孔径算法性能分析

对 ETAM 算法及改进的被动合成孔径算法原理充分研究的基础上，进行实际仿真实验，考虑 $N=8$ 各向同性阵元组成的均匀线列阵，阵元间距为 7.5 m，两窄带信号源分别从 60° 和 90° 方向入射，噪声为高斯白噪声，信噪比为 -10 dB，拖曳速度为 5 m/s，每 4 s 合成一次，共移动 8 次，合成阵列为原阵列的 3.67 倍，如图 2 所示为常规波束形成、ETAM 算法、改进被动合成孔径算法仿真图。

由图 2 可以看出 ETAM 算法和改进的被动合成孔径算法相比与常规波束形成算法其主瓣宽度均变窄，但由于移动前后阵元移动为间距 d 的非整数倍，即阵元未完全相互重叠，ETAM 算法目标识别角度偏移，改进的被动合成孔径算法解决这一问题，目标识别无误差。

进一步在低信噪比(-18 dB)弱目标条件下，其

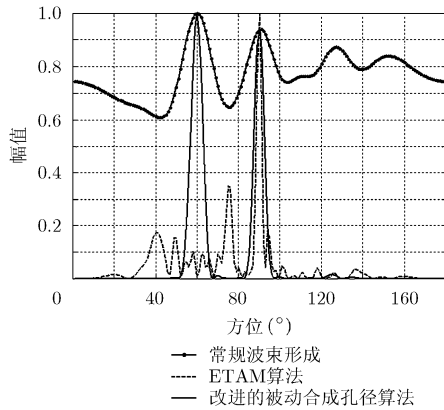


图2 应用被动合成孔径前后辐射目标信号检测图

它条件不变,比较 ETAM 算法和被动合成孔径算法对弱目标检测如图 3 和图 4 所示。

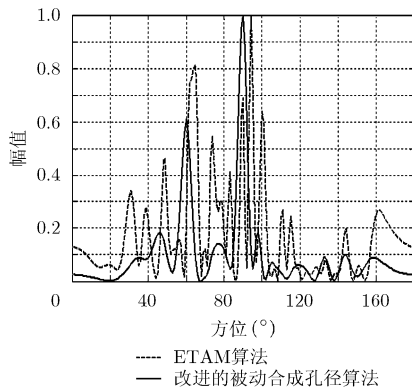


图3 ETAM 算法和改进被动合成孔径算法波束图比较

如图 3 和图 4 所示,改进的被动合成孔径算法对弱目标分辨准确,可改善实际水下复杂环境下由于介质和路径的扰动引起的相位扰动而引起的相位误差,在低信噪比下对弱目标信号检测能力强,具有一定的工程通用性及实用性。

在验证改进的孔径合成算法能够对弱目标信号有效检测的基础上,考虑拖曳速度变化对改进的被动合成孔径算法性能影响,研究实际水声试验条件下低频段信号,其中目标位于 60° 方向,辐射线谱信号频率约为 100 Hz ,叠加 $20\sim 200\text{ Hz}$ 宽带噪声信号,输入信噪比为 -23 dB ,基阵为 8 阵元,阵元间距选取为 7.5 m ,改变拖曳速度,每 6 s 合成一次,保证前后移动均在基阵的阵长范围内,且移动前后各阵元均不满足阵元间相互完全重合,结果如图 5 所示。

由图 5 看出,拖曳速度分别选取 2 kn (约 1 m/s), 8 kn (约 4 m/s), 12 kn (约 6 m/s),相邻两次合成移动分别 4 m , 20 m , 32 m 时均无阵元相互完全重叠,当拖曳速度偏小如 4 kn 时移动不明显,对辐射目标不能有效检测,当拖曳速度保证前后两次移动在基阵阵长范围内,且选择合适,均能有效检测对目标辐射信号,而由于拖曳速度选取偏大 12 kn 时阵列

移动重合较多,其波束更窄,对目标检测效果更好,利于在低信噪比下检测。

更进一步选取拖曳速度更大如 24 kn 时,前后两次合成移动为 72 m ,超于基阵阵长范围,其对目标辐射检测如图 6 所示,由于拖曳阵拖曳速度太快,空间采样就会不够,导致没有时间进行信号的补偿合成,改变信号输入信噪比,且由于前后两次移动距离过大,由于运动多普勒效应产生频偏,各频率间形成干涉,进而导致相位误差偏大,使孔径合成的效果恶化,不能对水下辐射目标进行检测。

水下环境的复杂性、拖曳速度的无规则变化及水流的影响均会对拖曳阵运动带来影响,改进的被动合成孔径声呐用于舰船等目标检测时需合理选取拖曳速度,要求每个分段时间移动的距离小于基阵阵长,且以时间换空间的合成孔径时间长度与阵运动速度乘积应小于信号的空间相干长度,一般选取拖曳速度为满足相邻两次合成移动前后为基阵物理阵长一半。

将改进的被动合成孔径算法用于海试验数据验证,试验参数为:拖曳阵做匀速直线运动,速度为水听器数目 32 个,水听器间距为 1.5 m ;拖船拖曳速度为 8 kn ,目标信号频带范围为 $40\sim 500\text{ Hz}$,信号采样率为 2000 Hz ,快拍长度为 2048 点。

图 7 所示应用改进的被动合成孔径算法合成孔径前后方位历程图比较,相邻两次移动阵元并非完全重叠,图 7(a)为物理孔径 32 阵元水听器接收信号作频域波束形成的时间方位历程图,图 7(b)为合成 128 阵元虚拟孔径得到的海试数据方位历程图,可以看出,改进的算法得到的目标波束非常精细,比物理孔径的常规波束形成方法具有更高的方位分辨率,且充分考虑拖曳阵难以满足不可能使阵列相继两次运动前后阵元完全重合,更有利于实现对水下安静型、远距离目标信号的检测,对舰船辐射噪声等弱目标的检测能力也更优异。

6 结束语

改进的被动合成孔径算法用于舰船辐射噪声检测研究,分别对舰船辐射噪声特性、PSAS 数学模型、ETAM 算法、改进的被动合成孔径算法原理等理论作以介绍,结合实际仿真、海试数据验证改进的被动合成孔径算法相比于 ETAM 算法不用考虑阵列孔径完全重合,可有效避免由于复杂水声环境影响而使拖曳阵列难以维持恒定速度,继而不能保证连续测量时重叠水听器的孔径位置导致对舰船辐射等目标信号进行有效检测。通过对算法性能分析,明确该算法对微弱目标信号的检测能力更优异,速度较快,具有一定的实用性,为后续研究及实际应用提供了帮助。

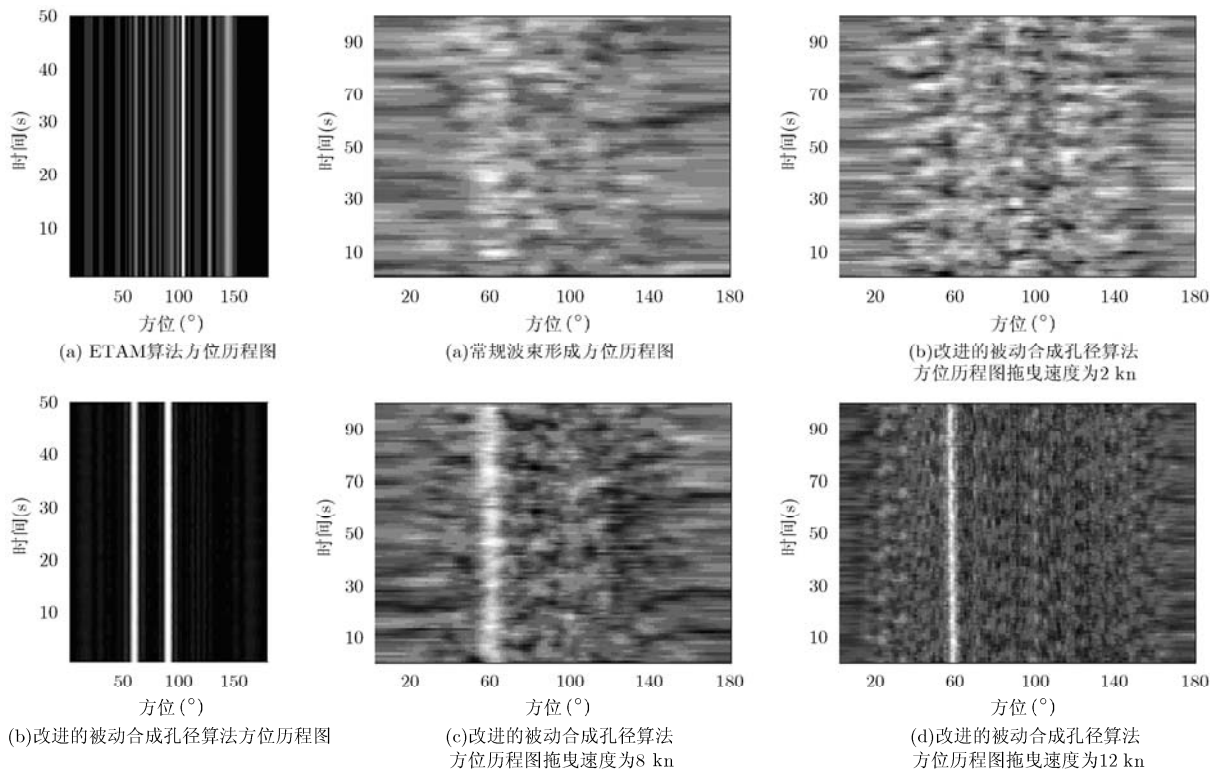


图4 ETAM 算法和改进被动合成孔径算法方位历程图比较

图5 拖曳速度变化对算法目标检测性能比较

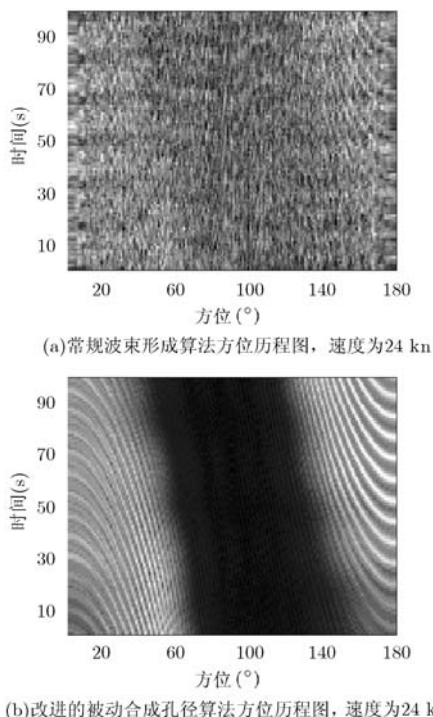


图6 拖曳速度过大对改进的被动合成孔径算法性能影响

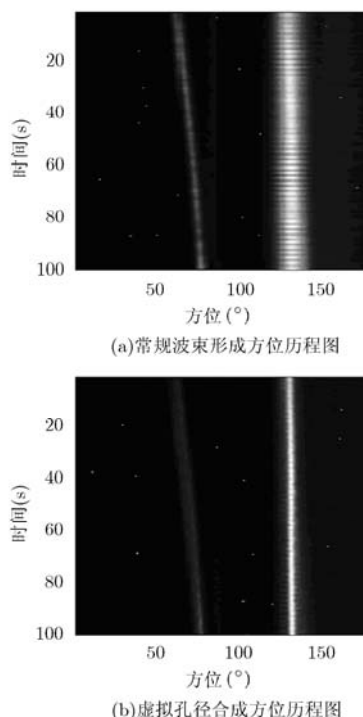


图7 应用改进的算法孔径合成前后方位历程图比较

参考文献

[1] 李启虎. 数字式声呐设计原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2002: 1-8.
Li Qi-hu. Principles of Design for Digital Sonar[M]. Hefei:

Anhui Educational Press, 2002: 1-8.
[2] 陈曦, 林怀清. 基于时变调制的舰船辐射噪声信号仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(2): 297-299.
Chen Xi and Lin Huai-qing. Research on simulation

- algorithm of vessels noise signal based on time-varying modulating[J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(2): 297-299.
- [3] 孙宝华, 汤俊, 唐波. 被动虚拟阵列的 CRB 界及最大似然估计方法研究[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(6): 641-642.
Sun Bao-hua, Tang Jun, and Tang Bo. CRB and maximum likelihood estimation for passive synthetic array[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2010, 8(6): 641-642.
- [4] Williams R and Harris B. Passive acoustic synthetic aperture processing techniques[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1992, 17(1): 102-110.
- [5] 陈新华, 鲍习中, 李启虎, 等. 水下声信号未知频率的目标检测方法研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(4): 471-473.
Chen Xin-hua, Bao Xi-zhong, Li Qi-hu, *et al.* Research on detection of underwater acoustic signal with unknown frequency[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(4): 471-473.
- [6] 陈敬军, 傅寅锋. 被动声呐目标识别系统设计研究[J]. 声学技术, 2012, 31(2): 147-148.
Chen Jing-jun and Fu Yin-feng. The research on the design of passive sonar target recognition system[J]. *Technical Acoustics*, 2012, 31(2): 147-148.
- [7] 白云. 噪声测量中矢量水听器被动合成孔径声呐方法研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工程大学, 2010.
Bai Yun. The Research of vector hydrophone passive synthetic aperture technique in the measurement radiated noise[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2010.
- [8] Stergiopoulos S and Urban H. A new passive synthetic aperture technique for towed arrays[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1992, 17(1): 16-25.
- [9] 郁彦利, 王英民. 基于相位估计和线性拟合的运动补偿方法[J]. 压电与声光, 2011, 33(6): 894-895.
Yu Yan-li and Wang Ying-min. Research on motion compensation based on phase estimation and linear fitting[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, 33(6): 894-895.
- [10] 黄勇, 李宇, 刘纪元. 被动合成孔径声呐阵列目标远程定位[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(3): 526-528.
Huang Yong, Li Yu, and Liu Ji-yuan. Long distance source localization with passive synthetic aperture sonar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(3): 526-528.
- [11] 王健鹏, 柳征, 姜文利. 运动阵列非重叠孔径扩展算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1597-1599.
Wang Jian-peng, Liu Zheng, and Jiang Wen-li. A non-overlap mode-based extend aperture algorithm for moving array[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(7): 1597-1599.
- [12] 曾雄飞, 孙贵青, 黄海宁. 矢量阵的快速宽带频域波束形成方法[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(1): 5-7.
Zeng Xiong-fei, Sun Gui-qing, and Huang Hai-ning. Fast broadband beamforming based on vector hydrophone array [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2012, 24(1): 5-7.
- 赵 闪: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为水声信号处理、被动合成孔径声呐等.
- 孙长瑜: 男, 1954 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为水声物理、阵列信号处理等.
- 陈新华: 男, 1978 年生, 副研究员, 博士, 研究方向为水声信号处理等.
- 余华兵: 男, 1976 年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为水声物理、信号处理等.