

基于 Warping 变换的波导时频分析

鹿力成 马力

Analysis of waveguide time-frequency based on Warping transform

Lu Li-Cheng Ma Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024305 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024305

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024305>

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

浅海内波影响下的波导不变量变化特性分析

Time-varying characteristics of the waveguide invariant under internal wave condition in the shallow water area

物理学报.2014, 63(19): 194303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194303>

水平变化浅海声波导中模态特征频率与声源距离被动估计

Modal characteristic frequency in a range-dependent shallow-water waveguide and its application to passive source range estimation

物理学报.2014, 63(4): 044303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.044303>

运动目标辐射声场干涉结构映射域特征研究

Characteristics of mapping domain of the acoustic field interference structures radiated by a moving target

物理学报.2014, 63(3): 034306 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034306>

浅海矢量声场干涉结构形成机理及试验研究

The mechanism of the interference structure in shallow water vector acoustic field and experimental investigation

物理学报.2013, 62(14): 144301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144301>

基于时空滤波理论的低频声场干涉结构研究

Researches on the interference structure in low-frequency acoustic field based on space-time filter theory

物理学报.2012, 61(5): 054303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.054303>

基于Warping变换的波导时频分析

鹿力成^{1)2)†} 马力¹⁾²⁾

1)(中国科学院水声环境特性重点实验室, 北京 100190)

2)(中国科学院声学研究所, 北京 100190)

(2014年3月28日收到; 2014年7月28日收到修改稿)

海洋波导的存在使得信号在水中传播过程中产生频散, 从而降低了信号处理质量. 基于声场的波导不变特性, 给出了一种具有普遍意义的Warping变换, 这种变换可以将波导中的信号频散特性简单化. 数值仿真结果表明, 只需要知道波导不变量的取值范围就可以很好地提取出波导的频散曲线, 数值仿真和海上实验数据给出了较为理想的结果.

关键词: 波导不变量, Warping变换, 频散曲线

PACS: 43.60.Ac, 43.60.Bp

DOI: 10.7498/aps.64.024305

1 引言

在海洋波导中, 声波在水中传播时会产生频散现象, 表现为脉冲信号的展宽、重叠. 由于频散效应, 低频声场在距离和频率平面上的分布呈现稳定和规律的条纹, 在此基础上Chupov^[1]首先提出了波导不变量的概念来描述这种现象. 近十年来, 许多学者利用波导不变量进行了很多有价值的研究, 比如对声源距离的估计^[2,3]、地声反演^[4]、纵向相关补偿^[5]和消频散^[6,7]等.

在信号处理中, 调制算子(modulation operator)和变形算子(warping operator)是两大类正交变换算子. 水下波导中信号的传播过程即是一种类似的调制过程, 而通过Warping变化则可将这一调制过程简单化. 最近一些学者将Warping变换应用到水下信号分析中. Ioana等^[8]利用时域Warping变换分析水下生物的叫声. Bonnel等^[9]和Zeng等^[10]分别利用时域Warping变化在等声速剖面下提取频散曲线反演海底地声参数. Wang等^[6]和Bonnel等^[7]利用频域Warping变换补偿信号的频散特性. 周士弘等^[11,12]利用Warping变换获得特征频率与收发距离的变换关系对被动声源距离进

行估计.

结合波导不变量性质, 给出了一种具有普遍意义的Warping变换, 这种变换可以适用于非等声速剖面. 首先给出基于波导不变量的Warping变换推导过程, 并进行数值仿真研究, 表明只需要知道波导不变量的取值范围下即可进行变换. 最后结合海上实验数据, 获得了满意的结果.

2 波导不变量的Warping变换

浅海中对于点源声场可以表示为各号简正波叠加:

$$P(\omega, r, z) = \frac{\exp(j\pi/4)}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi}} \sum_m \psi_m(\omega, z_s) \psi_m(\omega, z) \times \frac{\exp(jk_m(\omega)r)}{\sqrt{k_m(\omega)r}}, \quad (1)$$

其中 k_m 和 ψ_m 分别为第 m 号简正波本征值和本征函数. 对于一个脉冲声源, 接收点处的声压场表示为

$$p(t, r, z) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) P(\omega, r, z) \exp(-j\omega t) d\omega \\ = A \sum_m \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \psi_m(\omega, z_s) \psi_m(\omega, z)$$

† 通信作者. E-mail: luce_1983@sina.com

$$\times \frac{\exp[j(k_m(\omega)r - \omega t)]}{\sqrt{k_m(\omega)}} d\omega, \quad (2)$$

其中

$$A = \frac{\exp(j\pi/4)}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}}.$$

当声源频率是一个缓慢变化的函数, 只考虑指数项因子, 采用稳相法得到声场为

$$p(t, r, z) = \sum_m B_m(\omega_0) \exp[j(k_m(\omega_0)r - \omega_0 t)], \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} B_m(\omega_0) &= AS(\omega_0)\psi_m(\omega_0, z_s)\psi_m(\omega_0, z) \\ &\times \sqrt{\frac{2\pi}{rk_m(\omega_0)|k_m''(\omega_0)|}} \exp(\pm j\pi/4), \quad (4) \end{aligned}$$

$$k_m'(\omega_0) = t/r. \quad (5)$$

根据波导不变量的定义及在 Wentzel-Kramers-Brillouin 近似条件下, G'Spain 和 Kuperman [13] 给出了简正波本征值的近似表达式:

$$k_m(\omega) = \frac{\omega}{c(z)} - \frac{C_2^m \omega^{-1/\beta}}{c(z)}. \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式, 得

$$\frac{r}{\beta} \frac{C_2^m \omega_0^{-1/\beta-1}}{c(z)} = t - \frac{r}{c(z)}. \quad (7)$$

Warping 变换是一种正交变换的坐标轴转换, 定义一个算子 U 作用在信号 $s(t)$ 上 [14], 即

$$(Us)(t) = |\dot{w}(t)|^{1/2} s[w(t)], \quad (8)$$

这里 $w(t)$ 为一个平滑的单调函数, $\dot{w}$ 为一阶导数. 通常选取 $w(t)$ 是使得信号在时频域内线性化, 比如在时域内 $w(t)$ 使得信号近似为单频信号, 而在频域内 $w(f)$ 使得信号近似为脉冲信号. 经过 Warping 变换后的坐标为

$$\tilde{t} = w^{-1}(t), \tilde{f} = f\dot{w}(w^{-1}(t)) \text{ 时间算子}, \quad (9a)$$

$$\tilde{t} = t\dot{w}(w^{-1}(f)), \tilde{f} = w^{-1}(f) \text{ 频率算子}. \quad (9b)$$

将 (7) 式代入 (3) 式中, 其中的指数项相位因子表示为

$$\begin{aligned} \varphi_m &= -\left(\beta^{-\frac{\beta}{1+\beta}} + \beta^{\frac{1}{1+\beta}}\right) \\ &\times \left(\frac{C_2^m r}{c(z)}\right)^{\frac{\beta}{1+\beta}} \left(t - \frac{r}{c(z)}\right)^{\frac{1}{1+\beta}}. \quad (10) \end{aligned}$$

定义 Warping 变换函数 $w(t)$ 为

$$w(t) = t^{1+\beta} + \frac{r}{c(z)}. \quad (11)$$

通过 (9a) 式即可得到变换后的信号时间、频率和原信号时间、频率关系:

$$\begin{aligned} \tilde{t} &= \left(t - \frac{r}{c(z)}\right)^{\frac{1}{1+\beta}}, \\ \tilde{f} &= fW'(W^{-1}(t)) \\ &= (1+\beta) \left(t - \frac{r}{c(z)}\right)^{\frac{\beta}{1+\beta}} f. \quad (12) \end{aligned}$$

经过时域的变换信号表现为单频信号. 这种 Warping 变换形式不同于 Bonnel 等 [9] 给出的理想波导下的变换. 理想波导中时变换算子 $w(t) = \sqrt{t^2 - (r/c)^2}$, 包含了距离和声速非线性项, 而对于 (11) 式, 距离和声速项只是时间轴的平移, 不依赖于信号的选取时刻.

同理将 (7) 式变形为

$$T \equiv t - \frac{r}{c(z)} = \frac{1}{\beta} \frac{rC_2^m \omega_0^{-1/\beta-1}}{c(z)}. \quad (13)$$

代入 (3) 式指数项相位因子得到

$$\varphi_m = -\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \frac{rC_2^m \omega_0^{-1/\beta}}{c(z)}. \quad (14)$$

定义 Warping 变换函数 $w(f)$ 为

$$w(\omega) = \omega^{-\beta}. \quad (15)$$

通过 (9b) 式即可得到变换后的信号时间、频率和原信号时间、频率关系:

$$\tilde{t} = -T\beta\omega^{1+1/\beta}, \quad \tilde{f} = \omega^{-1/\beta}. \quad (16)$$

频域 Warping 变换就是 Bonnel 等 [7] 提出的指数项频域变换, 这里通过数学公式推导得到. 需要注意的是当 $\beta > 0$ 时, 得到的时间是负数, $\beta < 0$ 时, 得到的时间为正数. 从 (16) 式很容易得到 Wang 等 [6] 提到的消频散变换时间轴的关系 (其中假定 ω 变化很小):

$$t = \frac{r}{c(z)} - \tilde{t} \frac{1}{\beta} \omega_c^{-1-1/\beta}. \quad (17)$$

经过频域的变换信号表现为脉冲信号.

3 数值仿真

3.1 等声速剖面

在等声速剖面下, 对数值仿真获得的信号进行 Warping 变换. 海水声速为 $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 海深 62 m , 海底参数为声速 $1600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 密度 $1.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 衰减 $0.2 \text{ dB}/\lambda$, 声源深度为 30 m , 接收深度 60 m , 距离 10 km . 声源信号为一个中心频率为 150 Hz

的高斯脉冲, 频率范围为150—350 Hz. 在等声速剖面下波导不变量 β 近似为1, 对接收的信号进行(11)和(15)式变换. 图1(b)给出了接收信号时域波形, 图1(e)给出了短时傅里叶变换, 图1(a)给出了时域Warping变换, 图1(d)给出了短时傅里叶

变换. 可以看出, 每一号简正波进过变换以后, 对应的频率几乎为直线. 图1(c)给出了频域Warping变换, 在时间上各号简正波被压缩明显能够区分出来, 图1(f)为频域分析结果, 各号简正波的频散特性明显被消除.

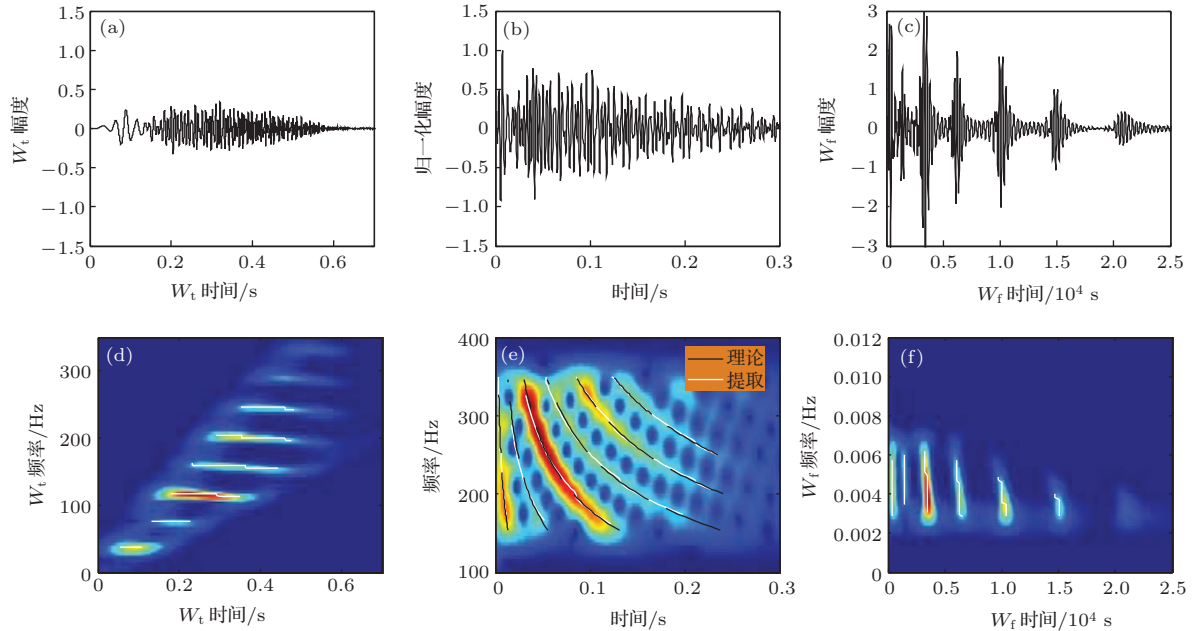


图1 (网刊彩色) 等声速剖面下接收信号 Warping 变换

3.2 典型夏季声速剖面

典型的夏季声速剖面如图2所示, 其他的环境参数如3.1所述. 图3给出了在10 km处的声场分布, 利用2维快速傅里叶变化(FFT)得到波导不变量分布在1.0—1.6之间.

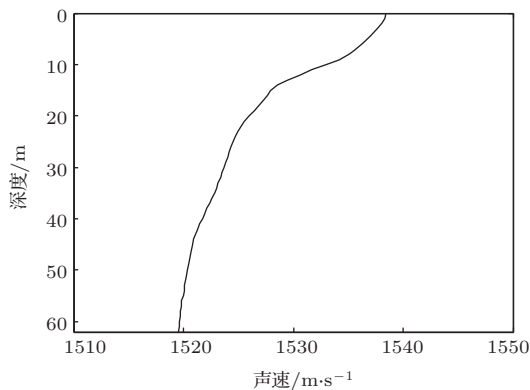


图2 典型夏季声速剖面

图4给出了设定波导不变量 $\beta = 1$ 时域与频域Warping变换结果, 其中在图5(e)中第1号和第2号简正波几乎不能分开, 而通过变换(图5(d))很容

易将两号简正波分开. 图5(c)和(f)看出由于消除了频散特性, 各号简正波频散基本被抵消掉.

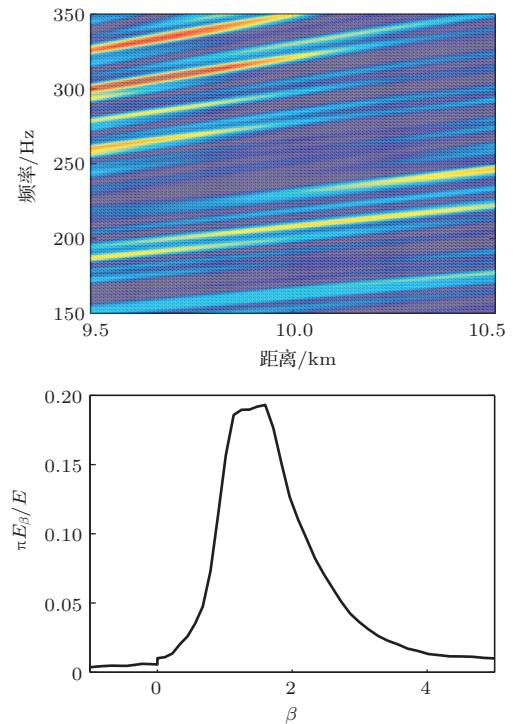


图3 (网刊彩色) 波导不变量分布

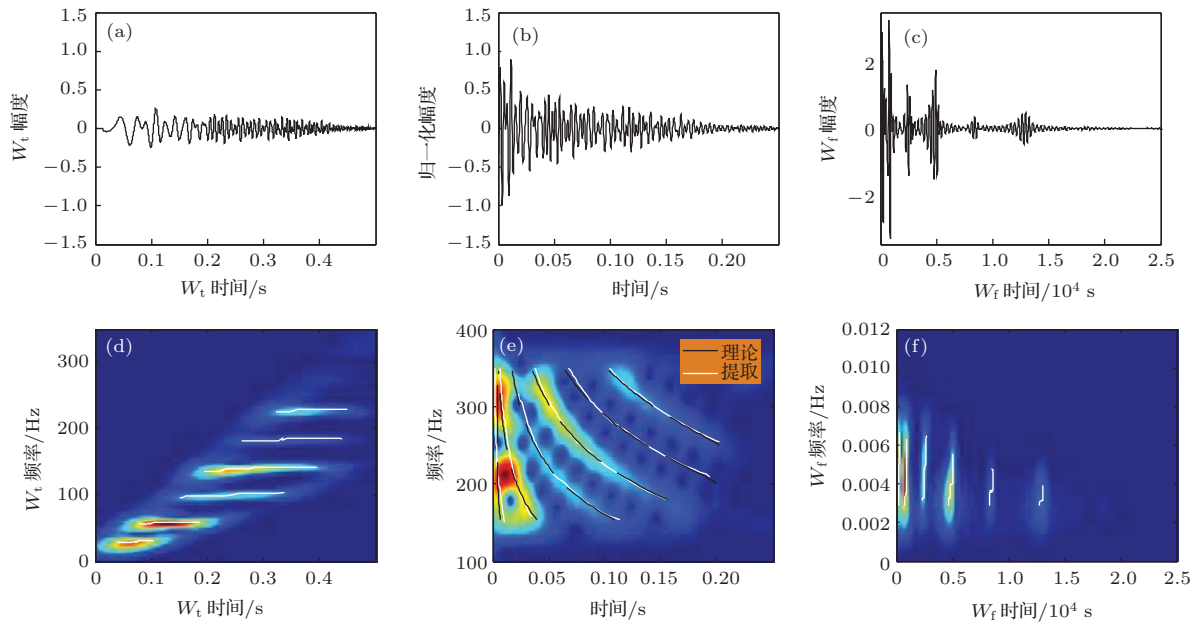
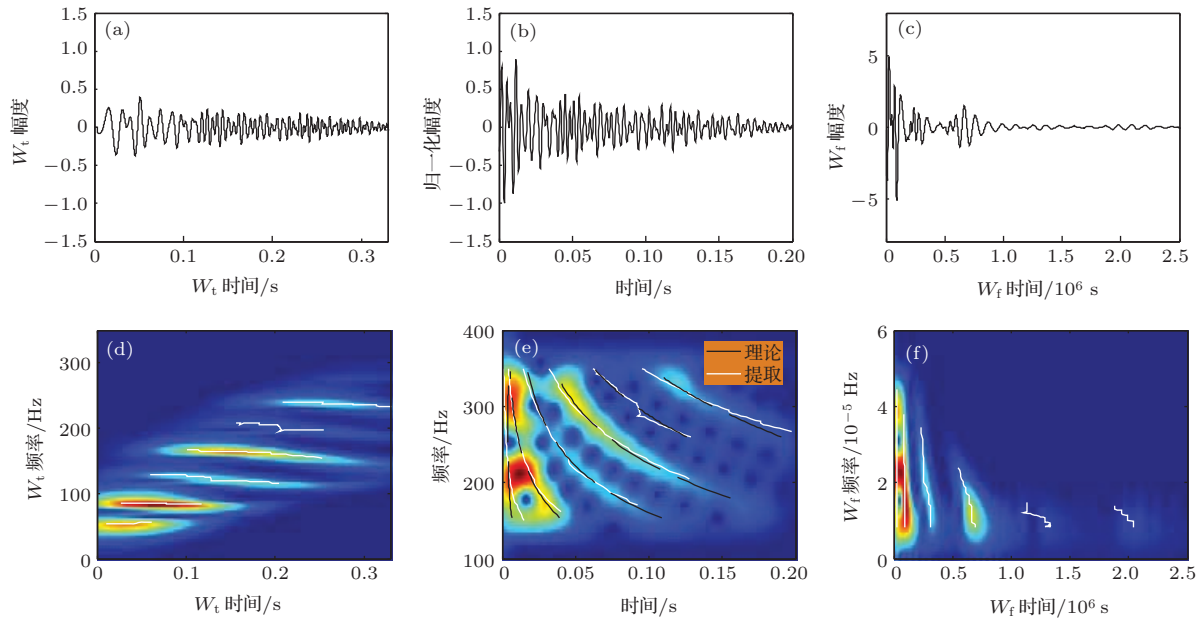
图4 (网刊彩色) 夏季声速剖面下接收信号 Warping 变换 ($\beta = 1$)图5 (网刊彩色) 夏季声速剖面下接收信号 Warping 变换 ($\beta = 0.5$)

图5和图6分别给出了波导不变量为0.5和1.5时的Warping变换结果, 对于时域变换波导不变量的取值影响很小, 而对于频域变换, 当波导不变量取值较小时低号简正波的频散特性不能够完全抵消.

4 海上实验

将Warping变换应用在海上实验数据中, 本次实验是2002年1月在黄海进行, 水深大约30 m, 海水剖面近似等声速为 $1474.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 爆炸声源深度

为7 m, 垂直接收爆炸信号. 图7给出了声源距离2.105 km, 深度为29 m的接信号时频变换, 其中波导不变量 $\beta = 1$. 利用定义的波导不变量Warping变换可以很好地将简正波提取出来, 图7(e)中的白线为实验数据提取频散曲线, 黑色线条为根据Zeng等^[10]反演结果, 海底声速为 $1600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 密度 $1.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

图8给出了不同深度的接收信号频域Warping变换结果. 对比图8(a)和(b)可以明显看出来, 通过频域Warping变换频散特性明显消除.

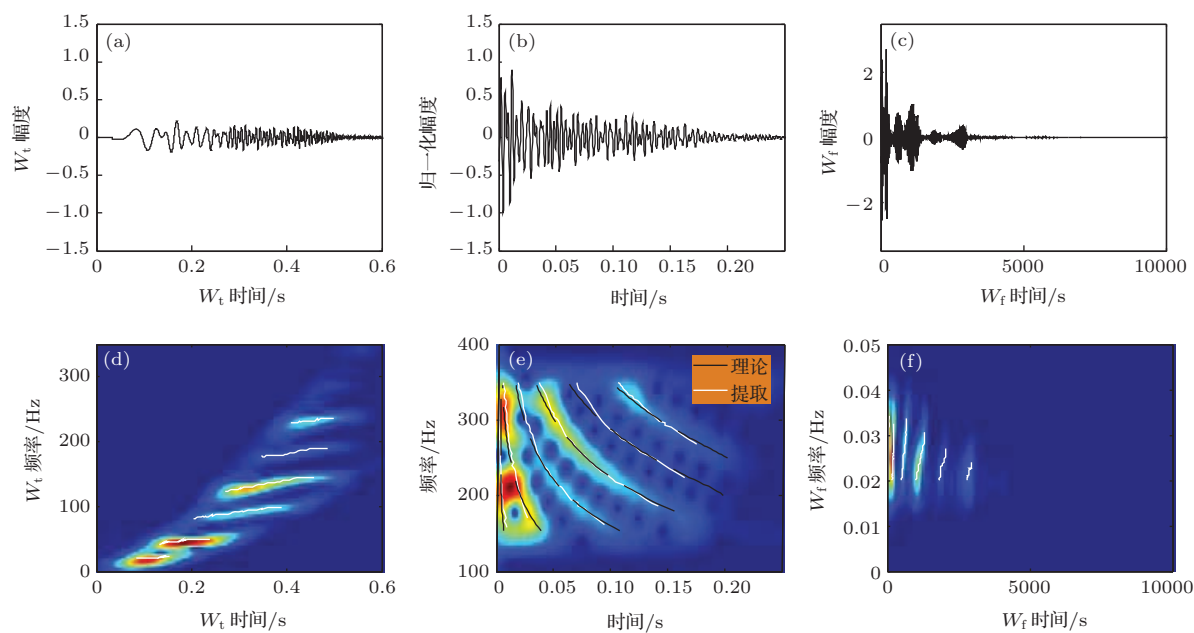


图6 (网刊彩色) 夏季声速剖面下接收信号 Warping 变换 ($\beta = 1.5$)

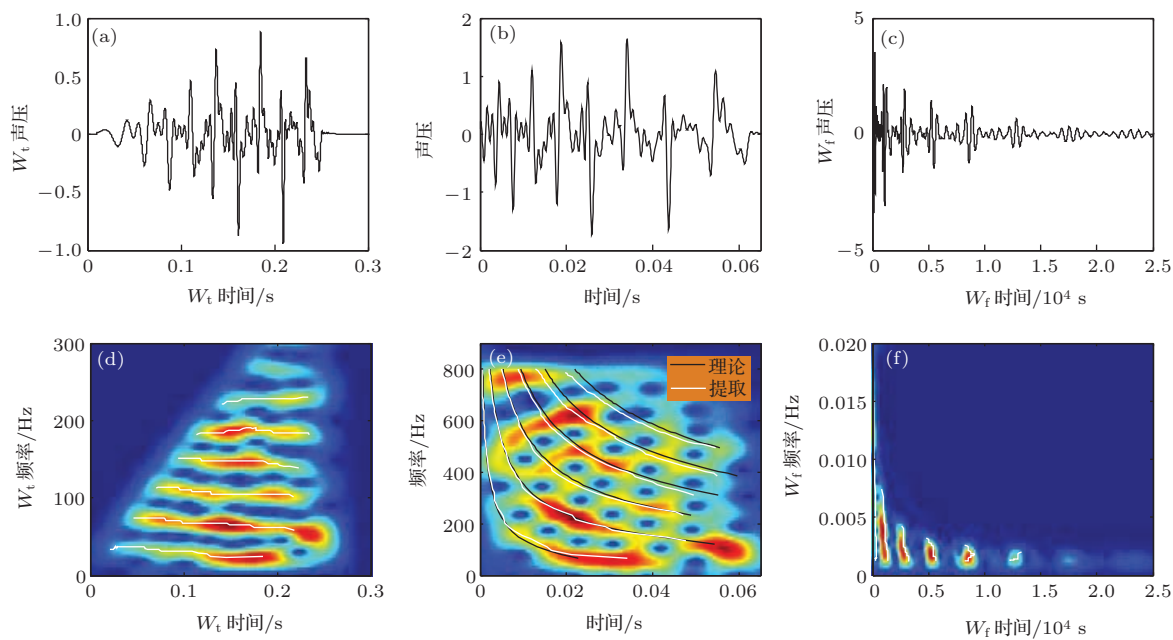


图7 (网刊彩色) 黄海试验数据 Warping 变换

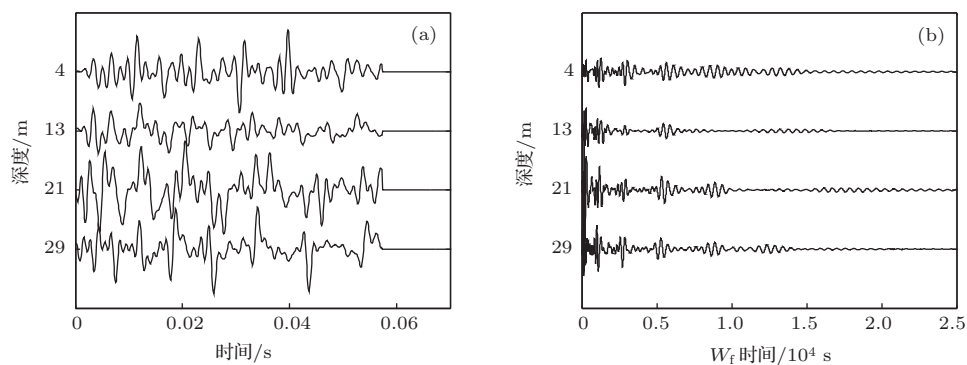


图8 不同深度接收信号频域变化结果 (a) 声压; (b) W_f 声压

5 总 结

基于波导不变量的 Warping 变换可以适用于较为复杂的海洋环境中, 通过 Warping 变换可以将水中波导的各号简正波分离出来, 同时可以消除各号简正波的频散. 通过数值仿真和海上试验数据表明, 只需要知道波导不变量的取值范围即可进行 Warping 变换.

参考文献

- [1] Chuprov S D 1982 *Ocean Acoustic: Current State* (Nauka: Moscow) p71
- [2] Thode A M 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **108** 1582
- [3] Lu L C, Guo S M, Ma L 2009 *Tech. Acoust.* **28** 586 (in Chinese) [鹿力成, 郭圣明, 马力 2009 声学技术 **28** 586]
- [4] Heaney K D 2004 *IEEE J. Oceanic Engineer.* **29** 88
- [5] Su X X, Zhang R H, Li F H 2006 *Acta Acoust.* **31** 303 (in Chinese) [苏晓星, 张仁和, 李风华 2006 声学学报 **31** 303]
- [6] Gao D Z, Wang N, Wang H Z 2010 *J. Comput. Acoust.* **18** 245
- [7] Bonnel J, Le Touzé G, Nicolas B, Mars J I 2013 *IEEE Signal Processing Magazine* **30** 120
- [8] Ioana C, Quinquis A, Stephan Y 2006 *IEEE J. Oceanic Engineer.* **31** 628
- [9] Bonnel J, Nicolas B, Mars J I 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 719
- [10] Zeng J, Chapman N R, Bonnel J 2013 *JASA Express letters* **134** 394
- [11] Zhou S H, Qi Y B, Ren Y 2014 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **57** 225
- [12] 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]
- [13] D'Spain G L, Kuperman A 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **106** 2454
- [14] Baraniuk R, Jones D 1995 *IEEE Trans. Signal Proc.* **43** 2269

Analysis of waveguide time-frequency based on Warping transform

Lu Li-Cheng^{1)2)†} Ma Li¹⁾²⁾

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

2) (Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 28 March 2014; revised manuscript received 28 July 2014)

Abstract

Sound propagation in underwater will induce dispersion due to the natural sea waveguide, and then it will degrade the results of the signal processing. Based on the waveguide invariant, a general warping transform is presented. This warping transform could extract the waveguide mode dispersion curve and remove the effect of the waveguide dispersion. Results from the simulation and experiment show that the transform works well.

Keywords: waveguide invariant, Warping transform, frequency dispersion curve

PACS: 43.60.Ac, 43.60.Bp

DOI: 10.7498/aps.64.024305

† Corresponding author. E-mail: luce_1983@sina.com