

# 曲线机动情况下水下自主平台的改进被动合成孔径算法研究

金盛龙<sup>①②</sup> 李宇<sup>\*①</sup> 黄海宁<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院声学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100190)

**摘要:** 水下自主无人平台(AUV)在曲线机动情况下利用传统ETAM方法扩展孔径时,目标方位估计结果无法聚焦到真实方位,估计偏差严重,针对这一问题,该文结合运动补偿提出一种新的ETAM算法。该算法将波束域与阵元域结合处理,在波束域获取相位信息,在阵元域对相位信息进行线性拟合,有效克服曲线运动造成的相位误差,得到相位修正因子后对连续测量进行相位补偿,实现孔径扩展。仿真和试验结果表明,无论平台直线航行还是曲线机动,该算法在对比算法失效的情况下,仍具有很高的测向精度、角度分辨率及空间增益,且适用于多目标的分辨,在较低信噪比下对性能的改善更为明显,有较强的实用性和环境宽容性。

**关键词:** 被动合成孔径声呐;曲线机动;波束域;阵元域;运动补偿

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)09-2265-08

DOI: 10.11999/JEIT171225

## An Improved Passive Synthetic Aperture Algorithm Based on Curvilinear Maneuverability of Autonomous Underwater Vehicles

JIN Shenglong<sup>①②</sup> LI Yu<sup>①</sup> HUANG Haining<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to overcome difficulty in extending flank array by traditional Extended Towed Array Measurement (ETAM) technique based on curvilinear maneuverability of Autonomous Underwater Vehicles (AUV), a new ETAM method is proposed by combining estimating phase correction factors in beam domain and linear fitting motion compensation in element domain. The method estimates phase differences in beam domain and implements linear fitting of phase correction factors in element domain to compensate phase error due to curvilinear motion, which can acquire accurate phase correction factors and extend array. Results of simulation and experiment show that no matter straight line navigation or curvilinear maneuverability, the method achieved higher DOA estimation accuracy, angular resolution and signal gain, which is also suitable for multi-target resolving. Especially in low signal-noise-ratio condition, the improvement of this method in performance is more obvious, for which it has strong practicality and environmental tolerance.

**Key words:** Passive Synthetic Aperture Sonar (PSAS); Curvilinear maneuverability; Beam domain; Element domain; Motion compensation

### 1 引言

水下自主无人平台由于体积较小,使得声呐基

阵物理孔径不足,因此限制了声呐系统的方位分辨率和测向精度。被动合成孔径声呐(Passive Synthetic Aperture Sonar, PSAS)技术可以利用小孔径基阵拖曳运动时连续接收的数据,基于信号的空间相关长度和时间相干长度特性,通过相位补偿、空间位置补偿等方法合成远大于实际物理孔径的虚拟阵列,获得较高的空间增益和方位分辨率<sup>[1-3]</sup>,十分适用于自主无人平台的声呐舷侧阵,其中扩展拖曳线列阵测量(Extended Towed Array Measurement, ETAM)算法在方位估计精度、稳健性、计

收稿日期: 2017-12-25; 改回日期: 2018-05-02; 网络出版: 2018-07-12

\*通信作者: 李宇 ly@mail.ioa.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(11504402),“率先计划”项目(SXJH201603)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (11504402), The Pioneering Action Initiative (SXJH201603)

算量等方面都有较好表现<sup>[4-6]</sup>。

依靠其机动灵活性, 自主无人平台经常通过机动的方式搜索跟踪目标<sup>[7]</sup>, 并且根据纯方位目标运动的收敛特性, 平台以曲线轨迹机动时, 目标方位角度变化率较大, 运动状态估计的收敛速度较快<sup>[8]</sup>。但这些机动方式对利用ETAM方法扩展孔径有很大影响, 因为传统ETAM算法假设阵列做匀速直线运动, 当平台运动轨迹为曲线时, 相邻两次测量间阵元位置的空间误差会造成相位修正因子估计误差<sup>[9-11]</sup>, 使对于非重叠阵元的相位补偿出现偏差, 合成的虚拟阵列出现弯曲, 且运动轨迹偏离直线程度越大, 相位补偿的误差越大, 后续对虚拟阵元接收数据进行相干累加会严重影响目标方位估计的准确性。文献<sup>[12]</sup>针对平台运动存在偏航误差的情况提出一种基于线性拟合相位校正因子的运动补偿改进ETAM算法, 可以用于小平台曲线机动时合成孔径, 该算法通过线性拟合重叠阵元的相位差来估计非重叠阵元的相位修正因子, 合成直线的虚拟阵列, 但是由于在阵元域进行改进, 对信噪比宽容性较差, 在复杂多变、低信噪比的实际环境中, 处

$$x_{n+q}(t_i) = A \cdot \exp \left[ jw_0 \left( t_i - \frac{vt_i + (n+q-1)d}{c} \cos \theta \right) \right] + n_{n+q}(t_i) \quad (1)$$

其中,  $c$ 为声速, 取 $v\tau = qd$ , 则经过时间 $\tau$ 后, 第 $n$ 号阵元接收信号为

$$\begin{aligned} x_n(t_i + \tau) &= A \cdot \exp \left[ jw_0 \left( t_i + \tau - \frac{vt_i + v\tau + (n-1)d}{c} \cos \theta \right) \right] + n_n(t_i + \tau) \\ &= n_n(t_i + \tau) + \exp(jw_0\tau) \cdot A \cdot \exp \left[ jw_0 \left( t_i - \frac{vt_i + (n+q-1)d}{c} \cos \theta \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

考虑理想条件, 连续两次测量各阵元接收到的噪声近似相等, 经推导式(2)可化为

$$x_n(t_i + \tau) = \exp(jw_0\tau) \cdot x_{n+q}(t_i) \quad (3)$$

则连续两次测量重叠阵元的相位修正因子为

$$\Psi_n' = \arg \{ x_{n+q}(t_i) \cdot x_n^*(t_i + \tau) \} = -w_0\tau \quad (4)$$

这里 $*$ 表示复共轭,  $n = 1, 2, \dots, N - q$ , 估计其平均值为

$$\Psi' = \frac{1}{N-q} \sum_{n=1}^{N-q} \Psi_n' \quad (5)$$

在ETAM基础上, 考虑阵列按照曲线轨迹进行机动, 在阵形保持均匀线列阵、声源为远场平面波的前提下, 相邻两次测量中, 均以前一次阵列所在位置为基准, 假设用于相关器处理获取相位修正因子的等效重叠阵元数为 $N - q$ , 后次测量各等效重叠阵元信号与前次测量各等效重叠阵元信号的相位修正因子 $\Psi_n (n = 1, 2, \dots, N - q)$ 近似符合线性关系<sup>[12]</sup>。因此可使用最小二乘法对各个 $\Psi_n$ 值作形如

理效果并不理想。

针对这个问题, 本文在ETAM基础上, 结合线性拟合的运动补偿方法, 提出一种适用于平台曲线机动情况下的波束域与阵元域结合处理的改进ETAM孔径扩展算法, 该算法首先在波束域单独估计每个重叠阵元的相位修正因子, 然后通过最小二乘法拟合出非重叠阵元的相位修正因子, 最后在阵元域进行孔径合成。该算法利用波束域处理起到噪声抑制作用, 在阵元域的相位补偿拟合消除了曲线运动造成的不均匀相位差, 使得测向精度和空间增益大大提高, 这对于低信噪比下无人平台的检测与跟踪有着重要的意义。

## 2 算法描述

### 2.1 基本原理

ETAM算法中, 对于 $N$ 元等间隔 $d$ 排布的标准线列阵, 存在方位为 $\theta$ 的远场窄带信号源 $s(t_i) = A \cdot \exp(jw_0t_i)$ , 定义基阵法线方向为 $90^\circ$ , 阵列匀速直线运动, 速度为 $v$ , 假设每次测量移动 $q$ 个阵元,  $t_i$ 时刻第 $n + q$ 号阵元接收信号为

$\Psi = a + b \cdot n$  ( $a, b$ 为常数)的拟合, 将 $N - q$ 个相位修正因子代入 $\Psi_n = a + b \cdot n (n = 1, 2, \dots, N - q)$ , 得到矛盾方程组 $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{l}$ , 其中 $\mathbf{x} = [ab]^T$ ,  $\mathbf{l} = [\Psi_1 \Psi_2 \dots \Psi_{N-q}]^T$ , 因而正则方程组为

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{l} \quad (6)$$

可以知道 $\mathbf{x}$ 有唯一解的充要条件为 $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$ 非奇异, 当 $N - q \geq 2$ 时该条件显然成立, 求解上述方程组得 $a, b$ , 根据 $\Psi = a + b \cdot n$ 可以得到后次测量中非重叠阵元的相位修正因子 $\Psi_n (n = N - q + 1, N - q + 2, \dots, N)$ 。需要注意的是, 每次相位补偿要使用当次测量对应的 $a, b$ 值, 且相位修正因子具有累积性<sup>[13]</sup>。扩展示意如图1所示,  $\varepsilon$ 为两次测量间的偏转角, 相位补偿后的阵元仍在一条直线上。

### 2.2 波束域与阵元域结合处理的改进ETAM算法

在实际环境信噪比较低情况下, 将单阵元接收信号通过相关器求取相位修正因子进行线性拟合时, 等效重叠阵元之间的相位差难以满足线性关系, 拟合效果较差。因此需要在等效重叠阵元组成

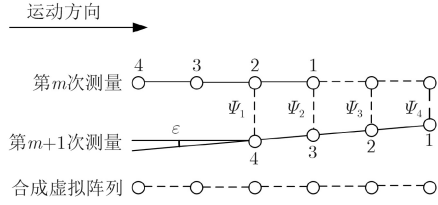


图1 阵列曲线运动的孔径扩展示意图

子孔径的波束域求取相位修正因子, 保证相位修正因子的准确性, 并在阵元域对多个相位修正因子进行线性拟合, 有效克服曲线运动造成的各阵元不均匀相位差问题<sup>[14-16]</sup>, 经过相位补偿得到所有的虚拟阵元, 最后对合成虚拟阵列进行相干求和处理。

对于宽带接收信号通过FFT运算划分为各个窄带信号进行改进ETAM算法处理, 整个算法步骤如下:

(1)对相邻两次测量的等效重叠子阵(预处理阵

$$L_{m-1,2}(f_0, \theta_s) = \sum_{n=q+1}^N X_{n,(m-1)}(f_0) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{f_0}{c} (n-q-2)d \cos \theta_s\right) \quad (9)$$

$$L_{m,2}(f_0, \theta_s) = \sum_{n=1}^{N-q} X_{n,m}(f_0) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{f_0}{c} (n-2)d \cos \theta_s\right) \quad (10)$$

⋮

$$L_{m-1,N-q}(f_0, \theta_s) = \sum_{n=q+1}^N X_{n,(m-1)}(f_0) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{f_0}{c} (n-q-(N-q))d \cos \theta_s\right) \quad (11)$$

$$L_{m,N-q}(f_0, \theta_s) = \sum_{n=1}^{N-q} X_{n,m}(f_0) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{f_0}{c} (n-(N-q))d \cos \theta_s\right) \quad (12)$$

(3)在波束域求互相关, 作为估计的 $N-q$ 个相位修正因子, 其中 $n=1, 2, \dots, N-q$ 。

$$\Psi_n^{(m)} = \arg\{L_{m-1,n}(f_0, \theta_s) \cdot L_{m,n}^*(f_0, \theta_s)\} \quad (13)$$

(4)用最小二乘法对第 $m$ 次测量的 $\Psi_n^{(m)}$ ( $n=1, 2, \dots, N-q$ )进行形如 $\Psi = a + b \cdot n$ ( $a, b$ 为常数)的拟合, 求得 $\Psi_n^{(m)}$ ( $n=N-q+1, N-q+2, \dots, N$ );

(5)用相位修正因子对第 $m$ 次测量的阵元接收信号进行相位补偿, 其中 $m \geq 2, n=N-q+1, N-q+2, \dots, N$ 。

$$\Psi' = \sum_{i=m}^2 \Psi_{n+q(m-i)}^{(i)} \quad (14)$$

$$X_{n+(m-1)q,1}(f_0) = \exp(j\Psi') \cdot X_{n,m}(f_0) \quad (15)$$

(6)在阵元域对相位补偿后的虚拟合成阵列进行相干求和。

$$B(f_0, \theta_s) = \left| \sum_{n=1}^{N+(m-1)q} X_{n,1}(f_0) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{f_0}{c} (n-1)d \cos \theta_s\right) \right|^2 \quad (16)$$

元)各自对齐到第1个阵元进行频域波束形成:

$$L_{m-1,1}(f_0, \theta_s) = \sum_{n=q+1}^N X_{n,(m-1)}(f_0) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{f_0}{c} (n-q-1)d \cos \theta_s\right) \quad (7)$$

$$L_{m,1}(f_0, \theta_s) = \sum_{n=1}^{N-q} X_{n,m}(f_0) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{f_0}{c} (n-1)d \cos \theta_s\right) \quad (8)$$

(2)重复步骤(1), 对相邻两次测量的预处理阵元各自对齐到第2个阵元进行频域波束形成, 直到对齐到第 $N-q$ 个阵元, 得到 $N-q$ 对波束输出:

其中,  $X_{n,m}(f_0)$ 表示第 $m$ 次测量中第 $n$ 个阵元在 $f_0$ 频率处的接收信号,  $L_{m,n}(f_0, \theta_s)$ 表示第 $m$ 次测量的重叠子阵在 $f_0$ 频率处以 $\theta_s$ 为来波方向对齐到第 $n$ 个阵元的波束输出,  $\Psi_n^{(m)}$ 表示第 $m$ 次测量中第 $n$ 个阵元的相位修正因子,  $\Psi'$ 表示第 $m$ 次测量中第 $n$ 个阵元相对于第1次测量的相位修正因子。

该改进ETAM算法在估计相位修正因子时, 采用等效重叠子阵的波束输出, 极大减小了噪声对互相关的影响, 可以提高相位修正因子的估计精度, 在阵元域拟合相位因子可以克服曲线运动的不均匀问题, 后续的相干累加在该波束方向进行, 整个算法流程相当于在每个扫描方位都进行了准确的相位补偿, 针对曲线机动情况下的多目标分辨同样适用。

### 3 仿真与实验数据分析

#### 3.1 单目标性能仿真

考虑远场平面波, 设声源频率1 kHz, 声速1500 m/s, 接收阵由 $N=8$ 个阵元组成, 半波长 $d$ 布阵。平台围绕坐标原点逆时针做半径 $R=50$  m的匀速圆周运动, 线速度为2 m/s, 等效重叠阵元数取

4, 即物理尺寸的一半, 测量次数 $L$ 取10, 形成44个阵元的虚拟阵列, 长度为原物理阵的5.5倍。平台运动轨迹如图2所示, 定义基阵法线方向为 $90^\circ$ , 声源位于基阵 $75^\circ$ 方向。

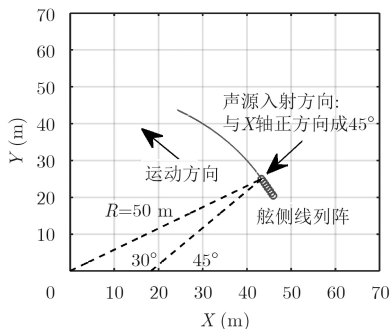


图2 仿真阵运动轨迹

为了测试不同信噪比下各算法的方位估计精度, 对阵元域的目标信号加不同信噪比的高斯白噪声产生仿真数据。文献[12]算法下文中称为阵元域改进ETAM, 图3给出在上述运动状态下输入信噪比为0 dB时, 本文改进ETAM、文献[12]阵元域改进ETAM、传统ETAM和CBF 4种算法的目标方位谱。

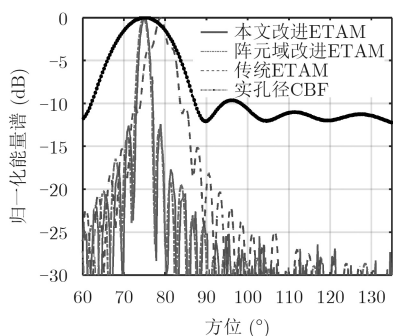


图3 信噪比0 dB的不同算法方位谱比较

由图3看出, CBF由于孔径较小, 主瓣很宽, 旁瓣较高; 传统ETAM算法中, 曲线运动的等效重叠阵元的相位差与非重叠阵元的相位修正因子相差较大, 利用各等效重叠阵元的相位差求平均进行相位补偿使合成的虚拟阵列误差很大, 导致估计的目标方位角不在 $75^\circ$ 附近, 且波束主瓣较宽, 出现发散情况; 结合运动补偿的阵元域改进ETAM与本文改进ETAM的波束主瓣基本重合, 都指向 $75^\circ$ 方向附近, 二者主瓣较窄, 分辨率较高, 且旁瓣比CBF低很多, 说明在该信噪比下, 阵元域改进ETAM性能与本文改进ETAM性能较为接近。

将信噪比改为 $-10$  dB, 其他条件不变, 比较4种算法的目标方位估计结果, 如图4所示, 此时阵元域改进ETAM主瓣指向 $71.5^\circ$ , 偏离目标方位约

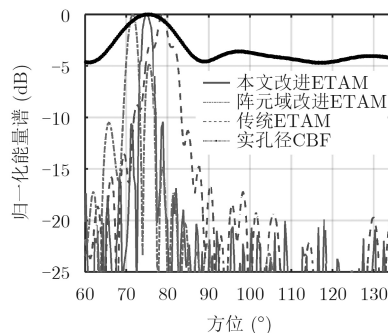


图4 信噪比 $-10$  dB的不同算法方位谱比较

$3.5^\circ$ , 方位角估计出现偏差, 而本文改进ETAM方位角估计仍比较准确, 且保持较高分辨率; 传统ETAM波束主瓣变化不大, 指向偏离目标方向。

通过Monte Carlo方法比较3种算法在不同输入信噪比下的方位角估计均方根误差, 图5为对比结果, 在信噪比较高时, 阵元域改进ETAM和本文改进ETAM均能准确估计出方位角, 但随着信噪比降低, 阵元域改进ETAM的性能会迅速恶化, 而本文改进ETAM仍有精确的方位估计能力以及较高的分辨率, 可以在阵列曲线运动的情况下实现孔径扩展。传统ETAM的方位角估计误差随信噪比变化不大, 但是在曲线运动情况下, 即使高输入信噪比也无法准确估计目标方位。

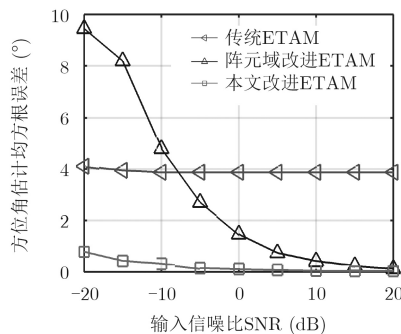


图5 不同算法方位角估计均方根误差随输入信噪比变化情况

### 3.2 多目标分辨仿真

本文改进ETAM算法不仅对单目标信号的方位估计效果有明显优势, 对于曲线运动情况下的多目标分辨能力也有较大提高。图6给出目标方位为 $75^\circ$ 和 $72^\circ$ , 信噪比为0 dB情况下的估计结果。

由图6可见, 两目标相差 $3^\circ$ 时CBF主瓣很宽, 显示为1个目标; 传统ETAM对相邻两目标无法分辨。本文改进ETAM可以准确分辨出 $75^\circ$ 和 $72^\circ$ 两个目标; 而作为对比的阵元域改进ETAM波束主瓣出现发散情况, 分辨不出相差 $3^\circ$ 的两个目标, 因为该算法在阵元域接收到信号的相位修正因子由于环境噪声容易出现偏差, 当多目标入射方向十分接近

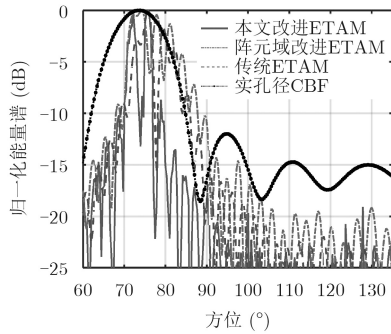


图6 目标方位75°和72°的不同算法方位谱比较

时，波束扫描对时延导向较敏感，该相位因子偏差在波束形成时会混淆多目标，导致无法分辨，故阵元域改进ETAM的多目标分辨需要较高信噪比。本文改进ETAM在波束域估计相位修正因子，相干累加时在每个扫描方位都进行准确的相位补偿，所以在低信噪比曲线机动情况下也可以有效分辨相邻较近的目标。

### 3.3 曲线运动影响因素分析

由前面分析可知，运动轨迹偏离直线程度越

大，对传统ETAM造成的相位补偿误差越大，由于偏离直线的程度与线阵尺寸是相对的，设每次测量均扩展物理尺寸的一半，则认为阵列的阵元数 $N$ 、孔径扩展次数 $L$ 及航迹的曲率半径 $R$ 是平台曲线机动对孔径扩展的主要影响因素。图7描述了在输入信噪比一定的情况下，通过Monte Carlo方法分别比较3种算法方位估计误差随 $N$ 、 $L$ 和 $R$ 的变化情况。

可以看出，传统ETAM的方位估计误差随 $N$ 或 $L$ 的增大而增大，随 $R$ 的减小而增大，说明合成的虚拟孔径越大，估计效果越差，运动轨迹的曲率越大，估计效果也越差，且误差都在阵元域改进ETAM和本文改进ETAM之上，说明该算法不能在平台曲线机动时准确估计目标方位；阵元域改进ETAM方位估计误差主要随 $N$ 增大而减小，因为空间采样数增多，线性拟合效果越准确；本文改进ETAM的方位估计误差基本不随 $N$ 、 $L$ 和 $R$ 变化而变化，对曲线轨迹偏离直线的程度不敏感，且在3种算法中始终保持最小误差，说明在平稳条件下，本文改进ETAM算法在曲线运动中测向精度最高、稳健性最好。

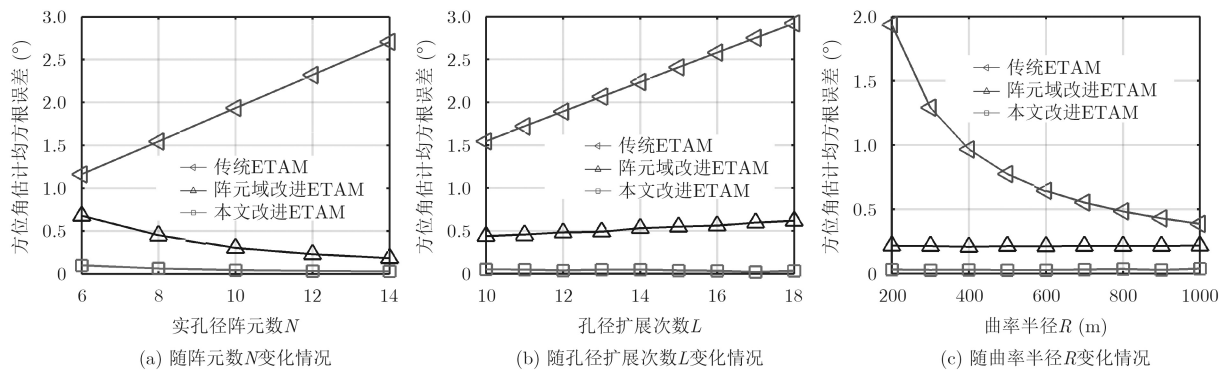


图7 不同算法方位角估计均方根误差变化情况

### 3.4 海试数据分析

截取某次UUV海试数据进行验证。该段数据由UUV转弯机动时舷侧阵接收，航速3 kn，图8为UUV航迹示意图，实线为目标出现在左舷时的航迹，且包含转弯部分，故本文对该段航迹左舷的探测结果进行分析。UUV左、右舷侧线阵各24个阵元，合成孔径算法形成144阵元的虚拟阵列，目标为2~4 kHz宽带噪声信号，左舷方位历程如图9所示，取第40 s转弯状态单帧方位谱如图10所示，取第300 s直航状态单帧方位谱如图11所示。

信号入射角定义为：左舷艇尾方向为0°，艇艏方向为180°。图9方位历程中，UUV先进行转弯航行，然后进入直航阶段。在转弯状态下传统ETAM目标轨迹出现严重拖尾，阵元域改进ETAM可以聚焦目标轨迹但受信噪比影响严重，轨迹较粗分辨率

较低；本文改进ETAM在转弯与直航状态下都有较窄且连续清晰的目标方位轨迹。

图10转弯状态下，目标位于36°方向；比较4种算法的方位谱可知，实孔径运算的空间孔径较小，

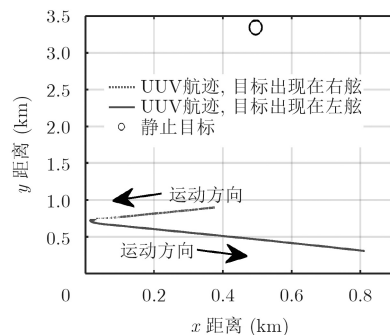


图8 某次海试UUV航迹

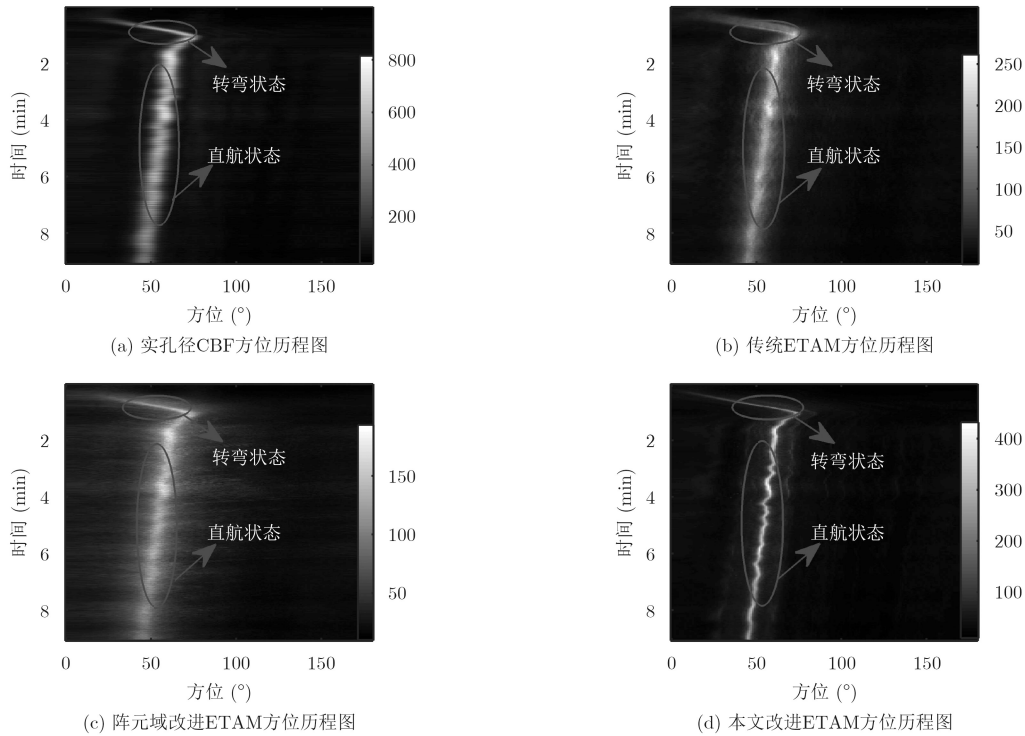


图9 海试方位历程图

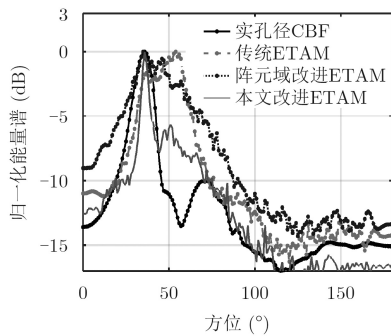


图10 左舷第40 s转弯状态单帧方位谱

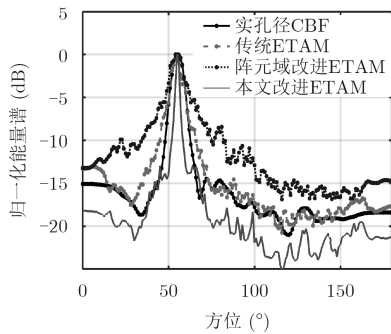


图11 左舷第300 s直航状态单帧方位谱

主瓣宽度较大；但是结合线性拟合运动补偿的阵元域改进ETAM主瓣宽度更宽，指向性较差，有多个尖峰在目标方位附近，最高尖峰相对实际目标方位有一定的偏移，说明海洋噪声的原因使各阵元接收信号的相位产生较大畸变，直接在阵元域求得的相

位修正因子误差较大，无法准确进行线性拟合；传统ETAM的主瓣宽度比实孔径CBF宽很多，整个主瓣向目标移动方向偏移，计算目标方位与实际方位偏差较大，说明在UUV曲线机动时，没有运动补偿的ETAM算法并不适用；本文改进ETAM算法指向准确的目标方位，在对比算法中波束主瓣最窄，方位分辨率最高，归一化主瓣情况下旁瓣较低。

图11直航状态下，目标位于55°方向；4种算法都可以较准确地估计目标方位，其中阵元域改进ETAM受信噪比影响噪点严重，旁瓣较高，性能较差；相比于CBF和传统ETAM，本文改进ETAM具有更高的分辨率和空间增益。

无人平台的目标自主检测是在高分辨率、持续且准确的方位历程的前提下进行的，被动声呐要在无人干预的情况下根据波束形成结果进行自主检测与连续跟踪，本文改进算法有助于提高检测概率。下面采用自动阈值检测的方法对4种算法得到的方位历程结果进行自主检测，表1对比了不同算法在转弯机动状态下的检测概率，检测结果如图12所示。可以看出，本文改进ETAM相较于CBF的检测概率更高，并且在转弯机动状态下可以检测到更

表1 转弯机动情况下对4种算法波束形成结果的检测概率(%)

实孔径CBF	传统ETAM	阵元域改进ETAM	本文改进ETAM
82.29	69.79	45.83	93.75

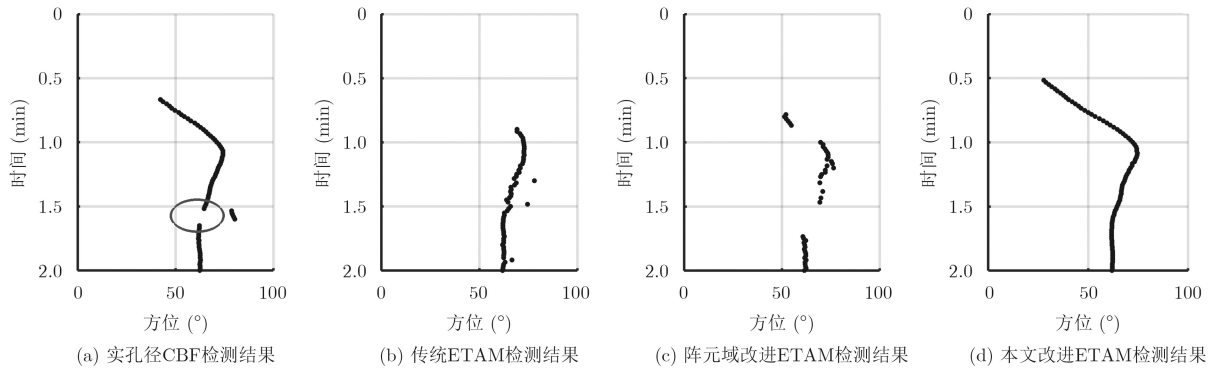


图 12 转弯机动情况的检测结果

多靠近端射方向的目标轨迹,且CBF的轨迹受环境噪声及杂波影响出现间断,而本文算法的检测结果较为连贯,有助于克服方位历程中可能出现的漏检现象,在曲线机动情况下有更好的检测效果;另外两种算法检测概率较低,目标轨迹出现较多断续和野值,稳健性较差。

#### 4 结论

本文针对小平台曲线机动对ETAM孔径扩展的影响,将波束域估计相位修正因子与阵元域线性拟合运动补偿有效地结合,提出一种新的ETAM算法。计算机仿真和海试数据处理都表明,无论平台做直线航行还是曲线机动,在传统ETAM和文献[12]的阵元域改进ETAM都失效的情况下,本文算法仍可以准确估计目标方位角,在测向精度、角度分辨率以及空间增益等方面都有明显优势,可有效提高目标自主检测概率,同时适用于多目标分辨的情况,并且对曲线轨迹偏离直线的程度不敏感;特别是在较低信噪比下,本文算法对性能的改善更为明显,适于在嘈杂噪声环境下工作,有较强的实用性和环境宽容性。

#### 参考文献

- [1] JIANG Wei, QIN Guodong, and DONG Jian. Impact of aperture coherence on DOA estimation in passive synthetic array[C]. 2017 IEEE 4th International Conference on Information Science and Control Engineering, Changsha, China, 2017: 375–379. doi: [10.1109/ICISCE.2017.85](https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.85).
- [2] STERGIPOULOS S and SULLIVAN E J. Extended towed array processing by an overlap correlator[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, 86(1): 158–171. doi: [10.1121/1.398335](https://doi.org/10.1121/1.398335).
- [3] TONG P B, LIM H S, CHIA C S, et al. Extended towed array measurement: Beam-domain phase estimation and coherent summation[C]. IEEE OCEANS 2006-Asia Pacific, Singapore, 2006: 1–6. doi: [10.1109/OCEANSAP.2006.4393956](https://doi.org/10.1109/OCEANSAP.2006.4393956).
- [4] RAJAGOPAL R and RAO P R. Performance comparison of PASA beamforming algorithms[C]. IEEE International Symposium on Signal Processing and Its Applications, Gold Coast, Australia, 1996: 825–828. doi: [10.1109/ISSPA.1996.6475889](https://doi.org/10.1109/ISSPA.1996.6475889).
- [5] KIM S, YOUN D H, and LEE C. Temporal domain processing for a synthetic aperture array[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(2): 322–327. doi: [10.1109/JOE.2002.1002487](https://doi.org/10.1109/JOE.2002.1002487).
- [6] WANG Yu, GONG Zaixiao, and ZHANG Renhe. An improved phase correction algorithm in extended towed array method for passive synthetic aperture[J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2017, 30(1): 055007. doi: [10.1121/2.0000643](https://doi.org/10.1121/2.0000643).
- [7] SWANSON D C and CULVER R L. Small-aperture array processing for passive multi-target angle of arrival estimation[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 142(4): 2030–2046. doi: [10.1121/1.5006910](https://doi.org/10.1121/1.5006910).
- [8] RAO S K. Comments on “discrete-time observability and estimability analysis for bearings-only target motion analysis”[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(4): 1361–1367. doi: [10.1109/7.72722](https://doi.org/10.1109/7.72722).
- [9] 郭振宇, 林贇, 洪文, 等. 基于定标器相位梯度提取的圆迹 SAR 轨迹重建方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(8): 1836–1842. doi: [10.11999/JEIT140950](https://doi.org/10.11999/JEIT140950).  
GUO Zhenyu, LIN Yun, HONG Wen, et al. Circular SAR trajectory reconstruction based on phase gradient of calibrators[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1836–1842. doi: [10.11999/JEIT140950](https://doi.org/10.11999/JEIT140950).
- [10] 李宇, 黄勇, 黄海宁. 空时被动合成孔径阵列处理算法研究[J]. *信号处理*, 2008, 24(3): 426–430. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2008.03.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2008.03.019).  
LI Yu, HUANG Yong, and HUANG Haining. Spatial-temporal processing methods for passive synthetic aperture array[J]. *Journal of Signal Processing*, 2008, 24(3): 426–430. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2008.03.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2008.03.019).
- [11] 赵闪, 孙长瑜, 陈新华, 等. 一种改进的被动合成孔径算法用于

- 舰船辐射噪声检测[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 426–431. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00879](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00879).
- ZHAO Shan, SUN Changyu, CHEN Xinhua, *et al.* An improved passive synthetic aperture sonar algorithm application for detecting of the ship radiated noise[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 426–431. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00879](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00879).
- [12] 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): 894–897. doi: [10.3969/j.issn.1004-2474.2011.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2474.2011.06.013).
- YU Yanli and WANG Yingmin. Research on motion compensation based on phase estimation and linear fitting[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, 33(6): 894–897. doi: [10.3969/j.issn.1004-2474.2011.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2474.2011.06.013).
- [13] LI Zheng, HUANG Yong, and HUANG Haining. Study of efficient broadband beamforming based on extended towed array measurement[C]. 2010 IEEE Youth Conference on Information, Computing and Telecommunications, Beijing, China, 2010: 323–326. doi: [10.1109/YCICT.2010.5713110](https://doi.org/10.1109/YCICT.2010.5713110).
- [14] STERGIPOULOS S and URBAN H. A new passive synthetic aperture technique for towed arrays[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1992, 17(1): 16–25. doi: [10.1109/48.126950](https://doi.org/10.1109/48.126950).
- [15] JIANG Wei, QIN Guodong, DONG Jian, *et al.* DOA estimation performance simulations and analysis with velocity errors for a passive synthetic array using single moving sensor[C]. 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, 2017: 2128–2133. doi: [10.1109/IAEAC.2017.8054393](https://doi.org/10.1109/IAEAC.2017.8054393).
- [16] PAILHAS Y, PETILLOT Y, and MULGREW B. Increasing circular synthetic aperture sonar resolution via adapted wave atoms deconvolution[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141(4): 2623–2632. doi: [10.1121/1.4979807](https://doi.org/10.1121/1.4979807).
- 金盛龙: 男, 1993 年生, 博士生, 研究方向为水声信号处理、阵列信号处理.
- 李 宇: 男, 1977 年生, 研究员, 博士, 研究方向为主被动声呐信号处理、空时自适应信号处理.
- 黄海宁: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、水下无线传感器网络、合成孔径声呐.