

warping 变换提取单模态反演海底衰减系数

李佳蔚 鹿力成 郭圣明 马力

Inversion of seabed attenuation by using single mode extracted by warping transform

Li Jia-Wei Lu Li-Cheng Guo Sheng-Ming Ma Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 204301 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.204301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

物理学报.2016, 65(21): 214302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214302>

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  $\beta$ -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>

## warping变换提取单模态反演海底衰减系数\*

李佳蔚<sup>1)2)</sup> 鹿力成<sup>1)†</sup> 郭圣明<sup>1)</sup> 马力<sup>1)</sup>

1)(中国科学院声学研究所, 水声环境特性重点实验室, 北京 100190)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2017年4月6日收到; 2017年6月24日收到修改稿)

为了获得浅海海底地声模型参数, 利用 warping 变换方法分离出单模态简正波. 对于接收深度固定、定深爆炸声源情况, 以简正波理论为基础定义了距离归一化的简正波传播损失, 并且其随传播的距离呈线性关系, 故可通过此变化规律得到声压值实部的衰减因子, 进而可求得海底地声模型参数: 海底衰减系数. 为验证此方法的有效性, 仿真了 warping 变换提取单模态简正波的过程, 同时将 warping 变换提取的单模态简正波与数值计算的结果进行比较验证; 并针对某次黄海试验数据进行了处理, 得到在 150—550 Hz 频带范围内海底衰减随频率的变化规律为  $\alpha = 0.581f_k^{1.86}$  (dB/m). 通过与其他学者在相同海域试验结果的对比较证, 变化规律基本相同. 此外不同模态间反演相同频点的衰减系数接近也较好地支撑了结果.

**关键词:** warping 变换, 模态提取, 曲线拟合, 海底衰减

**PACS:** 43.30.Bp, 43.30.Pc, 43.60.-c, 43.60.Pt

**DOI:** 10.7498/aps.66.204301

## 1 引言

海底是海洋环境的一个重要组成部分, 是声波反射和散射的重要边界, 也是影响水下声传播的一个主要因素. 由于海底边界的主要影响作用, 国内外很多水声工作者都致力于海底声学参数的获取工作, 其中反演方法是主要手段之一, 其基本思想是对通过携带海底信息量的声场物理量进行最优匹配获得模型参数. 由于对匹配场的不敏感性, 海底衰减系数在多参数反演中误差较大, 且衰减系数为频率的函数, 这也对反演的可靠性造成了较大影响. 故常在分步反演获得其他参数的情况下, 通过传播损失拟合<sup>[1]</sup>、水平纵向相关、测量海底反射系数<sup>[2]</sup>、模式幅值比等<sup>[3,4]</sup>来获得衰减系数. 在海底衰减与频率关系的研究中, 在较宽频带范围内, Hamilton 总结出海底衰减随频率的变化基本呈一次关系; 而根据 Biot 理论, 在低频段较窄的频带范围内, 海底衰减随频率的变化会呈现出非线性.

Holmes 总结了获得海底衰减的主要方法, 以及多位学者在 100—1000 Hz 范围内砂质海底为主的海底衰减系数随距离的变化呈非线性关系<sup>[5]</sup>, 所得结果与 Biot 理论更加符合.

简正波理论可以很好地表征水下声场, 通过有效的消频散手段能够提取频散曲线、分离单模态简正波等, 这些在水声学研究具有重要的意义. Zhou<sup>[6]</sup>利用滤波可分离的模式方法提取第一模式简正波幅度来反演海底衰减系数. 李整林等<sup>[7]</sup>利用简正波过滤技术提取出简正波系数, 获得单模态简正波反演海底衰减. warping 变换是一种处理复杂信号的重要手段, Baraniuk 和 Jones<sup>[8]</sup>首次将其应用于信号处理, 之后被引入水声信号处理中. Bonnel 等利用 warping 变换补偿信号的频散特征<sup>[9]</sup>、通过单声源进行地声参数反演<sup>[10]</sup>. Zeng 等<sup>[11]</sup>利用 warping 变换提取模态简正波并利用模态简正波之间的关系来反演海底参数. 鹿力成和马力<sup>[12]</sup>结合波导不变量, 给出了一般意义的 warping 变换算子. Duan 等<sup>[13]</sup>在获得声源信息的情况下,

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11004214, 11274338) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: luce\_1983@sina.com

利用 warping 变换对美国新泽西州海岸的地声参数进行了反演. 此外 warping 变换也被用于定位<sup>[14]</sup>、测距等<sup>[15,16]</sup> 诸多方面.

本文结合 warping 变换分离出单模态简正波和单模态简正波声压幅值(单位为 dB, 下同)与距离的关系来获得海底衰减系数. 第一部分推导了浅海环境下以简正波理论为基础定义了第  $m$  阶简正波的距离归一化传播损失, 介绍了理想波导的 warping 变换算子对信号变换的物理本质, 为反演衰减系数提供了理论依据; 第二部分针对浅海 Pekeris 波导环境下利用 warping 变换算子对单模态简正波的分离进行了仿真, 并将分离结果与数值计算结果进行比较; 同时通过对 2002 年某次黄海海试数据的处理得到海底衰减随频率的变化关系, 验证了该方法的有效性; 最后给出全文的总结.

## 2 简正波理论以及 warping 变换

### 2.1 简正波理论

在水平均匀的环境中, 单频点声源激发声场可以用一系列简正波叠加的形式表示

$$P(f, r, z_r, z_s) = \sum_{m=1}^M A_m(z_s, f) \psi_m(z_r) e^{ik_m r - \beta_m r}, \quad (1)$$

其中

$$A_m(f, z_s) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\rho(z_s) \sqrt{k_m r}} e^{j\pi/4} \psi_m(z_s) = \frac{1}{\sqrt{r}} a_m \psi_m(z_s),$$

其中, 时间因子取  $e^{i\omega t}$  形式;  $k_m$ ,  $\psi_m(z)$  和  $\beta_m$  分别为简正波本征值(或水平波数)、本征函数和衰减系数, 一般统称为简正波参数, 通过求解给定声速剖面以及海底和海面边界条件下的简正波本征方程得到, 它们原则上都是频率  $f$  的函数;  $r$  是声源与接收水听器的水平距离;  $z_s$  和  $z_r$  分别是声源和接收深度;  $\rho(z_s)$  为声源深度上的介质密度;  $M$  是远距离声场有显著贡献简正波的最高阶数. 定义第  $m$  阶简正波的距离归一化传播损失

$$Q_m(f, r) = 10 \lg\{r|P(f, r)|^2\} = Q_{m0}(f; z_r, z_s) - 8.686\beta_m(f)r, \quad (2)$$

其中

$$Q_{m0}(f; z_r, z_s) = 10 \lg |a_m \psi_m(z_s) \psi_m(z_r)|^2.$$

由(2)式可以知道, 距离归一化的简正波传播损失  $Q_m(f, r)$  是随距离线性变化的, 其斜率  $K_m(f) = -8.686\beta_m(f)$  与简正波衰减系数直接对应. 注意到简正波衰减系数的微扰近似计算公式为<sup>[17]</sup>

$$\beta_m(f) = \int_0^\infty \frac{\omega}{k_m} \frac{1}{\rho(z)} \frac{\alpha(f, z)}{c(z)} \psi_m^2(z) dz. \quad (3)$$

对于图 1 所示的环境模型, 认为海底是均匀半无限均匀介质, 有

$$\begin{aligned} \beta_m(f) &= \int_0^D \frac{\omega}{k_m} \frac{1}{\rho_w(z)} \frac{\alpha_w(z)}{c_w(z)} \psi_m^2(z) dz \\ &\quad + \int_D^\infty \frac{\omega}{k_m} \frac{1}{\rho_b} \frac{\alpha_b}{c_b} \psi_m^2(z) dz \\ &\equiv \beta_{m1} + \beta_{m2}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\rho_w(z)$ ,  $c_w(z)$  和  $\alpha_w(f, z)$  分别是海水介质密度、声速和吸收系数剖面;  $\rho_b$ ,  $c_b$  和  $\alpha_b(f)$  分别是海底介质密度、声速和衰减系数;  $D$  是海深. 在频率比较低的情况下(1 kHz 以下), 海水声吸收系数比海底要小几个数量级, 其贡献  $\beta_{m1}$  可以忽略不计, 近似得到

$$\begin{aligned} \beta_m(f) &\approx \beta_{m2} = \int_D^\infty \frac{\omega}{k_m} \frac{1}{\rho_b} \frac{\alpha_b}{c_b} \psi_m^2(z) dz \\ &= \frac{k_b}{k_m} \frac{1}{\rho_b} \frac{\psi_m^2(D)}{2\eta_m} \alpha_b(f), \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $k_b = \omega/c_b$ ,  $\eta_m = \sqrt{k_m^2 - k_b^2}$ . 利用(5)式, 可以由简正波衰减系数  $\beta_m(f)$ , 直接换算得到所需的海底介质衰减系数  $\alpha_b(f)$ .

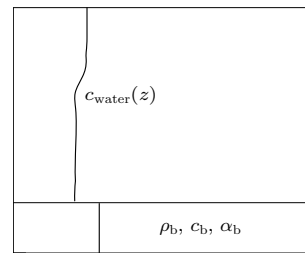


图 1 浅海地声模型

Fig. 1. The shallow water acoustic model.

### 2.2 warping 变换

由简正波传播损失来提取简正波衰减系数, 进一步再换算得到海底声衰减系数, 关键性的工作就是如何从接收到的不同阶简正波彼此叠加的信号中分离出单个简正波成分. 最容易想到的就是对接收信号进行窄带(例如中心频率附近 1/3 倍频程

带宽)滤波,利用不同阶简正波群速度差异形成的时域波形分离效应,直接提取得到不同阶简正波的时域波形,进一步得到对应的简正波传播损失,该方法原则上单通道接收即可,但要求水平距离足够远、简正波群速度差异足够大,不同简正波在时域接收信号波形能够彼此分开.其次就是利用垂直阵接收,结合简正波过滤技术来提取不同简正波分量,该方法尽管不要求简正波在时域波形上彼此分开,但需要用垂直阵接收,实际应用中容易受到阵形误差影响,本文利用warping变换来实现不同简正波成分的分离,进一步提取得到简正波传播损失,用于海底衰减系数反演.

warping变换是一种时间轴的非线性变换,对于接收到的多个简正波叠加的信号波形

$$p(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(f)P(f, r, z_r, z_s) e^{-i\omega t} d\omega \equiv \sum_{m=1}^M p_m(t, r), \quad (6)$$

其中

$$p_m(t, r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(f)P_m(f, r, z_r, z_s) e^{-i\omega t} d\omega, \\ S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{i\omega t} dt, \\ s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{-i\omega t} d\omega.$$

$s(t)$ 是声源发射的宽带脉冲信号, $S(f)$ 是对应的信号频谱,采用时间变换

$$t = \sqrt{t'^2 + t_0^2} \equiv w(t'), \quad (7)$$

将接收信号 $p(t, r)$ 变换成为

$$g(t', r) = |\dot{w}(t')|^{1/2} p[w(t'), r] = \sum_{m=1}^M g_m(t', r), \quad (8)$$

以及

$$g_m(t', r) = |\dot{w}(t')|^{1/2} p_m[w(t'), r], \quad (9)$$

式中 $\dot{w}(t') = t'/w(t')$ ,  $t_0 = r/c_0$ ,  $r$ 是声源到接收点的水平距离,  $c_0$ 是参考声速,一般取水中(最小)声速,  $t'$ 称为warping时间.对于接收信号 $p(t, r)$ 经过warping变换之后得到的信号 $g(t', r)$ ,不同简正波在新的频率域(warping频率)上是彼此分离的,可以通过滤波得到单个简正波成分 $g_m(t', r)$ ,再利用warping反变换得到所需的 $p_m(t, r)$ .

### 2.3 模态提取仿真

为了说明warping变换分离简正波成分的效果,选取具有两层均匀分层介质的Pekeris模型进行数值计算,其中海深为30 m,海水和海底介质声速分别为1500和1600 m/s,密度比为1/1.6;声源深度为7 m,接收深度为29 m,水平距离为10 km;海底介质声衰减系数为 $\alpha_b(f) = 0.3f_k^{1.9}$  dB/m,  $f_k = f/1000$ 是以kHz为单位的信号频率;发射信号 $s(t)$ 选取为频带100—400 Hz的宽带高斯信号.

图2给出了接收信号 $p(t)$ 对应的时域波形、频谱结构和时频分析结果及其warping变换信号 $g(t)$ 对应的时域波形、频谱结构和时频分析结果.从图中可以看出原始接收信号时域波形,能够大致分辨出对应前三阶简正波的三部分信号波形(100 Hz时,应该有三阶波导简正波,400 Hz时应该有六阶波导简正波,更高阶的简正波由于声源级和激发强度等方面的原因,并没有明显观察到).在三阶简正波对应的三部分波形结构中,可以看到频散效应导致的不同的频率成分是不同的时间到达的(高频先到,低频后到,对应于上排时频图中三条亮条纹结构).由于简正波之间的群速度差异和水平距离不甚合适、简正波频散引起的时域扩展等原因,很难从时域波形结构上(图2(a))将三阶简正波分开,也无法从频域结构上(图2(b))进行分离,但warping变换后的信号则有明显改善.在时域波形结构上,尽管三阶简正波对应的三部分信号波形在时域上也没有完全分开(图2(d)),但变成三个单频成分,分别对应前三阶简正波在理想波导的截止频率<sup>[5]</sup>( $0.5mc_w/D$ ): 25, 50, 75 Hz,频谱上完全分离开了(图2(e)).这样就可以对warping信号 $g(t', r)$ 进行频率滤波处理,得到不同的简正波对应的信号波形 $g_m(t', r)$ ,然后再反变换得到其原始的接收信号波形 $p_m(t, r)$ 以及对应的信号频谱 $P_m(f, r)$ .

图3给出了利用warping变换提取得到的简正波接收信号波形与直接数值计算得到的结果比较.图3(a)—图3(c)依次为前三阶简正波在warping频率域滤波以后的分离结果;图3(d)—图3(f)依次为前三阶简正波通过warping变换分离得到的信号时域波形(虚线)及其数值计算结果(实线).从图中可以看到前三阶简正波被正确地提取出来,得到的结果与直接数值计算的结果完全一致.注意图中第三阶简正波的接收信号波形,由于它在图1所示的Pekeris波导中的截止频率约为173.8 Hz,故低于100 Hz的频段频谱被波导截止了.

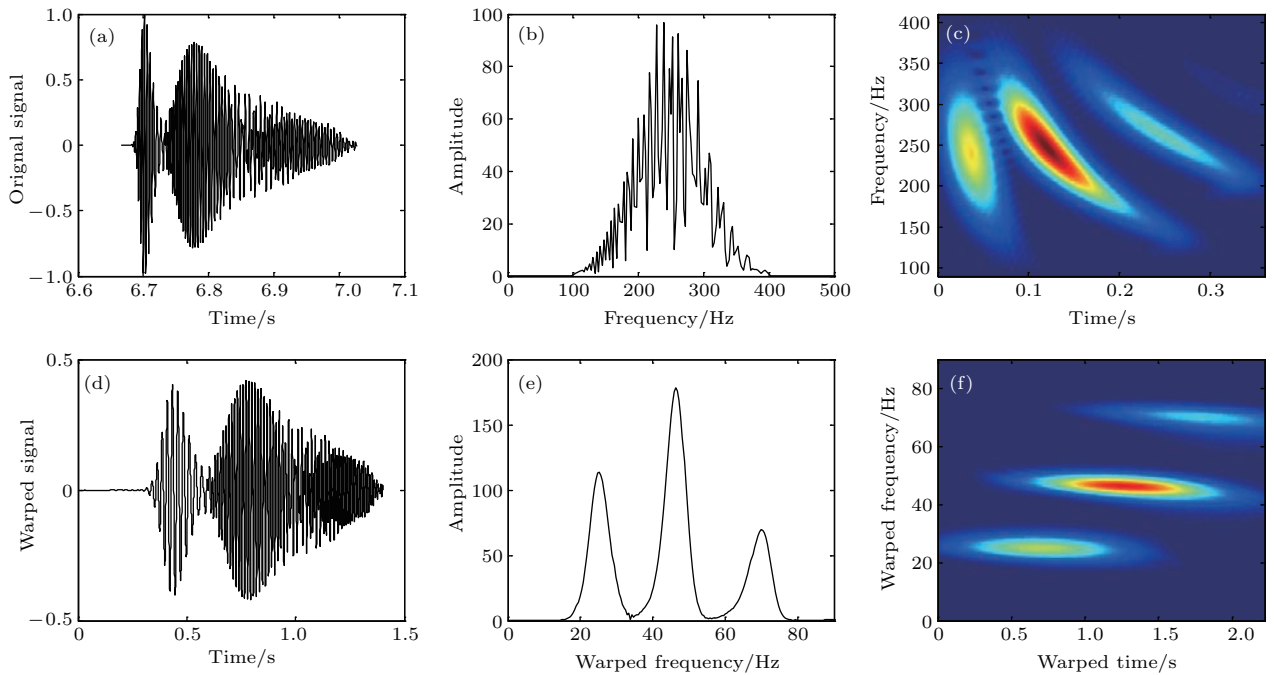


图2 (网刊彩色) (a) 原始接收信号; (b) 原始接收信号的频谱图; (c) 原始接收信号的时频图; (d) warping 变换的信号; (e) warping 变换信号的频谱图; (f) warping 变换信号的时频图

Fig. 2. (color online) (a) Original signal; (b) the spectrum of original signal; (c) spectrogram of the original signal; (d) warped signal; (e) the spectrum of the warped signal; (f) spectrogram of the warped signal.

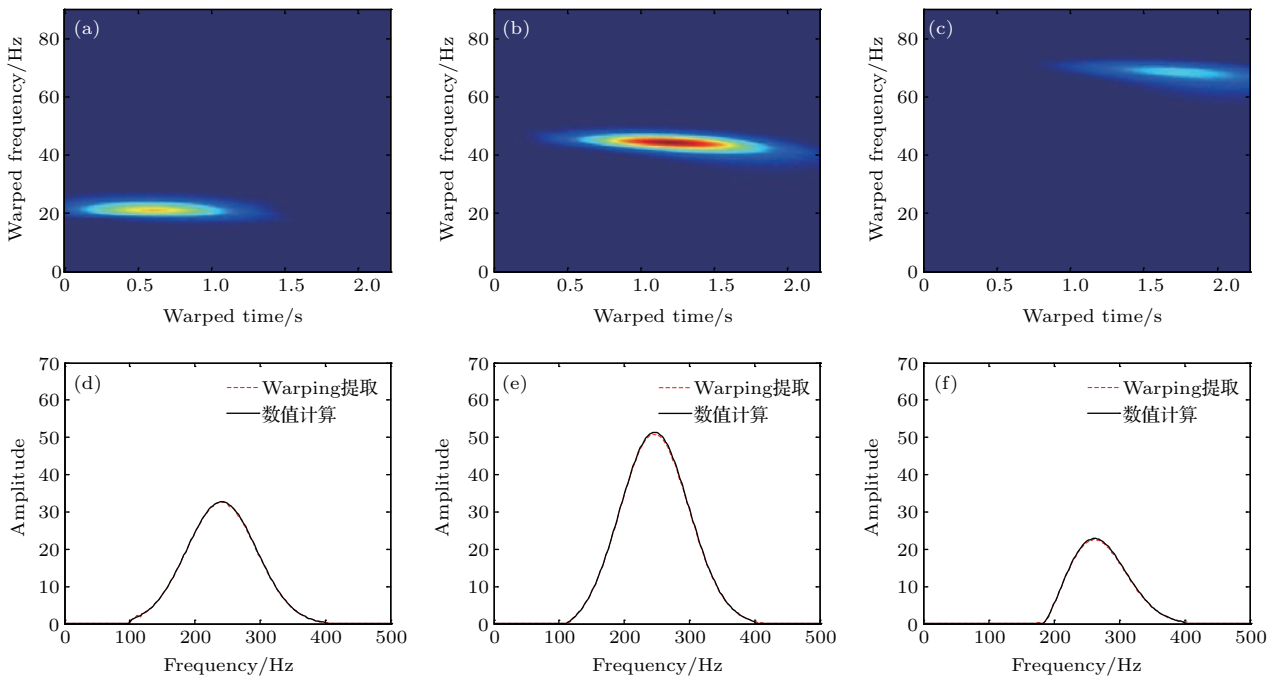


图3 (网刊彩色) warping 变换通过窄带滤波提取模态简正波以及提取结果与数值计算在频谱的对比图

Fig. 3. (color online) Normal modes extracted from the warped signal by narrow band filter and the contrast between extracted result and numerical calculation in spectrum.

### 3 试验与结果分析

海上实验数据来自于2002年冬季黄海北部进行的一次声传播试验. 试验海区海深约为30 m,

海底平坦, 沉积层厚度超过10 m以上, 对于数据分析的100—1000 Hz频段范围内, 可以等效近似为均匀半无限流体介质海底; 接收船抛锚, 垂直接收阵船舷吊放入水, 水中共29个阵元, 阵元间距1 m, 分布在1—29 m深度范围; 接收信号

经过滤波放大后用(RSR512)磁带录音机记录, 采样频率 10 kHz; 发射船沿设定航线航行, 航速约 12 节, 沿途投放 7 m 定深、38 g 装药量的爆炸声源, 前 50 枚(距离约 11 km 以内)间隔 30 s 投放一枚, 对应间隔约为 200 m, 后面 50 枚间隔 1 min 投放一枚, 对应距离间隔约 400 m, 这样最远距离约

31 km. 试验期间海况良好. 图 4 给出了测量得到的声速剖面以及发射、接收布置示意图. 从图中可以看到, 声速剖面上下差异不大, 表层 6 m 声速约为 1477.3 m/s, 16 m 以下声速约为 1475.1 m/s, 6—16 m 深度范围是一个弱跃层, 声速差约为 2.2 m/s.

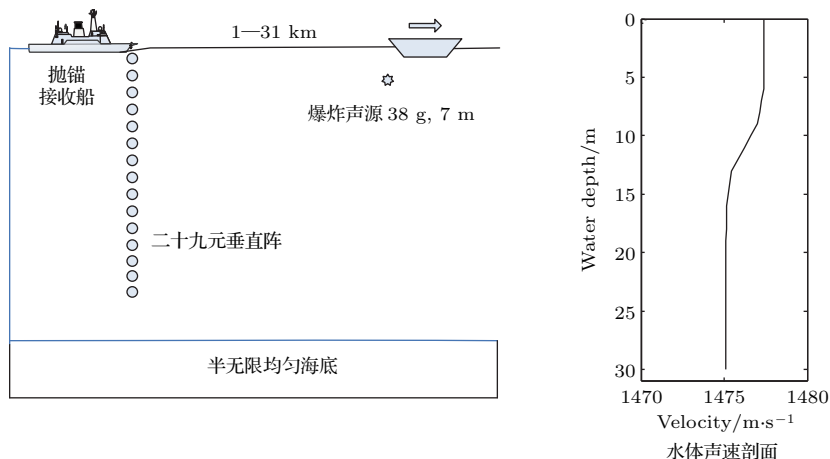


图 4 发射接收布置示意图以及测量声速剖面

Fig. 4. Diagram of the transmitter and receiver system and the sound velocity profile.

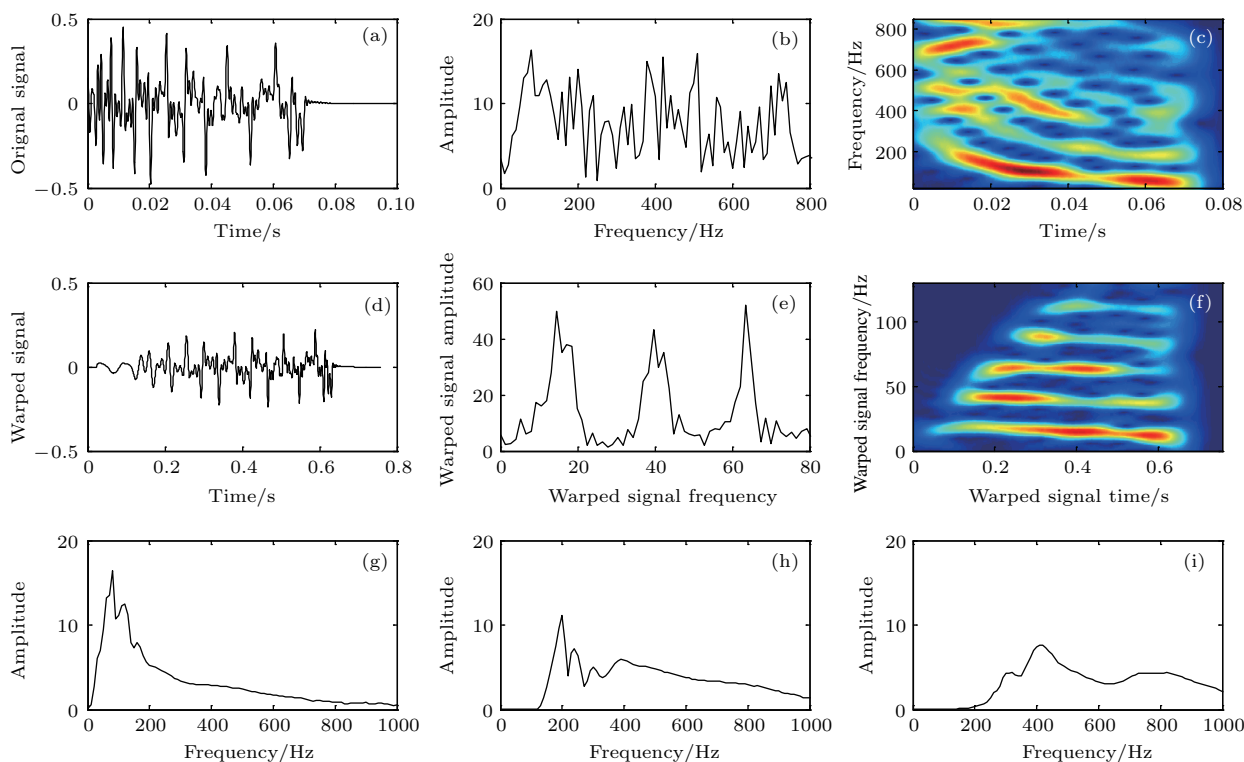


图 5 (网刊彩色) (a) 原始接收信号; (b) 原始接收信号的频谱图; (c) 原始接收信号的时频图; (d) warping 变换的信号; (e) warping 变换信号的频谱图; (f) warping 变换信号的时频图; (g) 第一阶简正波频谱图; (h) 第二阶简正波频谱图; (i) 第三阶简正波频谱图

Fig. 5. (color online) (a) Original signal; (b) the spectrum of original signal; (c) spectrogram of the original signal; (d) warped signal; (e) the spectrum of the warped signal; (f) spectrogram of the warped signal; (g) the spectrum of the first mode wave; (h) the spectrum of the second mode wave; (i) the spectrum of the third mode wave.

选取接收阵最下面一个阵元接收的7个距离点上的爆炸声信号进行数据处理, 这样接收深度约为29 m, 声源深度约为7 m, 距离点分别为1.735, 3, 4.16, 5.31, 7.78, 9.1, 10.25 km; 图5给出了4.16 km距离上的爆炸声接收信号的分析处理结果. 可以看到, 在800 Hz频段范围内, 大致有5阶明显的简正波存在, 已经很难将不同阶的简正波进行分离, 在经过滤波以及反变换以后, 得到了所需要的单个简正波成分  $P_m(f, r)$  (前三阶简正波结果见图5(g)—图5(i)).

获得单个简正波成分以后进一步计算出(2)式对应的距离归一化的简正波传播损失; 对7个距离点的处理结果进行线性拟合, 得到对应的斜率  $K_m(f)$  以及简正波衰减系数  $\beta_m(f)$ , 结果如图6—图8所示, 用于后续的海底衰减系数反演. 从图中结果可以看到, 简正波衰减系数(或者简正波传播损失斜率), 随着简正波阶数和频率是逐渐增大的, 这与“海底声衰减随频率增加以及高阶简正波海底反射损失增加”的物理机理是符合的.

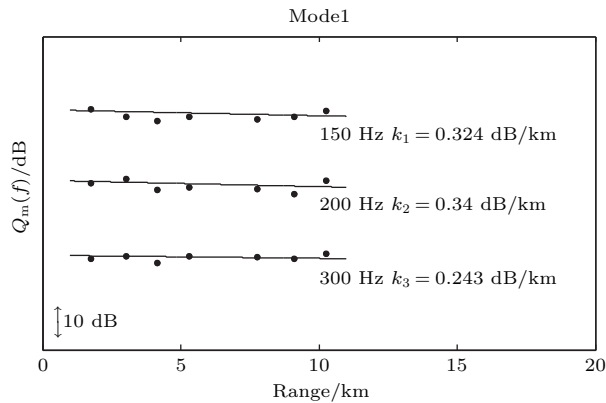


图6 模态一拟合所得斜率

Fig. 6. Slope of the first normal mode.

表1给出了根据(5)式、由前三阶简正波衰减系数  $\beta_m(f)$  换算得到的海底衰减系数  $\alpha_b(f)$  结果, 其中海底介质密度和声速采用文献[6]给出的数据. 从表中可以看到, 海底衰减系数随频率的增加而增大, 并且不同简正波得到的结果也相当一致.

为了进一步分析海底衰减系数  $\alpha_b(f)$  的频率变化关系, 对得到的数据结果按照关系式  $\alpha_b(f) = \alpha_0 f_k^n$  dB/m,  $f_k = f/1000$  进行了拟合, 在150—550 Hz频段范围内, 拟合结果为  $\alpha_0 = 0.581$ ,  $n = 1.86$ , 如图9所示.

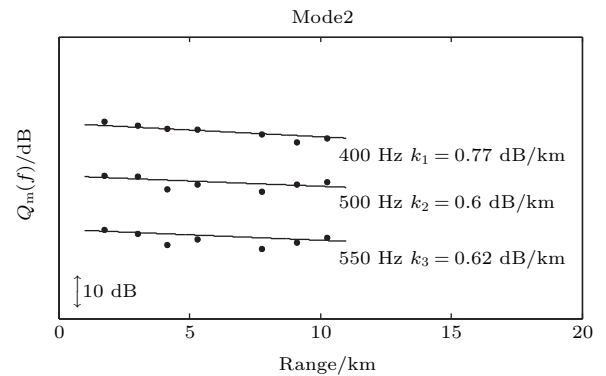


图7 模态二拟合所得斜率

Fig. 7. Slope of the second normal mode.

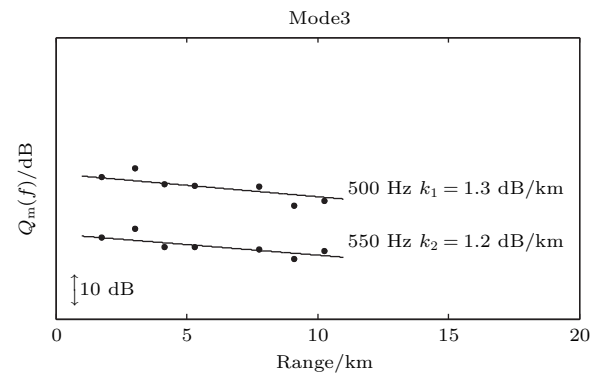


图8 模态三拟合所得斜率

Fig. 8. Slope of the third normal mode.

表1 海底衰减反演结果

Table 1. Invert results of seabed attenuation.

Mode	模式一			模式二			模式三	
	Frequency/Hz	150	200	300	400	500	550	500
Attenuation/dB·m <sup>-1</sup>	0.015	0.031	0.062	0.114	0.159	0.201	0.166	0.1976

从处理数据的过程分析, 试验的误差来自于两方面: 海洋波导参数的偏差、海洋噪声对信号的干扰, 以及原始信号的预处理等对信号造成的影响. 爆炸声接收信号包含直达波和气泡脉动, 而直达波

与一次脉动的时间间隔较短, 使得选择的信号长度有限. 且随着信号传播距离增加, 有限长度的直达波由于频散效应其低频部分会有部分能量流失. 故利用warping变换提取单模态简正波可使用的距离

有限, 而简正波距离归一化的传播损失其斜率对距离是敏感的, 可用数据在距离上太短会造成数据处理的误差. 鉴于这些因素, 单模态简正波中信噪比高、较为稳健的频带较窄.

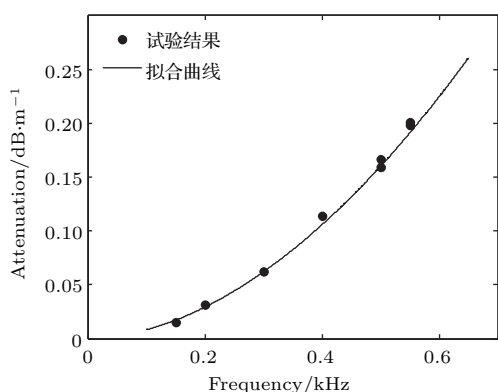


图9 海底衰减拟合图

Fig. 9. Fitting of seabed attenuation.

## 4 结 论

在海底地声反演问题中, 通过建立海底地声模型反演所得参数的本质为在频带范围内真实海底的等效模型参数. 在本研究中, 利用 warping 变换较好地分离出前三阶简正波, 由简正波幅值与距离的关系获得半无限海底地声模型下的海底衰减.

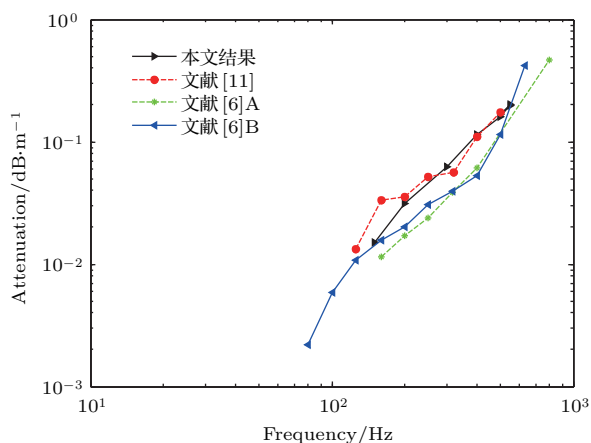


图10 (网刊彩色) 海底衰减随频率的变化关系

Fig. 10. (color online) Seabed attenuation as a function of frequency.

通过数据处理和分析, 给出在150—550 Hz范围内的衰减随频率的变化关系为  $\alpha = 0.581 f_k^{1.86}$  (dB/m). 在频点500, 550 Hz处, 由第二模态和第三模态所得海底衰减系数相近. 图10为本文反演结果与文献[6]海域A、海域B以及文献[11]中反演结果的对比如. 试验海区均为黄海海域, 其变化规律基本一致.

## 参考文献

- [1] Peng Z H, Zhou J X 2004 *IEEE J. Oceanic Engineer.* **29** 4
- [2] Jiang Y M, Chapman N R 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 4
- [3] Tindle C T 1982 *J. Acoust. Soc. Am.* **71** 5
- [4] Potty G R, Miller J H, Lynch J F 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **114** 4
- [5] Holmes J D, Carey W M, Dediu S M, Siegmann W L 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 5
- [6] Zhou J X 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **78** 3
- [7] Li Z L, Yan J, Li F H, Guo L H 2002 *Acta Acoust.* **27** 6 (in Chinese) [李整林, 鄢锦, 李风华, 郭良浩 2002 声学学报 **27** 6]
- [8] Baraniuk R G, Jones D L 1995 *IEEE Trans. Sign. Proc.* **43** 2269
- [9] Bonnel J, Le Touzé G, Nicolas B, Mars J I 2013 *IEEE Signal Proc. Magazine* **30** 120
- [10] Bonnel J, Barbara N 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 719
- [11] Zeng J, Chapman N R, Bonnel J 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** EL394
- [12] Lu L C, Ma L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024305 (in Chinese) [鹿力成, 马力 2015 物理学报 **64** 024305]
- [13] Duan R, Chapman N R, Yang K D, Ma Y L 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **139** 70
- [14] Yao M J, Lu L C, Ma L, Guo S M 2016 *Acta Acoust.* **41** 1 (in Chinese) [姚美娟, 鹿力成, 马力, 郭圣明 2016 声学学报 **41** 1]
- [15] Qi Y B, Zhou S H, Zhang R H, Zhang B, Ren Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044303 (in Chinese) [戚聿波 2014 物理学报 **63** 044303]
- [16] Wang D, Guo L H, Liu J J, Qi Y B 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 104302 (in Chinese) [王冬, 郭良浩, 刘建军, 戚聿波 2016 物理学报 **65** 104302]
- [17] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 1992 *Computational Ocean Acoustics* (New York: Springer) pp385–389



# Inversion of seabed attenuation by using single mode extracted by warping transform\*

Li Jia-Wei<sup>1)2)</sup> Lu Li-Cheng<sup>1)†</sup> Guo Sheng-Ming<sup>1)</sup> Ma Li<sup>1)</sup>

1) (Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 6 April 2017; revised manuscript received 24 June 2017 )

## Abstract

Seabed is an important part of the marine environment and it has a significant influence on sound propagation. Considering the fact that geoacoustic parameters are directly acquired with difficulty and complexity, a lot of researchers have focused on the inversion of them. The seabed attenuation coefficient is insensitivity to the matching field. However it has great effects on the transmission loss, mode amplitude ratios, etc. It can be inverted from measurements of these quantities. In this paper, we present an inversion scheme based on warping transform technique for estimating the seabed attenuation coefficient. It utilizes an equivalent seabed model which is constructed by using a prior and posterior knowledge. The dispersion characteristics of normal modes can be observed using the time-frequency analysis of the explosive signal recorded. The dispersion curve can be used to invert the seabed sound speed and density. The results presented by other scholars in the same circle are cited in this paper that focuses on how to obtain the seabed attenuation. Warping transform technique is used to separate and extract the normal modes. The main advantage of warping transform is that it can transform the time-frequency spectrogram into linear relationship which makes it easier to extract the normal modes. The feature of this paper lies in determining the distance normalized normal mode transmission loss. If the depths of receiving hydrophone and the explosion source are constant, the plot of normalized normal mode transmission loss versus distance is a straight line from the normal modes theory, which can be used to obtain the attenuation factor of real part of pressure. Then the seabed attenuation coefficient of the shallow water acoustic model can be calculated. In order to verify the effectiveness of this method, the warping transformation technology is used to separate and extract the first three modes from the simulated Gaussian pulse signal which is obtained in a simulated environment which is similar to the real marine environment. The extracted results are completely consistent with the numerical results. After that, the impulsive signal data collected in the Yellow Sea are analyzed according to the scheme process, and the relationship between the seabed attenuation and frequency is  $\alpha = 0.581f_k^{1.86}$  (dB/m) in a range from 150 Hz to 550 Hz. The results are in good agreement with those obtained by other scholars in the same circle. On the other hand, the inversion results of seabed attenuation from different modes can be used for comparison at the same frequency, which can be a good support for the result.

**Keywords:** warping transform, extract the mode, matched curve, seabed attenuation

**PACS:** 43.30.Bp, 43.30.Pc, 43.60.-c, 43.60.Pt

**DOI:** 10.7498/aps.66.204301

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11004214, 11274338).

† Corresponding author. E-mail: [luce\\_1983@sina.com](mailto:luce_1983@sina.com)