

浅海单模入射声场目标回波特性研究

王升¹, 马力², 郭圣明²

(1. 91388 部队 95 分队, 广东湛江 524022; 2. 中国科学院水声环境特性重点实验室, 北京 100190)

摘要: 浅海环境中, 目标回波受到入射和散射双向过程的信道多途影响, 具有复杂的多途结构。基于相控垂直阵的单模发射技术能激发出指定的单个简正波声场, 可以降低海底混响干扰, 简化目标回波多途结构, 为主动探测提供了一种有效手段。在信道中点声源目标回波模型基础上, 采用简正波本征函数加权研究了单模声场入射下球形目标散射问题, 建立了浅海单模入射声场目标回波预报模型, 并利用模型对刚性球回波进行了数值计算。结果表明: 总声源级相同条件下, 单模发射声场与传统的点声源发射声场相比具有一定的阵发射增益, 目标回波具有较高的声压级; 单模入射能够消除单程多途的影响, 回波结构相对简单, 有利于目标的探测和识别。

关键词: 目标回波; 单模; 简正波; 散射函数

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-01-0018-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.01.004

Research on target echo characteristics ensonified by a single mode in shallow water

WANG Sheng¹, MA Li², GUO Sheng-ming²

(1. Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524022, Guangdong, China;

2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In shallow water, target echo has complex structure as a result of multipath propagation on incidence and scattering journey. Based on vertical phased linear array, single mode excitation technique can produce desired field composed of a single mode, suppress reverberation, simplify echo structure and provide an effective way of active detection. In this paper, based on target echo model ensonified by a point source, the array weighting method according to normal-mode eigenfunctions is applied to studying target scattering problem. Target echo prediction model ensonified by a single mode in shallow water has been built to analyze target echo characteristics. The results of using the model to calculate a certain sphere object's echo numerically show that the target echo ensonified by a single mode has greater intensity comparing with the situation that target is ensonified by a point source; the single mode excitation technique can eliminate multipath interference on incidence journey, so target echo structure is straightforward relatively and favorable for target detection and identification.

Key words: target echo; single mode; normal-mode wave; scattering function

0 引言

由于水下目标特征控制技术的进步, 被动探测越来越困难, 主动探测技术重又得到重视。在浅海环境中, 目标回波经历入射和散射双向传播过程, 其波形呈现出复杂的多途结构, 影响目标探测和识别。对目标回波特性的建模与分析, 有助于提高传统的主动声呐探测性能、建立基于模型的新型主动探测技术。信道中目标回波特性建模与无限大自由场问题显著不同。早在 1987 年, Ingenito^[1]利用简

正波平面波分解方法, 研究了水平分层介质波导中点声源声场的刚性球散射问题, 将目标平面波散射函数嵌入到声场简正波表示中来计算目标散射场, 之后, T. C. Yang^[2,3]将 Ingenito 的研究推广到非均匀水层情形, 并进行了相关的目标主动定位技术研究。R. H. Hackman^[4,5]用 T 矩阵法建立了入射场和散射场之间的关系。Li-gang Chen^[6]在 Ingenito 方法的基础上给出了浅海波导中目标回波波形的具体算法。

单模发射技术利用相控垂直阵, 仅激发出指定的单个简正波声场, 充分地利用了海洋波导效应, 具有较高的能量利用率和较低的传播损失。近十几年来, 单模发射技术及其在目标探测中的应用得到了较为深入的研究。Donald F. Gingras^[7]介绍了单模的

收稿日期: 2013-07-16; 修回日期: 2013-10-15

作者简介: 王升(1978—), 男, 山东安丘人, 工程师, 研究方向为水下目标回波特性。

通讯作者: 王升, E-mail: comwsh@sina.com

激发原理，详细研究了模式衰减、海底反向散射随频率变化的规律，以及如何选择单模发射频带的问题。单模激发有开环控制和闭环控制两种方式，开环控制方式需要环境参数的先验知识，最近俄罗斯学者 Golubeva^[8,9]在开环控制方面进行了深入的研究。闭环控制算法最早由 John R. Buck^[10]提出，无需海洋环境的先验知识，具有良好的自适应性，彭大勇^[11]等提出了一种浅海单模声场闭环发射的最佳估算方法，能够在较短时间内得到发射阵加权系数。

本文在 Ingenito 和 T. C. Yang 等人研究工作基础上，采用简正波本征函数加权单模声场激发技术，结合信道中点声源目标回波模型建立了浅海单模入射声场目标回波波形预报模型，并分析了相应的目标回波特征。

1 单模发射技术

在水平分层的浅海环境中，单频点声源产生的声场可以用简正波表示为

$$p(r, z, \omega) = \sum_{m=1}^{\infty} \sqrt{\frac{2\pi}{\xi_m r}} \psi_m(z) \psi_m(z_s) e^{i\xi_m r - \delta_m r + i\pi/4} = \sum_{m=1}^M a_m(r) \psi_m(z) \psi_m(z_s) \quad (1)$$

式中：时间因子取 $e^{-i\omega t}$ ； ξ_m 、 ψ_m 和 δ_m 分别是第 m 号简正波的水平波数、本征函数和衰减系数； z 、 z_s 是场点和声源深度； r 是场点到声源的水平距离； ω 是角频率； $a_m(r) = \sqrt{(2\pi)/(\xi_m r)} e^{i\xi_m r - \delta_m r + i\pi/4}$ 。

单模声场可以通过垂直发射阵的加权发射来得到，记发射第 m' 简正波的阵加权系数矢量为 $\mathbf{W}_{m'} = (w_{m',1}, w_{m',2}, \dots, w_{m',J})$ ， J 为发射阵元总数，则垂直阵的发射声场为

$$p_{m'}(r, z, \omega) = \sum_{j=1}^J w_{m',j} \sum_{m=1}^{\infty} a_m(r) \psi_m(z) \psi_m(z_{s,j}) = \sum_{m=1}^{\infty} \left[\sum_{j=1}^J w_{m',j} \psi_m(z_{s,j}) \right] a_m(r) \psi_m(z) \quad (2)$$

对于满阵(阵长接近全海深，阵元数足够多)发射情形，利用简正波本征函数的正交特性：

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{\rho(z)} \psi_m(z) \psi_{m'}(z) dz = \delta_{m,m'} \quad (3)$$

$$\text{或} \quad \sum_{j=1}^J \frac{1}{\rho(z_j)} \psi_m(z_j) \psi_{m'}(z_j) \Delta z \approx \delta_{m,m'} \quad (4)$$

$$\text{取} \quad w_{m',j} = C \frac{\psi_m(z_{s,j}) / \rho(z_{s,j})}{\max\{|\psi_{m'}(z_{s,j}) / \rho(z_{s,j})|\}} \quad (5)$$

就可以近似得到第 m' 阶简正波的单模发射声场：

$$p_{m'}(r, z, \omega) \approx B_m a_m(r) \psi_m(z) \quad (6)$$

系数 B 为

$$B_{m'} = \frac{C}{\max\{|\psi_{m'}(z_{s,j}) / \rho(z_{s,j})|\}} \frac{1}{\Delta z_s} \quad (7)$$

其中： $\rho(z)$ 是介质密度； Δz_s 为发射阵元间距；系数 C 对应声源级最大阵元的发射声压，单位 μPa 。这样第 m' 阶简正波的发射声源级可近似为

$$\text{SL}_{m'} = 10 \lg \left(\sum_{j=1}^J w_{m',j}^2 \right) \quad (8)$$

2 单模入射目标散射声场

对于水下声信道中的目标散射问题，一种简便的处理方法就是采用基于平面波分解的散射函数法，即将入射简正波和散射简正波分解成准平面波形式，与平面波照射下的目标散射函数联系起来，得到目标散射场，如图 1 所示。

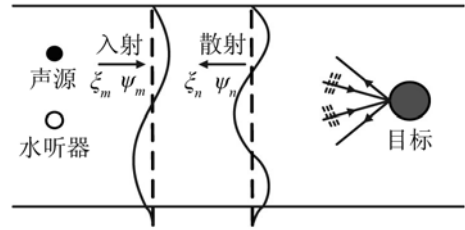


图 1 目标回波建模的散射函数法示意图
Fig.1 Illustration of target echo model with normal-mode theory.

对于海洋波导中单个点源发射时的目标散射声场，可以写成^[1,3]：

$$p_s(r_1, z_s; r_2, z; \omega) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_m(r_1, z_s) H_{mn} A_n(r_2, z) \quad (9)$$

其中：

$$H_{mn} = \psi_m^+(z_0) \left[\begin{array}{l} S(\alpha_{i,m}^+, \phi_i; \alpha_{s,n}^-, \phi_s) \psi_n^-(z_0) \\ + S(\alpha_{i,m}^+, \phi_i; \alpha_{s,n}^+, \phi_s) \psi_n^+(z_0) \end{array} \right] + \psi_m^-(z_0) \left[\begin{array}{l} S(\alpha_{i,m}^-, \phi_i; \alpha_{s,n}^-, \phi_s) \psi_n^-(z_0) \\ + S(\alpha_{i,m}^-, \phi_i; \alpha_{s,n}^+, \phi_s) \psi_n^+(z_0) \end{array} \right] \quad (10)$$

$$A_m(r_1, z_s) = a_m(r_1) \psi_m(z_s) \quad (11)$$

$$A_n(r_2, z) = a_n(r_2) \psi_n(z) \quad (12)$$

式中： A_m 、 A_n 分别为入射声场和散射声场； H_{mn} 为简正波耦合矩阵； $S(\alpha_{i,m}, \phi_i; \alpha_{s,n}, \phi_s)$ 为平面波照射下的目标散射函数； r_1 为声源到目标的水平距离； r_2 为目标到接收点的水平距离； z_0 为目标深度； α^+ 、 α^- 分别为上行波和下行波的掠射角； ϕ_i 、 ϕ_s 分别为入射波和散射波的水平方位角；上标“+”、“-”分别对应上行波和下行波；下标 i 、 s 分别表示入射和散射过程；下标 m 、 n 分别表示入射简正波和散射简正波的编号，如图 2 所示。对于收发合置方式，可以取 $r=r_1=r_2$ 、 $\phi_i=0$ 、 $\phi_s=\pi$ 。

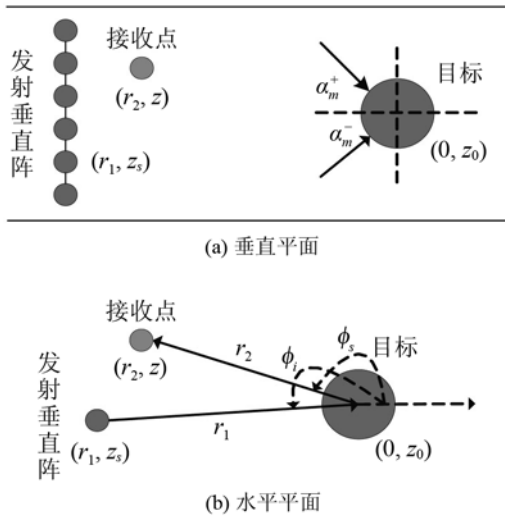


图2 声源、目标和接收点位置示意图

Fig.2 Schematic of relative positions of target, source and receiver.

这里利用了简正波的平面波分解, 目标深度的本征函数可表示为 $\psi_m(z_0) = \psi_m^+(z_0) + \psi_m^-(z_0)$, 上行波 $\psi_m^+(z_0)$ 和下行波 $\psi_m^-(z_0)$ 分别为^[6]:

$$\psi_m^+(z_0) = \frac{1}{2} \left(\psi_m(z_0) - \frac{\psi_m'(z_0)}{i\beta_m} \right) \quad (13)$$

$$\psi_m^-(z_0) = \frac{1}{2} \left(\psi_m(z_0) + \frac{\psi_m'(z_0)}{i\beta_m} \right) \quad (14)$$

其中: 垂直波数 $\beta_m(z) = \sqrt{k^2(z) - \xi_m^2}$; $k(z)$ 为介质波数; 撇号上角标表示函数导数。

从式(9)可以知道: 某号简正波入射到目标体, 会激发出多号散射简正波, 各号散射简正波的幅度与目标散射函数有关, 由入射和散射的掠射角、方位角确定, 对所有入射简正波激发的散射简正波进行求和, 即得到点源发射时的目标散射声场。对于垂直阵列发射的情况, 每个阵元发射的声波都激发出相应的目标散射声场。因此, 垂直发射阵列的目标散射声场可认为是所有阵元引起的散射声场的叠加, 考虑图2所示的垂直发射阵、目标和接收位置分布, 设垂直阵发射第 m' 号简正波, 根据式(9), 可得单模发射时的目标散射声场:

$$p_{s,m'}(r_1, z_s; r_2, z; \omega) =$$

$$\sum_{j=1}^J w_{m',j} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_m(r_1, z_{s,j}) \times H_{mn} A_n(r_2, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{j=1}^J w_{m',j} \psi_m(z_{s,j}) \right] \times a_m(r_1) H_{mn} a_n(r_2) \psi_n(z) \quad (15)$$

如果阵元权系数取式(5)形式, 则垂直阵发射第 m' 号简正波时的目标散射声场近似为:

$$p_{s,m'}(r_1, z_s; r_2, z; \omega) \approx \sum_{n=1}^{\infty} B_m a_m(r_1) \times H_{mn} a_n(r_2) \psi_n(z) \quad (16)$$

其中, B_m 的定义为式(7)。

3 单模入射目标回波波形

在式(16)基础上, 利用傅氏变换进一步得到目标回波波形:

$$p_{s,m'}(r_1, z_s; r_2, z; t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \times p_{s,m'}(r_1, z_s; r_2, z; \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (17)$$

其中, $X(\omega)$ 是声源发射信号 $x(t)$ 的频谱:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{i\omega t} dt \quad (18)$$

$x(t)$ 可以是单频、线性调频脉冲或其它的复杂、组合信号。

4 数值计算分析

给定发射信号和海洋环境相关参数, 根据上面建立的模型, 可以得到单模入射声场目标回波仿真信号。海洋环境参数如图3所示, 采用等间隔32元垂直阵进行单模发射, 阵元间隔3m, 第一个阵元距离海面3m; 接收水听器深度为50m; 点源发射目标回波仿真时, 声源深度为50m; 目标为刚性球, 半径10m, 深度50m; 发射声源级为200dB; 回波信号采样率 $f_s = 2.4$ kHz, 时间窗长度1s。

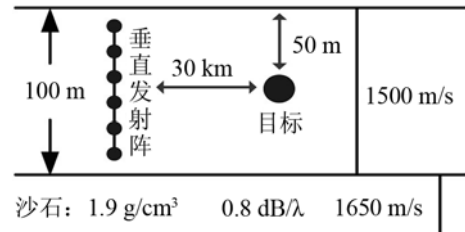


图3 目标、发射接收阵和环境参数示意图

Fig.3 Schematic of environmental parameters and positions of target, source and receiver

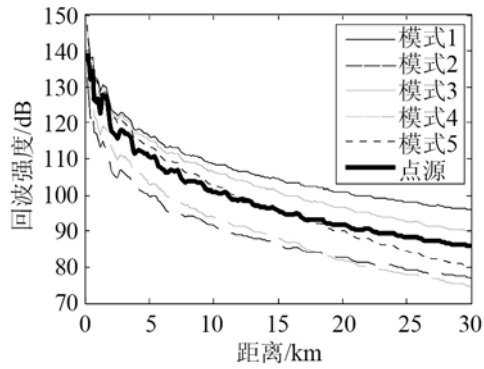
4.1 不同发射模式目标回波强度比较

为了分析单模发射相对于点源发射的目标回波增益, 将“目标回波强度”定义为发射信号经水下目标散射后, 水听器接收到的有效回波信号平均能量。设有效回波信号长度为 T , 则目标回波强度 E_{coh} 可表示为^[12]

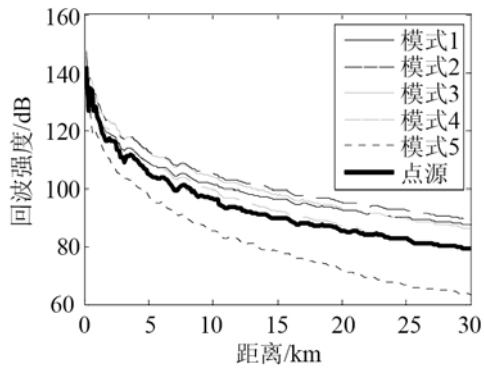
$$E_{\text{coh}} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |p_s(r_1, z_s; r_2, z; t)|^2 dt \quad (19)$$

其中, t_0 为目标回波信号起始时刻。

图4(a)和4(b)分别为目标位于50m和20m深度时, LFM信号的目标回波强度随距离的变化曲线。图5为相应声场的前5阶模式的本征函数, 可



(a) 目标深度 50 m



(b) 目标深度 20 m

图 4 不同入射模式下的目标回波级(LFM 信号, 中心频率 200 Hz, 带宽 40 Hz, 脉宽 3 s)

Fig.4 Rigid sphere echo intensity curves ensenified by different modes. (LFM signal, central frequency: 200 Hz, bandwidth: 40 Hz, pulse length: 3 s)

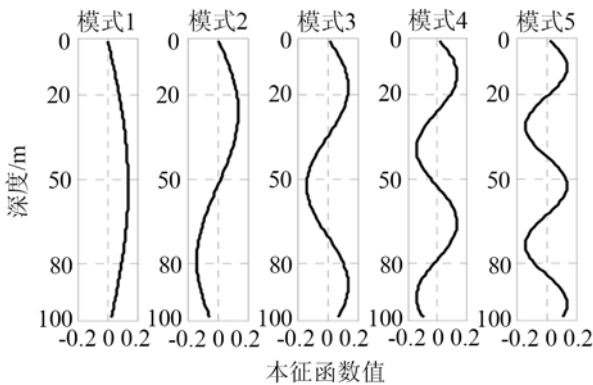


图 5 声场的前 5 阶模式

Fig.5 The preceding 5 orders of normal-modes

以看出:

(1) 目标回波强度与发射模式和目标深度有关, 当目标深度位于发射模式的波腹位置时, 目标处的入射声能量较强, 回波能量也相应较强。

(2) 在合理的发射模式下, 单模发射回波强度明显高于相同源级的点源回波, 随着目标距离声源越远, 单模发射的增益越大。

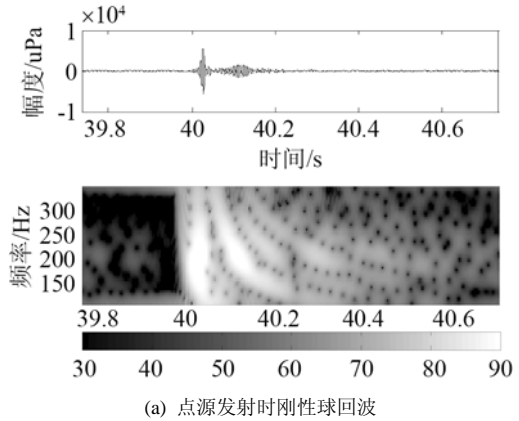
单模发射能够控制能量的深度分布, 有较高的能量利用率。因此, 利用单模声场探测目标时, 应根据目标深度调整发射阵元加权, 使声能量集中到

目标深度。

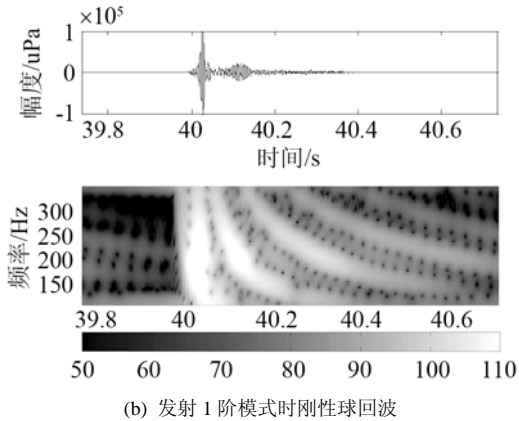
4.2 单模入射目标回波结构分析

浅海波导中, 多途导致回波信号畸变, 是目标远场定位与识别的主要干扰。将单模发射技术应用于目标探测, 可减小边界散射和传播衰减对目标回波的影响, 为回波信号检测和识别提供便利。

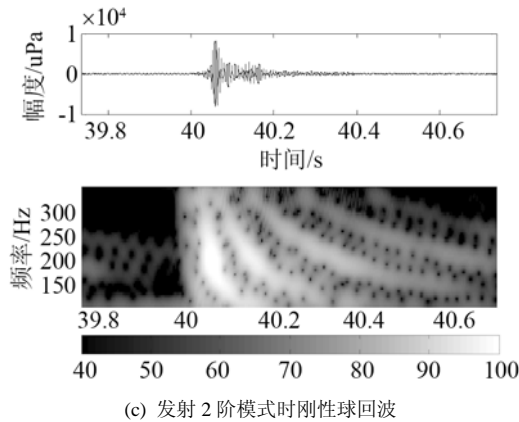
点源声场与单模声场入射下的刚性球回波比较如图 6 所示。由前面理论分析可知, 由于目标的



(a) 点源发射时刚性球回波



(b) 发射 1 阶模式时刚性球回波



(c) 发射 2 阶模式时刚性球回波

图 6 点源声场与单模声场入射下的刚性球回波比较(LFM 信号, 中心频率 200 Hz, 带宽 100 Hz, 脉宽 0.03 s, 接收深度 50 m, 目标深度 50 m, 点源深度 40 m, 目标声源相距 30 km)

Fig.6 Rigid sphere echo structure ensenified by a point source or a single mode. (LFM signal, central frequency: 200 Hz, bandwidth: 100 Hz, pulse length: 0.03 s, target depth: 50 m, receiver depth: 50 m, distance between source and target: 30 km)

存在, 简正波在目标处发生耦合, 任意号简正波入射都会激发出多号简正波。浅海波导中, 低号简正波传播速度快, 高号简正波传播速度慢, 传播后各号简正波延时叠加使得接收信号结构比发射信号复杂。单模声场发射时, 只有某一号简正波照射到目标, 色散现象只出现在声波从目标返回接收点的单程, 与单向声传播类似, 而点源发射声场照射目标时, 双向过程都有色散现象。因此, 单模发射比点源发射产生的目标回波结构相对简单, 见图 6, 单模发射声场产生的目标回波中各号简正波更易区分。

5 结 论

本文在信道中点声源目标回波模型基础上, 结合效率较高的单模发射技术, 首次建立了浅海单模入射声场目标回波模型, 并对简单环境下的刚性球目标回波进行了数值计算, 通过分析点源发射声场及单模发射声场照射下的目标回波强度、回波结构, 表明单模发射相对于点源发射有较大优势, 具体总结如下:

(1) 发射模式可控, 能量利用率高, 单模发射回波强度高于相同源级的点源回波强度。

(2) 单模入射目标回波强度与发射模式和目标深度有关, 当目标深度位于发射模式的波腹位置时, 目标处的入射声能量较强, 回波能量也相应较强。

(3) 单模发射时目标回波结构相对简单, 通过分离回波中各号简正波, 可以获取目标散射矩阵, 散射矩阵含有丰富的目标物理特征, 对于目标识别有重要意义, 而点源声场目标散射回波无法直接分离散射矩阵。

众所周知, 简正波方法适合于计算水平分层浅海环境中的声场, 高频时效率较低, 所以本文提供的方法适用于与距离无关的海洋信道中远程目标

低频回波计算; 当目标太靠近海底和海面边界时, 多次反射不能忽略, 模型误差较大; 由于需要预先掌握目标在自由空间中的散射函数, 所以对于没有解析表达式的复杂目标, 需要通过实验测量获得其散射函数。该模型为进一步研究浅海环境中的目标探测和主动匹配场处理提供了技术基础。

参 考 文 献

- [1] Ingenito F. Scattering from an object in a stratified medium[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1987, **82**(6): 2051-2059.
- [2] Yang T C. Scattering from boundary protuberances and reverberation imaging[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1993, **93**(1): 231-242.
- [3] Yang T C. Scattering from an Object in a Stratified Medium. I. Frequency Dispersion and Active Localization[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1994, **96**(2): 1003-1019.
- [4] Hackman R H, Sammelmann G S. Acoustic scattering in an inhomogeneous waveguide: Theory[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1986, **80**(5): 1447-1458.
- [5] Hackman R H, Sammelmann G S. Multiple-scattering analysis for a target in an ocean waveguide[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1988, **84**(5): 1813-1825.
- [6] Chen L G, Yuan B C, Liu J G. Echo waveform Prediction Algorithm for a Target in the Shallow Water Wave-guide[C]// The 1st International Conference on Information Science and Engineering, 2009: 550-553.
- [7] Gingras D F. Single mode excitation, attenuation, and backscatter in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, **103**(1): 195-204.
- [8] Golubeva E V, Eliseevnin V A. Generation of a single normal wave by a vertical linear array in the water layer[J]. Acoust. Phys., 2008, **54**(1): 52-57.
- [9] Golubeva E V, Eliseevnin V A. Power emitted by a vertical compensated linear array in a Pekeris waveguide[J]. Acoust. Phys., 2008, **54**(5): 664-669.
- [10] Buck J R. Single mode excitation in the shallow-water acoustic channel using feedback control[J]. IEEE J. Ocean. Eng., 1997, **22**(2): 281-291.
- [11] 彭大勇, 曾娟, 李海峰, 等. 浅海声场单模闭环发射的最佳估计算法[J]. 声学学报, 2009, **34**(5): 396-400.
PENG Dayong, ZENG Juan, LI Haifeng, et al. An optimal algorithm for single-mode close-loop excitation in shallow water[J]. Acta Acustica, 2009, **34**(5): 396-400.
- [12] Makris N C, Raitil P. A unified model for reverberation and submerged object scattering in a stratified ocean waveguide[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2001, **109**(3): 909-941.