

引用格式: 段江涛, 石建飞, 程俊, 等. 自适应时延估计在蛙人超短基线定位中的应用[J]. 声学技术, 2020, 39(4): 505-510. [DUAN Jiangtao, SHI Jianfei, CHENG Jun, et al. Application of adaptive time delay estimation in frogman USBL positioning[J]. Technical Acoustics, 39(4): 505-510.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.04.021

自适应时延估计在蛙人超短基线定位中的应用

段江涛¹, 石建飞¹, 程俊², 田甜¹, 李兆利¹

(1. 中国电子科技集团公司第三研究所, 北京 100015; 2. 中国科学院国家天文台, 北京 100101)

摘要: 蛙人超短基线(Ultra-Short Base Line, USBL)定位设备实现浅水环境下高精度定位的关键技术之一是精确的时延估计。由于自适应时延估计方法具备环境自适应能力强的特点, 文章将混合调制的拉格朗日直接时延估计方法应用于蛙人 USBL 定位时的高精度测向上, 它可以在信标信号中心频率已知的情况下将小数时延滤波器调制到信号中心频率处, 以较低的阶数提供更高的时延估计精度; 并根据 USBL 阵型和信号自身的特点, 对混合调制的拉格朗日直接时延估计在低信噪比下的具体使用模式进行了探讨和仿真验证; 结果显示, 所采用的自适应时延估计方法可以在中低信噪比下提供 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 的定位测向精度。

关键词: 超短基线; 自适应时延估计; 蛙人定位; 混合调制拉格朗日直接时延估计

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-04-0505-06

Application of adaptive time delay estimation in frogman USBL positioning

DUAN Jiangtao¹, SHI Jianfei¹, CHENG Jun², TIAN Tian¹, LI Zhaoli¹

(1. No.3 Research Institute of China Electronics Technology Group Company, Beijing 100015, China;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

Abstract: The accuracy of frogman Ultra-Short Base Line (USBL) positioning in shallow water largely depends on the direction finding accuracy of the array, which is determined by time delay estimation accuracy. Due to the robust environmental adaptability of adaptive time delay estimation method, the mixed modulated Lagrange explicit time delay estimation (MMLETDE) algorithm is applied to direction finding in frogman USBL positioning, which could modulate the decimal delay filter to the center frequency of beacon signal and provide higher time delay estimation accuracy with lower orders, when the center frequency of beacon signal is known. According to the USBL array geometry and the features of the array signals, the use of MMLETDE under low signal to noise ratio (SNR) is discussed and simulated, and the results show that the direction finding accuracy of $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ could be obtained under medium or low SNR.

Key words: Ultra-Short Base Line(USBL); adaptive time delay estimation; frogman location; mixed modulated Lagrange explicit time delay estimation (MMLETDE)

0 引言

蛙人或水下机器人在执行水下安防、打捞搜救等作业时, 为了进行有效的协同和指挥调度, 需要使用超短基线(Ultra-Short Base Line, USBL)定位设备实现高精度的测距及测向。蛙人定位设备包括微型声信标和 USBL 定位解算单元(蛙人定位腕表或船载定位终端)。微型声信标和定位腕表由蛙人佩戴, 为了防止身体对接收信号的遮挡,

蛙人定位腕表的 USBL 接收阵可以安装在潜水头盔的顶端。各定位设备下水前在近距离使用一定的同步机制进行信号同步, 同步之后每个声信标周期性地发射不同频率或编码的定位信号; 定位解算单元在相应的同步周期内接收声信标信号, 并根据时延差来不间断地计算不同蛙人间或蛙人和船载定位终端间的距离, 同时使用 USBL 测向算法测量蛙人之间或蛙人和船载定位终端间的方位角; 在蛙人端, 解算的方位信息可以通过腕表或目镜的方式显示。

蛙人 USBL 设备测距时, 可采用相关法进行时延量的全局粗测, 配合常规互谱法的局部精测。由于测量距离一般在几十到几百米, 而采样频率一般为信号载波频率(20 kHz 左右)的 3~6 倍, 因此在保证时间同步的准确性的前提下, 这种传统

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-05-19

基金项目: 国家重点研发计划公共安全项目(2017YFC0821200、2017YFC0821201)资助项目。

作者简介: 段江涛(1985-), 男, 河南荥阳人, 博士, 高级工程师, 研究方向为水声成像, 水声探测。

通讯作者: 段江涛, E-mail: duanjiangtaohr@163.com

的时延测量方法在典型信噪比下,其提供的 $0.1 T_s$ (T_s 为采样间隔)量级的时延估计精度即可达到较高的测距精度。目前蛙人 USBL 高精度定位的问题是测向精度和测向稳健性不足,而对于窄带和宽带信号的测向问题,最终都可以归为高精度的时延估计^[1-2]。

由于蛙人主要工作在复杂的浅水环境,而自适应时延估计方法具备环境自适应能力强的特点。本文尝试将混合调制的拉格朗日直接时延估计方法应用于蛙人 USBL 定位时的高精度测向上,它可以在信标信号中心频率已知的情况下将小数时延滤波器调制到信号中心频率处,以较低的阶数提供更高的时延估计精度。考虑到实际使用中可能的中、低信噪比环境,本文将根据蛙人 USBL 阵型和信号自身的特点,对混合调制的拉格朗日直接时延估计方法的具体使用模式进行探讨和仿真验证。

1 基于自适应时延估计的蛙人 USBL 定位测向

1.1 蛙人 USBL 定位模型

对蛙人定位信标发射信号的接收可使用结构简单的三元平面接收阵来完成,如图 1 所示,阵元 0、1、2 成等边三角形排列,阵元 0 位于坐标原点作为参考阵元。阵元 1、2 与参考阵元 0 之间的距离为 d ,水中声速 c ;为了避免相位模糊, d 小于信号的半波长。

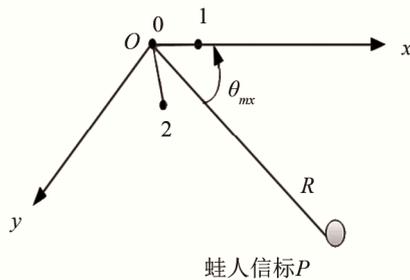


图 1 蛙人三元阵定位测向示意图

Fig.1 The sketch map of positioning and direction finding of frogman three-element USBL array

接收阵元 0 和阵元 1 接收到的信号可以表示为

$$\begin{cases} x_0(k) = s(k) + w_0(k) \\ x_1(k) = s(k - \tau) + w_1(k) \end{cases} \quad (1)$$

其中: k 为采样点的时刻, τ 为阵元 0 和 1 之间接收信号的时延; $s(k)$ 是蛙人定位信标发射的中心频率已知的窄带信号,噪声 $w_0(k)$ 与 $w_1(k)$ 分别是均值为 0、方差为 σ_0^2 、 σ_1^2 的高斯白噪声,且互不相关。

如图 1 所示,系统基阵的尺寸与斜距 R 相比很

小,因此可以认为是远场接收的情况,即由同一声信标发出、被基阵的 3 个阵元接收的声线是平行的。典型的远场信号入射角解算模型如图 2 所示。

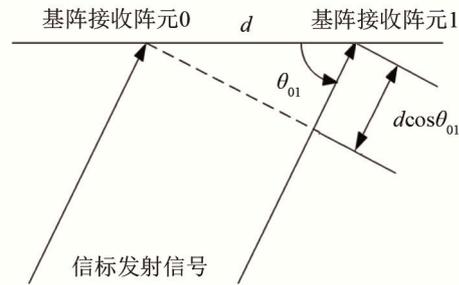


图 2 典型的远场信号入射角解算模型

Fig.2 Typical solution model of far-field signal's incident angle

阵元 0 和阵元 1 接收同一声信标发射的信号的时间差 τ_{01} 与信号入射角 θ_{01} 的关系为

$$\tau_{01} = \frac{d \cos \theta_{01}}{c} \quad (2)$$

用时延估计方法测出时间差 τ_{01} 之后,便可求得入射角 θ_{01} 。

接下来需要判定入射信号的入射方向。如图 1 所示,阵元 0 和阵元 1 位于 Ox 轴上,阵元 2 位于第四象限;根据时延 τ_{01} 的符号正负即可判断入射信号来自左半面还是右半面;不同于等腰直角三角形的阵型情况,判断入射信号来自上半面还是下半面,需要判断 τ_{02} 的数值范围,或者在阵元 0 和阵元 1 之间虚拟出一个阵元 3,其信号的输出为 $x_3(k) = [x_0(k) + x_1(k)]/2$,然后根据时延 τ_{23} 的符号正、负可判断入射信号来自上半面还是下半面,进而判断信号来自哪个象限,在 360° 范围内对测向角度进行标定。

1.2 自适应时延估计算法

自适应时延估计算法具有环境自适应能力强、需要的统计先验知识少等优点。最小均方误差 (Least Mean Square, LMS) 时延估计算法是一种基本的自适应时延估计算法,它使用 LMS 算法进行迭代,算法收敛时滤波器权系数将收敛为 sinc 函数的形式,其峰值位置就对应时延的估计值。最小均方误差时延 (LMS Time Delay Estimation, LMSTDE) 的结构如图 3 所示。

基于传统的 LMSTDE 算法,又发展出了一类带约束的时延估计方法,如直接时延估计 (Explicit Time Delay Estimation, ETDE)^[3]、直接时延和增益估计 (Explicit Time Delay and Gain Estimation, ETDGE)^[4] 等。其中 ETDE 将时延估计建模为一个 sinc 型的小数时延有限长单位冲激响应 (Finite Impulse Response, FIR) 滤波器权系数的估计,通过在自适应算法中直接对时延进行更新来获得非整数

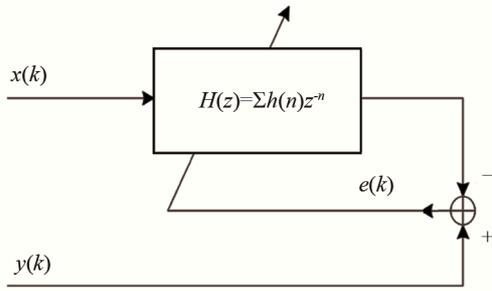


图 3 LMS 自适应时延估计算法框图
Fig.3 The block diagram of LMS adaptive time delay estimation algorithm

倍采样周期的时延估计，它减少了 LMSTDE 中对滤波器权系数的内插，具有计算量小、精度高等优点；但它在有限长滤波器或低信噪比的条件下被证明是一种有偏估计。ETDGE 通过加入一个增益控制，可以获得有限长滤波器下的无偏估计，但由于 sinc 型的小数时延 FIR 滤波器的通带波纹较大，ETDGE 对单频信号的估计精度并不理想^[5-7]。

混合调制的拉格朗日直接时延估计 (Mixed Modulation Lagrange Explicit Time Delay Estimation, MMLETDE)方法^[8-9]通过将 sinc 插值和拉格朗日插值相结合，对于带限信号，其时延估计精度高于 sinc 型小数时延滤波器。若带限信号的中心频率已知，可将小数时延滤波器调制到信号中心频率处，以较低的阶数提供更高的时延估计精度。

混合调制的拉格朗日直接时延估计方法的结构与图 3 相同，但滤波器系数的更新方式不同，其更新方程为^[9]

$$\begin{cases} e(k) = y(k) - \sum_{n=-M_1}^{M_2} h[n, \hat{D}(k)] x(k-n) \\ \hat{D}(k+1) = \hat{D}(k) - 2\mu \times \\ \quad \text{Re} \left\{ e^*(k) \sum_{n=-M_1}^{M_2} g[n - \hat{D}(k)] x(k-n) \right\} \end{cases} \quad (3)$$

其中： $h[n, \hat{D}(k)]$ 为拉格朗日 (Lagrange) 分数阶时延滤波器，表达式为

$$h(n, \hat{D}) = e^{j\omega_0(n-\hat{D})} \prod_{\substack{i=-M_1 \\ i \neq n}}^{M_2} \frac{\hat{D}-i}{n-i} \quad (4)$$

$g[n - \hat{D}(k)]$ 称为自适应因子，表达式为

$$\begin{cases} g[n - \hat{D}(k)] = e^{j\omega_0 n} \{ f[n - \hat{D}(k)] - j\omega_0 \text{sinc}[n - \hat{D}(k)] \} \\ f[n - \hat{D}(k)] = \frac{\partial \text{sinc}[n - \hat{D}(k)]}{\partial [n - \hat{D}(k)]} = \\ \quad - \frac{\cos[n - \hat{D}(k)] - \text{sinc}[n - \hat{D}(k)]}{n - \hat{D}(k)} \end{cases} \quad (5)$$

将 USBL 接收基阵的两路信号作为参考信号和时延信号输入，选取合适的收敛因子， $\hat{D}(k)$ 将逐渐收敛到两路信号时延的真值。为保证系统收敛， μ 应当满足：

$$-\frac{1}{2\sigma_x^2 \omega^2} < \mu < 0 \quad (6)$$

其中： σ_x^2 为输入信号的方差； ω 为输入信号的中心角频率。

为了排除阵型安装误差、声速误差及声线弯曲、电路附加相位和电路噪声的影响，以下采用仿真信号来评估相应自适应时延估计算法下蛙人 USBL 定位测向的精度。

在信号中心频率为 22 kHz，采样频率为 100 kHz，阵元间距 d 略小于半波长，为 $(c/f_0)/2.2$ ，信号窗长为 80 个采样点，信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 为 20 dB 时 (加入典型的加性高斯白噪声) 使用 MMLETDE 算法进行仿真，迭代次数为 45，收敛因子 μ 取 -0.08。

采用上述仿真条件，当信号垂直于 0、1 两阵元连线以 90° 入射时，仿真结果如图 4 所示。由图 4 可知，测得的时延估计值为 $0.0053 T_s$ (平稳段取均值)，对应的测向结果为 89.87°；即当信噪比较高 (大于 20 dB) 时，混合调制的拉格朗日直接时延估计方法可以提供 $0.001 T_s$ 量级的时延估计精度，相应可提供优于 1° 的测向精度。当信噪比降低 (低于 15 dB) 时，混合调制的拉格朗日直接时延估计方法性能下降，测向结果变差。

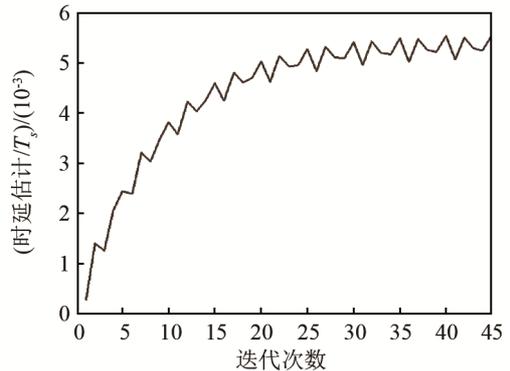


图 4 SNR=20 dB、信号垂直入射时的时延估计曲线
Fig.4 Adaptive time delay estimation curve for the vertically incident signal with SNR=20 dB

蛙人 USBL 信标的实际的发射声源级可达到 172 dB 以上，系统工作频率对应的海水的吸收系数约 $4.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ ，可得 500 m 处的传播损失约为 56.3 dB。工作环境为水下 2~10 m，三级海况下工作频带内的环境噪声约为 72 dB，据此可估算得到典型环境工作时，蛙人 USBL 基阵的接收信

号的理论信噪比可达 20~30 dB。但若蛙人端的接收阵以腕表形式灵活佩戴时,会对接收信号产生一定的遮挡;同时为了降低对发射信标声源级的要求,本文将采取两种途径实现中低信噪比(10~20 dB)下的 MMLETDE 高精度时延估计及 USBL 测向。

2 中低信噪比下的自适应时延方法的应用

2.1 考虑抑制噪声情况

第一种思路是尽可能地抑制信号携带的加性高斯噪声。常用的思路有基于高阶累积量的方法来消除高斯噪声,但计算略复杂。本文使用基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的窄带滤波方法,实现较为简单,虽然不能完全去除高斯噪声,但通过对自适应参数的优化,可以满足所需的测向精度要求。

窄带滤波方法为:

(1) 对阵元的接收信号进行 FFT 变换,找到最大的频率值 f_{\max} ;

(2) 根据工作环境和测距结果设定门限因子 r_{Th} 。信噪比越低、测距结果越远,门限因子越小,中低信噪比下 r_{Th} 典型值为 3~6;

(3) 将小于 f_{\max}/r_{Th} 的频点置零后,变换回时域。

仿真中发现,当两路信号的时延差较大时,测向误差会增大。这是由于入射角远离 90°时,角度解算模型对时延估计精度的要求愈发苛刻。另外当 SNR 为正并且阵元间距小于半波长布阵时,两路信号时延差越小,其相似性也越大。此时噪声对其相似性的破坏影响越小,从而当自适应时延的滤波器阶数有限长时,容易稳定地趋于真值附近,实际的仿真验证了这一点。因此当 τ_{01} 大于一定角度如 55°(多次试验统计得到)对应的时延值时,可以将由 τ_{01} 直接求 θ_{01} 转化为通过 τ_{02} 来求解 θ_{02} ,再利用阵型的几何关系求出 θ_{01} 。采用以上处理策略后,得到的中低信噪比下的测向仿真结果如图 5~7 所示。

从图 5~7 中的仿真结果可以看出,当信噪比从 20~10 dB 变化时,经过窄带滤波后,采用 MMLETDE 自适应时延估计的蛙人 USBL 定位测向精度约为 1.5°~4°。

2.2 对自适应时延估计算法进行修正

另一种思路是考虑存在不相关噪声时,对原始的 MMLETDE 自适应时延估计算法进行适当的修正。

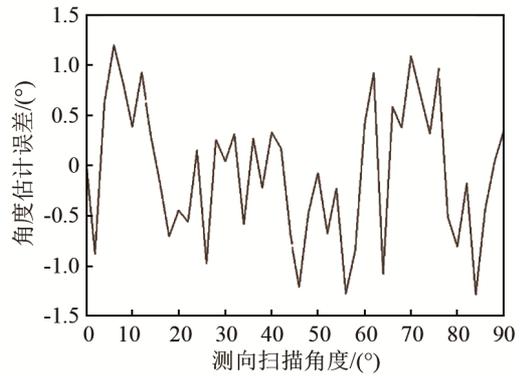


图 5 SNR=20 dB 时的自适应时延估计法测向误差
Fig.5 Direction finding error of adaptive time delay estimation with SNR=20 dB

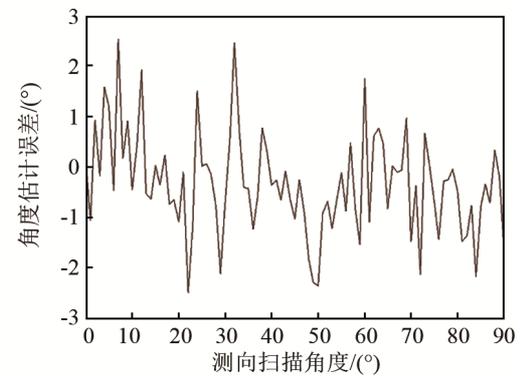


图 6 SNR=15 dB 时的自适应时延估计法测向误差
Fig.6 Direction finding error of adaptive time delay estimation with SNR=15 dB

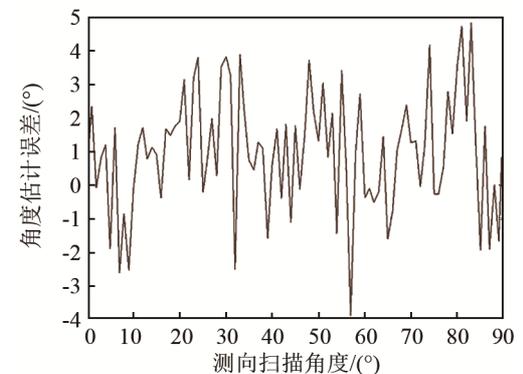


图 7 SNR=10 dB 时的自适应时延估计法测向误差
Fig.7 Direction finding error of adaptive time delay estimation with SNR=10dB

将式(1)代入原始的 MMLETDE 的输出误差函数,可得:

$$e(k) = x_1(k) - \sum_{n=-M_1}^{M_2} h(n, \hat{D}) x_0(k-n) \quad (7)$$

可得其均方误差函数为

$$E(|e^2(k)|) = E \left\{ \left[\sum_{n=-M_1}^{M_2} h(n, D) s(k-n) + w_2(k) - \sum_{n=-M_1}^{M_2} h(n, \hat{D}) [s(k-n) + w_1(k-n)] \right]^2 \right\} \quad (8)$$

其中，信号 $s(k)$ 与噪声 $w_0(k)$ 、 $w_1(k)$ 互相统计独立， $w_0(k)$ 、 $w_1(k)$ 彼此不相关，并满足 $E[w(k)]=0$ 。对于蛙人 USBL 定位接收系统，典型工作场景为远场情况，此时 $x_0(k)$ 和 $x_1(k)$ 是接收平行入射信号 $s(k)$ 叠加极相近区域的高斯噪声得到，两者之间只相差 0~2 个采样时间；当两路信号的采样点数较多时，可以认为噪声功率比 $\gamma = \sigma_1^2 / \sigma_2^2 \approx 1$ ，则：

$$E(|e^2(k)|) = E \left\{ \left| \sum_{n=-M_1}^{M_2} [h(n, D) - h(n, \hat{D})] s(k-n) \right|^2 \right\} + \sigma_0^2(k) \left[\gamma + \sum_{n=-M_1}^{M_2} |h(n, \hat{D})|^2 \right] \quad (9)$$

利用无偏冲击响应估计方法，得到调整后的均方误差函数

$$E(|\zeta^2(k)|) = \frac{E(|e^2(k)|)}{\gamma + \sum_{n=-M_1}^{M_2} |h(n, \hat{D})|^2} \quad (10)$$

其瞬时误差为

$$|\zeta^2(k)| = \frac{|e^2(k)|}{\gamma + \sum_{n=-M_1}^{M_2} |h(n, \hat{D})|^2} \quad (11)$$

使用该瞬时误差对时延估计值更新，有：

$$\hat{D}(k+1) = \hat{D}(k) - \mu \left[\gamma + \sum_{n=-M_1}^{M_2} |h(n, \hat{D})|^2 \right] \frac{\partial |\zeta^2(k)|}{\partial \hat{D}(k)} \quad (12)$$

对于蛙人 USBL 定位接收系统，典型工作场景为远场情况，此时 $x_0(k)$ 和 $x_1(k)$ 是接收平行入射的 $s(k)$ 叠加其相近区域的高斯噪声得到，两者之间只相差 0~2 个采样时间；当两路信号的采样点数较多时，可以认为噪声功率比 $\gamma = \sigma_1^2 / \sigma_2^2 \approx 1$ ，最终得到存在噪声时的时延估计的更新方程为

$$\begin{aligned} \hat{D}(k+1) &= \hat{D}(k) - \\ & 2\mu \operatorname{Re} \left\{ e^*(k) \sum_{n=-M_1}^{M_2} g[n - \hat{D}(k)] x(k-n) \right\} - \\ & 2\mu \operatorname{Re} \left\{ \frac{|e(k)|^2 \sum_{n=-M_1}^{M_2} [h(n, \hat{D})]^* g[n - \hat{D}(k)]}{1 + \sum_{n=-M_1}^{M_2} |h(n, \hat{D})|^2} \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

仿真参数同 2.1 节中，为了尽可能减少滤波器阶数，信号处理前经过带通滤波(实际设备中一般由硬件前端采集部分完成)；另外，为了更好地满足 $\gamma \approx 1$ 的条件，可将信号窗长略微增加，此处取 100 个采样点；中低信噪比下对修正后的 MMLETDE 进行仿真，得到的仿真结果如图 8~10 所示。

由图 8~10 可见，经过修正后的 MMLETDE 性能比第一种方法略高，可以在中低信噪比下提供

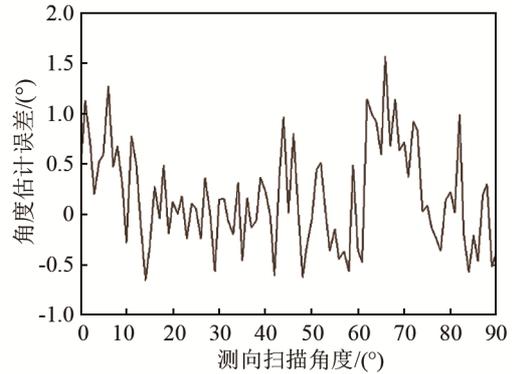


图 8 SNR=20 dB 时修正的自适应时延估计法测向误差
Fig.8 Direction finding error of the modified adaptive time delay estimation when SNR=20 dB

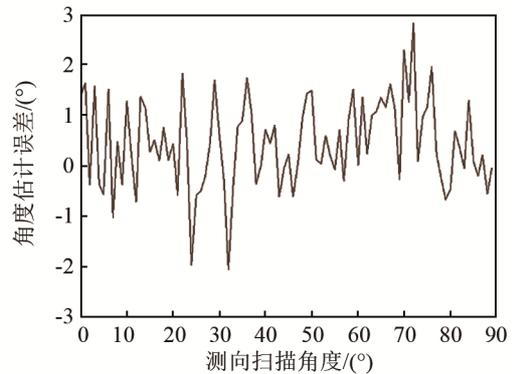


图 9 SNR=15 dB 时修正的自适应时延估计法测向误差
Fig.9 Direction finding error of the modified adaptive time delay estimation when SNR=15 dB

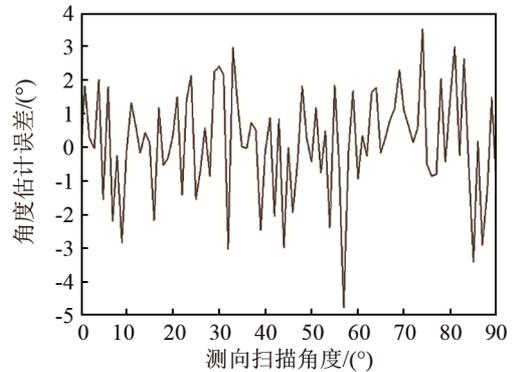


图 10 SNR=10 dB 时修正的自适应时延估计法测向误差
Fig.10 Direction finding error of the modified adaptive time delay estimation when SNR=10 dB

1°~3°的测向精度，能够满足蛙人 USBL 的典型定位测向精度要求。

3 结论

本文将混合调制的拉格朗日直接时延估计方法应用于蛙人 USBL 定位时的高精度测向中，并根据 USBL 的阵型和信号自身的特点，探讨了混合调制的拉格朗日直接时延估计在蛙人 USBL 中低信噪

比定位测向时的具体使用方法。结果显示,所采用的自适应时延估计方法在中低信噪比下可以达到 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 的测向精度。

参 考 文 献

- [1] 田坦. 水下定位与导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
TIAN Tan. Underwater positioning and navigation technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [2] 行鸿彦, 唐娟. 时延估计方法的分析[J]. 声学技术, 2008, 27(1): 110-114.
XING Hongyan, TANG Juan. Analysis and survey of algorithms for time-delay estimation[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(1): 110-114.
- [3] SO H C, CHING P C, CHAN Y T. A new algorithm for explicit adaptation of time delay[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(7): 1816-1820.
- [4] SO H C, CHING P C, CHAN Y T. An improvement to the explicit time delay estimator[C]//1995 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1995(ICASSP-95), Detroit, MI, 1995: 3151-3154.
- [5] YOUN D H, AHMED A, CATER G C. An adaptive approach for time delay estimation of band-limited signals[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1983, 31(3): 780-784.
- [6] YOUN D H, AHMED A, CATER G C. A method for generating a class of time-delayed signals[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, (ICASSP '81), Atlanta, Georgia, Apr 1981: 1257-1260.
- [7] CHAN Y T, RILEY J, PLANT J B. Modeling of time delay and its application to estimation of nonstationary delays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1981, 29(3): 577-581.
- [8] DOOLEY S R, NANDI A K. Adaptive subsample time delay estimation using Lagrange interpolators[J]. Signal Processing Letters, 1999, 6(3): 65-67.
- [9] ZHENG Cheng, Tjeng Thiang Tjhung. A new time delay estimator based on ETDE[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(7): 1859-1869.