

基于同态滤波技术的水下目标运动参数估计

王燕^{1,2}, 邹男^{1,2}, 付进^{1,2}, 梁国龙^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对测量平台空间有限条件下的近场目标运动分析问题, 提出了一种基于浅海射线声学多途结构的单水听器水下目标运动分析(TMA)方法。通过构建匀速直线运动目标的三维多途时延模型, 推导了以运动参数为变量的直达声和海面一次反射声时延差的非线性函数表达式; 根据典型水声信道特征, 推导了信道的倒谱表达式, 进而利用同态滤波技术解卷积能力估计直达声和海面一次反射声时延差; 结合 Levenberg-Marquardt 方法求解非线性方程的最优解; 最后提出二次逼近校正方法, 降低了实际水文条件对参数估计的影响。仿真结果证明了方法的正确性, 参数估计精度满足实际应用需求。

关键词: 声学; 同态滤波; 多途时延模型; 倒谱; 二次逼近; 目标运动分析

中图分类号: TB566 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2014)07-1045-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.07.017

Estimation of Underwater Target Motion Parameters Based on Homomorphic Filtering

WANG Yan^{1,2}, ZOU Nan^{1,2}, FU Jin^{1,2}, LIANG Guo-long^{1,2}

(1. Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University,
Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: The analysis of target motion in near field is difficult when the space of measurement platform is limited. A novel underwater target motion analysis (TMA) method is proposed based on the multipath structure of the ray acoustics in shallow water. A three-dimensional multipath time delay model of target in uniform speed rectilinear movement is established. The nonlinear function expression of time delay between direct sound and surface reflected sound is derived by taking the movement parameter as a variable. Based on the characteristics of typical underwater acoustic channel, the expression of channel in cepstrum domain is achieved. Then the time delay between direct sound and surface reflected sound is estimated by the homomorphic filtering technique with the ability of deconvolution. The optimal solution of the nonlinear equation is solved by combining with Levenberg-Marquardt method. The quadratic approximation correction method is proposed to decrease the influence of actual hydrological condition on parameter estimation. The simulation results show that the proposed method is practicable, and the estimation precision meets the demand of practical application.

收稿日期: 2013-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279043, 51209059, 61201411); 国家“863”计划项目(2013AA09A503); 水声技术国家级重点实验室基金项目(9140C200203110C2003); 黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划项目(1253G019)

作者简介: 王燕(1973—), 女, 教授, 博士生导师。E-mail: wangyan@hrbeu.edu.cn;

邹男(1986—), 女, 博士研究生。E-mail: feinanyan@aliyun.com

Key words: acoustics; homomorphic filtering; multipath time delay model; cepstrum; quadratic approximation; target motion analysis

0 引言

水下目标运动分析(TMA)在水下目标的研发和监测中占据重要地位。在平台空间有限的应用场合,利用单水听器的目标运动参数估计技术受到国内外同行较多的关注^[1]。文献[2]提出了一种基于信赖域最优的多普勒被动测距方法,解决了单水听器被动测距问题;文献[3]在浅海射线声场的双偶极子模型之上,利用运动目标的低频矢量宽带干涉谱估计目标运动参数。近程浅海的多途特征清晰,为了利用这一信息,许多学者展开了研究^[4-5]。文献[6]利用界面引起的干涉图案之间的关系测量目标水平和垂直距离。文献[7]则分析了多途时延法、球面交汇法等定位方法的精度,虽然多途时延法较球面交汇法误差大,但前者可利用单阵元进行定位,湿端结构简单,实际应用更加方便。上述方法均基于二维空间模型,仅用单水听器时的测距精度低,且未考虑声速梯度的影响。

同态滤波技术^[8-9]是一种有效的信道解卷积技术,且信道倒谱域特征清晰。本文首先建立了匀速直线运动目标的三维多途时延结构模型,推导了直达声与海面一次反射声时延差的参数估计方程,和水声信道的倒谱表达式,在倒谱域提取信道时延和相位信息,用 Levenberg-Marquardt 优化方法逼近目标运动参数。为了适用于实际水文环境,提出了二次逼近参数校正方法,并通过了实际水文数据的验证。实现了单水听器高精度的目标运动参数分析方法。

1 运动目标多途时延模型

在直角坐标系下建立三维运动目标多途时延模型,如图 1 所示。以水听器海面投影 O 为坐标原点, x 轴沿水平方向指向 C 点(运动轨迹上距水听器的最近点), $x-y$ 构成水平面, z 轴沿垂直方向指向海底。水听器深度 h_r ,近场目标 T 在 h_l 深度上沿 y 轴反方向以速度 v 做匀速直线运动, C 点到水听器的水平距离为 d 。用 t' 表示目标辐射脉冲信号的时刻, $R_d(t')$ 表示直达声声程, $R_r(t')$ 表示海面一次反射声声程, $R(t')$ 表示到达 O 点的声程。

采用准平稳近似法获得多途时延的时间变换。设声速为 c , t' 时刻目标在某一固定位置,经过信号

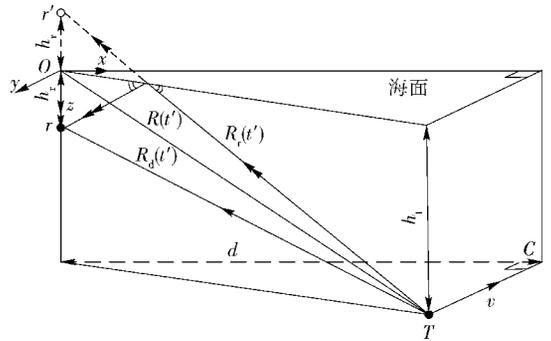


图 1 运动目标多途时延模型

Fig. 1 Time delay model of moving target

传播时延,在之后的某时刻 $t(t > t')$ 获得海面一次反射声与直达声时延差 $\tau(t)$,根据虚源法计算:

$$\tau(t) = (R_r(t') - R_d(t'))/c. \quad (1)$$

将时刻 t' 与 t 的关系定义为:时刻 t' 发出的信号在时刻 t 到达 O 点,即

$$t = t' + R(t')/c. \quad (2)$$

2 目标运动参数估计方法

2.1 多途时延差估计

设目标发射信号为 $s(t)$,信道冲激响应函数为 $h(t)$,加性噪声 $n(t)$,对应的傅里叶变换分别用 $S(j\omega)$ 、 $H(j\omega)$ 和 $N(j\omega)$ 表示,则接收信号的倒谱如(3)式所示^[10-11]。

$$\begin{aligned} \hat{C}(t) = F^{-1} \{ \ln |F[s(t) * h(t) + n(t)]|^2 \} = \\ F^{-1} \{ \ln |S(j\omega)|^2 \} + F^{-1} \{ \ln |H(j\omega)|^2 \} + \\ F^{-1} \left\{ \ln \left(\left| 1 + \frac{N(j\omega)}{S(j\omega)H(j\omega)} \right|^2 \right) \right\} \approx \\ \hat{C}_s(t) + \hat{C}_h(t), \end{aligned} \quad (3)$$

式中: F 、 F^{-1} 分别表示傅里叶正、反变换; \hat{C}_s 、 \hat{C}_h 分别表示原始信号和信道冲激响应的倒谱。当信噪比足够高,(3)式中 $\ln \left(\left| 1 + \frac{N(j\omega)}{S(j\omega)H(j\omega)} \right|^2 \right) \approx 0$,接收信号倒谱可近似表示为发射信号倒谱与信道冲激响应倒谱的和。

若只考虑直达声和海面、海底一次反射声,设冲激响应:

$$h(t) = \delta(t) + a_0\delta(t-t_0) + a_1\delta(t-t_1), \quad (4)$$

式中: a_0 、 a_1 和 t_0 、 t_1 分别表示海面、海底一次反射声系数和时延。可推导出信道冲激响应倒谱如(5)式所示。

$$\hat{C}_h(t) = F^{-1} [\ln(|F(h(t))|^2)] = F^{-1} \left[\ln(1 + a_0^2 + a_1^2) + \ln \left(1 + \frac{2a_0 \cos(\omega t_0) + 2a_1 \cos(\omega t_1) + 2a_0 a_1 \cos(\omega(t_0 - t_1))}{1 + a_0^2 + a_1^2} \right) \right]. \quad (5)$$

若信道冲激响应参数满足:

$$\left| \frac{2a_0 \cos(\omega t_0) + 2a_1 \cos(\omega t_1) + 2a_0 a_1 \cos(\omega(t_0 - t_1))}{1 + a_0^2 + a_1^2} \right| < 1, \quad (6)$$

设 $1 + a_0^2 + a_1^2 = a$, 则可推出(7)式:

$$\hat{C}_h(t) = F^{-1} \left[\ln a + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{m} \left(\frac{2a_0 \cos(\omega t_0) + 2a_1 \cos(\omega t_1) + 2a_0 a_1 \cos(\omega(t_0 - t_1))}{a} \right)^m \right] = F^{-1} \left[\ln a + \frac{2a_0 \cos(\omega t_0) + 2a_1 \cos(\omega t_1) + 2a_0 a_1 \cos(\omega(t_0 - t_1))}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{2a_0 \cos(\omega t_0) + 2a_1 \cos(\omega t_1) + 2a_0 a_1 \cos(\omega(t_0 - t_1))}{a} \right)^2 + \dots \right] \approx F^{-1} \left[\ln a + \frac{2a_0 \cos(\omega t_0) + 2a_1 \cos(\omega t_1) + 2a_0 a_1 \cos(\omega(t_0 - t_1))}{a} \right] = \ln a \delta(t) + \frac{1}{a} [a_0 \delta(t \pm t_0) + a_1 \delta(t \pm t_1) + a_0 a_1 \delta(t \pm (t_0 - t_1))]. \quad (7)$$

由(7)式可见,接收信号的倒谱在时延 t_0 、 t_1 和 $t_0 - t_1$ 处会出现尖峰。文献[12]研究了声波从水中入射到不同流体介质时的反射系数,并证明了利用接收信号的相位可以分辨海面 and 海底反射。因此,本文利用(7)式中尖峰幅度大小和极性区分海面和海底反射。多途信息在倒谱域以 $\delta(t)$ 函数的形式出现,不受信号时间分辨力的影响。另外,信号的倒谱分布在低时段,与信道倒谱分离,因此可估计得到多途时延差。

以线性调频(LFM)信号为例,脉宽 64 ms,图2为信号、信道冲激响应、接收信号的时域和倒谱域波形。

由图2可见,实数序列的倒谱关于零点对称;信号的倒谱在低时段和信号脉宽处出现尖峰;信道冲激响应海面反射声时延 0.040 25 s,海底反射声时延 0.075 5 s,根据(7)式,倒谱应该在 0 s、 $\pm 0.040 25$ s、 $\pm 0.075 5$ s 和 $\pm 0.035 25$ s 处出现尖峰,与图2结果吻合;接收信号倒谱等于信号倒谱与信道冲激响应倒谱的叠加;除低时段和信号脉宽处的确定性尖峰外,负极性最大尖峰的位置对应着海面反射声时延。

2.2 运动参数模型及求解

根据多途时延模型,可推导出海面一次反射和

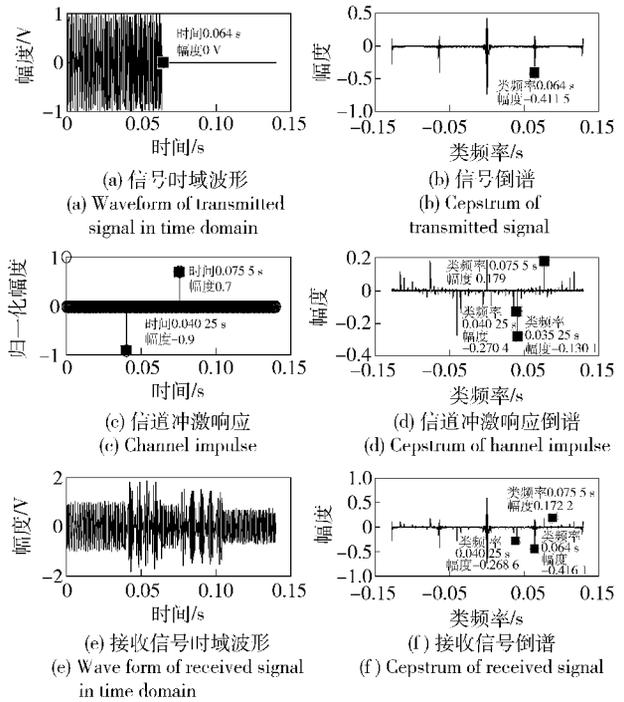


图2 信号、信道冲激响应、接收信号时域和倒谱域波形
Fig.2 The waveforms of signal and channel impulse and the received signals in time and cepstrum domains

直达声时延差 $\tau(t)$ 与目标速度 v 、航行深度 h_t 、到达 C 点时刻 t'_c 和水平距离 d 的数学关系表达式:

$$R_d(t') = \sqrt{v^2 |t' - t'_c|^2 + d^2 + (h_t - h_r)^2}, \quad (8)$$

$$R_r(t') = \sqrt{v^2 |t' - t'_c|^2 + d^2 + (h_t + h_r)^2}. \quad (9)$$

当收发距离足够远, $2R(t') \approx R_r(t') + R_d(t')$, 则根据(1)式得

$$\tau(t) = \frac{2h_t h_r}{cR(t')}, \quad (10)$$

式中:

$$R(t') = \sqrt{v^2 |t' - t'_c|^2 + d^2 + h_t^2}. \quad (11)$$

将(11)式代入(2)式,可解出:

$$t' = t'_c + \frac{c^2(t - t'_c) - \Psi}{c^2 - v^2}, \quad (12)$$

式中: $\Psi = \sqrt{(h_t^2 + d^2)(c^2 - v^2) + v^2 c^2 (t - t'_c)^2}$.

由(2)式和(12)式得

$$R(t') = \frac{c}{c^2 - v^2} [\Psi - v^2 (t - t'_c)]. \quad (13)$$

将(13)式代入(10)式得

$$\tau(t) = \frac{2(\alpha^2 - \beta^2)/\alpha^2}{\sqrt{\gamma^2(\alpha^2 - \beta^2) + \eta^2 \alpha^2 (t - t'_c)^2 - \beta \eta (t - t'_c)}}, \quad (14)$$

式中: $\alpha = c/h_r$; $\beta = v/h_t$; $\eta = v/h_t$; $\gamma = \sqrt{1 + (d/h_t)^2}$.

当 $d \neq 0$ 时, 将 $2R(t')$ 近似为 $R_r(t') + R_d(t')$, 在 C 点及 C 点附近的近似误差较大, 而时延 $\tau(t)$ 恰在 C 点出现极大值, 影响算法精度, 因此将 (14) 式写成倒数 $D(t)$ 形式:

$$D(t) = \frac{\sqrt{\gamma^2(\alpha^2 - \beta^2) + \eta^2\alpha^2(t - t'_c)^2} - \beta\eta(t - t'_c)}{2(\alpha^2 - \beta^2)/\alpha^2}. \quad (15)$$

采用同态滤波技术估计完整运动过程的时延, 取 $\tau(t)$ 的倒数组成向量 $\hat{D} = [D(t_0), D(t_1), \dots, D(t_{m-1})]^T$, m 为脉冲个数, 在误差平方和最小准则下, 将 (15) 式所示的参数求解问题转化为非线性最小二乘 (NLS) 问题, 采用 Levenberg-Marquardt 最优方法^[13]对 NLS 问题求解, 用 $\mathbf{p}_k = [\beta_k, \eta_k, t'_{ck}, \gamma_k]$ 表示第 k 次迭代得到的参数向量, Levenberg-Marquardt 算法步骤如下:

1) 初始化各参数, 包括参数向量 $\mathbf{p}_0 = [\beta_0, \eta_0, t'_{c0}, \gamma_0]$, 终止系数 $0 < \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \ll 1$, 步长控制量 λ 和参数向量取值范围;

2) 将 \mathbf{p}_0 代入 (15) 式计算函数输出向量 $\hat{D}(\mathbf{p}_0)$;

3) 计算 $m \times 4$ 维 Jacobian 矩阵 \mathbf{J} :

$$J_{i,j} = \frac{\partial \hat{D}_i}{\partial p_j} = \frac{\hat{D}_i(\mathbf{p}_0 + \delta \mathbf{p}_{0,j}) - \hat{D}_i(\mathbf{p}_0)}{\|\delta \mathbf{p}_{0,j}\|}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, 4; \quad (16)$$

式中: $\delta \mathbf{p}_{0,j} = \varepsilon_2(1 + |p_{0,j}|)$, $p_{0,j}$ 表示 \mathbf{p}_0 的第 j 个参数; $\hat{D}_i(\mathbf{p}_0)$ 表示 $\hat{D}(\mathbf{p}_0)$ 的第 i 个元素;

4) 计算 \mathbf{p}_0 的 χ^2 吻合度:

$$\chi^2(\mathbf{p}_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\hat{D}_i - \hat{D}_i(\mathbf{p}_0)}{w_i} \right]^2, \quad (17)$$

式中: \hat{D}_i 表示同态滤波所得时延倒数向量 \hat{D} 的第 i

个元素, $w_i^2 = \frac{1}{m-4+1} \hat{D}^T \hat{D}$, $\forall i$;

5) 计算参数更新向量 $\Delta \mathbf{p}$:

$$\Delta \mathbf{p} = [\mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{J} + \lambda \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{J})]^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{W} (\hat{D} - \hat{D}(\mathbf{p}_0)), \quad (18)$$

式中: \mathbf{W} 为以 w_i 为对角元素的对角阵; 令 $\mathbf{p}'_0 = \mathbf{p}_0 + \Delta \mathbf{p}$, 计算 $\chi^2(\mathbf{p}'_0)$;

6) 若满足:

$$\chi^2(\mathbf{p}_0) - \chi^2(\mathbf{p}'_0) > \varepsilon_3 \Delta \mathbf{p}^T (\lambda \Delta \mathbf{p} + \mathbf{J}^T \mathbf{W} (\hat{D} - \hat{D}(\mathbf{p}'_0))), \quad (19)$$

则 $\mathbf{p}_1 = \mathbf{p}'_0$, 且 $\lambda = \lambda/\mu_1$, 否则 $\lambda = \mu_2 \lambda$, 重复步骤 5 和 6, 直至满足 (19) 式, 完成一次迭代, 其中 μ_1, μ_2 为步长控制量 λ 的缩放系数, 通常取 10 左右;

7) 若满足 (20) 式所示某一条收敛条件, 算法

终止, 否则将 \mathbf{p}_1 代入 (15) 式, 重复步骤 2 至 6, 直至满足某收敛条件, Levenberg-Marquardt 算法终止。

$$\begin{cases} \max |J^T W (\hat{D} - \hat{D}(\mathbf{p}_k))| < \varepsilon_1, \\ \max (|\Delta p_{k,j}/p_{k,j}|) < \varepsilon_2, \\ \chi^2(\mathbf{p}_k)/m < \varepsilon_3. \end{cases} \quad (20)$$

2.3 运动参数校正方法

采用 2.2 节的参数估计方法, 声速梯度对估计 h_t, t'_c, d 的影响较大, 而对估计 v 的影响较小。据此本文提出对时延差采用二次逼近方法来减小估计误差。在一次逼近后, 将估计得到的 v 作为已知, 并对 (15) 式中的 α 采用校正因子 k 加以修正, 则有

$$D(t) = \frac{\sqrt{\gamma^2((k\alpha)^2 - \beta^2) + \eta^2(k\alpha)^2(t - t'_c)^2} - \beta\eta(t - t'_c)}{2((k\alpha)^2 - \beta^2)/(k\alpha)^2}, \quad (21)$$

此时, 时延差化为 h_t, t'_c, d 和 k 的函数, 并采用较一次逼近更严格的收敛条件进行 Levenberg-Marquardt 二次逼近。

3 仿真与实验及分析

3.1 等声速分布条件下仿真及分析

仿真条件: 目标以 5 m/s 匀速直线运动, 由 (0 m, -1 000 m, 50 m) 点运动至 (0 m, 1 000 m, 50 m) 点, LFM 信号发射周期为 1 s, 信号中心频率 8 kHz, 带宽为 4 kHz, 脉宽 10 ms, 水听器位置 (0 m, 0 m, 10 m), 加入高斯噪声, 信噪比为 20 dB, 目标与接收水听器相对位置如图 3 所示。

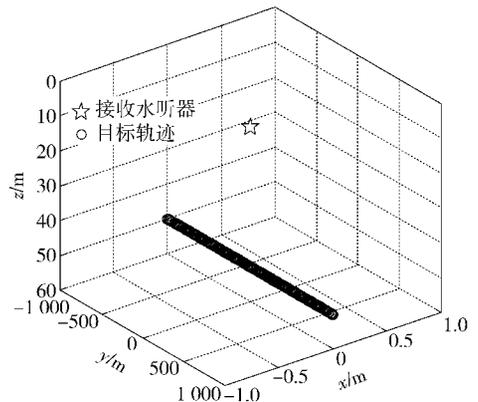


图 3 目标与接收水听器相对位置示意图

Fig. 3 Locations of target and receiving hydrophone

3.1.1 多途时延差估计

采用同态滤波技术, 对接收信号倒谱的低时部分作陷波, 得到信道冲激响应倒谱的时间历程图, 如

图 4 所示,色带表示倒谱幅度。根据(7)式提取直达声与海面一次反射时延差历程,对相关法和同态滤波法的时延差估计精度作对比,如图 5 所示,相关估计均方根误差为 0.069 3 ms,同态滤波估计均方根误差为 0.007 3 ms,可见,在多途环境下倒谱时延估计精度高于相关时延估计。

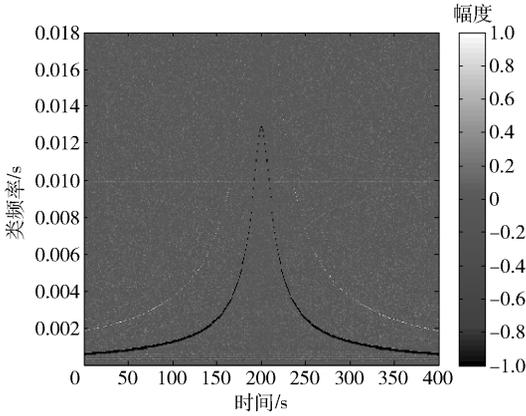


图 4 倒谱历程图

Fig. 4 History plot of cepstrum

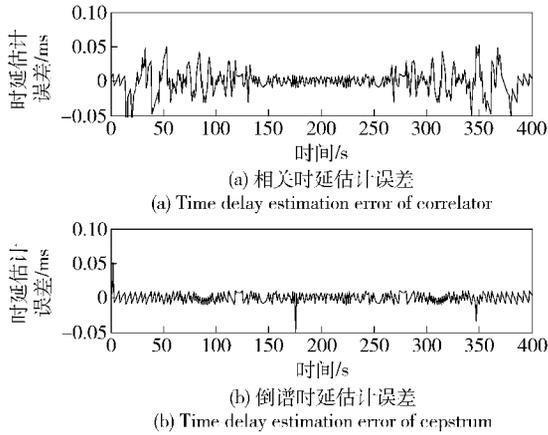


图 5 相关法与同态滤波法时延估计误差对比
Fig. 5 Comparison of delay estimation errors of correlation and homomorphic filtering

3.1.2 运动参数估计

表 1 所示为校正前后的目标运动参数估计结果,当声速恒定时,参数校正方法减小了 h_1 和 d 的估计误差。

水平距离 R_h 可表示为

$$R_h(t') = \sqrt{v^2(t' - t'_c)^2 + d^2}. \quad (22)$$

校正前后的水平距离估计结果及误差如图 6 所示。

距离估计误差可分为两种:一是 C 点附近距离估计误差,表现为 200 s 附近的误差尖峰,主要由 d

的估计误差产生;二是随距离增加而增大的误差,主要是由 v 和 t'_c 的估计误差随时间累积引起的。参数校正并不包括速度,因而只减小了第 1 种误差。仿真结果证明了方法的正确性,且在等声速条件下有较高的估计精度。

表 1 等声速分布条件下运动参数估计结果

Tab. 1 Motion parameter estimation results with constant sound velocity distribution

参数	预设值	校正前/后	Levenberg-	误差
			Marquardt 估计值	
$v/(m \cdot s^{-1})$	5	前	5.000 8	0.000 8
		后	5.000 8	0.000 8
h_1/m	50	前	49.975 2	0.024 8
		后	50.003 5	0.003 5
d/m	0	前	4.625 0	4.625 0
		后	0	0
t'_c/s		前	199.348 7	
		后	199.349 1	
k	1	前		
		后	1.002 6	0.002 6

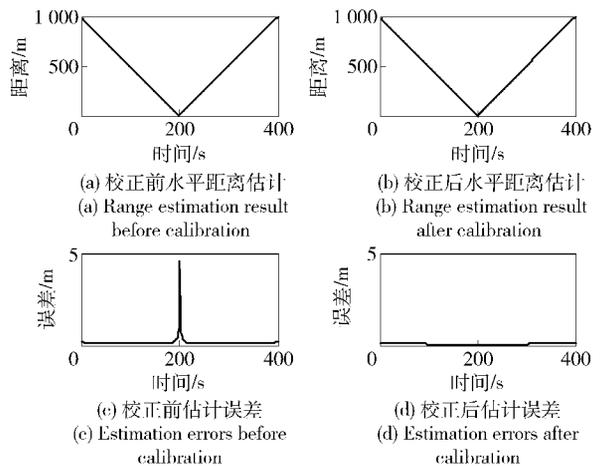


图 6 水平距离估计结果及误差

Fig. 6 Horizontal distance estimation results and errors

3.2 实际水文环境下测试及分析

运动模型基本同 3.1 节,加入信噪比为 20 dB 的高斯噪声,区别包括:运动轨迹由 $(0, -600 m, 50 m)$ 点运动至 $(0, 600 m, 50 m)$ 点,声速分布如图 7(a)所示,是实际勘测的千岛湖水文数据。图 7(b)为软件生成的多途信道冲激响应函数的部分历程。

3.2.1 多途时延差估计

图 8 所示为实际水文条件下得到的倒谱历程

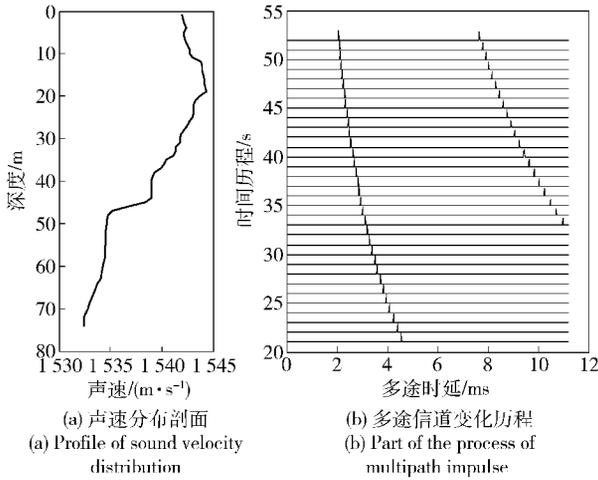


图 7 声速分布剖面及多途信道冲激响应函数部分历程
Fig. 7 Profile of sound velocity distribution and the impulse response function of multipath

图,色带表示倒谱幅度。图 9 为相关和同态滤波两种方法估计 $\tau(t)$ 的误差对比。相关估计均方根误差为 0.015 7 ms,同态滤波估计均方根误差为 0.003 8 ms,在实际水文条件下证明了倒谱时延估计精度高于相关时延估计。

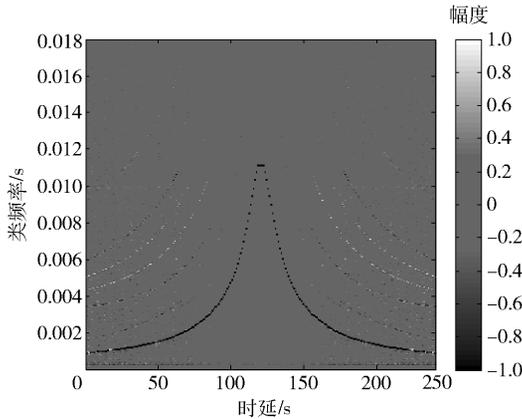


图 8 倒谱时间历程图
Fig. 8 History plot of cepstrum

3.2.2 运动参数估计

表 2 所示为实际水文条件下校正前后的参数估计结果。

当声速不恒定, h_1 和 d 的估计误差分别由 7.190 5 m、27.988 5 m 降低到 1.469 6 m、3.376 1 m。实验结果表明,在图 1 所示的运动模型下,声速垂直分布对速度估计的影响小,而对其他参数的估计影响较大,本文提出的参数校正方法可以显著提高在实际水文条件下的目标运动参数估计精度。

根据(21)式,校正前后的水平距离估计结果及

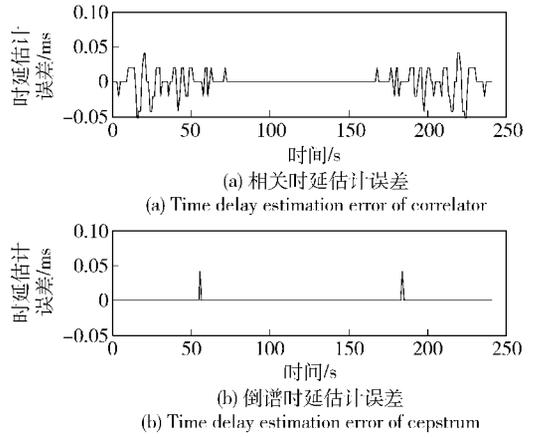


图 9 相关法与同态滤波法时延估计误差对比
Fig. 9 Comparison of delay estimation errors of correlation and homomorphic filtering

误差如图 10 所示。实际水文条件使得 d 的估计误差变大,因此由 d 引起的水平距离估计误差变大,参数校正可以减小此误差,却使累积误差略增大,但仍能达到较高的估计精度。

表 2 实际水文条件下运动参数估计结果

Tab. 2 Motion parameter estimation results with real sound velocity distribution

参数	预设值	校正前/后	Levenberg-	误差
			Marquardt 估计值	
$v/(m \cdot s^{-1})$	5	前	4.9880	0.0120
		后	4.9880	0.0120
h_1/m	50	前	42.8095	7.1905
		后	48.5304	1.4696
d/m	0	前	27.9885	27.9885
		后	3.3761	3.3761
t'_c/s		前	119.6090	
		后	119.6164	
k		前		
		后	1.1522	

4 结论

本文提出了一种单水听器近场高精度水下 TMA 方法,构建了匀速直线运动目标多途时延的三维模型,推导出了多途时延的倒谱表达式,将接收信号表示成倒谱形式,更利于提取直达声和海面一次反射声时延差信息。推导了运动参数与时延信息的非线性方程,将参数估计问题转化为 NLS 的求解问题,并用 Levenberg-Marquardt 算法实现了目标参

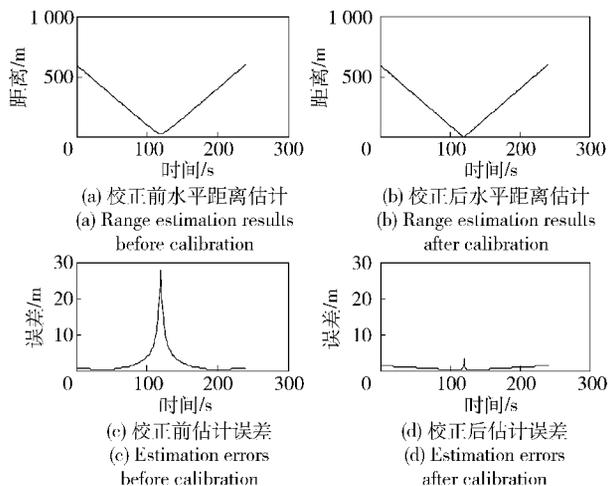


图10 水平距离估计结果及误差

Fig. 10 Horizontal range estimation results and errors

数估计,最后用真实水文数据验证了方法的可行性。

仿真和实验分析结果表明:同态滤波时延估计方法有很好的多途时延分辨能力,在多途环境下精度高于常规相关时延估计,且不依赖于信号形式,因此本文模型及方法适用于非合作目标;声速梯度对深度和水平距离估计精度有较大影响,二次逼近参数校正可以减小误差。此外,同态滤波时延估计方法亦适用于宽带噪声信号,因此可扩展为被动 TMA。

参考文献 (References)

[1] 陈励军,张俊,安良,等. 浅海信道单水听器多径被动定位[J]. 声学技术,2011,30(3):250-252.
CHEN Li-jun, ZHANG Jun, AN Liang, et al. Multipath passive location with single hydrophone in shallow water[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(3):250-252. (in Chinese)

[2] 刘俊星,章新华,綦敦浩,等. 单水听器被动测距的信赖域最优化方法[J]. 兵工学报,2012,33(9):1118-1123.
LIU Jun-xing, ZHANG Xin-hua, QI Dun-hao, et al. Trust region optimization method for single hydrophone passive ranging[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(9):1118-1123. (in Chinese)

[3] 凌青,生雪莉,袁延艺,等. 运动目标低频矢量宽带谱干涉结构及其应用研究[J]. 声学技术,2012,31(4):366-370.

LING Qing, SHENG Xue-li, YUAN Yan-yi, et al. Modeling and application of moving target's vector broadband interference spectrum of low frequencies[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(4):366-370. (in Chinese)

[4] Zhang J J, Papandreou-Suppappola A, Götting B, et al. Time-frequency characterization and receiver waveform design for shallow water environments[J]. Signal Processing, 2009, 57(8):2973-2985.

[5] Haspert K, Tuley M. Comparison of predicted and measured multipath impulse responses[J]. Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3):1696-1709.

[6] 吴国清. 线谱非平稳性分析和利用干涉谱测距[J]. 声学学报, 2004,29(4):364-368.
WU Guo-qing. Nonstationarity analysis of line spectrum and range estimation by spectrum interference[J]. Acta Acoustica, 2004, 29(4):364-368. (in Chinese)

[7] Ferguson B G, Lo K W, Thuraisingham R A. Sensor position estimation and source ranging in a shallow water environment[J]. Oceanic Engineering, 2005, 30(2):327-337.

[8] Parisi R, Camoes F, Scarpiniti M, et al. Cepstrum prefiltering for binaural source localization in reverberant environments[J]. Signal Processing Letters, 2012, 19(2):99-102.

[9] 杨德森,时洁,刘伯胜. 基于倒谱分析的水声信号被动定位时延估计算法研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(2):610-616.
YANG De-sen, SHI Jie, LIU Bo-sheng. Research of time-delay estimation algorithm for passive localization based on cepstrum analysis[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(2):610-616. (in Chinese)

[10] Lo K W, Ferguson B G, Gao Y, et al. Aircraft flight parameter estimation using acoustic multipath delays[J]. Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1):259-268.

[11] Childers D G, Skinner D P, Kemerait R C. The cepstrum: a guide to processing [J]. Proceedings of the IEEE, 1977, 65(10):1428-1443.

[12] 王晋晋,王大成,范军,等. 使用单水听器定位浅水中的脉冲声源[J]. 兵工学报,2012,33(9):1131-1137.
WANG Jin-jin, WANG Da-cheng, FAN Jun, et al. Impulsive-source localization in shallow water using single hydrophone[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(9):1131-1137. (in Chinese)

[13] Bedoui S, Ltaief M, Abderrahim K. Nonlinear approach for the identification of discrete time delay systems[C]//The 20th Control & Automation (MED). Barcelona:IEEE,2012:36-41.