

# 一种水平变化波导中匹配场定位的虚拟时反实现方法\*

张同伟<sup>1)2)†</sup> 杨坤德<sup>2)</sup>

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16日收到; 2014年5月31日收到修改稿)

在水平变化波导中, 匹配场被动定位的计算量非常大, 严重阻碍了其工程应用. 本文提出了一种水平变化波导中匹配场定位的虚拟时反实现方法, 其抛物方程模型计算网格总数远小于匹配场处理, 从而大大减小计算代价. 与匹配场处理不同, 虚拟时反实现方法是一个利用介质互易性和叠加性的后向传输过程. 通过在各水听器位置放置虚拟声源, 并在搜索区域产生相应的模糊平面, 对各个模糊平面进行相应加权求和, 获得的定位模糊平面. 利用地中海浅海实验数据验证了虚拟时反实现方法的快速性能.

**关键词:** 虚拟时反方法, 匹配场定位, 水平变化波导

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

**DOI:** 10.7498/aps.63.214303

## 1 引言

匹配场处理<sup>[1–5]</sup>是一个前向传播过程. 它系统地把测试点源放置到每一个搜索网格上, 计算基阵上的拷贝场向量, 然后把拷贝场向量和真实声源对应的数据向量做相关处理. 在预期目标位置区域内进行搜索, 达到匹配时获得目标的位置估计. 计算各搜索网格对应的拷贝场向量需要耗费大量的时间. 当海洋环境水平变化时, 需要利用抛物方程模型来计算拷贝场向量. 此时, 其计算量相当惊人, 这严重阻碍了其工程应用. 为了将匹配场处理技术应用于工程实际中, 必须寻找新的方法和技术途径.

时间反转处理<sup>[6–8]</sup>是利用海洋自身来构造拷贝场的匹配场实现. 当时间反转处理技术应用于目标定位时, 称之为匹配场定位的虚拟时反实现方法(VTRP). 在虚拟时反实现方法中, 信号不需要像时间反转处理那样在声源和接收器之间来回传输. 相

反, 假设水声信道在时间上是稳定的, 时间反转信号的重新发射是在计算机内完成. 在虚拟时反处理中仅仅需要一条被动接收阵即可.

虚拟时反实现方法是一个后向传输过程. 它利用了介质的互易性和叠加性, 在各水听器位置放置虚拟声源, 每个虚拟声源在搜索区域产生一个模糊平面, 对各个模糊平面进行相应加权求和, 即可得到最终的定位模糊平面.

对于水平不变海洋声学问题, 简正波模型<sup>[9,10]</sup>提供了一种快速而又准确的求解方法. 尽管传统的匹配场处理和虚拟时反实现方法的计算顺序不同, 但在水平不变波导中, 它们的简正波计算网格数是相同的. 然而, 绝大多数真实的海洋环境需要用水平变化海洋环境来精确描述<sup>[11–13]</sup>. 抛物方程模型<sup>[14]</sup>可以非常有效地求解水平变化波导的声学问题. 为了计算某一距离搜索网格上的测试点源在基阵上的拷贝场向量, 从该测试点源到基阵之间的声场都需要计算出来. 这使得在水平变化波导中,

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

† 通讯作者. E-mail: walternwpu@outlook.com

虚拟时反实现方法的抛物方程模型计算网格数远小于传统匹配场处理.

## 2 虚拟时反实现方法

### 2.1 线性匹配场处理器的原理

线性匹配场处理器也称作常规处理器或Bartlett处理器. 它将水听器阵列采集的信号场数据与物理模型预测的拷贝向量直接求相关得到处理器功率, 其实质是该相关幅度的二次方. 在匹配场处理中, 测量场数据是由接收时间序列信号通过快速傅里叶变换(FFT)获得的频域数据向量或互谱密度矩阵(CSDM-Cross Spectral Density Matrix). 基阵的拷贝向量 $\mathbf{w}_{\text{MFP}}(r, z)$ 可以运用已有的声场模型软件求出数值解. 并且将所有的拷贝向量进行归一化, 使其范数为1. 以Bartlett匹配场处理器为例, 其目标函数(或称为模糊度表面)定义为<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} S_{\text{MFP}}(r, z) &= |\mathbf{w}_{\text{MFP}}^H(r, z)\mathbf{d}(r_s, z_s)|^2 \\ &= \mathbf{w}_{\text{MFP}}^H(r, z)\mathbf{R}\mathbf{w}_{\text{MFP}}(r, z), \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{d}(r_s, z_s)$ 为接收数据响应向量,  $\mathbf{R}$ 为接收数据协方差矩阵,  $(\cdot)^H$ 为共轭转置.

### 2.2 虚拟时反实现方法的原理

虚拟时反实现方法是一个后向传输过程. 在各水听器位置放置虚拟声源, 每个虚拟声源可以在搜索区域产生一个模糊平面, 对各个模糊平面进行相应加权求和, 即可得到最终的定位模糊平面. 定义搜索深度向量 $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_{ND}]^T$ 和搜索距离向量 $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_{NR}]^T$ , 其中 $ND$ 和 $NR$ 分别是深度和距离网格数.  $(\cdot)^T$ 表示向量或矩阵的转置. 虚拟时反实现方法的定位模糊平面为

$$\begin{aligned} S_{\text{VTRP}}(\mathbf{r}, \mathbf{z}) \\ = \left| \sum_{i=1}^N d^*(r_i, z_i; r_s, z_s) \mathbf{w}_{\text{VTRP}}(\mathbf{r}, \mathbf{z}; r_i, z_i) \right|^2, \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $d(r_i, z_i; r_s, z_s)$ 表示位于 $(r_i, z_i)$ 处的阵元对 $(r_s, z_s)$ 处声源的接收声场.  $\mathbf{w}_{\text{VTRP}}(\mathbf{r}, \mathbf{z}; r_i, z_i)$ 表示 $(r_i, z_i)$ 处虚拟声源激发的归一化拷贝平面.  $N$ 是阵元个数.  $(\cdot)^*$ 为相位共轭.

在实际中, 信号的幅度和相位总是随时间起伏波动, 人们往往通过求平均来减弱信号起伏的影响.

当利用虚拟时反实现方法来处理实际数据时, 用于后向传播的声压数据可以通过下面的方式获得. 信号矩阵 $\mathbf{X}$ 可以通过多个信号向量(快拍)来构建. 利用奇异值分解, 可以得到

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H, \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_K]$ 是一个 $N \times K$ 的矩阵, 它的列向量 $\mathbf{u}_k$ 是左奇异值向量.  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_k, \dots, \sigma_K)$ 是一个 $K \times K$ 的矩阵, 它的对角线元素是奇异值,  $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_k, \dots, \mathbf{v}_K]$ 是一个 $N \times K$ 的矩阵, 它的列向量 $\mathbf{v}_k$ 是右奇异值向量. 虚拟时反实现方法的后向传播数据向量 $\mathbf{d}(r_s, z_s)$ 可以由左奇异值向量和相应的奇异值得到

$$\mathbf{d}(r_s, z_s) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \mathbf{u}_k. \quad (4)$$

此时, (2)式中的声压 $d(r_i, z_i; r_s, z_s)$ 就是数据向量 $\mathbf{d}(r_s, z_s)$ 的第*i*个元素.

对于宽带目标信号, 采用多个频率点非相干联合处理的方法, 可提高水下目标的定位精度, 降低定位模糊平面的旁瓣, 多频率点非相干联合处理的计算公式为

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(\mathbf{r}, \mathbf{z}) = \sum_{j=1}^M & \left| \sum_{i=1}^N d^*(r_i, z_i; r_s, z_s; f_j) \right. \\ & \left. \times \mathbf{w}(\mathbf{r}, \mathbf{z}; r_i, z_i; f_j) \right|^2, \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $M$ 为频率数量,  $f_j$ 表示第*j*个频率点.

### 2.3 虚拟时反实现方法的步骤

本文所提出的虚拟时反实现方法, 其特征在于: 在水声信道中布放水听器接收阵来实现水下目标的被动定位, 估计出目标的距离和深度, 被动定位方法是采用虚拟时反处理的思想. 它利用海水介质的互易性和叠加性, 在各水听器位置放置虚拟声源, 利用声场模型计算出每个虚拟声源在搜索区域产生的拷贝场平面, 然后对每个拷贝场平面进行相应的加权求和, 最终得到水下目标的定位模糊平面, 从而判定目标的距离和深度. 其过程分为以下六步:

**步骤1** 将水听器阵布放在海水中, 采集得到水声信号, 将水听器阵列数据向量 $\mathbf{x}(t)$ 的一段时间段分成彼此相互连接的一系列时间段, 通过傅里叶变换把时域数据向量 $\mathbf{x}(t)$ 变换到频域, 得到频域快拍数据向量 $\mathbf{X}(\omega)$ .

**步骤2** 假定在该时间段内信号的起伏变化主要是由噪声引起的, 通过对频域快拍数据向量  $\mathbf{X}(\omega)$  的平均来估计数据协方差矩阵  $\mathbf{S}(\omega) = E[\mathbf{X}(\omega)\mathbf{X}^H(\omega)]$ .

**步骤3** 对数据协方差矩阵做奇异值分解  $\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H$ , 其中  $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_K]$  是一个  $N \times K$  的矩阵, 它的列向量  $\mathbf{u}_k$  是左奇异值向量;  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_k, \dots, \sigma_K)$  是一个  $K \times K$  的矩阵, 它的对角线元素是奇异值,  $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_k, \dots, \mathbf{v}_K]$  是一个  $N \times K$  的矩阵, 它的列向量  $\mathbf{v}_k$  是右奇异值向量.

**步骤4** 虚拟时反实现方法的后向传播数据向量  $\mathbf{d}(r_s, z_s)$  可以由左奇异值向量和相应的奇异值得到,  $\mathbf{d}(r_s, z_s) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \mathbf{u}_k$ , 其中  $r_s$  是目标声源的距离,  $z_s$  是目标声源的深度.

**步骤5** 在各水听器位置放置虚拟声源, 每个虚拟声源的距离和深度表示为  $(r_i, z_i)$ , 搜索距离和深度区域表示为  $(\mathbf{r}, \mathbf{z})$ , 在搜索区域  $(\mathbf{r}, \mathbf{z})$  内产生一个归一化拷贝场平面  $\mathbf{w}(\mathbf{r}, \mathbf{z}; r_i, z_i)$ ; 对于水平不变的海洋环境, 拷贝场平面可以利用简正波模型求出数值解; 对于水平变化的海洋环境, 拷贝场平面则需要利用抛物方程模型来求其数值解.

**步骤6** 利用步骤4中得到的数据向量  $\mathbf{d}(r_s, z_s)$ , 对拷贝场平面  $\mathbf{w}(\mathbf{r}, \mathbf{z}; r_i, z_i)$  进行加权求和, 即可得到最终的目标定位模糊平面  $\mathbf{B}(\mathbf{r}, \mathbf{z}) = \left| \sum_{i=1}^N d^*(r_i, z_i; r_s, z_s) \mathbf{w}(\mathbf{r}, \mathbf{z}; r_i, z_i) \right|^2$ , 该定位模糊平面内的峰值即为目标距离和深度的最大似然估计.

### 3 传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的异同

#### 3.1 水平不变波导

在大多数情况下, 匹配场处理主要应用于水平不变波导中. 此时, 人们可以利用简正波模型来计算低频远距离声场. 传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的物理实现是不同的, 如图1所示. 传统匹配场处理是一个前向传播过程. 在这个过程中, 测试点源逐一放置在各搜索网格上, 然后计算阵列上的  $N \times 1$  维拷贝场向量  $\mathbf{P}_{\text{MFP}}^{\text{RI}}$ , 如图1(a)所示. 它对应的简正波模型计算格点数为  $N$ . 对于划分为  $ND \times NR$  个格点的搜索区域, 我们需要计算

$ND \times NR$  个拷贝场向量. 因此, 总的简正波模型计算格点数为  $ND \times NR \times N$ .

虚拟时反实现方法是一个后向传输过程. 它在各水听器位置放置虚拟声源, 每个虚拟声源可以在搜索区域产生一个  $ND \times NR$  的模糊平面  $\mathbf{P}_{\text{VTRP}}^{\text{RI}}$ , 如图1(b)所示. 相应的简正波计算格点数为  $ND \times NR$ . 因此, 总的简正波模型计算格点数为  $N \times ND \times NR$ .

由此可见, 在水平不变波导中, 尽管传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的计算顺序不同, 它们总的简正波模型计算格点数是相同的.

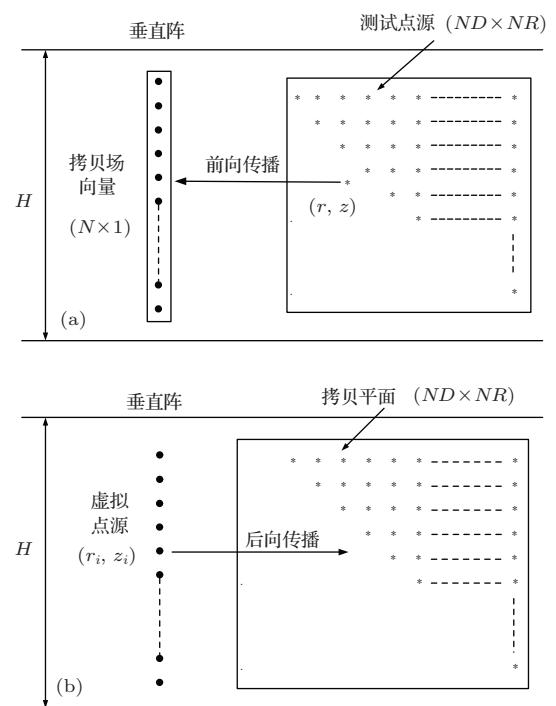


图1 水平不变波导中传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的实现框图 (a) 传统匹配场处理; (b) 虚拟时反实现方法

#### 3.2 水平变化波导

在真实的浅海波导中, 将海水深度、声速剖面和海底参数等设定为常数是很粗糙的. 对于绝大多数情况, 这些参数的变化是非常明显的, 特别是海水深度的变化更为显著. 对于求解水平变化波导中的声学问题, 抛物方程模型是非常有效的.

抛物方程模型的计算距离步长和深度步长分别为  $dr$  和  $dz$ . 最大计算深度为  $Z_{\max}$ . 搜索区域的距离范围(单位: m)为  $[R_1, R_2]$ , 深度范围为  $[Z_1, Z_2]$ . 距离深度搜索网格为  $\Delta R \times \Delta Z$ . 则距离搜索网格数为  $NR = (R_2 - R_1)/\Delta R + 1$ , 深度搜索网格数为  $ND = (Z_2 - Z_1)/\Delta Z + 1$ . 假定最大

搜索距离  $R_2$  为第 1 个距离搜索网格, 最近的搜索距离  $R_1$  为第  $NR$  个距离搜索网格.

图 2(a) 给出了传统匹配场处理的实现流程. 当测试点源位于第  $k$  个距离搜索网格时, 为了计算基阵的拷贝场向量  $\mathbf{P}_{\text{MFP}}^{\text{RD}}$ , 第  $k$  个距离搜索网格之前的声压场必须首先计算得到. 抛物方程模型的计算网格数为

$$C_k = \frac{Z_{\max}}{dz} \cdot \frac{1}{dr} \cdot [R_2 - (k-1) \cdot \Delta R]. \quad (6)$$

每个距离搜索网格上有  $ND$  个测试点源, 则第  $k$  个距离搜索网格对应的抛物方程模型计算网格数为  $ND \times C_k$ . 因此, 全部  $NR$  个距离搜索网格对应的抛物方程模型计算网格总数为

$$\begin{aligned} C_{\text{MFP}} &= \sum_{k=1}^{NR} (ND \times C_k) \\ &= ND \cdot \frac{Z_{\max}}{dz} \cdot \frac{1}{dr} \cdot \frac{NR \cdot (R_2 + R_1)}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

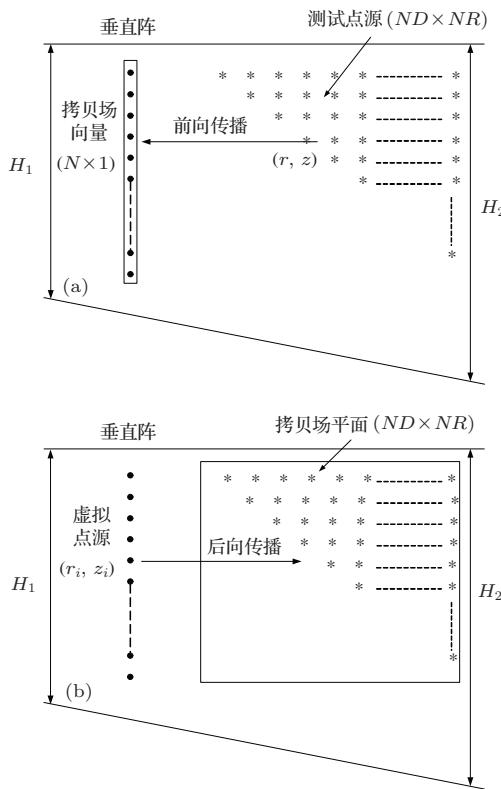


图 2 水平变化波导中传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的实现框图 (a) 传统匹配场处理; (b) 虚拟时反实现方法

图 2(b) 给出了虚拟时反实现方法的实现流程. 在基阵的  $N$  个阵元位置放置  $N$  个虚拟声源. 每个虚拟声源在搜索区域激发一个  $ND \times NR$  的拷贝场平面  $\mathbf{P}_{\text{VTRP}}^{\text{RD}}$ . 这  $N$  个拷贝场平面对应的抛物方程

模型计算网格总数为

$$C_{\text{VTRP}} = N \cdot \frac{Z_{\max}}{dz} \cdot \frac{R_2}{dr}. \quad (8)$$

传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的抛物方程模型计算网格总数之比为

$$\begin{aligned} \frac{C_{\text{MFP}}}{C_{\text{VTRP}}} &= \frac{ND \cdot NR \cdot (R_2 + R_1)}{2N \cdot R_2} \\ &\simeq \frac{ND \cdot R_2}{2N \cdot \Delta R}. \end{aligned} \quad (9)$$

由于最大搜索距离  $R_2$  通常比搜索距离步长  $\Delta R$  大上百倍, 因此虚拟时反实现方法的抛物方程模型计算网格总数要远小于传统匹配场处理. 例如, 当  $R_1 = 1000$  m,  $R_2 = 10000$  m,  $\Delta R = 30$  m,  $Z_1 = 5$  m,  $Z_2 = 115$  m,  $\Delta Z = 2$  m 和  $N = 60$  时,  $C_{\text{MFP}}/C_{\text{VTRP}} = 155$ . 由此得到, 在水平变化波导中, 虚拟时反实现方法可以比传统匹配场处理更快的得到定位模糊平面.

## 4 仿真实验及分析

### 4.1 仿真条件

图 3 给出了一个水平变化浅海波导的环境参数模型. 接收阵和声源处的海水深度分别为 140 m 和 130 m. 海水中的声速剖面为典型夏季声速剖面, 在 60—80 m 处有一强的跃变层.

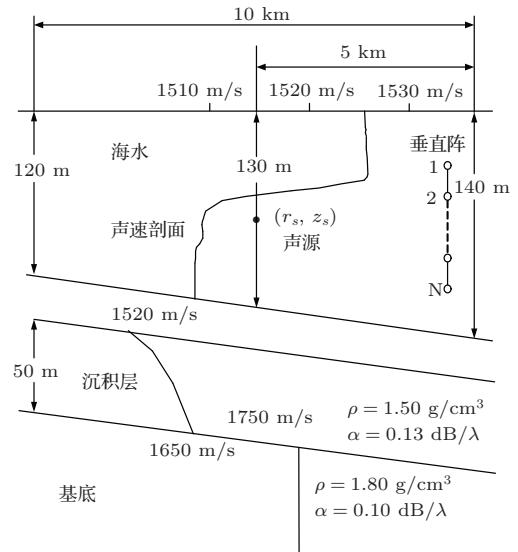


图 3 水平变化浅海波导的环境参数模型

假定整个海洋环境不随时间变化, 因此海洋波导满足互易性. 为方便起见, 忽略海洋背景噪声. 假设搜索区域为与基阵间隔 1000—10000 m 及水

下5—115 m。将该区域按水平和垂直方向划分网格，距离深度搜索网格为 $30\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。对定位平面进行归一化，因此其峰值为0 dB。定位平面上最大值(0 dB)的位置就是声源位置的参数估计。由于设定的声学条件水平变化，所以采用抛物方程模型来计算各网格内的声场，如RAM模型软件<sup>[16,17]</sup>。

采用输出信干比(SINR-Signal to Interference Noise Ratio)<sup>[3,18]</sup>来量化定位性能。若模糊平面的最大值位于真实值位置附近(距离方向 $\pm 500\text{ m}$ ，深度方向 $\pm 10\text{ m}$ )表示定位成功，反之定位失败。输出信干比定义为：在定位正确的前提下，最大输出功率(通常归一化为0 dB)减去所有网格点输出功率从小到大排序后位于75%的值，若定位失败，输出信干比无意义，设定为0 dB。

## 4.2 仿真结果分析

假设目标信号频率170 Hz，位于水深70 m、距离5000 m的位置。采用间距为2 m的60元垂直线列阵接收信号，阵元位于水下20—138 m之间。图4(a)给出了传统匹配场处理的定位模糊平面。峰值出现在真实声源位置，即定位成功。其输出信干比为15.3 dB。图4(b)给出了虚拟时反实现方法

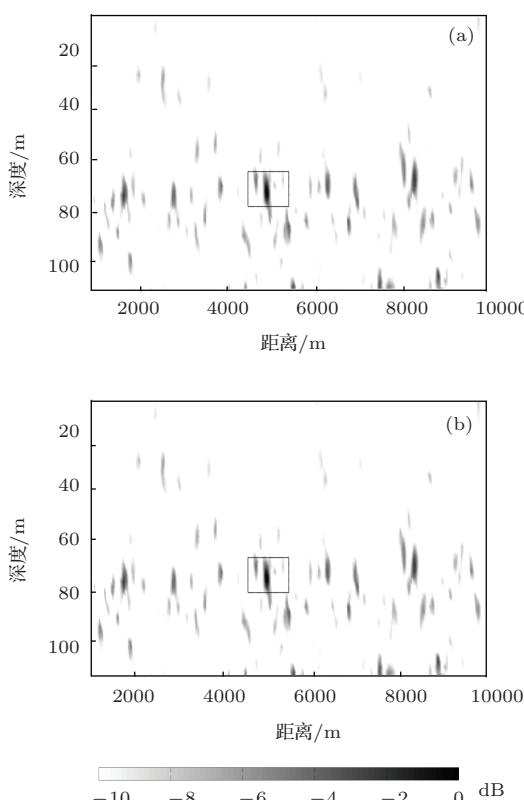


图4 垂直线距离/深度定位模糊平面 (a) 传统匹配场处理; (b) 虚拟时反实现方法

的结果，它同样实现了目标的正确定位，其输出信干比也是15.3 dB。传统匹配场处理和虚拟时反实现方法可以实现同样的定位性能。

传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的平均CPU时间为1356和8 min。上述CPU时间指的是Intel Core i7 CPU的运算时间。这意味着虚拟时反实现方法的计算速度是传统匹配场处理的170倍。其原因是在水平变化波导中，虚拟时反实现方法的抛物方程计算网格总数远小于传统匹配场处理。

以上浅海环境中的垂直线阵仿真实例中，只是考虑了单个频率、单个方位条件下的目标被动定位问题，在实际应用中，需要对360°范围内进行搜索，而且针对宽带水声信号，需要进行多频率点联合处理，假设方位搜索数量为72，并有20个频率点联合处理，则利用虚拟时反定位方法，垂直线阵计算量总的减小量应为 $170 \times 72 \times 20 = 244800$ 倍。

## 5 海试数据处理

本节采用1993年在地中海Elba岛实验<sup>[19-21]</sup>获得的垂直线列阵实验数据验证虚拟时反实现方法的快速性能。实验地点的环境参数和实验配置与图3类似，只是接收阵和声源位置的海水深度分别为128和130 m。由于设定的声学条件水平变化，本节采用抛物方程模型来计算各网格内的声场。采用间距为2 m的48元垂直线列阵接收信号，阵元位于水下18.7—112.7 m之间。声源信号是中心频率为170 Hz的伪随机信号，-3 dB带宽为12 Hz，采样频率1 kHz。分别对定点实验和运动声源数据进行处理，分析水平变化波导中的虚拟时反定位性能。

### 5.1 定点实验数据处理

在进行定点实验时，声源的声源级为163 dB( $1\text{ }\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ )。深度约为 $(80 \pm 2)\text{ m}$ ，距离约 $(5600 \pm 200)\text{ m}$ ，阵元输入信噪比约10 dB。各水听器的数据通过FFT变换到频域。数据处理中每个快拍选择1024点。传统匹配场处理的数据协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 和虚拟时反实现方法的信号矩阵 $\mathbf{X}$ 均由60个快拍数据的平均来估计。

采用文献[20]给出的水平变化模型的参数来计算得到定位模糊平面。利用第一分钟的数据得到传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的定位模糊平面，如图4所示。距离和深度估计结果分别为

$(r, z)_{\text{MFP}} = (5530 \text{ m}, 76 \text{ m})$  和  $(r, z)_{\text{VTRP}} = (5530 \text{ m}, 76 \text{ m})$ , 与文献[19]中距离与深度估计(5560 m, 77 m)接近。传统匹配场处理和虚拟时反实现方法均能实现对声源位置的正确估计。传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的输出信干比分别为10.6 dB和10.9 dB。虚拟时反实现方法的输出信干比略高于传统匹配场处理, 其原因是用于虚拟时反实现方法的数据是通过对数据矩阵的奇异值分解得到。传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的平均CPU时间分别为1305 min和6 min。在水平变化波导中, 虚拟时反实现方法的抛物方程模型的计算网格总数远小于传统匹配场处理, 所以虚拟时反实现方法的计算速度是传统匹配场处理的217倍。

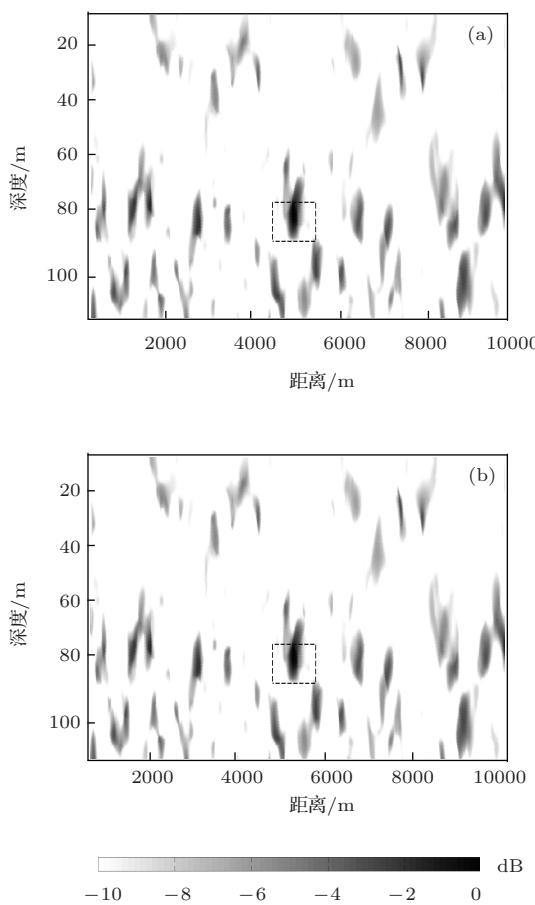


图5 水平变化环境第1 min实验数据定位模糊平面 (a) 传统匹配场处理; (b) 虚拟时反实现方法

## 5.2 运动声源实验数据处理

实验的水声环境、信号频率、带宽等基本参数与定点实验相同。10 min的测量数据中, 每分钟只有30 s发射信号, 因此使用其中比较稳定的25 s数据, 共采用24个快拍的平均来估计协方差矩阵, 每

个快拍用1024点数据。采用文献[20]给出的水平变化模型的参数来计算得到定位模糊平面。

利用传统匹配场处理和虚拟时反实现方法对整个10 min的运动声源数据进行定位, 结果如图6所示。从中可以看出虚拟时反实现方法的输出信干比略高于传统匹配场处理的输出信干比。其中估计距离值与真实值的变化趋势趋于一致, 但与真实值相比存在约500 m的偏差。传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的平均CPU时间为12385 min和55 min。虚拟时反实现方法的计算速度是传统匹配场处理的225倍。

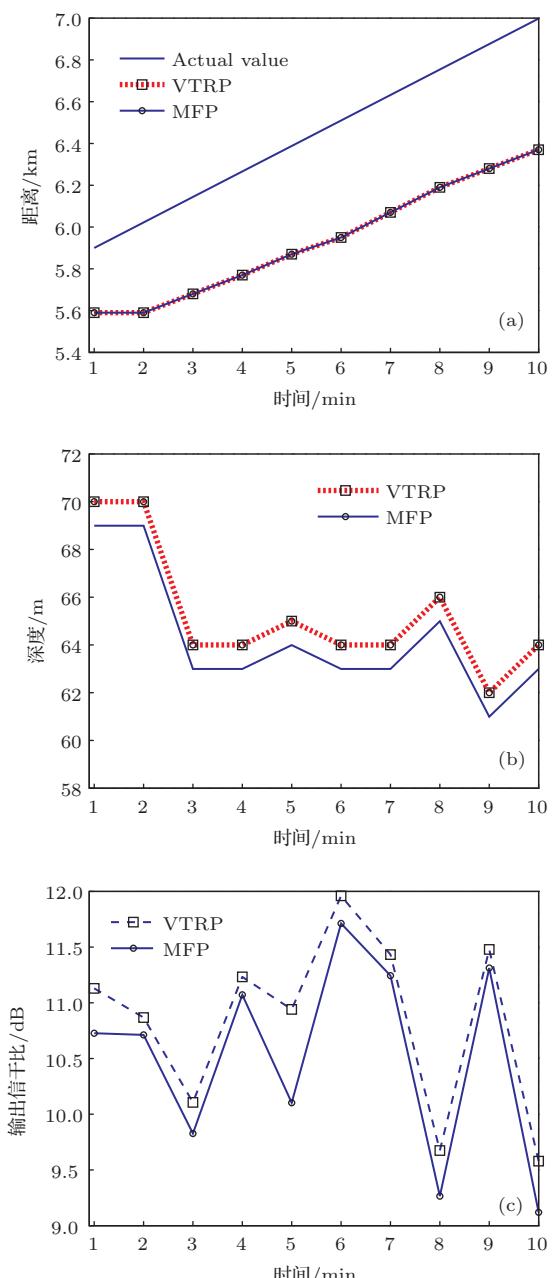


图6 (网刊彩色) 水平变化环境用整个10 min的运动声源实验数据进行定位结果

## 6 结 论

在前向传播的传统匹配场处理中, 每个搜索网格对应拷贝场向量需要逐个的计算出来. 匹配场定位的虚拟时反实现方法是利用介质的互易性和叠加性的后向传播过程. 在水平不变波导中, 尽管传统匹配场处理和虚拟时反实现方法的计算顺序不同, 但它们的简正波计算网格总数是相同的. 然而, 水平不变模型并不能准确的描述大多数实际的海洋环境. 在水平变化波导中, 虚拟时反实现方法的抛物方程模型计算网格总数远小于匹配场处理. 在水平变化导中, 虚拟时反实现方法可以得到与传统匹配场处理相同的定位性能, 但它消耗的CPU时间远小于后者. 利用实验数据验证了在水平变化波导中, 虚拟时反实现方法和传统匹配场处理的定位结果相似, 但前者的计算速度比后者要快得多.

实际使用中, 由于浅海环境的深度不同, 垂直线阵布放深度与孔径大小的确定, 可以进行优化选择. 另外, 可根据具体的定位要求进行带宽的选择, 从而改善定位性能.

## 参考文献

- [1] Tolstoy A 1993 *Matched field processing for underwater acoustics* (Singapore: World Scientific) p10–12
- [2] Baggeroer A B, Kuperman W A, Mikhalevsky P N 1993 *IEEE J. Ocean. Eng.* **18** 401
- [3] Yang K D 2008 *Matched-Field Processing for Underwater Acoustic Array Signals* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press) p165–167 (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]
- [4] Li Z L, Zhang R H, Yan J, Peng Z H, Li F H 2003 *Acta Acustica* **28** 425 (in Chinese) [李整林, 张仁和, 鄢锦, 彭朝辉, 李风华 2002 声学学报 **28** 425]
- [5] Liu Z W, Sun C, Xiang L F, Yi F 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034304 (in Chinese) [刘宗伟, 孙超, 向龙凤, 易锋 2014 物理学报 **63** 034304]
- [6] Jackson D R, Dowling D R 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 171
- [7] Kuperman W A, Hodgkiss W S, Song H C, Akal T, Ferla C, Jackson D R 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **103** 25
- [8] Dungan M R, Dowling D R 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **112** 1842
- [9] Yang C M, Luo W Y, Zhang R H, Qin j X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 94302
- [10] Zhang R H, Li F H 1999 *Science in China, Ser. A* **42** 739
- [11] Katsnelson B G, Petnikov V G 2002 *Shallow-Water Acoustics* (Berlin: Springer-Verlag) p4–6
- [12] Zhou S H, Qi Y B, Ren Y 2014 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **57** 225
- [13] Qi Y B, Zhou S H, Zhang R H, Zhang B, Ren Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044303 (in Chinese) [戚聿波, 周士弘, 张仁和, 张波, 任云 2014 物理学报 **63** 044303]
- [14] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (New York: Springer) p457–523
- [15] Yan S F, Ma Y L 2004 *Chin. Sci. Bull.* **49** 2220
- [16] Collins M D 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 1050
- [17] Collins M D 1992 *J. Acoust. Soc. Am.* **92** 2069
- [18] Duan R, Yang K D, Ma Y L, Lei B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 124301
- [19] Gingras D F, Gerstoft P 1995 *J. Acoust. Soc. Am.* **97** 3589
- [20] Gerstoft P, Gingras D F 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **99** 2839
- [21] Krolik J L 1996 *IEEE Trans. on Signal Processing* **44** 2605

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

Zhang Tong-Wei<sup>1)2)†</sup> Yang Kun-De<sup>2)</sup>

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

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

(Received 16 April 2014; revised manuscript received 31 May 2014)

## Abstract

Matched-field replica vector should be calculated using parabolic equation in a range-dependent waveguide, this means that the matched-field localization is too computationally intensive, hence its engineering application is seriously hindered. A virtual time-reversal method for passive source localization for a range-dependent waveguide is presented. The number of parabolic equation computational grids in virtual time-reversal method is much smaller than that in matched-field processing for a range-dependent waveguide. Thus, the computational cost can be greatly reduced. Different from the matched-field processing, the virtual time-reversal method is a back-propagation process, which explores and utilizes the properties of reciprocity and superposition. It can be realized by weighting the replica surface with the complex conjugate of the data received on the corresponding element, followed by a summation of the processed received data. This performance of virtual time-reversal method for source localization is validated through numerical simulations and data from the Mediterranean Sea.

**Keywords:** virtual time-reversal method, matched-field localization, range-dependent waveguide

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

**DOI:** 10.7498/aps.63.214303

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10774119, 11174235), 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