

深海会聚区波导不变量特征研究及应用

唐 帅, 笪良龙, 徐国军, 崔宝龙

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 为了解决深海会聚区目标及其运动态势难以判断的问题, 在研究会聚区形成条件及其声场传播规律以及波导不变量理论的基础上, 对典型深海环境不同位置的声强距离-频率分布图中的干涉条纹特征进行理论分析和仿真验证。结果表明, 深海会聚区存在与其他区域不同的干涉条纹特征, 其对应的波导不变量 β 值为负。本文提出了利用会聚区特有的干涉条纹特征, 对会聚区目标及其运动态势进行初步判断的方法, 仿真结果和试验数据表明, 判断方法具有可行性和有效性。

关键词: 波导不变量; 会聚区; 目标运动态势

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2014)07-0082-07

doi: 10.11759/hyqx20130715002

在深海环境中, 会聚区是水声传播最显著的特点之一。当声源和接收器都位于海洋近表层时, 海面声源发射的声波形成一个向下的波束, 这一波束沿着深海折射路径传播后, 重新出现在近海面, 在距声源数十公里处产生一个声强较高的环带状区域, 称为会聚区^[1], 该现象随着距离的增大反复出现。会聚区传播之所以重要, 是因为它是深海中良好的声信道, 能够高强度、低失真地远距离传输声信号, 很多学者对会聚区中的声传播特征及其应用进行了广泛的研究^[2-14], 其中包括会聚区环境特点、会聚区仿真建模、环境变化对会聚区结构的影响以及相关海上试验情况, 但对于深海会聚区干涉条纹特征及其应用方面的研究则鲜有涉及。波导不变量理论是由俄罗斯学者Chuprov提出^[15], 用于描述声场中的干涉现象。近年来, 波导不变量相关理论主要用于浅海环境下目标定位及运动态势分析等研究^[16-18]。为了进一步深入研究会聚区声场特性, 解决会聚区目标及其运动态势判别困难的问题, 本文分析了会聚区形成条件及其声传播规律, 并基于波导不变量理论, 研究了深海会聚区干涉条纹特征和性质, 并利用该特征对深海会聚区目标及其运动态势的判断方法进行了研究。

1 深海会聚区声场

1.1 会聚区形成条件

在深海环境中, 声源置于声道内且海水的深度足够大是形成会聚区的必要条件。此时传播至海洋

深处的声线发生折射, 不触及海底而聚焦在一起。而在深度较小的海水中, 深处的声线被海底反射, 从而抑制了会聚区的形成。因此对于给定声速剖面存在一个产生会聚区的最小海水深度, 即临界深度。临界深度以下到海底的垂直距离称为深度余量, 如图1所示。海区的深度余量越大, 不触及海底而聚焦在一起的声线数越多, 会聚区的能量越强。

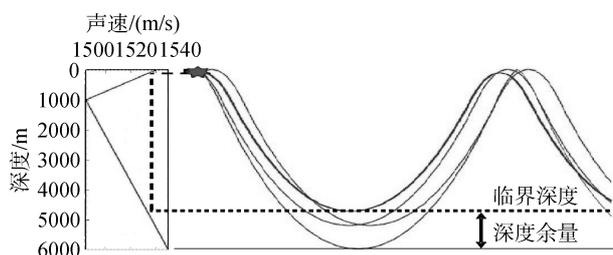


图1 会聚区形成条件示意图

Fig. 1 Formation conditions of deep-ocean convergence zone

1.2 会聚区声传播

典型深海波导如图2所示, 包含上层的深海声道剖面和下层的海底, 深海声道剖面水体最大声速 $C_{wmax}=1\ 559.3\ \text{m/s}$, 海底参数为: 声速 $C_b=1\ 668\ \text{m/s}$, 密度 $\rho=1.8\ \text{g/cm}^3$, 吸收系数 $\theta=0.692\ \text{dB/km}$ 。声源深

收稿日期: 2013-07-15; 修回日期: 2014-02-18

基金项目: 国防预研基金项目(51303080302-5); 国家自然科学基金(61203271); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET)

作者简介: 唐帅(1984-), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事水声环境效应仿真研究, 电话: 0532-51876638, E-mail: etang123@163.com

度 h 设为 7 m, 频率 $f=750$ Hz。图 3 给出了传播损失图, 其中, 图 3a 给出了同时包含水中传播模式和海底反射模式的传播损失图, 图 3b 所显示的传播损失只包括水中传播模式。通过对比可以看出, 深海会聚区是由相速及小于 C_{wmax} 的波导简正波模式形成,

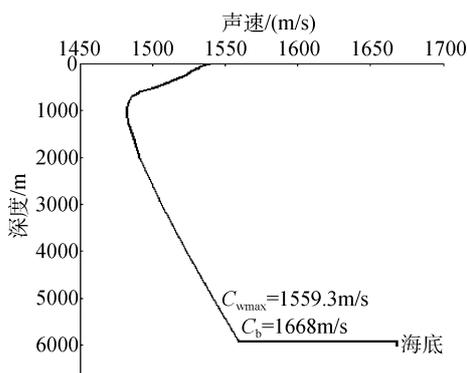


图 2 深海环境声速剖面
Fig. 2 Sound-speed profile of deep-ocean

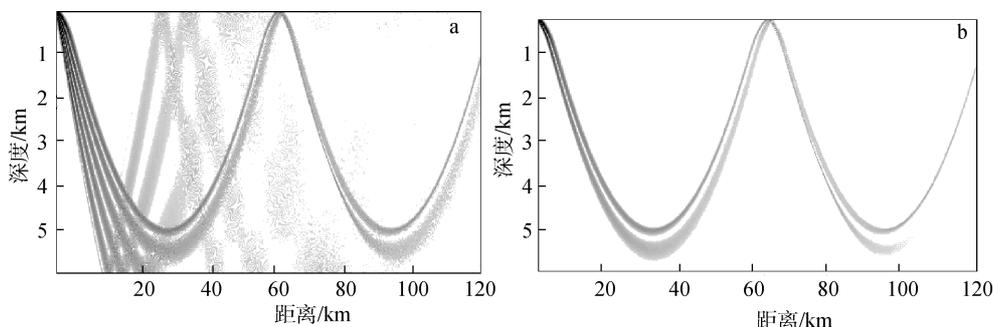


图 3 深海环境传播损失
Fig. 3 Transmission loss for deep-ocean profile

a. 同时包含水中传播模式和海底反射模式; b. 只包括水中传播模式
a. indicateing waterborne modes and bottom-bounce modes; b. indicateing waterborne modes

$$P(r, z_s, z_r; \omega) = e^{in/4} \sqrt{8\pi/r} \sum_l \Phi_l(z_s) \Phi_l(z_r) \sqrt{\mu_l} e^{i\nu_l r} \quad (1)$$

其中, ω 表示声源频率, l 表示简正波号数, $\nu_l = \mu_l + i\eta_l$, μ_l 为简正波本征值的实部, η_l 为简正波的衰减, $\Phi_l(z)$ 为简正波的本征函数。定义简正波幅度为:

$$A_l(z_s, z_r) = \sqrt{8\pi/r} \Phi_l(z_s) \Phi_l(z_r) \sqrt{\mu_l} \quad (2)$$

则公式(1)可以写成

$$P(r, z_s, z_r, \omega) = \sum_l A_l(z_s, z_r) \exp[i(\nu_l r + \pi/4)] \quad (3)$$

声强可表示为:

$$I(r, \omega) = E[PP^*] = \sum_l A_l^2 + 2 \sum_{m \neq l} \sum A_m A_l \cos[\Delta\mu_{lm}(\omega)r] \quad (4)$$

其中, m 为简正波号数, $\Delta\mu_{lm}(\omega) = \mu_l(\omega) - \mu_m(\omega)$

即简正波下反转点在海底上方, 不与海底发生接触; 而影区包含的是相速度介于 C_{wmax} 和 C_b 之间模态的海底反射模式。

2 会聚区波导不变量特征分析

2.1 波导不变量理论

波导声场结构一般都非常复杂, 对于水听器接收的宽带信号, 距离-频率图上表现出明显的干涉现象(即明暗相间条纹)。这种干涉条纹是由不同号简正波之间的干涉随距离和频率的变化规律形成的。根据简正波理论, 当声源与接收水听器间的水平距离大于水深的一定倍数时, 单个无指向性的点声源所产生的水下声压场可由一组有限阶次的简正波的和来表示, 当声源深度 z_s , 接收器深度为 z_r , 收发距离为 r 时, 点源声场频率响应函数 $P(r, z_s, z_r; \omega)$ 可表示为:

($m \neq l$) 为简正波本征值之差。接收器接收声强由两部分组成: 第一部分随距离和频率(这里假设模态函数的幅值并非频率的强函数)缓慢变化; 第二部分由一系列余弦因子累加而成, 反映了模态函数之间的干涉特征, 并且随着距离的变化而呈现振荡, 这种振荡就导致了声强时频分布图上的波导不变条纹图案^[19]。

每一个余弦因子对总声强的贡献值可表示为 I_{ml} :

$$I_{ml}(r, \omega) = A_m A_l \cos[\Delta\mu_{lm}(\omega)r] \quad (5)$$

干涉条纹是距离-频率平面上强度 I_{ml} 相等的直线或曲线, 其斜率可由条纹的方向确定。在距离-频率平面, 对 $I_{ml}(r, \omega)$ 进行一阶泰勒级数展开, 并将展开结果等于 0, 得到:

$$\frac{\partial I_{ml}(r, \omega)}{\partial r} \delta r + \frac{\partial I_{ml}(r, \omega)}{\partial \omega} \delta \omega = 0 \quad (6)$$

可解得干涉条纹斜率 $\frac{\delta\omega}{\delta r}$:

$$\frac{\delta\omega}{\delta r} = -\frac{\partial I_{ml}(r, \omega)}{\partial r} / \frac{\partial I_{ml}(r, \omega)}{\partial \omega} \quad (7)$$

将公式(5)代入公式(7)得,

$$\frac{\delta\omega}{\delta r} = -\frac{A_m A_l [\Delta\mu_{ml}(\omega)] \sin[\Delta\mu_{ml}(\omega)r]}{r A_m A_l \{\partial[\Delta\mu_{ml}(\omega)]/\partial\omega\} \sin[\Delta\mu_{ml}(\omega)r]} = -\frac{1}{r} \frac{[\Delta\mu_{ml}(\omega)]}{\partial[\Delta\mu_{ml}(\omega)]/\partial\omega} \quad (8)$$

其中, 定义任意两号简正波的波导不变量参数 β_{ml} 为:

$$\beta_{ml} = -\frac{1}{\omega} \frac{\Delta\mu_{ml}(\omega)}{\partial[\Delta\mu_{ml}(\omega)]/\partial\omega} \quad (9)$$

则式(8)可写成:

$$\frac{\delta\omega}{\delta r} = \beta_{ml} \frac{\omega}{r} \quad (10)$$

其中, 波导不变量 β_{ml} 描述了声强距离-频率图上干涉条纹的斜率。如果所有的 $I_{ml}(r, \omega)$ 项具有近似相同的 β_{ml} , 那么每项都将有近似斜率的条纹, 那么总的声强 $I(r, \omega)$ 就可以由一个与模数无关的 β 描述。

2.2 波导不变量特征分析

浅海环境典型干涉条纹样式如图4所示, 理想波导环境的解析推导^[20]和大量海上实验结果表明, 浅海环境中, 低频段的波导不变量 β 近似为1。

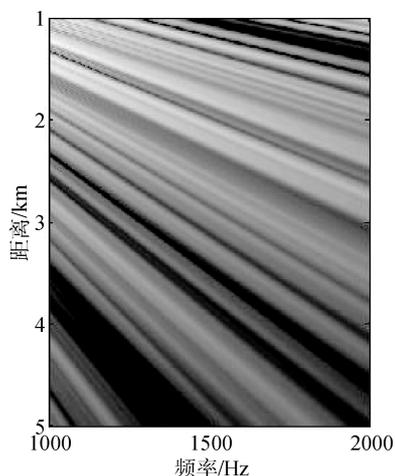


图4 浅海环境下的干涉条纹仿真结果

Fig. 4 Waveguide invariant striation simulation in shallow water

为了研究深海中的干涉现象, 采用了如图2所示的深海环境, 设定声源深度为10 m, 接收深度为100 m, 距离120 km, 其中会聚区范围为61~66 km。

图5~图7给出了不同距离的声强距离-频率干涉条纹图。其中图5a、图6a和图7a给出的是简正波相速度 $C_p < C_b$ 时, 各距离声强距离-频率干涉条纹图, 从图中可以看出, 深海波导环境中, 近距离无明显条纹, 声影区和会聚区存在干涉条纹, 且在两个区域的干涉条纹样式不同。在影区内的干涉结构和浅海环境中的相同, 而在会聚区区域内的干涉结构与浅海环境中观察的结果相反。

进一步将简正波范围限制在水体之内, 即简正波相速度 $C_p < C_{wmax}$, 各距离声强距离-频率干涉条纹图如图5b、图6b和图7b所示。通过对比可以看出, 在近距离声场, 由于波导简正波和海底反射简正波同时存在, 干涉条纹相互抵消, 致使近距离声

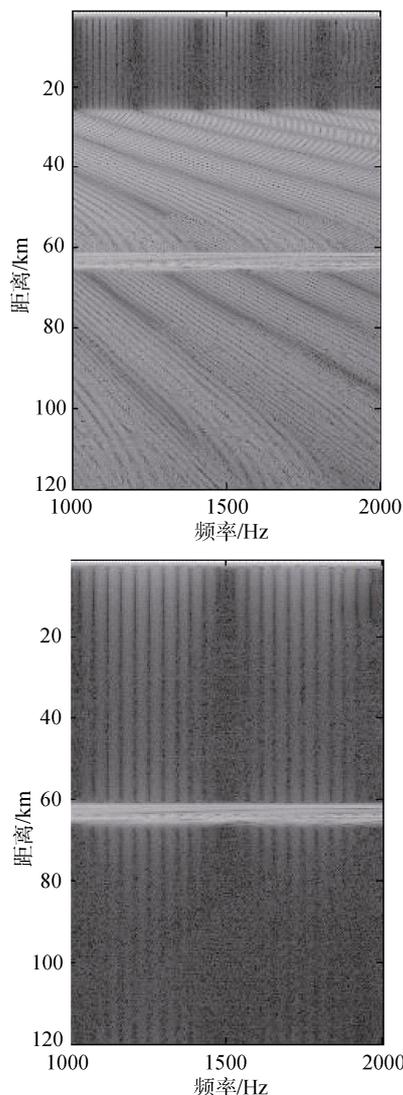


图5 深海声强距离-频率干涉结构

Fig. 5 Waveguide invariant striations simulation in deep-ocean

A. $C_p < C_b$; b. $C_p < C_{wmax}$ (图6、图7同)

a. $C_p < C_b$; b. $C_p < C_{wmax}$ (also applied in Fig. 6 and Fig. 7)

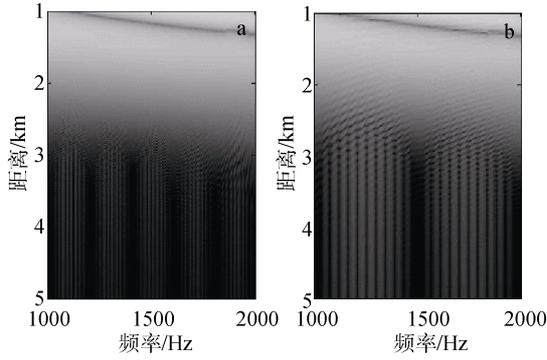


图 6 深海近距离声强距离-频率干涉结构

Fig. 6 Near-field waveguide invariant striations simulation in deep-ocean

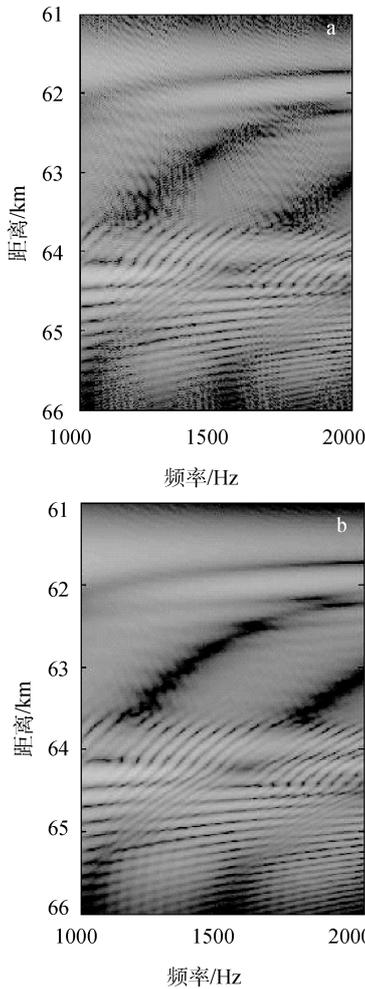


图 7 会聚区声强距离-频率干涉结构

Fig. 7 Convergence zone waveguide invariant striations simulation in deep-ocean

场声强较强，但干涉条纹却不明显；影区内干涉条纹主要是由海底反射模式形成；会聚区内，海底反射简正波再次经海面反射后，衰减较大，因此，会聚

区内干涉条纹主要是由波导简正波干涉形成，与上文传播损失分析结果一致。

在深海会聚区，由于声场的复杂性，无法精确地求解满足定解条件的波动方程的解，往往只能求得一定近似条件下的形式解或数值解。因此，利用相慢度和群慢度对任意两号简正波的波导不变量 β_{ml} 表达式(公式(9))进行重新定义。定义第 m 号简正波的相速度 v_m^p 和群速度 v_m^g 分别为：

$$v_m^p = \frac{\omega}{\mu_m} \quad (11)$$

$$v_m^g = \frac{\partial \omega}{\partial \mu_m} \quad (12)$$

相对应的相慢度 S_m^p 和群慢度 S_m^g 为：

$$S_m^p = \frac{1}{v_m^p} = \frac{\mu_m}{\omega} \quad (13)$$

$$S_m^g = \frac{1}{v_m^g} = \frac{\partial \mu_m}{\partial \omega} \quad (14)$$

根据公式(9)，波导不变量 β_{ml} 可表示为：

$$\beta_{ml} = -\frac{\Delta S_{ml}^p(\omega)}{\Delta S_{ml}^g(\omega)} \quad (15)$$

其中 $\Delta S_{ml}^p = S_m^p - S_l^p$ ， $\Delta S_{ml}^g = S_m^g - S_l^g$ 。根据公式(15)，可以将声源频率 ω 所对应的 1 到 L 号简正波的群慢度 S_m^g 看成是随相慢度 S_m^p 变化的函数，即 $S^g(S^p)$ 。如果在某一区域内 $S^g(S^p)$ 函数可近似成一条直线，那么波导不变量 β 可以用该直线的斜率表示(公式(16))，且与简正波号数无关。

$$\frac{1}{\beta(S^p)} = -\frac{dS^g}{dS^p} \quad (16)$$

图8给出了典型浅海波导环境下，相慢度与群慢度的关系，图中 $S^g(S^p)$ 函数的斜率比较稳定且为负，即波导不变量 β 为正；图9给出了典型深海声道环境中相慢度与群慢度的关系，从图中可以看出， $S^g(S^p)$ 函数可以分为两个区间，即波导简正波区间和海底反射简正波区间。相慢度小于拐点的区间是海底反射简正波，相慢度大于拐点的区间是波导简正波，从 $S^g(S^p)$ 函数斜率可以看出，海底反射简正波区间内的波导不变量 β 为正值，波导简正波区间内的波导不变量 β 为负值。结合波导不变量 β 估值范围可以对图5~7中的干涉条纹现象进行解释，由于会聚区主要是由波导简正波组成，而所对应的 β 值为负，与浅海相反，所以声强的距离-频率干涉条纹样式与

浅海相反；声影区干涉条纹主要是由海底反射筒正波干涉形成，对应的 β 值与浅海相同，且近似为1，因此，影区内声强的距离-频率干涉条纹样式也与浅海相类似。

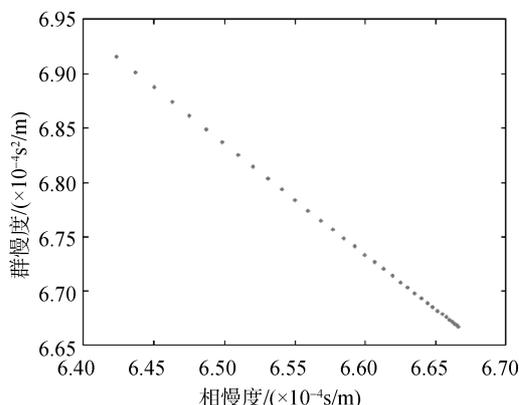


图 8 浅海波导相慢度和群慢度的对应关系

Fig. 8 Group slowness versus phase slowness for the shallow water waveguide

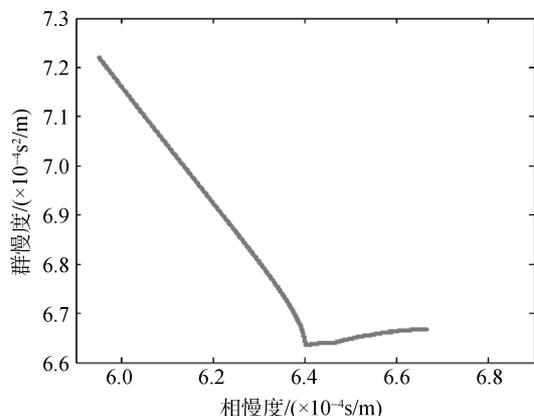


图 9 深海波导相慢度和群慢度的对应关系

Fig. 9 Group slowness versus phase slowness for the deep-ocean waveguide

2.3 波导不变量特征应用

对于深海会聚区目标，由于接收器距离声源较远，信号出现时间较短，方位变化率又比较慢，导致会聚区目标的判别以及目标运动态势判断都存在较大的困难，这也在一定程度上限制了会聚区效应的应用。结合上文对深海会聚区环境波导不变量特征的分析，提出利用会聚区距离-频率干涉条纹特征实施会聚区目标判定及目标运动态势判断的方法。

通过对深海会聚区波导不变量特征的分析，可以看出深海会聚区与近距离声场以及声影区干涉条纹存在明显区别，而且在实际深海环境中，会聚区

与声影区可利用的条件也存在差异。当海深满足会聚区形成条件时，由海水和海底造成反射筒正波的衰减，影区内的信号衰减较为严重，目标信号难以检测；当海水深度减小，无法形成会聚区时，大量筒正波通过海底反射在海面聚焦，影区内信号强度增强，在直达波和会聚区距离之间，形成海底反射会聚区，反射会聚区距离受海深影响较大。因此，可以利用干涉条纹特征对会聚区目标进行判断。

在深海环境，能形成会聚区条件下，声源位置初步判断依据如下：

- 1) 噪声信号无干涉条纹，且方位变化率快，判为疑似近距离目标；
- 2) 噪声信号存在干涉条纹，且方位变化率慢，判为疑似会聚区目标。

初步判断为会聚区目标以后，可以通过声强的距离-频率分布图中干涉条纹变化趋势进一步判断目标运动态势。当环境参数不随水平距离改变时，公式(10)可转化为：

$$r = r_0 (\omega / \omega_0)^{1/\beta} \quad (17)$$

其中， r_0 表示初始距离， ω_0 表示初始频率。推导得：

$$\frac{dr}{d\omega} = r_0 \omega^{(1-\beta)/\beta} / (\beta \omega_0) \quad (18)$$

上式中 r_0 、 ω_0 均为正值，则干涉条纹斜率的正负取决于 β 的正负。

因此，可以根据干涉条纹随距离-频率的变化趋势对目标运动态势进行判断。在声强距离-频率平面上建立坐标轴，定义某一干涉条纹 P 与距离轴的偏角 φ ，如图 10 所示。

在深海环境，判断为会聚区后，其目标运动态势判断方法如下：

- 1) $\varphi < 90^\circ$ 时，目标处于向接收器接近态势；
- 2) $\varphi > 90^\circ$ 时，目标处于向接收器远离态势。

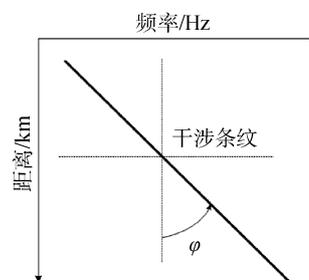


图 10 距离-频率平面干涉条纹偏角示意图

Fig. 10 Waveguide invariant striations declination in range and frequency plane

2.4 试验数据分析

结合某次东海试验数据,对上述会聚区目标及运动态势初步判断方法进行验证。图11a给出了深海近距离目标声强的距离-频率分布,图11b给出了深海会聚区远离态势目标声强的距离-频率分布,图11c给出了深海会聚区接近态势目标声强的距离-频

率分布。通过试验数据可以看出,深海近距离声场不存在干涉条纹;会聚区区域存在明显的干涉条纹,且 β 值为负值,不同运动态势干涉条纹变化趋势不同,且与浅海相反,所以,可以利用干涉条纹对目标运动态势进行初步判断,试验结果与理论分析结果一致。

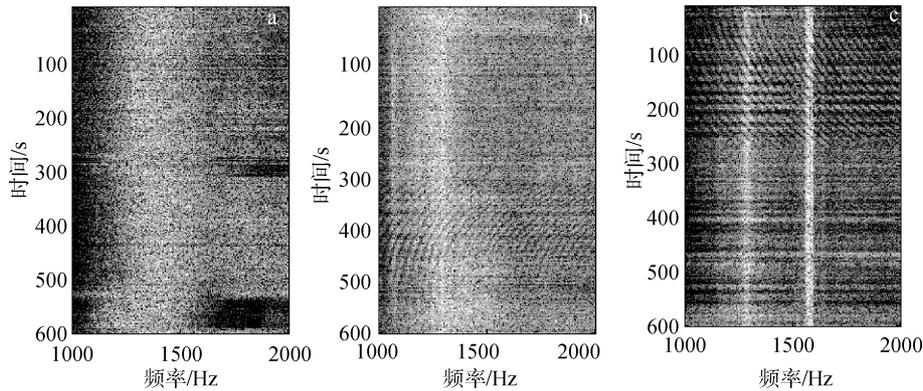


图 11 深海试验数据干涉条纹图

Fig. 11 Waveguide invariant striations from deep-ocean experimental data

a. 近距离目标; b. 会聚区远离态势目标; c. 会聚区接近态势目标

a. target in near field; b. target away from receptor in CZ; c. target close to receptor in CZ

3 结论

本文首先分析了会聚区声场形成条件以及不同模式简正波对会聚区声场传播的影响,在此基础上,基于波导不变量的理论,对深海不同位置的声强距离-频率分布图中的干涉条纹特征进行了仿真分析,通过仿真分析发现,深海波导环境中,近距离无明显条纹,声影区和会聚区存在干涉条纹,且两区域内的干涉条纹样式相反。深海会聚区内的干涉条纹主要由波导简正波形成,其对应的波导不变量 β 值为负,干涉条纹样式与浅海相反,而且会聚区内处于不同运动态势的目标,在声强距离-频率平面内干涉条纹的偏角不同。利用会聚区干涉特征提出了会聚区目标判定及运动态势判断方法,通过仿真结果和试验数据初步验证了方法的有效性,为深入研究会聚区环境效应及其相关应用提供了新的思路。

参考文献:

[1] Jensen B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational Ocean Acoustics [M]. 2nd edn. Germany: Springer, 2011: 21-23.
[2] Freitas K M. Improving accuracy of acoustic prediction

in the Philippine Sea through incorporation of mesoscale environmental effects[R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008.

[3] 吴炳昭, 崔华义. 射线声学法在会聚区调查中的应用研究[J]. 海洋技术, 2009, 4: 52-53.
[4] Schneider T, Schmidt H. Improving underwater vehicle communication in the littoral zone through adaptive vehicle motion[J]. J Acoust Soc Am, 2009, 125(4): 2581.
[5] 李玉阳, 笮良龙. 海洋锋对深海会聚区特征影响研究[J]. 声学技术, 2010, 6: 78-79.
[6] Lynch S D, Gerald L D, Heaney K, et al. Dependence of the structure of the shallow convergence zone on deep ocean bathymetry[J]. J Acoust Soc Am, 2010, 127(3): 1962.
[7] 李佳讯, 张韧. 海洋中尺度涡建模及其在水声传播影响研究中的应用[J]. 海洋通报, 2011, 2: 38-45.
[8] Heaney K D, Campbell R L, Murray J J, et al. Detection performance modeling and measurements for convergence zone (CZ) propagation in deep water[J]. J Acoust Soc Am, 2011, 130(4): 2530.
[9] Lynch S D, Gerald L D, Heaney K D, et al.

- Investigating sources of variability of the range and structure of the low frequency shallow convergence zone[J]. *J Acoust Soc Am*, 2011, 130(4): 2555.
- [10] Song H C, Hodgkiss W S. Diversity combining for long-range acoustic communication in deep water[J]. *J Acoust Soc Am*, 2012, 132(2): EL68-EL73.
- [11] Kang T, Song H C, Hodgkiss W S. Long-range multi-carrier acoustic communication in deep water using a towed horizontal array[J]. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131(6): 4665-4671.
- [12] Heaney K D, Campbell R L, Baggeroer A B, et al. Towed array propagation measurements and modelling in the Philippine Sea[J]. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131(4): 3353.
- [13] Heaney K D, Campbell R L, Baggeroer A B, et al. Deep-water propagation measurements from a towed-array[J]. *J Acoust Soc Am*, 2010, 128(4): 2386.
- [14] Heaney K D, Campbell R L, Murray J J, et al. Detection performance modeling and measurements for convergence zone (CZ) propagation in deep water[J]. *J Acoust Soc Am*, 2011, 130(4): 2530.
- [15] Chuprova S D. An invariant of the spatial-frequency interference pattern of the acoustic field in a layered ocean [C]//Proc of the Russian Academy of Sciences, *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1981: 257, 475-479.
- [16] Sostrand K A. Range localization of 10-100 km explosions by means of an endfire array and a waveguide Invariant[J]. *IEEE J Oceanic Eng*, 2005, 30(1): 207-212.
- [17] 徐国军, 笪良龙, 李玉阳, 等. 低信噪比条件下引导源目标定位算法[J], *声学技术*, 2010, 29(3): 336-339.
- [18] 赵振东. 浅海声场干涉结构与宽带声源测距研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [19] D'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.
- [20] Brekhovskikh L M, Lysanov I P, Lysanov Y P. *Fundamentals of Ocean Acoustics*[M]. 3rd edn. New York : AIP Press/Springer, 2003: 122-124.

Characters and application of waveguide invariant in deep-ocean convergence zone

TANG Shuai, DA Liang-long, XU Guo-jun, CUI Bao-long
(Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Received: Jul., 15, 2013

Key words: waveguide invariant; convergence zone (CZ); target movement

Abstract: In order to solve the difficulties in judgment of whether target is in convergence zone (CZ) as well as its movement in CZ, by analyzing formation conditions of CZ and its acoustic propagation, the characters of waveguide invariant in deep-ocean were analyzed based on waveguide invariant theory and the simulation tests were performed. The theoretical analysis and simulation results both show that there were special waveguide invariant striations in CZ and the value of its waveguide invariant β was negative. Using these characters, the method to judge whether target is in CZ and its movement in CZ was proposed and simulated. The simulation and experimental data both show that the judgment was valid.

(本文编辑: 李晓燕)