被动定向浮标阵定位误差仿真分析

罗 博，骆澎勇
(杭州应用声学研究所，浙江杭州 310012)

摘要：仿真分析了被动定向浮标阵为正三角形阵时，阵元间距等几种因素对利用最小二乘法解算目标位置精度的影响。仿真结果表明，在相同的位置误差和测向误差下，当目标在一定范围内时，阵元间距增大，定位误差增大，当目标位置超出该范围后，浮标阵定位误差急剧增大，阵元间距大的浮标阵定位误差反而小；在其它条件相同时，位置误差(测向误差)增大，定位误差增大。因此，为提高三角形阵的定位精度，应尽量提高浮标的测向精度和浮标位置精度；使用中应根据浮标性能和实际使用需求选取合理的布阵间距。

关键词：被动定向浮标；最小二乘法；定位误差
中图分类号：TN911.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2016)-06-0518-04
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.06.006

Simulation analysis of target localization using passive directional buoy arrays

LUO Bo, LUO Peng-yong
(*Hangzhou Applied Acoustic Research Institute*, *Hangzhou* 310012, *Zhejiang*, *China*)

Abstract: In this paper, the influence of parameters variations, such as array spacing, buoy location and direction error on solving target location using multi-buoys in a regular triangle case by mean square technique is simulated and analyzed. The simulation results indicate that when the target location is in a certain area, location error increases when the array spacing increases, but when the target location is out of the area, location error increases steeply in the case of small array spacing. Also, location error increases when the buoy location and direction error increase. So, in order to improve location accuracy, the accuracies of buoy location and direction must be increased, also the array spacing must be rightly set according to buoy performance and actual needs.

Key words: passive directional buoy; mean square technique; location error

0 引 言

声呐浮标系统作为航空探潜系统的一个分系统，与声信号处理分系统共同构成搜潜系统，完成反潜飞机的反潜侦查、搜索和定位任务，并对攻潜系统提供攻击参数[1-2]。

被动定向浮标作为声呐浮标系统中重要的一种，主要特点是当采用矢量水听器接收目标信号时，单枚浮标即可对目标定向。工作时，被动定向浮标将水听器模拟信号进行放大、滤波、调理、数字化，并通过甚高频调频无线电信号发往反潜飞机。飞机上浮标接收机接收并解调这个信号，机载信号处理系统对目标进行检测、识别和定位。被动定向浮标阵进行目标定位时，主要是利用浮标测向结果、自身位置进行几何交叉定位[3-4]。

国外 Charles R 等人利用被动定向浮标对露脊鲸的迁徙活动进行研究等[3]。国内李居伟等人结合卡尔曼滤波技术对基于被动定向浮标定位的目标跟踪行了研究[5-6]；罗明愿等对 2 枚被动定向浮标的定位误差进行了分析和仿真[7]；陶林伟等在研究被动定向浮标定位技术及多普勒最接近点定位技术的基础上，提出了利用单枚被动定向浮标进行目标定位的方法[8]。本文在上述研究的基础上，对测量阵形为正三角形的被动定向浮标阵的目标定位性能进行了仿真分析。

1 被动定向浮标阵定位模型

1.1 2 枚被动定向浮标定位原理[2]

利用 2 枚被动定向浮标定位，即定向分析与记录定位(DIrection frequency and recording FIX，DIFIX)时，假设已知两个被动定向浮标的坐标为 $D_1(X_1,Y_1)$ 和 $D_2(X_2,Y_2)$，以及它们分别估得目标方位

收稿日期：2016-02-21；**修回日期：**2016-06-12
作者简介：罗博(1985－)，男，陕西咸阳人，工程师，研究方向为水声信号处理。
通讯作者：罗博，Email: nwpulb@163.com

角为 θ_1 和 θ_2，其中正北方向为 0°，顺时针为正，目标位置为 $S(X,Y)$，则有

$$\begin{cases}\cot\theta_1=\dfrac{Y_1-Y}{X_1-X}\\ \cot\theta_2=\dfrac{Y_2-Y}{X_2-X}\end{cases} \tag{1}$$

根据式(1)可以得到

$$\begin{aligned}X&=\frac{(Y_2-Y_1)+X_1\cot\theta_1-X_2\cot\theta_2}{\cot\theta_1-\cot\theta_2}\\ Y&=\frac{(X_2-X_1)+Y_1\tan\theta_1-Y_2\tan\theta_2}{\tan\theta_1-\tan\theta_2}\end{aligned} \tag{2}$$

上式成立的条件是，$\theta_1\neq\theta_2$，$|\theta_1-\theta_2|\neq\pi$，即目标和两枚浮标不能在同一条直线上。

1.2　多枚被动定向浮标定位原理[5,6]

当 3 枚及 3 枚以上被动定向浮标发现目标时，假设浮标位置为 $D_i(X_i,Y_i)$，测得目标方位分别为 θ_i，i=1，2，3……，目标位置为 $S(X,Y)$，则

$$\frac{\cos\theta_i}{\sin\theta_i}=\frac{Y_i-Y}{X_i-X} \tag{3}$$

整理可得

$$\begin{bmatrix}-\cos\theta_1 & \sin\theta_1\\ -\cos\theta_2 & \sin\theta_2\\ -\cos\theta_3 & \sin\theta_3\\ \vdots & \vdots\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\ Y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\cos\theta_1X_1+\sin\theta_1Y_1\\ -\cos\theta_2X_2+\sin\theta_2Y_2\\ -\cos\theta_3X_3+\sin\theta_3Y_3\\ \vdots\end{bmatrix} \tag{4}$$

将上式写为 $\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{b}$ 的形式，利用最小二乘法对其进行求解，则

$$\boldsymbol{X}=\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b} \tag{5}$$

多枚浮标与目标都在同一直线上时无法完成目标定位，当浮标数量多于 2 枚时，这种情况一般不会出现。

2　仿真分析

三角形阵是常见的浮标阵，考虑到浮标作用距离和覆盖范围，一般按照正三角形布放，实际上受布放精度、机载设备对浮标定位精度等因素影响，浮标位置存在误差。因此，基于以下假设，仿真分析阵元间距、浮标位置误差和测向误差对测量阵形为正三角形阵的被动定向浮标阵定位误差的影响：

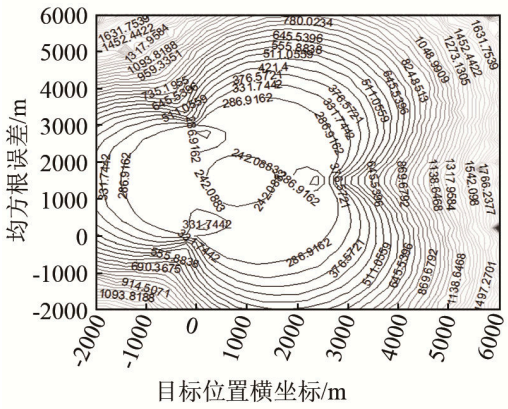
(1) 各浮标位置误差(均方差)符合高斯分布；

(2) 各枚浮标是全方位观测(0°~360°)，测向误差(均方差)符合高斯分布，且各枚浮标测向均方误差一致；

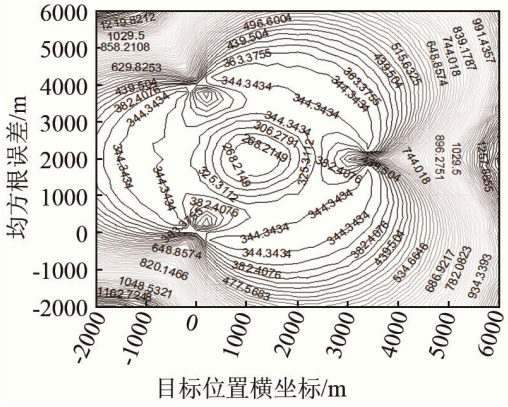
(3) 目标处于低速航行状态(每枚浮标由于目标运动引起的测向误差可忽略)。

2.1　相同位置误差和测向误差下不同阵元间距的影响

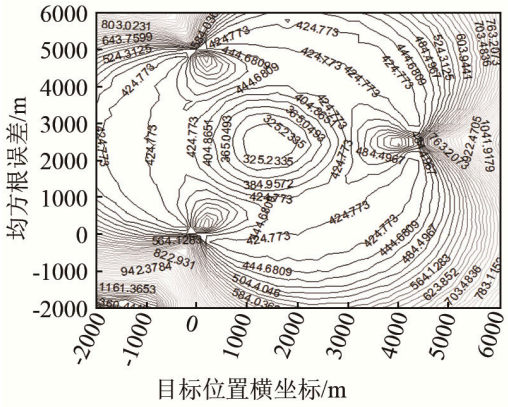
设浮标位置误差为 100 m，测向误差为 5°，阵元间距 D 分别为 3、4、5 km，仿真分析浮标阵定位误差。取浮标位置分别为(0, 0)、(D, 0)和(D/2, 0.866D)，目标位置为正方形区域，横坐标为(–2000, 6000)，纵坐标为(–2 000，6 000)，等间隔 200 m 取一个点，共 41×41 点。每个点仿真次数 10 000 次，计算定位误差。仿真误差的等高线图见图 1。



(a) 阵元间距 3 km、位置误差 100 m、测向误差 5°



(b) 阵元间距 4 km、位置误差 100 m、测向误差 5°



(c) 阵元间距 5 km、位置误差 100 m、测向误差 5°

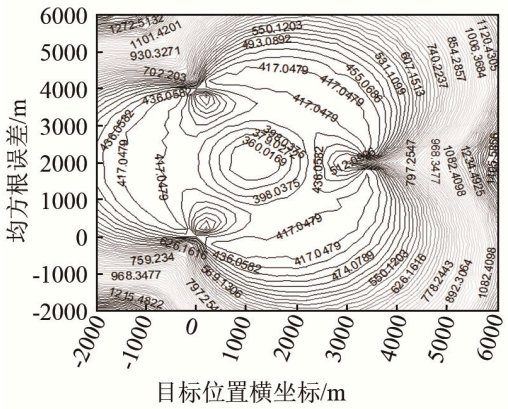
图 1　不同阵元间距下的定位误差

Fig.1　Localization errors under different array spacing

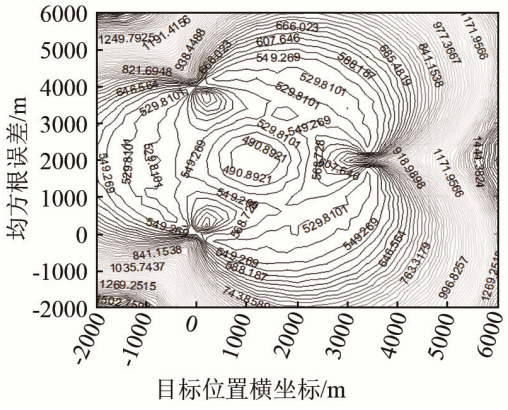
由图 1 可知，在相同的位置误差和测向误差下，当目标在一定范围内(约在 3 500 m 范围内)时，定位误差随阵元间距增大而增大，当目标超出该范围时，阵元间距小的浮标阵定位误差急剧增大，阵元间距较大的浮标阵定位误差反而较小。

2.2 相同阵元间距和测向误差下不同位置误差的影响

设测向误差为 5°，阵元间距为 4 km，位置误差分别为 300、500 m，仿真分析浮标阵定位误差。取浮标位置分别为(0，0)、(4 000，0)和(2 000，3464)，目标位置为(–2 000，2 000)，和(–6 000，6 000)围成的正方形区域，等间隔 200 m 取一个点，共 41×41 点。每个点仿真次数 10 000 次，计算定位误差。仿真误差等高线图见图 2。



(a) 阵元间距 4 km、位置误差 300 m、测向误差 5°



(b) 阵元间距 4 km、位置误差 500 m、测向误差 5°

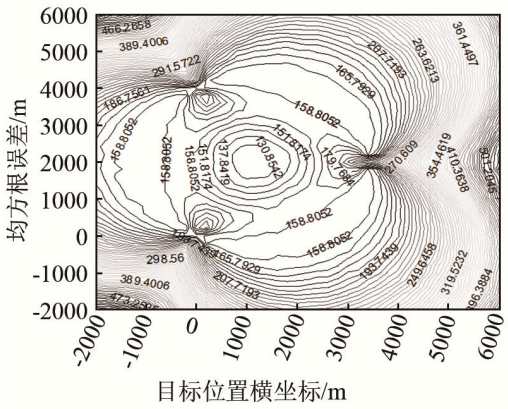
图 2 不同位置误差下的定位误差

Fig.2 Localization errors under different buoy location errors

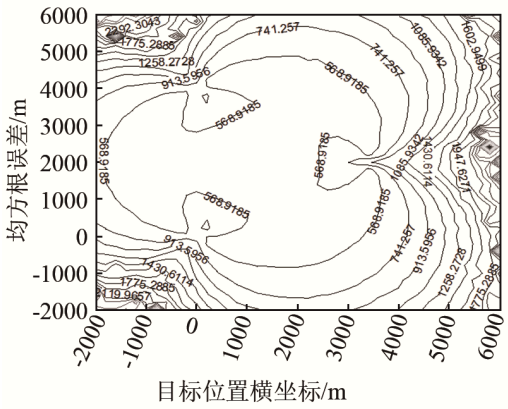
根据图 2 和图 1(b)可知，在其它条件相同的情况下，浮标位置误差增大，定位误差变大；当目标超出一定范围(约在 4 000 m 范围内)后，位置误差引起的定位误差显著增大，但由位置误差引起的定位误差变化比该范围内小。

2.3 相同阵元间距和位置均方误差下不同测向均方误差的影响

取阵元间距为 4 km，位置误差为 100 m，测向误差分别为 2°、8°，仿真分析浮标阵定位误差。取浮标位置分别为(0，0)、(4 000，0)和(2 000，3 464)，目标位置为(–2 000，2 000)，和(–6 000，6 000)围成的正方形区域，等间隔 200 m 取一个点，共 41×41 点。每个点仿真次数 10 000 次，计算定位误差。仿真误差等高线图见图 3。



(a) 阵元间距 4 km、位置误差 100 m、测向误差 2°



(b) 阵元间距 4 km、位置误差 100 m、测向误差 8°

图 3 不同测向误差下的定位误差

Fig.3 Localization errors under different direction errors

根据图 3 和图 1(b)可知，在其余条件相同的情况下，测向误差增大，定位误差变大；当目标超出一定范围后，测向误差引起的定位误差显著增大，且不同测向误差引起的定位误差变化增大。

3 结 论

本文在研究 DIFIX 定位的基础上，推导了利用多枚被动定向浮标对目标定位的最小二乘解算方法，并对测量阵形为正三角形阵的情况进行了仿真，分析了不同目标位置下阵元间距、浮标位置误

差、测向误差等对定位方法精度的影响。仿真结果表明，在相同的位置误差和测向误差下，当目标在一定范围内时，阵元间距增大，定位误差增大，当目标位置超出该范围后，浮标阵定位误差急剧增大，阵元间距大的浮标阵定位误差反而小；在其它条件相同时，位置误差(测向误差)增大，定位误差增大。因此，为了提高三角形阵的定位精度，应尽量提高浮标的测向精度和浮标位置精度；在实际使用中，应根据浮标性能和实际使用需求选取合理的布阵间距。

本文的结论是基于正三角形被动定向浮标阵得出的，但值得一提的是，本文的结论并不局限于正三角形阵的情况，对一般三角形阵同样适用。

参 考 文 献

[1] 蓉竹. 机载声呐浮标和吊放声呐[J]. 现代军事, 2006, **32**(1): 62-63.
RONG Zhu. Airplane carry sonobuoy and dipping sonar[J]. Modern Military, 2006, **32**(1): 62-63.

[2] 张晓利, 陈建勇. 吊放声呐与声呐浮标在应召反潜中的联合应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2006, **21**(6): 669-371.
ZHANG Xiaoli, CHEN Jianyong. Joint application of dipping sonar and sonobuoy in answering the call to anti-submarine[J]. Journal of Navel Aeronautical Engineering Institute, 2006, **21**(6): 669-371.

[3] Charles R, Greene J. Directional frequency and recording (DIFAR) sensors in seafloor recorders to locate calling bowhead wales during their fall migration[J]. J Acoustic Soc Am, 2004, **116**(2): 799-813.

[4] 王泽民，蒋俊培. 加速度矢量水听器定向声呐浮标的定位方法[J]. 声学与电子工程, 2001, **16**(3): 23-26.
WANG Zemin, JIANG Junpei. Target location algorithm using direction finding and ranging sonobuoy based on acceleration vector hydrophone[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2001, **16**(3): 23-26.

[5] 李居伟, 徐以成, 孙明太. 被动定向声呐浮标的目标运动分析[J]. 电光与控制, 2011, **18**(12): 31-38.
LI Juwei, XU Yicheng, SUN Mingtai. Research on target motion analysis for passive directional sonobuoy[J]. Electronics Optics & Control, 2011, **18**(12): 31-38.

[6] 董志荣. 被动声呐浮标目标运动分析数学模型[J]. 电光与控制，2006, **13**(6): 1-5.
DONG Zhirong. Mathematical models for target moving analysis through passive sonobuoy[J]. Electronics Optics & Control, 2006, **13**(6): 1-5

[7] 罗明愿, 张远洋. 一种浮标定位方法的误差分析[J]. 声学与电子工程, 2013, **28**(3): 16-19.
LUO Mingyuan, ZHANG Yuanyang. Simulation analysis of A target location algorithm based on Sonobuoy[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2013, **28**(3): 16-19.

[8] 陶林伟, 王英民. 一种新的单枚被动定向浮标目标定位方法[J]. 兵工学报, 2011, **32**(3): 365-369.
TAO Linwei, WANG Yingmin. A target location algorithm based on single direction finding and ranging sonobuoy[J]. ACTA Armamentarll, 2011, **32**(3): 365-369.