

一种基于简正波模态消频散变换的声源距离深度估计方法

郭晓乐 杨坤德 马远良 杨秋龙

A source range and depth estimation method based on modal dedispersion transform

Guo Xiao-Le Yang Kun-De Ma Yuan-Liang Yang Qiu-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 214302 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.214302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅海波导中折射类简正波的 warping 变换

Warping transform of the refractive normal mode in a shallow water waveguide

物理学报.2016, 65(13): 134301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134301>

三维绝热简正波-抛物方程理论及应用

Three-dimensional adiabatic mode parabolic equation method and its applications

物理学报.2016, 65(3): 034301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.034301>

基于频带分解和距离加权的单矢量水听器浅海被动测距方法研究

Source ranging based on frequency band decomposition and distance weighting using a single acoustic vector sensor in shallow water

物理学报.2015, 64(15): 154303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154303>

一种基于 β -warping 变换算子的被动声源距离估计方法

A passive source ranging method using the waveguide-invariant-warping operator

物理学报.2015, 64(7): 074301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.074301>

水平变化波导中的简正波耦合与能量转移

Mode coupling and energy transfer in a range-dependent waveguide

物理学报.2014, 63(21): 214302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214302>

一种基于简正波模态消频散变换的声源距离深度估计方法*

郭晓乐¹⁾²⁾ 杨坤德^{1)2)†} 马远良¹⁾²⁾ 杨秋龙¹⁾²⁾

1)(西北工业大学, 海洋声学信息感知工业和信息化部重点实验室, 西安 710072)

2)(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

(2016年5月18日收到; 2016年6月15日收到修改稿)

针对浅海环境中传播的低频宽带水声脉冲信号, 基于简正波水平波数差和波导不变量之间的关系, 本文提出了一种利用距离-频散参数二维平面聚焦测距与匹配模态能量定深的目标声源定位方法. 首先, 通过将频散参数和波导不变量表示的前几阶模态相速度与由环境模型计算的相速度进行对比分析, 从而估计出前几阶模态的频散参数和环境的波导不变量. 其次, 利用估计出的频散参数值和波导不变量对接收信号进行消频散变换处理, 只有当接收信号的距离参数等于目标声源距离时, 各号简正波的幅度均达到最大值, 在距离-频散参数二维平面上, 出现声压聚焦的现象, 利用此现象可以估计目标声源的距离. 不仅如此, 消频散变换后的接收信号, 前几阶模态在时域上明显地分离开来, 可以准确地估计出前几阶模态的能量, 采用多模态能量匹配的方式, 可以估计出目标声源的深度. 最后, 通过对仿真和冬季获得的气枪信号数据处理结果验证了本文方法的有效性.

关键词: 消频散变换, 测距和定深, 波导不变量, 气枪信号

PACS: 43.30.Bp, 43.60.Jn

DOI: 10.7498/aps.65.214302

1 引言

浅海环境中, 由于水声环境非常复杂, 声源定位一直是水声领域中的一个关键问题^[1-3]. 目前主要的定位方法有匹配场处理^[4-6], 基于波导不变量处理等^[7-9]方法. 匹配场处理通过将声场传播模型计算的拷贝声场与实际接收的声场进行相关处理来实现水声目标的定位问题, 它比较依赖于海洋环境参数和声场计算模型, 计算量很大, 且实际应用中往往会存在各种环境失配所带来的性能下降甚至是失效问题. 波导不变量方法利用的是浅海波导中声场在距离和频率二维平面上具有稳健性的干涉结构特征来进行处理, 虽然波导不变量对于目标的测距有一定的效果, 但是波导不变量对声源深

度参数不敏感, 不能有效地估计出声源的深度.

针对浅海中传播的低频宽带信号而言, 受海洋媒质的影响, 会产生简正波的叠加与频散. 水声信道的频散主要由波导特性决定, 表现为简正波本征波数随频率的变化. 虽然浅海信道的频散特性对信号的分析 and 处理增加了难度, 但是信道的频散特性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水声信号, 可以获得目标的距离深度等位置信息. 对海洋波导中频散现象的研究, 多集中在通过时频分析(如短时傅里叶变换 STFT、Wigner 分布、自适应最优核时频分布等)提取各号简正波的频散曲线. 但是由于宽带频散会导致简正波信号展宽、不同号简正波重叠, 同时时频分析数值计算的时频分辨率精度也阻碍了频散曲线的准确提取. 近些年来, Bonnel 等^[10-12]提出了

* 国家自然科学基金(批准号: 11174235)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ykdzym@nwpu.edu.cn

基于单水听器的时频 warping 变换算法, 此算法通过对接收信号进行 warping 变换操作, 将每个模态转变成近似 Dirac 函数, 从而补偿掉波导的频散效应, 实现每个模态在时频域的分离, 获取每个模态的特征, 进行地声参数反演等. 除此之外, 为了消除浅海波导传播中的频散, Gao 等^[13]提出一种消频散变换的思路, 并将其用于简正波的耦合及混响问题.

本文基于浅海传播的低频宽带水声脉冲信号, 借鉴消频散变换的思路, 提出了一种利用距离-频散参数二维平面聚焦测距与匹配模态能量定深的目标声源定位方法. 浅海接收信号通过消频散变换后在距离-频散参数二维平面上出现声压聚焦的现象, 只有当接收信号的传播距离参数等于目标声源距离时, 各号简正波的声压幅度均达到最大值, 由此可以估计出目标声源的距离参数. 并且接收信号通过消频散变换后, 前几阶模态在时域上明显地分离开来, 可以准确地估计出各阶模态的能量, 采用多模态能量匹配的方式, 可以确定目标声源的深度. 本文通过仿真和冬季实验数据验证了方法的有效性.

2 浅海传播模态的消频散及定位原理

2.1 浅海模态传播及频散

根据简正波理论, 在水平不变的环境中, 一个深度为 z_s 的声源发射一个宽带脉冲信号, 经过海洋波导传播后, 在距离为 r 、深度为 z_r 的接收点处的声压场可以表达为^[14]

$$P(\omega, r, z_r) \simeq Q \sum_{m=1}^M S(\omega) \psi_m(z_s) \psi_m(z_r) \frac{e^{jk_{rm}(\omega)r}}{\sqrt{k_{rm}(\omega)r}}, \quad (1)$$

其中, S 是发射信号的频谱, ω 是声波频率, M 是总的传播模态数, ψ_m 是第 m 阶模态的模式函数, k_{rm} 是第 m 阶模态的水平波数; 系数 $Q = e^{j\pi/4}/\sqrt{8\pi\rho(z_s)}$ 是一个常量, $\rho(z_s)$ 表示在声源深度处的海水密度值.

由 (1) 式可知, 接收点处的声场是由各阶简正波模态的叠加所组成的. 对于每一阶模态, 可以定义如下的相速度和群速度分别为

$$v_m(\omega) = \frac{\omega}{k_{rm}(\omega)}, \quad (2)$$

$$u_m(\omega) = \frac{d\omega}{dk_{rm}(\omega)}. \quad (3)$$

各阶模态的相速度和群速度刻画了频率与波数之间的关系, 其中相速度是等相位面的传播速度, 而群速度表示信号能量传播的速度, 反映的是信号不同频率分量传播的速度, 是频散关系中最重要物理量. 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.

2.2 浅海波导中的波导不变量

根据波导不变量的定义, 在与距离无关的海洋波导中, 波导不变量可以表示为^[15]

$$\beta = \frac{r d\omega}{\omega dr} = -\frac{\Delta s_p^{mn}}{\Delta s_g^{mn}}, \quad (4)$$

其中, Δs_p^{mn} 表示第 m 阶和第 n 阶简正波相慢度 (相速度的倒数) 的差分, Δs_g^{mn} 表示第 m 阶和第 n 阶简正波群慢度 (群速度的倒数) 的差分.

从 (4) 式可以获得两种估计波导不变量 β 的方法, (4) 式的第一个等号表明通过分析 r - f 平面中的干涉条纹, 利用图像处理的方法提取干涉条纹的斜率可以估计 β 值, 而第二个等号表示可以通过海洋环境先验知识, 通过海洋环境声学模型计算出简正波的群速度和相速度, 从而计算出相应的 β 值.

2.3 浅海模态的消频散变换

由于浅海波导中的接收信号为多模信号, 各号简正波有不同的水平波数, 若想同时抵消多号简正波的频散, 必须找到各号简正波的共同特征. 由 (4) 式可知, 波导不变量 β 的值与相互干涉的简正波号数 m, n 无关. 因此, 波导不变量概念提供了一种统一各号简正波的思路. Grachev^[16]曾给出用波导不变量统一各号简正波水平波数差的表达式:

$$\begin{aligned} k_{mn} &= k_{rm} - k_{rn} \\ &= (-\gamma_m + \gamma_n)\omega^{-\frac{1}{\beta}} \\ &= \gamma_{nm}\omega^{-\frac{1}{\beta}}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, k_{rm} 和 k_{rn} 分别是第 m 阶和第 n 阶的水平波数, k_{mn} 是第 m 阶和第 n 阶模态的水平波数差, γ_m 和 γ_n 为第 m 阶和第 n 阶频散参数, γ_{nm} 为第 m 阶和第 n 阶频散参数差, 是一个与简正波号数有关的常量.

对于一个已知的浅海波导环境, 在高频情况下, 近似满足

$$\omega \rightarrow \infty, \quad k_{rm}(\omega) \rightarrow \frac{\omega}{c_0}, \quad (6)$$

其中, c_0 为水中平均声速. 通过 (5) 和 (6) 式结合王宁等的相关工作 [13,17] 可知

$$k_{rm}(\omega) = \frac{\omega - \gamma_m \omega^{-\frac{1}{\beta}}}{c_0}. \quad (7)$$

(7) 式一般在远离艾里相位区域时比较有效, 否则 c_0 会随模态有一定的变化但是变化不大. 从 (7) 式可知, 它包含两项: 第一项表示传输项, 所有的模态能量的传播只和信号频率一个物理量有关, 即所有模态的所有频点具有统一的到达时间; 第二项表示频散项, 即所有模态传输时, 不同频率以不同的传输速度向前传播, 不同模态不同频率具有不同的到达时间. 将 (7) 式代入 (2) 式可得

$$v_m(\omega) = \frac{\omega c_0}{\omega - \gamma_m \omega^{-\frac{1}{\beta}}}. \quad (8)$$

分析 (8) 式可知, 此时的未知参数为波导不变量 β 和第 m 阶频散参数 γ_m , 由于下文引入的消频散变换需要利用这两个物理量, 这两个物理量按如下公式进行估计:

$$(\hat{\gamma}_m, \hat{\beta}) = \min \left(\sum_{\omega=\omega_{\min}^m}^{\omega=\omega_{\max}^m} (v_m^c(\omega) - v_m^e(\omega, \gamma_m, \beta))^2 \right), \quad 1 \leq \beta \leq 2, \quad (9)$$

其中, $1 \leq \beta \leq 2$ 表示浅海波导不变量的变化范围, v_m^c 为由 Kraken 模型 [18] 计算相应频点的第 m 阶模态的相速度, v_m^e 为利用 (8) 式计算出的第 m 阶模态的相速度, ω_{\min}^m 和 ω_{\max}^m 分别表示计算时第 m 阶模态相速度的最小频率和最大频率.

本文引入消频散变换 [13,17], 定义如下:

$$P(r, z_r, r', \gamma') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P(\omega, r, z_r) e^{-i(\frac{\omega}{c_0})r' + i\omega^{-\frac{1}{\beta}}(\frac{\gamma'}{c_0})} d\omega, \quad (10)$$

其中, $\{r', \gamma'\}$ 为消频散变换的两个变换参数. 将 (1) 式中的 $P(\omega, r, z_r)$ 代入 (10) 式并展开得

$$P(r, z_r, r', \gamma') = \frac{Q}{\sqrt{r}} \sum_{m=1}^M \psi_m(z_s) \psi_m(z_r) \times \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(\omega)}{\sqrt{k_{rm}(\omega)}} \times e^{i(\omega/c_0)(r-r') + i(\omega^{-1/\beta}/c_0)(\gamma'-r\gamma_m)} d\omega. \quad (11)$$

为了消除接收信号的频散, 需要通过一定的方法将接收信号的指数项部分消除掉. 由 (11) 式可知指数项包含两部分, 对于第 m 阶频散模态, 只有当满足 $r' = r, \gamma' = r\gamma_m$ 时, (11) 式的指数项部分可被完全抵消, 即该号筒正波的频散被全部消除.

2.4 目标声源测距与定深

对于声源的距离估计, 由 (11) 式可知, 对于第 m 阶频散模态, 只有当满足 $r' = r, \gamma' = r\gamma_m$ 时, (11) 式的指数项部分被完全抵消, 即变换后的接收信号在距离-频散参数二维平面上会出现声压聚焦的现象, 模态的频散项被完全抵消时对应的距离即为声源的距离, 由此可以确定出声源的距离参数.

对于声源深度的估计, 文献 [19, 20] 采用了模态特征函数有效幅值的方法估计了声源深度, 但是未涉及距离估计和距离-频散参数平面聚焦问题. 由于接收信号的不同模态具有不同的能量, 能量的变化反映了模态形状函数随深度的变化. 通过上述的消频散变换, 各阶模态的能量已经完全分离开来, 本文通过对分离开的各阶模态的能量进行匹配的方法进行声源的深度估计. 令 E_m^e 为实际接收信号经过消频散变换后第 m 阶模态的能量, E_m^c 为拷贝信号经过消频散变换后提取出的第 m 阶模态的能量. 第 m 阶模态的能量按如下的公式进行计算,

$$E_m = \int_{t_m^1}^{t_m^2} y^2(t) dt, \quad (12)$$

其中, $y(t)$ 表示接收信号经过消频散变换后的时域波形, t_m^1 和 t_m^2 分别表示接收信号经过消频散变换后在时域上第 m 阶模态的起始时刻与结束时刻, 起始时刻和结束时刻通过设置一定的门限获得. 由此构造如下的代价函数

$$J(z) = -10 \log_{10} \left(1 - \sum_m \frac{(E_m^e - E_m^c)^2}{M} \right). \quad (13)$$

通过 (13) 式的代价函数, 在声源深度范围内进行峰值搜索, 可确定出声源的深度.

3 典型海洋环境仿真

Pekeris 波导是一个具有两层分层结构的海洋波导, 它与实际的海洋环境比较接近, 如图 1 所示. 其中, 水深 $H = 40$ m, 海水的声速和密度分别为 $c_1 = 1500$ m/s, $\rho_1 = 1.0$ g/cm³, 海底的声速和密

度分别为 $c_2 = 1800 \text{ m/s}$, $\rho_2 = 1.7 \text{ g/cm}^3$, 声源深度为 25 m, 接收深度和接收距离分别为 36 m 和 15 km.

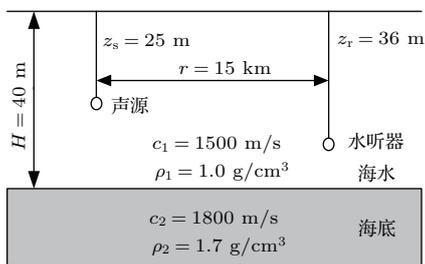


图1 Pekeris 波导环境模型

Fig. 1. Pekeris ocean waveguide model.

对于声源发射的宽带脉冲信号而言, 根据(2)和(3)式可获得在图1所示的典型Pekeris波导环境模型下的相速度和群速度, 图2给出了前4阶模态的相速度和群速度随频率的变化. 其中, Pekeris波导中各个模态所能传播的下限频率称为截止频率, 当信号频率低于某阶模态的截止频率时, 波导中不能激发相对应的有效模态. 第 m 阶模态的截止频率定义如下:

$$f_{cm} = \frac{(2m - 1)c_1}{4H\sqrt{1 - (c_1/c_2)^2}}. \quad (14)$$

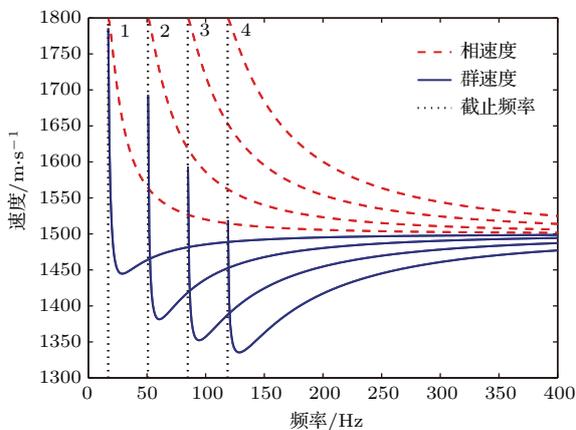


图2 (网刊彩色) Pekeris 波导中相速度和群速度随频率的变化

Fig. 2. (color online) Frequency dependence of phase and group velocities for the first 4 propagating modes in Pekeris waveguide.

从图2可知, Pekeris波导中的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 . 其中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位. 从以上模态的频散

曲线中可以看出, 同一频率处, 不同的传播模态具有不同的传播速度, 表示的是各阶模态之间的频散关系, 称为模态间频散; 而同一模态在不同频率处具有不同的传播速度, 反映的是单一模态的频散现象, 称为模态内频散. 对于宽带脉冲而言, 既存在模态间频散也存在模态内频散, 每个模态以不同的群速度向前传播, 因而以不同的时间到达接收水听器. 本文的目的正是通过消频散变换消除各阶模态的频散从而进行测距和定深.

在图1所示的Pekeris波导环境下, 通过(9)式估计出相应的波导不变量 $\hat{\beta}$, 前4阶模态的频散参数 $\hat{\gamma}_m$ 以及利用估计值计算出的相速度均方根误差列于表1. 由于波导不变量是一个与模态数无关的物理量, 所以消频散变换时利用的波导不变量估计值为前4阶模态估计出的波导不变量的均值. 由表1可知, 由模型计算的相速度和由(8)式计算出的相速度的均方根误差非常小, 量级在 10^{-2} , 说明通过(9)式估计出的频散参数值和波导不变量值比较准确.

表1 频散参数和波导不变量估计结果

Table 1. The estimated results of dispersion parameters and waveguide invariant.

	模态数				平均值
	1	2	3	4	
波导不变量 $\hat{\beta}$	1.0576	1.0554	1.0518	1.0469	1.0529
频散参数 $\hat{\gamma}_m$	4195.9	17072	39511	73063	
均方根误差/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.0019	0.0070	0.0138	0.0198	

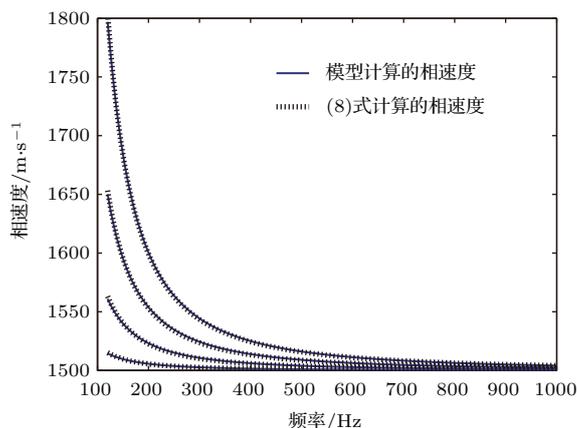


图3 (网刊彩色) Kraken 模型计算和由(8)式计算的相速度变化曲线

Fig. 3. (color online) Phase velocity curves for modes 1 to 4. Solid curves are calculated by Kraken model and dashed curves are approximated by Eq. (8).

由表 1 估计的频散参数值和波导不变量均值, 得到模型计算的前 4 阶模态的相速度曲线和由 (8) 式计算的相速度曲线如图 3 所示. 由图 3 可见实线和虚线完全重合, 表明估计的误差很小, 进一步说明估计出的频散参数比较准确.

仿真时利用的是低频宽带脉冲信号, 脉冲宽度为 200—300 Hz, 中心频率为 250 Hz. 图 4 给出了图 1 所示的 Pekeris 波导环境下, 声源深度 25 m、接收深度 36 m、接收距离 15 km 处接收到的低频宽带脉冲信号的时域波形和时频图.

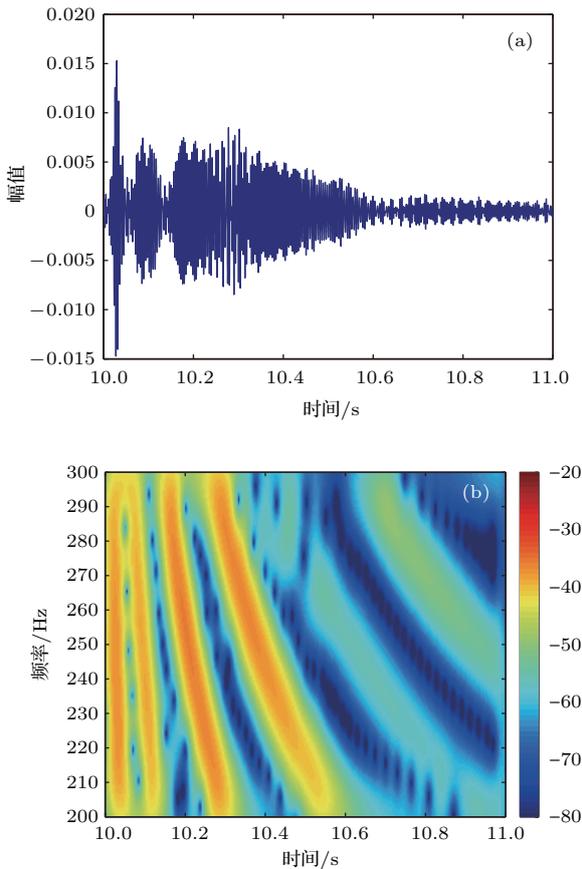


图 4 (网刊彩色) 接收信号的时域波形和时频图 (a) 时域波形; (b) 时频图
Fig. 4. (color online) The received signal at 15 km: (a) The time domain waveform; (b) the time-frequency diagram.

由图 4 可以看出, 低频宽带声源在浅海波导中传播后前几阶模态在时频图上出现了明显的频散现象, 从而导致信号在时域上相互叠加无法明显地区分开. 对图 4 的接收信号进行 (10) 和 (11) 式所示的消频散变换, 得到相应的距离-频散参数二维平面图, 如图 5 所示. 图中横向的虚线表示声源实际的发射距离, 可以看出, 在声源实际距离剖面上, 前

4 阶模态的声压幅值均达到最大值, 此时各阶模态的频散效应被完全抵消. 所以在消频散测距时, 只需要在距离-频散参数二维平面上, 寻找各阶模态被完全抵消的距离即为实际声源所在的距离.

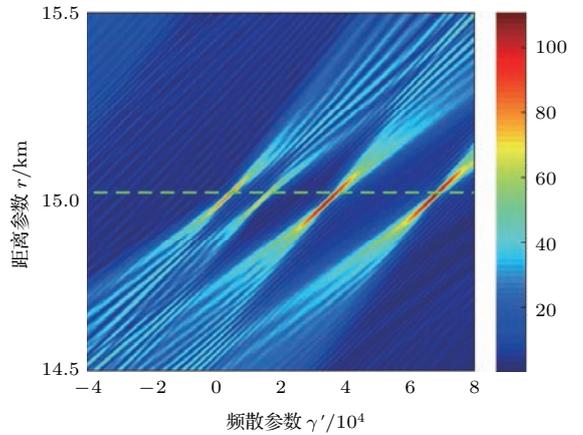


图 5 (网刊彩色) 距离-频散参数二维平面图
Fig. 5. (color online) Range-dispersion two-dimensional plane.

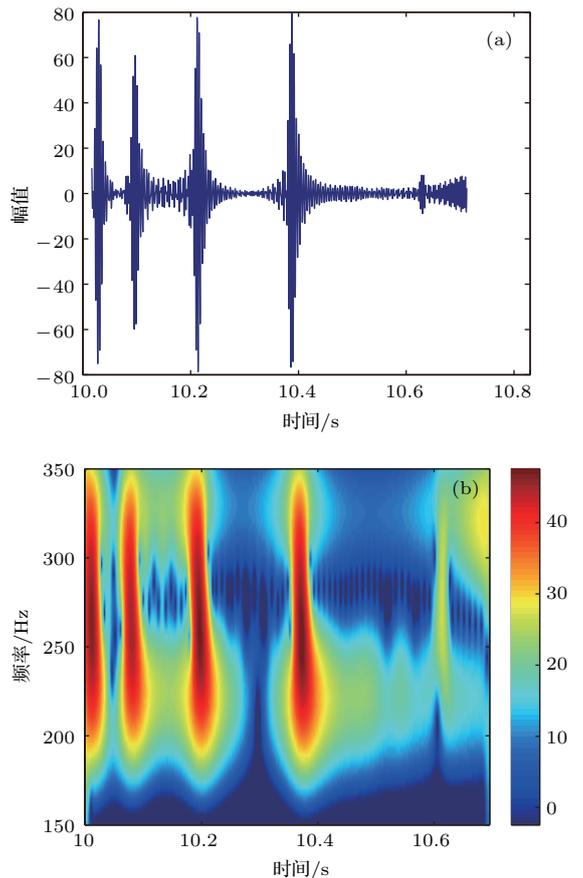


图 6 (网刊彩色) 消频散变换后接收信号的时域波形和时频图 (a) 时域波形; (b) 时频图
Fig. 6. (color online) The received signal after dedispersion transform: (a) The time domain waveform; (b) the time-frequency diagram.

当准确地定出声源距离后, 消频散变换时的频散参数域与消频散变换的时域信号的转换关系为^[13]

$$t = \hat{r} \left[\frac{1}{c_0} + \left(\frac{1}{\beta} \right) \frac{\gamma' \omega_0^{-\frac{1}{\beta}-1}}{c_0} \right], \quad (15)$$

其中, \hat{r} 为估计出的声源距离, ω_0 为发射信号的中心频率. 将接收信号进行消频散变换后利用(15)式得到消频散变换后的时域信号和时频图, 如图6所示.

由图6所示的消频散变换信号可知, 前4阶模态在时域上已经分离得比较清楚, 由于各阶模态在时域上的能量分布反映了声源深度的变化. 其中图6(a)中前4阶模式的起始时间和结束时间通过设置一定的门限获得, 当图6(a)中信号的平方 $y^2(t)$ 大于门限的时刻作为起始时间, 小于门限的时刻作为结束时间. 本文通过(12)和(13)式匹配消频散变换后的能量分布, 得到如图7所示的深度估计结果. 由图7可知, 在仿真条件下, 目标声源深度估计曲线在25 m时比较尖锐, 深度的估计结果比较准确.

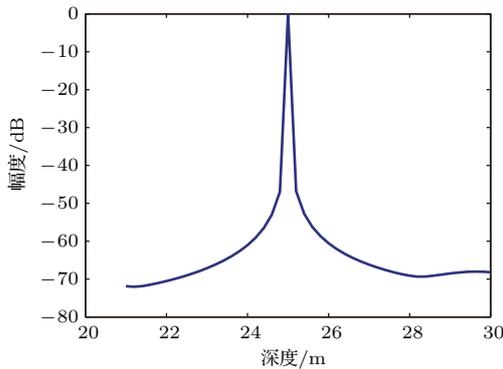


图7 深度估计结果

Fig. 7. The estimated results of depth.

4 实验数据验证

本文的实验数据来自冬季进行的声传播测量实验. 实验海区的海底地形比较平坦, 平均海深约为113.5 m. 图8给出了实验海区的平均声速剖面, 并由此计算出实验海区的平均声速 $c_0 = 1518.6$ m/s. 从图8可以看出, 实验海区的平均声速剖面为典型的浅海冬季声速剖面, 声速随着深度的增加呈现缓慢的增加趋势. 实验过程中发射的信号是气枪信号, 并且通过16元垂直线列阵接收信号.

为了通过本文的方法对实测数据进行测距和定深, 本文利用图8所示的声速剖面和实验海区实际测量得到的环境参数, 通过(9)式估计出相应的波导不变量 $\hat{\beta}$, 前4阶模态的频散参数 $\hat{\gamma}_m$ 以及利用估计值计算出的相速度均方根误差列于表2. 由表2可知, 在实验环境下, 由模型计算的相速度和由(8)式计算出的相速度的均方根误差非常小, 说明通过(9)式估计出的频散参数值和波导不变量值比较准确.

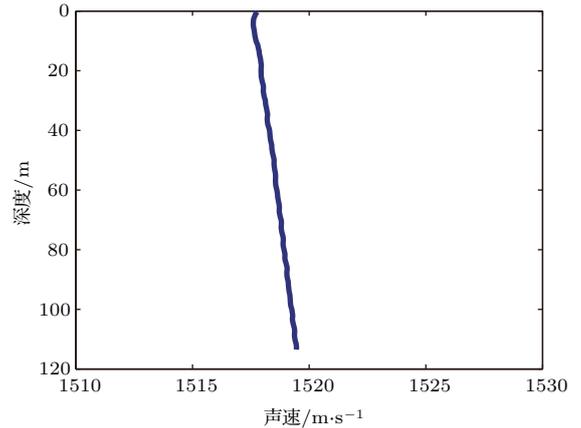


图8 实验海区的平均声速剖面

Fig. 8. The average sound speed profile of experimental area.

表2 实验环境下, 频散参数和波导不变量估计结果
Table 2. The estimated results of dispersion parameters and waveguide invariant under experimental environment.

	模态数				平均值
	1	2	3	4	
波导不变量 $\hat{\beta}$	1.0391	1.0528	1.0296	1.0202	1.0354
频散参数 $\hat{\gamma}_m$	476	2224	5292	9788	
均方根误差/ $m \cdot s^{-1}$	2.6193	0.9572	2.5330	1.8857	

由表2估计的频散参数值和波导不变量均值, 得到实验海区环境下模型计算的前4阶模态的相速度曲线和由(8)式计算的相速度曲线如图9所示. 由图9可知, 利用表2估计出的波导不变量和频散参数值代入(8)式能够比较好地拟合模型计算的相速度变化, 所以将估计的波导不变量均值用于后续的消频散变换比较合理.

本文利用16元垂直线列阵接收到的气枪数据进行分析和处理. 其中, 利用的接收阵元深度为72.4 m, 接收到气枪信号由GPS记录的距离大约为

33.4 km. 图 10 给出了接收信号的时域波形和时频图. 由图 10 可知, 接收的气枪信号在时频图上明显地呈现频散传播的现象, 但是接收信号的各阶模态在时域上叠加在一起, 很难分离.

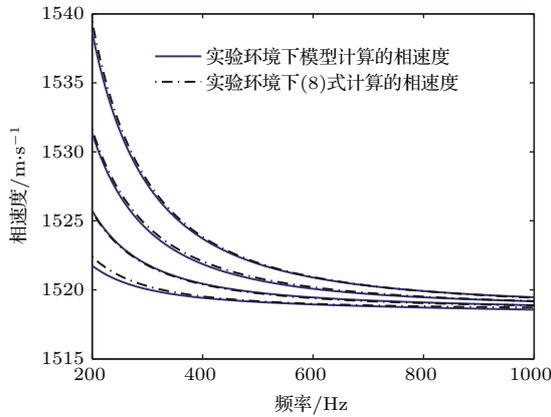


图 9 (网刊彩色) 实验环境下 Kraken 模型计算的相速度和 (8) 式计算的相速度曲线

Fig. 9. (color online) Phase velocity curves for modes 1 to 4 under experimental environment. Solid curves are calculated by Kraken model and dashed curves are approximated by Eq. (8).

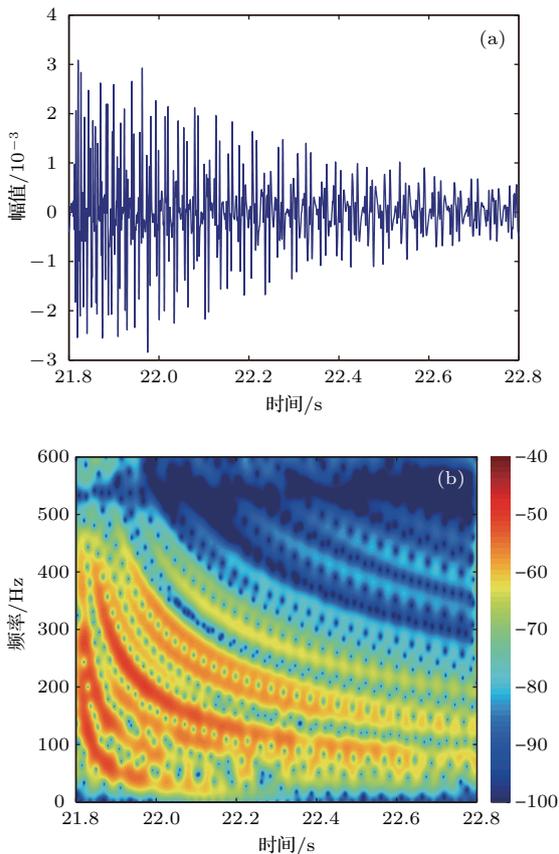


图 10 (网刊彩色) 实测距离大约为 33.4 km 的时域波形和时频图 (a) 时域波形; (b) 时频图

Fig. 10. (color online) The received airgun signal at 33.4 km: (a) The time domain waveform; (b) the time-frequency diagram.

和仿真方法相同, 对图 10 中的接收信号根据 (10) 和 (11) 式所示的消频散变换, 得到相应的距离-频散参数二维平面图如图 11 所示. 其中, 图 11 中的横虚线表示距离-频散二维平面上各阶频散被完全抵消时的距离, 此时 $\hat{r} = 33.12$ km, 即本文方法测距的结果和 GPS 记录的 33.4 km 有很小的差别, 误差只有 0.84%.

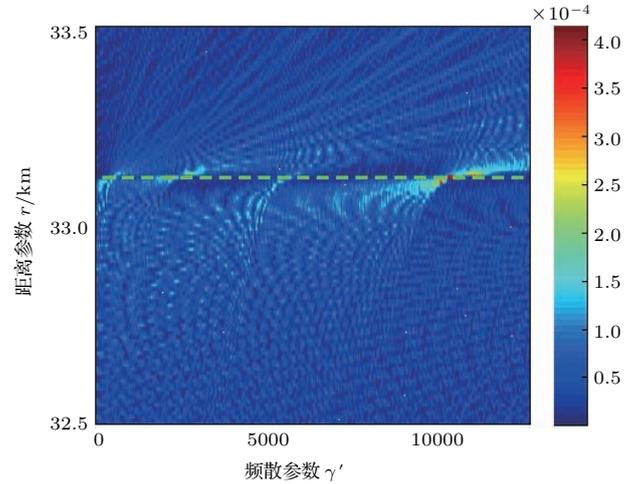


图 11 (网刊彩色) 实测气枪信号的距离-频散参数二维平面图

Fig. 11. (color online) Range-dispersion two-dimensional plane of real data.

利用得到的 33.12 km 距离上的频散参数, 根据 (15) 式进行坐标的线性变换, 可得到频散变换后的时域信号和时频图, 如图 12 所示.

由图 12 可知, 气枪信号消频散变换后, 前几阶模态在时域已经分离得比较清楚, 可以很准确地计算出相应模态的能量. 对于气枪信号的定深, 实验时气枪所处的深度大约为 10 m, 由于气枪信号每次发射时信号的一致性比较好, 所以模型计算时, 利用的气枪信号为校准气枪声源级时接收到的极近距离上 (40 m) 气枪信号, 如图 13 所示, 并且通过球面扩展的方式折算到气枪发射位置, 从而得到气枪发射时的时域信号. 由于气枪信号的入水深度较浅, 所以海面反射的信号紧跟着直达信号.

通过不断变换气枪发射深度, 并且利用 (12) 和 (13) 式进行模态能量匹配, 由于实验系统中都会存在前置放大等设备, 所以在实验数据能量处理时, 本文将提取出的前 4 阶模态能量进行归一化处理, 计算能量百分比. 通过匹配能量百分比, 计算方便有效. 得到实验数据的声源深度估计结果如图 14 所示. 由图 14 可知, 气枪声源最有可能的深

度在 10 m 左右, 和实验记录的声源深度比较一致, 由此说明本方法在定深方面的有效性.

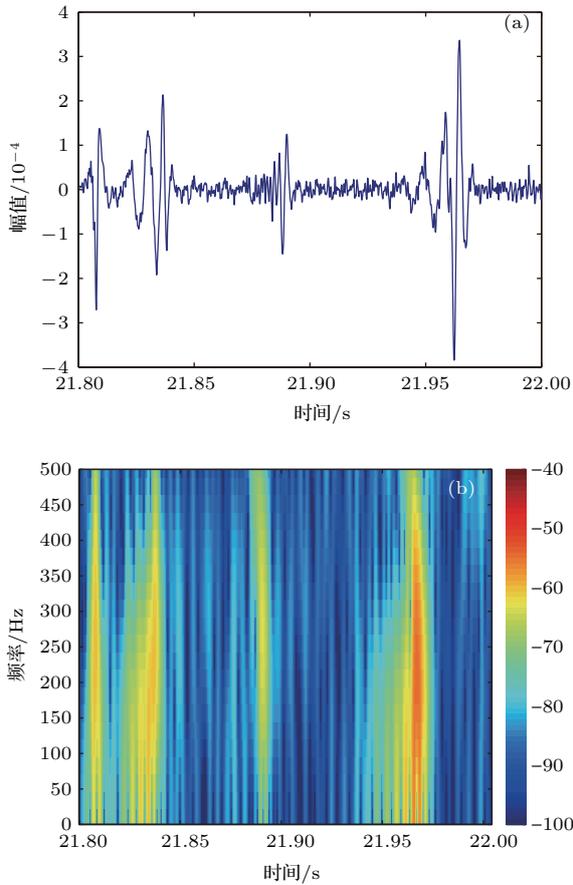


图 12 (网刊彩色) 消频散变换后气枪信号的时域波形和时频图 (a) 时域波形; (b) 时频图
Fig. 12. (color online) The received airgun signal after dedispersion transform: (a) The time domain waveform; (b) the time-frequency diagram.

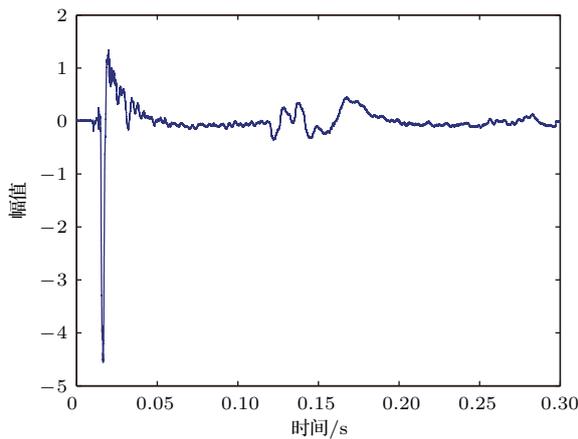


图 13 40 m 处接收到的气枪信号
Fig. 13. The received airgun signal at 40 m.

运用本文的测距和定深方法, 对一条实验测线上的 23 个气枪信号进行了测距和定深处理.

图 15 给出了实验测线上的测距和定深结果, 距离估计值与 GPS 记录值一致性较好. 由于气枪与海面的绳长为 10 m, 所以实验记录的深度均为 10 m, 而深度估计的结果最大达到 10 m, 在 10 m 上面波动, 比较符合实际情况.

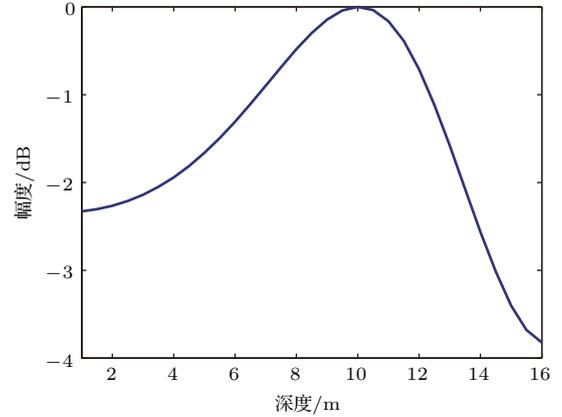


图 14 实验数据深度估计结果

Fig. 14. The estimated results of depth by airgun signal.

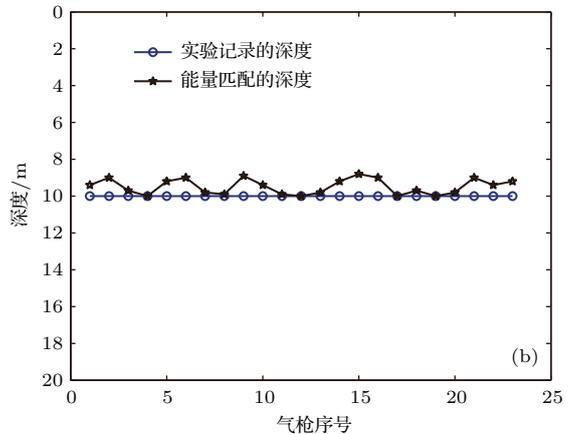
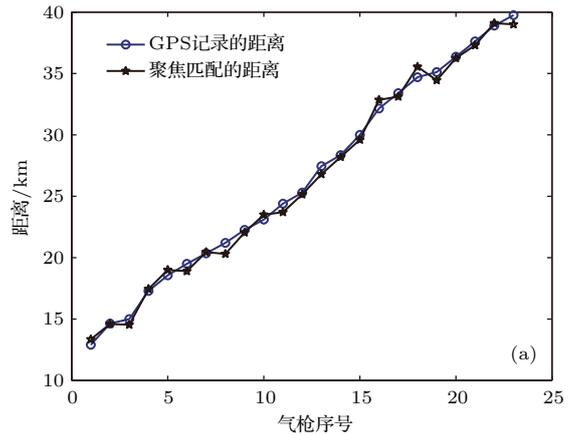


图 15 (网刊彩色) 消频散变换测距和定深结果 (a) 距离; (b) 声源深度
Fig. 15. (color online) Dedispersion transform localization results: (a) Range; (b) depth.

5 结 论

浅海水下目标定位问题一直是国内外研究的热点和难点. 本文针对浅海低频宽带水声脉冲信号传播时会出现频散效应, 提出利用消频散变换消除各阶模态的频散, 从而进行水下目标的定位问题. 通过分析得到, 浅海接收信号通过消频散变换后在距离-频散参数二维平面上会出现声压聚焦的现象, 利用此现象可以比较准确地估计出目标声源的距离参数. 并且当接收信号通过消频散变换后, 可以比较准确地估计出各阶模态的能量, 采用多模态能量匹配的方式, 可以确定目标声源的深度. 本文通过仿真和冬季实验数据验证了本文方法有一定的可行性, 并且给出了一条实验测线的测距和定深结果.

本文定位过程中, 仿真环境和实验海区的海底地形和声速剖面变化不大, 对于海底地形和声速剖面变化大的情况, 如何准确地消除各阶模态的频散, 从而用于声源定位问题, 有待进一步的研究.

参考文献

- [1] Duan R, Yang K D, Ma Y L 2014 *J. Acoust. Soc. Am.* **136** EL159
- [2] 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]
- [3] Qi Y B, Zhou S H, Zhang R H, Ren Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 074301 (in Chinese) [戚聿波, 周士弘, 张仁和, 任云 2015 物理学报 **64** 074301]
- [4] Bucker H P 1976 *J. Acoust. Soc. Am.* **59** 368
- [5] Baggeroer A B, Kuperman W A, Mikhalevsky P N 1993 *IEEE J. Ocean. Eng.* **18** 401
- [6] Preisig J C 1994 *IEEE Trans. Signal Proces.* **42** 1305
- [7] Thode A M 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **108** 1582
- [8] Thode A M, Kuperman W A, D' Spain G L, Hodgkiss W S 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **107** 278
- [9] Zhao Z D, Wang N, Gao D Z, Wang H Z 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 064301
- [10] Bonnel J, Gervaise C, Roux P, Nicolas B, Mars J I 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **130** 61
- [11] Bonnel J, Gervaise C, Nicolas B, Mars J I 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 119
- [12] Bonnel J, Nicolas B, Mars J I, Walker S C 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 719
- [13] Gao D Z, Wang N, Wang H Z 2010 *J. Comput. Acoust.* **18** 245
- [14] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2000 *Computational Ocean Acoustics* (Vol. 2) (New York: American Institute of Physics) p67
- [15] Brekhovskikh L M, Lysanov Y P 2003 *Fundamentals of Ocean Acoustics* (Vol. 3) (New York: Springer-Verlag) p101
- [16] Grachev G A 1993 *Acoust. Phys.* **39** 33
- [17] Wang N, Gao D Z, Wang H Z 201 *J. Harbin Eng. Univ.* **31** 825 (in Chinese) [王宁, 高大治, 王好忠 201 哈尔滨工程大学学报 **31** 825]
- [18] Porter M B 1991 *The KRAKEN Normal Mode Program* (La Spezia: SACLANT Undersea Research Center) Technical Report SM-245
- [19] Gao D Z, Wang N, Wang H Z 2013 *Sci. China G* **43** s159 (in Chinese) [高大治, 王宁, 王好忠 2013 中国科学 G **43** s159]
- [20] Wang H Z, Wang N, Gao D Z 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 114302

A source range and depth estimation method based on modal dedispersion transform*

Guo Xiao-Le¹⁾²⁾ Yang Kun-De^{1)2)†} Ma Yuan-Liang¹⁾²⁾ Yang Qiu-Long¹⁾²⁾

1) (Key Laboratory of Ocean Acoustics and Sensing [Northwestern Polytechnical University], Ministry of Industry and Information Technology, Xi'an 710072, China)

2) (School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 18 May 2016; revised manuscript received 15 June 2016)

Abstract

The wideband source localization is analysed widely in shallow water. It is pointed out that its performance is poor when the number of array elements is few or the ocean environment is uncertain. A method of estimating the range and depth is studied by using a single hydrophone based on the relationship of the horizontal wavenumber difference between two modes with the waveguide invariant for low frequency underwater acoustic pulse signals in a range-independent shallow water waveguide. This localization method estimates the source range by using the rangedispersion two-dimensional (2D) plane focus phenomenon and also the source depth by matching the modal energy. So it can separately estimate the source range and source depth by single hydrophone. First, the signal received on a single hydrophone can be decomposed into a series of modes within the framework of normal mode theory. In order to obtain a better localization performance, the first few order modal dispersion parameters and waveguide invariant are regarded as the unknown parameters. And then the first few order modal dispersion parameters and waveguide invariant can be estimated by comparing the differences between the modal phase velocity calculated by Eq.(8) and that calculated by the Kraken model. Second, using the estimated dispersion parameters and waveguide invariant for dedispersion transform, the amplitudes of each normal mode can achieve maximum values but only when the range of the received signal after dedispersion transform is equal to the range of source. On range-dispersion 2D plane, there appears the sound pressure focus phenomenon, and this phenomenon can be used to estimate the source range. Simulation results from a shallow water Pekeris waveguide show that the time-frequency distribution represents well the dispersion characteristics of the underwater acoustic pulse signal and the dedispersion transform can eliminate this dispersion at the range of source, so that the source range can be estimated. Besides, the first few order modal signals received are clearly separated in time domain after dedispersion transform, and the first few order modal energy can be calculated accurately. So the source depth can be estimated by matching the modal energy. The errors in range estimation and depth estimation are little in simulation. Finally, the data collected from airgun sources during an experiment in the shallow water are used to verify the presented method, and the experimental results obtained using airgun sources on a straight line are shown. The presented method is very significant for estimating the range and depth in shallow water.

Keywords: dedispersion transform, range and depth estimation, waveguide invariant, airgun signal

PACS: 43.30.Bp, 43.60.Jn

DOI: [10.7498/aps.65.214302](https://doi.org/10.7498/aps.65.214302)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11174235).

† Corresponding author. E-mail: ykdzym@nwpu.edu.cn