

利用相关峰内插时延估计提高四元阵定位精度

郑琛瑶^{1,2}, 潘泉¹, 董真杰²

(1. 西北工业大学自动化学院, 西安 710129; 2. 广东湛江 91388 部队 93 分队, 广东湛江, 524022)

摘要: 超短基线定位系统具有基阵尺寸小、易于安装等优点, 被广泛应用于海洋科学领域。但超短基线作用距离短, 远距离定位精度不高。为了改善超短基线的定位精度, 在四元阵被动定位结构基础上, 采用相关峰内插时延估计算法进行超短基线定位。仿真结果表明该算法能够较好地估计时延差值, 有效改进定位精度。

关键词: 超短基线; 四元阵; 时延估计; 定位精度

中图分类号: P225.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-05-0526-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.05.016

Improvement of positioning precision of four-element-array by interpolating time-delay estimation in correlation peak

ZHENG Chen-yao^{1,2}, PAN Quan¹, DONG Zhen-jie²

(1. The College of Automation in Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: Ultra-short baseline system (USBL) is widely used in ocean observation because of its small aperture size and easily being installed. However, the USBL has lower accuracy in long-range operation. In order to increase the accuracy, the algorithm of interpolating time-delay estimation in correlation peak is used for passive positioning four-element-array. The simulation results show that this algorithm can estimate the differential time-delay exactly, the positioning precision is enhanced.

Key words: ultra-short baseline(USBL); four-element-array; time-delay estimation; positioning precision

0 引言

超短基线系统是 20 世纪 70 年代为简化水声定位系统而发展起来的。它的特点是基阵尺寸特别小, 可以在较小的载体上使用。其尺寸只有几厘米至几十厘米。使用较为灵活方便, 且易于在载体上选择噪声干扰较小的位置进行安装或吊放。超短基线水声定位系统目前已得到了广泛的应用。

由于水听器基阵的尺寸很小, 利用短基线系统中的常规脉冲包络检波和相对到达时间测量方法会带来较大误差, 需采用新的测量和定位解算方法。本文采用相关峰内插时延估计算法进行超短基线定位, 用余弦曲线拟合和多项式拟合两种方法做了比较。仿真证明, 定位精度显著提高, 两种拟合方法无明显差异, 定位误差随信噪比的增大而减小, 随阵元间距的增大而减小, 实现了超短基线定位系统远距离高精度定位。

1 四元阵被动定位结构

四元阵被动定位模型如图 1 所示。图 1 中, 1, 2, 3, 4 分别为四个水听器, 1 和 2、3 和 4 相互间隔 L , 目标位于 $S(x, y, z)$, 目标矢径为 OS , R 为目标到基阵中心的距离, S' 为 S 在水平面 xoy 内的投影, 它与 x 轴的夹角 θ 为目标水平方位角。矢径 OS 与 x 轴和 y 轴的夹角分别为 θ_{mx} , θ_{my} , 阵元 1 和 2、3 和 4 接收到的目标信号的时延差分别为 τ_{12} 和 τ_{34} 。当目标位置满足远场条件, 在平面波模型下, 根据空间

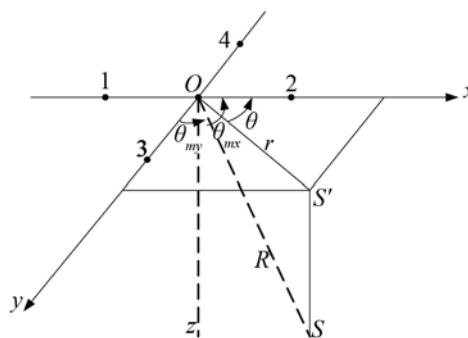


图 1 四元阵被动定位结构图

Fig.1 Structure of four-element-array position

收稿日期: 2012-03-20; 修回日期: 2012-05-02

作者简介: 郑琛瑶(1985—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为水声信号处理方面的研究。

通讯作者: 郑琛瑶, E-mail: zhchy@foxmail.com

几何关系有

$$x_L = R \cos \theta_{mx} = \frac{c\tau_{12}R}{L}, \quad y_L = R \cos \theta_{my} = \frac{c\tau_{34}R}{L} \quad (1)$$

其中, c 为水中声速, R 可通过回波测距法测得。因此定位精度取决于时延差 τ 的测量精度, 即准确测量时延差, 是提高定位精度的关键。

2 相关峰内插时延算法

传统的时延估计算法, 离散采样后时延估计分辨率较低, 采用相关峰内插技术^[1]可以提高时延估计的精度。

2.1 拷贝相关器

对于超短基线定位系统, 在白噪声背景下采用匹配滤波方法可以得到最大输出峰值功率信噪比。由于匹配滤波器的输出是相关器输出的“全景图形”, 因而可用互相关器来实现, 这个互相关器是一个时间压缩拷贝相关器^[2], 如图2所示。

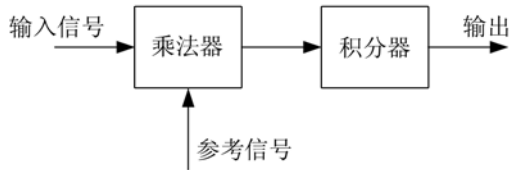


图2 拷贝相关器示意图

Fig.2 Schematic of a cross correlator

相关器的一个输入是接收信号(加噪声), 另一个输入是该发射信号本身。在每一采样间隔内, 参考信号均与输入信号进行相关运算。以线性调频信号为例观察拷贝相关器的输出。线性调频信号经过理想信道传输后送入拷贝相关器的输入端, 假设接收信号的延时为 t_0 , 则输入信号为

$$s_i(t) = \begin{cases} A \sin[\omega(t-t_0) + \pi\beta(t-t_0)^2], & t_0 \leq t \leq T+t_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

参考信号为:

$$s_r(t) = \begin{cases} A \sin[\omega t + \pi\beta t^2], & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\beta=B/T$ 称为调频斜率; B 为信号带宽; T 为信号宽度。拷贝相关器的输出为^[3]

$$R_{out}(t) = \begin{cases} \frac{A^2 T}{\pi\beta(t-t_0)} \sin\left[\pi\beta(t-t_0)\left(1 - \frac{|t-t_0|}{T}\right)\right] \cdot \cos[\omega(t-t_0)], & |t-t_0| \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

当 $t=t_0$ 时, 拷贝相关器的输出达到最大值。若检测出拷贝相关器的输出峰值, 便可估计出接收信号的时延值 t_0 。由于每一采样间隔内, 相关器输出

的是相关序列的一个离散样本, 因此输出的最大值不可能正好对应于相关峰值, 从而带来时延测量误差。显然, 时延估计的精度取决于采样频率, 最不利的情况为采样周期的 $1/2$ 。只有具有足够高的时延估计精度, 才能有较高的角度测量精度, 从而得到高的定位精度。

2.2 余弦曲线拟合

相关函数序列具有余弦或准余弦函数的形式。利用这一特性, 可用余弦函数内插来获得相关峰值的精确时刻^[4]。

设拟合波形函数为

$$r(\tau) = A_r \cos \omega \tau + B_r \sin \omega \tau \quad (5)$$

式(5)中的3个未知参数 A_r 、 B_r 和 ω 可以利用3个样值求出, 从而确定这个余弦信号, 如图3所示。由此可以得到相关峰的最大值对应的时间 t_0 。

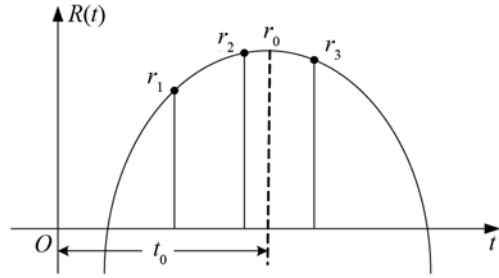


图3 相关峰内插示意图

Fig.3 Interpolation in correlation peak

根据这一思想, 参看图3, 假定利用峰值选择器得到一个最大值 $r(\tau_2)=r_2$, 在该样点前后相邻的样点为 $r(\tau_1)=r_1$ 和 $r(\tau_3)=r_3$, 则有

$$\begin{cases} r_1 = r(\tau_1) = A_r \cos \omega \tau_1 + B_r \sin \omega \tau_1 \\ r_2 = r(\tau_2) = A_r \cos \omega \tau_2 + B_r \sin \omega \tau_2 \\ r_3 = r(\tau_3) = A_r \cos \omega \tau_3 + B_r \sin \omega \tau_3 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可解出

$$\begin{cases} A_r = \frac{r_2 \sin \omega \tau_1 - r_1 \sin \omega \tau_2}{\sin[\omega(\tau_1 - \tau_2)]} \\ B_r = \frac{r_1 \cos \omega \tau_2 - r_2 \cos \omega \tau_1}{\sin[\omega(\tau_1 - \tau_2)]} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 整理后得

$$r_3 \sin[\omega(\tau_1 - \tau_2)] = r_2 \sin[\omega(\tau_1 - \tau_3)] - r_1 \sin[\omega(\tau_2 - \tau_3)] \quad (8)$$

因为 $\tau_2 - \tau_1 = \tau_3 - \tau_2 = T_s$, T_s 为采样周期, 故式(8)可改写为

$$\begin{aligned} r_3 \sin \omega T_s &= r_2 \sin 2\omega T_s - r_1 \sin \omega T_s = \\ &= 2r_2 \sin \omega T_s \cos \omega T_s - r_1 \sin \omega T_s \end{aligned} \quad (9)$$

求解式(9), 得到

$$\cos \omega T_s = \frac{r_1 + r_3}{2r_2} \quad (10)$$

由此估计出相关器输出信号的频率为

$$\hat{f} = \frac{1}{2\pi T_s} \arccos \left(\frac{r_1 + r_3}{2r_2} \right) \quad (11)$$

要求的实际峰值为 $r(t_0)=r_0$ 。因为当 $\omega t=k\pi+\phi$ (k 为非负的整数) 时, 式(7)取最大值, 所对应的时间即为所求的 t_0 , 故有

$$\hat{t}_0 = \frac{k\pi + \phi}{\omega} \quad (12)$$

又知 $t_0 \in (\tau_1, \tau_3)$, 故可得出 k 的取值范围为

$$\frac{\omega\tau_1 - \phi}{\pi} \leq k \leq \frac{\omega\tau_3 - \phi}{\pi} \quad (13)$$

通过以上诸式, 可估计出时延值 t_0 。

2.3 多项式拟合

时延 t_0 也可以通过多项式拟合的方法来获得, 利用峰值选择器得到一个最大值 $r(\tau_2)=r_2$, 在该样点前后相邻的样点为 $r(\tau_1)=r_1$ 和 $r(\tau_3)=r_3$, 采用多项式拟合法 $y=ax^2+bx+c$ 将这 3 个已知点做二阶拟合, 得到一条抛物线, 求取这条曲线的最大值 r_0' , 最大值对应的 t_0' 就是所要估计的时延值。

3 算法仿真

本文选用线性调频信号作为目标的定位信号。

3.1 仿真流程

四元阵被动定位的仿真流程图如图 4 所示。仿真流程主要由 4 个步骤组成: 第 1 步为四阵元结构对应的四路信号生成; 第 2 步为时延粗测, 包括相关和峰选两个模块; 第 3 步为曲线拟合, 精确时延差估计。分别选用余弦曲线拟合和多

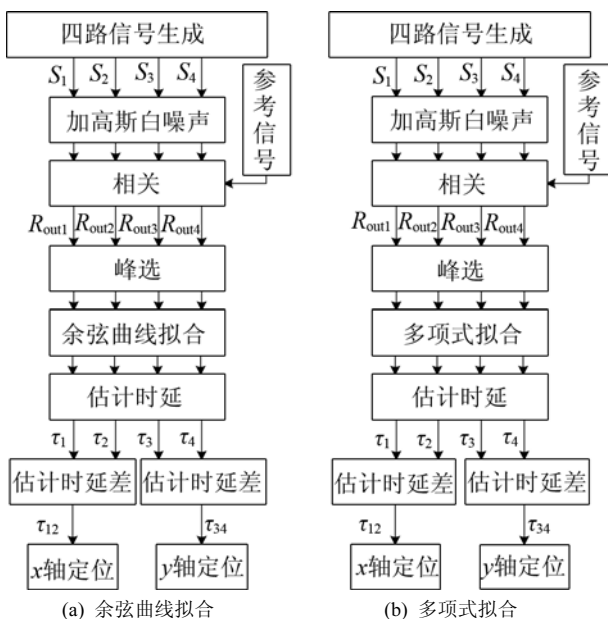


图 4 相关峰内插时延估计定位仿真流程图

Fig.4 Simulation flowchart of interpolating time-delay estimation in correlation peak

项式拟合, 对测得的相关峰做插值, 对应的拟合曲线为准余弦形式和抛物线形式, 得到较准确的时延值 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$; 第 4 步计算时延差 τ_{12}, τ_{34} , 再利用式(3)求解目标的坐标。

3.2 仿真实验

选择频率为 12~15 kHz 的线性调频信号作为定位目标的信号, 带宽 $B=3$ kHz, 采样频率 $f_s=200$ kHz。定位信号脉宽总长 $T=10$ ms, 背景噪声为限带高斯白噪声。预设目标 S 的斜距为 $R=8000$ m, S' 的坐标为(4000,4000)。设两阵元 1 和 2 的间距 $L=320$ mm, 水中声速为 $c=1500$ m/s。

3.2.1 仿真一: 平面定位解算

根据相关峰内插时延估计算法的原理, 分别在信噪比为 10 dB 和 15 dB 两种条件下, 用蒙特卡洛方法各自进行 500 次独立统计, 得到目标在水平面坐标内的定位点阵如图 5 和图 6 所示。其中 x 和 y 为以间距 $L=320$ mm 的阵元定位得到的水平面坐标, σ_{Lx}' 为以间距 $L=320$ mm 的阵元定位得到的 x 坐标的标准差。标准差 σ_{Lx}' 的计算公式为

$$\sigma_{Lx}' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2}{N}}$$

其中, x_i 为测量值, x_0 为目标位置投影到水平面上的 x 轴坐标值的均值, N 为统计次数。

对比图 5 和图 6, 可以看出, 10dB 信噪比条件下目标位置定位点偏差较大, 定位点阵分布比较分散, 15dB 信噪比条件下目标位置定位点偏差较小, 定位点阵分布比较集中。

经统计计算, 信噪比分别为 10 dB 和 15 dB 时定位的标准差 σ_{Lx}' 的值分别是 4.38 m 和 2.52 m。对于四元阵被动定位系统来说, 采用相关峰内插时延估计算法对时延差进行精测, 定位精度较高。

再根据相关峰多项式插值时延估计算法的原

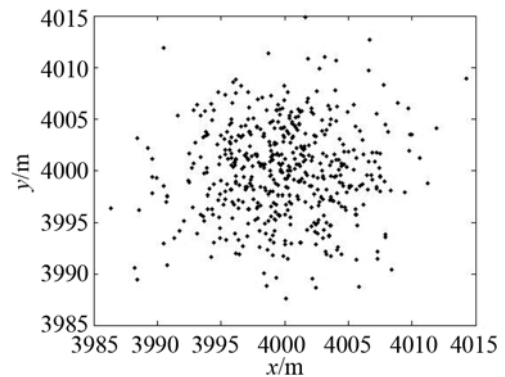


图 5 SNR 为 10dB 条件下 x 和 y 轴定位点阵(余弦曲线拟合)

Fig.5 Positioning points along x and y axis for SNR=10dB (Cosine fitting curve)

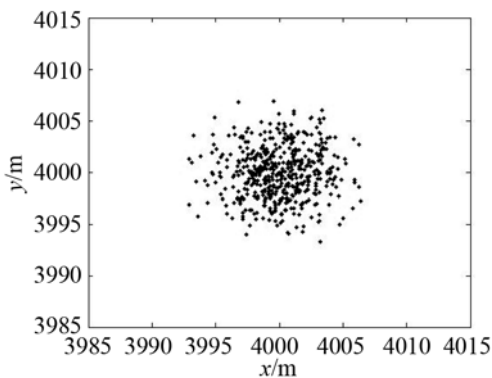


图 6 SNR 为 15dB 条件下 x 和 y 轴定位点阵(余弦曲线拟合)
Fig.6 Positioning points along x and y axis for SNR=15dB (Cosine fitting curve)

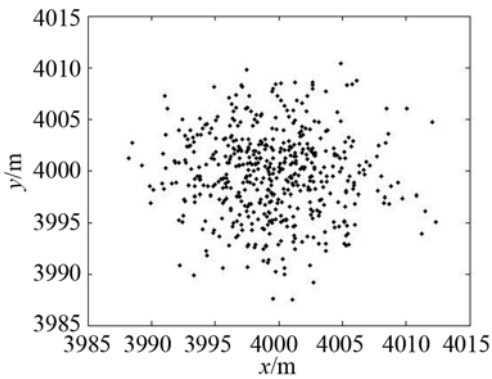


图 7 SNR 为 10dB 条件下 x 和 y 轴定位点阵(多项式拟合)
Fig.7 Positioning points along x and y axis for SNR=10dB (Polynomial fitting curve)

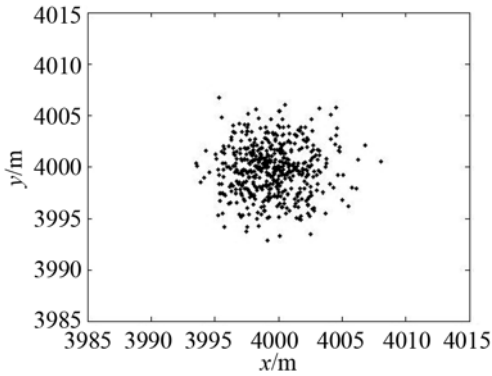


图 8 SNR 为 15dB 条件下 x 和 y 轴定位点阵(多项式拟合)
Fig.8 Positioning points along x and y axis for SNR=15dB (Polynomial fitting curve)

理, 在信噪比为 10 dB 和 15 dB 两种条件下, 也对样本点用蒙特卡洛方法各自做 500 次独立统计, 如图 7 和 8 所示。

经计算, 定位标准差 σ_{Lx}' 的值分别是 4.34m 和 2.44m。由此可见, 采用相关峰内插时延估计算法, 多项式拟合比余弦曲线拟合的结果稍好, 但多项式拟合运算量较大, 所需时间比较长。

3.2.2 仿真二: 不同阵元间距条件下定位误差比较

超短基线定位系统采用相关峰三点内插时延

估计算法, 在不同的阵元间距条件下, 用蒙特卡洛做 100 次独立统计, 得到的定位误差如表 1 所示, R 为斜距。

表 1 不同阵元间距条件下的定位误差值

Table 1 Positioning error for different array element separations								
L/mm	4	8	16	32	48	64	80	96
$\sigma_{Lx}/(\%R)$	2.51	1.24	0.63	0.36	0.21	0.16	0.11	0.09

表 1 说明随着阵元间距的加大, 定位误差在不断减小, 也就是说, 增大阵元间距, 超短基线定位系统相对于斜距的千分比标准差可以达到 0.09。

根据定位误差解算公式, 给定一个 L 值, 就可以求出 x 轴定位误差值 σ_{Lx} 。考虑到增大阵元间距, 会给四元阵被动定位系统的安装带来难度, 同时会增加成本, 所以折中这些因素, 选取最优的 L 值^[5-7]。

4 结 论

本文在四元阵被动定位结构中, 采用相关峰内插时延估计算法进行超短基线定位, 对余弦曲线拟合和多项式拟合两种方法作了比较。仿真证明, 定位精度较高, 两种拟合方法无明显差异, 定位误差随信噪比增大而减小, 随阵元间距增大而减小, 实现了超短基线定位系统是远距离高精度定位。

参 考 文 献

[1] 黄建人. 用于时延估计的一种相关峰内插算法[J]. 应用声学, 2006, 15(6): 33-36.
HUANG Jianren. An algorithm of interpolating time-delay estimation in correlation peak[J]. Applied Acoustics, 2006, 15(6): 33-36.

[2] 田坦. 水下定位与导航技术[M]. 国防工业出版社, 2007. 9.
TIAN Tan. Technique of underwater positioning and navigation[M]. National Defense Industry Press, 2007. 9.

[3] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006.
TIAN Tan, LIU Guozhi, SUN Dajun. Technique of sonar[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2006.

[4] 刘丽. 水下声通信技术研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2006.
LIU Li. Research on technique of underwater acoustic communication[D]. Harbin Engineering University, 2006.

[5] 仲祺祺, 毛卫宁. 双基阵被动定位位置估计算法研究[J]. 声学技术, 2003, 22(4): 269-272.
ZHONG Qiqi, MAO Weining. Analysis of algorithm for passive localization with duai arrays[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(4): 269-272.

[6] 庞学亮, 张效民. 任意四元非平面阵的定向性能分析[J]. 声学技术, 2005, 24(3): 160-163.
PANG Xueliang, ZHANG Xiaomin. Directional performance of four-elements arbitrary array[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(3): 160-163.

[7] 彭永镇, 曹岳海. 基于多基元的水下目标高精度测速方法[J]. 声学技术, 2008, 27(6): 832-834.
PENG Yongzhen, CAO Yuehai. A method high precision underwater target velocity measurement[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(6): 832-834.