

# 基于单矢量水听器的水面目标运动分析

吴艳群, 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要:** 介绍了一种基于单个三维矢量水听器对水面目标进行跟踪定位和运动速度估计的简单方法。首先利用平均声能流法得到目标波达方向的极大似然估计; 当矢量水听器深度已知, 由目标波达方向的估计序列可得到目标空间位置和运动速度的估计序列。但随着信噪比的降低, 目标定向性能随之下降, 导致目标位置和速度的估计误差急剧增大。针对直线运动目标, 提出利用线性最小二乘法进行目标轨迹拟合的改进算法。仿真结果表明, 拟合算法大大提高了目标定位精度和运动速度估计精度, 增强了基于单矢量水听器的水面目标运动分析的结果的可靠性。

**关键词:** 矢量水听器; 波达方向; 被动定位; 目标跟踪

中图分类号: TN911.7 TB565

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-04-0361-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.04.002

## Analysis of surface target motion based on a single vector sensor

WU Yan-qun, HU Yong-ming

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A simple method based on a single 3-dimensional vector sensor is proposed to localize and track a surface target. The maximum likelihood estimation of the azimuth and elevation angles is obtained by the averaged intensity estimator. When the vector sensor depth is known, the target position and velocity can be estimated from the target direction sequence. However, as the signal-noise ratio (SNR) is reduced, the accuracy of the azimuth and elevation angles is deteriorated, which results in the fallibility of the target position and velocity estimations. For linearly moving targets, a linear least square method is used to fit the target track, and thus the velocity estimation is improved. The simulation results show that the curve-fit method enhances the accuracy of both the localization and velocity estimation results. The proposed method is simply and low-cost in computation consumption, suitable for passive sonar buoy and torpedo systems, and increases the reliability of the surface target motion analysis based on a single vector sensor.

**Key words:** acoustic vector sensor; direction of arrival; passive localization; target tracking

## 1 引言

矢量水听器一般由声压水听器和振速水听器复合而成, 可共点、同步测量声场中声压和质点振速的三个正交分量, 具有指向性与目标频带无关、抑制空间各向同性噪声等优点, 在军事和民用上具有广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>。

舰船辐射噪声谱由宽带连续噪声谱和线谱叠加而成。对高速运动或者辐射稳定高频线谱的目标, 可利用单个无指向性水听器对目标线谱的多普勒频移进行估计, 从而获得目标的运动速度和空间位置信息<sup>[3,4]</sup>。但这些方法的估计精度都依赖于线谱频率的估计精度, 且对低频信号或低速运动目标,

目标线谱的多普勒频移很小, 难以检测。因此, 上述方法在实际应用中具有一定局限性。

平均声能流法适用于窄带和宽带信号, 是目标波达方向的极大似然估计器<sup>[2]</sup>。本文利用时域平均声能流法对舰船进行测向, 当矢量水听器布放深度已知, 利用目标波达方向估计序列估计舰船的位置和运动速度, 并通过曲线拟合改进了上述算法的估计精度。

## 2 基本原理

### 2.1 目标方位估计

单矢量水听器系统通常以其自身  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴作为参考坐标系建立方程。每个矢量水听器都需要安装一个姿态传感器, 以将  $x$ 、 $y$ 、 $z$  各通道采集的数据转换到大地坐标系上, 最终得到目标在大地坐标系下的方位<sup>[5]</sup>。使用过程中, 通常矢量水听器的  $x$  轴和  $y$  轴位于水平面上,  $z$  轴沿着水域的深度方向,

收稿日期: 2009-05-14; 修回日期: 2009-07-07

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z121)

作者简介: 吴艳群(1981-), 女, 福建人, 博士研究生, 研究方向为光纤矢量水听器及其应用研究。

通讯作者: 吴艳群, E-mail: wuyanqun@nudt.edu.cn

因此,不失一般性,以矢量水听器的几何中心为坐标原点  $o$ ,以其自身  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴建立直角坐标系坐标。如图 1 所示,水平方位角  $\theta$  定义为与  $x$  轴正方向之间的夹角,  $0 \leq \theta < 2\pi$ ; 俯仰角  $\alpha$  定义为与  $z$  轴正方向之间的夹角,由图 1 易知  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ 。通常矢量水听器的布放深度  $z_0$  已知。舰船辐射噪声的时域信号为  $s_d(t)$ ,其瞬时运动速度以及瞬时水平方位角与俯仰角分别为  $\mathbf{u}(t)$ 、 $\theta(t)$ 、 $\alpha(t)$ ,则矢量水听器接收到的信号为:

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} p(t) \\ \mathbf{v}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{r(t)} s_d(t) \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中,  $1/r(t)$  是球面波衰减因子;  $\mathbf{a}(t) = [\cos\theta \sin\alpha, \sin\theta \cos\alpha, \cos\alpha]^T$  为目标波达方向;  $\mathbf{n}(t) = [n_p(t), n_x(t), n_y(t), n_z(t)]^T$  为声压和振速三个通道的噪声信号,且  $n_p(t)$ 、 $n_x(t)$ 、 $n_y(t)$  与  $n_z(t)$  互不相关。

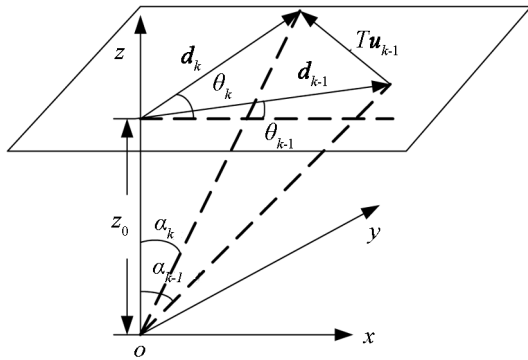


图 1 坐标系建立  
Fig.1 The coordinate frame

每隔  $T$  秒进行一次目标波达方向估计,那么第  $k$  个积分时段的平均声强为:

$$\bar{I}_k = \int_{(k-1)T}^{kT} p(t) \mathbf{v}(t) dt, \quad k=1,2,\dots \quad (2)$$

则对应时刻的目标水平方位角和俯仰角分别为:

$$\hat{\theta}_k = \arctan(\bar{I}_{y,k} / \bar{I}_{x,k}) \quad (3)$$

$$\hat{\alpha}_k = \arctan\left(\sqrt{\bar{I}_{x,k}^2 + \bar{I}_{y,k}^2} / \bar{I}_{z,k}\right) \quad (4)$$

使用  $\arctan$  确定的  $\theta_k$  角值域为  $[-\pi/2, \pi/2]$ , 必须根据  $\bar{I}_{x,k}$ 、 $\bar{I}_{y,k}$  的符号判断目标所在象限,进而修正  $\theta_k$  的值。

运动目标的方位随时间变化,导致振速信号中携带的方位信息也随时间变化。此时平均声能流器的估计结果趋向于积分信号首尾所对应的方位角的平均值<sup>[6]</sup>,这将导致后面进行目标位置和速度估计的结果存在一定偏差。积分时间  $T$  越小,估计结果偏差越小,但同时,平均声能流器抑制各向同性噪声的能力也越差<sup>[2]</sup>。所以要综合上述两因素选择合适的积分时间。

## 2.2 目标位置和速度估计

由图 1 的几何关系可得目标在水平面上的位置矢量为:

$$\hat{\mathbf{d}}_k = \hat{r}_k [\cos\hat{\theta}_k, \sin\hat{\theta}_k]^T \quad (5)$$

其中,  $\hat{r}_k = z_0 \tan\hat{\alpha}_k$  为目标到  $z$  轴的距离。

通常积分时间  $T$  在秒的数量级,故可假设目标在积分时间  $T$  内行驶速度不变,则第  $k$  时刻速度为

$$\hat{\mathbf{u}}_{d,k} = (\hat{\mathbf{d}}_k - \hat{\mathbf{d}}_{k-1}) / T, \quad k=2,3,\dots \quad (6)$$

其中,  $\hat{\mathbf{u}}_{d,1} = 0$ 。

如果直接利用式(6)估计目标速度,目标位置  $\hat{\mathbf{d}}_k$  的瞬时估计误差对速度估计误差影响严重。尤其在低信噪比情况下,目标水平方位角和俯仰角估计误差严重,使得位置矢量  $\hat{\mathbf{d}}_k$  的估计误差很大,这时利用式(6)估计目标速度的误差可能远大于目标真实速度,估计结果不可靠。

假设目标做直线运动,可利用线性最小二乘法对目标运动轨迹进行线性拟合以提高目标位置的估计精度,然后再利用式(6)的差分法估计目标的运动速度。

设拟合后得到的目标运动轨迹为  $[d_x, f(d_x)]$ , 其中  $f(d_x) = d_y = A d_x + B$ 。参数  $A$ 、 $B$  可利用最小二乘法得到,分别为<sup>[7]</sup>:

$$A = l_{xyk} / l_{xk}, \quad B = \bar{d}_{yk} - A \bar{d}_{xk} \quad (7)$$

$$\text{其中, } \bar{d}_{xk} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \hat{d}_{xi}, \quad \bar{d}_{yk} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \hat{d}_{yi},$$

$$l_{xk} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\hat{d}_{xi} - \bar{d}_{xk})^2, \quad l_{xyk} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\hat{d}_{xi} - \bar{d}_{xk})(\hat{d}_{yi} - \bar{d}_{yk}).$$

拟合后的目标轨迹将改善目标波达方向估计误差带来的目标空间位置误差。将  $[\hat{d}_{xi}, f(\hat{d}_{xi})]$  ( $i=k-1, k$ ) 代入式(6)即可得到估计目标的运动速度。

## 3 仿真分析

设矢量水听器的深度  $z_0=100\text{m}$ , 目标初始位置  $(x_0, y_0) = (-250\text{m}, 100\text{m})$ , 做  $v=12\text{m/s}$  的匀速直线运动,速度方向与  $x$  轴正方向之间的夹角  $\varphi = \pi/18$ 。海水中声速  $c=1500\text{m/s}$ , 采样率  $f_s=6000\text{Hz}$ , 观测总时间为  $60\text{s}$ 。平均声能流器的积分时间  $T=0.5\text{s}$ 。设目标的辐射噪声为  $200\sim 800\text{Hz}$  的宽带噪声信号,声压传感器接收到的运动目标信号如图 2 所示。运动目标靠近接收器时,声压信号的信噪比高,远离接收器时声压信号的信噪比低,如图 3 所示,定义第  $k$  个积分时段的声压信噪比为:

$$SNR_{p,k} = 10 \log_{10} \left\{ \int_{(k-1)T}^{kT} p^2(t) dt / \int_{(k-1)T}^{kT} n_p^2(t) dt \right\} \quad (8)$$

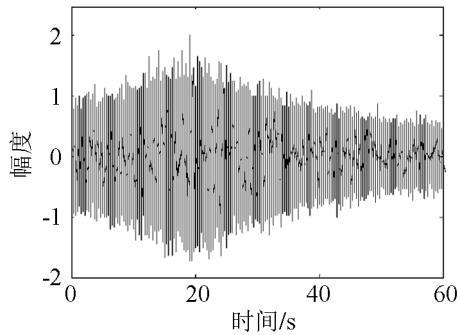


图 2 接收到的声压信号  
Fig.2 Pressure signal

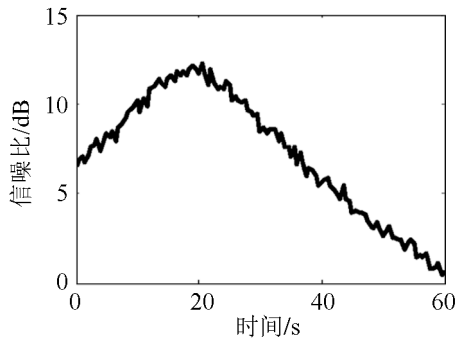


图 3 运动目标的信噪比随时间变化  
Fig.3 SNR for moving target vs. time

图 4 为目标水平方位角和俯仰角的估计误差。平均声能流器的估计精度受信号带宽、信噪比、积分时间  $T$  等因素影响<sup>[2,6]</sup>。在信号类型和积分时间给定的情况下,目标水平方位角和俯仰角的估计精度仅由接收信号的信噪比决定。由图 3 可知,当目标在矢量水听器的正横方向(20s 附近)时,声压信号的信噪比最高。因此,图 4 中,角度估计误差在正横方向最小,此后,由于目标不断远离接收器,随着信噪比逐渐降低,角度估计误差逐渐增大。

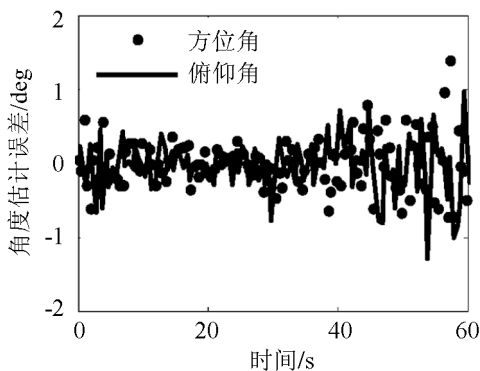


图 4 水平方位角和俯仰角估计误差  
Fig.4 The estimation errors of azimuth and elevation angles

图 5、6 是空间位置以及运动速度的处理结果。图 5 中离散点是直接利用式(5)得到的估计结果,即拟合前目标轨迹。当目标远离水听器时,随着信噪比降低,角度估计误差的增大导致目标位置估计误

差增大。尤其是当目标水平距离  $x_s$  超过 200m 之后,估计结果偏离真实值较远,误差在几十米。此时利用式(6)估计目标运动速度的结果远远偏离真实值,因此图 6 中没有显示其估计结果。

由图 5 左上图可知,经过拟合后的曲线虽然略微偏离真实轨迹,但大大改善了目标方位估计的离散程度。如图 6 所示,利用拟合目标方位结果估计得到的运动速度的估计结果在真值附近,而且在正横方向附近,目标速度估计误差达到最小(小于 0.2m/s)。由图 5 和图 6 可知,拟合算法提高了目标位置和速度估计精度,使得利用单个矢量水听器进行水面目标运动分析的结果更加可靠。

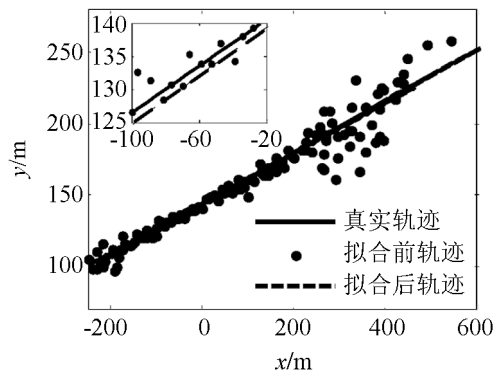


图 5 目标位置估计结果  
Fig.5 The estimation result of target track

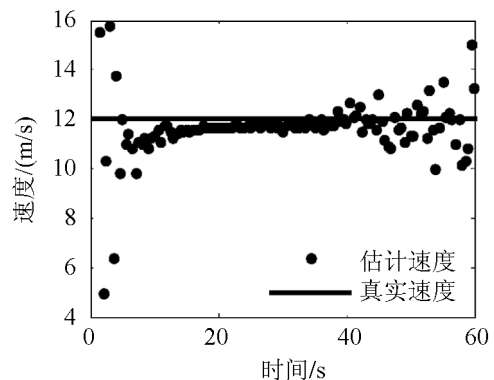


图 6 目标速度估计结果  
Fig.6 The estimation result of target velocity

## 4 结论

本文研究了利用单个三维矢量水听器进行水面目标运动分析的方法。对直线运动的目标(匀速或加速度运动),采用线性最小二乘法对其轨迹进行拟合,大大提高了目标运动速度的估计精度,从而使基于单矢量水听器的水面目标运动分析的结果更加可靠。此法原理简单,计算量小,工程实施方便,适合声纳浮标系统、鱼雷自导系统、水下被动报警平台等应用场合对水面目标的跟踪定位。

## 参 考 文 献

- [1] 惠俊英, 刘宏, 余华兵, 等. 声压振速联合信息处理及其物理基础初探[J]. 声学学报, 2000, 25(4): 303-307.  
HUI Junying, LIU Hong, YU Huabing, et al. Study on the physical basis of pressure and particle velocity combined processing[J]. Acta Acustica, 2000, 25(4): 303-307.
- [2] 孙贵青, 杨德森, 张揽月, 等. 基于矢量水听器的最大似然比检测和最大似然方位估计[J]. 声学学报, 2003, 28(6): 509-513.  
SUN Guiqing, YANG Desen, ZHANG Lanyue, et al. Maximum likelihood ratio detection and maximum likelihood DOA estimation based on the vector hydrophone[J]. Acta Acustica, 2003, 28(1): 66-72.
- [3] 刘秀丽, 冯海泓, 黄敏燕, 等. 基于单基元几何交汇法的被动目标测距测速研究[J]. 声学技术, 2007, 26(2): 173-178.  
LIU Xiuli, FENG Haihong, HUANG Minyan, et al. Passive ranging and velocity estimation based on geometric convergence using a single sensor[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(2): 173-178.
- [4] 李君桥, 岳剑平, 洗观福, 等. 基于多普勒频移的水下运动目标测距技术[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 758-760.  
LI Junqiao, YUE Jianping, XIAN Guanfu, et al. Passive ranging of underwater motional targets based on Doppler frequency shift[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(5): 758-760.
- [5] McDonald M A. DIFAR Hydrophone usage in whale research[J]. Canadian Acoustics, 2004, 32(2): 155-160.
- [6] 刘伯胜, 田宝晶. 矢量传感器估计目标方位的误差的仿真研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(5): 491-517.  
LIU Bosheng, TIAN Baojing. Simulation study on errors for evaluation of target azimuth by single vector transducer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(5): 491-517.
- [7] 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社. 1997, 836-837.  
Mathematic handbook[M]. Beijing: Higher Education Press, 1997, 836-837.

## • 简 讯 •

## 承历史音符, 谱华彩乐章——热烈庆祝东海研究站成立五十周年

2010年7月将迎来中国科学院声学研究所东海研究站建站五十周年。6月28日, 王小民所长、张春华书记特地从北京亲赴上海参加东海研究站建站五十周年座谈会, 恭贺五十华诞。出席座谈会的还有东海站领导班子、各科室主要负责人、离退休老领导及研究生代表等。

座谈会由胡长青站长主持。五十年弹指一挥间, 五十年春华秋实, 胡站长首先与会代表共同回顾了东海站创建的背景和成长的历史, 总结了五十年来取得的成就, 展望了当今蓬勃发展的良好势头, 同时也认识到目前存在的一些不足之处, 强调今后应加强引进和挖掘优秀科技人才, 培养和锻炼年轻科技人员。在这庆祝建站五十周年的时刻, 胡站长代表东海站全体职工缅怀我国水声事业的奠基人、老所长汪德昭先生, 东海站的开拓者、老站长朱西先生等驾鹤仙去的老前辈; 感谢为创立和建设东海站而付出心血的历任领导和老同志们; 感谢以“四大金刚”为首的老科学家们, 尤其感谢至今仍坚守在科研第一线老专家们, 祝愿他们身体健康, 生命之树常青。副站长关平在“回顾过去, 立足现在, 展望未来”的发言中, 也提出了今后应着重在技术进步、文化创新、人才培养上加大力度, 年轻人应勇挑重担, 并提倡科研骨干潜心搞学术研究。

座谈会气氛祥和, 场面温馨, 老同志们精神矍铄, 谈笑风生, 深情回忆了自己学习和工作的经历, 说到动情处, 一度哽咽, 感人肺腑。老站长冯绍松才情横溢, 赋诗一首庆祝东海站建立五十周年; 仍然奋斗在科研第一线的向大威教授宝刀未老, 言语幽默, 在肯定来之不易的成就的同时, 也为今后的发展提出了宝贵的意见; 退休职工陈克棠也书写了一幅韵味深远的对联庆贺建站五十周年。

王小民所长最后说, 要坚持理想信念, 坚持实事求是, 奋力拼搏, 把思想统一到院党组关于“创新2020”的精神上来, “不动摇、不懈怠、不折腾、不忽悠”, 推进东海站各项事业健康发展, 声学所会持续关注东海站的发展, 持续支持东海站的发展。祝愿东海站有更大的发展, 迎来更加美好的明天。

老站长冯绍松赋诗一首: 《七律东海站五十周年》

半世纪前乌云翻, 十八罗汉站昌。声纳数据海上取, 五十二度等闲闯。

改革开放军转民, 科研成果所无双。长江后浪推前浪, 龙腾虎跃定可望。

退休职工陈克棠敬贺的对联: 展宏伟蓝图还看东海, 忆峥嵘岁月且听回声。