

一种基于单水听器宽带信号自相关函数的水下目标定位稳健方法

张同伟 杨坤德 马远良 汪勇

A robust localization method for source localization based on the auto-correlation function of wide-band signal

Zhang Tong-Wei Yang Kun-De Ma Yuan-Liang Wang Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024303 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024303

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种水平变化波导中匹配场定位的虚拟时反实现方法

A virtual time reversal method for passive source localization in a range-dependent waveguide

物理学报.2014, 63(21): 214303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214303>

利用多角度海底反向散射信号进行地声参数估计

A geoacoustic estimation scheme based on bottom backscatter signals from multiple angles

物理学报.2014, 63(8): 084302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084302>

一种基于新型间歇混沌振子的舰船线谱检测方法

A method of detecting line spectrum of ship-radiated noise using a new intermittent chaotic oscillator

物理学报.2014, 63(6): 064301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.064301>

不确定海洋环境中的模态子空间重构稳健定位方法

Robust source localization based on mode subspace reconstruction in uncertain shallow ocean environment

物理学报.2014, 63(3): 034304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034304>

不确定海洋声场中的检测性能损失环境敏感度度量

The measure of environmental sensitivity in detection performance degradation

物理学报.2013, 62(6): 064303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.064303>

一种基于单水听器宽带信号自相关函数的水下目标定位稳健方法*

张同伟^{1)2)†} 杨坤德²⁾ 马远良²⁾ 汪勇²⁾

1)(国家深海基地管理中心, 青岛 266061)

2)(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

(2014年4月22日收到; 2014年7月15日收到修改稿)

在浅海波导中, 未知声源的本征声线相对到达时延估计是非常困难的. 声源位置在邻域内变化和声速剖面扰动对本征声线相对到达时延的影响是类似的. 基于这种思想, 提出了基于单水听器宽带信号自相关函数的水下目标定位稳健方法. 通过设计邻域位置约束, 构造加权函数, 将宽带信号自相关函数包含的交叉干扰峰值转化为能够改善目标定位性能的有用信息. 该方法不仅不需要估计本征声线的相对到达时延, 而且对搜索网格失配和环境参数失配具有相当的宽容性. 利用典型浅海环境下的仿真数据和海上实验数据 (Shallow Water 2006 experiments) 对所提出方法的有效性进行了验证.

关键词: 单水听器定位, 自相关函数, 宽带信号

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Wi, 43.60.Kx

DOI: 10.7498/aps.64.024303

1 引言

本征声线的相对到达时延估计是基于声线理论信道模型的匹配场被动定位方法中的关键环节. 在声源信号未知的条件下, 利用现有的时延估计算法来估计本征声线的相对到达时延是比较困难的. 在浅海波导中, 随着声源和水听器之间距离的增加, 本征声线条数也会不断增加, 这将进一步增加时延估计的难度.

要想充分利用水听器接收信号中包含的多途时延信息来实现水下目标定位, 要么研究更为有效的时延估计算法来提取本征声线的相对到达时延, 要么提出新的不需要估计多途到达时延的匹配定位方法.

匹配场定位所面临的两个难题^[1]是较高的旁瓣和海洋环境参数失配导致定位性能的大幅度下降. 针对不确定水声环境, 提出了许多宽容的自适

应匹配场处理方法^[2-7], 比较典型的有邻域位置约束法和环境扰动约束法. 邻域位置约束匹配场定位算法^[7]的基本原理是: 认为环境参数的扰动(失配)对应了声源位置在一定邻域范围内的变化. 它利用了线性约束方法, 通过在距离深度平面内设置多个邻点位置约束来确保在环境失配时其主瓣近似于 Bartlett 处理器, 旁瓣接近 MVDR (最小方差无失真响应). 环境扰动约束的匹配场定位算法^[6]考虑了环境参数的扰动对拷贝场向量的影响, 通过计算拷贝场信号相关矩阵提取环境参数扰动的一阶和二阶统计特性, 取得更稳健的定位性能.

由于声源位置变化和声速剖面扰动对本征声线相对到达时延的影响是类似的, 本文在匹配场处理中的邻域位置约束方法和环境扰动约束方法的基础上, 提出了一种基于单水听器宽带信号自相关函数的目标定位稳健方法, 它不需要估计本征声线的相对到达时延, 而且对环境参数失配比较宽容.

* 国家自然科学基金(批准号: 10774119, 11174235, 41330965)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-08-0455)、陕西省自然科学基金基础研究计划(批准号: SJ08F07)和声场声信息国家重点实验室基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: walternwpu@outlook.com

2 理论模型

2.1 基于声线理论的多途信道模型

在多途环境中, 固定声源及接收点位置, 假设有 N 条本征声线到达接收点, 则由声源到接收点间的信道传递函数^[8]可以表示为

$$h(z_s, z_r, r; n) = \sum_{i=1}^N g_i(z_s, z_r, r) \times \delta[n - n_i(z_s, z_r, r)], \quad (1)$$

其中, z_s, z_r 与 r 分别表示声源深度、接收点深度及接收点与声源间的距离; g_i 是第 i 条本征声线的幅度(包含附加相位信息), 对于宽带信号它是信号频率的函数; n_i 是第 i 条本征声线的传播时延. 信号传递函数表示为若干冲激函数的叠加. 每一冲激函数表示一条本征声线, 代表了信号的一种传播途径. 在此信道模型下接收点处的接收信号可以表示为

$$x(n) = h(z_s, z_r, r; n) \otimes s(n) + e(n) = \sum_{i=1}^N g_i s(n - n_i(z_s, z_r, r)) + e(n), \quad (2)$$

其中, $x(n)$ 表示接收信号, $s(n)$ 表示声源信号, $e(n)$ 表示噪声. (2) 式的形式实际上是表示了一个单水听器条件下的信道模型. 在此表达式中可以清楚地反映出本征声线的到达时间, 因此理论上利用单水听器接收到的信号即可完成对本征声线相对时延的估计, 进而实现对声源位置的估计^[9,10].

2.2 自相关函数

假设信号与噪声互不相关, 接收信号 $x(n)$ 的自相关函数^[11]为

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_{xx}(m) &= E[x(n)x(n-m)] \\ &= \mathfrak{R}_{ee}(m) + \sum_{i=0}^{N-1} g_i g_i^* \mathfrak{R}_{ss}(m) \\ &\quad + \sum_{i=0}^{N-1} g_i \mathfrak{R}_{ss}(m - n_i) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{N-2} \sum_{j=i+1}^{N-1} g_i g_j^* \mathfrak{R}_{ss}(m + n_i - n_j), \quad (3) \end{aligned}$$

其中, \mathfrak{R}_{ee} 为噪声 $e(n)$ 的自相关函数, \mathfrak{R}_{ss} 为声源信号 $s(n)$ 的自相关函数. 如果 $s(n)$ 是服从独立同

分布的宽带白噪声, 则其自相关函数 $\mathfrak{R}_{ss}(m)$ 仅在 $m = 0$ 处存在一个峰值. 由(3)式可知, 多途接收信号 $x(n)$ 的自相关函数 $\mathfrak{R}_{xx}(m)$ 在 $m = 0, n_i (i = 1, 2, \dots, N-1), n_j - n_i (i = 1, 2, \dots, N-2; j = i+1, i+2, \dots, N-1)$ 时出现峰值. 本征声线的相对到达时延包含在这些峰值位置中, 但是要从这些峰值位置估计它们的相对到达时延是非常困难的. 其原因在于自相关函数 \mathfrak{R}_{ee} 不仅在真实本征声线到达时延位置 n_i 处出现峰值, 而且在它们的交叉位置 $n_j - n_i$ 也出现峰值, 其数量为 $C_N^2 = N \times (N - 1)/2$. 这样一来, 自相关函数绝对值的峰值个数将远远大于本征声线条数 N , 特别是当 N 较大时. 例如, 当本征声线条数为6时, 自相关函数绝对值的峰值个数为21; 当本征声线条数为20时, 自相关函数绝对值的峰值个数为210.

2.3 基于宽带信号自相关函数的目标定位稳健方法

借鉴匹配场处理中的邻域位置约束方法和环境扰动约束方法, 提出了一种基于单水听器宽带信号自相关函数的目标定位稳健方法, 简称为稳健方法. 它将 $|\mathfrak{R}_{ss}(m)|$ 包含的交叉干扰峰值转化为能够改善目标定位性能的有用信息. 鉴于声源位置变化和声速剖面扰动对本征声线相对到达时延影响的相似性, 这里采用实现相对简单的邻域位置约束方法. 图1给出了基于单水听器宽带信号自相关函数的目标定位稳健方法的实现流程图.

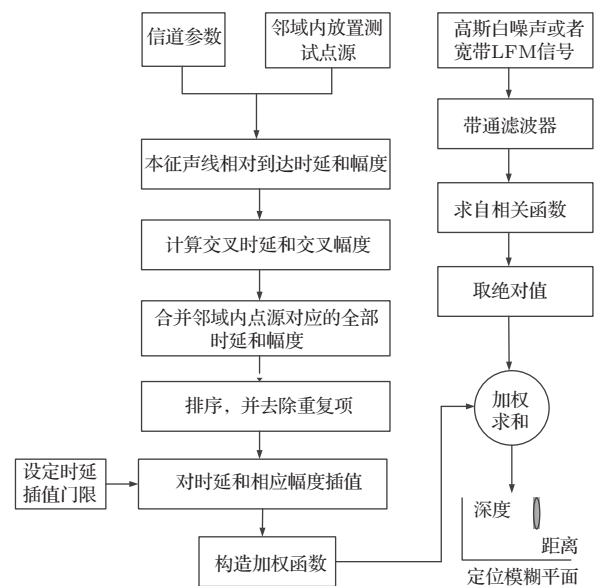


图1 稳健定位方法的实现流程图

下面给出其原理和实现过程.

步骤1 利用水听器对水声信号进行采样, 设采样率为 f_s . 对水听器接收信号进行带通滤波, 要求带通滤波器具有较宽的通带, 并利用(3)式计算其自相关函数绝对值 $|\Re_{ss}(m)|$.

步骤2 采用已知的环境参数和水听器位置等先验信息, 利用声线理论模型计算得到测试点源 (r, z) 到达接收水听器的本征声线相对到达时延 τ 和幅度 $\text{amplitude}_{\text{eigen}}$, 将相对到达时延乘以采样率 f_s 转换为其对应的采样周期数 $\text{delay}_{\text{eigen}} = \tau \times f_s + 1$, 如无特别说明, 下面的到达时延均指其对应的采样周期数.

步骤3 根据(3)式, 计算本征声线到达时延的交叉时延 $\text{delay}_{\text{cross}} = (n_j - n_i)$ 和交叉幅度 $\text{amplitude}_{\text{cross}} = |g_i g_j^*|$.

步骤4 将本征声线到达时延 $\text{delay}_{\text{eigen}}$ 和交叉时延 $\text{delay}_{\text{cross}}$ 组合在一起得到全部时延信息 $\text{delay} = [\text{delay}_{\text{eigen}} \text{delay}_{\text{cross}}]$; 将本征声线到达幅度 $\text{amplitude}_{\text{eigen}}$ 和交叉幅度 $\text{amplitude}_{\text{cross}}$ 也组合在一起得到相应的幅度信息 $\text{amplitude} = [\text{amplitude}_{\text{eigen}} \text{amplitude}_{\text{cross}}]$, 注意时延要和其幅度保持一一对应.

步骤5 改变测试点源的位置, 使其在一定邻域范围 $(\Delta r, \Delta z)$ 内变化, 重复步骤2、步骤3, 计算得到邻域相应本征声线到达时延(含交叉时延) $\text{delay}_{\text{neighborhood}}$ 和幅度(含交叉幅度) $\text{amplitude}_{\text{neighborhood}}$, 实际使用时, 只需要对邻域划分少量网格, 将测试点源依次放置到各网格点上即可.

步骤6 将邻域相应到达时延 $\text{delay}_{\text{neighborhood}}$ 按先后顺序进行排序得到 $\text{Delay}_{\text{neighborhood}}$, 对幅度 $\text{amplitude}_{\text{neighborhood}}$ 进行相应排序得到 $\text{Amplitude}_{\text{neighborhood}}$, 使幅度对应其相应的到达时延.

步骤7 去除 $\text{Delay}_{\text{neighborhood}}$ 中冗余的重复时延, 得到 $D_{\text{neighborhood}}$, 相应的幅度取这些重复时延对应的最大值, 得到 $A_{\text{neighborhood}}$. 重复时延产生的原因是: 声线理论模型计算得到的本征声线到达时延分辨率是有限的, 而且交叉时延也可能与本征声线到达时延或其他交叉时延相同.

步骤8 设定时延差门限 $\Delta = \Delta T \times f_s$ (转化为采样周期数). 当 $D_{\text{neighborhood}}$ 中两相邻时延的时延差 Π 小于门限 Δ 时, 则在这两个相邻时延之间插入 $\Pi - 1$ 个时延, 其对应的幅度由两个时延对应的幅度进行线性差值得到, 这样就得到差值后的到

达时延 D 和相应的幅度 A .

步骤9 利用到达时延 D 和幅度 A 构造加权函数 $w(m; r, z)$.

步骤10 利用加权函数 $w(m; r, z)$ 的时延信息 D 对接收信号的自相关函数绝对值 $|\Re_{ss}(m)|$ 进行取值, 然后利用加权函数 $w(m; r, z)$ 的幅度信息 A 进行加权求和, 即可得到邻域约束下测试点源对应的输出功率 $P(r, z) = \sum_m w(m; r, z) |\Re_{ss}(m)|$.

步骤11 在预期目标位置区域内进行搜索, 重复步骤2—10, 构造输出功率的模糊平面, 其峰值位置就是目标声源的位置估计.

本文提出的稳健定位方法要求信号具有较宽的带宽, 以使信号自相关函数具有尖锐的峰值. 在定位过程中, 将信号中心频率作为射线模型程序的输入信号频率, 计算本征声线相对到达时延和幅度. 此时, 射线模型输入信号频率较高, 一般在几千赫兹以上. 海底参数对较高频率信号下本征声线的相对到达时延和幅度较不敏感.

3 仿真验证

3.1 仿真环境

用仿真数据进行实验. 仿真环境取一个典型的水平分层浅海波导环境^[12,13], 如图2所示. 水深为79.6 m, 水体中的声速剖面为典型的浅海夏季声速剖面, 如图中曲线CTD#36所示. 在海表15 m深度内近似等声速, 15—60 m存在一强跃变层, 且在40 m深度声速最小. 假设海底为均匀半空间声学介质, 其密度为 $1.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 声速为 $1640 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 声吸收系数为 $0.15 \text{ dB}/\lambda$. 这里 λ 为海底介质中的声波波长. 不考虑海洋噪声, 且假设整个海洋环境在处理过程中不随时间变化.

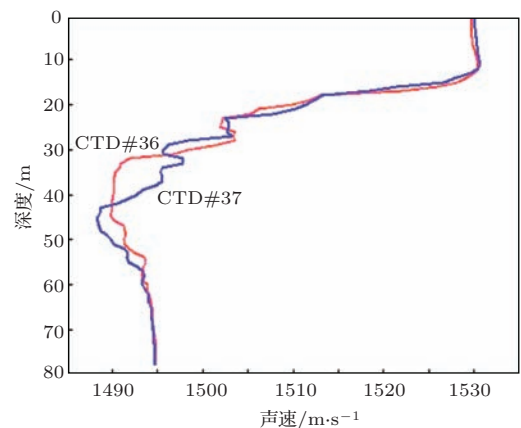


图2 声速剖面

仿真信号采用宽带线性调频信号(频率 1.5—4.5 kHz, 脉冲宽度 1 s), 利用波数积分模型^[14] 计算测量场信号, 并由此产生自相关函数. 取宽带线性调频信号的中心频率, 利用声线理论模型^[15] 计算得到各本征声线的相对到达时延和相应幅度.

3.2 仿真结果

3.2.1 近距离 230 m

假设声源深度为 45 m, 接收深度为 15.15 m, 声源与接收端的水平距离为 230 m. 图 3 给出了基于单水听器宽带信号自相关函数的目标定位稳健方法的仿真结果. 图 3(a) 是环境信息无失配, 且目标声源位于搜索网格点上的定位模糊平面. 模糊平面的峰值出现在目标声源位置, 定位结果准确. 图 3(b) 是环境信息无失配, 而目标声源位于搜索网格点中间的定位模糊平面, 此时定位性能略有下降, 旁瓣级略有升高, 定位结果正确. 图 3(c) 是目标声源位于搜索网格点上, 而声速剖面失配时的定位模糊平面, 此时定位性能略有下降, 旁瓣级略有升高, 定位结果正确.

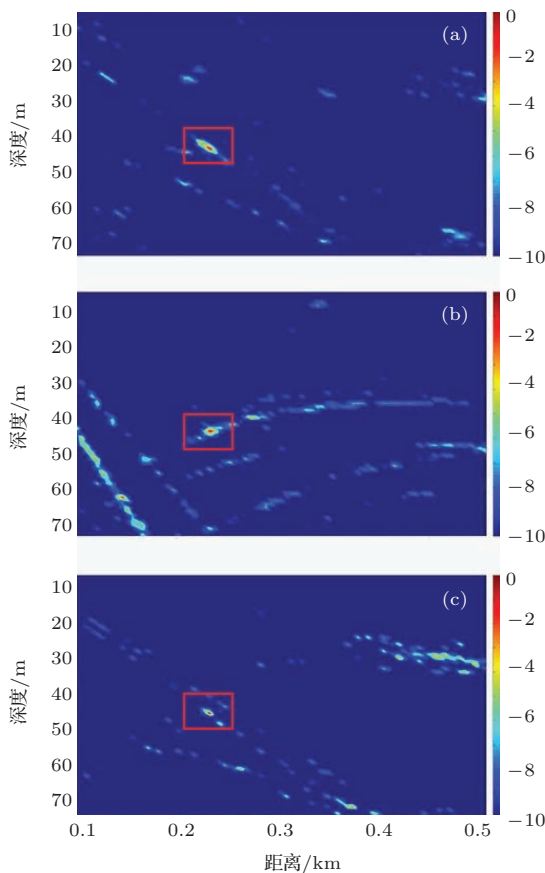


图3 (网刊彩色) 近距离的定位结果 (a) 无失配; (b) 网格失配; (c) 声速剖面失配

3.2.2 较远距离 1500 m

假设声源深度为 45 m, 接收深度为 15.15 m, 声源与接收端的水平距离为 1500 m. 图 4 给出了基于单水听器宽带信号自相关函数的目标定位稳健方法的仿真结果. 图 4(a) 是环境信息无失配, 且目标声源位于搜索网格点上的定位模糊平面. 模糊平面的峰值出现在目标声源位置, 定位结果准确. 图 4(b) 是环境信息无失配, 而目标声源位于搜索网格点中间的定位模糊平面, 此时定位性能略有下降, 旁瓣级略有升高, 定位结果正确. 图 4(c) 是目标声源位于搜索网格点上, 而声速剖面失配时的定位模糊平面, 此时定位性能略有下降, 旁瓣级升高, 但定位结果仍然正确.

由此可见, 基于单水听器宽带信号自相关函数的目标定位稳健方法的定位性能优越, 稳健性好, 对环境参数和搜索网格失配等较不敏感.

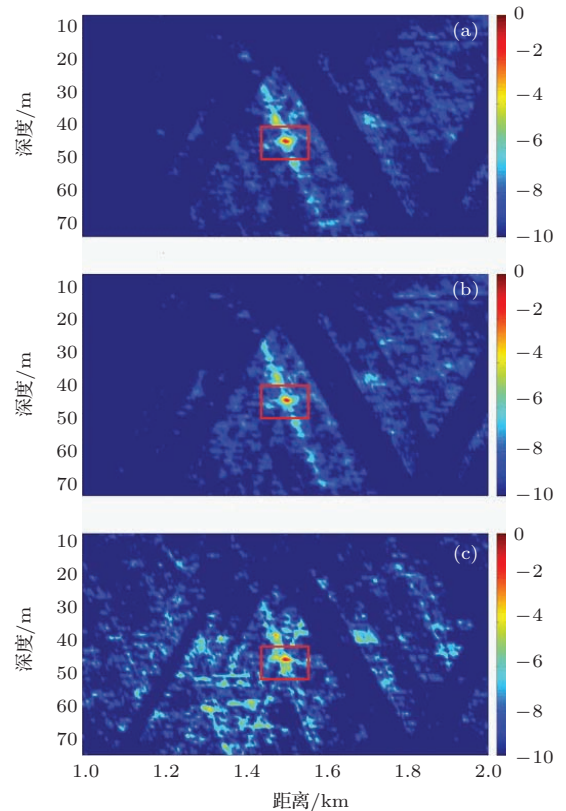


图4 (网刊彩色) 较远距离的定位结果 (a) 无失配; (b) 网格失配; (c) 声速剖面失配

4 海试数据验证

4.1 实验描述与环境模型

利用 Shallow Water 2006 (SW06) 垂直线列阵数据^[12,13] 对本文提出的基于单水听器宽带信号

自相关函数的目标定位稳健方法进行分析验证. SW06垂直线列阵数据是由美国海洋物理实验室(MPL)垂直线列阵采集得到. 实验环境、声源和垂直线列阵布放如图5所示. 实验处的海深为79.6 m; 接收阵采用均匀垂直线列阵, 阵元数为16, 阵元间距为3.75 m, 总长56.25 m, 最底端阵元离海底8.2 m, 最上端阵元在海面下15.15 m. 声源距离垂直线列阵的水平距离大约为230 m, 信号形式为线性调频信号, 频率为1.5—4.5 kHz, 信号长度为1 s. 声源深度从15 m变化到65 m, 间隔10 m, 在每个深度上发射信号5 min. 信号采样频率为50 kHz.

图2给出了实验前后的声速剖面测量值. CTD#36是实验前的测量值, CTD#37是实验后的测量值, 两次测量的时间差为45 min. 可看出在30 m到50 m的深度上, 声速值的变化有 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之大, 声速剖面的剧烈波动是由内波引起的, 对声传播有较大的影响. 海底参数选用文献中采用同样的实验数据进行反演得到的结果.

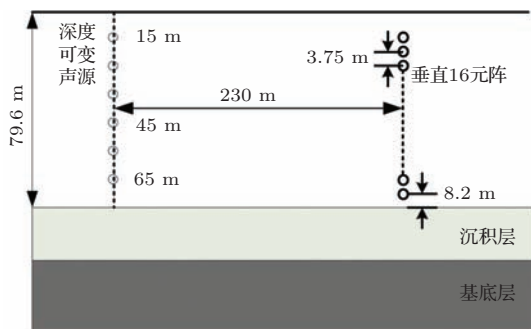


图5 短距离传播实验示意

4.2 实验数据验证

选取15 m和45 m两个典型声源深度的实验数据对本文提出的单水听器定位方法进行验证. 对接收数据进行5倍降采样处理, 得到降采样数据, 采样率为10 kHz.

4.2.1 声源深度为15 m

实验开始前首先进行了声速剖面的测量, 得到CTD#36声速剖面. 实验开始后首先把声源放置在15 m深进行发射, 因此选择CTD#36声速剖面作为当时的声速剖面. 将CTD#36声速剖面输入射线理论模型程序BELLHOP可以计算得到本征声线相对到达时延和幅度. 数据处理中选用前10 s数据计算信号自相关函数. 图6给出了本文稳健方法的定位结果. 由图可见, 稳健方法的定位模糊平

面峰值出现在目标声源位置, 且有效抑制了旁瓣, 定位结果准确, 定位性能优越.

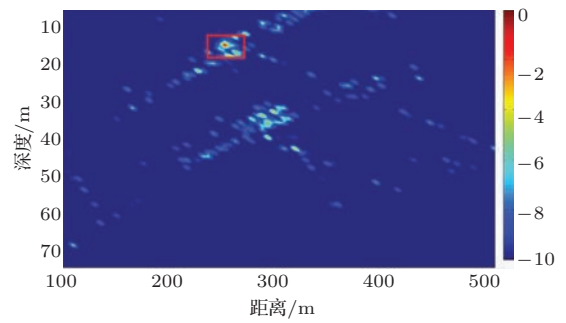


图6 (网刊彩色) 声源深度为15 m, 水听器深度为15.15 m的前10 s数据的定位结果

4.2.2 声源深度为45 m

声源放置在45 m深度发射时, 其时间段大约介于实验前后两次声速剖面测量的中间. 这里选择CTD#36和CTD#37两条声速剖面的平均声速剖面作为当时的声速剖面. 将平均声速剖面输入射线理论模型程序BELLHOP可以计算得到本征声线相对到达时延和幅度. 选取最上面水听器(深度为15.15 m)采集的数据进行处理, 选用前10 s数据计算信号自相关函数. 图7给出了稳健方法的定位结果. 由图可见, 稳健方法的定位模糊平面峰值出现在了目标声源位置, 且有效抑制了旁瓣, 定位结果准确, 定位性能优越.

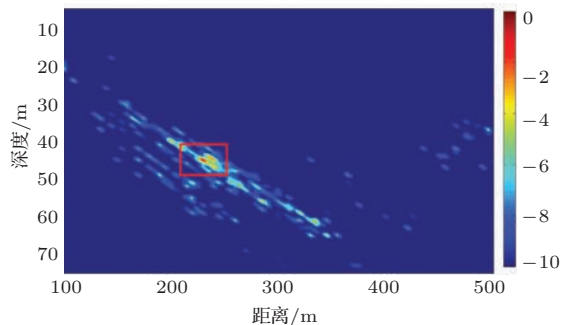


图7 (网刊彩色) 声源深度为45 m, 水听器深度为15.15 m的前10 s数据的定位结果

5 结 论

声线理论中的多途信道模型是单水听器实现被动定位的理论基础. 在声源信号未知的条件下, 现有的时延估算法很难对复杂浅海环境中的多途时延进行有效估计, 这制约了基于本征声线相对到达时延估计的定位方法的发展. 为了克服上述困难, 从自相关函数出发, 研究无须估计多途时延的

定位技术,提出了基于单水听器宽带信号自相关函数的水下目标定位稳健方法,并给出了其实现流程和实施步骤.通过计算机仿真和SW06垂直线列阵的实验数据验证了基于单水听器宽带信号自相关函数的目标定位稳健方法的有效性.

参考文献

- [1] Yang K D 2008 *Matched-Field Processing for Underwater Acoustic Array Signals* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press) pp165–167 (in Chinese) [杨坤德 2008 水声阵列信号的匹配场处理 (西安: 西北工业大学出版社) 第 165—167 页]
- [2] Yang K D, Ma Y L 2006 *Acta Acoust.* **31** 399 (in Chinese) [杨坤德, 马远良 2006 声学学报 **31** 399]
- [3] Woojae S, Sung-Hoon B 2002 *IEEE J. Ocean. Eng.* **27** 642
- [4] Krolik J L, Shorey J A, Nolte L W 1994 *J. Comp. Acoust.* **02** 285
- [5] Richardson A M, Nolte L W 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 2280
- [6] Schmidt H, Baggeroer A B, Kuperman W A, Scheer E K 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **88** 1851
- [7] Chandler H A, Feuillade C, Smith G B 1995 *J. Acoust. Soc. Am.* **97** 2159
- [8] Sun Z G, Ma Y L, Tu Q P, Jiang X Q 1996 *Acta Acoust.* **21** 824 (in Chinese) [孙枕戈, 马远良, 屠庆平, 姜小权 1996 声学学报 **21** 824]
- [9] Wang Y, Zou N, Fu J, Liang G L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034302 (in Chinese) [王燕, 邹男, 付进, 梁国龙 2014 物理学报 **63** 034302]
- [10] Li K, Fang S L, An L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094303 (in Chinese) [李焜, 方世良, 安良 2013 物理学报 **62** 094303]
- [11] Yan S F, Ma Y L 2004 *J. Electr. Inform. Technol.* **26** 702 (in Chinese) [鄢社锋, 马远良 2004 电子与信息学报 **26** 702]
- [12] Jiang Y M, Chapman N R, Gerstoft P 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** EL135
- [13] Jiang Y M, Chapman N R, Yang K, Ma Y 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** EL158
- [14] Schmidt H 1999 *OASES Verion 22 User Guide and Reference Manual* (Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology)
- [15] Porter M B 1995 *The KRAKEN Normal Mode Program* (La Spezia: SACLANT Undersea Research Center)

A robust localization method for source localization based on the auto-correlation function of wide-band signal*

Zhang Tong-Wei^{1)2)†} Yang Kun-De²⁾ Ma Yuan-Liang²⁾ Wang Yong²⁾

1) (National Deep Sea Center, Qingdao 266061, China)

2) (College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 22 April 2014; revised manuscript received 15 July 2014)

Abstract

It is very difficult to estimate the relative arrival delay of the eigenrays for an unknown source in shallow water. The effects of a source position changing in the neighborhood and sound speed profile perturbation on arrival time of eigenrays are similar. In this paper, we present a robust localization method based on the auto-correlation function of wide-band signal of single hydrophone. By designing neighboring location constraints, a weighting function is constructed to change the peak cross-interference of the auto-correlation function to useful information that is conducive to the improving of targeting performance. In this method there is no need to estimate the relative arrival delay of the eigenray. Computer simulation shows that the robust method can achieve better localization performance, and even has tolerances of environment mismatch and searching grid mismatch. The performance of the robust method is validated through the broad-band data collected on a vertical line array during the Shallow Water 2006 experiments.

Keywords: single hydrophone localization, auto-correlation function, wide-band signal

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Wi, 43.60.Kx

DOI: [10.7498/aps.64.024303](https://doi.org/10.7498/aps.64.024303)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10774119, 11174235, 41330965), the Program for New Century Excellent Talents in University, China (Grant No. NCET-08-0455), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. SJ08F07), and the Foundation of National Laboratory of Acoustics.

† Corresponding author. E-mail: walternwpu@outlook.com