

分布式矢量传感器对宽带源 被动定位的方法研究

陈新华[†] 孙长瑜 杨秀庭

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

摘要 本文给出了两种基于矢量传感器的被动定位方法。一般来说,对目标进行被动定位可以通过方位信息或时延信息来实现。单个矢量传感器就可以实现目标方位估计,而对多个矢量传感器接收的信号进行互相关运算即可得到目标对各矢量传感器的时延信息。本文先给出了利用方位信息进行被动定位的方法,然后给出了利用分布式矢量传感器进行方位-时延信息联合被动定位的新方法,并通过仿真分析对这两种方法的定位性能进行了比较。

关键词 声矢量传感器,被动定位,波达方向,时延

Wideband source localization using distributed acoustic vector sensors

CHEN Xin-Hua SUN Chang-Yu YANG Xiu-Ting

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

Abstract This paper provides two passive methods for source localization based on acoustic vector sensor. Generally, the localization of a target requires the estimation of direction of arrival (DOA) or the estimation of time difference of arrival (TDOA). The estimation of DOA can be realized by using an acoustic vector sensor, while the calculation of the cross-correlation function for several such sensors can give TDOA information. This paper at first introduces the method applying DOA information. Then it derives a novel method for source localization, which uses the combination of DOA and TDOA from distributed acoustic vector sensors. The simulation results of the performance of the two methods are presented.

Key words Acoustic vector sensor, Passive localization, Direction of arrival, Time difference of arrival

2005-04-21 收稿; 2005-09-28 定稿

作者简介: 陈新华 (1978-), 男, 江苏泰州人, 中科院声学研究所在站博士后, 主要从事水声传播、定位领域研究。

孙长瑜 (1954-), 男, 中科院声学研究所研究员, 博士生导师。杨秀庭 (1973-), 男, 中科院声学研究所博士生。

[†] 通讯联系人 Email: CXH@ocean.ioa.ac.cn

1 引言

目标定位技术分为主动定位和被动定位。有一种主动定位技术是在目标上装有合作信标, 目标声源发射时刻和信号形式已知, 因此估计目标声源到达各接收器的时刻即可得到声源和接收器的时延差, 根据这些时延差, 利用球面交汇原理确定目标的空间位置坐标。这种主动定位在武器弹道测量中应用较广。被动定位技术是水声研究领域的经典课题, 但它至今仍然亟待继续深入研究。被动定位技术可利用目标的方位信息或时延信息来实现。利用时延信息的被动定位方法, 是通过测量各接收器之间的声传播时延来进行。常用的时延估计方法是广义相关法, 通过对两路水听器信号进行相关运算, 相关函数输出的峰值位置即对应为两路信号的时延差, 该方法已被广泛应用于声呐、雷达、电子对抗等领域, 文献 [1] 对两路水听器信号部分相关对定位精度的影响做了分析。利用方位信息的被动定位方法 [2], 则先由各基阵独立完成对目标的方位估计, 然后将各基阵估计的目标方位进行融合处理, 实现目标定位。本文将探讨基于矢量传感器的分布式定位系统, 利用方位和时延信息定位技术, 联合利用方位和时延信息定位技术国内尚无公开文献发表。

矢量传感器技术是一新兴技术, 但它已经得到广泛的研究和发展, 国内外介绍矢量传感器技术的文献很多 [3~5]。矢量传感器区别于一般声压传感器, 它可以获得声场的声压和振速信息, 而振速信息携有目标方位信息, 因此利用单个矢量传感器即可以得到目标的方位估计, 在理想的平面行波场中, 单个矢量传感器的接收响应为: 声压为 p , 三维振速分别为 v_x 、 v_y 、 v_z , 有:

$$\begin{cases} v_x = p \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi \\ v_y = p \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \\ v_z = p \cdot \cos \phi \end{cases} \quad (1)$$

其中, θ 为目标相对传感器的方位角, ϕ 为俯仰角。

2 被动定位方法

2.1 测量模型

如图 1 所示, 在三维坐标系中, 点 T 表示目标声源, 对应的空间坐标向量为 $\vec{s}$, R_i 表示各接收矢量传感器, 对应的空间坐标向量分别为 $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, \dots, M$ 。

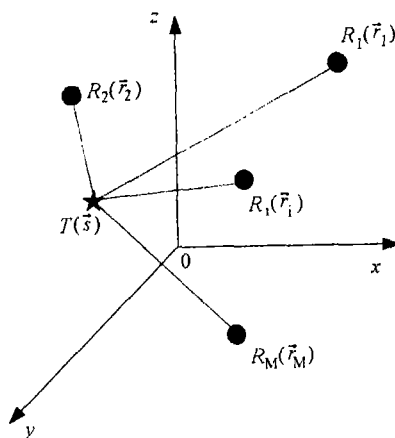


图 1 被动定位布阵示意图

2.2 方位被动定位

该方法利用矢量传感器估计的目标方位进行目标定位, 设各矢量传感器估计的目标方位向量为 $\hat{u}_i$, $i = 1, \dots, M$, 如图 2 所示, 为讨论方便, 示意图表示为二维坐标。若估计值 $\hat{u}_i$ 无误差, 则经过各矢量传感器空间坐标点 $R_i(\vec{r}_i)$, 方向向量为 $\hat{u}_i$ 的 M 条直线交汇于目标声源的真实坐标。由于背景噪声的影响, 各矢量传感器的方位估计不可能无误差, 因此实际上 M 条直线并不交汇于目标声源, 此时可通过某个代价函数的最小化给出目标的空间坐标向量估计。目标坐标点估计满足到空间 M 条直线的距离平方和最小, 这 M 条直线分别为经过各矢量传感器空间坐标 $R_i(\vec{r}_i)$, 方向向量为 $\hat{u}_i$ 的直线, 如图 2, 线段 TO 表示目标到第 i 条直线的距离, 假设目标最优化估计向量为 $\hat{\vec{s}}$ 。

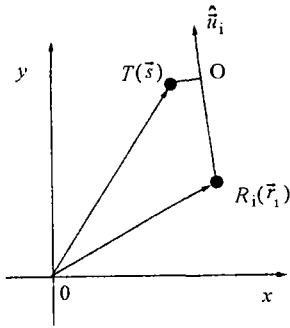


图 2 纯方位目标被动定位原理示意图

$\hat{s}$ 由以下代价函数给出

$$\hat{s} = \arg \min \sum_{i=1}^M |\vec{r}_i + \hat{u}_i^T (\vec{s} - \vec{r}_i) \hat{u}_i - \vec{s}|^2 \quad (2)$$

整理后得到式 (3), 式中 I 为单位矩阵,

$$\hat{s} = \arg \min \sum_{i=1}^M \{-2\vec{r}_i^T (I - \hat{u}_i \hat{u}_i^T) \vec{s} + \vec{s}^T (I - \hat{u}_i \hat{u}_i^T) \vec{s}\} \quad (3)$$

上式求和部分对 $\vec{s}$ 求导并使其等于 0, 有

$$2 \sum_{i=1}^M (I - \hat{u}_i \hat{u}_i^T) (\vec{r}_i - \hat{s}) = 0 \quad (4)$$

因此, 目标向量的估计值 $\hat{s}$ 的解析表达式为,

$$\hat{s} = \left[\sum_{i=1}^M (I - \hat{u}_i \hat{u}_i^T) \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^M (I - \hat{u}_i \hat{u}_i^T) \vec{r}_i \right] \quad (5)$$

在求解过程中, 还可以通过对各接收器的目标方位估计 $\hat{u}_i$ 进行加权运算, 以获得更精确的目标位置估计^[6]。文献[6]对方位被动定位技术进行了详细讨论。

2.3 方位和时延联合定位

如果各矢量传感器能同时测得目标声源的方位和该目标至各矢量传感器的声传播时延差, 则全部利用这些定位信息可进一步提高目标的定位精度。与方位法定位原理相似, 若各矢量传感器估计的目标方位 $\hat{u}_i$ 和目标声源至各接收器的距离 D_i 无误差, 则从接收器 $R_i(\vec{r}_i)$ 出发, 方向向量为 $\hat{u}_i$, 长为 D_i 的直线段, 其

末端重合于空间同一点。但由于背景噪声的影响, 各矢量传感器的估计误差是客观存在的, 因而此时也可通过某个代价函数的最小化给出目标的位置估计。目标坐标点估计满足到空间 M 条直线段的末端的距离平方和最小, 这 M 条直线段分别为从接收器空间坐标点 $R_i(\vec{r}_i)$ 出发, 方向向量为 $\hat{u}_i$, 长为 D_i 的线段, 如图 3, 线段 $T0$ 表示目标到第 i 条直线段末端的距离。目标声源至各接收器的距离和时延差 τ_{1i} 之间的关系为: $D_i = D_1 + \Delta D_i$, $\Delta D_i = c\tau_{1i}$, 其中, c 为声速, D_1 为目标声源到 1# 接收器的距离, τ_{1i} 为目标声源到 1# 接收器和 i # 接收器的声波传播时延。

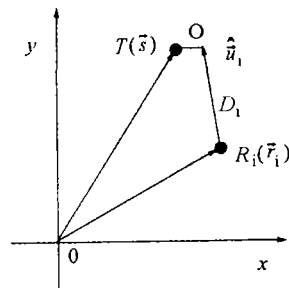


图 3 方位和时延联合被动定位原理示意图

此时 $\hat{s}$ 由以下代价函数给出

$$\hat{s} = \arg \min \sum_{i=1}^M |\vec{r}_i + (D_1 + \Delta D_i) \hat{u}_i - \vec{s}|^2 \quad (6)$$

上式求和部分对 D_1 求导并等于 0, 有

$$\sum_{i=1}^M (\vec{r}_i^T \hat{u}_i + D_1 + \Delta D_i - \hat{u}_i^T \hat{s}) = 0 \quad (7)$$

$$\text{令 } C = \sum_{i=1}^M (\vec{r}_i^T \hat{u}_i + \Delta D_i), B^T = \sum_{i=1}^M \hat{u}_i^T$$

$$D_1 = \{B^T \hat{s} - C\} / M \quad (8)$$

对 $\vec{s}$ 求导并等于 0,

$$\sum_{i=1}^M \{\vec{r}_i + (D_1 + \Delta D_i) \hat{u}_i - \hat{s}\} = 0 \quad (9)$$

上两式联立,

$$(B^T B - M^2 I) \hat{s} = -M A \quad (10)$$

其中, $A = \sum_{i=1}^m \left(\vec{r}_i + \Delta D_i \hat{u}_i - \frac{C}{M} \hat{u}_i \right)$ 。

3 仿真分析

对于实际的工程应用, 各矢量传感器在垂直方向布放距离有限, 因此在仿真时, 将各矢量传感器置于同一水平面, 即垂直坐标相等。四个分布式矢量传感器布放区域范围不超过半径为 300m 的圆柱 (以下坐标单位均为 m), 设各矢量传感器的空间坐标分别为 (0, 0, -30), (400, 0, -30), (400, 400, -30), (0, 400, -30)。

目标在阵内运动, 轨迹为在水平面内做半径为 200m 的匀速圆周运动一周, 在垂直面内做匀速直线运动, 从 -300m 运动到 -20m, 我们从目标运动轨迹上均匀取 36 个点进行讨论。这里假设各矢量传感器接收信号具有一定的相关性, 可以测得它们间的传播时延。

设矢量传感器对目标方位估计方差为 2° , 时延估计方差为 1ms, 各矢量传感器空间坐标无误差, 各测量点估计误差结果如图 4 所示。由于在垂直方向上, 分布式矢量传感器阵孔径为 0, 对于目标垂直坐标估计精度, 方位-时延联合定位精度与方位法定位精度近似, 这里暂不分析 z 坐标的定位精度。由图 4 可以看出, 方位定位估计误差与测量点有关, 有较大起伏,

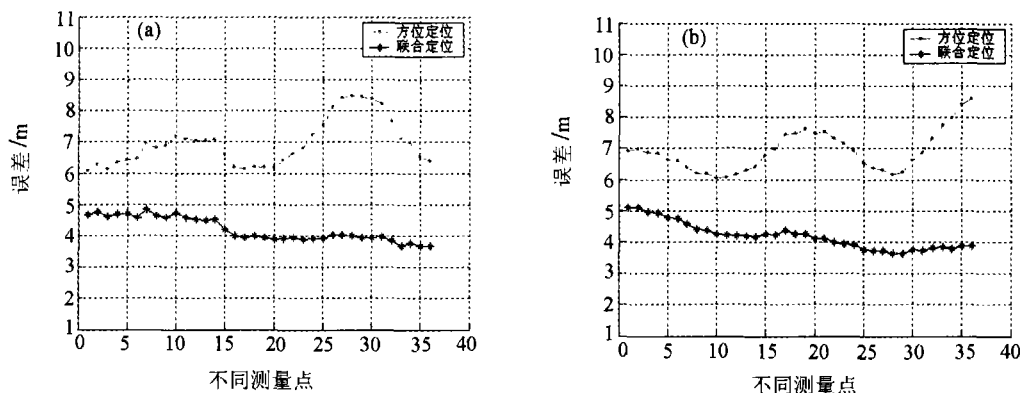


图 4 方位精度 2° 和时延精度 1ms 的定位性能仿真结果 (a) x 坐标误差 (b) y 坐标误差

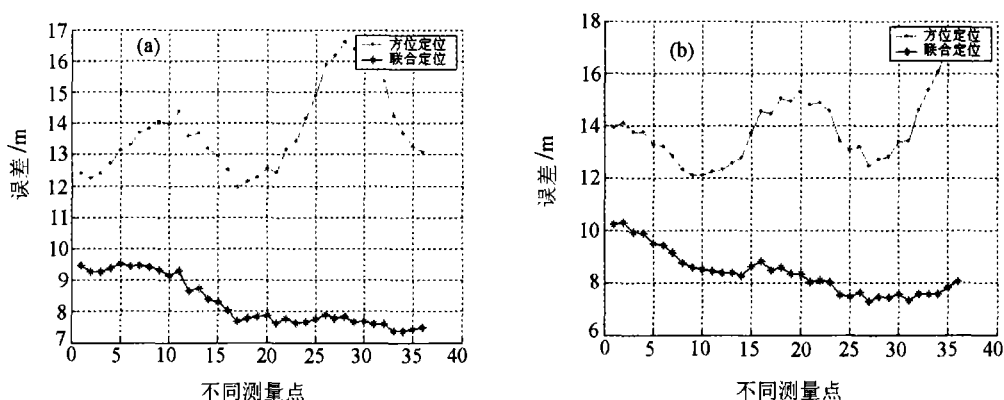


图 5 方位精度 4° 和时延精度 1ms 的定位性能仿真结果 (a) x 坐标误差 (b) y 坐标误差

而方位、时延联合定位在不同测量点估计误差比较平稳, 与测量点的具体空间坐标关系较小, 且估计误差较小。图 4 中不同测量点字样表示取目标在空间中的不同位置进行定位误差分析, x 坐标误差字样表示该图结果为 x 坐标的估计误差。下同。

当目标方位估计方差增大为 4° , 时延估计方差为 1ms , 各矢量传感器空间坐标无误差, 各测量点估计误差结果如图 5 所示。分析图 5 可以看出在此情况下, 方位定位 x 、 y 坐标定位精度下降 7m 左右, 而联合定位精度只下降大约 4m 左右, 联合定位有很强的稳定性。

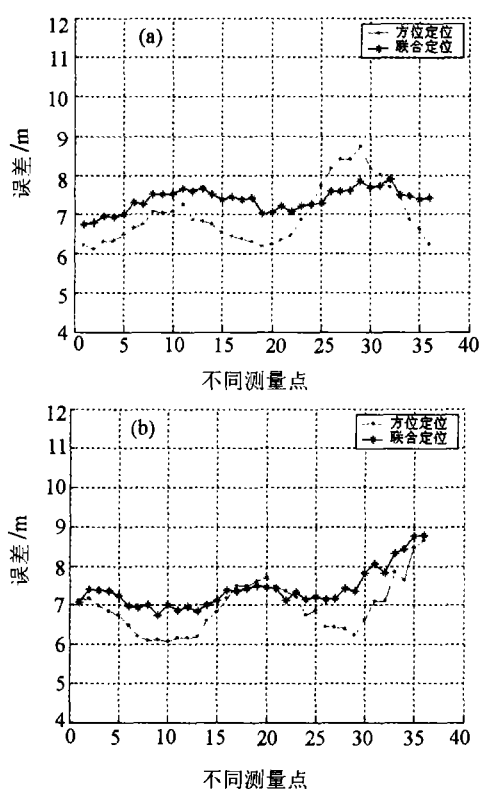


图 6 方位精度 2° 和时延精度 16ms 的定位性能仿真结果

(a) x 坐标误差 (b) y 坐标误差

当目标方位估计方差为 2° , 时延估计方差增大为 16ms , 各矢量传感器空间坐标无误差, 各测量点估计误差结果如图 6 所示。分析图 6 可以看出, 时延估计方差增大为 16ms 时, 联合定位精度与方位定位精度近似。

单纯利用时延信息进行定位需要五个浮标, 垂直坐标定位误差很大, 并且定位精度与阵的空间位置有很大关系, 容易出现奇异点, 这可以由仿真看出。

4 结论

本文从基于矢量传感器的分布式被动定位系统出发, 对比分析了两种分布式被动定位方法在水下单一声源定位背景中的应用。从仿真结果可以看出, 本文提出的方位-时延信息联合定位算法的效果较佳, 所增加的计算量很小, 并具有更强的鲁棒性, 当方位或时延某一估计精度降低时, 对该方法定位精度的影响较小。由于需要利用相关函数法计算时延, 在测量区域内信号需较大的空间相关半径。从机理看, 该方法也可用于提高主动方式的定位性能。

参 考 文 献

- 1 Richard J Kozick. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(3):601~616.
- 2 岳剑平. 水下动目标被动跟踪研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- 3 杨士莪. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(6):591~595.
- 4 孙贵青, 杨德森, 张揽月等. 声学学报, 2003, 28(1):66~72.
- 5 岳剑平, 王德俊, 惠俊英等. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(3):300~304.
- 6 Malcolm Hawkes. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(6):1479~1491.