

基于频散特征的单水听器模式特征提取及 距离深度估计研究*

李焜 方世良[†] 安良

(东南大学水声信号处理教育部重点实验室, 南京 210096)

(2012 年 11 月 29 日收到; 2013 年 1 月 9 日收到修改稿)

针对浅海环境中低频宽带水声脉冲信号, 研究基于频散特征结合时频分析的单水听器距离和深度估计方法. 以简正波理论为依据, 将单水听器上的接收信号表示成一系列传播模式之和的形式, 分析了经典波导环境下的频散现象, 采用自适应径向高斯核函数的时频分析方法表征接收信号的频散特征. 为提高时频分辨率, 采用自适应径向高斯核函数的时频分布来提取频散关系曲线中传播模式的到达时间差, 利用模式的到达时间差估计声源的距离. 采用多模式联合匹配的方式, 通过二值掩模滤波的时频滤波方法, 提取所需的模式. 通过计算实际提取出的模式能量与预测的模式能量之间的误差, 建立代价函数, 并通过模式能量匹配的方式, 确定声源的深度. 通过对基于 Pekeris 波导模型的浅海环境进行仿真验证, 结果表明: 自适应径向高斯核函数的时频分析方法能够很好地反映信号本身的频散特征, 具有较高的时频分辨率, 克服了传统短时傅里叶变换时频表征的限制, 使得模式在时频域更加容易辨识和分离; 从测距效果来看, 不同模式组合下的距离估计结果不同, 采用在时频面上具有较高能量的模式, 可得到较为准确的距离估计; 选用高能量的模式所得的距离估计的相对误差小于 2%. 在定深方面, 参与联合匹配的模式个数越多, 代价函数的峰值更加地尖锐, 同时具有低的伪峰, 深度估计的性能会进一步提升. 该工作对于研究低频水声脉冲信号的分离和提取具有重大意义.

关键词: 频散信道, 时频分析, 单水听器, 定位

PACS: 43.30.Bp, 43.60.Hj

DOI: 10.7498/aps.62.094303

1 引言

确定水下声源的位置是水声领域中的一个关键问题. 考虑到水声环境的复杂性, 为了能够更准确地对水下目标实施定位, 多数文献从声传播的角度出发, 使用匹配场定位技术来确定声源的位置^[1-4]. 匹配场定位技术是声场传播规律与水声信号处理相结合的技术, 它充分考虑了水声传播规律的特点, 利用声场传播模型计算预测的拷贝声场, 并与实际测量声场进行相关, 从而确定水下目标的位置. 传统的匹配场定位技术, 一般多采用阵列的处理方式, 具有大的孔径, 以获得良好的阵增益和分辨性能. 但是采用多阵元的大阵列, 一方面增加了系统的开销, 给基阵的设计带来不便; 另一方面,

在实际海水中布放时会受到诸如阵倾斜以及阵元失效等问题, 增加了对水下目标定位的难度. 此外, 在某些应用方面, 由于受安装平台尺寸的限制, 也使得多阵元的布放无法实现. 因此, 可否采用较少的水听器尤其是单个水听器来对目标实施定位, 激发了研究人员的兴趣, 不断激励着相关研究人员为此进行探索.

使用单水听器进行定位的一个难点在于可利用的信息量太少, 主要是空间信息的缺乏. 多数文献借助宽带信号的多频点特性, 采用“频点换孔径”的思想, 对宽带目标信号实施定位. 文献 [5] 将范数的不同表达式引入匹配场定位函数中, 研究了利用单个水听器来对目标进行定位; 文献 [6] 采用宽带相干匹配场处理的方式使用单个水听器来对目标进行定位; 文献 [7] 针对宽带信号提出了基于时延

* 国家重大基础研究项目 (批准号: 6131222) 和国家自然科学基金 (批准号: 11104029, 11104141) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: slfang@seu.edu.cn

匹配的单水听器定位方法; 文献 [8] 针对超低频信号采用模态滤波的方法来实现单水听器的声源定位; 文献 [9] 利用单水听器采用直方图滤波的方法对浅海中的移动目标进行定位; 文献 [10] 讨论了在合作方式下借助波导不变量的性质来对目标实施定位; 文献 [11] 利用单水听器使用迭代优化算法反演声源的位置并进行地声参数估计; 文献 [12] 则研究了利用单水听器对海洋生物实施定位的方法。

对于浅海中传播的信号而言, 受海洋媒质的影响, 会产生频散效应。频散现象是信号的传播速度与信号的频率之间存在一定的关系, 使得不同的频率分量会以不同的速度传播, 同时受海水吸收和衰减的影响, 造成接收波形的失真。就频散本身而言, 它一方面对发射的信号进行了更为复杂的变化, 引入了具有非线性时频形状的多分量结构, 增加了接收信号的复杂性, 使得分量之间不容易进行辨识和分离; 但另一方面, 频散本身蕴含了关于海洋环境和信号的相关信息, 通过分析频散波导中所接收到的信号, 可有助于我们提取目标信号的特征并获得目标的位置。

对海洋波导中频散现象的研究, 多集中于时频分析的方法, 通过时频域 2 维结构来进行联合表征 [13–15]。根据简正波理论 [16], 接收信号是一系列传播模式叠加所组成的, 不同的模式以不同的群速度传播, 因而将以不同的时间间隔到达接收机, 其在时频面上的分布蕴含了传播所包含的位置信息, 声源的位置不同就会表现出不同的频散结构。利用时频表征来分析频散现象, 最关键的是所采用的时频分析方法可准确地反映所分析的信号, 并通过相应的处理方法能在时频面上孤立或是分离出每个传播的模式。Bonnel 等 [17–19] 提出了基于单水听器的时频翘曲算法 (warping)。此算法通过对接收信号进行酉变换操作, 将每个模式转变成近似 Dirac 函数, 从而补偿波导的频散效应, 使得每个模式在短时傅里叶变换 (STFT) 后能够在时频域上实现分离, 更好地获取每个模式的特征, 从而进行声源位置估计 [20] 或地声参数反演 [21]。

传统的时频分析方法如基于线性时频表示的 STFT 受不确定性原理的影响, 其时频分辨率较低; 而基于二次型时频表示的 Wigner-Ville 分布、Choi-Williams 分布等存在严重的交叉项干扰问题。另外, 传统的时频分析方法都是基于固定核函数的设计方法, 并不能很好地反映水声脉冲信号短时瞬态的非平稳特性。针对这一不足, Baraniuk 等 [22] 提出了基于信号的自适应径向高斯核函数 (ARGK) 的时

频分析方法, 其核函数的形状根据所分析的信号自适应地变化, 提高了对于非平稳信号的分辨能力。Li 等 [23–25] 通过应用与 ARGK 时频分布相类似的自适应最优核函数的时频分析方法来获取简正波的频散特征, 对海底声速和密度等参数的反演进行了研究。

本文针对浅海传播的低频宽带水声脉冲信号, 借鉴 Li 等反演时采用自适应时频分布提取简正波群延迟的思路, 对利用单水听器进行定位的问题进行了研究。分析了经典 Pekeris 波导模型中的频散现象, 采用自适应径向高斯核函数的时频分析方法表征接收信号的频散特征; 通过采用自适应径向高斯核函数的时频分布来提取频散关系曲线中传播模式的到达时间差, 利用模式的到达时间差估计声源的距离; 通过二值掩模滤波, 估计模式的能量, 并采用多模式能量联合匹配的方式, 确定声源的深度。

2 海洋中的模式传播及频散

在与距离无关的环境中, 位于深度为 z_s 的一个脉冲声源, 经过海洋波导传播后, 在距离为 r , 深度为 z 处所接收到的声场可以表示为 [16]

$$Y(f) = \frac{e^{i4\pi}}{\sqrt{8\pi\rho(z_s)}} S(f) \times \sum_{m=1}^M \Psi_m(z) \Psi_m(z_s) \frac{e^{ik_{rm}(f)r}}{\sqrt{k_{rm}(f)r}}, \quad (1)$$

其中, $S(f)$ 为声源信号的频谱, $\Psi_m(z)$ 为第 m 阶与深度有关的模式函数, $k_{rm}(f)$ 为第 m 阶模式的水平波数, $\rho(z_s)$ 为声源深度处的海水密度, M 为总的传播模式数。

(1) 式可进一步写为 [21]

$$Y(f) = \sum_{m=1}^M B_m(f) e^{i\Phi_m(f)}, \quad (2)$$

其中, $B_m(f) = QS(f)\Psi_m(z)\Psi_m(z_s)/\sqrt{k_{rm}(f)r}$ 为接收信号的幅度, Q 为 (1) 式所包含的常数项, $\Phi_m(f) = k_{rm}(f)r$ 为接收信号的相位。

从 (2) 式可以看出, 接收点处的声场是各阶简正波模式叠加所组成的。对于每一个模式, 定义如下的相速度和群速度分别为

$$v_m(f) = \frac{2\pi f}{k_{rm}(f)}, \quad (3)$$

$$u_m(f) = 2\pi \frac{df}{dk_{rm}(f)}. \quad (4)$$

相速度和群速度刻画了频率与波数之间的关系, 其中相速度是以某一特定相位传播的速度, 它

代表了等相位面的传播速度, 而群速度则表示信号不同频率分量传播的速度, 它反映了信号水平传播的速度, 也是能量传播的速度, 它是频散关系中最重要为的量. 从以上的分析可以看出, 频散现象是信号的传播速度与信号的频率之间存在一定的关系. 对于在浅海中传播的低频脉冲信号而言, 其频散效应尤为明显. 为说明波导中的频散效应, 下面针对典型浅海环境模型 Pekeris 波导进行分析.

3 典型海洋环境的频散曲线

Pekeris 波导是一个具有两层的分层结构的海洋波导, 它与实际的海洋环境更为接近, 如图 1 所示, 相关参数设置为海底声速 $c_2 = 1800 \text{ m/s}$, 海底密度 $\rho_2 = 1800 \text{ kg/m}^3$, 海水声速 $c_1 = 1500 \text{ m/s}$, 海水密度 $\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$. Pekeris 波导中, 海底处于液态海底, 海底声速大于海水中的声速, 同时海底的密度也大于海水中的密度.

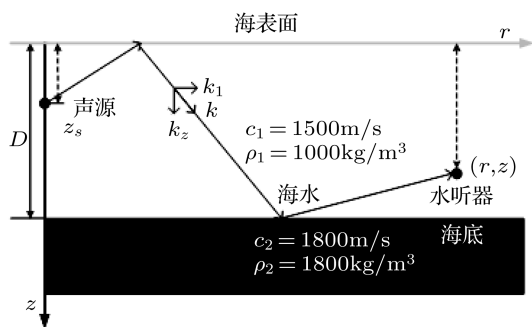


图1 Pekeris 波导模型

Pekeris 波导中的频散关系, 可以通过如下的特征方程来表示^[16]:

$$k_{zm1}D + \arctan\left(\frac{\rho_2 k_{zm1}}{\rho_1 j k_{zm2}}\right) = m\pi, \quad (5)$$

其中, k_{zm1} 为第 m 阶模式在海水中的垂直波数; k_{zm2} 为海底的垂直波数.

将水平波数和垂直波数之间的关系 $k_m^2 = k_{zm}^2 + k_{rm}^2 = (2\pi f)^2/c^2$ 代入上面的特征方程中, 则水平波数可以表示为

$$k_{rm} = \frac{1}{\sqrt{v_m^2/c_1^2 - 1}} \times \left[\frac{m\pi}{D} - \frac{1}{D} \tan^{-1} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{v_m^2/c_1^2 - 1}{1 - v_m^2/c_m^2}} \right) \right]. \quad (6)$$

Pekeris 波导中各模式的最低频率称为截止频率, 可表示为

$$f_{om} = \frac{(2m-1)c_1}{4D\sqrt{1 - \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2}}. \quad (7)$$

模式的截止频率定义了波导中各阶模式所能传播的下限频率. 当频率低于截止频率时, 不能激发有效的模式, 因而对声传播没有贡献.

通过 (3) 式和 (4) 式可以获得相应的相速度和群速度. 图 2 给出了 Pekeris 波导中 $D = 120 \text{ m}$ 的前 4 个模式的相速度和群速度随频率变化的曲线.

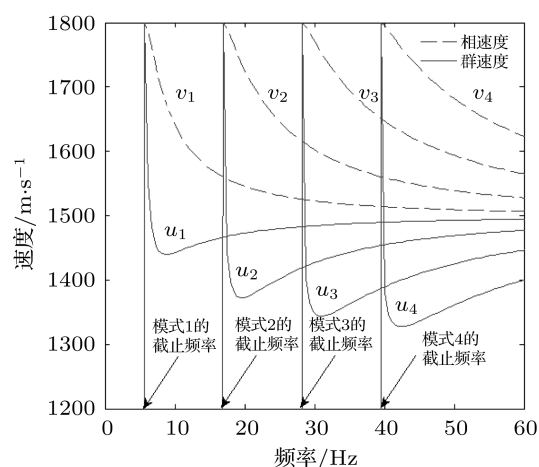


图2 Pekeris 波导中相速度和群速度随频率的变化曲线

从图中可以看出, Pekeris 波导中相速度和群速度在高频段均趋近于海水中的声速 c_1 ; 而在截止频率处, 这两种速度均趋近于海底声速 c_2 . 相速度随频率单调下降, 而群速度则在某一频率上存在极小值, 此极小值称为艾里相.

4 频散效应的时频表征

从以上模式的频散曲线中可以看出, 同一频率处, 不同的传播模式具有不同的传播速度, 描述的是模式之间的频散关系, 称为模态间频散; 而同一模式在不同的频率处具有不同的传播速度, 则反映了单一模式的频散现象, 称为模态内频散^[21]. 对于宽带脉冲而言, 既存在模态间频散也包含模态内频散, 每个模式以不同的群速度传播, 因而以不同的时间到达接收水听器. 各模式的到达时间定义为^[18]

$$t_m(f) = \frac{r}{u_m(f)}. \quad (8)$$

由此可以看出, 各模式的到达时间通过声源与接收机之间的距离以及各模式的群速度相联系. 图

3 给出了 Pekeris 波导中传播距离为 15km 的前 4 个传播模式到达时间随频率的变化关系。

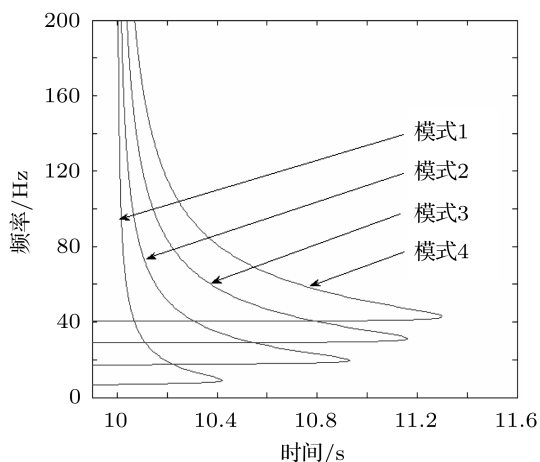


图3 模式到达时间随频率的变化

从图中可以看出, 受激发频率的不同, 每个模式从低频的艾里相开始一直延伸到最高频率, 各模式都具有不同的到达时间. 从频散曲线上看, 高频分量的传播要快于低频分量, 在高频段, 频散的作用渐渐减弱, 频散曲线逐渐变成直线, 各模式间传播的时间间隔变小; 而在低频段, 频散曲线随着频率的降低, 各模式间传播的时间间隔变大, 频散效应更加地明显。

通过以上分析可知, 受模式群速度的影响, 各模式在不同频率处具有不同的到达时间. 因此, 可通过时频分析的方法对接收信号的频散效应进行表征. 相应的时频分布可以表示为

$$R(t, f) = \sum_{m=1}^M A_m(f) \delta\left(t - \frac{r}{u_m(f)}\right), \quad (9)$$

其中, $A_m(f)$ 代表接收信号中各模式所对应的幅度, $\delta\left(t - \frac{r}{u_m(f)}\right)$ 则反映了每个模式在时频面上

的位置。

由于每个模式在时频面上的分布不同, 具有不同的形状, 因此, 时频分析最关键的是所采用的时频分析方法可准确地反映所分析的信号, 且能够更好地在时频域辨识和分离各自的模式. 采用 STFT 的方法, 对 Pekeris 波导深度为 120 m, 距离分别为 5 km 和 15 km 以及距离为 15 km, 波导深度分别为 40 m 和 80 m 的 4 个传播模式进行仿真, 相应的结果如图 4 所示, 其中的虚线表示理论的频散曲线。

从图中可以看出, 在同一波导深度下, 随着距离的增加, 模式之间的分离性变大, 模式低频段的频散效应更加明显; 而随着波导深度的减小, 各模式的截止频率升高, 模式的频散效应更加的明显, 频散向更高的频段扩散, 在时频面上的分离性更大. 但从整体上看, STFT 的方法受时频分辨率的限制, 在时频表征上并不理想。

为了提高时频分辨率, 采用 ARGK 的时频分析方法, 相应的结果如图 5 所示. 可以看出, ARGK 较 STFT 能够获得更高的分辨率, 可明显地反映出所分析信号的特征。

5 定位原理

5.1 距离估计

由以上的分析可知, 频散信道中接收到的信号是由多个分量所组成的, 每个分量根据传播模式的不同, 在时频面上会有不同的形状. 各模式的到达时间蕴含了声源的距离信息, 因此可通过测定模式间的到达时间差来估计声源的距离。

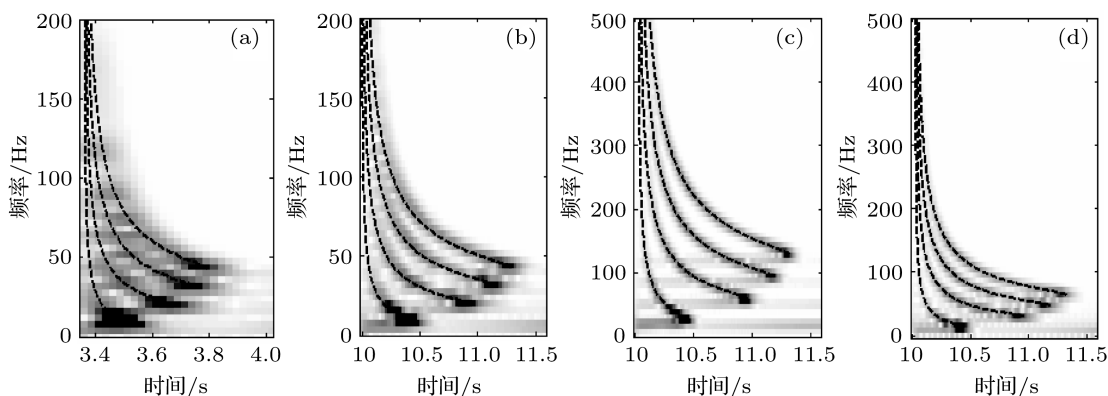


图4 STFT 时频分析的结果 (a) $D = 120$ m, $R = 5$ km; (b) $D = 120$ m, $R = 15$ km; (c) $R = 15$ km, $D = 40$ m; (d) $R = 15$ km, $D = 80$ m

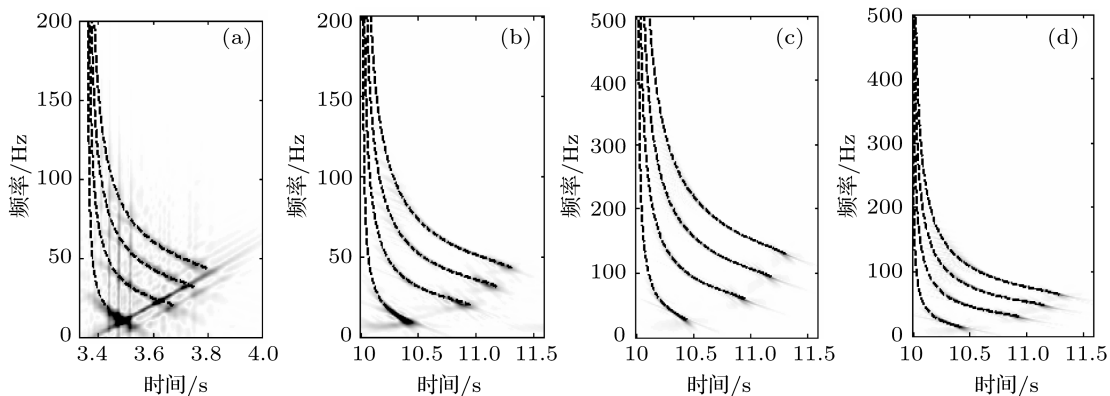


图5 ARGK 时频分析的结果 (a) $D = 120$ m, $R = 5$ km; (b) $D = 120$ m, $R = 15$ km; (c) $R = 15$ km, $D = 40$ m; (d) $R = 15$ km, $D = 80$ m

对于时间随频率变化的非平稳信号, 在频率 f 处, 第 m 阶模式传播的时间可表示为

$$t(m, f) = t_e(f) + \frac{r}{u_m(f)}, \quad (10)$$

其中, $t_e(f)$ 为发射信号的时间随频率的变化, 也即是发射信号的调制率.

则两个模式的到达时间差可表示为

$$\Delta T_{mn}(f) = r \left[\frac{1}{u_m(f)} - \frac{1}{u_n(f)} \right] = r K_{mn}(f), \quad (11)$$

其中, $K_{mn}(f)$ 称为群慢度之差.

模式的群速度可通过理论计算求出, 而模式的到达时间差可通过 ARGK 时频分析来获取, 从而可确定出声源的距离.

5.2 深度估计

对于声源深度的估计, 本文借鉴文献 [26] 利用水平阵列采用频率波数域变换来定深的匹配模式的思想, 对提取出的各模式采用模式能量匹配的方法进行深度估计. 令 $a_{m,\text{real}}$ 为从实际接收信号提取出的第 m 阶模式的能量, $a_{m,\text{replica}}$ 为拷贝场信号中提取出的第 m 阶模式的能量, 则构造如下的代价函数:

$$J(z) = -10 \log \left(\sum_{m=1} \frac{(a_{m,\text{real}} - a_{m,\text{replica}})^2}{N_m} \right), \quad (12)$$

其中, N_m 为估计所用的模式数.

通过 (12) 式所确定的代价函数, 在声源深度范围内进行峰值搜索, 则可确定声源的深度

$$\hat{z}_s = \arg \max_z J(z). \quad (13)$$

5.3 二值掩模滤波

由以上的分析可以看出, 使用单水听器进行声源的位置估计需要提取所需的传播模式, 估计出模式的到达结构以及模式的能量. 由于各模式在时频面上的出现时间不同且能量分布不均匀, 为准确提取定位所需模式, 在对接收信号进行 ARGK 时频分析的基础上, 本文采用类似文献 [26] 中的二值掩模滤波的方法进行模式的特征提取.

二值掩模滤波是一种时频滤波的方法, 通过二值掩模滤波, 可以提取所需的模式. 所谓的二值, 是指其在时频面某个位置上的取值只有 0 和 1 两种, 即

$$M(t, f) = \begin{cases} 1, & t \in [t_1, t_2], \quad f \in [f_1, f_2], \\ 0, & t \notin [t_1, t_2], \quad f \notin [f_1, f_2]. \end{cases} \quad (14)$$

由于各阶模式在时频面上的分布并非是理想的曲线, 而是具有一定宽度的带状区域, 因此, 需要对所设计的二值掩模滤波器中的频散曲线进行加宽处理. 采用图像形态学中的膨胀方法 [27], 实现对各模式的扩充. 图 6 给出了图 5(d) 表示的第 4 阶模式进行膨胀前后的掩模滤波输出.

通过 ARGK 时频分析的方法, 确定模式在时频面上的位置, 设计二值掩模滤波矩阵, 将二值掩模滤波矩阵与接收信号的时频矩阵相乘, 即可提取出相应的模式.

6 仿真实验

6.1 仿真环境及参数设置

本文选用经典的 Pekeris 波导模型, 波导环境参数如图 1 所示, 其中海水深度 $D = 120$ m. 发射信

号为线性调频信号, 频带范围为 40—120 Hz, 脉冲宽度为 0.05 s. 声源位于水下 30 m, 距离接收机为 15 km. 单一接收水听器放置于海底. 此波导中频率为 120 Hz 所激发的 9 个模式形状函数随深度的变化如图 7 所示. 从图中可以看出, 各阶模式随深度

的变化类似正弦曲线的形状, 第 m 阶模式有 m 个过零点.

图 8 分别给出了脉冲响应各阶模式的理论到达时间随频率变化的频散曲线以及发射信号经过此波导后频散曲线的变化.

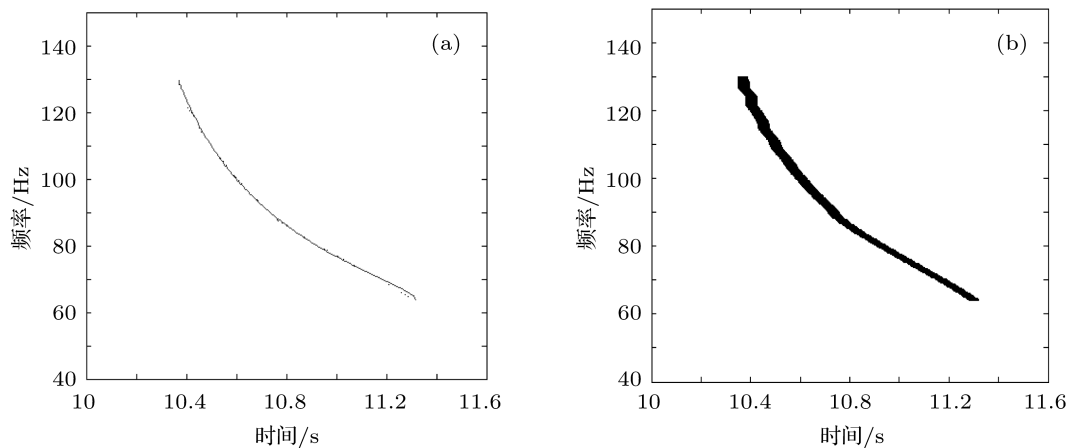


图 6 二值掩模滤波器膨胀前后的输出 (a) 未经膨胀的二值掩模滤波器; (b) 经膨胀之后的二值掩模滤波器

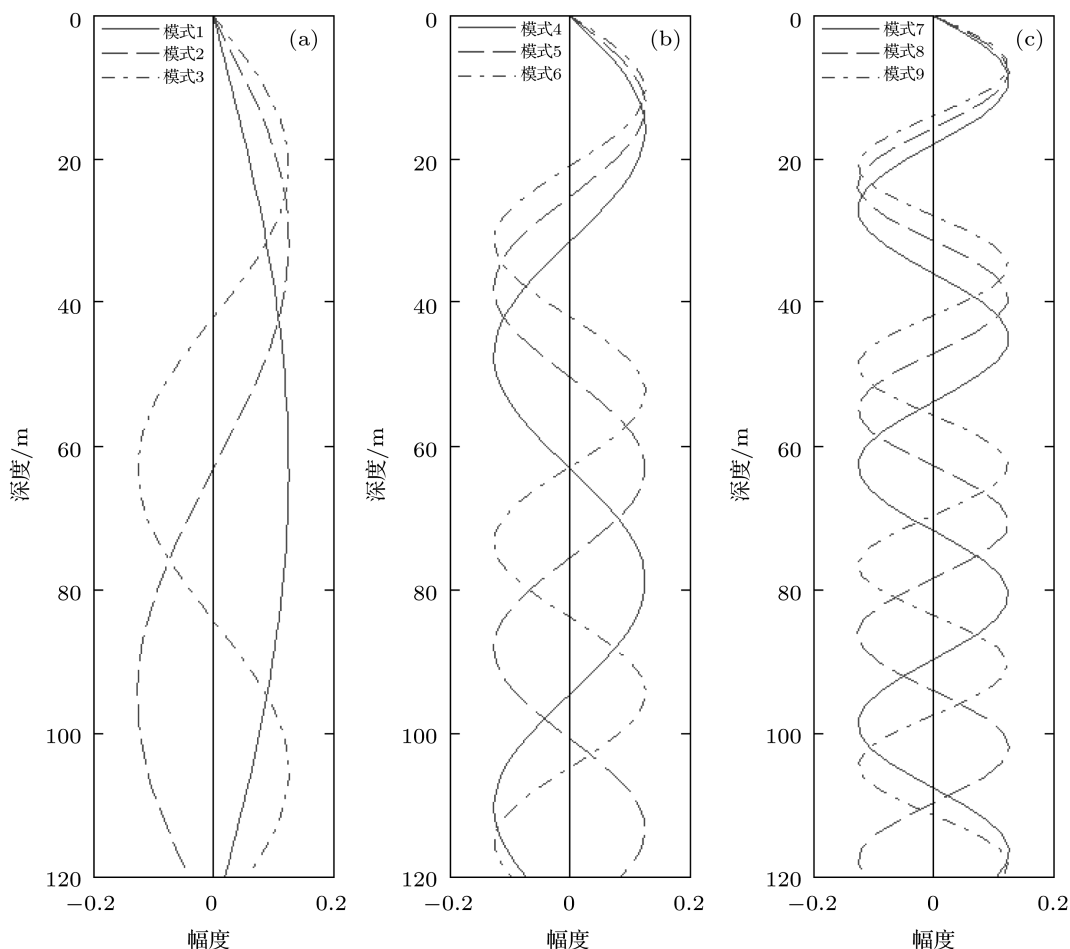


图 7 模式形状函数随深度的变化

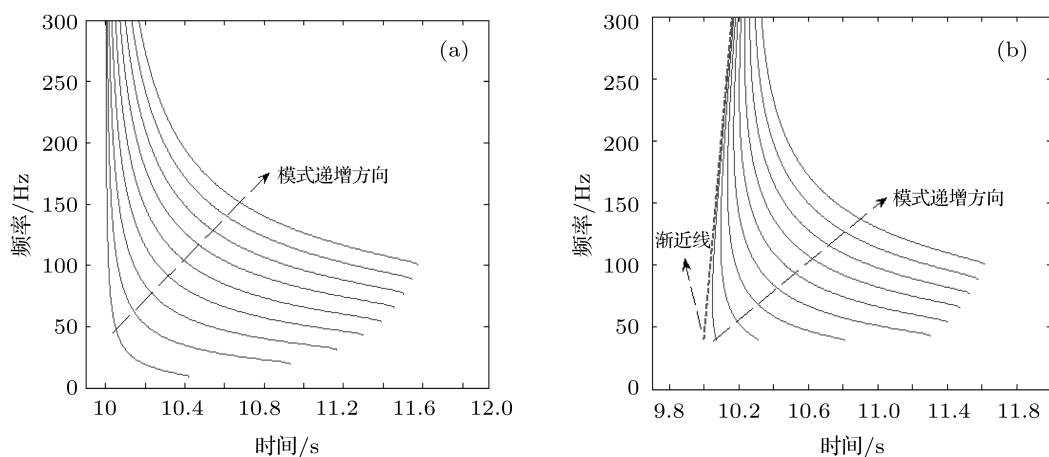


图8 各阶模式到达时间随频率变化的频散曲线 (a) 脉冲响应的理论频散曲线; (b) 接收信号的理论频散曲线

从图8可以看出, 传播的不同模式随频率的变化具有不同的到达时间, 高频分量的传播要快于低频分量, 各模式的到达时间随着模式数的增加而变慢. 受激发频率的不同, 每个模式从低频的艾里相开始一直延伸至最高频率, 各模式的频散曲线结构各不相同. 1阶模式的频散效应持续时间最短, 频散曲线主要集中在低频段; 随着模式数的增加, 各模式频散曲线的持续时间逐渐增大. 在高频段, 频散的作用渐渐减弱, 各模式间传播的时间间隔变小, 频散曲线逐渐变成直线; 随着频率的降低, 各模式间传播的时间间隔变大, 频散效应更加地明显. 对于接收信号的频散曲线而言, 其频散结构与图8(a)的情形相类似, 但受发射信号调制率的影响, 频散曲线将以发射信号的调制率作为斜率而发生倾斜.

6.2 时频表征结果

发射信号通过此波导后, 单一接收水听器上所接收到的信号如图9(a)所示, 传播的各阶模式的出现范围已在图中标出, 相应的时频结构如图9(b)所示, 其中的虚线代表理论的频散曲线.

从时域波形图中可以看出, 接收信号是由传播的各阶模式叠加所组成的, 信号波形在时间上被展宽, 产生波形失真, 且受波导频散效应的影响, 各模式传播所出现的时间不同. 从时频图中可以看出, 不同的模式具有不同的时频形状, 每个模式在时频面上的分布具有不同的能量, 能量的变化反映了模式形状函数随深度的变化. 其中, 模式6和模式7由于靠近模式函数波峰(谷)的位置, 因而其能量最强, 相应的时频表征具有很强的亮度; 而模式1的持续时间最短, 所引起的频散效应最弱, 到达接收机呈短时脉冲信号, 因而其能量较小, 在时频面上

未被显示; 而模式4由于处在模式函数的过零点位置, 因此不被激发, 从而在时频面上不出现第4阶模式. 另外, 由于峰值能量在模式8和模式9的激发频率之下, 因此模式8和模式9的能量较小, 相应的时频表征的亮度较弱.

6.3 模式提取结果

在ARGK时频面上, 对每个模式使用经膨胀之后的二值掩模滤波方法进行提取, 相应的结果如图10所示.

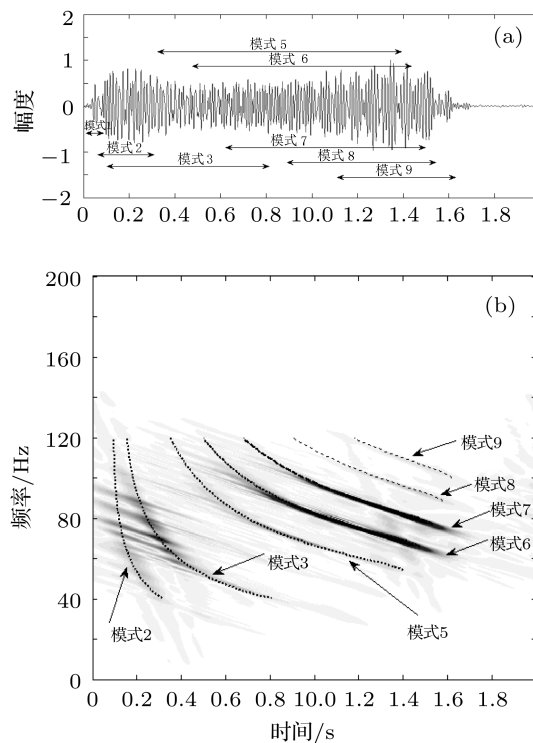


图9 单水听器上的接收信号和相应的时频显示 (a) 接收信号的时域波形及各阶模式的显示范围; (b) 接收信号的时频结构

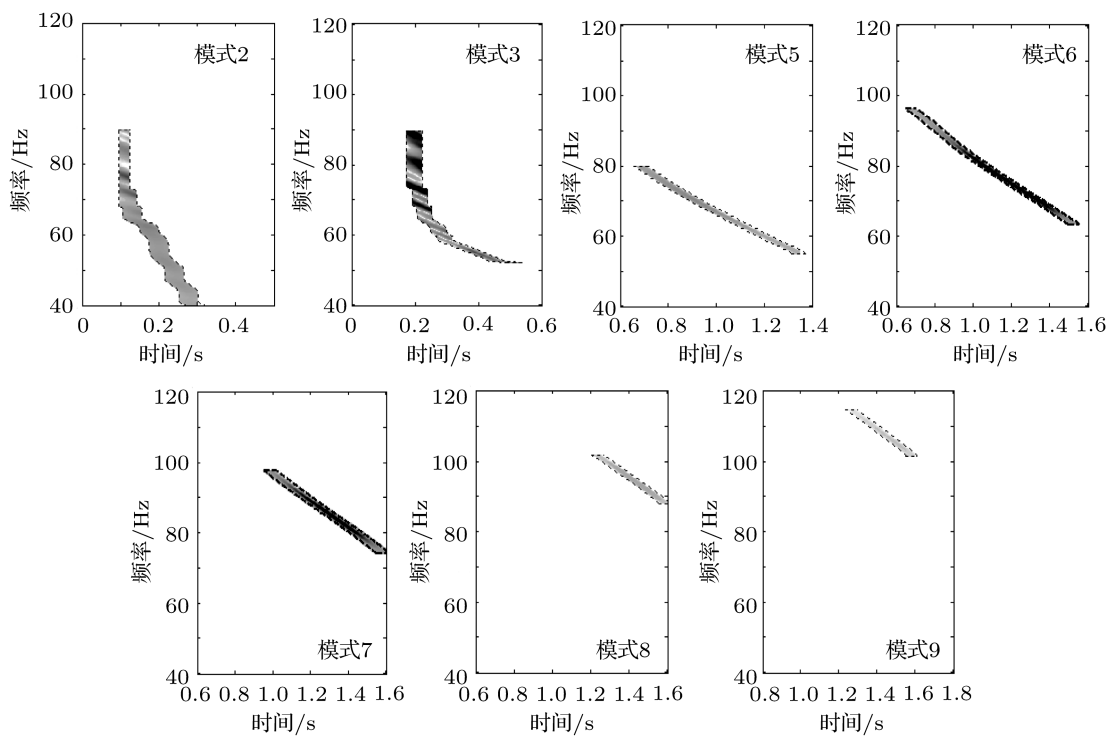


图 10 7 个模式提取后的综合显示

6.4 定位结果分析

在各模式的出现频段内, 提取出各频点对应的到达时间差获得声源的距离. 由于各模式所对应的截止频率不同, 因此本文在各模式最大相同的频带范围来衡量测距结果. 表 1 给出了在相同频带内选用不同模式组合情况下的距离估计结果.

表 1 单水听器的距离估计结果

选用的模式数	平均值/km	相对误差/%
模式 3 和模式 5	16.7373	11.582
模式 3 和模式 6	16.0872	7.248
模式 3 和模式 7	15.7616	5.077
模式 5 和模式 6	15.2639	1.759
模式 6 和模式 7	15.2166	1.444

从表中的结果可以看出, 不同模式组合下的距离估计结果稍有不同. 其中, 模式 6 和模式 7 因在时频面上的能量较高, 易于辨识和分离, 因此, 估计的结果较为准确, 其距离估计相对误差小于 2%. 而模式 3 因其所具有的能量较低, 时频表征的效果较差, 使得估计得到的相对到达时间的误差较大, 从而与其他模式组合之后对测距的结果会有一定的影响.

采用模式能量匹配的方式进行深度估计, 各模

式的能量分布如图 11 所示. 选用能量较高的模式 5、模式 6 以及模式 7 三个模式, 以步距为 5 m, 在深度搜索范围为 5—105 m 的范围内进行多模式能量匹配确定声源的深度, 相应的结果如图 12 所示.

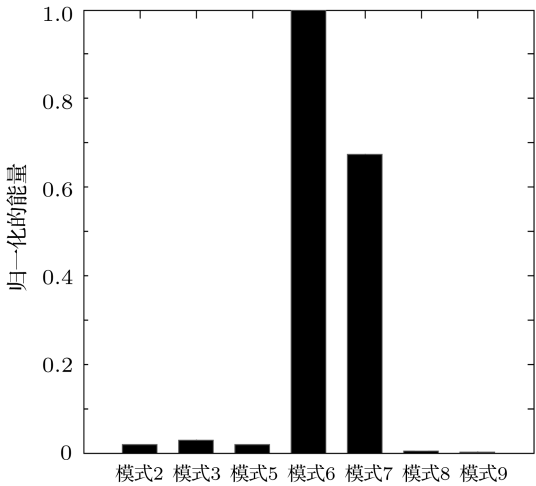


图 11 各阶模式的能量分布

从图中可以看出, 对所提取的模式采用模式能量匹配的方式进行搜索, 所确定出的峰值较为明显, 但同时, 不同模式的组合方式在定深效果上会有所差别. 其中, 模式 5 和模式 7 的模式能量匹配效果相对于模式 6 和模式 7 存在更多的伪峰, 同时参与模式匹配的个数越多, 匹配所能获得的判别信息增加,

使得主峰值更加地尖锐,同时具有低的伪峰,从而深度估计的性能有所提升.

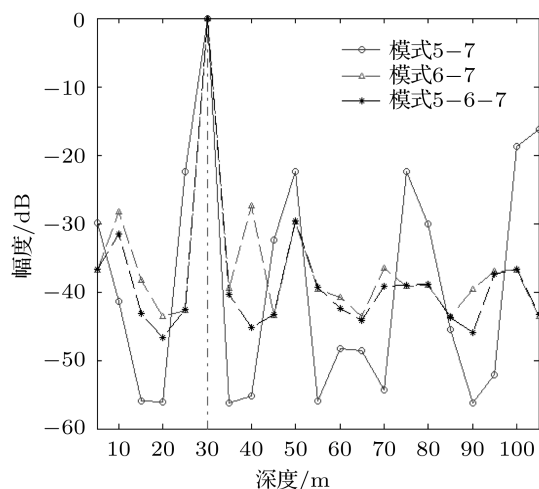


图 12 深度估计的结果

7 结 论

利用单水听器来对水下声源实施定位一直是国内外研究的热点和难点. 本文针对浅海环境中低频宽带水声脉冲信号, 通过理论分析和仿真计算对基于频散特征的单水听器定位问题进行了研究. 分

析了经典 Pekeris 波导环境下的频散现象, 采用自适应径向高斯核函数的时频分析方法表征接收信号的频散特征, 提取频散关系曲线中传播模式的到达时间差估计声源的距离. 通过二值掩模滤波的时频方法, 估计模式的能量, 采用多模式联合匹配的方式, 确定声源的深度.

通过对基于 Pekeris 波导模型的浅海环境进行仿真验证, 结果表明: 自适应径向高斯核函数的时频分析方法能够很好地反映信号本身的频散特征, 具有较高的时频分辨率, 克服了传统短时傅里叶变换时频表征的限制, 使得模式在时频域更加容易辨识和分离, 模式频散曲线的提取更加地准确; 从测距结果来看, 不同模式组合下的距离估计结果不同, 采用在时频面上具有较高能量的模式, 可得到较为准确的距离估计; 采用二值掩模滤波的方法能够获得可靠的模式的特征参数; 在定深方面, 参与联合匹配的模式个数越多, 深度估计的性能会进一步的提升.

本文对经典的 Pekeris 波导模型中利用模式频散特征的定位问题进行了研究, 证明了此方法具有一定的可行性. 但由于海洋环境存在的时变性以及不确定性, 如何对更为复杂的海洋环境利用频散特征来进行定位的问题, 有待进一步的研究.

- [1] Porter M B, Tolstoy A 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **2** 161
- [2] Xu W, Xiao Z, Yu L 2011 *IEEE J. Ocean. Eng.* **36** 273
- [3] Wu K M, Ling Q, Wu L X 2011 *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, Xi'an, September 14–16, 2011 p1
- [4] Wang Q, Jiang Q 2010 *EURASIP J. Advances. Signal Processing.* **483524** 1
- [5] Frazer L N, Pechols P I 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **88** 995
- [6] Lee Y P 1998 *IEEE Oceans '98 Conference Proceedings Nice*, September 28–October 1 1998 p1074
- [7] Jesus S M, Porter M B, Y Stéphan, Démoulin X, Rodriguez O C, Ferreira Coelho E M M 2000 *IEEE J. Ocean. Eng.* **25** 337
- [8] Touzé G L, Torras J, Nicolas B, Mars J 2008 *IEEE Oceans*, Quebec City, September 15–18, 2008 p1
- [9] Jemmott C W, Culver R L, Bose N K 2008 *IEEE Conference on Signal, Systems and Computers*, Pacific Grove, October 26–29, 2008 p283
- [10] Tao H L, Hickman G, Krolik J L, Kemp M 2007 *IEEE Oceans Aberdeen*, June 18–21, 2007 p1
- [11] Gac L J C, Asch Mark, Stéphan Y, Demoulin X 2003 *IEEE J. Ocean. Eng.* **28** 479
- [12] Tiemann C O, Thode A M, Straley J, O'Connell Victoria, Folkert K 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **120** 2355
- [13] Chen C S, Miller J H, Boudreaux G F, Potty G R, Lazauski C J 2003 *IEEE Oceans 2003. proceedings*, San Diego, September 22–26, 2003 p2903
- [14] Touzé G L, Nicolas B, Lacoume J L, Mars J, Fattaccioli D 2005 *IEEE Europe Oceans Brest*, June 20–23, 2005 p725
- [15] Ioana C, Jarrot A, Gervaise C, Stéphan Y, Quinquis A 2010 *IEEE Trans. Signal Processing.* **58** 4093
- [16] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 1994 *Computational Ocean Acoustics* (New York: American Institute of Physics) p337
- [17] Bonnel J, Nicolas B, Mars J I, Fattaccioli D 2009 *IEEE Oceans' 2009 Biloxi*, October 26–29, 2009 p1
- [18] Bonnel J, Gervaise C, Roux P, Nicolas B, Mars J I 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **130** 61
- [19] Bonnel J, Gervaise C, Nicolas B, Mars J I 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 119
- [20] Lopatka M, Touzé G L, Nicolas B, Cristol X, Mars J I, Fattaccioli D 2010 *EURASIP J. Advances. Signal Processing.* **304103** 1
- [21] Bonnel J, Nicolas B, Mars J I, Walker S C 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 719
- [22] Baraniuk R G, Jones D L 1993 *Signal Processing* **32** 263
- [23] Li Z L, Zhang R H 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 471
- [24] Zhang D M, Li Z L, Zhang R H 2005 *Acta Acoustica* **30** 415 (in Chinese) [张德明, 李整林, 张仁和 2005 声学学报 **30** 415]
- [25] Zhang X L, Li Z L, Huang X D 2009 *Acta Acoustica* **34** 54 (in Chinese) [张学磊, 李整林, 黄晓砥 2009 声学学报 **30** 54]
- [26] Nicolas B, Mars J I, Lacoume J L 2006 *EURASIP J. Applied Signal Processing* **65901** 1
- [27] Rein van den B, Richard van B 1992 *Computer Vision, Graphics, And Image Processing: Graphical Models And Image Processing* **54** 252

Studies on mode feature extraction and source range and depth estimation with a single hydrophone based on the dispersion characteristic^{*}

Li Kun Fang Shi-Liang[†] An Liang

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Signal Processing of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(Received 29 November 2012; revised manuscript received 9 January 2013)

Abstract

A method of range and depth estimation was studied using a single hydrophone based on the dispersive characteristic and time-frequency analysis for low frequency underwater acoustic pulse signals in shallow water environment. First, the signal received on a single hydrophone can be decomposed into a series of modes within the frame work of normal mode theory, and then the dispersive characteristic of the propagating modes can be analyzed using the time-frequency analysis. In order to improve the time-frequency resolution, the use of the time-frequency distribution with adaptive radial-Gaussian kernel extracts the arrival time difference of propagating modes in dispersion curve, which can be used to estimate source range. Mode energy can be extracted using binary time-frequency mask filtering based on multi-mode joint matching processing; and the source depth can be estimated by comparing the differences of the mode energy of the real data and simulated replica data, yielding a contrast function. Simulation results from a shallow-water Pekeris waveguide show that the time-frequency distribution with adaptive radial-Gaussian kernel represents well the dispersion characteristics of the underwater acoustic pulse signals, provides higher time-frequency resolution and overcomes the problem of the inherent limit for the time resolution and frequency resolution in the traditional short-time Fourier transform, so that the modes can be separated and identified more easily in the time-frequency plane. From the result of the range estimation, the different mode combinations have different results of the range estimation. The range estimation result can be obtained accurately by using the mode with high energy in the time-frequency plane. The relative error in range estimation is less than 2% by using the mode with high energy. In terms of the depth estimation, the more the number of joint matching mode, the more sharp peak and low fake peaks the contrast function has, so that the depth estimation is further improved by incorporating more modes. This research has great significance for studying the extraction and separation of low frequency underwater acoustic pulse signals.

Keywords: dispersive channel, time-frequency analysis, single hydrophone, localization

PACS: 43.30.Bp, 43.60.Hj

DOI: 10.7498/aps.62.094303

^{*} Project supported by the National Key Basic Research Program of China (Grant No. 6131222), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11104029, 11104141).

[†] Corresponding author. E-mail: slfang@seu.edu.cn