

采用单水听器匀速直线运动直升机三维参数估计算法

张华夏^① 王惠刚^{*①②} 孙伟涛^① 古清月^③ 荣少巍^①

^①(西北工业大学航海学院 西安 710072)

^②(西北工业大学深圳研究院 深圳 518057)

^③(空军工程大学装备管理与无人机学院 西安 710072)

摘要: 针对空中匀速飞行运动目标所激发的水声信号特征, 该文将传统的2维平面内估计目标飞行高度、速度等参数的问题扩展到3维空间, 可以求解飞行时偏航距离, 更符合实际情况, 解决了空中快速飞行目标状态3维参数估计问题。该文首先以直升机离散线谱为特征声源, 建立其在空气-水两层介质中声学多普勒的3维传播模型, 考虑了目标的飞行速度、高度和偏离水听器的偏航距离。然后根据多普勒频移曲线及其1阶、2阶导数的不对称性, 推导出水下探空应用中飞行器的3维参数估计方法。最后, 通过分析单水听器接收的实测信号, 验证了文章构建3维空间多普勒频移飞行参数估计模型的合理性及APP-LMS算法相较于短时傅里叶瞬时频率估计算法能够更准确反演直升机的航行参数。

关键词: 直升机3维参量估计; 水下声探测; 多普勒效应; 瞬时频率估计

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)06-2180-08

DOI: [10.11999/JEIT220693](https://doi.org/10.11999/JEIT220693)

3D Parameters Estimation of Helicopter with Constant Speed Using Single Hydrophone

ZHANG Huaxia^① WANG Huigang^{①②} SUN Weitao^①

GU Qingyue^③ RONG Shaowei^①

^①(School of Marine Science & Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

^②(Research & Development Institute in Shenzhen, Northwestern Polytechnical University, Shenzhen 518057, China)

^③(School of Equipment Management and UAV, Air Force Engineering University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The three-dimensional parameter estimation algorithm of the helicopter with constant speed flight from the underwater acoustic data with single hydrophone, which extended the traditional two-dimension flight parameters estimation is proposed. Firstly, the helicopter line spectrum is used as the exciting sound source, and its three-dimensional Doppler propagation model in two-layer air-water medium, including altitude, speed and deviation distance of the helicopter, is established. The asymmetry of the Doppler frequency curve and its first- and second-order derivatives is related with the three-dimensional motion parameter of the helicopter, which can be estimated from the received data. Finally, with the measured data, the rationality of the three-dimensional Doppler shift flight model is verified and the result is compared with short-time Fourier instantaneous frequency estimation algorithm, APP-LMS algorithm can more accurately retrieve the flight parameters such as natural frequency, velocity, altitude and yaw distance of the helicopter.

Key words: 3D parameters estimation of helicopter; Underwater acoustic detection; Doppler effect; Instantaneous frequency estimation

收稿日期: 2022-05-30; 改回日期: 2022-08-24; 网络出版: 2022-08-30

*通信作者: 王惠刚 wanghg74@nwpu.edu.cn

基金项目: 水声对抗技术国家重点实验室项目(JZX7Y201911SY003401), 深圳市科技创新委员会基金(CYJ20190806150003606), 中央高校基本科研业务费专项资金(D5000220158)

Foundation Items: The National Key Laboratory Project of Science and Technology on Underwater Acoustic Antagonizing (JZX7Y201911SY003401), The Science, Technology and Innovation Project of Shenzhen Municipality (CYJ20190806150003606), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (D5000220158)

1 引言

动声源参数估计是水下对空探测领域的基本问题，主要包括解算声源固有频率、航速、高度、偏航距离等信息^[1]。水上航空机多采用直升机或螺旋桨飞机，它的辐射噪声由离散谐波与宽带连续谱信号组成，其中15~200 Hz低频段内离散线谱具有能量显著、稳定性强的特点^[2,3]。直升机以一定高度匀速通过水域上方时，到达水听器的线谱信号因相对运动而产生多普勒频移，频移变化曲线与目标固有频率、速度、距离等参数信息有关，可作为水听器检测和识别空中声源的主要信息载体。

近年来，国内外学者关于水听器探测直升机问题的研究已经取得一系列成果。Buckingham等人^[4,5]建立了2维域内多普勒频移与直升机运动参数的函数关系，并通过直升机过顶飞行实验，分别验证了空气、海水和海底沉积层中声波的多普勒频移曲线，这为水下探空方法奠定理论基础。随后，学者对水下探空的建模分析和理论研究可以分为单水听器和阵列水听器两个领域。在单水听器方面，Ferguson^[6]提出了空气-水介质的多普勒频移模型，并推导出直升机过顶飞行的参数估计算法，由于传统单水听器接收的直升机声信号是标量，不包含方位信息，因此仅能在2维平面上估计飞行参数。与传统标量水听器相比，矢量水听器可同时测量标量声压和矢量振速信息，采用合理的统计信号处理模型可以估计来波方位和声源运动信息^[7,8]。在单矢量水听器的非指向性盲区和较高信噪比场景中，能够可靠获得直升机方位信息和其他飞行参数。在水听器阵列方面，通过水听器单元接收的声波时延可估计3维空间内声源运动参数。文献^[9,10]设计了交叉水听器阵列，并提出基于非线性最小二乘法估计直升机全部参数的方法，在一定噪声环境中可解算出高精度的估计结果。刘凯悦等人^[11,12]结合线谱分析和干扰剔除方法，设计出稳健可靠的基于水听器阵列的线谱检测方法，可有效抑制水下噪声场干扰并提高低信噪比条件下的参数估计性能。

本文将传统的匀速直线运动的直升机2维平面航行参数估计问题扩展到3维空间中，通过构建3维空间内的空气—水介质多普勒频移模型，在传统2维平面直升机飞行参数估计飞行高度、速度的基础上，可以求解直升机未从水听器正上方飞行时带来的偏航距离，更符合实际情况。文章通过引入无网格瞬时频率估计算法，即APP-LMS算法，准确反演匀速直线运动直升机的航行参数。文章首先，根据空气—水介质3维空间中声源与水听器相对运动的几何关系，建立了空中运动点声源激发水下的

多普勒频移模型。然后，在此基础上得到多普勒频移与直升机螺旋桨固有频率、速度、高度、偏航距离等参数之间的非线性函数关系，并应用多普勒频移曲线的不对称性以及1阶、2阶导数信息，使用单水听器接收数据解算空中匀速直线运动目标在3维空间内的飞行参数。最后，文章采用实测数据验证3维空间多普勒频移模型及APP-LMS算法直升机飞行参数估计的性能。

2 空气-水介质中多普勒频移模型

文献^[13]提出，由空气透射到水下的声波有4种途径可抵达水听器：直接折射波、底部反射波、渐逝波和粗糙海面散射波。若不计海面和海底对水听器放置处的声场影响，直接折射波相较于其余3种波接收到的点声源辐射能量强且传播距离短，路径损耗小，水听器接收到的直接折射波能量最显著，其他3种波均可忽略，直升机的飞行高度远大于螺旋桨辐射噪声声波的波长，将直升机螺旋桨辐射噪声视为频率恒定的点声源^[14]，由全反射定理可知，点声源在一个小锥角范围内发出的声线可以折射进入水中，该锥角大小为 $\theta_c = \arcsin c_a / c_w = \arcsin n$ (c_a 与 c_w 分别为空气与水介质的声速， n 是折射率)，如图1。若 $c_a = 340 \text{ m/s}$ 和 $c_w = 1500 \text{ m/s}$ ，锥角 θ_c 约为 12.8° 。根据声源与水听器的几何关系，任意位置处的点声源有且仅有一条入射角为 $\theta_I(t)$ 、折射角为 $\theta_T(t)$ 的声射线传播至水听器。

图2是直升机声源沿定高直线 l_s 飞过水听器节点的3维示意图。静止的水听器节点记为点 H ，位于水下深度 d 处。恒定频率为 f_0 的直升机辐射声源记为点 S ，它以恒定亚声速 v ($v < c_a < c_w$)、恒定高度 h 飞过点 H 斜上方。投射到静止节点 H 所在的水平面上的动声源记为 S' ，该投影动点 S' 形成的直线轨迹记为 l'_s 。动点 S' 和节点 H 之间水平距离记为 $w(t)$ ，即点声源 S 和节点 H 直线距离 $r(t)$ 的水平投影。特

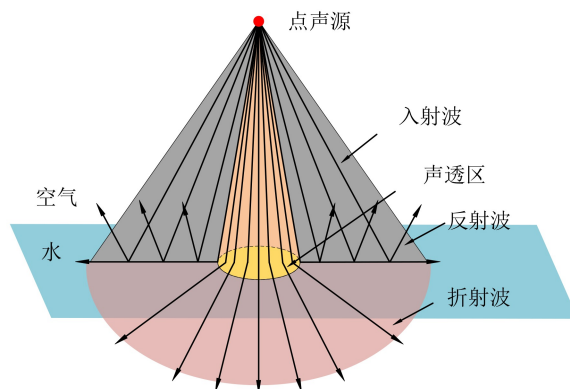


图1 球面波在空气—水界面的透射示意图

别地，点声源 S 飞至距节点 H 的最近点(Closest Point of Approach, CPA)处时，二者距离 $r_{\min}(t)$ 的水平投影记为 w_{\min} 。

点声源 S 的速度 v 可以在飞行水平面分解为两个相互垂直的分量，分量 $v_1(t)$ 与水听器处于同一垂面，其大小表示为式(1)，其中， $\alpha(t)$ 为偏向角，是直线轨迹 l_s 与直线 $S'H$ 的夹角。

$$v_1(t) = v \cos \alpha(t) \quad (1)$$

进一步， $v_1(t)$ 可以分解为两个相互垂直的分量，其中分量 $v_{11}(t)$ 与入射声射线方向一致，其大小表示为式(2)，其中， $\beta(t)$ 是空气中的视线角，与入射角 $\theta_1(t)$ 互为余角。

$$v_{11}(t) = v_1(t) \cos \beta(t) \quad (2)$$

由于点声源 S 和水听器节点 H 相对速度随时间发生变化，因此水听器接收信号的瞬时频率也随时间发生变化。显然，水听器所接收到的多普勒频移曲线 $f_d(t)$ 由参数 $\{f_0, v, \beta(t), \alpha(t)\}$ 决定。对于固有频率为 f_0 的动点声源 S ，水听器在 t 时刻所接收到的多普勒频率为式(3)。式(3)给出多普勒频移 $f_d(t)$ 与声源运动参数之间的关系，可利用点声源 S 和水听器节点 H 的几何关系，可以获得偏向角 $\alpha(t)$ 和空气中视线角 $\beta(t)$ 。

$$f_d(t) = \frac{f_0}{1 - v/c_w \cos \alpha(t) \cos \beta(t)} \quad (3)$$

首先，根据图3所示的俯视图中动声源 S 和水听器节点 H 的位置关系，可以求解偏向角 $\alpha(t)$ 。设动点声源 S 在CPA的左侧或右侧时，速度 v 和时刻 t 为负或正，动点声源 S 和静止节点 H 之间的俯视位置关系如图3所示。根据勾股定理和三角函数，在时间 t 时刻，偏向角为式(4)。

$$\alpha(t) = \arccos \frac{vt}{\sqrt{v^2 t^2 + w_{\min}^2}} \quad (4)$$

然后，根据图4所示的声线传播路径几何关系，可以求解空气中视线角 $\beta(t)$ 。图4是动点声源 S 和静止节点 H 的侧视图。在以 $\angle STH$ 为顶角 ΔSTH 中，由余弦定理可知入射角 $\theta_1(t)$ 和折射角 $\theta_T(t)$ 满足关系式(5)，其中，声波在空气介质与水介质的传播距离分别为 $r_a(t)$ 和 $r_w(t)$ ，可写为式(6)。

$$\cos \{\pi - [\theta_1(t) - \theta_T(t)]\} = \frac{r_a^2(t) + r_w^2(t) - r^2(t)}{2r_a(t)r_w(t)} \quad (5)$$

$$r_a(t) = \frac{h}{\sin \beta(t)}, \quad r_w(t) = \frac{d}{\sin \bar{\beta}(t)} \quad (6)$$

点声源 S 和水听器节点 H 的直线距离 $r(t)$ 为式(7)，入射角 $\theta_1(t)$ 和折射角 $\theta_T(t)$ 之间满足的斯涅尔(Snell)

定理，且与空气视线角 $\beta(t)$ 的互补关系和水下视线角 $\bar{\beta}(t)$ 的互补关系可表示为式(8)。将式(8)代入式(5)后，整理可得水下视线角 $\bar{\beta}(t)$ 与点声源高度 h 、声源速度 v 、偏航距离 w_{\min} 、水听器深度 d 之间的关系为式(9)。

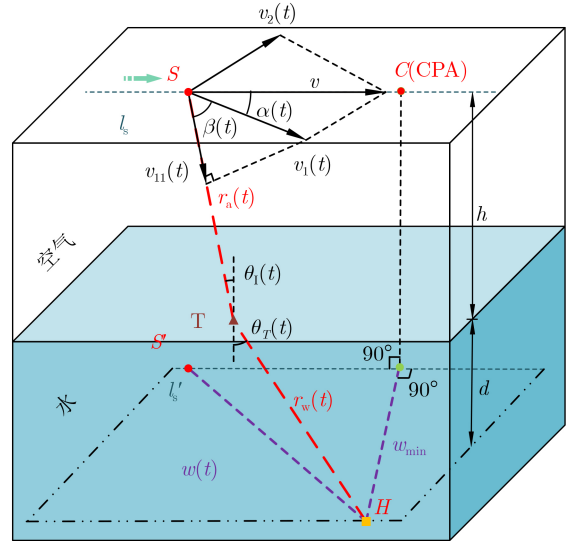


图2 空中沿直线运动的点声源与静止水听器节点的3维图

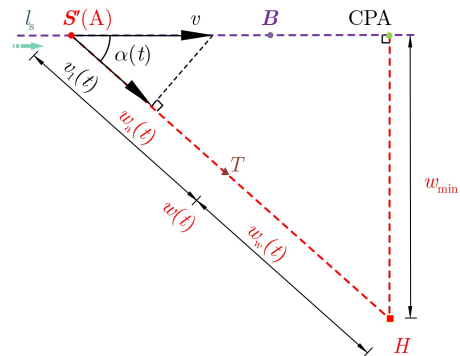


图3 空中动点声源与静止水听器节点的几何俯视图

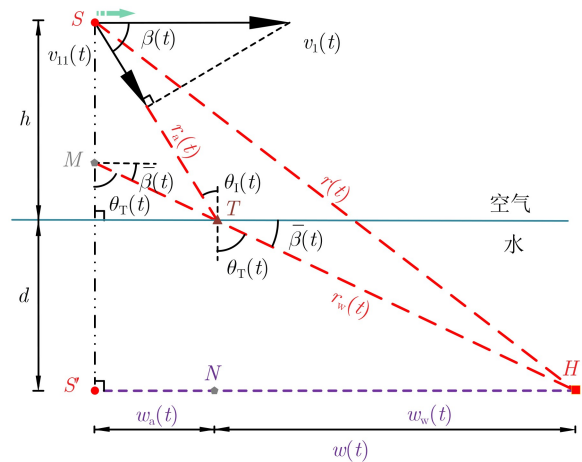


图4 声波在两层介质中传播路径的侧视图

$$r^2(t) = (d+h)^2 + v^2t^2 + w_{\min}^2 \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin[\theta_I(t)]}{\sin[\theta_T(t)]} &= n \\ \beta(t) &= \frac{\pi}{2} - \theta_I(t), X_1, X_2, \dots, X_n \\ \bar{\beta}(t) &= \frac{\pi}{2} - \theta_T(t) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &\sin \bar{\beta}(t) \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \bar{\beta}(t)} (d^2 + h^2 + v^2t^2 + w_{\min}^2) \\ &- 2dhncos^2 \bar{\beta}(t) - \frac{h^2 \sin^2 \bar{\beta}(t) + d^2 [1 - n^2 \cos^2 \bar{\beta}(t)]}{\sin \bar{\beta}(t) \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \bar{\beta}(t)}} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

对图3和图4的几何关系分析可知，当点声源S朝向或远离CPA过程时，各参数随时间的变化规律如表1所示。由于存在临界入射角，点声源在距CPA点前后一定距离时，入射角大于临界角，因此几乎无直达波到达水听器，则可认为声源距CPA点为负/正无穷，相应地，时刻为负/正无穷。

$$\left. \begin{aligned} f_d(t) &= f_0 \times \left[1 - \frac{v^2t \cos \beta(t)}{c_w \sqrt{v^2t^2 + w_{\min}^2}} \right]^{-1} \\ &\sin \bar{\beta}(t) \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \bar{\beta}(t)} (d^2 + h^2 + v^2t^2 + w_{\min}^2) \\ &- 2dhncos^2 \bar{\beta}(t) - \frac{h^2 \sin^2 \bar{\beta}(t) + d^2 [1 - n^2 \cos^2 \bar{\beta}(t)]}{\sin \bar{\beta}(t) \sqrt{1 - n^2 \cos^2 \bar{\beta}(t)}} \\ &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

最后，将式(4)、式(8)和式(9)代入式(3)中，可以消去水平角 $\alpha(t)$ 、空气视线角 $\beta(t)$ 、折射角 $\theta_I(t)$ 和折射角 $\theta_T(t)$ ，化简后可以得到式(10)方程组。对于式(10)方程组，水下视线角 $\bar{\beta}(t)$ 作为可消参数，因此可以确定多普勒频移 $f_d(t)$ 与声源运动参数 $\{f_0, v, d, h, w_{\min}\}$ 之间的函数关系。

3 估计飞行参数

在建立直线飞行轨迹模型和分析3维多普勒频移曲线基础上，本节提出一种可应用于3维空间内的单水听器估计飞行参数方法。若已知空气介质声速 c_a 、水介质的声速 c_w 、水听器深度 d ，本方法可依据式(10)使用单水听器所接收的多普勒频移曲线

$f_d(t)$ 估计直升机的固有频率 f_0 、速度 v 、飞行高度 h 和最短偏航距离 w_{\min} 。声源S行至当前位置所处的时刻为

$$t = -\frac{h}{v \cos \alpha(t) \tan \theta_I(t)} - \frac{d}{v \cos \alpha(t) \tan \theta_T(t)} \quad (11)$$

由表1可知，声源S在经过CPA点前后， $\cos \alpha(t)$ 分别为负值或正值，对于如式(3)所示的多普勒频移公式，空气中动声源在接近或远离水听器过程中所产生的多普勒频移变化量不相等。图5展示了在高度 $h = 151 \text{ m}$ 处谐振频率为68 Hz的声源以速度 $v = 100 \text{ m/s}$ 经过CPA点前后，位于水下90 m处水听器所接收多普勒频移曲线的理论值及其1阶、2阶导数。在图5(a)中，以 $t = 0$ 为时间分界点，随着时间的推移，直升机首先驶近水听器， $t = 0$ 时对应于直升机和水听器最短偏航距离的位置，即直升机和水听器之间的直线距离最短，然后直升机驶离水听器，声源S距声接收器H距离相同时，接近状态时的频率偏移量比远离状态时的频率偏移量大。从多普勒频移曲线的1阶导数曲线中可以得出其极小值点对应的直升机位置即为最短偏航距离的位置，即 w_{\min} 。

根据表1，声源位置处于无穷时， $\cos \alpha(t) = \cos \bar{\beta}(t) = 1$ ，此时式(10)所示的多普勒频移方程退化为式(12)。利用声源由时刻 $-\infty \rightarrow 0$ 至 $0 \rightarrow +\infty$ 带来的多普勒变化规律及声源处于无穷时多普勒频移方程，可以计算点声源的固有频率 f_0 和速度 v ，即式(13)，其中，在理论上 $f_d(-\infty)$ 与 $f_d(+\infty)$ 是直升机距离水听器无穷远处时所接收到的多普勒频移。根据图5(a)展示的多普勒频移规律，多普勒频移的变化率随直升机与水听器间距离增加而变小，直升机距水听器一定距离后，多普勒频率变化相当微弱。同时考虑到图1所示的声波全反射现象，直升机距离水听器一定范围外，水听器无法感知直升机螺旋桨的辐射频率。因此，在实际计算时，通常将式(13)中的 $f_d(-\infty)$ 与 $f_d(+\infty)$ 将用折射有效范围边缘处的多普勒频移替代。

$$f_d(t) = f_0 \left(1 - \frac{v}{c_w} \right)^{-1} \quad (12)$$

表1 各参数在穿过CPA点前后的变化规律

位置	从负无穷至CPA	CPA	从CPA至正无穷
$t(s)$	$-\infty \rightarrow 0$	0	$0 \rightarrow +\infty$
$\alpha(t)(s)$	$0 \rightarrow \pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2 \rightarrow \pi$
$\theta_I(t)(s)$	$\arcsin n \rightarrow \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{h}{w_{\min}}$	$\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{h}{w_{\min}}$	$\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{h}{w_{\min}} \rightarrow \arcsin n$
$\theta_T(t)(s)$	$\frac{\pi}{2} \rightarrow \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{d}{w_{\min}}$	$\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{d}{w_{\min}}$	$\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{d}{w_{\min}} \rightarrow \frac{\pi}{2}$

$$f_0 = 2 \frac{f_d(-\infty) f_d(+\infty)}{f_d(-\infty) + f_d(+\infty)}, v = c_w \frac{f_d(-\infty) - f_d(+\infty)}{f_d(-\infty) + f_d(+\infty)} \quad (13)$$

设置固有频率 f_0 对应的时刻 $t = 0$ ，联立多普勒频移 $f_d(t)$ 的1阶导数和2阶导数，并分别将极点值为零的时刻代入式(14)，其中， τ_0 是 $f'_d(t)$ 极小值对应的时刻， τ_{-1} 是 $f''_d(t)$ 极小值对应的时刻。于是，可以获得点声源的高度 h 和最短水平投影 w_{\min} 。由于篇幅原因，式(14)中关于多普勒频移 $f_d(t)$ 的1阶导数和2阶导数的求解过程及结果略去。

$$\left. \begin{aligned} \frac{df_d}{dt} \Big|_{t=\tau_0} &= f'_d(\tau_0 | f_0, v, h, w_{\min}) \\ \frac{d^2f_d}{dt^2} \Big|_{t=\tau_{-1}} &= f''_d(\tau_{-1} | f_0, v, h, w_{\min}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

4 实验与分析

美国声学学会提供了一段由水下90 m处水听器记录的直升机通过水听器上方，总计120 s的音频数据，采样频率为44 100 Hz^[14]。直升机在一定高度沿直线匀速航行，假定声波在空气和水中的速度为340 m/s和1 500 m/s。本节应用所提出的水下探空算法，根据单水听器深度及其采集的声波信号，反演匀速直线航行直升机的3维飞行参数。

4.1 多普勒频移曲线的估计

估计直升机飞行参数前，分别使用DIPASSIO^[15]提出的窗内补零短时傅里叶变换算法和本文作者提出的无网格瞬时频率估计算法(Accumulation of Phase-difference Power on Multiple Logarithm Sum, APP-MLS)^[16,17]估计单水听器采集信号的多普勒频移。图6为采用窗内补零短时傅里叶变换算法得出的瞬时频率及其幅值的变化规律，直升机运动时，不仅水听器接收信号瞬时频率随时间变化，信号幅度也发生变化。图6(a)所示的多普勒频移曲线中，52~56 s中存在明显的调频信号曲线，并且频率发生快速变化。同时，图6(b)所示的多普勒频移曲线幅值也显示出该段时间内幅值具有明显变化，其中54 s附近处有明显的能量峰值。因此可以判定在52~56 s直升机经过水听器附近，54 s时直升机与水听器之间的偏航距离最短。

以窗内补零短时傅里叶变换算法为基础的传统瞬时频率估计方法受到时间带宽积制约，时间与频率分辨率不会同时达到最佳，这会导致估计的频率曲线产生一定理论误差。本文使用多普勒频移曲线及其1阶、2阶导数计算匀速直线航行直升机的3维飞行参数，若所估计的多普勒频移曲线误差较大，

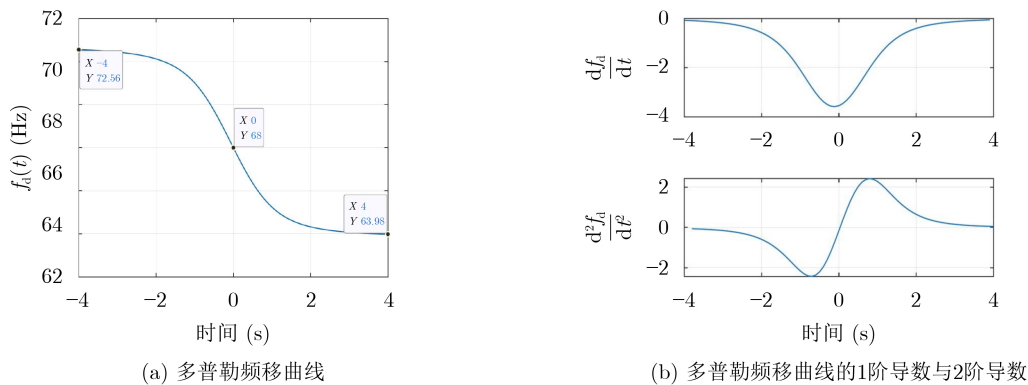


图5 多普勒频移曲线及其导数的理论结果

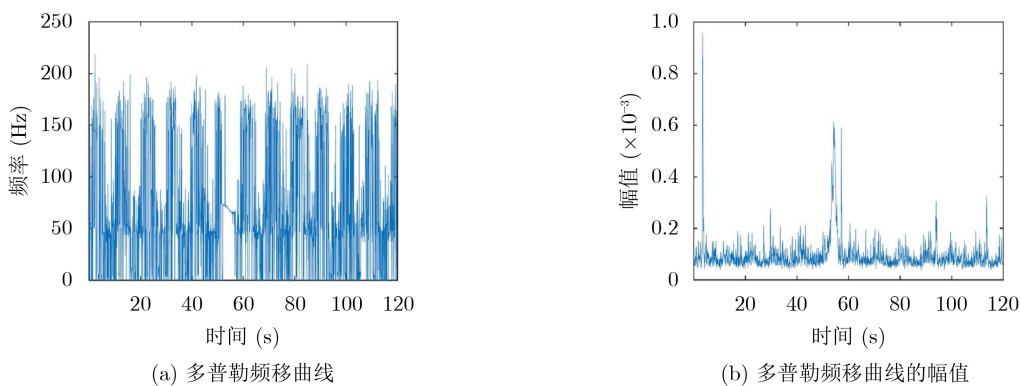


图6 窗内补零短时傅里叶变换算法估计的多普勒频移曲线及其幅值

会增加飞行参数估计结果偏差。APP-MLS算法建立了关于累积功率与瞬时频率的无网格代价函数,提高了估计小样本瞬时频率信息的准确度,同时利用多维Log-sum函数设计出非线性放大映射,可提升代价函数主瓣峰值锐度且保持旁瓣深零程度,增强了在不同概率分布噪声条件下的稳定性。无网格瞬时频率估计算法能降低多普勒频移曲线的误差,以验证水下探空算法的有效性。APP-MLS算法的具体过程如下:

(1) 计算相位差分的功率函数。将该音频文件每次取120样本点作为1帧数据,相邻两帧重叠50个样本点。将每组帧数据与多项式核函数做Hadamard积得到相位差分,然后计算去除其中直流成分的前 t 时刻功率函数。

(2) 计算功率函数的累积Log-sum。将该功率函数取Log-sum,并获得时间累积与相位差分的累积函数,以抑制非白高斯噪声。

(3) 求解Log-sum累积量的最优值。根据AdamBelief的优化规则,调节多项式核函数的频率系数,完成目标信号的瞬时频率曲线估计。

(4) 移动窗函数,重复以上窗内时频估计过程,并记录窗内的瞬时频率曲线,即可得到多普勒频移曲线,如图7所示。

图7显示了窗内补零短时傅里叶变换及其滤波前后的多普勒频移曲线和APP-MLS算法所估计的多普勒频移曲线。直升机距离水听器较远时,窗内补零短时傅里叶变换的估计结果受噪声影响显著,所以图7仅展示52~56 s内的瞬时频率曲线。相对于距水听器较远处(如54 s左右),距水听器较远处的瞬时频率估计值(如53 s和56 s左右)具有显著的波动性。Savitzky-Golay滤波器^[18]可以确保数据的形状、宽度不变,使用其对窗内补零短时傅里叶变换估计的瞬时频率曲线平滑处理,可以更好地反映多普勒频移趋势。然而,信噪比低于一定阈值时,Savitzky-Golay滤波器依然无法有效消除噪声对多

普勒频移曲线的影响。如55~56 s范围内,经滤波器处理后的瞬时频率曲线会发生一定程度畸变。与窗内补零短时傅里叶变换方法得到的瞬时频率曲线及其滤波曲线相比,无网格瞬时频率估计算法在无网格频率空间中显著提高了瞬时频率曲线分辨率,同时可以在较低信噪比环境下检测到目标信号。正是得益于该方法的无网格频率空间和非线性放大效应,直升机距离水听器较远时,仍可得准确度较高的多普勒频移曲线。正如图7在48~60 s内所估计的多普勒频移曲线,该曲线具有较高的频率分辨率,并且变化趋势较为平滑,未受到噪声影响而发生明显波动。此外,图7所估计的瞬时频率曲线已经有效抑制噪声,可以直接据此做参数估计,无需做进一步滤波处理。

4.2 3维航行参数的估计

传统运动参数估计方法仅能估计直升机2维航行参数,即直升机沿直线从水听器正上方经过的模型。对于Savitzky-Golay滤波后的短时傅里叶变换结果,如图7所示,由于52 s前与56 s后到达水听器的声波能量相当微弱,无法估计直升机较远处时的多普勒频移值。因此,DIPASSIO^[15]使用查表法近似认为 $f(-\infty) = 73.45$ Hz, $f(+\infty) = 63.17$ Hz。于是,由式(13)可计算出直升机的固有频率和速度,即式(15)。

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= 2 \frac{f_d(-\infty) f_d(+\infty)}{f_d(-\infty) + f_d(+\infty)} = 68.5 \text{ Hz} \\ v &= c_w \frac{f_d(-\infty) - f_d(+\infty)}{f_d(-\infty) + f_d(+\infty)} = 101 \text{ m/s} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

进一步,由图7可知在音频文件的第54.2 s处的多普勒频移曲线 $f_d = 68.5$ Hz,认为此时声源到达水听器正上方,因此将该时刻设定为 t_0 。然后分别计算其1阶导数与2阶导数曲线如图8所示,由该图可知,1阶导数的极小值点在 $t_0 = 54.2$ s处,2阶导数的极小值点在 $t_{-1} = 53.45$ s处。联立式(16),其中, $\tau_0 = 0$ s, $\tau_{-1} = t_{-1} - t_0 = -0.75$ s。求解式(16),可得直升机高度 $h = 151$ m,最小偏航距离 $w_{\min} = 1.4$ m。

$$\left. \begin{aligned} \frac{df_d}{dt} \Big|_{t=\tau_0} &= f'_d(\tau_0 | f_0, v, h, w_{\min}) = -3.619 \\ \frac{d^2 f_d}{dt^2} \Big|_{t=\tau_{-1}} &= f''_d(\tau_{-1} | f_0, v, h, w_{\min}) = -2.429 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

根据本文提出的基于单水听器估计直升机3维参数方法,可以实现最小偏航距离 w_{\min} 的估算。对于累积差分功率的时频估计结果,如图7所示的多普勒频移曲线,设定时间窗端点处的频率值为

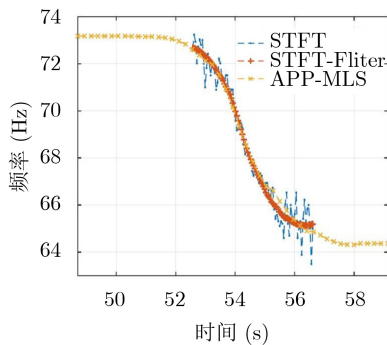


图7 不同方法所得瞬时频率曲线结果的对比图

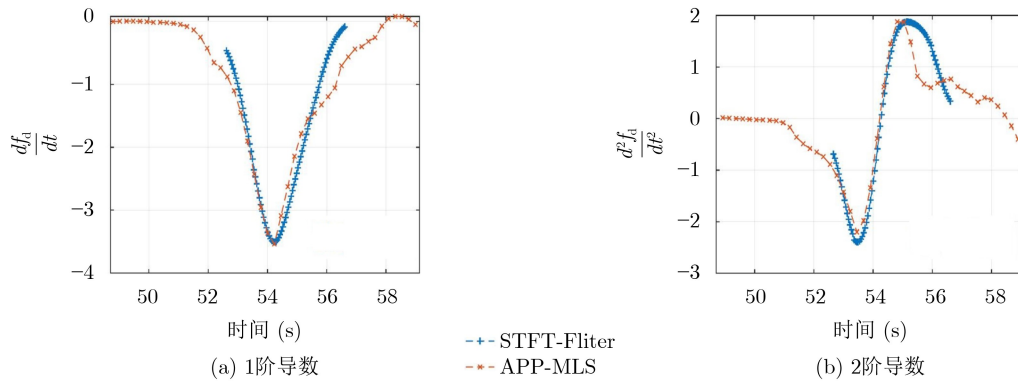


图8 多普勒频移导数曲线

$f(-\infty) = 73.17$ Hz、 $f(+\infty) = 64.37$ Hz。于是，由式(13)可计算得

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= 2 \frac{f_d(-\infty) f_d(+\infty)}{f_d(-\infty) + f_d(+\infty)} = 68.48 \text{ Hz} \\ v &= c_w \frac{f_d(-\infty) - f_d(+\infty)}{f_d(-\infty) + f_d(+\infty)} = 95.97 \text{ m/s} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

接着分别计算其1阶导数与2阶导数如图8所示，1阶导数的极小值点在 $t_0 = 54.14$ s处，2阶导数的极小值点在 $t_{-1} = 53.25$ s处。

在传统2维方法中，可使用 $f_d(t)$ 的近似1阶导数式求解直升机航行高度^[6]，即

$$\frac{df_d}{dt} \Big|_{t=0} \approx \frac{v^2}{c_a h + c_w d} f_0 = \frac{95.97^2 \times 68.48}{340h + 1500 \times 90} = -7 \quad (18)$$

故直升机高度 h 为132 m。而本文提出的直升机3维参数估计方法通过联立 $f_d(t)$ 的1阶导数和2阶导数可得直升机航行高度与偏航距离，即

$$\left. \begin{aligned} \frac{df_d}{dt} \Big|_{t=\tau_0} &= f_d'(\tau_0 | f_0, v, h, w_{\min}) = -3.536 \\ \frac{d^2 f_d}{dt^2} \Big|_{t=\tau_{-1}} &= f_d''(\tau_{-1} | f_0, v, h, w_{\min}) = -2.201 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

其中， $\tau_0 = 0$ s， $\tau_{-1} = t_{-1} - t_0 = -0.89$ s。可得直升机高度 $h = 149.35$ m，最小偏航距离 $w_{\min} = 1.41$ m。

使用窗内补零短时傅里叶变换的瞬时频率估计算法和无网格瞬时频率估计算法得出直升机螺旋桨的多普勒频移曲线，然后根据式(17)和式(18)所示的2维参数估计算法和式(17)和式(19)所示的3维参数估计算法可分别得到匀速运动直升机的飞行参数。按照美国声学学会公布的结果，直升机固有频率为68 Hz、速度约为100 m/s、航行高度约为150 m、偏航距离约为0 m。比较传统2维参数估计方法和3维参数估计方法，后者更接近合理数值，因此本文提出单水听器估计匀速直线运动直升机3维参数算法具备有效性。

5 结束语

本文针对单水听器反演匀速直线运动直升机飞行的3维参数问题，建立了空中运动点声源激发水下的多普勒频移模型，并推导多普勒频移与直升机螺旋桨固有频率、速度、高度、偏航距离等参数之间的非线性函数关系。利用单水听器所采集数据刻画出多普勒频移曲线，根据其不对称性及1阶、2阶导数，可解算出空中匀速直线运动声源在3维空间内的飞行参数。文章借助公开的实测数据验证了3维空间内估计空中匀速直线运动直升机航行参数的合理性且APP-LMS算法相较于窗内补零短时傅里叶瞬时频率估计算法能够更准确反演直升机的固有频率、速度、高度、偏航距离等航行参数。

参考文献

- [1] 修建娟, 张敬艳, 董凯. 基于动力学模型约束的空间目标精确跟踪算法研究[J]. 电子学报, 2021, 49(4): 781–787. doi: 10.12263/DZXB.20200336. XIU Jianjuan, ZHANG Jingyan, and DONG Kai. Precise tracking algorithm of space target based on dynamic model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(4): 781–787. doi: 10.12263/DZXB.20200336.
- [2] 穆森, 李京华, 张恒, 等. 基于谐波集检测的飞行目标水下声探测算法研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 1050–1057. doi: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.05.018. MU Sen, LI Jinghua, ZHANG Heng, et al. Research on underwater acoustic detection algorithm of aerial targets based on harmonic set detection[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(5): 1050–1057. doi: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.05.018.
- [3] PENHALE M and BARNARD A. Direction of arrival estimation in practical scenarios using moving standard deviation processing for localization and tracking with acoustic vector sensors[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 168: 107421. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107421.
- [4] BUCKINGHAM M J, GIDDENS E M, POMPA J B, et al.

- Sound from a light aircraft for underwater acoustics experiments?[J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2002, 88(5): 752–755.
- [5] BUCKINGHAM M J, GIDDENS E M, SIMONET F, *et al.* Propeller noise from a light aircraft for low-frequency measurements of the speed of sound in a marine sediment[J]. *Journal of Computational Acoustics*, 2002, 10(4): 445–464. doi: [10.1142/S0218396X02001760](https://doi.org/10.1142/S0218396X02001760).
- [6] FERGUSON B G. A ground-based narrow-band passive acoustic technique for estimating the altitude and speed of a propeller-driven aircraft[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1992, 92(3): 1403–1407. doi: [10.1121/1.403934](https://doi.org/10.1121/1.403934).
- [7] 陈韶华, 陈川, 郑伟. 单矢量水听器线谱多目标分辨研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1253–1256. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00460](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00460).
CHEN Shaohua, CHEN Chuan, and ZHENG Wei. Multi-sources distinguishing by exploring line spectra with single acoustic vector sensor[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1253–1256. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00460](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00460).
- [8] 王彪, 陈宇, 徐千驰, 等. 非理想条件下基于矢量水听器阵列的一种快速方位估计算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 745–751. doi: [10.11999/JEIT200541](https://doi.org/10.11999/JEIT200541).
WANG Biao, CHEN Yu, XU Qianchi, *et al.* A fast direction estimation algorithm based on vector hydrophone array under non-ideal conditions[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(3): 745–751. doi: [10.11999/JEIT200541](https://doi.org/10.11999/JEIT200541).
- [9] LO K W and FERGUSON B G. Broadband passive acoustic technique for target motion parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(1): 163–175. doi: [10.1109/7.826319](https://doi.org/10.1109/7.826319).
- [10] LO K W. Flight parameter estimation using instantaneous frequency and direction of arrival measurements from a single acoustic sensor node[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 141(3): 1332–1348. doi: [10.1121/1.4976091](https://doi.org/10.1121/1.4976091).
- [11] 刘凯悦, 彭朝晖, 张灵珊, 等. 水下水平阵对空中运动声源的线谱探测[J]. 声学学报, 2019, 44(4): 566–575. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2019.04.017](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2019.04.017).
LIU Kaiyue, PENG Zhaohui, ZHANG Lingshan, *et al.* Line spectrum detection of airborne moving source by underwater horizontal array[J]. *Acta Acustica*, 2019, 44(4): 566–575. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2019.04.017](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2019.04.017).
- [12] 安春莲, 杨古月, 杨延菊. 基于中值滤波预处理的强冲击噪声背景测向方法[J]. 电子学报, 2021, 49(6): 1159–1166. doi: [10.12263/DZXB.20200392](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200392).
AN Chunlian, YANG Guyue, and YANG Yanju. DOA estimation under strong impulsive noise based on median value filtering[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(6): 1159–1166. doi: [10.12263/DZXB.20200392](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200392).
- [13] URICK R J. Noise signature of an aircraft in level flight over a hydrophone in the sea[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1972, 52(1A): 172. doi: [10.1121/1.1982074](https://doi.org/10.1121/1.1982074).
- [14] FERGUSON B G, CULVER R L, and GEMBA K L. International student challenge problem in acoustic signal processing 2019[J]. *Acoustics Today*, 2019, 15(1): 71–73. doi: [10.1121/AT.2019.15.1.73](https://doi.org/10.1121/AT.2019.15.1.73).
- [15] DIPASSIO III J. Tre DiPassio’s solution to the 2019 international student challenge problem in acoustic signal processing[EB/OL]. https://static1.squarespace.com/static/5d362ec264480900010504be/t/5d765d6527a38b3a5d5be508/1568038249817/TreDiPassio_ChallengeProblem2019Solution.pdf, 2019.
- [16] SUN Weitao, WANG Huigang, GU Qingyue, *et al.* Exact frequency estimation in the i. i. d. noise via KL divergence of accumulated power[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(8): 2574–2578. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3077315](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3077315).
- [17] SUN Weitao, WANG Huigang, GU Qingyue, *et al.* Exact and robust time-frequency estimation via accumulation of phase-difference power on multiple log-sum[EB/OL]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21036.59523>, 2021.
- [18] SADEGHI M, BEHNIA F, and AMIRI R. Window selection of the Savitzky-Golay filters for signal recovery from noisy measurements[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(8): 5418–5427. doi: [10.1109/TIM.2020.2966310](https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2966310).
- 张华霞: 女, 博士生, 研究方向为阵列信号处理。
王惠刚: 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为目标检测、参数估计、自适应信息处理。
孙伟涛: 男, 博士生, 研究方向为时频估计、目标检测。
古清月: 女, 博士生, 研究方向为阵列信号处理。
荣少巍: 男, 博士生, 研究方向为目标检测、自适应控制。

责任编辑: 马秀强