

基于倒谱分析的单水听器目标运动参数估计*

王燕 邹男 付进† 梁国龙

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2013年7月17日收到; 2013年9月9日收到修改稿)

基于浅海射线声学多途结构, 提出了一种具有高稳健性、高精度的单水听器目标运动参数估计方法. 针对匀速直线运动目标, 综合多途时延差和运动学几何关系, 构建了目标三维多途时延模型, 进而获得目标运动参数与多途时延差的非线性时间映射. 研究了典型水声信道的倒谱表达式, 提出了利用倒谱提取多途时延差的策略. 采用差分进化综合优化手段估计目标运动参数, 提高了算法的稳健性. 理论及仿真结果表明, 倒谱的时间分辨率不受信号带宽的限制, 而主要取决于信号类型和信噪比; CW信号的倒谱对多普勒不敏感; 参数估计精度主要取决于时延差估计精度和参与差分进化运算的信息量, 当包含最近点信息时参数估计性能较好. 水池实验结果进一步验证了方法的正确性和有效性.

关键词: 运动参数估计, 倒谱, 多途信道, 差分进化

PACS: 43.25.+y, 43.30.+m, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.63.034302

1 引言

目标运动参数估计在水下目标跟踪和监测中占据重要地位. 在水声工程领域, 虽然多途传播常常被认为是不受欢迎的物理现象, 但在某些应用领域上是有意义的. 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^[1,2]. 基于Lloyd镜面效应, 学者们针对宽带信号, 利用多途干涉条纹测量目标方位和距离信息^[3,4]. 文献^[5]利用多途时延差估计飞行器飞行特征, 并给出基于倒谱的运动参数估计性能高于基于相关器的估计性能的结论. 针对运动目标, 近年来发展了许多阵列处理方法, 例如基于动态波叠加^[6]、MIMO^[7]和多种优化算法^[8,9]的参数估计方法. 与此类方法相比, 在平台空间有限的应用场合, 单水听器运动参数估计技术受到国内外同行较多的关注. 文献^[10]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.

现有的运动参数估计方法大多是基于二维空间模型, 该模型对测量误差相对敏感, 特别是仅用单水听器时的测量精度低. 为了进一步提高单水听器运动参数估计性能, 本文针对水下运动目标, 构造了三维多途时延差的运动学几何模型, 建立多途时延差与运动参数之间的非线性时间映射关系, 分析了误差传递模式. 利用倒谱对线谱信号的抑制作用克服多普勒效应, 并针对算法的稳定性问题, 提出了综合差分进化算法的运动参数估计方法. 仿真和水池实验结果表明, 本方法运算量小, 精度高, 稳健性强, 是一种高效的运动参数估计方法.

2 单水听器目标运动参数估计方法

2.1 运动目标多途时延三维模型

建立柱坐标系 (r, φ, z) , 令水听器所在位置在海面上的投影为坐标原点, r 轴与海平面平行指向

* 国家自然科学基金(批准号: 51279043, 61201411, 51209059, 51009042)、国家高技术研究发展计划(863计划)(批准号: 2013AA09A503)、水声技术国家重点实验室基金(批准号: 9140C200203110C2003)和黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划(批准号: 1253G019)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fujin@hrbeu.edu.cn

最近点, φ 为目标所在位置在海面上的投影与 r 轴的夹角, z 轴与海平面垂直且指向海底, 水下运动目标多途时延三维模型如图 1 所示. 水听器位置为 $(0, 0, z_1)$, 声源在 t 时刻位于 $(r_s(t), \varphi(t), z_s)$, 由声源到达水听器的直达声时延为 $\tau_1(t)$, 海面一次反射声时延为 $\tau_2(t)$, 声源相对于水听器的俯角为 $\alpha(t)$. 声源在恒定深度以速度 v 做匀速直线运动, t_c 时刻经过距水听器的最近点 C, 设 C 点到水听器的水平距离为 r_{sc} , 水中声速为 c .

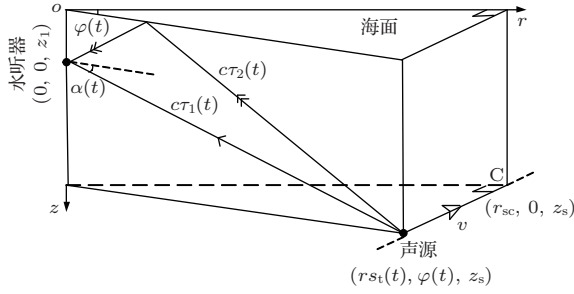


图 1 水下运动目标多途时延三维模型

设 t 时刻接收到的直达声与随后到达的海面一次反射声时延差为

$$\Delta\tau_{12}(t) = \tau_2(t) - \tau_1(t). \quad (1)$$

2.2 目标运动参数分析方法

根据三维多途时延模型, 可获得由 v, z_s, r_{sc} 和 t_c 与时延差 $\Delta\tau_{12}(t)$ 之间的非线性时间映射关系式

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{12}(t) &= \frac{1}{c} \left(\sqrt{r_{sc}^2 + v^2(t - t_c)^2 + (z_s + z_1)^2} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{r_{sc}^2 + v^2(t - t_c)^2 + (z_s - z_1)^2} \right) \\ &= f(r_{sc}, v, t_c, z_s), \end{aligned} \quad (2)$$

式中时刻 t 均以 $t - t_c$ 的形式出现, 可见该方法只需要相对时间, 因此设第一次接收到信号的时刻为零时刻. 若声源发射脉冲信号, 则可通过信号检测方法获得直达声到达时刻 t , 若声源为辐射噪声, 则可将分段处理中每段数据的起始时刻作为 t . 时延差 $\Delta\tau_{12}(t)$ 可以由自相关、倒谱等信道估计方法获得. 因此, 只要估计出四组 $\Delta\tau_{12}(t)$ 就可以由 (2) 式得到运动参数 v, z_s, r_{sc} 和 t_c 的解析解, 进而根据 (3) 式和 (4) 式计算运动声源距水听器的水平距离和相对水听器的俯角.

$$r_s(t) = \sqrt{r_{sc}^2 + v^2(t - t_c)^2}, \quad (3)$$

$$\alpha(t) = \arctan \frac{z_s - z_1}{r_s(t)}. \quad (4)$$

2.3 倒谱多途时延差估计方法

设声源发射信号为 $s(t)$, 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下式所示:

$$\begin{aligned} \hat{C}(t) &= F^{-1} \left\{ \ln \left(|F[s(t) * h(t) + n(t)]|^2 \right) \right\} \\ &= F^{-1} \left\{ \ln \left(|S(j\omega)|^2 \right) \right\} \\ &\quad + F^{-1} \left\{ \ln \left(|H(j\omega)|^2 \right) \right\} \\ &\quad + F^{-1} \left\{ \ln \left(\left| 1 + \frac{N(j\omega)}{S(j\omega)H(j\omega)} \right|^2 \right) \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中 F, F^{-1} 分别表示傅里叶正、反变换. 用 \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, (5) 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之和 [11,12]

$$\hat{C}(t) \approx \hat{C}_s(t) + \hat{C}_h(t). \quad (6)$$

若只考虑直达声和海面、海底一次反射声, 并以直达声的到达时刻和信号幅度作为时延和传播衰减基准, 设归一化后的冲激响应:

$$h(t) = \delta(t) + a_0\delta(t - t_0) + a_1\delta(t - t_1), \quad (7)$$

其中 a_0, a_1 和 t_0, t_1 分别表示海面、海底反射系数和一次反射的时延. 可推导出信道冲激响应倒谱如下式所示:

$$\begin{aligned} \hat{C}_h(t) &= F^{-1} \left[\ln \left(|F(h(t))|^2 \right) \right] \\ &= F^{-1} \left[\ln \left(1 + a_0^2 + a_1^2 \right) \right. \\ &\quad \left. + \ln \left(1 + \frac{1}{1 + a_0^2 + a_1^2} \right) \right. \\ &\quad \left. \times \left(2a_0 \cos(\omega t_0) + 2a_1 \cos(\omega t_1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2a_0 a_1 \cos(\omega(t_0 - t_1)) \right) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

设 $1 + a_0^2 + a_1^2 = a$, 根据泰勒展开公式, 若信道冲激响应参数满足

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{1 + a_0^2 + a_1^2} \left(2a_0 \cos(\omega t_0) + 2a_1 \cos(\omega t_1) \right. \right. \\ \left. \left. + 2a_0 a_1 \cos(\omega(t_0 - t_1)) \right) \right| < 1. \end{aligned} \quad (9)$$

则有

$$\begin{aligned}
 \hat{C}_h(t) &= F^{-1} \left[\ln a + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{m} \left(\frac{2a_0 \cos(wt_0) + 2a_1 \cos(wt_1) + 2a_0 a_1 \cos(w(t_0 - t_1))}{a} \right)^m \right] \\
 &= F^{-1} \left[\ln a + \frac{2a_0 \cos(wt_0) + 2a_1 \cos(wt_1) + 2a_0 a_1 \cos(w(t_0 - t_1))}{a} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{2a_0 \cos(wt_0) + 2a_1 \cos(wt_1) + 2a_0 a_1 \cos(w(t_0 - t_1))}{a} \right)^2 + \dots \right] \\
 &\approx F^{-1} \left[\ln a + \frac{2a_0 \cos(wt_0) + 2a_1 \cos(wt_1) + 2a_0 a_1 \cos(w(t_0 - t_1))}{a} \right] \\
 &= \ln a \delta(t) + \frac{1}{a} [a_0 \delta(t \pm t_0) + a_1 \delta(t \pm t_1) + a_0 a_1 \delta(t \pm (t_0 - t_1))] .
 \end{aligned} \tag{10}$$

可见,接收信号倒谱在时延 t_0 , t_1 和 $t_0 - t_1$ 处会出现冲激. 文献[13]证明了流体分层介质中,海面、海底反射系数相位在近距离处可近似为 180° 和 0° ,因此利用冲激极性可以区分海面和海底反射,再根据 $|a_0 a_1| < |a_0|$,可以区分海面反射和交叉项.多途信息在倒谱域以 $\delta(t)$ 函数的形式出现,不受信号带宽影响.另外,信号的倒谱分布在低时段,与信道倒谱分离,因此容易获得多途时延差.

以CW信号为例,脉宽10.67 ms,频率4 kHz,采样率48 kHz,FFT样本数为2048,图2为发射信

号、信道冲激响应、接收信号的时域和倒谱域波形.

可见,实序列的倒谱关于零点对称;信号的倒谱能量主要集中在低时段并在信号脉宽处出现冲激;信道冲激响应海面反射声时延4.021 ms,海底反射声时延7.542 ms,根据(10)式,倒谱应在0 s, ± 4.021 ms, ± 7.542 ms和 ± 3.521 ms处出现冲激,仿真结果与其符合;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冲激外,负极性最大冲激的位置对应着海面一次反射声与直达声的时延差.

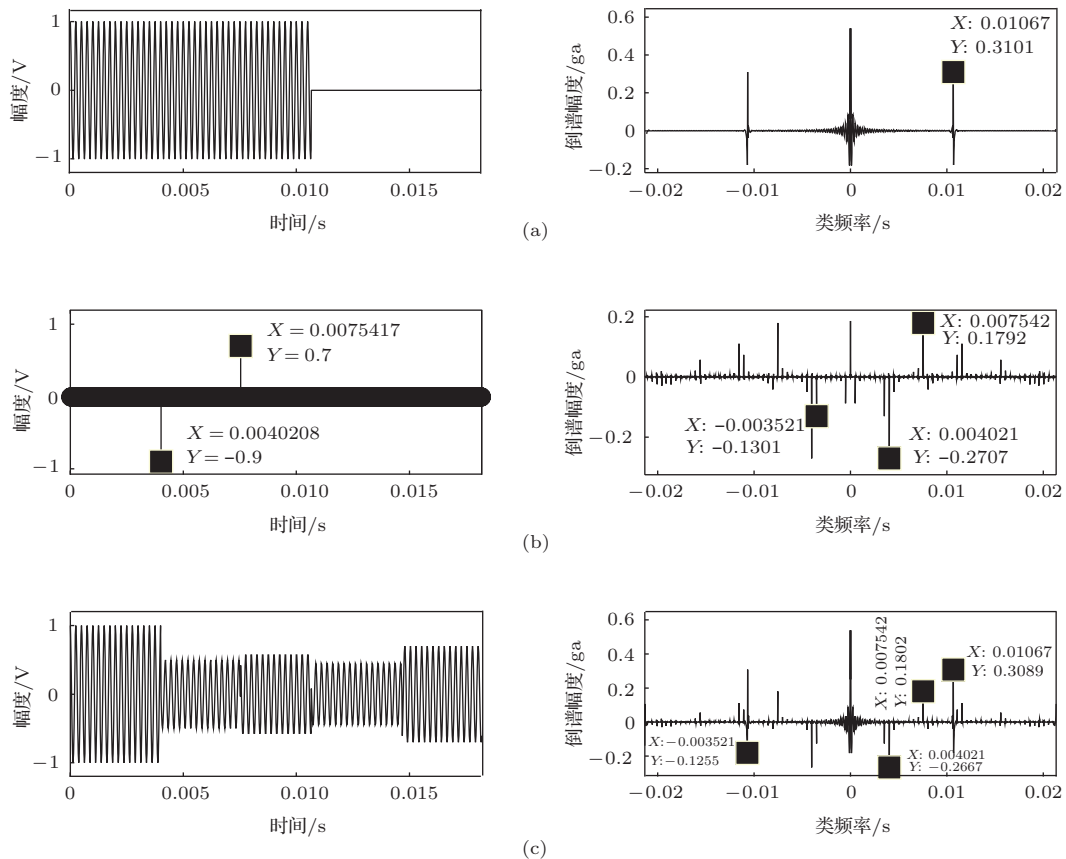


图2 时域及倒谱域波形 (a) 发射信号; (b) 信道冲激响应; (c) 接收信号

2.4 运动参数的差分进化估计方法

采用信号检测方法和倒谱时延差估计方法获得整个运动过程的脉冲到达时刻 t 和直达声与海面一次反射声时延差 $\Delta\tau_{12}(t)$, 定义时延差向量

$$\hat{\tau} = [\Delta\tau_{12}(t_0), \Delta\tau_{12}(t_1), \dots, \Delta\tau_{12}(t_{m-1})]^T, \quad (11)$$

其中 m 为独立方程个数. 由 (2) 式可知, $m \geq 4$ 时方程可解. 为提高稳健性, 充分利用时延差冗余信息, 将 (2) 式所示的参数求解问题转化为非线性参数优化估计问题. 非线性参数优化估计方法主要有 Gauss-Newton 法、Levenberg-Marquardt 法等, 本文采用 differential-evolution (差分进化, DE) 算法求解, 它的特点是利用个体局部信息和群体全局信息协同搜索, 通用性强 [14-16].

本文的优化问题可描述为

$$\begin{aligned} \min F(\mathbf{p}), \mathbf{p} &= [r_{sc}, v, z_s, t_c]^T, \\ \text{s.t. } p_k &\in [l_k, u_k], \end{aligned} \quad (12)$$

其中, \mathbf{p} 为目标函数 $F(\mathbf{p})$ 的解, 它是差分进化的一个个体, p_k 是 \mathbf{p} 中的任意元素, $k = 1, 2, 3, 4$, l_k, u_k 分别表示元素 p_k 对应的下界和上界. 定义均方误差为目标函数

$$F(\mathbf{p}) = (f(\mathbf{p}) - \hat{\tau})^T (f(\mathbf{p}) - \hat{\tau}). \quad (13)$$

DE 算法求解分为四个步骤: 种群初始化、变异、交叉和选择, 本文采用 DE/best/1/bin 方法求解上述问题 [14,17-19].

3 仿真分析

仿真条件: 水听器深度 7 m, 目标以 15 m/s 做匀速直线运动, $r_{sc} = 10$ m. 航行深度 40 m, 水深 70 m, 起始时刻 0 s, 33.33 s 时通过最近点 (r_{sc}, z_s). CW 信号发射周期为 0.6 s, 频率 4 kHz, 脉宽 10.67 ms. 加入高斯噪声, 信噪比为 25 dB. 只考虑海面、海底一次反射, 信道冲激响应函数随时间的变化过程如图 3 所示.

3.1 多途时延差估计

采用倒谱时延差估计方法, 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如图 4 所示.

根据 (10) 式提取时延差估计值, 具体分为三个步骤: 初始建立、局部搜索和野点剔除. 野点剔

除采用”差分综合滤波方法”, 综合时延差一阶差分 and 二阶差分特征滤除野点. 时延差的一阶差分、二阶差分、时延差估计值及剔除野点后结果如图 5 所示.

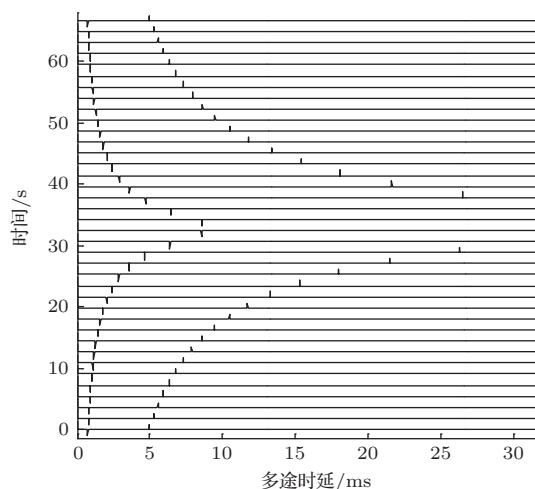


图3 信道冲激响应函数随时间的变化过程

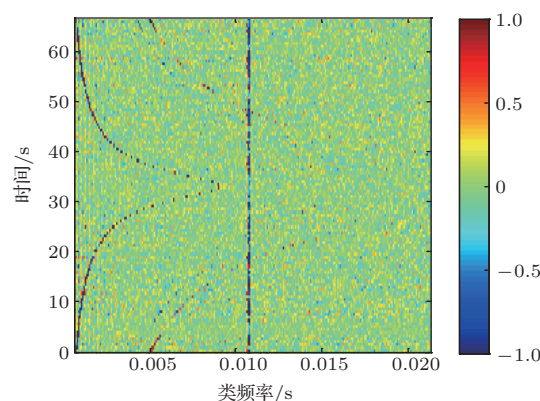


图4 信道冲激响应倒谱历程图

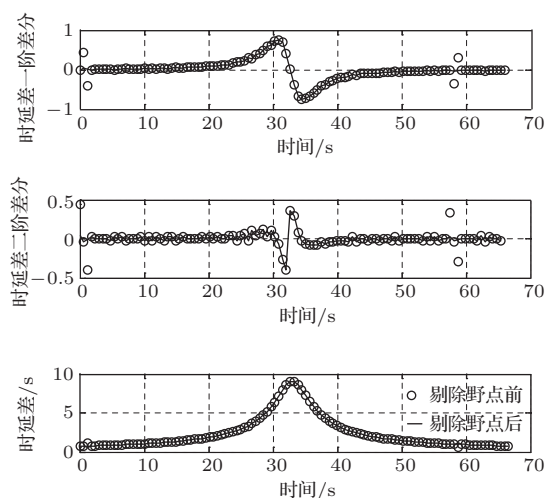


图5 一阶差分, 二阶差分, 时延差估计值及剔除野点后结果

3.2 运动参数估计结果

根据2.4节所述, 仿真得到的DE算法参数估计结果如表1所示, 参数估计精度可以满足实际应用需求.

表1 参数估计仿真结果

运动参数	C点水平距离 r_{sc}/m	速度 $v/m \cdot s^{-1}$	航深 z_s/m	通过C点相对时刻 t_c/s
预设值	10.0000	15.0000	40.0000	33.3333
估计值	9.9772	14.9503	39.8816	33.3313
绝对误差	0.0228	0.0497	0.1184	0.0020

按(3)式和(4)式估计整个运动过程水平距离和俯角及误差如图6所示.

根据误差传递公式

$$\begin{aligned} \Delta r_s(t) &= \frac{\partial r_s(t)}{\partial r_{sc}} \Delta r_{sc} + \frac{\partial r_s(t)}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial r_s(t)}{\partial t_c} \Delta t_c \\ &= r_s^{-1}(t) r_{sc} \Delta r_{sc} + r_s^{-1} v |t - t_c|^2 \Delta v \\ &\quad + r_s^{-1} v^2 (t - t_c) \Delta t_c, \end{aligned} \quad (14)$$

上式中前两项关于 t_c 对称, 而第三项由 t_c 处划分, 两侧异号. 因此如图6所示, 在距离相同时, 当 $t < t_c$ 时距离估计误差略大于 $t > t_c$ 时的情况. 由 Δr_{sc} 引起的距离误差随着 r_s 的增大而减小, 由 Δv

引起的距离误差随着 $|t - t_c|$ (即 r_s) 的增大而增大, 如图6所示, 后者的增大速度大于前者减小速度.

同理:

$$\begin{aligned} \Delta \alpha(t) &= \frac{\partial \alpha(t)}{\partial z_s} \Delta z_s + \frac{\partial \alpha(t)}{\partial r_s(t)} \Delta r_s(t) \\ &= \frac{r_s(t) \Delta z_s}{r_s^2(t) + (z_s - z_1)^2} \\ &\quad - \frac{(z_s - z_1) \Delta r_s(t)}{r_s^2(t) + (z_s - z_1)^2}, \end{aligned} \quad (15)$$

右式中第一项为由 Δz_s 引起的误差, 关于 t_c 对称, 且随着 $|t - t_c|$ 的增大而减小; 第二项是由 $\Delta r_s(t)$ 引起的误差, 受分子项 $\Delta r_s(t)$ 的影响,

$$\frac{(z_s - z_1) \Delta r_s(t)}{r_s^2(t) + (z_s - z_1)^2}$$

在 $t < t_c$ 时大于 $t > t_c$, 因此 $z_s > z_1$ 时俯角误差在 t_c 左侧衰减快于右侧, 与图6结果符合.

3.3 性能分析

3.3.1 时延分辨率

倒谱法与常规的时延估计方法不同, 它的时延分辨率主要取决于信号在倒谱域的衰减特性. 为了方便分析, 针对海面反射, 定义如下物理量, 可用于表征信号的倒谱域特征:

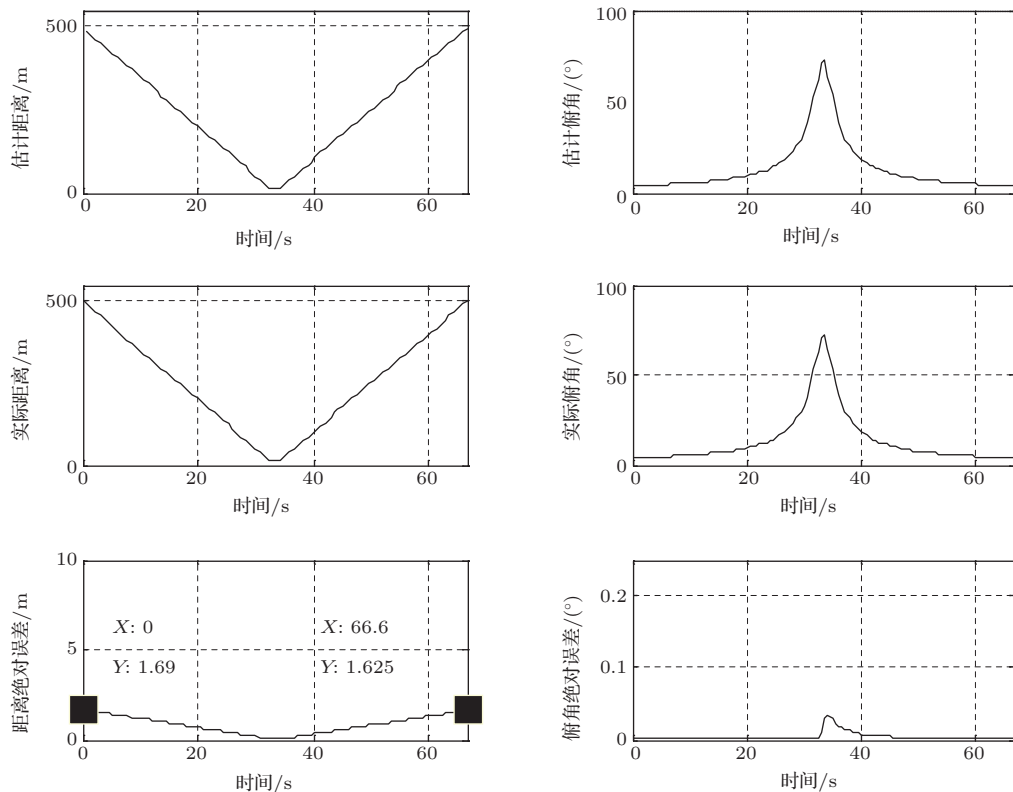


图6 水平距离和俯角估计结果及误差

倒谱深度: 排除信号脉宽及脉宽整数倍处的瞬态冲激后, 定义倒谱深度为倒谱幅度的最小值, 单位: $\text{gamnitude}(\text{ga})$.

倒谱宽度: 倒谱深度所在的类频率, 单位: 毫秒 (ms).

倒谱干扰区间: 设倒谱域幅度门限为 $\varepsilon (\varepsilon < 0)$, 在排除信号脉宽及脉宽整数倍处的瞬态冲激后, 包含所有满足倒谱幅度小于 ε 的最小区间, 单位: 毫秒 (ms).

图 7 给出了以上物理量的图示, 以仿真所用 CW 信号为例, 设 $\varepsilon = -0.05$. 图 7 所示信号倒谱深度为 -0.1741 ga , 倒谱宽度 0.1042 ms , 干扰区间 $[-0.375, 0.375] \text{ ms}$. 可见, 信号倒谱深度越浅、宽度和干扰区间越小, 则海面多途时延分辨率越强.

图 8 给出了三种不同信号的倒谱评价量. 图 8(a) 为 CW 信号的倒谱特征随频率的变化,

图 8(b) 为中心频率为 10 kHz 的 LFM 信号倒谱特征随带宽的变化, 图 8(c) 为中心频率为 10 kHz 的噪声信号倒谱特征随带宽的变化.

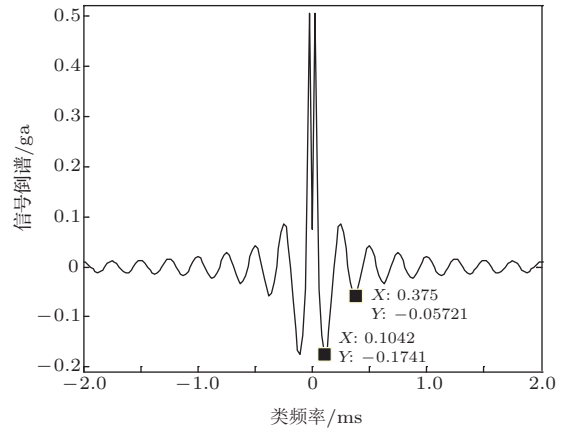
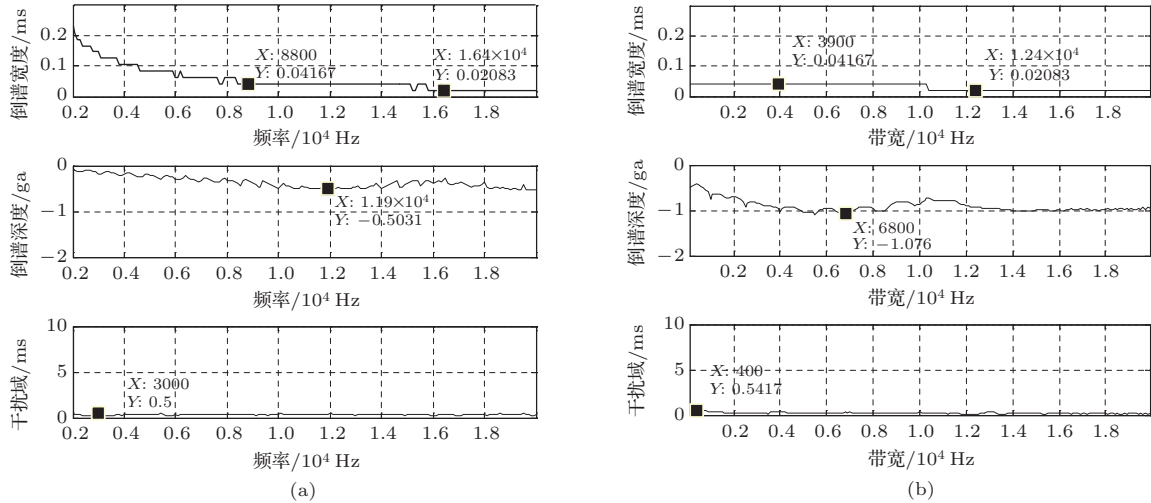
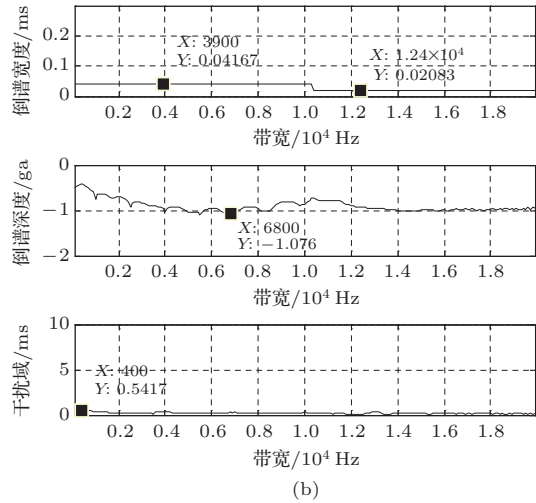


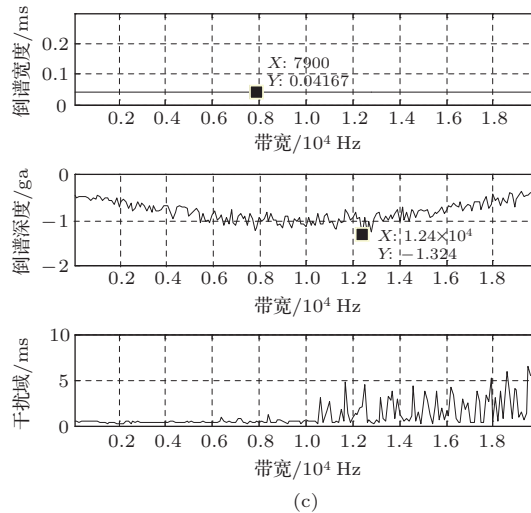
图 7 倒谱时延分辨率评价示意图



(a)



(b)



(c)

图 8 倒谱时延分辨率评价物理量 (a) CW 信号; (b) LFM 信号; (c) 噪声信号

可见, CW 信号具有较浅的倒谱深度和较小的干扰区间, 倒谱宽度随频率的增加而减小, 8.8 kHz 以后趋于平稳, 干扰区间保持在 $[-0.5, 0.5]$ ms 以内. LFM 信号具有较小的倒谱宽度, 倒谱深度大体上随带宽的增加而加深, 且保持在 -1.075 ga 以上, 干扰区间保持在 0.55 ms 以下. 带宽在 10.5 kHz 以下的噪声信号与 LFM 信号倒谱特征类似, 但超过以后干扰区间突变, 已不能满足基本的时延估计要求. 综合考虑以上信息后, 本文选择了 CW 信号.

3.3.2 对多普勒的适应性

多普勒频移是目标运动引发的重要现象之一. 对于 CW 信号而言, 该现象基本可等效为频率搬移. 文献 [20] 推导了频率为 ω_0 的线谱信号倒谱表达式

$$c_s(n) = \frac{2}{\sqrt{\cos \omega_0}} (\sqrt{\cos \omega_0})^n u(n) + \frac{2}{n} (\cos \omega_0)^n u(n) + 2(\sqrt{\cos \omega_0})^n u(n), \quad (16)$$

其中 $u(n)$ 为单位阶跃函数, 可见倒谱幅度随着时间 n 的增加急剧减小, 倒谱特征主要集中在低时段,

多普勒频移仅会影响上式中第 1、3 项的幅度和第 2 项的频率. 因此, 对于 CW 信号的倒谱多普勒影响基本可以忽略. 图 9 为仿真中所用的 CW 信号在不同速度时的倒谱特征变化曲线. 可见, 相对运动对倒谱时延差估计的影响很小. 该结论为水池实验的定点测量提供了理论依据.

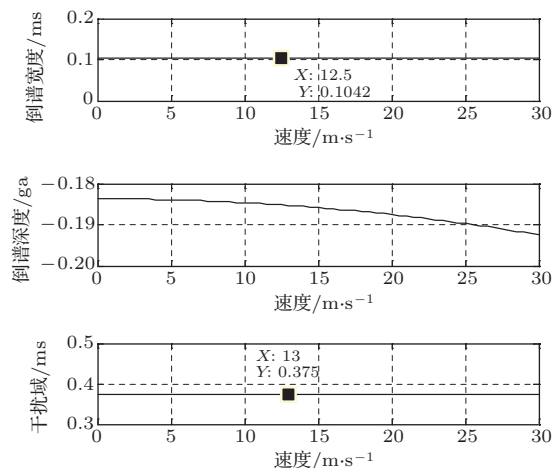


图 9 CW 信号倒谱特征随速度的变化

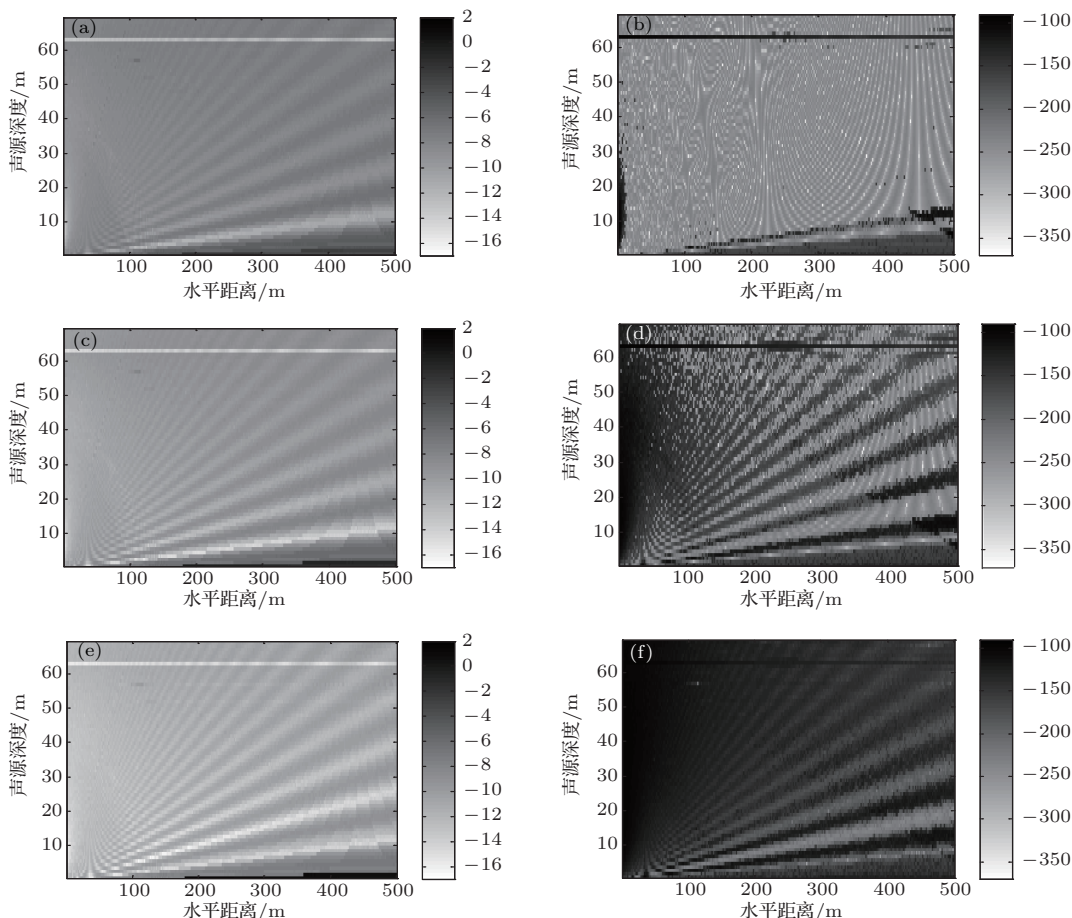


图 10 不同信噪比条件下倒谱幅度及时延估计方差随声源水平距离和声源深度的变化 (a) 30 dB 倒谱幅度的模; (b) 30 dB 时延差估计方差; (c) 25 dB 倒谱幅度的模; (d) 25 dB 时延差估计方差; (e) 20 dB 倒谱幅度的模; (f) 20 dB 时延差估计方差

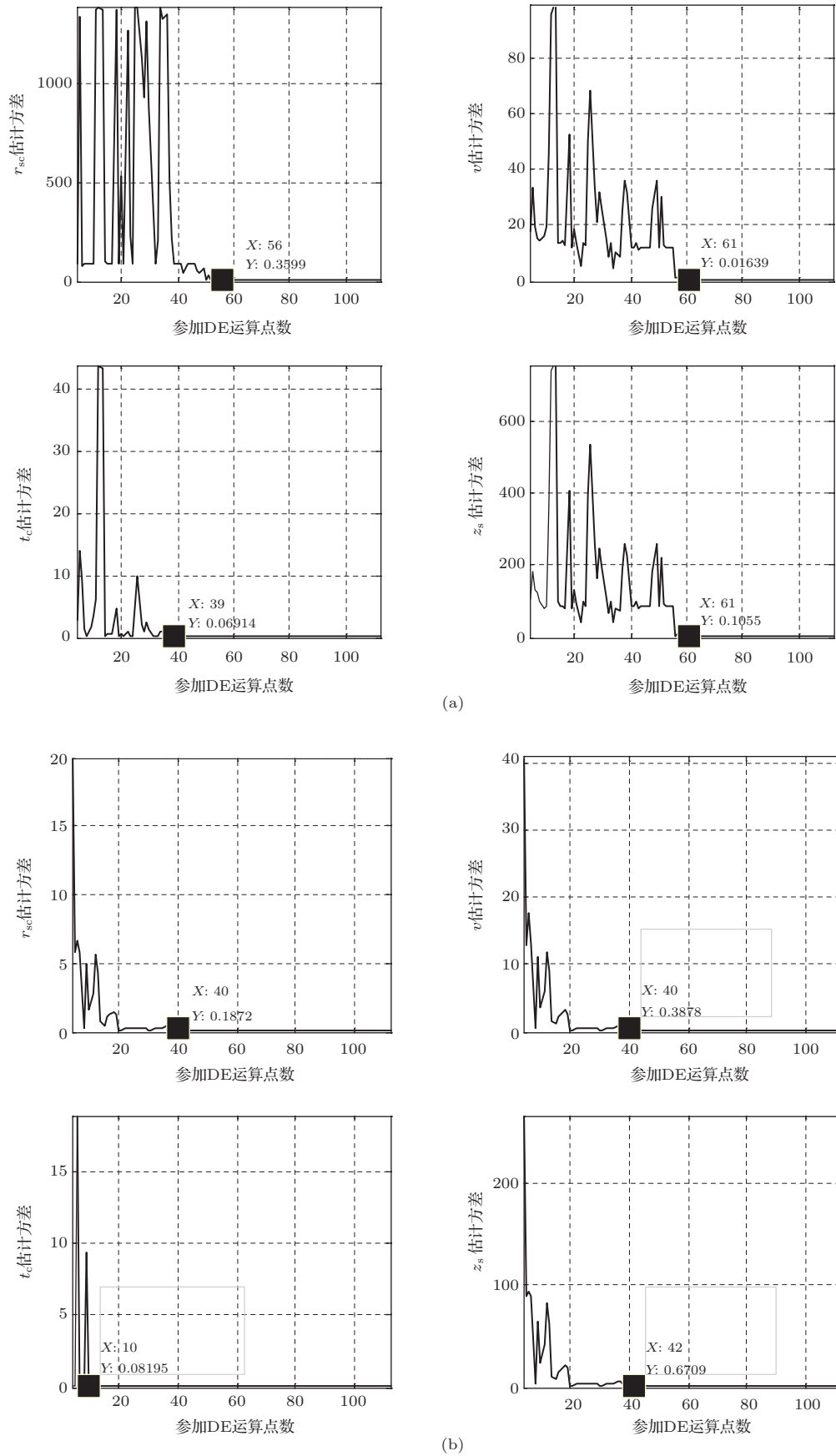


图 11 运动参数估计方差随参加 DE 运算点数变化曲线 (a) 从最远处依次取值; (b) 在 C 点两侧对称取值

3.3.3 倒谱时延差估计方差

仿真条件: 水听器深度 7 m, 水深 70 m, 只考虑直达声、海面和海底一次反射声, 海面反射系数为 -0.9 , 海底反射系数为 0.6 , 且考虑球面扩展传播损失. 统计分析不同信噪比条件下, 海面一次反射和直达声时延差处倒谱幅度(图 10(a), (c), (e))及倒谱时延估计方差(图 10(b), (d), (f))随声源水平距离和声源深度的变化. 为使图 10 更清晰, 取 $10 \lg \sigma^2$ 显示, σ^2 为时延差估计方差.

对比图 10 中的各个子图, 我们不难发现:

1) 在信噪比较高时 (30 dB), 时延估计方差受倒谱幅度的影响很小而主要由干涉条纹决定, 而随着信噪比降低, 倒谱幅度对时延估计方差的影响逐渐占据了主导地位. 随着信噪比降低, 倒谱幅度下降, 时延估计方差增大.

2) 深度为 63 m 处, 在图 10(a), (c), (e) 中出现亮条纹, 图 10(b), (d), (f) 中出现暗条纹, 原因主要是由于海面和海底反射声同时到达, 倒谱幅度较小, 时延估计方差较大.

3) 各图右下角出现一部分暗区域, 它是由信号倒谱干扰区间引起的, 即时延差小于倒谱时延分辨率, 我们将其定义为盲区.

4) 在倒谱时延差方差图 10(b), (d), (f) 中, 左侧近距离处出现部分暗区, 原因是由于倒谱幅度小所致, 此区域随着信噪比的减小而逐渐增大.

3.3.4 目标运动参数估计方差

影响运动目标参数估计方法性能的因素除了时延差估计精度外, 还有参加 DE 优化算法的信息量. 图 11 为运动参数估计方差随参加 DE 运算点数和选取运算点位置的变化曲线, 图 11(a) 为从距离最远处按照参加 DE 运算的点数依次取值, 图 11(b) 为在 C 点两侧 (包括 C 点) 按照参加 DE 运算的点数对称取值, C 点为第 56 点.

由图 11 可见, 参加 DE 运算的航迹不包括 C 点时算法的性能较差, 图 11(a) 中参数 r_{sc} , v 和 z_s 在包含了 C 点后, 估计方差逐渐收敛, 而 t_c 收敛较快, 在未包含 C 点的 40 点处达到收敛. 图 11(b) 中当点数大于 20 时方差开始收敛, 达到 40 点后性能较好, 同样 t_c 收敛较快, 10 点处达到收敛. 因此在实际应用时, 一方面要加大运算点数, 另一方面要尽量选取 C 点 (最近点) 附近的点参与运算.

4 水池实验

4.1 实验布局

根据 3.3 节多普勒对倒谱影响很小的结论, 实验中采取声源沿速度方向做定点测量的方式来模拟运动目标. 信道水池长 25 m, 宽 5 m, 深 5m. 实验布局如图 12 所示, 水听器深度 3.1 m, 发射换能器深度 2.2 m, 信噪比约为 20 dB, 信号参数与仿真信号相同.

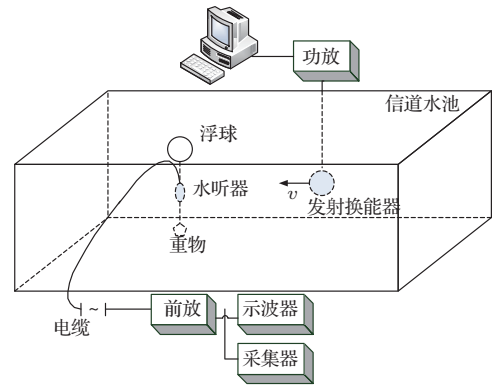


图 12 信道水池实验布局

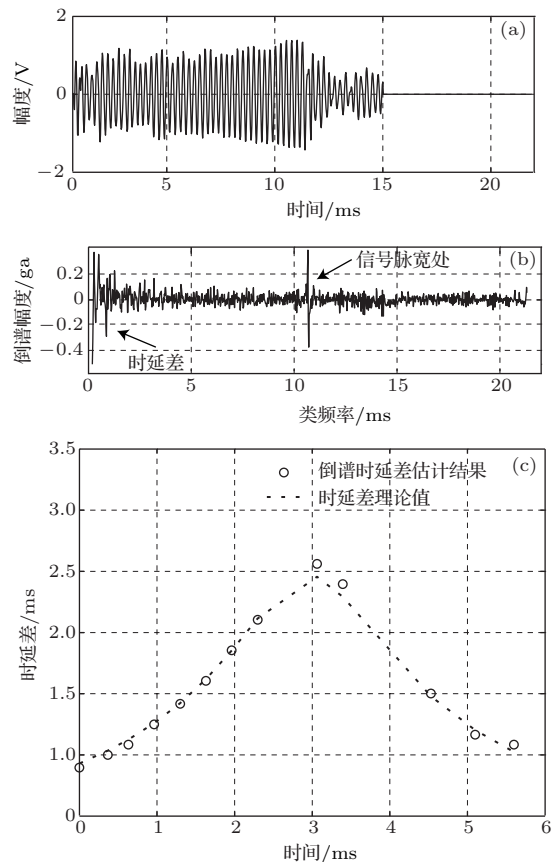


图 13 时延差估计结果 (a) 第一组数据时域波形; (b) 第一组数据倒谱域波形; (c) 运动全过程的时延差估计结果

4.2 多途时延差估计结果

采用倒谱时延估计及提取方法, 得到多途时延差估计结果如图 13 所示, 其中时延差理论值是由距离测量值计算得到.

4.3 参数估计结果

实验得到的 DE 算法参数估计结果如表 2 所示. 可见, 本文方法可较准确的估计出目标运动参数, 只是相对表 1 估计误差大些, 其原因主要在于水池尺度限制, 定点测量的数据量较少, 根据 3.3 节

第四部分的结论可知, 参加 DE 运算的点数较少会使参数估计的精度受限.

按 (3) 式和 (4) 式估计整个运动过程水平距离、俯角及偏差, 如图 14 所示.

表 2 参数估计水池实验结果

运动参数	C 点水平距离 r_{sc}/m	速度 $v/m \cdot s^{-1}$	航深 z_s/m	通过 C 点相对时刻 t_c/s
测量值	1.6	3.0	2.2	2.9667
估计值	1.4312	3.1008	2.2341	3.0015
绝对偏差	0.1688	0.1008	0.0341	0.0348

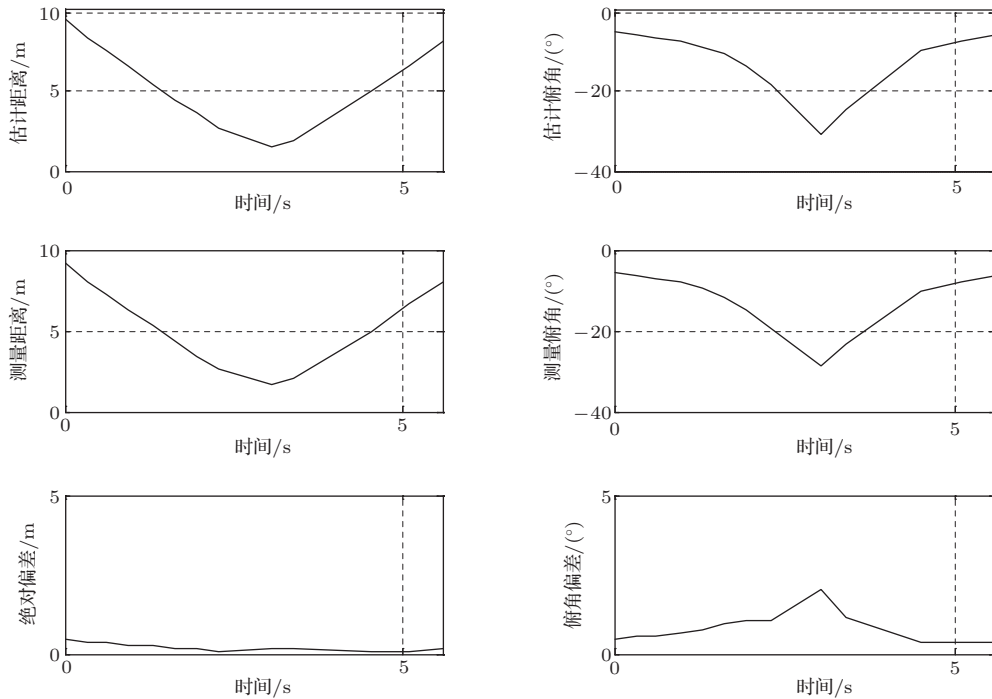


图 14 水平距离和俯角估计结果及误差

如图 14 所示, 在整个过程中距离测量误差均低于 1 m, 俯角测量误差不高于 2° . 在距离相同时, $t < t_c$ 时的偏差要略大于 $t > t_c$ 的情况, 且偏差随着距离的增大而增大. 俯角偏差基本关于 t_c 对称, 且随着 $|t - t_c|$ 的增大而减小, 由于 $z_s < z_1$ 时, 俯角误差在 t_c 左侧衰减慢于右侧, 与仿真分析结果符合.

5 结 论

提出了一种基于倒谱和差分进化的单水听器运动参数估计方法. 该方法基于倒谱的解卷积原理, 采用综合优化手段, 通过构建匀速直线运动目

标多途时延的三维模型, 生成目标运动参数与多途反射时延差的非线性时间映射, 进而利用基于最小均方误差的差分进化算法, 获取稳健的高精度运动目标分析效果. 本研究结果可为目标运动分析的工程应用提供理论及实验支持. 主要内容及结果包括:

1. 建立了水下运动目标多途时延的三维模型, 推导出了水声信道多途时延的倒谱表达式, 提出了具体的包括初始建立、局部搜索和野点剔除过程的时延差提取方法.
2. 提出了基于差分进化的参数估计方法. 根据运动参数和多途时延差的非线性时间映射, 将 DE 优化算法引入到方程组求解之中, 以提高单水

听器估计参数的稳健性和精度.

3. 理论及仿真研究结果表明, 倒谱时延差估计方法的时间分辨力不依赖于信号形式, 有较高的多途时延分辨率, 且不易受多普勒频移影响. 参加 DE 运算的信息量直接影响参数估计性能, 包括最近点时, 参数估计精度较高, 稳定性较强.

4. 通过水池实验对本文提出的基于倒谱分析的目标运动参数估计方法进行了验证.

仿真及实验结果表明本文方法能够用单水听器正确估计目标运动参数.

参考文献

- [1] Jun J Z, Antonia P S, Bertrand G, Cornel I 2009 *Signal Processing* **57** 2973
- [2] Haspert K, Tuley M 2011 *Aerospace and Electronic Systems* **47** 1696
- [3] Lo K W, Perry S W, Ferguson B G 2002 *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **38** 137
- [4] Wu G Q 2004 *Acta Acoust* **29** 364 (in Chinese) [吴国清 2004 声学学报 **29** 364]
- [5] Lo K W, Ferguson B G, Gao Y J, Alain M 2003 *Aerospace and Electronic Systems* **39** 259
- [6] Yang D G, Lin B, Wang Z T, Lian X M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 54306 (in Chinese) [杨殿阁, 李兵, 王子腾, 连小珉 2012 物理学报 **61** 54306]
- [7] Aboulnasr H, Sergiy A V, Alex B G 2012 *Signal Processing* **60** 2354
- [8] Shi J, Yang D S, Shi S G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 64301 (in Chinese) [时洁, 杨德森, 时胜国 2011 物理学报 **60** 64301]
- [9] Kushibiki J, Zou W, Zhang D 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2807
- [10] Ferguson B G, Lo K W, Thuraisingham R A 2005 *Oceanic Engineering* **30** 327
- [11] Donald G C, David P S, Robert C K 1977 *Proceedings of the IEEE* **65** 1428
- [12] Raffaele P, Flavia C, Michele S, Aurelio U 2012 *Signal Processing Lett.* **19** 99
- [13] Wang J J, Wang D C, Fan J, Cai P, Hu J 2012 *Acta Armamentarii* **33** 1131 (in Chinese) [王晋晋, 王大成, 范军, 蔡平, 胡军 2012 兵工学报 **33** 1131]
- [14] Wang L, Qian B 2012 *Hybrid Differential Evolution and Scheduling Algorithm* (Beijing: Tsinghua University Press) p1 (in Chinese) [王凌, 钱斌 2012 混合差分进化与调度算法 (北京: 清华大学出版社) 第 1 页]
- [15] Sotiroudis S P, Goudos S K, Gotsis K A, Siakavara K, Sahalos J N 2013 *Antennas and Wireless Propagation Lett.* **12** 364
- [16] Huang D X, Wang J Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2755 (in Chinese) [黄德先, 王钧炎 2008 物理学报 **57** 2755]
- [17] Coelho L D S, Mariani V C, Ferreiradaluz M V, Leite J V 2013 *Magnetics* **49** 2121
- [18] Zhang W Z, Long W, Jiao J J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 220506 (in Chinese) [张文专, 龙文, 焦建军 2012 物理学报 **61** 220506]
- [19] Chen H, Tan Y J, Pan K J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5956 (in Chinese) [陈华, 谭永基, 潘克家 2008 物理学报 **57** 5956]
- [20] Liu J 2011 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [刘佳 2011 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]

Estimation of single hydrophone target motion parameter based on cepstrum analysis*

Wang Yan Zou Nan Fu Jin[†] Liang Guo-Long

(*Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

(Received 17 July 2013; revised manuscript received 9 September 2013)

Abstract

Based on the multipath structure of shallow water ray acoustics, a new robust high-precision motion parameter estimation method using single hydrophone was proposed. Aiming at uniform linear motion target, colligating multipath delay difference and kinematic geometric relation, we have constructed a tridimensional multipath delay model. Then nonlinear time map can be obtained from motion parameters to delay difference, and the cepstrum expression of typical underwater acoustic channel can be studied. The delay difference is extracted from it, and the extraction strategy is put forward. Differential evolution algorithm is used to estimate motion parameters, and the robustness can be improved. Theoretical and simulation results show that the time resolution of cepstrum is not restricted by the bandwidth of signals, which depends mainly on the type of signals and the signal to noise ratio. The cepstrum of CW is not sensitive to Doppler effect. The precision of parameter estimation depends mainly on the accuracy of time delay estimation and the amount of information attached to the differential evolution algorithm. When the information includes recent data points, parameter estimation can be better. Pool test results further verify the correctness and validity of this method.

Keywords: motion parameter estimation, cepstrum, multipath channel, differential evolution

PACS: 43.25.+y, 43.30.+m, 43.60.+d

DOI: [10.7498/aps.63.034302](https://doi.org/10.7498/aps.63.034302)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51279043, 61201411, 51209059, 51009042), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2013AA09A503), the Foundation of Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, China (Grant No. 9140C200203110C2003), and the Program for University Young Core of Disciplines from Heilongjiang Province, China (Grant No. 1253G019).

[†] Corresponding author. E-mail: fujin@hrbeu.edu.cn