

一种Alpha稳定分布噪声下的体积目标长度估计方法

王彬* 侯越圣

(战略支援部队信息工程大学 郑州 450001)

摘要: 为了解决Alpha稳定分布噪声环境下运动舰船目标的长度估计问题, 该文借鉴非线性变换抑制脉冲噪声以及多普勒目标运动特性估计思想, 提出基于广义时频分析(G-TFA)和最小二乘估计的运动目标长度估计方法。该方法首先利用G-TFA获取Alpha稳定分布噪声环境下运动目标的多普勒频率, 然后利用最小二乘方法估计出目标航速和不同位置的横正时刻, 最后利用上述估计结果计算目标长度。以广义Winger-Ville分布(G-WVD)为例, 从理论上推导了G-TFA在Alpha稳定分布噪声环境下具有提取目标多普勒特征的能力, 并通过仿真实验验证了该算法在中低混合信噪比下的稳健性。与现有算法相比, 该文所提算法不需要估计噪声特征指数, 算法性能优于基于传统时频分析的估计方法。

关键词: 目标长度估计; 横正时刻估计; Alpha稳定分布噪声; 广义时频分析; 多普勒分析

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)09-2231-08

DOI: 10.11999/JEIT190327

Estimation of Volume Target Length in Alpha Distribution Noise

WANG Bin HOU Yuesheng

(PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to estimate the length of moving ship targets in Alpha stable distribution noise, a moving target length estimation method based on Generalized Time-Frequency Analysis (G-TFA) and least squares estimation is proposed, which utilizes nonlinear transform to suppress impulsive noise and Doppler effect to estimate target motion characteristics. The method uses G-TFA to obtain the Doppler frequency of moving targets in a stable distributed noise environment. Then, the least squares method is used to estimate the target speed and the closest point of approach time of different positions. Finally, the target length is calculated using the above estimation results. Taking Generalized Winger-Ville Distribution (G-WVD) as an example, the ability of G-TFA to extract Doppler features in Alpha stable distributed noise is theoretically derived. The robustness of the proposed method under low-to-medium mixed signal-to-noise ratio is verified by simulation experiments. Compared with the existing methods, the proposed method does not need to estimate the noise characteristic index, and the performance is better than the methods based on the traditional time-frequency analysis.

Key words: Target length estimation; Estimating the closest point of approach time; Alpha distribution noise; Generalized Time-Frequency Analysis (G-TFA); Doppler feature analysis

1 引言

目标航行过程中产生的辐射噪声是进行被动探测的重要信息, 探测方可以通过提取辐射噪声在时域、频域等能够反应目标的特征量实现目标的识别^[1,2]。对于某些水下设备来说其动作半径只有几十至几百米不等, 在这种情况下舰船可以被视为体积声源^[3]。如果能够实现对舰船上不同声源横正时

刻估计, 进而实现目标长度估计, 将对目标识别和属性判定具有很大的帮助。

实现对目标长度估计要充分利用舰船辐射噪声中包含的信息, 需要把舰船目标作为具有纵向分布特征的体积声源进行处理。沿舰船的艏艉方向会呈现出3个声辐射亮点, 分别是位于舰船中部的辅机、中后部的主机和尾部的螺旋桨。文献^[4,5]利用舰船辐射噪声的通过特性对目标长度进行估计, 但该方法易受噪声干扰且精度不高。刘勋等人^[6]利用小尺寸菱形传感器阵实现对舰船目标上不同频率声源俯仰角和方位角估计, 并建立了卡尔曼滤波所需的状态方程和观测方程, 实现对舰船纵向尺度估计。石

收稿日期: 2019-05-07; 改回日期: 2019-12-16; 网络出版: 2020-07-16

*通信作者: 王彬 commutech@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61572518)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61572518)

杰等人^[7]提出一种基于多元小尺度阵的声源定向方法,综合利用互谱法和时延法对中部、中后和舰船尾部进行定向,在已知布放深度时可估计目标长度。王笑^[8]对目标辐射噪声进行经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD),从中挑选合适的本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF)相加做希尔伯特变换获得信号时频能量图,求得各个部位到达接收阵时延差,当目标速度已知可估计目标尺寸。实现对近距离运动目标上的噪声声源进行定位还有基于传感器阵列的方法,主要有:有近场声全息法^[9]、聚焦波束形成法^[10]。但近场全息法要求全息面大于声源面积,聚焦波束形成法要求阵列孔径大于半波长。由于目标尺寸较大且辐射噪声频率较低,因此需要较大尺寸的传感器阵列才能满足方法条件,这导致以上方法无法应用于基于小平台的水声设备。在浅海环境下,由于工业活动、地震风暴及海洋生物等自然或者人为因素的影响,会使得接收信号时域上呈现出的尖峰特性。Chitre等人^[11]对新加坡附近浅海噪声的概率密度函数进行统计发现比高斯分布尖锐很多,十分贴近Alpha稳定分布的概率密度曲线。张安清等人^[12]对标准水听器采集的4类舰船辐射噪声和海洋环境噪声的噪声特征指数进行了估计,发现它们的特征指数绝大多数位于2.0以下,表明接收的舰船辐射噪声信号具有Alpha稳定分布特性。该种噪声会使得上述传统方法性能退化甚至失效。

针对脉冲环境噪声对传统方法影响,结合现有的单声源多普勒参数估计方法^[13,14],基于多声源多普勒效应辐射噪声观测模型,本文提出一种基于广义时频分析(Generalized Time-Frequency Analysis, G-TFA)方法适用于Alpha稳定分布噪声环境的运动目标长度估计方法,仅利用单传感器即可实现较为精确的声源横正时刻和目标长度估计,且对先验知识依赖较少。最后,仿真实验验证算法性能,并通过实测数据验证本文方法的有效性。

2 问题模型与信号模型

舰船目标和传感器位置关系如图1所示,目标进入设备动作半径后,以速度 v 做匀速直线运动通过静止传感器附近。 O 点为目标运动轨迹与传感器距离最近点,传感器到 O 点的距离称横正距离记为 R_0 ,声源到达该点时刻为横正时刻。当目标长度与横正距离可比拟时,可用“三亮点模型”对目标上分布的主要声源进行刻画^[3],分别是:

(1) 各类辅机:一般在目标中部,主要能量覆盖100 Hz~1 kHz,频谱中既包含不规则连续谱,也包括多根离散线谱成分;

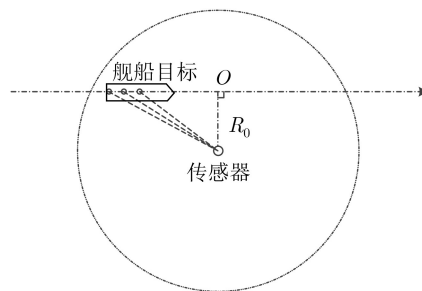


图1 舰船目标与传感器位置关系

(2) 主推进系统:在目标中后部,能量主要覆盖10~100 Hz,具有弱连续谱加强线谱的频谱特征;

(3) 螺旋桨:位于尾部,能量主要覆盖10 Hz~5 kHz,频谱主要为螺旋桨空化引起的规则连续谱以及螺旋桨轴和叶片旋转引起的线谱频率及其多次谐波。

由于目标与传感器之间存在相对运动,接收到的目标辐射噪声会产生多普勒效应,可表示为

$$r(t) = s(t) + \omega(t) = \sum_{i=1}^3 s_i(t - R_i(t)/c) + \omega(t) \quad (1)$$

其中 $s_i(t)$ 为不同部位产生的辐射噪声,沿舰艇顺序 $s_1(t)$, $s_2(t)$ 和 $s_3(t)$ 分别表示辅机、主机和螺旋桨产生的辐射噪声。 $R_i(t) = \sqrt{R_0^2 + [v(t - t_{ci})]^2}$ 表示各部位到水听器的直线距离, t_{ci} 为不同部位的横正时刻, c 为声波在水中的传播速度。 $\omega(t)$ 为环境噪声,服从Alpha稳定分布, α ($0 < \alpha \leq 2$)是噪声特征指数。由于Alpha稳定分布噪声不存在有限的2阶统计量,因此通常用混合信噪比(Mixed Signal-to-Noise Ratio, MSNR)

$$\text{MSNR} = 10 \lg (\sigma_s^2 / \gamma) \text{ (dB)} \quad (2)$$

来描述信号和噪声功率的大小关系, σ_s^2 为信号平均功率, γ ($\gamma \geq 0$)为噪声分散系数。

3 算法设计

3.1 基于多普勒频移的声源横正时刻估计

对于辐射噪声中频率为 f_0 的线谱,其多普勒频率随时间的变化符合式(3)的表达式^[13]

$$f_d(t) = \frac{f_0 c^2}{c^2 - v^2} \left[1 - \frac{v^2(t - t_c)}{\sqrt{R_0^2(c^2 - v^2) + c^2 v^2(t - t_c)^2}} \right] \quad (3)$$

式中 v 表示目标速度, R_0 为横正距离, t_c 为声源的横正时刻, c 为水中声速。从式(3)中可以看出,线谱多普勒频移是由 f_0 , t_c , v 和 R_0 决定的,即多普勒频移曲线中包含有上述运动信息。图2(a)为 $f_0 = 200$ Hz, $t_c = 20$ s, $v = 5$ m/s, $R_0 = 30$ m, $c = 1500$ m/s的多普勒频移曲线。

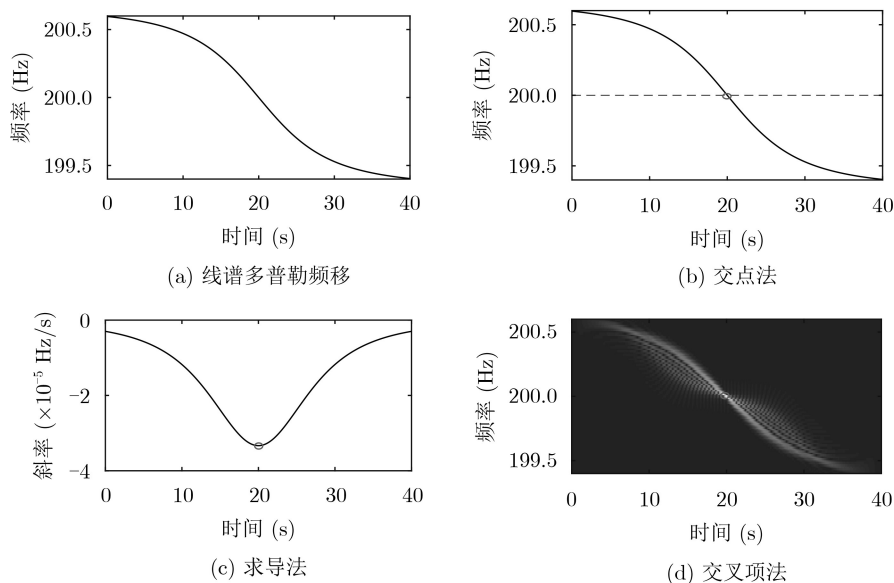


图2 多普勒频移曲线和不同横正时刻估计结果

文献[13]提出了最小二乘法估计声源运动参数，该方法分为两步：(1)估计线谱瞬时频率；(2)将瞬时频率估计值与式(3)做最小二乘求解声源运动参数。该方法可以实现对于运动参数 $\{t_c, v, R_0\}$ 的估计。除上述最小二乘法之外还有交点法、求导法和维格纳分布交叉项法。交点法是通过寻找多普勒频移曲线和线谱原频率的交点估计横正时刻，如图2(b)所示；求导法是通过寻找多普勒频移曲线求导的最小值估计横正时刻，如图2(c)所示。维格纳分布交叉项法是利用维格纳分布对于多普勒信号进行分析时产生自交叉项的现象估计声源横正时刻^[14]，如图2(d)所示。

通过上述方法对线谱的多普勒效应进行分析，可获得声源的运动信息。当背景噪声呈现脉冲性时，现有多普勒横正时刻估计方法性能退化。其原因是现有方法都假设背景噪声服从高斯分布，在进行多普勒特征提取时所用的时频分析方法在脉冲噪声下性能退化所导致。

3.2 Alpha稳定分布噪声下的信号时频分析

传统时频分析方法(比如WVD)是建立在对信号进行2次型运算基础之上，但Alpha稳定分布噪声的2阶及以上各阶统计量是无限的。为了对含Alpha稳定分布噪声信号进行时频分析，典型方法是利用分数低阶思想进行处理，如文献[15]提出的分数低阶伪维格纳分布(Fractional Low Order Pseudo Winger-Ville Distribution, FLOPWVD)方法。但是分数低阶处理方法对阶数有要求，比如FLOPWVD方法要求分数低阶的阶数小于 $\alpha/2$ ，这就需要接收信号进行特征指数 α 估计。

为了避免噪声特征指数估计环节，本文借鉴文

献[16]的非线性预处理思想。首先对信号进行非线性变化，然后再进行时频分析，本文称之为广义时频分析(Generalized Time-Frequency Analysis, G-TFA)，其处理流程如图3所示。

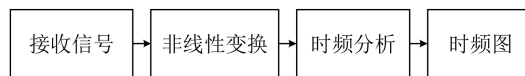


图3 G-TFA处理流程图

下面以广义魏格纳分布(Generalized Winger-Ville Distribution, G-WVD)为例，分析G-TFA在脉冲噪声下的性能，其表达式为

$$W_r(t, f) = \int_{\tau} f[r(t + \tau/2)] f^*[r(t - \tau/2)] e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (4)$$

其中，上标“*”表示共轭运算， $f[\cdot]$ 是非线性映射，其表达式为^[16]

$$f[r(t)] = \frac{r(t)}{|r(t)|}, \quad r(t) \neq 0 \quad (5)$$

通过该非线性变换，保留了接收信号的 $r(t)$ 相位信息，去掉了接收信号的幅度信息。式(1)代入G-WVD得

$$\begin{aligned} W_r(t, f) &= \int_{\tau} f[r(t + \tau/2)] f^*[r(t - \tau/2)] e^{-j2\pi f \tau} d\tau \\ &= \int_{\tau} \frac{s(t + \tau/2) + w(t + \tau/2)}{|s(t + \tau/2) + w(t + \tau/2)|} \\ &\quad \cdot \left(\frac{s(t - \tau/2) + w(t - \tau/2)}{|s(t - \tau/2) + w(t - \tau/2)|} \right)^* e^{-j2\pi f \tau} d\tau \end{aligned} \quad (6)$$

由于信号 $s(t)$ 与噪声 $w(t)$ 是独立的，所以

$$W_r(t, f) = \int_{-\tau}^{\tau} \frac{s(t+\tau/2)s^*(t-\tau/2) + w(t+\tau/2)w^*(t-\tau/2)}{|s(t+\tau/2) + w(t+\tau/2)||s(t-\tau/2) + w(t-\tau/2)|} \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

当混合信噪比较高, 即 $|s(t)| \gg |w(t)|$ 时, 式(7)可近似为

$$W_r(t, f) \approx \int_{-\tau}^{\tau} \frac{s(t+\tau/2)s^*(t-\tau/2) + w(t+\tau/2)w^*(t-\tau/2)}{|s(t+\tau/2)||s(t-\tau/2)|} \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau + \int_{-\tau}^{\tau} \frac{w(t+\tau/2)w^*(t-\tau/2)}{|s(t+\tau/2)||s(t-\tau/2)|} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (8)$$

式(8)中等号右侧第1项 $\int_{-\tau}^{\tau} \frac{s(t+\tau/2)s^*(t-\tau/2)}{|s(t+\tau/2)||s(t-\tau/2)|} e^{-j2\pi f\tau} d\tau$ 是发送信号相位的WVD, 保留了发送信号的时频信息, 等号右侧第2项 $\int_{-\tau}^{\tau} \frac{w(t+\tau/2)w^*(t-\tau/2)}{|s(t+\tau/2)||s(t-\tau/2)|} e^{-j2\pi f\tau} d\tau$ 是包含了噪声的WVD。当 $|s(t)| \gg |w(t)|$, 式(8)中起主要作用的是信号相位WVD, 脉冲噪声的影响被显著降低, 达到了抑制脉冲噪声目的。在实际使用过程中为避免因 $|r(t)|$ 过小而出现 $1/|r(t)| \rightarrow \infty$ 的情况, 会对非线性变换公式添加一个小的修正量, 表达式为

$$f[r(t)] = \frac{r(t)}{|r(t)| + \Delta} \quad (9)$$

其中 Δ 为一个较小的正数, 本文假设 $\Delta = 0.001$ 。

3.3 Alpha稳定分布噪声下声源横正时刻估计与目标长度估计算法

如果能获得舰船不同特征部位的横正时刻, 则可实现目标长度估计。下面给出目标特征部位横正时刻和长度估计算法, 如图4所示, 具体流程如下:

步骤1 对接收信号做式(9)非线性变换预处理, 然后做谱分析估计辐射噪声中线谱的频率。

步骤2 依据“三亮点模型”, 设计窄带滤波器选择不同亮点产生的线谱。频率几百赫兹的线谱认为是辅机产生的线谱噪声, 频率在1~100 Hz且

具有倍频关系的线谱认为是螺旋桨处产生的线谱噪声。

步骤3 由于多普勒信号的时频分布会产生交叉项影响瞬时频率估计, 因此在综合考虑交叉项抑制和计算量情况下, 以广义伪维格纳分布(Generalized Pseudo Wigner-Ville Distribution, G-PWVD)估计瞬时频率, 然后利用最小二乘法估计声源速度和横正时刻, G-PWVD表达式为

$$\text{GPWVD}_r(t, f) = \int_{-\tau}^{\tau} h(\tau) f[r(t+\tau/2)] f^*[r(t-\tau/2)] e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (10)$$

其中 $h(\tau)$ 为平滑所用窗函数, 本文所选用的窗函数是汉明窗。

步骤4 重复步骤2、步骤3直至估计出螺旋桨和辅机的横正时刻。

步骤5 将螺旋桨、辅机的横正时刻估计值和舰船速度估计值, 通过式(11)估计目标长度

$$\hat{L} = (\hat{t}_{c3} - \hat{t}_{c1}) \cdot 2 \cdot \hat{v} \quad (11)$$

其中 \hat{v} 表示声源速度估计值, \hat{t}_{c3} 表示螺旋桨的横正时刻估计值, \hat{t}_{c1} 表示辅机的横正时刻估计值。

4 实验及性能分析

4.1 不同噪声特征指数下性能对比

单频多普勒信号参数如下: 信号长度为50 s, 横正时刻 $t_c = 25$ s, 线谱频率 $f_0 = 200$ Hz, 运动速度 $v = 7$ m/s, 横正距离 $R_0 = 50$ m, 声速 $c = 1500$ m/s, MSNR = 10 dB。噪声特征指数从1开始以0.1为间隔变换到2, 每个噪声特征指数下做100次蒙特卡洛实验。图5为上述多普勒信号在 $\alpha = 1.2$, MSNR = 10dB下的波形和不同时频分析方法的时频分析结果。图5(b)为PWVD的时频分析结果, 受噪声影响信号被淹没难以提取多普勒特征, 图5(c)为G-PWVD时频分析结果, 图5(d)是FLOPWVD结果。图5(e)和图5(f)是阶数选取偏小或偏大时的FLOPWVD结果。当阶数偏小时, FLOPWVD会出现能量较弱的情况, 当阶数选择偏大时, FLOPWVD并不能消除脉冲噪声的影响。从图5中可以看出, G-PWVD和阶数选择合适的

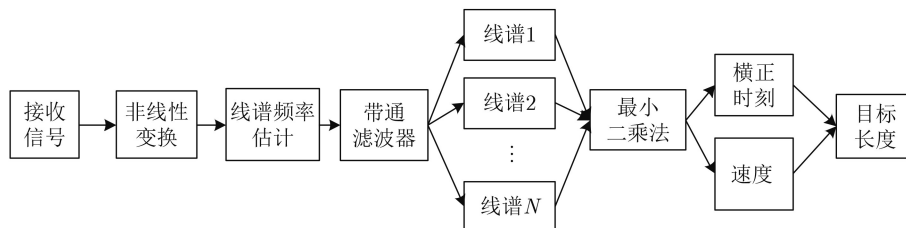


图4 目标特征部位横正时刻和长度估计算法

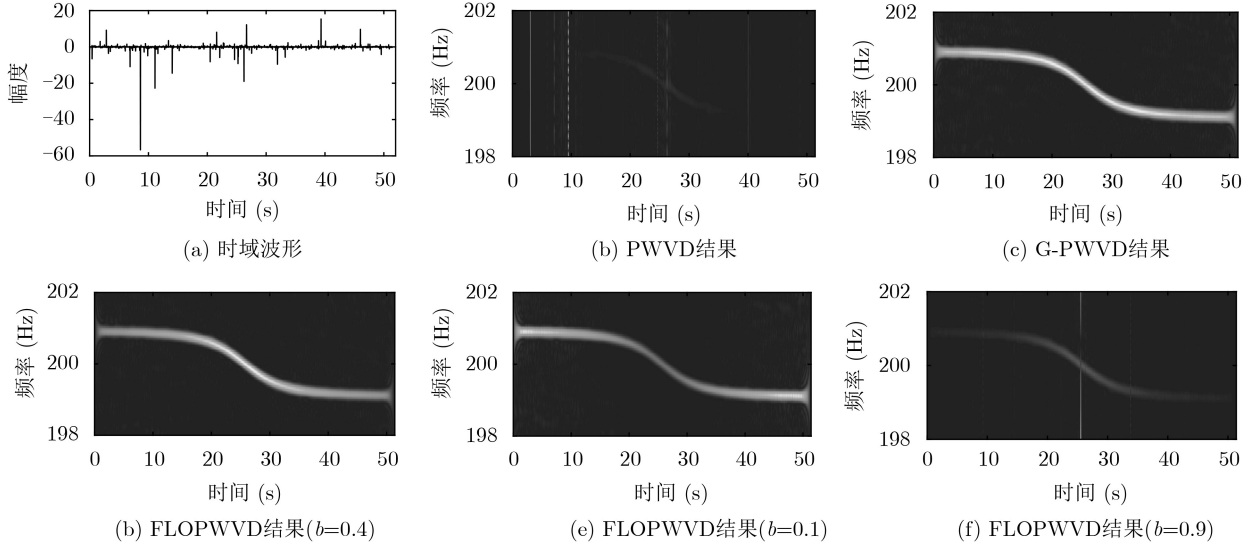


图5 波形和时频分析结果

FLOWVVD可较好地恢复信号时频信息，当FLOPWVD的阶数选择不合适，时频分析性能会受到较大影响。FLOPWVD定义为^[15]

$$\text{FLOPW}_x^{(b)}(t, f) = \int_{\tau} h(\tau) x^{(b)}(t + \tau/2) x^{-(b)}(t - \tau/2) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (12)$$

其中 $x^{(b)}(\cdot) = |x(\cdot)|^{b+1}/x(\cdot)^*$, $x(\cdot)^{-(b)} = (x(\cdot)^*)^{(b)} = (x(\cdot)^{(b)})^*$ 。

为了对比在Alpha稳定分布噪声下基于不同时频分析方法的声源横正时刻估计性能，均采用最小二乘法估计横正时刻，以均方根误差衡量(Root Mean Square Errors, RMSE)性能，其定义为

$$\text{RMSE} = 10 \lg \left(\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{t}_{c_i} - t_c)^2 / N} \right) \text{ (dB)} \quad (13)$$

其中 \hat{t}_{c_i} 表示第 i 次横正时刻的估计值， t_c 为横正时刻真实值， N 为仿真次数。结果如图6所示，当噪声特征指数 $\alpha = 2$ 时，3种时频分析方法效果相当。当噪声特征指数 $\alpha < 2$ ，随着噪声特征指数 α 的减小，基于PWVD方法性能下降。基于FLOPWVD(阶数

选择合适)和G-PWVD的方法，性能保持稳定。本文提出的G-PWVD不需要考虑阶数的选择问题，在解决该问题时更具优势。

接下来对比最小二乘法、交点法、交叉项法3种方法的性能，其中最小二乘法和交点法采用G-PWVD作为瞬时频率估计器，交叉项法依靠寻找G-WVD结果的能量最大值来估计横正时刻。信号参数不变，改变噪声参数，在噪声特征指数 $\alpha = 1.5$ 下，混合信噪比从 -5 dB开始以 1 dB为间隔变换到 20 dB，每个混合信噪比下做100次蒙特卡洛实验，结果如图7所示。当混合信噪比不低于 2 dB时，基于G-PWVD的最小二乘法的估计性能明显优于基于G-PWVD的交点法和基于G-WVD的交叉项法。该实验结果验证了高混合信噪比下算法具有优越性能，也说明在中、低混合信噪比下算法具有稳健性。但是混合信噪比小于 1 dB时，最小二乘法均方根误差明显增大。说明当混合信噪比过低时，有用信号被淹没在环境噪声中最小二乘法失效。

4.2 实测数据分析

为了进一步验证本文所提出的脉冲噪声下声源

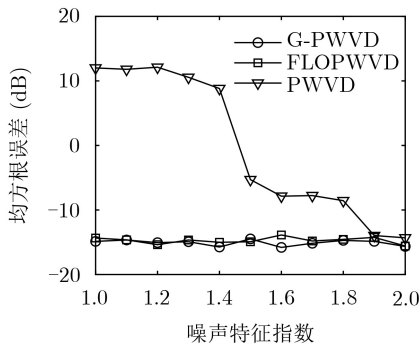


图6 不同特征指数下性能对比

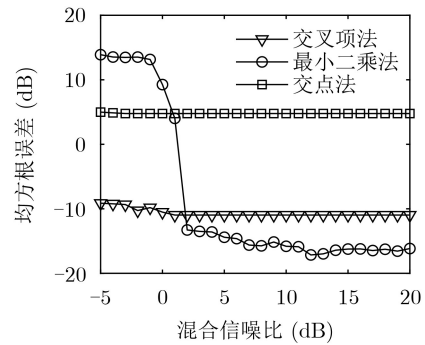


图7 不同混合信噪比下性能对比

横正时刻估计算法的实用性, 利用小型AUV在人工湖进行实验, 并对采集到的辐射噪声数据进行分析, 实验条件如表1所示。

表1 实验条件

被测目标	天和防务TH-B050R型AUV
采集设备	Ocean Sonics公司icListen HF智能水听器
测试地点	信息工程大学中心校区人工湖, 测试区域水深1.5 m左右
测试环境	有雨并伴有4~5级风

将水听器布放在距离岸边0.5 m、水深0.5 m处, AUV放置到与岸边距离2 m的位置, 如图8所示。通过岸段控制台设定螺旋桨转速400 rad/min, 用手柄操控AUV使其做直线运动前进。观测区域的起始位置与水听器的水平距离为10 m, 从AUV到达起始位置开始计时, 到AUV到达横正位置的时长为12.58 s。可得到AUV的运动参数记录值: 横正距离1.5 m、横正时刻12.58 s、速度0.795 m/s。

辐射噪声信号时域波形如图9(a)所示, 由于降雨以及水面风浪的拍打, 时域波形上出现了很多尖峰脉冲。对该信号做非线性预处理后获得的功率谱如图9(b)所示。

图9(b)中在800 Hz左右有一根较为明显的线谱, 设置通带滤波器频率的通带798~802 Hz, 对

接收辐射噪声滤波处理。滤波后信号的PWVD和G-PWVD结果图10所示。

受脉冲噪声的影响, 图10(a)中信号不明显, 并且在横正时刻附近出现畸变, 难以保证信号瞬时频率估计的正确性。采用G-PWVD获得的时频分析结果如图10(b)所示, 可以看出较为明显的多普勒频移现象。根据G-PWVD结果估计线谱的瞬时频率, 采用最小二乘法获得的横正时刻、横正距离和速度估计结果如表2所示。本文方法获得参数估计值较为接近实验时的记录值, 说明该算法具有一定实用性。

4.3 目标长度估计性能分析

依据目标长度将目标类型分为大、中、小3类目标。长度150 m以上的为大型目标, 长度在60~150 m之间的为中型目标, 60 m以下的为小型目标。依据文献[17,18]对舰船辐射噪声进行仿真。在30~200 m范围内随机生成500组不同长度的目标的信号, 依据长度估计结果对目标类型进行识别, 将结果中低于10 m和大于220 m的判为错误。表3是信号长度为100 s(以辅机横正时刻为中心左右各50 s), 目标速度7 m/s, 横正距离50 m, 声速 $c = 1500$ m/s, $\alpha = 1.5$, MSNR = 5 dB下的识别结果。在舰船多个特征部位可观测的情况下, 500次实验的正确率在90%以上。

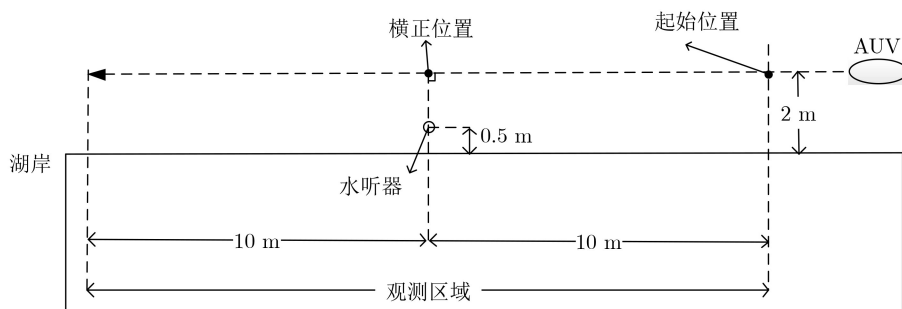


图8 实验场景示意图

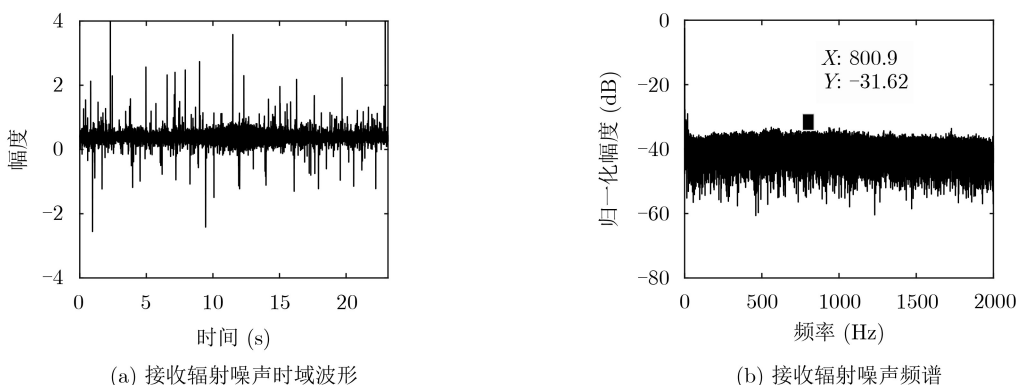


图9 接收辐射噪声时域波形

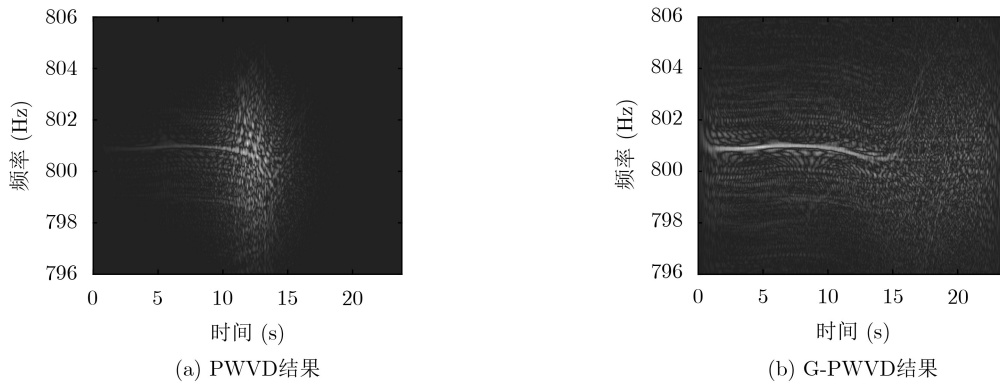


图 10 800 Hz线谱时频分析结果

表 2 最小二乘参数估计结果

	横正距离(m)	横正时刻(s)	速度(m/s)
记录值	1.50	12.58	0.795
估计值	1.56	12.52	0.748

表 3 横正距离50 m的识别结果

目标类型	识别类型			
	大	中	小	错误
大	142	10	0	4
中	11	233	3	2
小	0	6	87	3

5 结论

本文提出一种Alpha稳定分布噪声下声源横正时刻和目标长度估计方法。首先，本文在广义时频分析中引入了一种非线性变换，并对引入非线性变换后的时频分析公式进行修正和理论推导，使其可以应用于Alpha稳定分布噪声中。然后探究了基于广义时频分析的3种横正时刻估计方法的性能。仿真实验结果表明，本文所提方法在噪声特征指数 $1 \leq \alpha \leq 2$ 、混合信噪比不低于2 dB时能够有效估计舰船上声源的横正时刻和目标长度。当混合信噪比低于1 dB时，有用信号淹没在环境噪声中，本文算法失效。最后，本文对实际数据分析结果表明，广义时频分析能够消除实际环境中脉冲噪声带来的不良影响，获得的时频图中可以较为清晰地观察到多普勒频移现象。从其中提取瞬时频率并采用最小二乘法获得的目标参数估计值与实验过程中的记录值较为接近，验证了本文核心算法的有效性和优越性。

参 考 文 献

[1] 李余兴, 李亚安, 陈晓. 基于EEMD的舰船辐射噪声特征提取方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(5): 114-119. doi: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.05.018.
 LI Yuxing, LI Yaan, and CHEN Xiao. Ships' radiated noise

feature extraction based on EEMD[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(5): 114-119. doi: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.05.018.
 [2] YAN Jiaquan, SUN Haixin, CHEN Hailan, et al. Resonance-based time-frequency manifold for feature extraction of ship-radiated noise[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 936. doi: 10.3390/s18040936.
 [3] 相敬林, 刘勋. 舰船做为体积声源的源强度谱纵向分布特性[J]. 探测与控制学报, 2002, 24(2): 5-9, 17. doi: 10.3969/j.issn.1008-1194.2002.02.002.
 XIANG Jinglin and LIU Xun. The longitudinal distribution of source intensity spectrum of ship-radiated noise[J]. *Journal of Detection & Control*, 2002, 24(2): 5-9, 17. doi: 10.3969/j.issn.1008-1194.2002.02.002.
 [4] 周有, 韩鹏, 相敬林. 舰船作为体积目标时噪声通过特性的仿真[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(2): 61-64. doi: 10.3969/j.issn.1008-1194.2005.02.017.
 ZHOU You, HAN Peng, and XIANG Jinglin. Simulation of radiated noise of the ship as a volume target[J]. *Journal of Detection & Control*, 2005, 27(2): 61-64. doi: 10.3969/j.issn.1008-1194.2005.02.017.
 [5] 陈韶华, 李世智, 陈川. 子带通过特性分析用于体积目标识别的研究[C]. 中国声学学会2007年青年学术会议论文集(下), 武汉, 2007: 211-212.
 CHEN Shaohua, LI Shizhi, and CHEN Chuan. Volume target recognition with subband passage signature analysis[C]. China Acoustics Society 2007 Youth Conference, Wuhan, China, 2007: 211-212.
 [6] 刘勋, 相敬林, 张文军, 等. 自适应舰船被动跟踪与尺度估计的实验研究[J]. 兵工学报, 2002, 23(1): 54-58. doi: 10.3321/j.issn:1000-1093.2002.01.013.
 LIU Xun, XIANG Jinglin, ZHANG Wenjun, et al. Experimental study on the adaptive passive tracking and size estimation of ships[J]. *Acta Armamentarii*, 2002, 23(1): 54-58. doi: 10.3321/j.issn:1000-1093.2002.01.013.
 [7] 石杰, 相敬林, 陈韶华, 等. 七元非典型声强向量阵对舰船的被动定向和尺度估计[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1483-1486.

- SHI Jie, XIANG Jinglin, CHEN Shaohua, *et al.* The bearing and size estimation of Volume target based on a vector sound intensity array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(6): 1483–1486.
- [8] 王笑. 目标舰船尺度特性估计算法研究[D]. [硕士学位论文], 中国舰船研究院, 2015.
- WANG Xiao. Research on the scale estimates algorithm of the Ship target characteristic[D]. [Master dissertation], China Ship Research and Development Academy, 2015.
- [9] 张揽月, 丁丹丹, 杨德森, 等. 阵元随机均匀分布球面阵列联合噪声源定位方法[J]. *物理学报*, 2017, 66(1): 014303. doi: [10.7498/aps.66.014303](https://doi.org/10.7498/aps.66.014303).
- ZHANG Lanyue, DING Dandan, YANG Desen, *et al.* Noise source identification by using near field acoustic holograpy and focused beamforming based on spherical microphone array with random unifrom distribution of elements[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(1): 014303. doi: [10.7498/aps.66.014303](https://doi.org/10.7498/aps.66.014303).
- [10] 俞孟萨, 庞业珍. 舰船辐射声场及声源特性测量方法研究综述[J]. *船舶力学*, 2017, 21(1): 107–126. doi: [10.3969/j.issn.1007-7294.2017.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7294.2017.01.013).
- YU Mengsa and PANG Yezhen. A review of measurement methods of radiation acoustic field and acoustic source characteristics for ships[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2017, 21(1): 107–126. doi: [10.3969/j.issn.1007-7294.2017.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7294.2017.01.013).
- [11] CHITRE M, POTTER J, and HENG O S. Underwater acoustic channel characterisation for medium-range shallow water communications[C]. OCEANS '04 MTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04, Kobe, Japan, 2004: 40–45.
- [12] 张安清, 邱天爽, 章新华. α 稳定分布的水声信号处理新方法[J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(8): 1201–1204.
- ZHANG Anqing, QIU Tianshuang, and ZHAND Xinhua. A new underwater acoustic signals processing approach to α -stable distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(8): 1201–1204.
- [13] FERGUSON B G. Doppler effect for sound emitted by a moving airborne source and received by acoustic sensors located above and below the sea surface[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 94(6): 3244–3247. doi: [10.1121/1.407230](https://doi.org/10.1121/1.407230).
- [14] XU Lingji and YANG Yixin. Parameter estimation of underwater moving sources by using matched Wigner transform[J]. *Applied Acoustics*, 2016, 101: 5–14. doi: [10.1016/j.apacoust.2015.07.020](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.07.020).
- [15] GRIFFITH D W, GONZALEZ J G, and ARCE G R. Robust time-frequency representations for signals in α -stable noise using fractional lower-order statistics[C]. 1997 IEEE Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics, Banff, Canada, 1997: 415–419.
- [16] 张俊林, 王彬, 汪洋, 等. 一种 α 稳定分布噪声下OFDM信号调制识别与参数估计算法[J]. *电子学报*, 2018, 46(6): 1390–1396. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.017).
- ZHANG Junlin, WANG Bin, WANG Yang, *et al.* An algorithm for recognition and parameters estimation of OFDM in alpha stable distribution noise[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(6): 1390–1396. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.017).
- [17] LI Qin, YUAN Bingchen, and MING Xing. Simulation technique of radiated noise from underwater target and its implement of simulator[C]. The 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System, Shenzhen, China, 2009: 357–360.
- [18] 罗建, 赵亚磊, 黄仁可. 作为体积目标的舰船辐射噪声建模[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2018, 1(2): 38–42.
- LUO Jian, ZHAO Yalei, and HUANG Renke. Modelling of ship-radiated noise as volume targets[J]. *Digital Ocean & Underwater Warfare*, 2018, 1(2): 38–42.
- 王彬: 女, 1971年生, 副教授, 研究方向为信号分析与处理.
侯越圣: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为信号分析与处理.

责任编辑: 陈倩