

# 基于声矢量传感器的分布式定位系统 在水下宽带声源定位中的应用

杨秀庭<sup>†</sup> 李启虎 陈新华

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

**摘要** 提出了基于声矢量传感器的分布式浮标网络定位系统,研究了不同应用背景下单个声矢量传感器的测向算法,推导了目标 DOA 估计的 Cramer-Rao 界,给出了分层海水介质中多个声矢量传感器的几何定位算法。数值仿真结果表明:(1)系统的定位性能强烈依赖于接收信噪比;(2)该系统适用于单一强声源的定位。

**关键词** 声矢量传感器,浮标网络,分布式定位系统

## Application of distributed positioning system based on acoustic vector sensors

YANG Xiu-Ting LI Qi-Hu CHEN Xin-Hua

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** A new architecture of distributed buoy network based on acoustic vector sensors has been presented in this paper. In order to explore its performance, algorithms of DOA estimation using a single acoustic vector sensor in different scenarios are studied, and the Cramer-Rao lower bound of the DOA estimator in free space is also derived. Finally, with respect to jointly localize the underwater wideband target in horizontally stratified ocean, a new method based on ray theory is given. Numerical simulations show that the performance of this distributed system depends significantly on the signal to noise ratio at the receivers and it is only applicable to localize the single dominant source.

**Key words** Acoustic vector sensor, Buoy network, Distributed positioning system

2004-09-02 收稿; 2005-02-28 定稿

作者简介: 杨秀庭 (1973-), 男, 浙江金华人, 中科院声学研究所博士生, 主要从事水声信号处理研究。

李启虎 (1939-), 男, 中国科学院声学研究所研究员, 中国科学院院士, 博士生导师。陈新华 (1978-), 男, 中国科学院声学研究所站博士后。

<sup>†</sup> 通讯联系人 Email: yxt@ocean.ioa.ac.cn

## 1 引言

利用信号与噪声的时空差异, 从噪声中提取目标信号, 实现目标的测向或定位是声纳系统的基本功能<sup>[1]</sup>。传统的基于时延估计的单基阵被动式声纳系统, 由于其定位精度依赖于基阵孔径, 对于远程定位和较大海区的水下环境监视, 存在检测概率低, 定位精度差的弱点。为此, 基于多基地测量的分布式定位系统正日益成为一种发展趋势<sup>[5,7]</sup>。

与传统的标量传感器不同, 声矢量传感器 (acoustic vector sensor, AVS) 具有空间指向性<sup>[2]</sup>(余弦指向性), 在一定的信噪比条件下, 单个 AVS 即可完成目标的精确测向任务。与多个传感器构成的基阵相比, 单个 AVS 的体积要小得多, 因此可用来构建浮标网络监测系统, 如图 1 所示。由于 AVS 的测向能力, 该浮标网络不仅可以检测目标, 同时还可以实现目标定位, 对于现代反潜战所要求的大范围水下监视, 具有重要的现实意义。

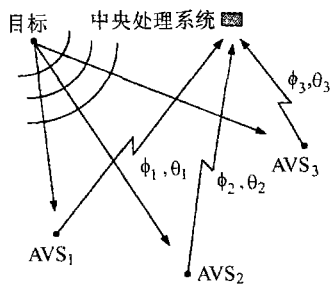


图 1 分布式定位系统的空间拓扑结构

## 2 测量模型

假设在各向同性、静态的海水介质中仅存在单一宽带声源, 其空间位置矢量为  $\mathbf{r}(x, y, z)$ , 各 AVS 的空间位置矢量为  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m$ , 其中  $m$  为传感器数。

### 2.1 自由空间

此时无多途效应, AVS 只接收直达信号,

输出为

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} y_p(t) \\ \mathbf{y}_v(t) \end{bmatrix} = \mathbf{a}(\phi, \theta)p(t) + \mathbf{e}(t) \quad (1)$$

式 (1) 中,  $y_p(t)$ ,  $\mathbf{y}_v(t)$  为 AVS 声压通道和质点振速通道输出信号的复包络;  $\mathbf{a}(\phi, \theta)$  为方位向量 ( $\mathbf{a}(\phi, \theta) = [1, \mathbf{u}^T]^T = [1, \cos \theta \cos \phi, \cos \theta \sin \phi, \sin \theta]^T$ ,  $\phi, \theta$  分别为目标的水平方位角和俯仰角。为表述简洁, 以后用  $\mathbf{a}$  表示);  $p(t)$  为接收的声压信号,  $\mathbf{e}(t)$  为背景噪声向量, 两者均为零均值的高斯随机过程, 并满足

$$\begin{aligned} E\{p(t)p^*(\tau)\} &= \sigma_s^2 \delta_{t,\tau} \\ E\{\mathbf{e}(t)\mathbf{e}^H(\tau)\} &= \sigma^2 \mathbf{I} \delta_{t,\tau} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式中,  $\delta_{t,\tau}$  为函数,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵, “\*” 代表共轭, “H” 代表共轭转置,  $\sigma_s^2, \sigma^2$  分别为信号与噪声的方差。

### 2.2 近边界区

当 AVS 布放于海面附近水层中时, 除接收直达信号外, 还同时接收来自海面的反射信号, 反射波和直达波之间存在一定的传播时延, 此时 AVS 的输出为

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} y_p(t) \\ \mathbf{y}_v(t) \end{bmatrix} = \mathbf{a}p(t) + \Re \cdot \mathbf{a}_r p(t - \tau) + \mathbf{e}(t) \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{a}_r$  为海面反射波的方位向量, 有  $\mathbf{a}_r = [1, \cos \phi_r \cos \theta_r, \sin \phi_r \cos \theta_r, \sin \theta_r]^T$ ,  $\phi_r, \theta_r$  分别为海面反射波的水平方位角和俯仰角。  $\tau$  为直达波和反射波之间的传播时延,  $\Re$  为海面声反射系数。

## 3 单个 AVS 的 DOA 估计算法

### 3.1 自由空间

此时通过计算声强来估计目标方位

$$\hat{\mathbf{I}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \Re\{y_p(t)\mathbf{y}_v^*(t)\}, \quad \hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{I}}/|\hat{\mathbf{I}}| \quad (4)$$

其中,  $\hat{\mathbf{I}}$  为声强估计值,  $\hat{\mathbf{u}}$  为单位方向矢量的估计值。AVS 的方位估计性能可由均方角度误

差 (mean square angular error, MSAE<sup>[4]</sup>) 来描述

$$MSAE = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [\cos^{-1}(\hat{\mathbf{u}}_m \cdot \mathbf{u})]^2 \quad (5)$$

(5) 式中的  $\hat{\mathbf{u}}_m$  为第  $m$  次测量所得的单位方向矢量,  $M$  为总测量次数。角误差估计的 Cramer-Rao 下界为

$$CRB_b = (1 + 2SNR)/(2N \cdot SNR^2) \quad (6)$$

上式中,  $N$  为快拍数;  $SNR = \sigma_s^2/\sigma^2$ 。

### 3.2 近海面区

单个 AVS 通过声强测量进行目标方位估计的算法, 只适用于自由空间中单一目标的测向<sup>[5,6]</sup>。当 AVS 布放于海面附近区域时, 海面反射波的强度可与直达信号相比拟, 声强测向法将失效。由于信源为宽带高斯信号, 此时直达波和海面反射波可看作具有一定相关性的两个独立信号, 理论上可通过波束形成和空间谱估计方法来分辨这种多途结构。本文中比较了基于单个 AVS 的常规波束形成 (CBF)、最小方差无畸变波束形成 (MVDR) 和多重信号分类 (MUSIC) 三种方法的方位分辨能力。

## 4 多个 AVS 的几何定位算法

由于海水介质的非均匀性, 水下声传播存在折射效应, 传播路径为一曲线<sup>[8]</sup>, AVS 测量所得的目标方位, 实则指向一个虚源, 因此根据方位射线交汇法<sup>[3]</sup>得到的目标位置估计, 会存在固定的偏差。为提高目标定位精度, 必须修正声波的折射效应。

每个 AVS 所测的目标方位及其自身的空间位置, 可决定一条本征声线, 目标的空间位置坐标应满足该声线方程。背景噪声的存在, 使得各声线一般不会恰好交汇于空间某一定点, 因此, 多个 AVS 的联合定位, 实际上可以归结为用最小二乘方法确定目标的位置坐标,

即

$$\hat{\mathbf{r}} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^m d_i^2 w_i \right\} \quad (7)$$

(7) 式中,  $\hat{\mathbf{r}}$  为目标空间位置矢量的估计值,  $w_i$  为加权系数,  $d_i$  为目标至第  $i$  条声线的距离, 由下式确定

$$d_i^2 = \arg \min |f(\mathbf{r}_i, \phi_i, \theta_i) - \mathbf{r}|^2 \quad (8)$$

(8) 式中,  $\mathbf{r}_i$  为第  $i$  个 AVS 的空间位置矢量,  $(\phi_i, \theta_i)$  为所测的水平方位角和俯仰角,  $f(\mathbf{r}_i, \phi_i, \theta_i)$  为该 AVS 所确定的本征声线方程。

### 4.1 目标的水平坐标分量估计

如图 2 所示, 由于背景噪声的影响, 各声线在水平面内的投影交汇于某一区域。此时可利用加权最小二乘算法 (weighted least square, WLS) 或二次加权最小二乘算法 (reweighted least square, RWLS)<sup>[6]</sup>, 求得目标的水平位置坐标。

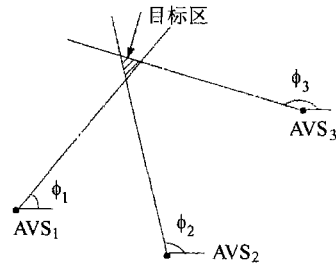


图 2 声线在水平面内的投影交汇

设: AVS 的平面位置坐标为  $\mathbf{r}_{h,i}$ , 所测目标的水平方位角为  $\hat{\phi}_i, i = 1, \dots, m$ , 则 WLS 和 RWLS 解的形式为

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \left[ \left( \sum_{i=1}^m w_i \right) I - \hat{U} W \hat{U}^T \right]^{-1} M \mathbf{w} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{w} &= [w_1, w_2, \dots, w_m]^T, \quad W = \text{diag}\{\mathbf{w}\}, \\ \hat{U} &= [\hat{\mathbf{u}}_1, \hat{\mathbf{u}}_2, \dots, \hat{\mathbf{u}}_m], \quad \hat{\mathbf{u}}_i = [\cos \hat{\phi}_i, \sin \hat{\phi}_i]^T, \\ M &= [(I - \hat{\mathbf{u}}_1 \hat{\mathbf{u}}_1^T) \mathbf{r}_{h,1}, \dots, (I - \hat{\mathbf{u}}_m \hat{\mathbf{u}}_m^T) \mathbf{r}_{h,m}] \end{aligned}$$

### 4.2 目标的垂直坐标分量估计

由式 (9) 求得目标的水平坐标分量  $(\hat{x}, \hat{y})$  后, 根据式 (7), 垂直坐标分量应满足下式

$$\hat{z} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^m w_i [(\hat{x} - f_1(z_i))^2 + (\hat{y} - f_2(z_i))^2 + (z - z_i)^2] \right\} \quad (10)$$

式 (10) 中,  $f_1(z_i)$ 、 $f_2(z_i)$  分别为

$$f_1(z_i) = x_{i,0} + \cos \phi_i \cdot \int_{z_{i,0}}^{z_i} \frac{pc(u)du}{\sqrt{1-p^2c^2(u)}},$$

$$f_2(z_i) = y_{i,0} + \sin \phi_i \cdot \int_{z_{i,0}}^{z_i} \frac{pc(u)du}{\sqrt{1-p^2c^2(u)}} \quad (11)$$

式 (11) 中,  $(x_{i,0}, y_{i,0}, z_{i,0})$  为第  $i$  个 AVS 的位置坐标;  $p = \cos \theta_i / c_r$ , 为声线常数,  $c_r$  为 AVS 处的声速;  $z_i$  为由  $(x_{i,0}, y_{i,0}, z_{i,0})$  和  $(\phi_i, \theta_i)$  所决定的本征声线上距目标最近点的垂直坐标分量。式 (10) 可通过 Newton-Raphson 迭代法求解。

### 4.3 定位性能

多个 AVS 的联合几何定位, 同样可以用式 (5) 所定义的 MSAE 来描述系统的测向性能。由于斜距和方位角  $(r, \phi, \theta)$  可以完全确定目标的空间位置, 因此可进一步引入均方距离误差 (mean square range error, MSRE)<sup>[4]</sup> 来描述系统的测距性能

$$MSRE = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\hat{r}_m - r)^2 \quad (12)$$

其中,  $r$  为目标的真实斜距,  $\hat{r}_m$  为其第  $m$  次测量结果。

## 5 数值仿真

本文针对水下宽带目标的静态定位进行了仿真研究, 以此来考察基于 AVS 的分布式定位系统在不同应用背景下的工作性能。仿真的工作频段为 3000~6000Hz, 采用 Nyquist 抽

率。

### 5.1 单个 AVS 的方位估计

图 3 给出了自由空间中方位估计的均方角度误差与信噪比的关系 (目标方位  $[45^\circ, 30^\circ]$ )。可以看出, 由于观测时间很短, 低信噪比所对应的测向误差很大 (0dB 时最优下界近似为  $3^\circ$ ), 不具备实用价值。而当信噪比达到 30dB 时, 150 个独立抽样 (对应的观测时间仅为 0.025s) 的测向均方根误差低达  $0.2^\circ$ , 600 个独立抽样时则可达  $0.1^\circ$ , 此时的测向精度可满足一般的定位要求。

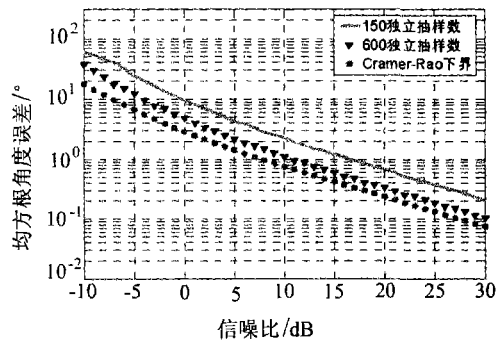


图 3 单个 AVS 的测向性能

图 4 给出了单个 AVS 进行多途结构 (直达和海面反射) 分辨时的空间谱。从中可以看出, 各算法分辨力次序为: MUSIC 最优, MVDR 次之, CBF 最差。信噪比为 30dB 时,

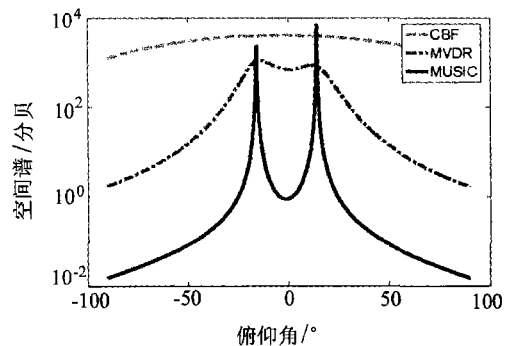


图 4 不同算法对直达和海面反射信号的方位分辨能力

MUSIC 方法得到的空间谱存在两个尖锐的谱峰, MVDR 虽能分辨, 但谱峰要宽得多, 而 CBF 则仅能识别出直达波和反射波的合成方位。因此, 在声强测向法失效的情况下, 可通过 MUSIC 方法分辨信号的多途结构, 从而正确地提取出目标直达波方位。

### 5.2 多个 AVS 的几何定位

在各 AVS 完成目标测向后, 将测量数据和传感器自身的空间位置信息发送至处理中心进行定位融合解算。仿真条件为:

目标位置: (0, 0, 300), (单位: m)。

传感器位置: (1000, 0, 30), (0, 1000, 30), (-1000, 0, 30), (0, -1000, 30), (单位: m)。

为考察声速不均匀性对目标定位的影响, 仿真中使用 Munk 声速剖面。

图 5~6 给出了自由空间中分布式系统的定位性能。虽然利用单个 AVS 测向面临种种不利条件 (如几何孔径为零, 高机动目标定位、跟踪时所允许的积分时间很短), 但由于目标信号具有高强度和大带宽的特点, 系统仍可以提供满意的定位精度。图中横坐标为坐标原点处的信噪比, 根据仿真条件, 由于声波的几何扩展, 此时各 AVS 处的信噪比比原点处约低 10.8dB。从图中可以看出, 当 AVS 工作于 30dB 的信噪比时, 目标定位的角度误差约为 0.53°, 距离误差约为 1.3m。WLS 和 RWLS 的误差曲线几

乎重合, 因而此时采用计算量较小的 WLS 算法即可。

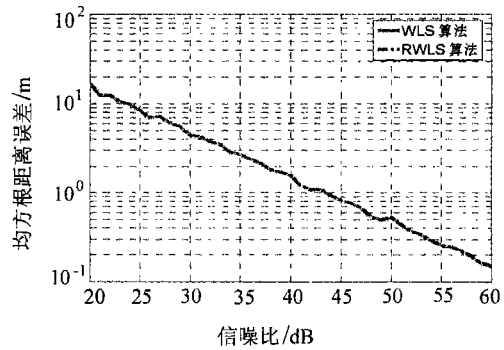


图 6 自由空间中系统的  $MSAE^{1/2}$   
(快拍数: 150; Monte Carlo 模拟次数: 200)

当 AVS 位于海面附近时, 由于海面反射信号的干扰, 基于声强测量的目标定位算法已不再适用, 此时分辨信号的多途结构是实现目标定位的前提。如图 7~8 所示, 目标定位分两步进行: 首先通过 MUSIC 方法提取本征声线所对应的目标方位, 而后再利用声线交汇方法确定目标的空间位置。该情况下系统的定位性能与信噪比之间的依变关系和自由空间情况类似, WLS 和 RWLS 两种定位算法的结果差异也很小。

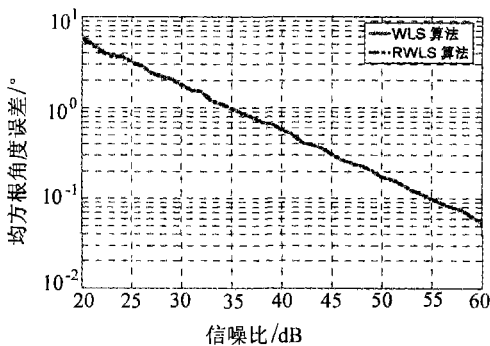


图 5 自由空间中系统的  $MSAE^{1/2}$   
(快拍数: 150; Monte Carlo 模拟次数: 200)

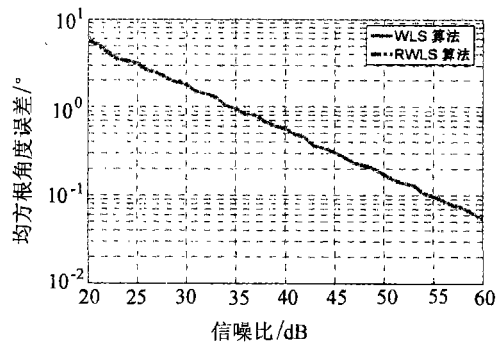


图 7 AVS 位于海面附近时系统的  $MSAE^{1/2}$   
(快拍数: 150; Monte Carlo 模拟次数: 200)

### 6 研究结论

研究表明: (1) 基于声强测量的分布式定位算法适用于宽带目标的快速定位, 硬件实现简单, 高信噪比时具有良好的定位性能; (2) 基于多目标分辨的定位算法在更大的信噪比范围内具有更高的定位精度, AVS 的布放更为灵活, 缺点在于计算量大, 要求信号多途之间的相干性较弱; (3) 为修正声波的折射效应, 本

文提出的基于声线跟踪的分步定位算法简单、实用, 在单一强声源应用背景下具有理想的定位性能; (4) WLS 和 RWLS 两种算法适用于多个 AVS 的联合定位, 在高信噪比条件下, 采用前者即可。

### 参 考 文 献

- 1 李启虎著. 数字式声纳设计原理. 合肥: 安徽教育出版社, 2002. 1~10.
- 2 孙贵青著. AVS 及其在均匀线列阵声纳中的应用. 博士后研究报告, 北京: 中科院声学所, 2003. 1~6.
- 3 孙仲康等著. 单多基地有源无源定位技术. 北京: 国防工业出版社, 1996. 187~194.
- 4 Nehorai A, Hawkes M. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2000, **48**(6):1737~1749.
- 5 Hawkes M, Nehorai A. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2003, **51**(6):1479~1491.
- 6 Hochwald B, Nehorai A. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1996, **44**(1):83~95.
- 7 Kozick R J, Sadler B M. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2004, **52**(3):601~616.
- 8 Brekhovskikh L M, Yu P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics. Third Edition*, New York: Springer, 2003. 35~56.

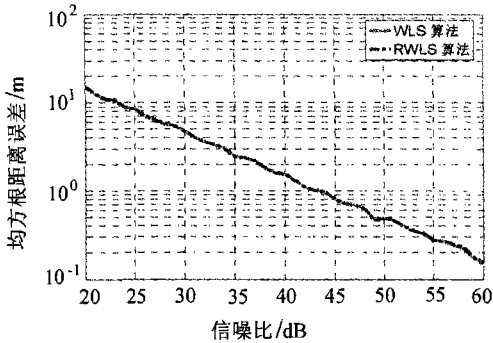


图 8 AVS 位于海面附近时系统的 MSAE<sup>1/2</sup> (快拍数: 150; Monte Carlo 模拟次数: 200)