浅海水平线阵接收海底混响序列仿真

王 升，陈长安，高守勇
(中国人民解放军 91388 部队，广东湛江 524022)

摘要：混响序列仿真作为海上实验的替代手段，可为声呐设计及抗混响技术研究提供数据支撑。借助简正波理论研究海底散射声场，将海底散射场视为海洋传输网络形成的传递函数，在此基础上将海底散射微元按方位角均匀划分，依据阵元间的相位关系给出了水平线阵接收海底混响序列的仿真方法。以负梯度浅海环境为例进行了混响仿真，并对仿真序列的频谱特征、统计特征、空间相关特征进行了验证，结果表明该方法获得的混响序列特性与理论预测相符，可以为抗混响技术研究提供参考。

关键词：混响；散射；水平线阵；简正波；相关性
中图分类号：TB56 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2019)-04-0382-05
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.04.004

Simulation of reverberation sequence received by horizontal array in shallow water

WANG Sheng, CHEN Chang-an, GAO Shou-yong
(*No.* 91388 *Unit of PLA*, *Zhanjiang* 524022, *Guangdong*, *China*)

Abstract: As an alternative means of experiments at sea, reverberation signal simulation supports the studies on sonar design and anti-reverberation techniques. In this paper, scattering acoustic field of seabed in shallow water is studied by means of normal-mode method, which is treated as a transfer function formed by ocean transmission network. On this basis, scattering region is divided into many cells according to azimuth angles, and the phase differences between seabed cells are taken into account. Then, a simulation method of reverberation sequence received by horizontal array is put forward. Finally, the method is illustrated in the case of shallow water with negative gradient and the results show that the spectrum characteristics, statistical characteristics and spatial correlation characteristics of simulation signals are in accordance with theoretical predictions, which are useful for the research on anti-reverberation techniques.

Key words: reverberation; scattering; horizontal array; normal-mode; relevant characteristics

0 引 言

浅海环境中，海底混响作为主动声呐的背景干扰，一直是声呐设计和信号处理的难点。混响信号获取是研究混响抑制方法的基础，海上实验可以获取到真实的混响信号，然而存在代价高、风险大的问题。作为替代手段，信号仿真可以在实验室环境下进行，既解决了海上实验受到的制约，又方便研究多种环境条件下的混响特征。

近年来，海洋混响仿真研究已经取得了很大进展。依据混响产生机理通常将混响分为双向传播过程和散射过程，一般情况下，海底混响在浅海混响中起支配作用，散射过程大多采用单元散射模型或点散射模型来描述，传播过程可以借助现有的声传播模型进行研究。对于浅海远程混响采用简正波理论研究比较适合[1-2]，既考虑了传播中的多途效应，又方便与界面散射特性结合起来，物理概念比较清晰。姚万军等[3]、郭熙业等[4]将简正波理论应用到混响序列的仿真建模之中，解决了海底散射信号传播损失的计算问题，由于忽略了声场的色散效应，适合于窄带低频条件下浅海混响序列的仿真。

为了抑制背景干扰和获得更多的信道特征，水声工程中经常采用阵列接收和波束形成技术，然而，目前的混响仿真模型大多基于单水听器或垂直线阵，或者侧重于研究混响的垂直相关特征，对于水平线阵混响序列的仿真方法描述甚少。当前，水平线阵已在主动拖曳声呐上逐渐得到应用，为了研究混响的水平空间特性和抑制方法，本文借助简正波理论，通过分析海底散射信号到水平线阵各阵元的时延，给出水平阵列混响序列的仿真方法，最后进行实例计算和验证。

收稿日期：2018-08-03; **修回日期：**2018-09-18
作者简介：王升(1978－)，男，山东安丘人，硕士，工程师，研究方向为水下目标特性测量。
通讯作者：王升, E-mail: comwsh@sina.com

1　海底混响仿真理论基础

单频点源条件下的海底稳态散射场是混响序列仿真的基础。依据“射线-简正波”类比理论[5]，简正波在海底附近可以分解为准平面波形式，结合海底散射特性得到简正波耦合矩阵，进而获得海底微元的散射声场。海底混响场计算的简正波方法示意图如图 1 所示。

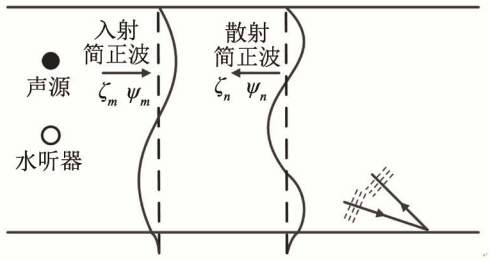


图 1　海底混响场计算的简正波方法示意图
Fig.1　Schematic diagram of reverberation calculation with normal-mode method

本文采用单元散射模型来描述海底散射特性，认为海底由许多均匀分布的海底微元组成，海底微元的稳态散射场可以表示为[1,3-4]

$$p_{s,j}(\omega,z_s,z_r,r_1,r_2)=\sum_m^M\sum_n^N A_m(r_1,z_s)C_{mn}A_n(r_2,z_r) \quad (1)$$

$$C_{mn}=\psi_m^-(z_b)S_j(\alpha_m^-,\alpha_n^+)\psi_n^+(z_b) \quad (2)$$

$$A_m(r_1,z_s)=\sqrt{\frac{2\pi}{\xi_m r_1}}\psi_m(z_s)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\xi_m r_1-\delta_m r_1+\mathrm{i}\pi/4} \quad (3)$$

$$A_n(r_2,z_r)=\sqrt{\frac{2\pi}{\xi_n r_2}}\psi_n(z_r)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\xi_n r_2-\delta_n r_2+\mathrm{i}\pi/4} \quad (4)$$

式(1)～(4)中：下标 s 为散射场标识，下标 j 为海底微元的编号，A_m 为海底微元的入射声场，A_n 为散射声场，C_{mn} 为反向散射耦合矩阵，m、n 分别为入射简正波和散射简正波的标号，ω 为声场角频率，ξ_m、ψ_m 分别是第 m 号简正波的本征值和本征函数，δ_m 是对应的衰减系数，z_s、z_r、z_b 分别是声源、接收点和海底的深度，r_1、r_2 分别是声源到海底微元和海底微元到接收点的水平距离。$S_j(\alpha_m^-,\alpha_n^+)$ 为海底微元的散射函数，α_m^-、α_n^+ 分别为海底附近入射下行波和散射上行波的俯仰角，$\psi_m^-(z_b)$ 对应简正波分解得到的下行波，$\psi_n^+(z_b)$ 对应分解得到的上行波。

式(1)～(4)表明：简正波在海底微元处产生耦合效应，假设在某环境条件下有 X 号离散简正波，那么任意一号入射简正波都会产生 X 号散射简正波。混响序列由不同简正波组合(m, n)(第 m 号简正波入射，第 n 号简正波散射)叠加而成。

混响是大量散射体对声源信号进行散射的结果。对于收发合置海底混响，对 t 时刻混响有贡献的海底散射区域为一个圆环(为了简化计算过程，认为所有简正波群速度相同)，圆环内半径为 $c_g\times t/2$，外半径为 $c_g\times(t+\tau)/2$，c_g 为平均群速度，τ 为源信号脉宽。假设待仿真混响序列的时间窗口为 $[t_1,t_2]$，则对窗口内混响序列有贡献的海底区域为内径 $c_g\times t_1/2$、外径 $c_g\times(t_2+\tau)/2$ 的圆环。海底散射场是由对设定时间窗口内混响序列有贡献的所有海底微元散射场叠加而成[4]：

$$p_s(\omega,z_s,z_r)=\sum_j^J\sum_m^M\sum_n^N A_{mj}C_{mnj}A_{nj} \quad (5)$$

式中：j 是散射微元的编号，J 表示对时间窗口内混响序列有贡献的散射微元总数。

2　水平阵列接收海底混响序列仿真

水平线阵接收海洋混响的较为普遍的应用是主动拖曳声呐，拖曳线阵近似为水平姿态，声源通常也以拖带方式位于线阵附近，对远程混响来说，对混响有贡献的海底微元与收发点相距较远(千米级)，而收发距离和阵尺度相对较小，因此每个阵元的输出仍可近似当作收发合置混响进行仿真。考虑理想情况，水平阵列各阵元位于相同深度，声源 S 位于水平线阵上任意位置，如图 2 所示，不考虑平台运动，则对 t 时刻混响有贡献的海底散射区域为圆环，假设阵元间距为 d，水平阵侧射方向为 0°，位于方位角 θ 的海底微元 $\mathrm{d}A_j$ 与声源的水平距离为 r_s，与阵元 k 的水平距离为 r_k；设声源位置为坐标圆点，阵元 k 的 x 轴坐标为 x_k。由于 $|x_k|$ 与 r_k、r_s 相比很小，根据图 2 所示的几何关系，r_k 可表示为

$$r_k=r_s-x_k\cos(\theta) \quad (6)$$

假设海底微元在散射圆环内均匀分布，将散射

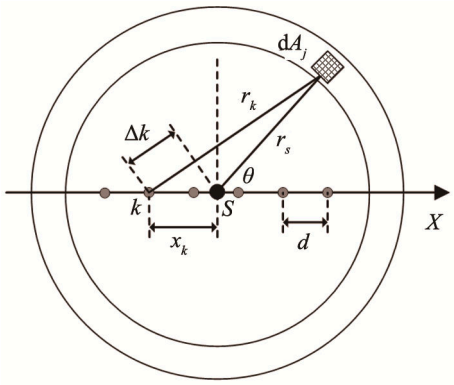


图 2　水平阵列接收海底混响序列仿真示意图
Fig.2　Schematic diagram of reverberation received by horizontal array

圆环按方位角$\Delta\theta$分为G份，每份含有J个微元，则海底混响场可以表示为

$$p_s^k(\omega, z_s, z_r)=\sum_g^G\sum_j^J\sum_m^M\sum_n^N A_{mj}C_{mnj}A_{njg}^k \tag{7}$$

其中，k为阵元编号，g为方位角编号，G为参与计算的方位角总数，每个方位角θ的开角为$\Delta\theta$，对应着J个海底散射微元。式(7)中的$A_{njg}^k(z_r)$与阵元编号、方位角有关。仿真计算时可以将海底有效区域分为多个等宽度的圆环带，每个圆环按方位角分为G份，每份含有J个微元，同一圆环带内各个微元到声源距离相同，每个微元面积与波长呈正比，考虑到海底微元位置和散射幅度的随机性，应为耦合矩阵C_{mnj}加随机相位和幅度。

混响是声源发射信号作用于海洋环境而引起的现象，如果将声波的双向传播及目标散射过程看作一个传输网络，那么单频稳态散射声场就可以视为谐波信号作用于传输网络形成的传输函数。设源信号频谱为$s(\omega)$，对式(7)作傅里叶逆变换，就获得水平线阵接收海底混响的时域序列：

$$p_s^k(t, z_s, z_r)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}s(\omega)p_s^k(\omega, z_s, z_r)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}\mathrm{d}\omega \tag{8}$$

3 仿真算例及特征分析

3.1 混响序列仿真

海底散射强度是混响序列仿真的重要参数，决定了混响序列中各号简正波的能量分布。海底散射特性通常采用经验公式来描述，本文采用 Lambert 定律[1]，海底微元$\mathrm{d}A_j$的声压散射函数为

$$S_j(\alpha_m^-, \alpha_n^+)=\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\zeta_j(m,n)}\sqrt{\left|\mu\sin(\alpha_m^-)\sin(\alpha_n^+)\right|\mathrm{d}A_j} \tag{9}$$

式(9)中，海底散射系数μ满足$10\lg\mu=-27\,\mathrm{dB}$，$\zeta_j$为随机相位，在$[0, 2\pi]$区间均匀分布。

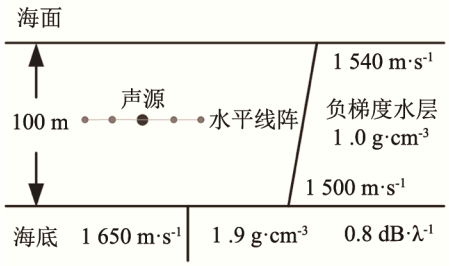
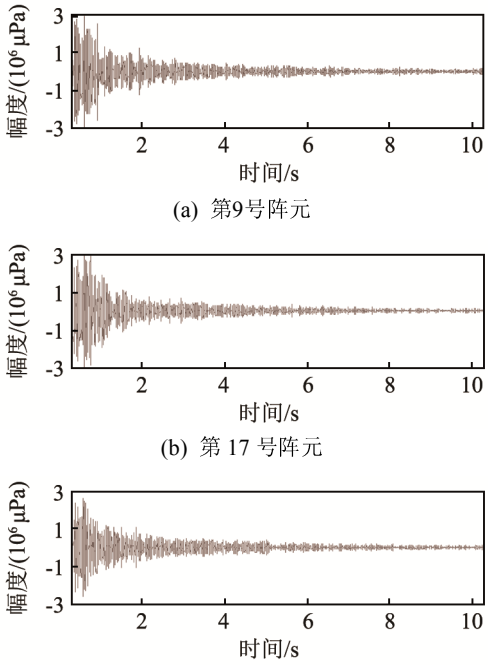


图 3 海洋环境和声源、接收线阵位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the environmental parameters and the positions of source and receiver

下面以典型负梯度浅海环境为例进行仿真，参数设置如图 3 所示，水平分层海洋环境，海底为沙石底质，粗糙度均匀且各向同性。声源为 200 dB 全向点源，深度 50 m，发射线性调频(Linear Frequency Modulated, LFM)脉冲信号，中心频率为 300 Hz，带宽为 50 Hz，脉宽为 0.5 s；均匀线阵为保证良好指向性，线阵阵元间距常取半波长，本文采用 33 元水平均匀线阵接收，阵元间隔为 2.5 m，线阵中心与声源处于相同位置；考虑到计算效率，海底微元尺度设为 5 m，对海底按 2°进行划分，即G=180，相应计算出每个扇形海底包含的海底微元数量J=39 057；信号采样频率为 2 400 Hz，仿真时间窗口为 10 s。图 4 为仿真获得的水平线阵第 9、17、25 号阵元的混响序列。



(a) 第9号阵元

(b) 第 17 号阵元

(c) 第 25 号阵元

图 4 水平阵列部分阵元接收的 LFM 混响序列

Fig.4 Reverberation sequence of LFM signal received by horizontal array

3.2 仿真序列统计特征

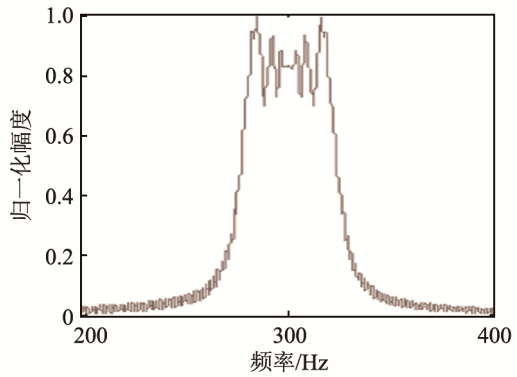
文献[6]阐述了混响信号的频谱、统计特征、自相关特征应满足以下规律：

(1) 不考虑声呐和散射体之间的相对运动时，混响信号应与源信号频谱相一致；

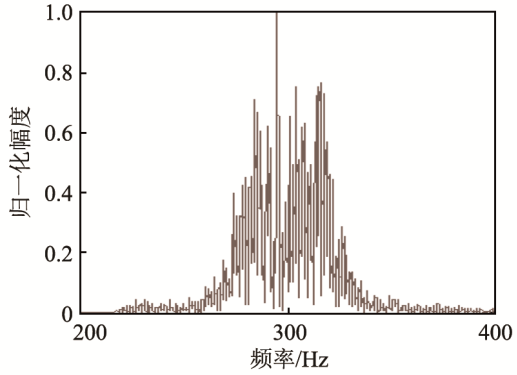
(2) 混响信号的瞬时幅值服从高斯分布，而包络幅值服从瑞利分布；

(3) 混响信号的时间相关半径与带宽成反比。

图 5 为 3.1 节中第 17 号阵元的混响序列与发射信号的频谱比较；图 6、7 分别为仿真序列的瞬时概率密度和包络概率密度，由于混响是非平稳随机过程，统计分析前要先做平稳化处理；图 8 为不同带宽的混响序列的自相关函数。可看出：仿真序列的相关半径与带宽呈反比，其自相关特征、频谱特征和统计特征都符合理论预测。



(a) 发射信号频谱



(b) 仿真序列频谱

图 5　发射信号与仿真混响序列频谱比较

Fig.5　Spectrum comparison between transmitted signal and simulated reverberation sequence

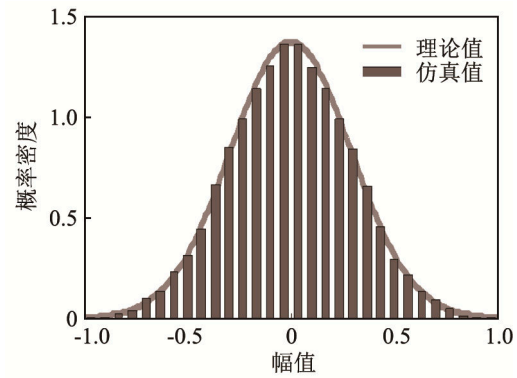


图 6　仿真混响序列的瞬时概率密度(均值 μ=0，标准差 σ=0.22)

Fig.6　Instantaneous probability density of simulated reverberation sequence (mean μ=0, standard deviation σ=0.22)

3.3　仿真序列的水平相关性

混响的空间相关性是衡量阵列增益的重要指标，对于抗混响设计有重要意义。文献[7]给出了海底混响的水平相关系数的计算公式：

$$C_h \approx \mathrm{sinc}\left(\frac{l}{\lambda}\Theta\right) \tag{10}$$

式中：l 为水平线阵上两个水听器间距，λ 为波长，Θ 为水听器的水平指向性开角，本文仿真中采用全向水听器，$\Theta=2\pi$。

对混响仿真序列的空间相关性进行验证，

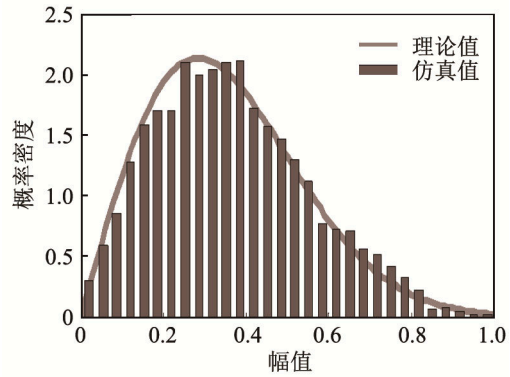
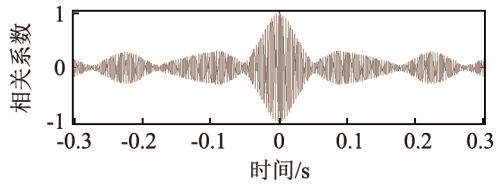
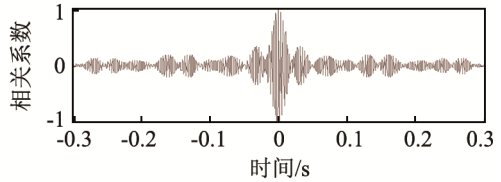


图 7　仿真混响序列的包络概率密度(标准差 σ=0.18)

Fig.7　Envelope probability density of simulated reverberation sequence (standard deviation σ=0.18)



(a) 20 Hz 带宽

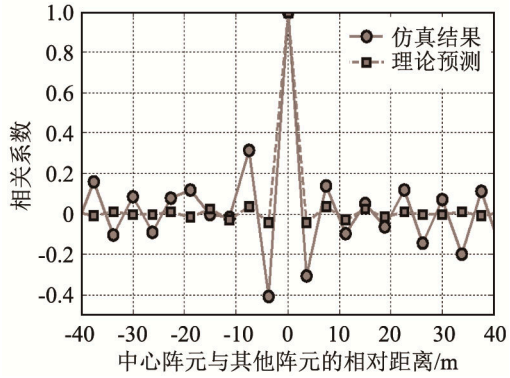


(b) 50 Hz 带宽

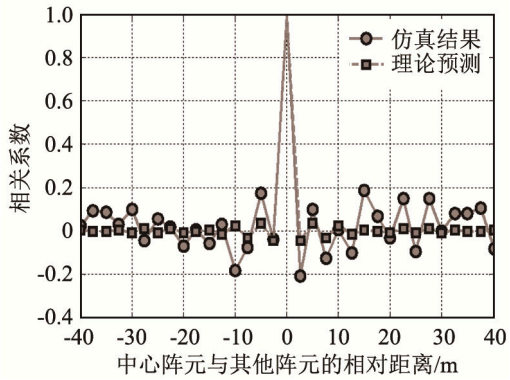
图 8　仿真混响序列的自相关函数

Fig.8　Temporal auto-correlative coefficient of simulated reverberation sequence

环境参数同 3.1 节，发射两个频率的 LFM 信号，中心频率分别为 200 Hz 和 300 Hz，带宽为 50 Hz；采用水平均匀线阵接收，阵元间距为半波长，中心频率为 200 Hz 时的阵元数为 23，中心频率为 300 Hz 时的阵元数为 33。图 9 为线阵中心阵元与其它阵元的水平相关系数。从图 9 中可以看出：仿真结果与理论预测基本一致，相关系数随两个水听器的水平距离增大而迅速减小，呈现或正或负的震荡现象。



(a) LFM 信号(中心频率 200 Hz，带宽 50 Hz)



(b) LFM 信号(中心频率 300 Hz，带宽 50 Hz)

图 9 仿真和理论预测的线阵中心阵元与其它阵元的水平相关系数

Fig.9 The simulated and theoretically predicted horizontal correlation coefficients between central array element and other array elements: (a) the central frequency of LMF signal is 200 Hz, (b) the central frequency of LMF signal is 300 Hz, and the band-width is all 50 Hz

4 结束语

本文借助射线简正波类比方法，对收发合置方式水平阵列接收混响序列的仿真方法进行了探讨。文中对负梯度声速条件下的混响序列进行了仿真及特征分析，结果表明，该仿真方法是合理的。通过分析海底混响的水平相关性，认为浅海混响的水平相关性随水听器间的水平距离增大而迅速减小。值得指出的是，本文仿真是对实际工程应用情况的简化，没有考虑拖曳线阵姿态变化和平台运动的影响，仿真方法是以简正波理论为基础，适用于浅海远程低频混响序列的计算，可以为远程海底混响的空间特征分析及抑制方法研究提供参考。

参 考 文 献

[1] ELLIS D D. A shallow-water normal-mode reverberation model[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, **97**(2): 2804-2814.

[2] ZHOU J X, ZHANG X Z, ROGERS P H. Reverberation vertical coherence and sea-bottom geoacoustic inversion in shallow water [J]. IEEE J Oceanic Eng, 2004, **29**(4): 988-999.

[3] 姚万军，蔡志明. 基于简正波的浅海混响序列仿真[J]. 声学技术, 2009, **28**(1): 25-28.
YAO Wanjun, CAI Zhiming. Simulation of reverberation sequence in shallow-water based on normal-mode theory[J]. Technical Acoustics, 2009, **28**(1): 25-28.

[4] 郭熙业，苏绍璟，王跃科. 海底混响统计建模与仿真方法研究[J]. 兵工学报, 2009, **30**(7): 940-944.
GUO Xiye, SU Shaojing, WANG Yueke. Research on the statistical modeling and simulation method for seafloor reverberation[J]. Acta Armamentarii, 2009, **30**(7): 940-944.

[5] 汪德昭，尚尔昌. 水声学[M]. 北京：科学出版社, 1981: 105-111.
WANG Dezhao, SHANG Erchang. Underwater acoustics[M]. Beijing: Science Press, 1981: 105-111.

[6] 奥里雪夫斯基 B B. 海洋混响的统计特性[M]. 罗耀杰等译. 北京：科学出版社, 1977: 67-163.
OLSHEVSKII B B. Statistical characters of the ocean reverberation[M]. LUO Yaojie, translate. Beijing: Science Press, 1977: 67-163.

[7] 朱艳，陈刚，鲁辛凯. 水平分置海底混响信号的空间相关特性研究[J]. 舰船科学技术, 2009, **31**(5): 56-59.
ZHU Yan, CHEN Gang, LU Xinkai. Research on space correlation characteristic of horizontal bistatic seafloor reverberation signals[J]. Ship Science and Technology, 2009, **31**(5): 56-59.