

基于矢量传感器的双基地声纳数据融合<sup>①</sup>邹吉武<sup>②</sup> 孙大军 兰华林

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

**摘 要** 提出了一种基于单矢量传感器的双基地声纳定位数据融合算法。阐述了矢量双基地声纳数据融合定位算法的基本原理与解决方案。与常规声压双基地 T/R-R 声纳系统相比,矢量双基地声纳系统拥有更为丰富的声场观测信息。较之传统声压型,基于时延定位的算法(TOL),此新算法可带来更高的定位精度。在近基线三角区域,定位精度提高约 23%,而在基线定位盲区附近,定位精度提高近 40%。此新算法同时还解决了 TOL 算法的定位二值模糊问题。

**关键词** 双基地声纳,数据融合,矢量声场,定位

## 0 引 言

基于多站址信息数据融合的三维被动水声定位技术,由于其在海洋开发及非合作水下目标探测中的重要作用,成为国内外学者研究的热点<sup>[1-4]</sup>。值得关注的是,北约海洋研究中心的 Coraluppi 博士在其多篇论文中,对双(多)基地条件下的数据融合,以及影响双基地声纳定位精度的因素等双基地声纳应用中的关键技术,做了诸多有益的研究工作<sup>[5-8]</sup>。凌青博士与张小凤博士在学位论文中<sup>[9,10]</sup>均就多站址条件下的双基地声纳定位误差相关问题,从不同角度给出了详尽的阐述。

但从对双(多)基地声纳系统的预言以及多站址数据融合技术的发展现状来看,研究工作均是围绕声压传感器或声压传感器阵列来进行的。即双基地声纳的接收基地均选用传统的声压传感器。而具有诸多优良性能且小巧的矢量传感器却一直未被给予足够的重视。声矢量传感器可空间共点拾取声场声压与质点振速信息,具有出色的抗噪声及远程探测能力<sup>[11]</sup>。鉴于此,本文提出了一种基于矢量传感器的最佳线性数据融合算法,该算法在传统标量 TOL (time only location,基于时延的定位)技术基础上,同时利用声场矢量特性进行达波方向(direction of arrival, DOA)解算,进而配合站址先验信息,对水下目标进行定位。该算法充分综合了矢量声场观测所带来的冗余信息,较之单纯 TOL 算法,极大提高了双

基地声纳系统的定位精度。矢量双基地定位方法的引入,也显著改善了 TOL 算法在基线向定位精度急剧下降的缺点。

## 1 数据融合原理

考虑对参量  $\theta$  进行的两次独立观察  $x_i$  和  $x_j$ 。假定观察结果为无偏,且有不等离差  $\sigma_i$  和  $\sigma_j$ , 则

$$\begin{cases} E[x_i] = \theta & \text{Var}[x_i] = \sigma_i^2 \\ E[x_j] = \theta & \text{Var}[x_j] = \sigma_j^2 \end{cases} \quad (1)$$

数据融合旨在基于两次观察的结果,寻找一个新的估计量  $x_{ij}$ , 使它依然保持对  $\theta$  无偏,且具有小于  $\sigma_i$  和  $\sigma_j$  的估计偏差<sup>[12]</sup>。

在最简单的情况下,仅考虑  $x_i$  和  $x_j$  的加权线性组合

$$x_{ij} = ax_i + bx_j \quad (2)$$

问题转化为解  $a$  和  $b$ , 使得

$$\text{Var}[x_{ij}] = E[x_{ij} - \theta]^2 \quad (3)$$

极小。新估计量  $x_{ij}$  依然要求无偏,故

$$E[x_{ij}] = (a + b)\theta = \theta \quad (4)$$

即“ $a + b = 1$ ”为求解的直接约束条件。

根据独立性的假设,求解(3)式得

$$\text{Var}[x_{ij}] = a^2\sigma_i^2 + b^2\sigma_j^2 \quad (5)$$

用 Lagrange 乘子法求(5)式的条件极值,可得:

$$a = \frac{\sigma_j^2}{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}; \quad b = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \sigma_j^2} \quad (6)$$

① 国防科技重点实验室基金(9140C2002020602)资助项目。

② 男,1983年生,博士生;研究方向:矢量声系统与矢量双基地声纳信号处理;联系人,E-mail: zoujiwu@gmail.com  
(收稿日期:2008-11-26)

由此可知,最佳线性加权数据融合是对两个独立变量的加权,权与估计量的标准差成反比。偏离度越大,权系数越小。这一结果在直观上非常容易理解。联立(2)、(6)两式得

$$x_{ij} = \frac{\sigma_j^2 x_i + \sigma_i^2 x_j}{\sigma_i^2 + \sigma_j^2} \quad (7)$$

联立(5)、(7)两式得

$$\text{Var}[x_{ij}] = \left( \frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma_j^2} \right)^{-1} \quad (8)$$

显然,新的估计量在最小均方误差准则下,最佳线性数据融合的离差要小于单独每一分量。

## 2 双基地 TOL 系统配置

双基地声纳系统配置及 TOL 定位算法原理如图 1 所示。图中  $T/R(x_T, y_T)$  为声源,它可接收声波,且具有单基地声纳的特点。 $R(x_R, y_R)$  为被动接收基地。 $S(x, y)$  为探测目标的位置; $S'(x', y')$  为目标的估计; $r'_T$  与  $r'_R$  分别为对  $r_T$  与  $r_R$  的估计。 $\theta_T$  为发射基地的波束指向角,  $\theta_R$  为接收基地的波束指向角。

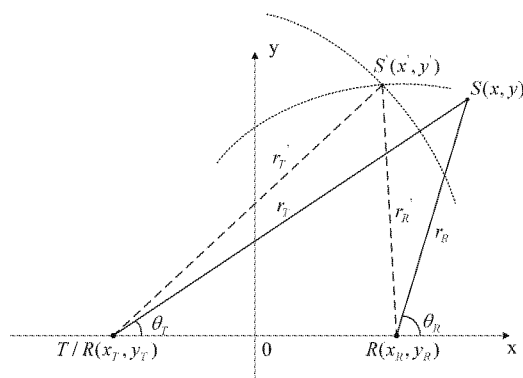


图 1 T/R-R 型双基地声纳 TOL 原理

理想情况下,在  $T/R(x_T, y_T)$  站测得的目标回波时延为

$$\tau_T = \frac{2r_T}{v_c} \quad (9)$$

在  $R(x_R, y_R)$  测得的目标回波时延为

$$\tau_\Sigma = \frac{r_\Sigma}{v_c} = \frac{r_T + r_R}{v_c} \quad (10)$$

其中  $v_c$  为水中的声速。联立(9)、(10)式,有

$$\begin{cases} r_T = \frac{\tau_T v_c}{2} \\ r_R = \tau_\Sigma v_c - \frac{\tau_T v_c}{2} \end{cases} \quad (11)$$

带入坐标,可得定位方程

$$\begin{cases} (x - x_T)^2 + (y - y_T)^2 = r_T^2 \\ (x - x_R)^2 + (y - y_R)^2 = r_R^2 \end{cases} \quad (12)$$

不难看出,大多数情况下,(12)式的 TOL 定位算法给出的  $S(x, y)$  位置有二值解,存在模糊问题。图 1 中,第 4 象限存在模糊估值点。需要借助其它信息来消除定位模糊现象。

## 3 单矢量传感器方位估计

有限尺度的声源形成的声场,称之为相干声场。其声压与质点振速间存在相关性。双基地声纳的目标回波声场属于相干声场。

设声场中一点处的声压为  $p(t)$ , 振速为  $\vec{v}(t)$ 。目标回波信号与噪声相互独立,且各态历经。平均声强器输出为

$$\overline{\vec{I}(t)} = \overline{p(t)\vec{v}(t)} \quad (13)$$

顶横线为时间平均,又有

$$\begin{cases} p(t) = p_s(t) + p_n(t) \\ \vec{v}(t) = \vec{v}_s(t) + \vec{v}_n(t) \end{cases} \quad (14)$$

足标  $s$  表示信号;  $n$  表示噪声。联立(13)、(14)式。由于信号与噪声不具有相关性,故其时间平均的结果为零,有

$$\overline{\vec{I}(t)} = \overline{p_s(t)\vec{v}_s(t)} \quad (15)$$

平均声强器在统计意义上是最大似然估计器。具有好的抗各向同性噪声干扰能力。简单的情况下,只在  $xoy$  平面内考虑,有

$$\begin{cases} \overline{\vec{I}_x(t)} = \overline{p(t)\vec{v}_x(t)} \\ \overline{\vec{I}_y(t)} = \overline{p(t)\vec{v}_y(t)} \end{cases} \quad (16)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\overline{\vec{I}_y(t)}}{\overline{\vec{I}_x(t)}} \quad (17)$$

图 2 为单矢量传感器时域平均声强器方位估计原理框图。不难看出,由(17)式得到目标  $S$  对  $T/R(x_T, y_T)$  与  $R(x_R, y_R)$  观测点的方位估计,结合基地位置的先验信息,可由式

$$\begin{cases} y - y_T = \tan \theta_T \cdot (x - x_T) \\ y - y_R = \tan \theta_R \cdot (x - x_R) \end{cases} \quad (18)$$

解算出目标位置。显然,相异于(12)式给出的定位方程,(18)式为线性方程组,不存在二值解定位模糊问题。这正是矢量传感器的无模糊测向的优势所在。

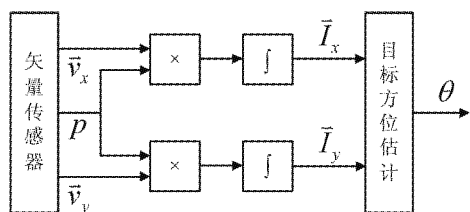


图 2 平均声强器方位估计原理图

## 4 数据融合算法性能与仿真

几何精度衰减因子 (geometrical dilution of precision, GDOP) 曲线可以直观地描述矢量双基地声纳定位精度的空间分布。考虑二维情况下, 选取水平方向  $x$ 、 $y$  分量误差方差和的平方根  $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$  表征定位精度是合适的。

### 4.1 TOL 算法误差分析

如图 1 模型, 将  $r_T$ 、 $r_R$  的测量结果直接引入零均值的高斯噪声。 $\sigma_{r_T}$  和  $\sigma_{r_R}$  为相应的标准差, 则有

$$\begin{cases} r'_T = r_T + N(0, \sigma_{r_T}^2) \\ r'_R = r_R + N(0, \sigma_{r_R}^2) \end{cases} \quad (19)$$

不考虑站址测量误差, 设基线长度为  $2d$ , 取中点为坐标原点建立坐标系; 又  $dr_T$ 、 $dr_R$  为距离测量误差, 则 (12) 式的定位方程可写为

$$\begin{cases} (x + d)^2 + y^2 = r_T^2 \\ (x - d)^2 + y^2 = r_R^2 \end{cases} \quad (20)$$

(20) 式两边微分, 有

$$\begin{bmatrix} (x + d) & y \\ (x - d) & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_T dr_T \\ r_R dr_R \end{bmatrix} \quad (21)$$

即得

$$\mathbf{A} \cdot d\mathbf{X} = \mathbf{R} \quad (22)$$

$$d\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{R} \quad (23)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (x + d) & y \\ (x - d) & y \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_T dr_T \\ r_R dr_R \end{bmatrix} \quad (24)$$

TOL 算法的定位误差可写为

$$GDOP = \sqrt{\text{tr}[d\mathbf{X}]} = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} \quad (25)$$

### 4.2 矢量 DOA 定位算法误差分析

如图 1 建立坐标系, 则 (18) 式可写成

$$\begin{cases} y = \tan\theta_T \cdot (x + d) \\ y = \tan\theta_R \cdot (x - d) \end{cases} \quad (26)$$

上式微分得

$$\begin{cases} dy = \sec^2\theta_T(x + b)d\theta_T + \tan\theta_T dx \\ dy = \sec^2\theta_R(x - b)d\theta_R + \tan\theta_R dx \end{cases} \quad (27)$$

$d\theta_T$ 、 $d\theta_R$  为角度测量误差。写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} -\tan\theta_T & 1 \\ -\tan\theta_R & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sec^2\theta_T(x + b)d\theta_T \\ \sec^2\theta_R(x - b)d\theta_R \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{B} \cdot d\mathbf{X} = \mathbf{Q} \quad (29)$$

$$d\mathbf{X} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{Q} \quad (30)$$

其中:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\tan\theta_T & 1 \\ -\tan\theta_R & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sec^2\theta_T(x + b)d\theta_T \\ \sec^2\theta_R(x - b)d\theta_R \end{bmatrix} \quad (31)$$

DOA 算法定位误差可表示为

$$GDOP = \sqrt{\text{tr}[d\mathbf{X}]} = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} \quad (32)$$

### 4.3 数据融合算法仿真

由于两组测量子集 ( $r'_T$ 、 $r'_R$ ) 与 ( $\theta'_T$ 、 $\theta'_R$ ) 是独立观测量, 故  $x_1$ 、 $x_2$  与  $y_1$ 、 $y_2$  皆为独立不相关的, 满足最佳线性数据融合的条件。对两次独立估计的  $x'$  与  $y'$  的值进行融合后得

$$\begin{cases} x'_{12} = a_x x'_1 + b_x x'_2 \\ y'_{12} = a_y y'_1 + b_y y'_2 \end{cases} \quad (33)$$

融合后观测误差为

$$\begin{cases} \text{Var}[x'_{12}] = (\sigma_{x_1}^{-2} + \sigma_{x_2}^{-2})^{-1} \\ \text{Var}[y'_{12}] = (\sigma_{y_1}^{-2} + \sigma_{y_2}^{-2})^{-1} \end{cases} \quad (34)$$

其中  $a_x$ 、 $b_x$ 、 $a_y$ 、 $b_y$  为线性加权系数, 可由 (33) 式带入 (6) 式中求出。

取  $T/R$  与  $R$  基地距离测量的标准差分别为  $\sigma_{r_T}$  = 52.5m,  $\sigma_{r_R}$  = 58.5m, DOA 算法角度测量误差  $\sigma_{\theta_T}$  =  $\sigma_{\theta_R}$  = 1.5°。选取两组相异的基地坐标, 分别为 (-1.8, 0) 与 (1.8, 0)km; (-3.6, 0) 与 (3.6, 0)km。双基地声纳探测区域为  $x$  向  $\pm 10$ km,  $y$  向  $\pm 10$ km 的方形区域。对双基地声纳的 GDOP 分布进行计算机仿真。

图 3 与图 4 给出定位误差的计算机仿真结果。二维水平坐标为双基地声纳作用范围; 纵轴为相应的定位误差 GDOP 分布情况。图 3 为基线长度 3.6km 的仿真结果; 图 4 为基线长度 7.2km 的仿真结果。其中 (a) 为单纯 TOL 算法定位误差分布; (b) 为矢量 DOA 算法定位误差分布; (c) 为数据融合算法定位误差分布。由图结果可知:

(1) 无论是 TOL 算法, 还是 DOA 算法, 在靠近基线向的定位误差都会变大。在基线上定位误差为无穷大, 即基线上为定位盲区。目标定位精度较高的区域, 为基线的中垂线附近的三角区域。

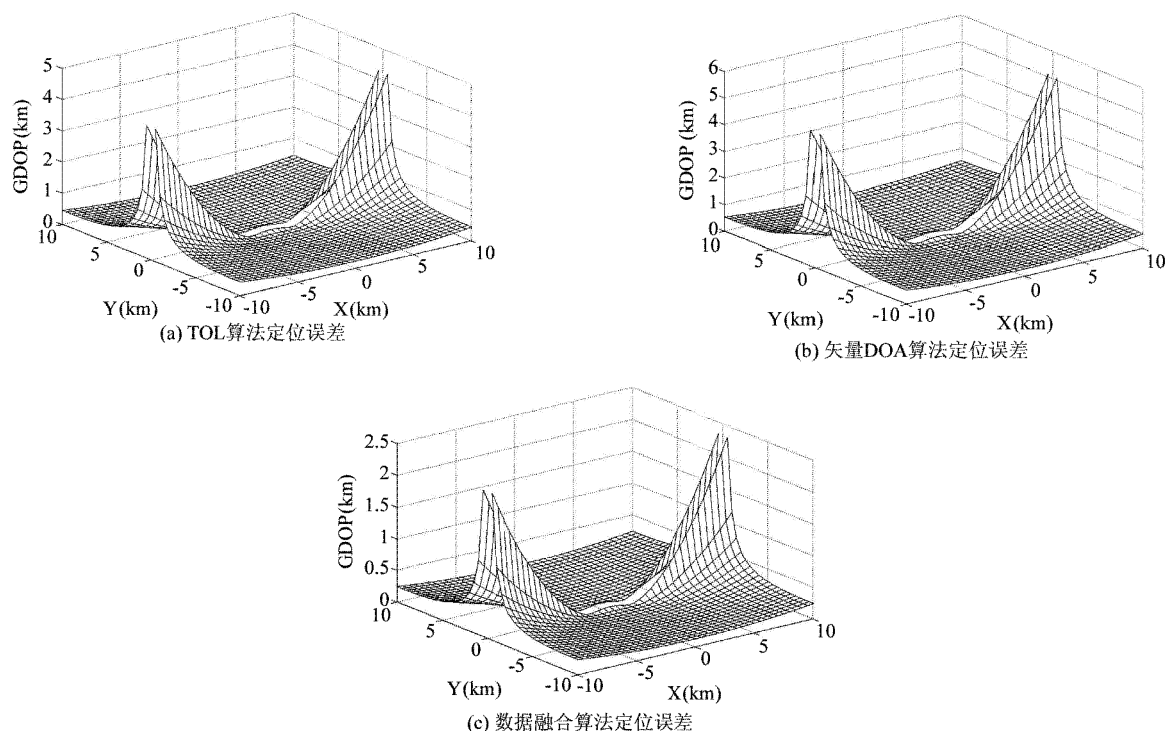


图3 基线长度为3.6km的定位精度比较

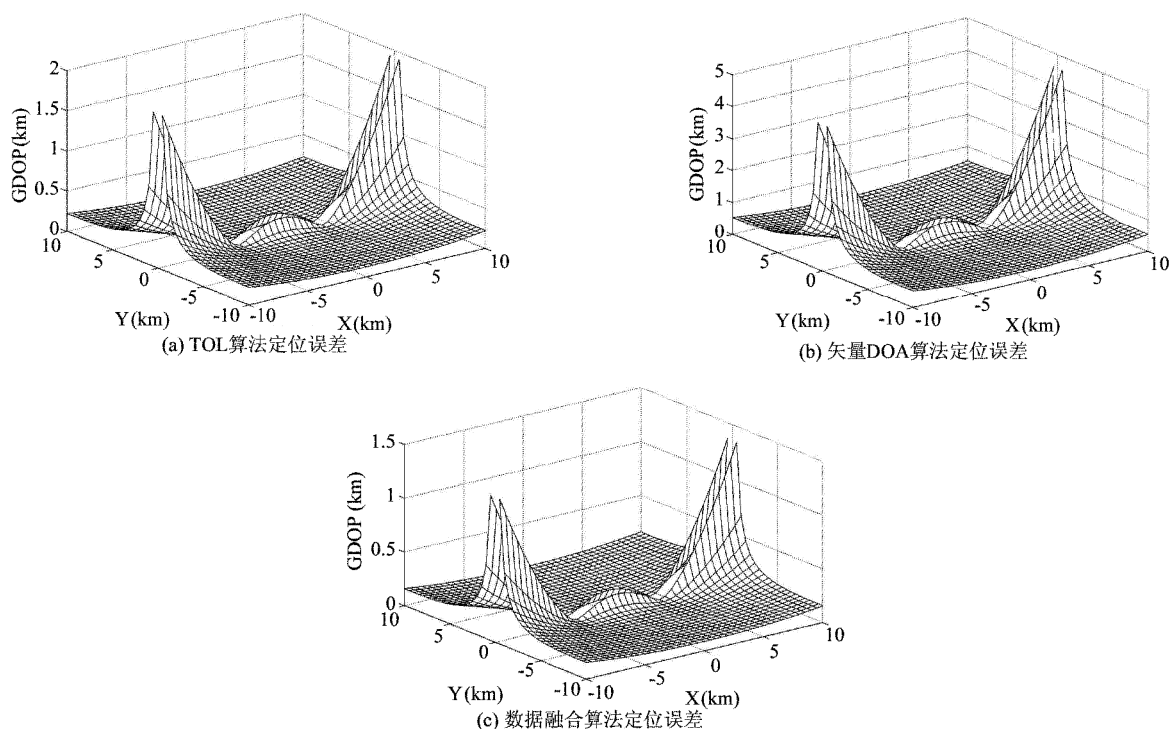


图4 基线长度为7.2km的定位精度比较

(2)基线长度的增加,会使大部分区域定位精度有所提高,但在基线区定位精度略有下降。显然,基线长度的增加,相当于声纳基阵孔径的加大。相应的,带来了距离测量与角度测量的误差引起的定位误差更大的容限。

(3)数据融合后的定位精度,明显优于单纯利用距离或角度信息进行定位的精度。定位精度最高的近基线三角区域,定位精度提高约23%;而在基线定位盲区附近的区域,定位精度提高近40%。

## 5 结 论

本文将矢量传感器应用于双基地声纳系统,提出了基于矢量传感器的双基地声纳数据融合算法。相比传统 TOL 定位算法,该算法拥有更丰富的声场观测信息,给数据融合新算法带来更高的定位精度。由于单矢量传感器即可无模糊地给出波达方向,矢量双基地声纳系统解决了传统定位算法的二值解定位模糊问题,从而实现了全空间无模糊定位。单矢量传感器可独立获取声场声压与空间共点质点振速信息,这是数据融合算法出色定位性能的物理基础。文中算法只提及双基地声纳系统,但同样可应用于多基地声纳系统。文中仅就最简单的物理模型给出了讨论结果,对于复杂海洋声信道下的算法研究以及不同海洋条件对算法性能的影响还未给出。进一步的研究工作将结合海试实测数据后续给出介绍。

### 参考文献

- [ 1 ] Hempel C G. Adaptive track detection for multi-static active sonar systems. In: Proceedings of the OCEANS 2006, Boston, MA, USA, 2006. 4099154
- [ 2 ] Saksena A, Benmohamed L, Dunne J, et al. Improving system-wide detection performance for sonar buoy networks using in-network fusion. In: Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM 2007), Orlando, FL, USA, 2007. 4454977
- [ 3 ] Krout D W, El-Sharkawi M A, Fox W L J, et al. Intelligent ping sequencing for multistatic sonar systems. In: Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, Florence, Italy, 2006. 4085949
- [ 4 ] Lourey S, Evans R, Moran W. Integrated probabilistic data association tracker for enhanced active sonar detection. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA 2005), Sydney, Australia, 2005. 527-530
- [ 5 ] Coraluppi S. Multistatic sonar localization. *Special Issue on HF/VHF Ocean Surface Radar*, 2006, 31(4): 964-974
- [ 6 ] Willett P, Coraluppi S. Application of the MLPDA to bistatic sonar. In: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference Proceeding, Big Sky, MT, USA, 2005. 1559498
- [ 7 ] Coraluppi S. Localization and fusion in multistage sonar. In: Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion, Philadelphia, PA, USA, 2005. 303-310
- [ 8 ] Coraluppi S. Analysis of tracker performance models for centralized and distributed tracking. In: Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion, Philadelphia, PA, USA, 2005. 1404-1411
- [ 9 ] 凌青. 基于多站址信息综合的水下探测定位技术研究:[博士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学水声工程学院,2006. 18-46
- [ 10 ] 张小凤. 双/多基地声纳定位及目标特性研究:[博士学位论文]. 西安:西北工业大学航海学院,2003. 26-37
- [ 11 ] 惠俊英, 刘宏, 余华兵. 声压振速联合信息处理及其物理基础初探. 声学学报, 2000, 25(4): 303-307
- [ 12 ] 李启虎. 独立观测资料的最佳线性数据融合. 声学学报, 2000, 2(5): 385-388

## A data fusion algorithm for bistatic sonar based on vector transducer

Zou Jiwu, Sun Dajun, Lan Hualin

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

### Abstract

A data fusion localization algorithm for bistatic sonar based on the single vector transducer is proposed. The principle and implementation scheme of the data fusion localization algorithm for the vector bistatic sonar are presented. Compared with the common T/R-R bistatic sonar systems in the pressure acoustic field, vector bistatic sonar systems can obtain more information of the acoustic field. Compared with the time only location (TOL) localization algorithm based on the traditional pressure sensor, the new algorithm can obtain a higher localization accuracy. In the triangle zone near the baseline, the new algorithm can increase the localization accuracy by 23%, and in the blind zone near the baseline, that can be increased by 40%. Moreover, it can also resolve the localization ambiguous problem of the TOL algorithm.

**Key words:** bistatic sonar, data fusion, vector sound field, localization