

纪念应崇福院士诞辰 95 周年

# 数据驱动声场信息处理与控制\*

王 宁<sup>†</sup> 高大治 王好忠

(中国海洋大学 信息学院 青岛 266100)

**摘要** 海洋水声环境复杂性、多变性及其模型参数获取限制需要直接从实验数据中估计参数、评估模型。在水声物理框架下,利用信道物理规律、特性,基于数据估计/提取模型参数或模型(模型函数),实现声场信息处理和控制具有学术价值和应用意义。本文综述波导不变量、格林函数提取和单边声场聚焦三种数据驱动声场信息处理与控制方法近年国内外相关研究进展。

**关键词** 波导不变量,格林函数提取,单边声场聚焦

**中图分类号:** O422.5; O427.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-310X(2013)03-0224-07

## Data-derived acoustic signal processing and controlling of field

WANG Ning GAO Dazhi WANG Haozhong

(Information & Technology Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** It is difficult to acquire full set of propagation model parameters due to complexity and variation of underwater acoustic environment. For these reasons, it is often required to invert/estimate parameters and evaluate model directly from experimental data. Data-derived acoustic signal processing and controlling of field method/technique using underwater acoustic properties or rules are of academic importance and application significance. In this paper recent developments on the waveguide invariant, Green's function retrieval and single sided wave field focusing are briefly reviewed.

**Key words** Waveguide invariant, Green's function retrieval, Single sided wave field focusing

## 1 引言

声波在海洋中传播会受到海底、海面及不同尺度的海洋动力过程等影响使得声传播规律千差万别,具有不确定性/随机特性,水声物理实验的复杂性等使得水声物理学研究具有一定挑战性。水声物

理主要包括以下研究方向。正问题:传播、混响、环境噪声、目标散射、声场起伏(时空相关特性)及水声反问题研究。我国水声物理学研究历史由来已久,尤其在浅海水声物理学研究处于国际先进水平<sup>[1-2]</sup>。相关内容读者可以参考最新中国科学-G“浅海声学进展”专刊<sup>[3]</sup>。

2013-04-15 收稿; 2013-04-26 定稿

\*国家安全重大基础研究资助项目

作者简介:王宁(1962-),男,山东青岛人,教授,研究方向:海洋声学。

高大治(1976-),男,副教授。

王好忠(1975-),男,工程师。

<sup>†</sup>通讯作者:王宁, E-mail: wangyu@public.qd.sd.cn

水声物理研究最终目的是物理建模和声场预报。上世纪以来声场建模的发展使得基于声场模型的声信息处理(简称模基处理)得以迅速发展,匹配场处理在水声学应用中堪称典范。实际海洋多变、复杂,预先获取环境参数存在实际限制,许多模型参数需要直接用声学方法获取,譬如浅海海底声学参数一般采用声学反演方法。此外,模型宽容性要求建模充分考虑现场数据,以保证模型适应。在水声物理模型框架下,应用数据估计/提取声学参数、评估完善模型(模型函数),基于数据实现信息处理乃至控制当前水声物理建模应用的关键之一。我们强调基于水声物理模型的数据驱动方法研究。类似于海洋科学的数据同化,其最终目的是:通过联合观测数据和物理模型,实现声场预报,弥补单独观测或模型不足。

本文主要综述作者研究室近几年关心的数据驱动信息处理相关研究,强调水声物理与信号处理交叉,供水声同仁参考。

## 2 频散/波导不变量/各类变换

声波在海洋中(尤其浅海)长距离传播通常用简正波方法描述。已知频率、环境参数(水体声速剖面、海底声学参数),水平不变信道声场可表示为离散个简正波模态线性叠加的形式<sup>[3]</sup>:

$$p(r, z; \omega) \propto \sum_{n=1}^N \varphi_n(z; \omega) \varphi_n(z_0; \omega) \frac{\exp(ik_n r)}{\sqrt{k_n r}}, \quad (1)$$

$kn(\omega), n=1, 2, \dots, N$  为简正波水平波数,其随频率依存性即导波频散特性。考虑吸收的频散曲线计算一般需要在复数频率平面搜根计算,文献[4-5]作者等给出了一种计算宽带频散的新方法。频散会导致通过信道的信号展宽,加之模态叠加最终导致信号畸变,是浅海声场应用中的主要障碍之一。对频散特性的深入研究可能提供新的声场信息处理可能性。

考虑声场空间两点相关

$$\langle C(r, z, r', z'; \omega) \rangle \propto \sum_{n,m=1}^N \varphi_n(z_0; \omega) \varphi_n(z; \omega) \tilde{\varphi}_m(z_0; \omega) \tilde{\varphi}_m(z'; \omega) \frac{\exp[i(k_n r - \tilde{k}_m r')]}{\sqrt{k_n r k_m r'}} + c.c. \quad (2)$$

$\varphi_n(z; \omega)$  利用 WKB 近似代入,简正波干涉形成  $r$ - $z$  平面干涉结构。在深海环境下,这种干涉结构尤为明显,特定组简正波干涉与射线束之间有很好的对应。上个世纪 80 年代,俄罗斯学者发现:空间干涉结构之外,浅海低频声场呈现稳定的  $r$ - $\omega$  干涉条纹<sup>[6]</sup>,这种干涉结构源于浅海波导特有的频散特性。声场水平干涉结构由简正波波数差决定,浅海声波导水平波数差近似满足

$$\Delta k_{mn} = (\gamma_n - \gamma_m) \omega^{-1/\beta} \equiv \gamma_{nm} \omega^{-1/\beta}, \quad (3)$$

其中  $\beta$  在浅海环境近似等于 1。令  $r=r'$ , 干涉项在  $r$ - $\omega$  平面沿曲线  $\omega^{-1/\beta} r = \text{const.}$  保持一定,形成稳定的干涉结构,对应的微分形式:

$$\beta = r/\omega \times \partial \omega / \partial r, \quad (4)$$

已知  $\beta$  值, (4) 式可以用于水中目标距离估计。这种  $r$ - $\omega$  平面的特殊性质的运用非常有意义。阵元信号按照  $r$ - $\omega$  平面特定的曲线叠加可补偿长阵纵向相关系数<sup>[8-9]</sup>、增强宽带波数形成 (waveguide invariant focusing)<sup>[10]</sup>。通过沿特定的频率积分,聚焦一定的水平距离,改善时反聚焦不稳定性<sup>[11]</sup>,在混响背景下增强某一距离目标回波信号<sup>[12-13]</sup>。阵不变量 (Array-invariant) 方法联合了简正波到达方位与频散特性可近似估计宽带目标方位和距离<sup>[14]</sup>。

文献[15-17]将(3)式改写为

$$k_n(\omega) = \frac{\omega}{c_n} + \gamma_n \omega^{-1/\beta}, \quad (5)$$

其中  $c_n, \gamma_n$  随简正波号数变化。与相共轭处理一样通过补偿相位

$$\exp[-i(\frac{\omega}{s} + \gamma \omega^{-1/\beta})], \quad (6)$$

视  $s, \gamma$  为参数对频率信号做富立叶变换,不同号的简正波频散当  $1/s=r/c_n; \gamma=r\gamma_n$ , 延时和频散可以抵消。消除频散的脉冲信号可以被有效地压缩,如图 1 所示为某次青岛海区实验结果。左图为匹配滤波后的信号,图 1(a)为图 1(b)消频散变换后的结果。

浅海声信道的另一特点是:不同模态存在截止频率,对于理想波导水平波数可以表示为

$$k_n(\omega) \approx \frac{1}{c} \sqrt{\omega^2 - \omega_n^2}, \quad (7)$$

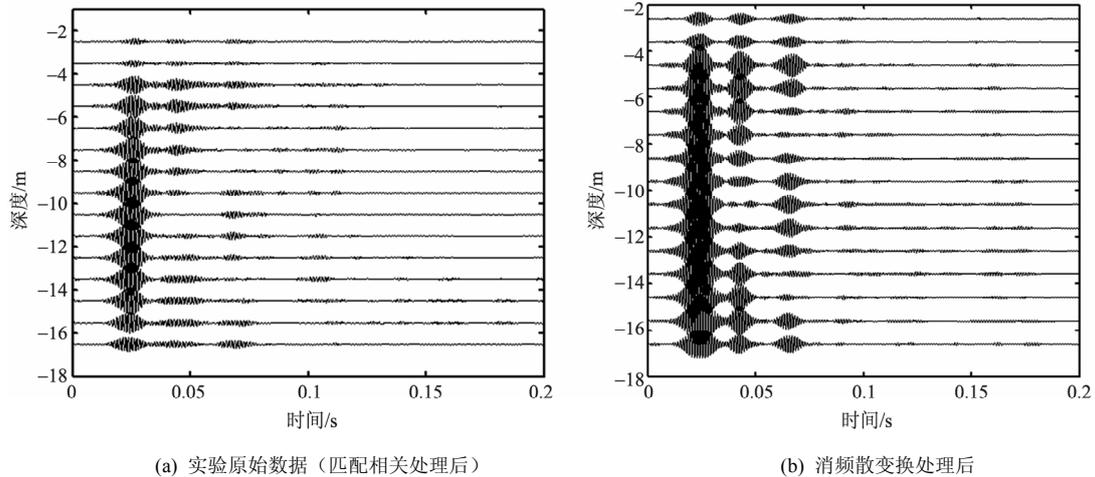


图1 消频散处理结果

其中 $\omega_n$ 是简正波的截止频率。将该式代入(1)式并利用最陡相位法对频率积分得

$$p(r, z; t) \propto \sum_{n=1}^N A_n(z; t) \exp(i2\pi f_n \sqrt{t^2 - (r/c)^2}). \quad (8)$$

通过对时间轴做一定的扭曲变换 **Warping transform**, 脉冲信号在时频谱域被拉直, 每一号简正波时频曲线平行于对应截止频率<sup>[18-19]</sup>。这种变换在低频截止频率附近效果好。对(7)式做简单双曲变换

$$\omega = \frac{\omega_n}{2} (\omega' + \frac{1}{\omega'}). \quad (9)$$

(7)式和(5)式具有相同的函数形式, 同样可以采用消频散变换。上述各种方法优点是一般无需严格已知环境参数。以上方法充分利用了浅海声波导的频散规律。需要强调的是: 关键在于规律的函数形式, 具体数值的变化影响为次要因素。

波导不变量  $\beta$  数值与波导环境参数有关, 随简正波号数、频段也会发生相应变化<sup>[20-22]</sup>。随机内波<sup>[23]</sup>、强跃层结构及水平变化波导会导致  $\beta$  估计数值有一定分布, 试验数据处理结果一般会有一定的误差<sup>[24-25]</sup>。而深海典型剖面下, 会聚区模态对应的  $\beta$  非常大, 决定了深海声道的特殊行为。此外波导不变量应用一般要求宽带信号, 高信噪比, 当目标距离变化超过介质起伏相关半径时, 干涉条纹一般会模糊。需要提到的是早在上世纪 60 年代, D.E.Weston<sup>[26-27]</sup>就在实验数据中发现了浅海声场在试验时间-频率平面 ( $\tau-\omega$ ) 的干涉结构。 $(\tau-\omega)$  干涉结构由于水体变化导致的波数变化所致, 这种干

涉结构可以用来监测水体变化<sup>[28-31]</sup>。

### 3 环境噪声与格林函数提取

如何利用海洋环境噪声是一个负有挑战性的课题。当同一噪声通过两个接收器时, 如果延时恰好等于噪声穿过两者的时间差, 两者信号相关正比于通过两者的噪声能量。这些性质近年被用于称为格林函数提取 (**Green's function extraction**) 方法<sup>[32]</sup>。当噪声满足一定条件譬如: 扩散场, 两点声场相关正比于介质格林函数。虽然一般条件下严格格林函数难以得到, 但格林函数的相位/时间到达结构一般被较好地抽出。这为利用环境噪声开展海洋声层析、噪声成像研究提供了可能性。无需主动声源可以简化许多技术环节, 而数据驱动同样是这类方法的优点之一。

对于海洋波导, 由(2)式出发, 假设噪声源分布近似满足:

$$\langle a_n a_m = \varphi_n(z_0) \varphi_m(z_0) \rangle_{ave} \propto \delta_{nm}, \quad (10)$$

$\langle \rangle_{ave}$  表示随机样本平均。忽略各号简正波的幅度信息, 将(16)代入(2)时得到的结果与两点间格林函数的相位结果完全吻合。海洋环境噪声水平相关的经典结果

$$C(R, z_1, z_2) = \frac{i\pi}{k^2} Q^2(\omega) \int \frac{1}{\rho^2} dz' \sum_{n,m} \frac{\varphi_n(z') \varphi_n(z_1) \varphi_m(z') \varphi_m(z_2)}{k_n^2 - \tilde{k}_m^2} \quad (11)$$

$$[H_0^{(1)}(k_n R) - H_0^{(1)}(-\tilde{k}_m R)],$$

已经包含了相关信息<sup>[33]</sup>。文献[34-38]从针对海洋声学理论模型到实验数据处理开展大量工作: 深海环境噪声的确可以较好地提取两条相隔 2.0 km 垂直阵间的传播波阵面, 累积时间一般在分钟量级。文献[39-40]讨论了运动介质中的声场相关问题, 介质运动特性对相关有明显影响。

混响是由于声波在水体、界面及其海底体散射导致, 通常表示出明显的随机特性。文献[39]讨论了浅海混响信号格林函数提取。假设远场混响条件下, 证明

$$C(\vec{r}_1 - \vec{r}_2, z_1, z_2) = \sum_n \sqrt{\frac{\pi^3}{2k_n^3 |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}} \varphi_n(z_1) \varphi_n(z_2) \times [Q_1^n e^{ik_n |\vec{r}_1 - \vec{r}_2| + i\pi/4} + Q_2^n e^{-ik_n |\vec{r}_1 - \vec{r}_2| - i\pi/4}] \quad (12)$$

在得到这个结果时, 文献[39]过度采用了最陡相位近似。而实际上浅海混响相关可以存在不同号间的干涉<sup>[42]</sup>。作者将混响散射近似为一定分布的随机点散射, 证明为了消除的干涉项需要附加处理譬如: 垂直阵垂向平均<sup>[43]</sup>。

格林函数提取利用海洋环境噪声或混响信号无需主动声源提供了一种新的海洋声学探测、层析可能性。这种方法应用依然存在许多问题需要研究譬如: 能否完全提取格林函数(除相位信息外), 实际数据处理需要累加时间多少(与噪声时间相关半径关系等等)、监测距离受那些因素影响, 海洋环境噪声的非各向同性影响, 海洋随机介质起伏对格林函数提取的影响等。目前唯一较成功的应用是文献[42-46]海洋噪声海底成像, 但这也只是早年 Claerbout 猜想的具体应用。格林函数提取在地球物理探测领域有更为广泛、深入的研究, 有兴趣的读者可以参考<sup>[47]</sup>。

#### 4 逆散射变换与数据驱动声场聚焦

场聚焦作为成像、探测主要手段广泛应用于各类波动现象。许多应用中, 被探测介质声学参数未知, 常规波束形成、聚焦概念失去基础。时间反转固然可以实现声场聚焦, 前提条件是: 需要在待聚焦位置设置引导声源; 或者限于单体散射主导的问题, 响应矩阵的奇异值 SVD 分解与散射体一一对应。格林函数提取将两个接收器之一等效为虚拟声源, 但需要将接收器置于介质之中。

文献[48-50]提出一种一维单边聚焦概念(single-sided focusing)证明: 对于一维薛定谔方程(Schrodinger equation)或等离子波动方程(Plasma wave equation)(两者之间可以转换), 只要给定介质或势场的反射冲击响应, 可以设计入射波波形使得波场在特定时刻  $t_0$ , 聚焦在设定的空间位置  $x_0$ ; 该时刻除位置  $x_0$  为 Dirac- $\delta(x-x_0)$ -函数外, 其它空间点波场值为零。入射波波形可以通过求解一维逆散射(inverse scattering problem)的 Marchenko 方程得到。单边聚焦并非真正意义聚焦, 在二维洛伦兹时空图  $t > t_0$ , 波动场并非由  $x_0$  处点源辐射形成。单边聚焦场与其时间反转场相加可以实现“真正意义”的波场聚焦, 可以推广到三维层状散射介质<sup>[51-53]</sup>。

这是一个有潜力的方向, 通过数据驱动方式实现声场控制是一个很好的方向。作者最近给出了文献离散模拟, 讨论了一般多体散射环境聚焦方法。限于篇幅, 详细细节别处报道。以下利用简单三层 Goupillaud layered model, 说明其基本物理。所谓 Goupillaud 分层介质模型如图 2(a)所示, 分层介质由传播时间相等、声学均匀的若干层叠加形成。每层单程传播时间为  $\Delta t$ , 第  $k$  界面的反射系数为  $r_k$ 。这种模型的优点是计算非常直观, 可以洞悉其中的物理。

图 2(b)为三层模型的传播时间-空间图。为了形象表示, 假设初始入射波在足够大的负时间向  $x > 0$  区域入射,  $t = -4\Delta t$  时刻, 恰好波前传播到  $x=0$  处, 入射波拖尾到  $x = -6\Delta x$ 。下行波表示入射波, 在  $t-x$  平面沿向下  $45^\circ$ 角传播; 上行波表示反射波沿向上  $45^\circ$ 角传播。每经一层有相移  $W = \exp(i\omega\Delta t)$ , 因此入射信号的  $z$ -变换形式如下:

$$D(z) = W^{-4} [1 + \sum_{n=1}^3 D(n)z^n],$$

$$D(1) = -r_2 + r_2 r_1 + r_1 r_0,$$

$$D(2) = -r_2 r_1 r_0 + r_2 r_0 - r_1, D(3) = -r_0, \quad (13)$$

$t = 0$  时刻波前恰好传播至  $x = 4\Delta x$ , 单边聚焦对应除波前处总场存在,  $t = 0$  轴其它位置上上行、下行波和为零。表 1 第二列给出直观计算得到的  $t = 0$  轴空间格点的总场表示, 第三列对应离散 Gel'fand-Levitan-Marchenko (GLM)方程。

利用冲击反射相应与层反射系数间关系:

$$R(1) = r_0, \quad R(2) = r_1(1 - r_0^2),$$

$$R(3) = r_2(1 - r_0^2)(1 - r_1^2) - r_0(1 - r_0^2)r_1^2, \dots$$

可以验证表 1 结果。

表 2, 表 3 分别给出了图中标注的各点的场值。关于  $t=0$  轴对称的格点总场和等于零 (表 2)。设想  $(0, 4\Delta x)$  位置一个“虚拟声源”, 表 2 结果表明: 单

边聚焦声场与其时反的和构成的场在“虚拟源”的类空区域场 (图 3) 为零。表 3 计算了虚拟源光锥线 L-F 上各点下行波的幅值, 除公共因子  $t_0 t_1 t_2$  外各点下行波的幅值与虚拟源位置放置一个“点源”的结果完全一致。换言之: 对于处于虚拟源因果区域的观测者, 在未知源强度条件下, 无法区分位于虚拟源位置真实声源和虚拟源产生的声场时间序列。

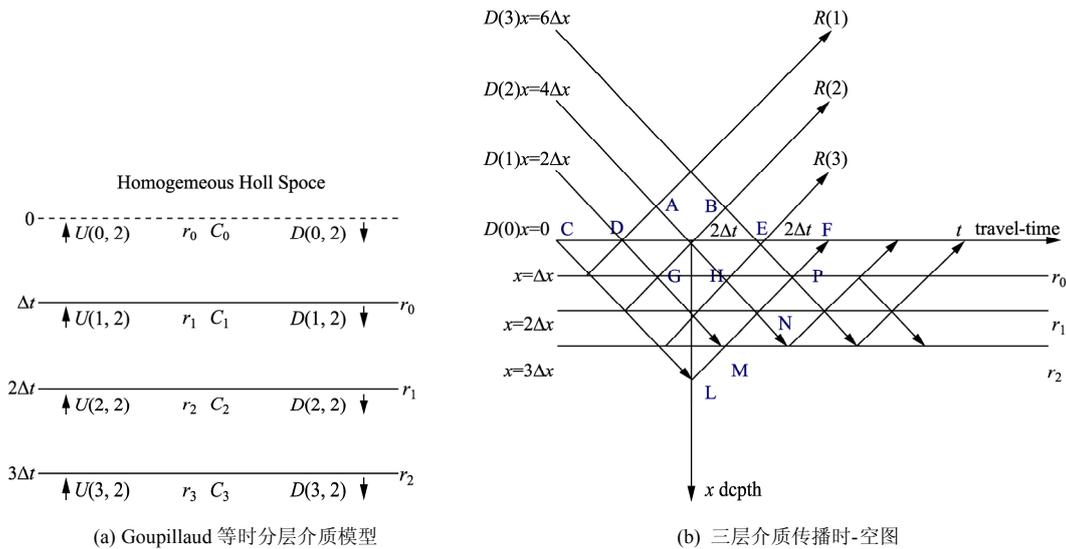


图 2 Goupillaud 层模型及三层模型传播时-空图

表 1 单边聚焦条件 at  $t = 0$

格点位置	物理条件	GLM 方程
$(0, -2\Delta x)$	$D(3)+r_0=0,$	$D(3)+R(1)=0$
$(0, 0)$	$D(2)+D(1)r_0+r_1r_0^2=0,$	$D(2)+R(2)+D(1)R(1)=0,$
$(0, 2\Delta x)$	$t_0t_1r_2 - t_0t_1r_2r_1 + D(1)t_0t_1 - t_0t_1r_1r_0=0.$	$D(3)+R(3)+R(1)D(2)+R(2)D(1)=0$
$(0, 4\Delta x)$	$t_0t_1t_2$	

表 2 类空区域总场分布

总场 $t < 0$	总场 $t > 0$	sum
A: $r_0+D(2)$	B: $D(3)+D(1)r_0+t_0^2r_1$	0
D: $r_0+D(1)$	E: $D(3)+r_0D(2)+D(1)t_0^2r_1+t_0^2t_1^2r_2-t_0^2r_1^2r_0$	0
G: $D(1)t_0+t_0r_1(1-r_0)$	H: $D(2)t_0+D(1)t_0r_1(1-r_0) + t_0^2r_1^2r_0(r_0-1) + t_0t_1^2r_2(1-r_0)$	0

表 3 虚拟源激发的声场

光锥线 L-F 上下行波幅值
M: $t_0t_1t_2(-r_1r_2-r_1r_0+D(1)) = -r_2t_0t_1t_2,$
N: $D(2)t_0t_1-D(1)t_0t_1r_2r_1-D(1)t_0t_1r_0r_1+t_0t_1r_2^2r_1^2-t_0t_1^3r_2r_0+t_0t_1r_2^2r_0^2+t_0t_1r_1^2r_2r_0=-t_0t_1^2r_2r_1$
P: $D(3)t_0-D(2)t_0r_1r_0-D(1)t_0t_1^2r_2r_0+D(1)t_0r_1^2r_0^2-t_0r_1^3r_0^3+2t_0t_1^2r_2r_1r_0^2+t_0t_1^2r_0r_1r_2^2=-t_0t_1^2t_2^2r_0$

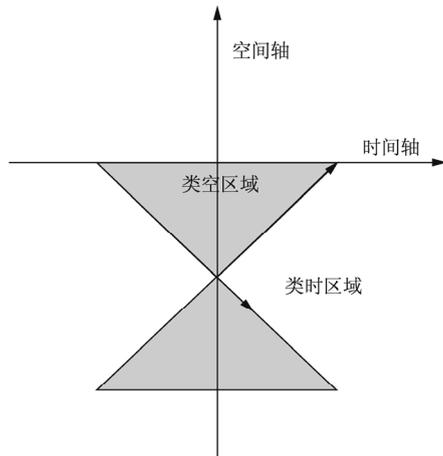


图 3 虚拟源的二维洛伦兹时空图(声速归一):  
影区为类空区, 也即非因果区域

一维 Goupillaud 层介质的单边聚焦物理过程可以描述如下: 在  $t-x$  二维时空图中, 单边聚焦的条件要求在  $t=0$  时刻, 对应空间格点场(图 2 中与  $t=0$  轴相交的空间点)消失。假设介质均匀, 一切问题不存在, 波前自然在设定位置聚焦。然而层反射引出不必要的虚像“鬼波=ghost wave”, 为此必须在输入信号中, 后续附加“反鬼波=anti-ghost wave”抵消。抵消每一个鬼波原理上需要对应的一个反鬼波。最前端到达的鬼波需要最后抵消(如表 1GLM 方程所示), 时间顺序相反以保证  $t=0$  时刻空间所有点(波前除外)场值消失。Goupillaud 层介质模型恰好保证: 沿同一时空特征线(图 2 种上、下行波走的  $t-x$  45°角直线譬如: A-N 线)行走的反射波的“像”具有同样位置, 因此在同样位置输入对应的反鬼波问题就解决了。由于总可以保证反鬼波自由度选取与鬼波自由度相同, 这个过程总是可以实现。

## 5 结论

单边聚焦方法发展、改进了 Newton-Marchenko-Faddeev 三维逆散射理论, 逐步接近应用。单边聚焦可认为是一种迭代时反技术,  $N$  次迭代原理上可以消除  $N$ -体散射虚像。与时反不同这类方法原理上可以克服多体强散射, 其深入研究有可能开辟数据驱动声场控制譬如: 散射环境中的声场聚焦, 虚拟源生成。目前理论上声波/标量波单边聚焦理论已有讨论<sup>[48-54]</sup>, 而弹性、电磁等矢量场理论, 多体强散射环境下单边聚焦方法及

其细致的数学物理证明有待完善。

单边聚焦方法完全数据驱动实现声场聚焦控制, 与时反和格林函数抽出方法不同, 无需源或接收器放置于介质之中, 适用于更广泛的应用背景。在水声学领域有可能应用于(1)在海底声参数反演<sup>[55]</sup>; (2)混响抑制; (3)声场控制/聚焦。单边聚焦方法在水声学领域尚未见应用报道, 大量的理论、数值和实验工作需要开展。

## 参 考 文 献

- [1] ZHANG R H, ZHOU J X. Shallow-Water Acoustics[M]. China Ocean Press, Beijing, 1997.
- [2] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 科学出版社, 北京, 1981.
- [3] 张仁和, 李整林, 彭朝晖, 等. 浅海声学研究进展[J]. 中国科学-G, 2013, 43, 增刊: s2-s15.
- [4] WANG N, WANG H Z. A Hamilton Solver for finding eigen-value of normal mode[J]. J. Comput. Acoustics, 2010, 18(3), 259-266.
- [5] WANG H Z, WANG N, GAO D Z. A Hamiltonian method for finding broadband modal eigenvalues[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, 131(2), 1047-1054.
- [6] CHUPROV S, MAL'TSEV N E. An invariant of the spatial-frequency interference pattern of the acoustic field in a layered ocean[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR (Proc. of the Russian Academy of Sciences), 1981, 257, 475-479.
- [7] GRACHEV G A. Theory of acoustic field invariants in layered waveguides[J]. Acoust. Phys., 1993, 39(1), 33-35.
- [8] ZHANG R H, SU X X, LI F H. Improvement of Low-Frequency Acoustic Spatial Correlation by Frequency-Shift Compensation' [J]. Chin. Phys. Lett., 2006, 23, 1838-1841.
- [9] 苏晓星, 张仁和, 李风华. 利用波导不变性提高声场的水平纵向相关特性[J]. 声学学报, 2006, 31(4).
- [10] TAO H L, KROLIK J L. Waveguide invariant focusing for broadband beamforming in an oceanic waveguide[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2007, 123(3), 1338-1346.
- [11] KIM S, KUPERMAN W A. Robust time reversal focusing in the ocean[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2003, 114(1), 145-157.
- [12] GOLDBAHN R, HICKMAN G, KROLIK J. Waveguide invariant broadband target detection and reverberation estimation[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2008, 124(5), 2841-2851.
- [13] 李风华, 张燕君, 张仁和, 等. 浅海混响时间-频率干涉特性研究[J]. 中国科学-G, 2010, 40(7), 838-841.
- [14] LEE S. W, NICHOLAS C. M. The array invariant[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2006, 119(1), 336-351.
- [15] WANG N. Dispersionless Transform and Potential Applications in Ocean Acoustics[J]. Presentation in the 9th Western Pacific Acoustics Conference, 2009.
- [16] GAO D Z, WANG N, WANG H Z. A dedispersion transform for sound propagation in shallow water waveguide[J]. J. Comput. Acoust., 2010, 18(3), 245-257.
- [17] 高大治, 王宁, 王好忠. 一种浅海脉冲声场环境自适应人工时反方法[J]. 中国科学-G, 2013, 43 增刊, s159-s167.

- [18] BARANIUK R, JONES D. Unitary equivalence: A new twist on signal processing[J]. *IEEE Trans. Signal Process*, 1995, 43(10), 2269-2282.
- [19] BONNEL J, NICOLAS B, MARS J I. Estimation of modal group velocities with a single receiver for geoacoustic inversion in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 128(2), 719-727.
- [20] SPAIN G L, KUPERMAN W A. Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, 106(5) 2454-2468.
- [21] SHANG E C, WU J R, ZHAO Z D. Relating waveguide invariant and bottom reflection phase-shift parameter  $P$  in a Pekeris waveguide[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2012, 131(5), 3691-3697.
- [22] HARRISON C H. The relation between the waveguide invariant, multipath impulse response, and ray cycles[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011, 129(5), 2863-2877.
- [23] ROUSEFF D. Effect of shallow water internal waves on ocean acoustic striation patterns[J]. *Waves Random Media*, 2001, 11(4), 377-393.
- [24] ZHAO Z D, WANG N, GAO D Z. Broadband Source Ranging in Shallow Water Using the  $\Omega$ -Interference Spectrum[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, 27 (6) 064301.
- [25] COCKRELL K L, SCHMIDT H. Robust passive range estimation using the waveguide invariant[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 127(5), 2780-2789.
- [25] WESTON D E. Experiments on time-frequency interference patterns in shallow-water acoustic transmission[J]. *J. Sound Vib.*, 1969, 10(3), 424-429.
- [26] WESTON D E. Interference of wide-band sound in shallow water[J]. *J. Sound Vib*, 1972, 21(1), 57-58.
- [28] TURGUT A, MARSHALL O, et al. Acoustic monitoring of the tide height and slope-water intrusion at the New Jersey Shelf in winter conditions[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, 121(5), 2534-2541.
- [29] Turgut A. Use of acoustic frequency shift for monitoring oceanographic processes in shallow water[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2009, 126(4), 2305.
- [30] TURGUT A, MIGNERET P C, GOLDSTEIN D J, et al. Acoustic observations of internal tides and tidal currents in shallow water[J]. *Acoust. Soc. Am.*, 2013, 133(4), 1981.
- [31] 高大治, 王宁, 王好忠, 等. 声强谱干涉结构监测浅海温跃层深度起伏[J]. *中国科学 G*, 2012, 42(2): 107-115.
- [32] SNIEDER R, WAPENAAR K, WEGLER U. Unified Green's function retrieval by cross-correlation: connection with energy principle[J]. *Phys. Rev. E*, 2007, 75: 036103-1-036103-14.
- [33] KUPERMAN W A, INGENITO F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1980, 67(2), 1988-1996.
- [34] ROUX P, SABRA K G, KUPERMAN W A, et al. Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, 117(1), 79-84.
- [35] ROUX P, KUPERMAN W A, et al. Extracting coherent wavefronts from acoustic ambient noise in the ocean[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, 116(4): 1995-2003.
- [36] SABRA K G, ROUX P, KUPERMAN W A. Arrival-time structure of the time-averaged ambient noise cross-correlation function in an oceanic waveguide[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, 117(1), 164-174.
- [37] SABRA K G, ROUX P, THODE A M, et al. Using ocean ambient noise for array self-localization and self-synchronization[J]. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2005, 30(1), 338-347.
- [38] ROUX P, FINK M. Green's function estimation using secondary sources in a shallow water environment[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, 113(3) 1406-1412.
- [39] WAPENAAR K. Nonreciprocal Green's function retrieval by cross-correlation[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2006, 120(1): EL7-EL13.
- [40] GODIN O A. Recovering the acoustic Green's function from ambient noise cross correlation in an inhomogeneous moving medium[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97(5): 054301-1-054301-4.
- [41] GODIN O A. On the Possibility of Using Acoustic Reverberation for Remote Sensing of Ocean Dynamics[J]. *Acoustical Physics*, 2012, 58(1): 129-138.
- [42] 李风华, 金国亮, 张仁和. 浅海相干混响理论与混响强度的振荡现象[J]. *中国科学 A 辑*, 2000, 30(6): 560-566.
- [43] 王好忠, 王宁, 高大治, 等. 浅海混响互相关函数与格林函数的关系[J]. *中国科学-G*, 2013, 43, 增刊, s106-s111.
- [44] SIDERIUS M, HARRISON C H, PORTER M B. A passive fathometer technique for imaging seabed layering using ambient noise[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2006, 120(3), 1315-1323.
- [45] GERSTOFT P, HODGKISS W S, SIDERIUS M, et al. Passive fathometer processing[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, 123(3), 1297-1305.
- [46] SIDERIUS M, SONG H, GERSTOFT P, et al. Adaptive passive fathometer processing[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 127(4), 2193-2200.
- [47] WAPENAAR K, DRAGANOV D, ROBERTSSON J O A. Seismic Interferometry: History and Present Status[J]. 2008, Society of Exploration Geophysicists.
- [48] ROSE J H. "Single-sided" focusing of the time-dependent Schrodinger equation[J]. *Phys. Rev. A*, 2001, 65, 012707.
- [49] ROSE J H. "Single-sided" autofocusing of sound in layered materials[J]. *Inverse Problems*, 2002, 18, 1923-1934.
- [50] AKTOSUN T, ROSE J H. Wave focusing on the line[J]. *J. Math. Phys.*, 2002, 43(7), 3717-3745.
- [51] BROGGINI F, SNIEDER R. Connection of scattering principles: a visual and mathematical tour[J]. *Eur. J. Phys.*, 2012, 33, 593.
- [52] BROGGINI F, SNIEDER R, WAPENAAR K. Focusing the wavefield inside an unknown 1D medium: Beyond seismic interferometry[J]. *Geophysics*, 2012, 77(5): P. A25-A28.
- [53] WAPENAAR K, BROGGINI F, SNIEDER R. Geophys. Creating a virtual source inside a medium from reflection data: heuristic derivation and stationary-phase analysis[J]. *J. Geophys. Int.*, 2012, 190, 1020-1024.
- [54] WAPENAAR K, BROGGINI F, SLOB E, et al. Three-Dimensional Single-Sided Marchenko Inverse Scattering, Data-Driven Focusing, Green's Function Retrieval, and their Mutual Relations[J]. *Phys. Rev. Letts.*, 2013, 110, 084301.
- [55] WANG N, LIN J X, UEHA S. Goupillaud inverse problem with arbitrary input[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, 101(7), 3255-3260.