

使用干涉谱图的浅海目标无源定位^{*}

李庆龙¹ 宋文华^{1†} 高大治² 迟 静² 高德洋²

(1 中国海洋大学 物理与光电工程学院 青岛 266100)

(2 中国海洋大学 海洋技术学院 青岛 266100)

2021 年 12 月 14 日收到

2022 年 4 月 27 日定稿

摘要 提出了一种利用 3 个接收水听器对目标进行定位的算法。该方法对各水听器接收到的低频分析记录 (LOFAR) 谱图, 利用 Hough 变换提取得到目标运动轨迹的最近通过点 (CPA) 参数。根据文中提出的最近点关联算法可以确定目标的运动速度, 从而解算目标与各个水听器之间的距离, 由此便可以结合三边定位原理对目标定位。仿真与海试数据的处理结果表明, 本文定位方法可以在缺乏环境参数的情况下对匀速运动的目标进行定位。

PACS 数: 43.30, 43.60

Passive localization of shallow sea targets using interferogram

LI Qinglong¹ SONG Wenhua^{1†} GAO Dazhi² CHI Jing² GAO Deyang²

(1 College of Physics and Optoelectronic Engineering, Ocean University of China Qingdao 266100)

(2 College of Marine Technology, Ocean University of China Qingdao 266100)

Received Dec. 14, 2021

Revised Apr. 27, 2022

Abstract This paper introduces an algorithm for target location using three receiver hydrophones. The Hough transform is used to extract the closest point of approach Closest Point of Approach (CPA) of the target trajectory from Low Frequency Analysis and Recording (LOFAR) spectra received by hydrophones. According to the closest point association algorithm proposed in this paper, the moving speed of the target can be determined, and the distance between the target and each hydrophone can be calculated, so that the target can be located by combining the principle of three-side positioning. Simulation and sea trial data processing results show that the proposed method can locate the target with uniform velocity in the absence of environmental parameters.

引言

目前水下目标的无源定位主要采用三子阵法^[1], 目标运动分析^[2-3](TMA), 匹配场定位等算法^[4]。使用三子阵法进行定位过程中对定位精度影响的主要因素有目标的距离和方位、基阵孔径的测量误差、基阵的安装精度以及时延估计精度, 其中时延估计精度是决定定位精度的关键因素^[5]。三子阵定位方法

是建立在自由场条件下的, 且要求各水听器间要严格同步。目标运动分析方法是由不同时刻观察到的目标方位历程, 对目标运动状态进行预测, 从而对目标定位^[6]。匹配场定位算法是基于声源、海水介质以及水听器之间的紧密联系所提出的一种定位方法^[7-9]。已知其中的任意两者, 便可以估计第三者, 基于海洋参数进行声场建模, 结合水听器所接收到的声源信号对声源进行定位分析。

在海洋波导传播过程中, 由于多途效应, 声信号

^{*} 国家自然科学基金项目 (12004359) 和中央高校基本科研业务费专项 (202265001) 资助

[†] 通讯作者: 宋文华, songwenhua@ouc.edu.cn

在时频域内会出现几何分布的干涉条纹, 这种干涉效应称之为声场的干涉结构^[10]。与其它的定位算法相比, 声场干涉结构对环境中的小扰动并不敏感^[11], 具有良好的环境稳定性, 但是基于声场干涉条纹的定位算法一般只能给出目标的距离信息^[12-13], 方位信息是缺失的。

本文提出了一种基于 LOFAR 谱对水下目标进行定位的最近点关联算法。该方法可以由 3 个水听器来获取目标的运动速度, 从而得到目标与水听器之间的距离, 再结合三边定位的方法便可对目标定位。该方法的优点在于, 相较于一般的基于声场干涉条纹的定位方法, 该方法不仅能得出目标的距离信息, 更可以准确的对目标定位。仿真和海试结果表明, 最近点关联算法在海洋环境参数缺失的情况下也可对目标定位。

1 定位算法的理论依据

本文定位算法主要针对匀速直线运动的目标。利用 3 个水听器来接收目标所发出的声信号, 并使用短时傅里叶变换得到 LOFAR 图, 由 Hough 变换对 LOFAR 图进行处理得到声源运动轨迹参数^[14-16], 之后利用 3 个接收器提取参数之间的关联特性, 确定运动目标的运动速度 v , 进而得到各个时刻运动目标与各水听器之间的距离 r , 利用三边定位的方法便可对运动目标进行定位^[17-18]。

如图 1 所示, 3 个水听器所在的位置为 O_1, O_2, O_3 , 目标轨迹如图所示, 目标运动速度为 v 。目标轨迹中距离水听器 O_i 最近的位置称为最近通过点 CPA, 最近通过点与水听器 O_i 的距离称为最近通过距离 (记为 d_i), 目标到达 CPA 的时刻称为最近通过时刻 (记为 τ_i), 本文称 d_i 和 τ_i 为目标运动轨迹对水听器 O_i 的 CPA 参数。下标 $i=1, 2, 3$, 对应各个水听器。

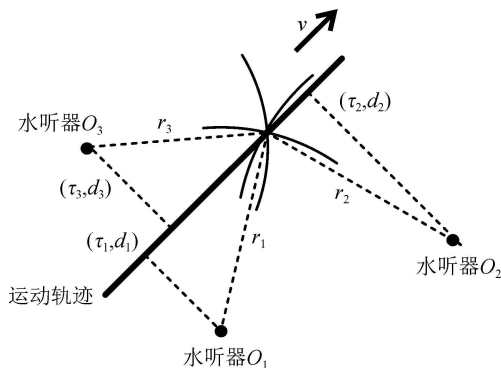


图 1 最近点关联算法定位原理示意图

本文定位算法是利用 3 个水听器记录的 LOFAR 谱图获取目标轨迹 CPA 参数, 然后计算出目标与各

水听器的距离, 根据三边定位原理对目标定位。本部分将首先介绍 LOFAR 谱图的产生机理, 然后是讨论目标运动轨迹 CPA 参数的提取、最近点关联算法估计目标运动速度和三边定位原理, 最后介绍数值仿真实验和海试数据处理分析的结果。

1.1 LOFAR 谱图的产生及目标运动参数获取

由于简正波之间的干涉, 接收器接收到的声场信号 LOFAR 谱图中会出现规则的条纹结构, 可以使用波导不变量 β ^[19] 来描述。本部分将简述 LOFAR 谱图中声强等值线的条纹方程, 及其目标轨迹 CPA 参数之间的联系。

根据图 1 所示几何关系, t 时刻, 目标与某一水听器 O 的距离 $r(t)$:

$$r(t) = \sqrt{v^2(t - \tau)^2 + d^2}. \quad (1)$$

对式 (1) 求导:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{v^2(t - \tau)}{\sqrt{v^2(t - \tau)^2 + d^2}}. \quad (2)$$

令 $v_d = dr/dt$, 表示运动目标与水听器之间距离的变化率, 目标相对于水听器的径向速度。

由波导不变量定义式^[20]:

$$\beta = \frac{r}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial r}. \quad (3)$$

可以转化为:

$$\beta = \frac{r}{f} \frac{\partial f}{\partial r}. \quad (4)$$

由式 (4) 可得:

$$\frac{df}{dr} = \frac{f}{r} \beta. \quad (5)$$

在 t - f 域声强图中, 干涉条纹的斜率为:

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dr} \frac{dr}{dt} = \beta \frac{f}{r} v_d. \quad (6)$$

式 (6) 可以等价写成:

$$\frac{df}{f} = \frac{\beta v^2(t - \tau)}{v^2(t - \tau)^2 + d^2} dt. \quad (7)$$

对式 (7) 两边做定积分:

$$\int_{f_0}^f \frac{df}{f} = \int_{\tau}^t \frac{\beta v^2(t - \tau)}{v^2(t - \tau)^2 + d^2} dt. \quad (8)$$

积分结果为:

$$\ln f = \beta \ln \left(\sqrt{v^2(t - \tau)^2 + d^2} \right) + \ln f_0 - \beta \ln d. \quad (9)$$

已知 f_0 为干涉条纹顶点频率, 则 $f = f(t)$, $f_0 = f(\tau)$, 对上式取反对数可以得到:

$$f = f_0 \left[1 + \left(\frac{v}{d} \right)^2 (t - \tau)^2 \right]^{\beta/2}. \quad (10)$$

波导不变量 β 由信号频率 ω 、声源和接收器间的平均距离 r , 以及在 $(r-\omega)$ 平面内干涉条纹的斜率 $\partial\omega/\partial r$ 决定。对于 Pekeris 波导, 宽频带范围内 β 也并不严格等于 1.0, 但是对于多数模间干涉而言, 对应的 β 数值近似在 1.0 的附近, 故而称之为不变量。在浅海中, 考虑一般情况, 取 $\beta \approx 1$ ^[20], 式 (10) 可以化简为:

$$\frac{f^2}{f_0^2} - \frac{(t - \tau)^2}{b^2} = 1, \quad (11)$$

其中, $b = d/v$ 。

由式 (11) 可以知道, 目标运动通过水听器最近距离时候的干涉条纹是一簇广义的双曲线, 并且它们共同的参数是 τ 和 b 。

1.2 利用 Hough 变换对运动轨迹的 CPA 参数的提取

Hough 变换是 1962 年由 Hough 提出来的, 它在影像分析, 模式识别等很多领域中得到了成功的应用^[21]。Hough 变换 (图 2) 可用来识别和检测直线、圆、双曲线、抛物线等曲线。它可以把空间图像中的曲线变换到参数空间的一个点上面。在本文 1.1 节已经分析得知目标运动通过水听器最近距离时候的干涉条纹是一簇广义的双曲线。因此可以用 Hough 变换的方法, 就可以把空间图像中对曲线的检测的问题转变成寻找参数空间中峰值的问题。

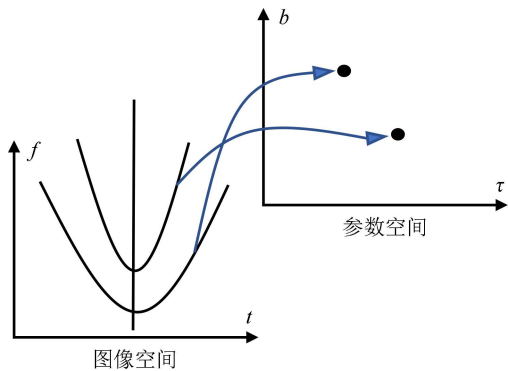


图 2 Hough 变换示意图

在时频平面中存在形如式 (11) 的双曲线 $(f^2/a) - [(t - \tau)^2/b] = 1$, 在双曲线上的点 (t_0, f_0) , 分别对应参数空间 $(\tau-b)$ 内的一条曲线, 而整条双曲线则对应参数空间 $(\tau-b)$ 内的一组相交于同一点的曲线。

对于图像空间中位于同一曲线上的点 (t, f) , 可以表述为:

$$h((\hat{\tau}, \hat{b}), (t, f)) = 0, \quad (12)$$

式中, $\hat{\tau}, \hat{b}$ 为曲线的特征值参数。假如将上述公式中的 CPA 参数和变量互换, 则上式等同于:

$$h((\hat{t}, \hat{f}), (\tau, b)) = 0. \quad (13)$$

图像空间中的同一条曲线上的点经过式 (13) 后, 可以映射到参数空间, 相交于参数 τ, b 所确定的点。由此可以得知, 图像空间中某一曲线的数据点足够多, 则在参数空间对应的参数点的积累值就越多, 由对参数空间中各个参数点的积累值可以对图像空间中的曲线进行描述。

结合式 (11), 对于 $t-f$ 平面空间图像中的干涉条纹曲线, τ 和 b 为参数空间的曲线参数, 通过对 $t-f$ 平面中的干涉条纹曲线进行 Hough 变换将其映射到 $\tau-b$ 参数空间内, 便可以对 τ, b 进行估计。

在使用 Hough 变换从 LOFAR 谱图中提取运动参数 τ, b 的过程中, 使用了下形式的代价函数^[22]:

$$H(\tau, b) = \sum_{f_0} \frac{\left(\int_{L(f_0)} I(f, t) ds \right)}{\int_{L(f_0)} ds}, \quad (14)$$

式中:

$$L(f_0) = f_0 \sqrt{1 + \frac{(t - \tau)^2}{b^2}},$$

其中, $I(f, t)$ 为声场强度, $L(f_0)$ 是曲线积分路径, f_0 取值范围为 LOFAR 谱图的整个频率周。曲线积分会将二维 LOFAR 谱图压缩成一维曲线, 如图 3 所示。当 τ 和 b 参数与真实值接近, 曲线积分后的结果后保留声场干涉条纹结构, 而当 τ 和 b 参数偏离真实值时, 曲线积分后的结果中干涉条纹的周期特性会减弱甚至消失。

由式 (11), 我们已经知道干涉条纹为一簇形如 $(f^2/f_0^2) - [(t - \tau)^2/b^2] = 1$ 的双曲线, f_0 为双曲线顶点的频率, 取值范围为 LOFAR 谱图的整个频率区间。在式 (14) 中, $L(f_0)$ 为这些双曲线中顶点频率为 f_0 的一条, τ 和 b 为参数空间的曲线参数, 式 (14) 分母部分为对各双曲线做归一化处理, 由于这些曲线在 LOFAR 谱图中的长度不同, 而我们所需要提取的参数 b 与曲线的曲率有关, 并不完全依赖曲线长度, 因此在对其进行曲线积分之后做归一化处理, 为了考虑整个 LOFAR 谱图平面内以不同频率为顶点的所有曲线的影响, 将平面内以所有频率为曲线顶点的曲线 (不同的 f_0) 的处理结果求和。这样便利用到了 LOFAR 谱平面内每条双曲线的信息, 使用 Hough 变换来提取得到 τ 和 b 。

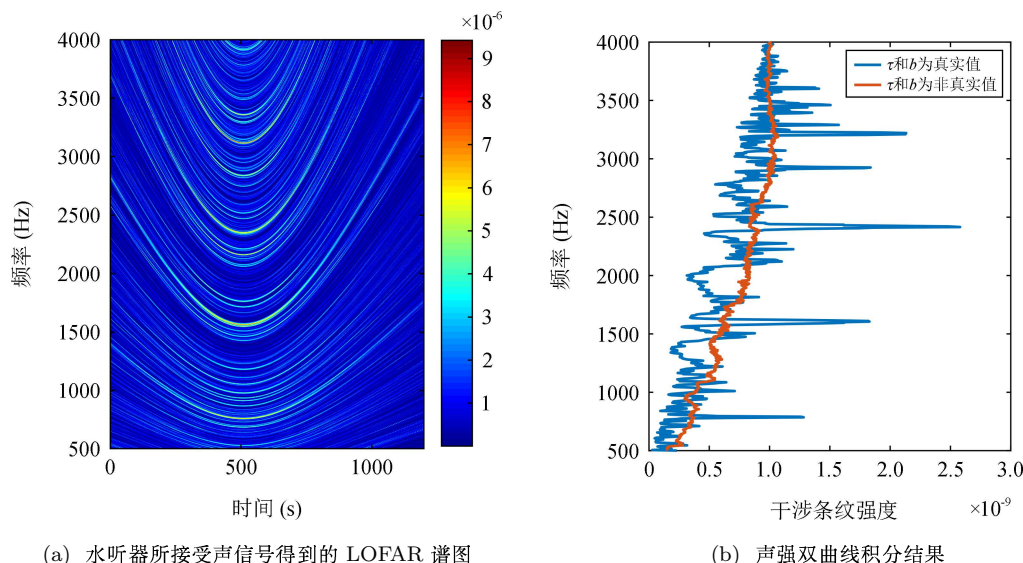


图3 Hough 变换过程中声强在频率上的能量分布

1.3 三边定位原理及利用最近点关联算法对距离的估计

三边定位是一种比较常见的定位算法,由3个已知坐标的水听器与被测目标之间的距离 r 来确定被测目标的位置。已知3个水听器的坐标为 $O_1(x_1, y_1)$, $O_2(x_2, y_2)$, $O_3(x_3, y_3)$ 。设目标点的位置坐标为 (x, y) , 目标与3个水听器之间的距离分别为 r_1, r_2, r_3 , 由几何关系可得到如下方程式:

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= r_1^2, \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= r_2^2, \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= r_3^2. \end{aligned} \quad (15)$$

在理想状态下,在三边定位的算法中,被测目标是处于一个确定的位置,但是实际过程中,对距离的测量存在着一定的误差,只能得到对目标定位的最优解。 x 和 y 的数值可以根据最小二乘准则求解^[23-24]。

为了得到目标与接收器之间距离 r_i , $i = 1, 2, 3$, 需要知道目标的运动速度 v 。如图4所示, t 时刻目标与水听器 O_i 之间的距离 r_i 表达式为:

$$r_i = v\sqrt{b^2 + (t - \tau_i)^2}, \quad (16)$$

式中, b 和 τ 可以由Hough变换结果得到,而目标的运动速度 v 则需要事先已知或者估计得到。关于目标速度的估计,文献中已有的算法包括声压相关算法^[25]或者多普勒算法^[26-28]等,都只能估计径向速度,并且声压相关算法需要已知声简正波的波数信息(或者已知环境信息计算确定);而多普勒算法则需要已知声源的辐射线谱频率。本文提出的最

近点关联算法,可以直接确定目标的运动速度。

最近点关联算法将各水听器LOFAR谱图提取的目标轨迹CPA参数进行综合考虑,以分析得到目标运动速度。其基本思路是,综合考虑各水听器之间距离与各水听器LOFAR谱图提取的目标轨迹CPA参数之间的几何联系,穷举目标轨迹所有可能性,根据代价函数确定目标速度的最优值。下面对最近点关联算法做详细介绍。

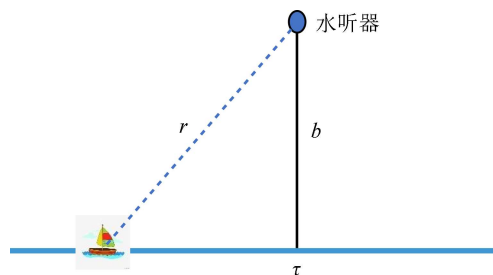


图4 目标运动轨迹与任一水听器之间的位置关系

由于各接收水听器的空间位置已知,那么任意两个水听器之间的距离 r_{ij} 与目标轨迹CPA参数之间的空间关系,如图5所示,为:

$$\begin{aligned} r_{ij}^2 &= v^2[(\tau_i - \tau_j)^2 + (b_i \pm b_j)^2], \\ i, j &= 1, 2, \dots, n, \text{ 且 } i \neq j, \end{aligned} \quad (17)$$

式中, n 是水听器个数, τ_i, τ_j 是水听器 i 和水听器 j 的CPA时刻,而 b_i, b_j 是CPA距离与目标运动速度的比值。式中正负号取决于水听器 i 和水听器 j 与目标轨迹之间的关系,当两个水听器位于目标运动轨迹异侧(如图5中 r'_{ij})的时候,式(17)取“+”;而当两个水听器位于目标运动轨迹同侧(如图5中 r_{ij})的时候,式(17)取“-”。

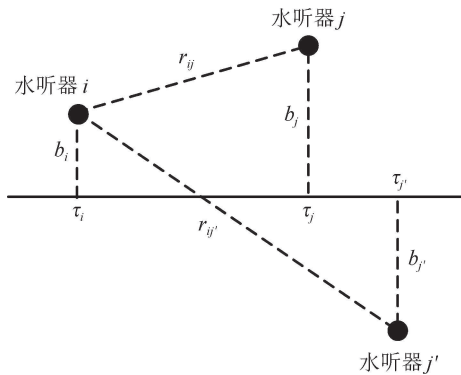


图 5 目标运动轨迹与两个水听器之间的位置关系

根据式 (17), 目标速度 v 的估计需要已知目标轨迹在各水听器之间的穿插情况; 但这在定位完成前是不可能的, 因此拟采用穷举的算法得到速度的估计。算法具体如下:

(1) 假设有 n 个水听器, 按照水听器位于目标轨迹同侧还是异侧, 目标运动轨迹的可能情况有 2^{n-1} 种。

(2) 任意两个水听器, 当其位于同一侧时, 方程组内 b 部分的相关公式取减号, 当其位于两侧时, 公式取加号。

(3) 对某一轨迹, n 个接收器两两组合, 共可以计算出个 $[(n-1)n]/2$ 速度 v 。

如果该轨迹与目标真实轨迹一致, 那么这些速度的方差 S^2 最小。则认定该运动轨迹为目标运动的真实轨迹。由此可以确定目标的运动速度。

当采用 3 个水听器接收时, 目标路径与 3 个水听器之间的位置关系存在 4 种可能性, 如图 6 所示。可以得到如下 3 个公式:

$$\begin{aligned} r_{12}^2 &= v_{12}^2[(\tau_2 - \tau_1)^2 + (b_2 \pm b_1)^2], \\ r_{13}^2 &= v_{13}^2[(\tau_3 - \tau_1)^2 + (b_3 \pm b_1)^2], \\ r_{23}^2 &= v_{23}^2[(\tau_3 - \tau_2)^2 + (b_3 \pm b_2)^2]. \end{aligned} \quad (18)$$

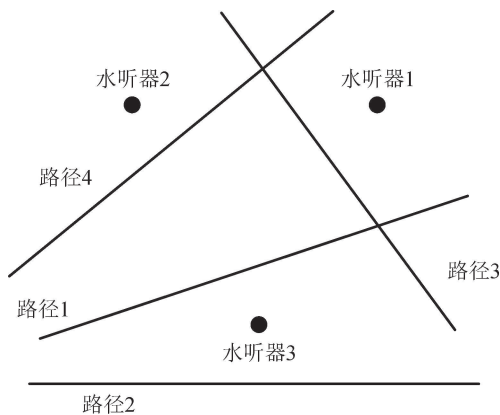


图 6 目标运动路径与 3 个听器之间可能存在的位置关系

其中各公式中取“+”号还是“-”号取决于两水听器位于轨迹异侧还是同侧。此时可以解得 3 个不同的速度 v , 当假定的目标路径与真实路径一致时, v_{12} , v_{13} , v_{23} 彼此之间最一致。此时取三者的均值作为目标速度的估计值。

估计得到目标速度 v 之后, 便根据式 (16) 可以得到目标距离各个水听器之间的距离 r_i , 再利用三边定位原理对目标进行定位。

2 数值仿真

本次仿真是使用了 KRAKEN 工具箱来进行试验的仿真。采用的是 Pekeris 波导, 仿真设定一个水深为 100 m, 海底为覆盖有一层 20 m 厚的沉积层的半无限大空间, 声速剖面为等声速, 具体参数见表 1。

表 1 仿真环境参数设定

分层信息	声速 (m/s)	密度 (g/cm ³)	衰减系数 (dB/λ)	厚度
海水	1500	1.00	0	100
沉积层	1600	1.50	0.1	20
半无限大空间	1700	1.50	0.1	—

仿真时设定 3 个水听器的坐标为 $O_1(4000, 2250)$, $O_2(1500, 2250)$, $O_3(3000, -1000)$, 目标的运动速度为 5 m/s, 从原点 (0,0) 开始出发, 沿着与 x 轴成 15° 的方向匀速运动。目标运动轨迹与 3 个水听器之间位置关系如图 7 所示。目标运动中保持深度为 25 m, 3 个水听器接收深度为 5 m, 声场计算频率范围为 500~4000 Hz, 时间范围为 0~200 s。仿真过程添加噪声信噪比 $\text{SNR}=20$ dB, 仿真得到 3 个水听器接收到 LOFAR 谱图, 如图 8 所示。

对图 8 中 3 幅 LOFAR 图进行 Hough 变换 (如图 9), 可以提取得到 b 和 τ , 提取结果见表 2。

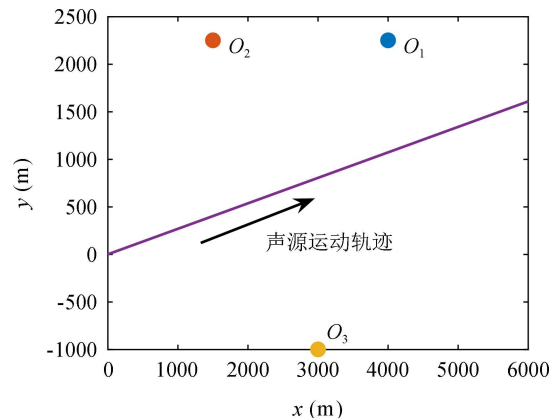


图 7 目标运动轨迹与水听器间的位置关系

表 2 Hough 提取得到 b 和 τ (括号内为真实值)

	水听器 1	水听器 2	水听器 3
b (s)	222.2 (227.3)	333.3 (357.1)	344.8 (344.8)
τ (s)	864 (860)	408 (400)	504 (510)

对 Hough 提取的目标轨迹 CPA 参数结果运用最近点关联算法可以得到目标的运动速度, 中间过程见表 3, 其中路径 1, 2, 3, 4 的具体情况如图 5 所示。结果表明路径 1 为最可能的情况(方差最小), 且目标运动速度为 $v=5.21$ m/s。根据三边定位原理可以对运动目标进行定位, 定位结果如图 10 所示。

比较表 2 中运动目标特征信息的提取, τ 和 b 的提取结果均与真实值接近, 具有较高的准确性。图 10 对运动目标的定位结果与运动目标的真实位置的比较可以看出, 此定位方法定位效果比较准确, 但是随着时间的增加, 定位的误差逐渐积累增大, 在目标运

动 12 s 内误差由 53 m 增大到 229 m。从本定位方法的角度考虑, 由式 (16) 分析可以知道影响定位精度的直接因素为目标运动速度。而由式 (18) 可以得知目标运动速度 v 准确与否取决于 Hough 变换对 τ 和 b 的提取的准确度。分析认为误差产生的原因是在利用 Hough 变换对目标轨迹 CPA 参数的提取不够精确导致对目标运动速度估计产生误差, 从而影响了定位精度。

表 3 仿真运动目标各可能路径速度计算结果

	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4
v_{12} (m/s)	5.32	5.32	3.48	3.48
v_{13} (m/s)	5.06	8.94	5.06	8.94
v_{23} (m/s)	5.23	37.02	37.02	5.23
$\bar{v}$ (m/s)	5.21	17.10	15.19	5.88
方差	0.01	200.68	238.78	5.19

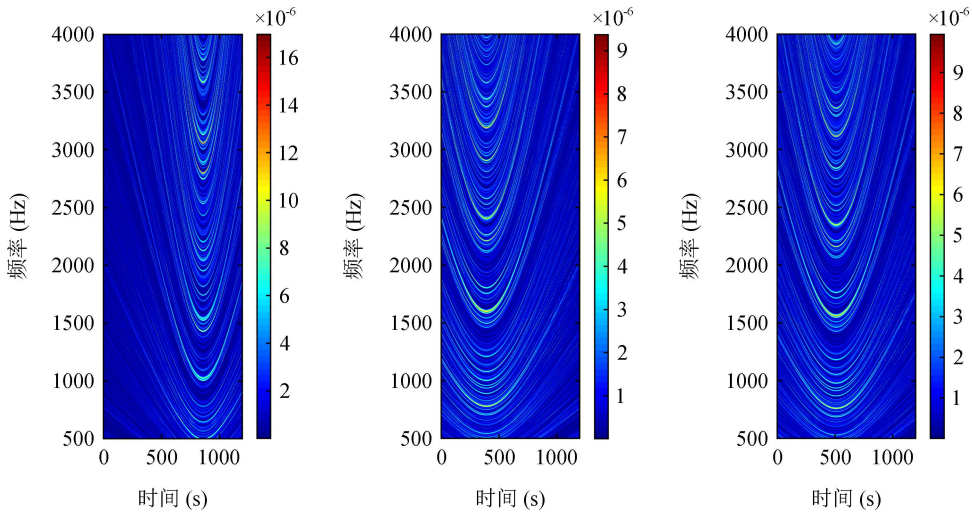


图 8 3 个水听器所接收到的声信号对应的 LOFAR 图

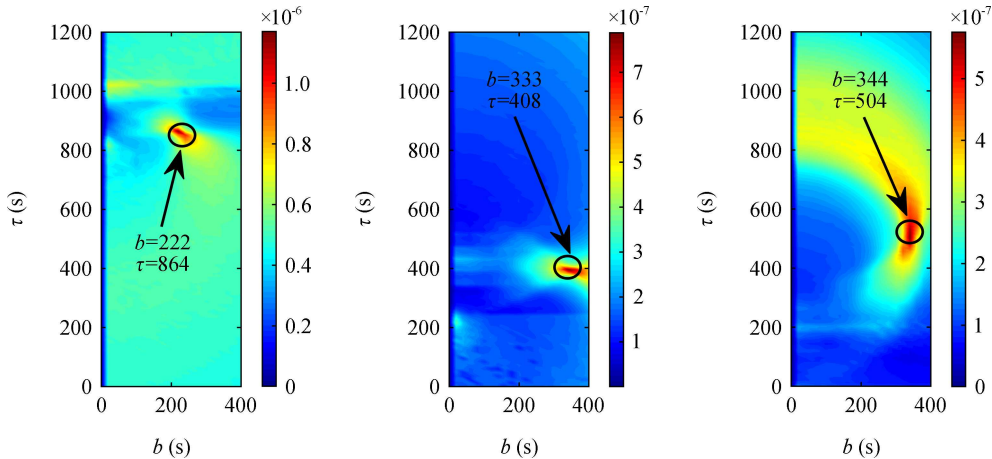


图 9 对仿真数据所得 LOFAR 图进行 Hough 变换提取结果

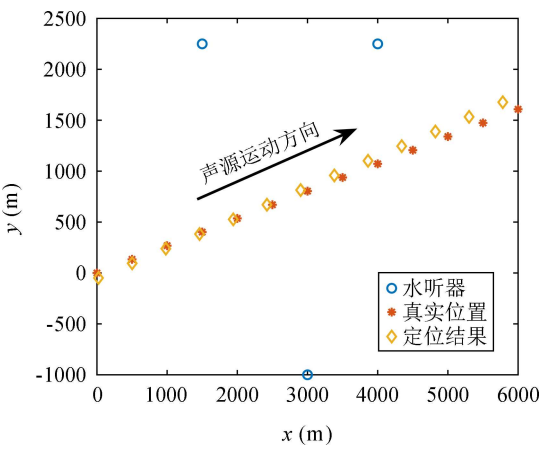


图 10 仿真数据定位结果

3 定位算法的实验验证

2020 年 6 月在青岛黄海水域进行了海上试验来对本文提出的定位方法进行验证。实验所采用的声

源是一艘匀速直线运动的渔船，运动过程中，渔船穿过 3 个不同位置的水听器。试验海域水深 45 m，接收水听器深度为 20 m，3 个水听器之间距离为 $r_{12}=411.60\text{ m}$ ， $r_{13}=647.96\text{ m}$ ， $r_{23}=532.06\text{ m}$ 。试验数据处理的频率范围为 200~2000 Hz。信号长度为 6 min。本定位方法不需要事先预知海水的其它参数如海底介质、海底声速、吸收系数、密度等条件。

试验过程中对 3 个水听器接收到的声信号进行时间窗口为 0.2 s 覆盖率为 50% 的短时傅里叶变换可以得到对应的 LOFAR 谱图，如图 11 所示。

对图 11 中 3 幅 LOFAR 图利用 Hough 变换来对目标运动轨迹的特征信息进行提取 (如图 12)，提取结果见表 4。

根据表 4 中数据，利用式 (18) 以及最近点关联算法，可以得知目标运动的轨迹有 4 种情况，如图 8 所示。在图 8 所示的 4 种可能的运动路径中，3 个

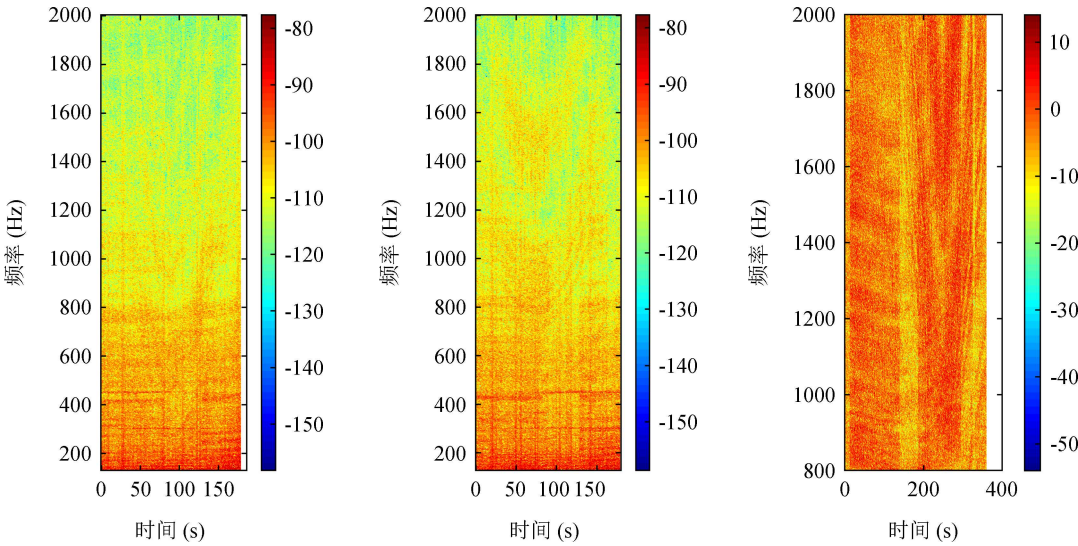


图 11 海试过程 3 个水听器所接收到的声信号对应的 LOFAR 图

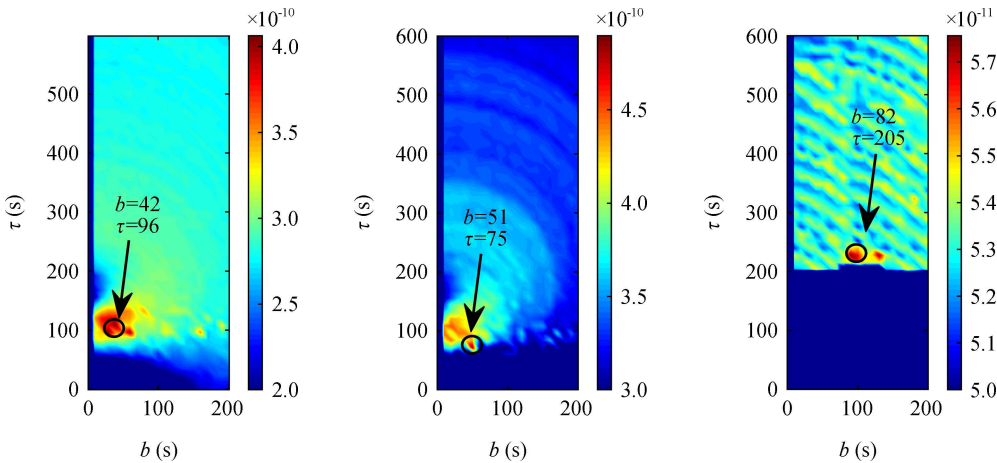


图 12 对海试数据所得 LOFAR 图进行 Hough 变换提取结果

水听器两两组合每个路径可以得到 3 个速度, 计算结果见表 5。

表 4 试验过程 Hough 提取得到 b 和 τ

	水听器 1	水听器 2	水听器 3
b (s)	42.40	51.55	82.64
τ (s)	96	75	205

表 5 运动目标各可能路径速度计算结果

	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4
v_{12} (m/s)	8.65	8.65	7.34	7.34
v_{13} (m/s)	4.37	4.52	4.38	4.52
v_{23} (m/s)	2.90	4.13	4.13	2.90
$\bar{v}$ (m/s)	5.31	5.77	5.28	4.92
方差	5.94	4.18	2.14	3.37

由最近点关联算法分析可以得知目标运动轨迹为路径 3, 取平均速度 $\bar{v}=5.28$ m/s 作为预测目标运动速度。

根据式 (16) 可以得到不同时刻目标分别与 3 个水听器之间的距离, 见表 6。由三边定位原理可以确定出在此段时间内目标声源的移动轨迹, 由运动声源上的搭载的 GPS 定位设备, 可以得到目标声源在此段时间内的实际运动轨迹。定位结果以及运动的实际轨迹如图 13 所示, 其运动方向为由下而上。

表 6 运动目标不同时刻与 3 个水听器之间的距离 (单位: m)

t (s)	水听器 1	水听器 2	水听器 3
0	422.99	480.52	1142.60
60	100.95	283.47	858.37
120	212.38	361.30	607.30
180	528.47	617.61	448.94

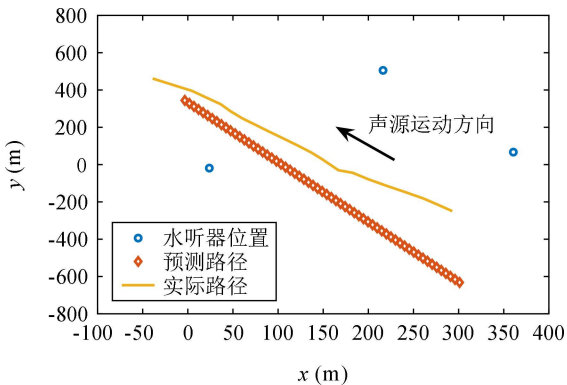


图 13 试验过程目标渔船运动轨迹

下面对定位算法的误差来源进行分析。在定位过程中, 定位误差逐渐减小误差最大产生于定位初

始时刻, 误差为 350 m, 在试验结束时, 定位误差为 141 m。定位过程中所用到的具体的定位方法为三边定位法, 需要用到的参数为目标与水听器之间的距离 r ; 在对 r 的计算过程中, 所用到的参数有目标的运动速度 v , 水听器接收到的 LOFAR 图经过 Hough 变换提取得到的 b 和 τ , 其中 v 是由 b 和 τ 的一个方程组 (18) 来得到的, 因此, 算法定位精度主要依赖对 b 和 τ 的准确提取, 这一方面取决于目标运动参数的提取算法, 另一方面也取决于接收 LOFAR 谱图的信噪比。试验数据中 LOFAR 谱图为渔船辐射噪声产生, 信噪比不高, 本文所使用的 Hough 变换也不具备很好的抗噪声性能, 因此提取的目标轨迹参数 b 和 τ 具有较大的误差, 后续考虑在对 LOFAR 谱图进行特征信息提取的过程中在原有参量 b 和 τ 的基础上加入波导不变量 β , 结合多个参量的提取来提高提取精度。此外, 还有以下原因可能会导致算法定位误差: 水听器浮标随海水漂动, 在提取目标轨迹参数 b 和 τ 时假定波导不变量 β 值为 1, 而实际环境的 β 可能有所差别。

4 结论

本文介绍了一种基于 LOFAR 图对目标进行定位的方法。该方法利用 Hough 变换从 LOFAR 图中提取出运动目标轨迹的 CPA 参数, 再由最近点关联算法来确定目标的运动速度来得到目标与水听器之间的距离, 利用三边定位的方法来对运动目标进行定位。在经过数值仿真的验证之后, 进行了海上试验, 对运动的渔船进行了试验分析, 并与 GPS 所记录的真实运动轨迹做了对比, 表明该方法可以实现对未知目标的定位。该方法计算简单, 减少了传统定位方法所需要用到的大量计算过程, 并且可以在环境参数缺失的情况下使用, 对环境的依赖性较低。在目标源级较低的情况下, 可以在各接收浮标布置多个水听器提高信噪比。

参 考 文 献

1 梁晶, 于瑾, 闫晓英. 三元阵被动定位方法原理及试验验证. 舰船电子工程, 2009; **29**(5): 144—145

2 陈韶华, 王志刚, 张维. 多基阵目标运动分析的实验研究. 2016 年全国声学学术会议论文集, 中国声学学会, 2016: 228—231

3 Tremois O, Cadre J. Target motion analysis with multiple arrays: performance analysis. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1996; **32**(3): 1030—1046

4 Gall Y L, Socheleau F X, Bonnel J. Matched-field processing performance under the stochastic and deterministic signal models. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2014; **62**(22): 5825—5838

5 惠娟, 胡丹, 惠俊英, 殷敬伟. 聚焦波束形成声图测量原理研

- 究. 声学学报, 2007; **32**(4): 356—361
- 6 Hassab J C. Contact localization and motion analysis in the ocean environment: a perspective. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2003; **8**(3): 136—147
- 7 Baggeroer A B, Kuperman W A. An overview of matched field methods in ocean acoustics. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1993; **18**(4): 401—424
- 8 Xiao Y C, Wei P, Yuan T. Observability and performance analysis of Bi/Multi-Static Doppler-only radar. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2010; **46**(4): 1654—1667
- 9 Webster R. An exact trajectory solution from Doppler shift measurements. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1982; **18**(2): 249—252
- 10 Chuprov S D. Interference structure of sound field in the layered ocean. In *Ocean Acoustics*, Moscow: Nauka, 1982: 71—91
- 11 Cockrell K L, Schmidt H. A modal Wentzel-Kramers-Brillouin approach to calculating the waveguide invariant for non-ideal waveguides. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011; **130**(1): 72—83
- 12 余赟, 袁延艺, 刘雄厚. 利用波导不变量进行运动单线阵的无源测距测速. 声学学报, 2017; **42**(6): 661—668
- 13 任群言, 朴胜春, 郭圣明, 马力, 廖天俊. 利用宽带声场干涉结构特性对移动船只距离的连续估计. 声学学报, 2018; **43**(2): 163—168
- 14 李建, 孙贵青, 张春华等. 声矢量传感器线阵波导不变量被动测距研究. 应用声学, 2012; **31**(4): 249—255
- 15 杨娟, 惠俊英, 江磊. 利用低频声压干涉谱的目标运动参数估计. 哈尔滨工业大学学报, 2008; **40**(3): 471—474
- 16 杨娟, 惠俊英, 江磊等. 基于 STFT-Hough 变换的目标运动分析. 哈尔滨工程大学学报, 2007; **28**(2): 137—142
- 17 Bae Y C. Robust localization for robot and Io T Using RSSI. *Energies*, 2019; **12**(11): 34—35
- 18 Srikanth B, Kumar H, Rao K. A robust approach for WSN localization for underground coal mine monitoring using improved RSSI technique. *Math. Model. Eng. Probl.*, 2018; **5**(3): 225—231
- 19 曾武, 吴旭, 周胜增. 基于波导不变性的运动目标威胁分析. 声学与电子工程, 2018(4): 21—23
- 20 王文博, 黄勇, 李淑秋. 单水听器波导不变量被动测距. 应用声学, 2014; **33**(5): 391—396
- 21 李建森, 项偲. 基于随机采样的随机 Hough 变换快速圆检测算法. 科技创新与应用, 2021; **11**(29): 128—130
- 22 Turgut A, Orr M, Rouseff D. Broadband source localization using horizontal-beam acoustic intensity striations. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010; **127**(1): 73—83
- 23 Cui X, Yu K, Lu S. Approximate closed-form TDOA-based estimator for acoustic direction finding via constrained optimization. *IEEE Sens. J.*, 2018; **18**(8): 3360—3371
- 24 Guvenc I, Gezici S, Sahinoglu Z. Fundamental limits and improved algorithms for linear least-squares wireless position estimation. *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, 2010; **12**(12): 1037—1052
- 25 Shchurov V A. Coherent and diffusive fields of underwater acoustic ambient noise. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991; **90**(2): 991—1001
- 26 Susaki H. A fast algorithm for high-accuracy frequency measurement: Application to ultrasonic Doppler sonar. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2002; **27**(1): 5—12
- 27 Ma X, Tepedelenliolu C, Giannakis G B *et al.* Non-data-aided carrier offset estimators for OFDM with null subcarriers: Identifiability, algorithms, and performance. *IEEE J. Sel. Area. Commun.*, 2002; **19**(12): 2504—2515
- 28 Mason S F, Berger C R, Zhou S *et al.* Receiver comparisons on an OFDM design for Doppler spread channels. *Oceans 2009-Europe*, 2009: 1—7