

基于时-空离散化的海底混响时间序列仿真方法

陈文剑, 孙辉, 张明辉, 朱广平

(哈尔滨工程大学水声技术国防科技重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 以海底混响为研究对象, 提出了一种混响仿真时通过时空离散化处理降低计算量的方法。以混响的点散射模型为基础, 海底混响认为是海底散射体对发射信号的响应, 用线性网络对其进行描述, 得到冲击响应函数。通过对冲击响应函数时间离散化处理, 相应的对海底进行空间区域划分, 进而把散射体散射信号叠加时的叠加总数转化为时间域离散化之后的时间段总数, 降低了混响仿真时的计算量。通过计算机仿真结果, 表明所提方法可以有效降低计算量, 并且其相关特性与文献研究结果相符。

关键词: 海底混响; 时-空离散化; 点散射模型

中图分类号: TP319.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-02-0173-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.02.013

A method of simulating seafloor reverberation based on time-space discretization

CHEN Wen-jian, SUN Hui, ZHANG Ming-hui, ZHU Guang-ping

(National Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Taking the seafloor reverberation as a studied object, a method of simulating reverberation is proposed based on time-space discretization to increase the computing speed. The reverberation is the linear response of scatters to the emitting signal, and can be described by a linear network to obtain the impulse response function. By the time discretization of the impulse response function and regional division of the seafloor, the summation of scatters is translated into the total number of time slice, and the computing speed is increased. The results of numerical simulation show that the proposed method can effectively reduce the computational complexity, and the performance is well in agreement with the theoretical analysis.

Key words: sea bottom reverberation; time-space discretization; point-scattering model

0 引言

混响是影响主动声纳工作性能的重要干扰因素之一, 混响的预报对声纳的使用和设计有着重要意义。对混响信号仿真的研究主要包括混响强度仿真^[1-3]和混响时间序列仿真。当声纳系统所采用的信号处理方法主要依赖能量时, 常用混响强度对其进行估计和评价。随着声纳系统的发展, 如多波束和复杂的相干信号处理技术的应用, 就需要对混响时间序列进行仿真。混响时间序列仿真的方法主要有两种, 一种根据混响信号的概率分布, 仿真所需分布的混响信号^[4-6]; 另一种是以点散射模型为基础的仿真方法, 即通过计算散射体或通过网格划分海底

为小散射元的散射信号在接收点的叠加得到混响信号, 很多文献中混响仿真方法都是以此模型为基础的改进和扩展^[7-13], 该方法能够比较准确地仿真混响信号, 但由于海洋中存在大量散射体, 在混响仿真时存在计算量大的问题。

本文针对利用点散射模型进行混响仿真时计算量大的问题, 通过时间-空间离散化处理的方法, 把散射体散射信号叠加时的叠加总数转化为时间域离散化之后的时间段总数, 从而降低了计算量。

1 海底混响模型

由于海洋介质的不均匀性和界面的作用, 海洋是缓慢时变的相干多途信道。从声源发出的信号沿各种不同的途径到达散射体, 散射信号又经各种不同途径到达接收器, 因此一个散射体产生的接收信号是多个途径到达信号的干涉叠加。海洋中存在着大量的无规散射体, 因此混响的形成是一个复杂的

收稿日期: 2010-04-01; 修回日期: 2010-06-10

作者简介: 陈文剑(1981-), 男, 陕西大荔人, 博士研究生, 研究方向为水下目标特性与水声信号处理。

通讯作者: 陈文剑, E-mail: chwjchwj@163.com

干涉叠加的过程。本文为了讨论方便,只考虑海底混响,并假设海水均匀,不考虑多途效应。声源和接收器具有指向性,在方位角方向上,认为在主瓣宽度内取固定值,不考虑旁瓣的影响;在俯仰角方向上有如图1所示的指向性,且不考虑旁瓣的影响,因此可以忽略来自海面作用的声波。

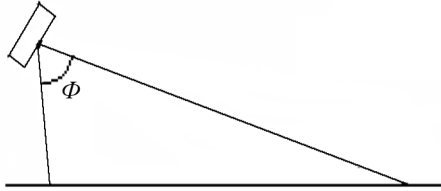


图1 俯仰角方向的指向性示意图
Fig.1 The directivity in pitch angle direction

假定二次散射效应可以忽略,散射体静止,且散射信号的波形与发射信号波形相同,在满足线性叠加原理的条件下,混响过程可以写为

$$r(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} B_i A_i s(t-t_i) \quad (1)$$

式中: $N(t)$ 是 t 时刻对混响有贡献的散射体总数; B_i 是第 i 个散射体散射信号的传播衰减; A_i 是第 i 个散射体散射信号幅度; $s(t-t_i)$ 是时延为 t_i 的归一化的发射信号, t_i 是第 i 个散射体散射信号到达接收点的时延。

假设声波照射区域固定,公式(1)中, $N(t)$ 的值与海底散射体的密度有关,还与发射信号的波列长度有关,海底散射体的密度一定的条件下,波列越长,在 t 时刻参与叠加的信号就越多;另外混响信号 $r(t)$ 还与发射信号调制形式有关,例如发射 CW 脉冲和 LFM 脉冲信号产生的混响信号波形不同,这一点已经通过仿真和实验得到验证^[7]。公式(1)是作为混响形成过程的一种描述,大量的混响时间序列仿真方法都是以它为依据,概括来说就是通过计算每一个散射信号的时延(或多途的时延),然后把每一个散射信号进行叠加得到混响信号。显而易见,当散射体个数非常多时,计算量是非常可观的。

海底混响可以认为是海底散射体对发射信号的响应,因此可以用线性网络对其进行描述。当对网络的输入端加一个 δ 脉冲,即声源发射一个 δ 脉冲,网络的输出信号即接收到的混响信号被称为网络的冲激响应函数,记为 $h(t)$:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N B_i A_i \delta(t-t_i) \quad (2)$$

可见式(2)与式(1)形式相同,所不同的是式(2)中的 N 表示声波照射面积所包含的散射体总数。由于产生混响的散射体随机分布在海底,因此冲击响应函数也是随机的,其随机性的分布反映了海底的

性质,也从根本上对海底混响进行了表述,而与发射信号的形式无关。

Lambert 散射定律常用来描述声和光在粗糙面上的散射,公式如下^[14]:

$$I_s = \mu I_i \sin\theta \sin\phi dS \quad (3)$$

式中, μ 是比例常数, dS 为表面面元。作为一种近似描述,可以认为 dS 表示海底散射体的大小,散射体大小是服从某种分布的随机数,文献[15]中假设散射体的大小服从指数分布,即认为 dS 服从指数分布。散射体大小的分布要根据具体的海底情况决定,例如砾石、砂、泥沙等海底的散射体大小分布各不相同,其密度由具体海底决定。式(2)中 B_i 和 t_i 取决于散射体相对于接收器的距离(位置)。

图2为具有指向性声纳照射的海底散射体随机分布示意图,图3为对应的冲激响应函数。从图中可以看出,冲激响应是随时间(距离)增加幅度逐渐减小的一系列延时的 δ 脉冲,在远距离处,由于散射体个数的增加, δ 脉冲个数在单位时间(距离)内的密度变大。

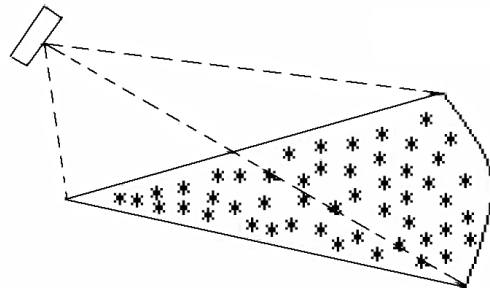


图2 海底散射体随机分布示意图
Fig.2 Random distribution of sea bottom scatterers

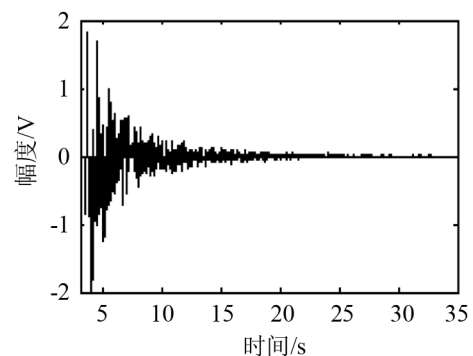


图3 冲激响应函数
Fig.3 Impulse response function

2 时-空离散化

观察图3中的冲激响应函数,每一个散射体对应一个 δ 脉冲,当两个散射体的散射信号到达接收点的时间相同或相差很小时,对应的 δ 脉冲重叠或

几乎重叠在一起。因此可以对图 3 中的时间轴离散化处理,即在某一很小时间段 Δt 内的 δ 脉冲可认为是同时到达的。在实际声纳工作时,发射信号是有一定调制形式和脉冲长度的信号(如 CW 脉冲和 LFM 脉冲信号), Δt 时间段内到达接收点的散射信号可认为是同时到达的散射信号的叠加。 Δt 由具体的声纳发射信号的自相关函数决定。图 4 分别给出了 CW 脉冲和 LFM 脉冲信号的自相关函数,其中图 4(b)、4(d)分别是 4(a)、4(c)的局部放大。我们认为幅度下降到 0.99 时所对应的时间为 Δt , 取值一般较小。

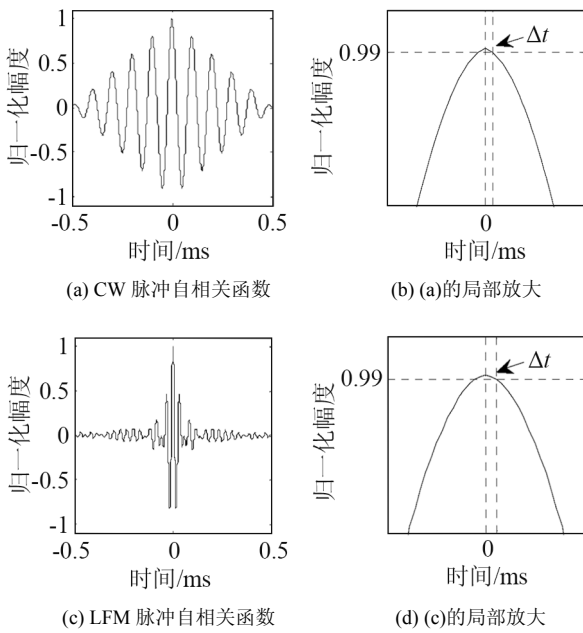


图 4 CW 和 LFM 信号的自相关函数
Fig.4 Autocorrelation functions of CW and LFM signals

对图 3 中时间轴的离散化与海底平面的离散化相对应,即 Δt 时间段对应的海底区域如图 5 所示, Δl 距离内所包含的扇形面积为 ΔS 。由概率论的知识可知,假如海底散射体均匀分布在海底二维平面,平均密度为 ρ 个/ m^2 ,则在单位面积中含有散射体的个数服从均值为 ρ 的 Poisson 分布。因此, ΔS 包含的散射体个数服从均值为 $\rho\Delta t$ 的 Poisson 分布。由时间轴的分段处理,可以对应海底平面进

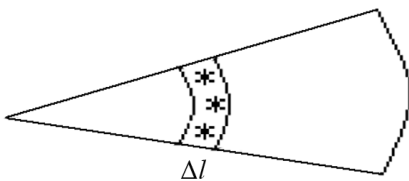


图 5 海底区域划分
Fig.5 Sea bottom division

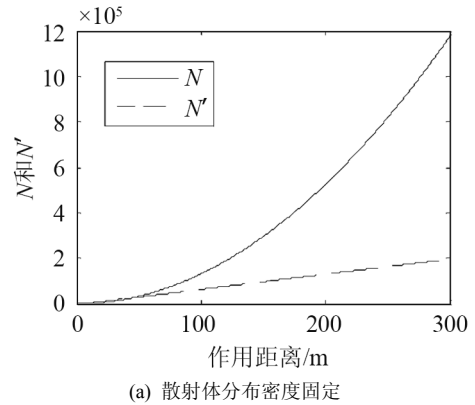
行区域划分,所划分的每个 ΔS 区域内的散射体散射信号认为是同时到达接收点,此时的冲激响应函数在 Δt 时间段内只有一个 δ 脉冲,其幅度是时间分段之前 Δt 时间内所有 δ 脉冲幅度之和,则式(2)的冲激响应函数可以重写为:

$$h'(t) = \sum_{i=1}^{N'} B_i A'_i \delta(t - i\Delta t) \tag{4}$$

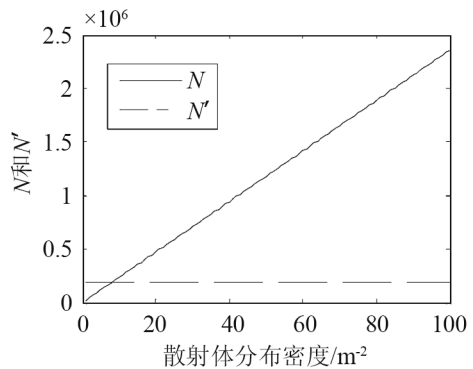
式中, $N' = T/\Delta t$, T 表示接收混响的总时间; $A'_i = \sum_{j=1}^{\Delta N} A_j$, ΔN 表示 ΔS 区域内的散射体个数。

对比式(2)和式(4)可见,通过时-空离散化处理之后,求和个数 N 变为 N' 。下面结合具体的发射信号参数对 N 和 N' 进行对比分析。

声纳发射信号为调频范围 20~40 kHz、脉宽 2.5 ms 的 LMF 信号, Δt 根据发射信号的自相关函数确定。基阵的水平波束宽度 30° 。分别以仿真海底的水平距离和散射体分布密度为变量,计算得到 N 和 N' , 如图 6 所示。其中,图 6(a)表示散射体分布密度固定,假定 $\rho = 10$ 个/ m^2 ,可以看出随着距离的增加, N 和 N' 都增大,但 N 增大的速度要远大于 N' 的增大速度;图 6(b)表示作用距离固定,假定 $L = 300$ m,可以看出 N 随着散射体分布密度的增大



(a) 散射体分布密度固定



(b) 作用距离固定

图 6 计算量对比
Fig.6 Comparison of calculation amount

而增大，但此时 N' 与散射体分布密度无关。

3 混响时间序列仿真及检验

3.1 混响时间序列仿真

通过上面的分析，时-空离散化处理可以减小混响仿真时的计算量，下面通过设定发射信号和海洋环境的相关参数，仿真得到海底混响的时间序列。声纳基阵距海底 30 m，水平波束宽度为 30°，水中声速为 1500 m/s，海底散射体均匀分布在海底二维平面，密度为 ρ 个/m²。发射信号分别采用 CW 脉冲信号和 LFM 脉冲信号，CW 脉冲信号脉宽为 2.5 ms，频率为 40kHz；LFM 脉冲信号的调频范围为 20~40kHz，脉宽为 2.5 ms。仿真的混响时间序列如图 7 所示，其中图 7(a)是 CW 脉冲混响，图 7(b)是 LFM 脉冲混响信号。

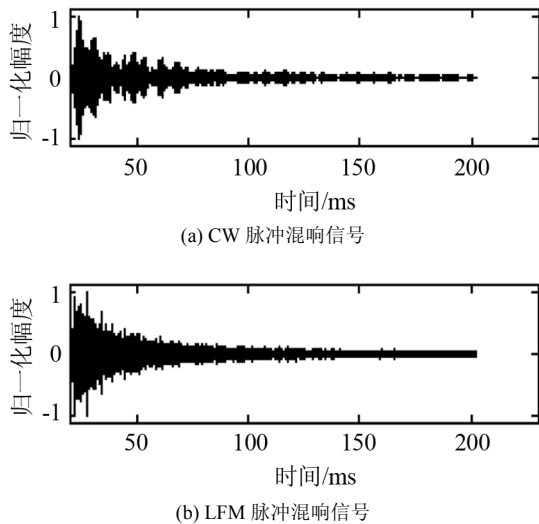


图 7 仿真混响时间序列
Fig.7 Simulation of reverberation time-series

3.2 混响特性检验

混响是大量散射体散射信号在接收点的叠加形成的，每个散射信号对混响的贡献都非常小，因此由大数定律可知，混响的瞬时值服从高斯分布，其包络服从瑞利分布^[16]。如果不满足大数定律，混响的统计特性将发生变化^[6]。图 8 给出了满足大数定律条件时仿真混响信号的瞬时值和包络分布与理论值的比较。

混响是由发射信号引起的，因此混响的频谱与发射信号频谱具有一致性。图 9 给出 LFM 信号和对应混响信号的频谱。图 10 为发射信号与混响信号的自相关函数的比较，结果显示自相关函数较为接近，混响信号的时间自相关半径与脉宽成正比。

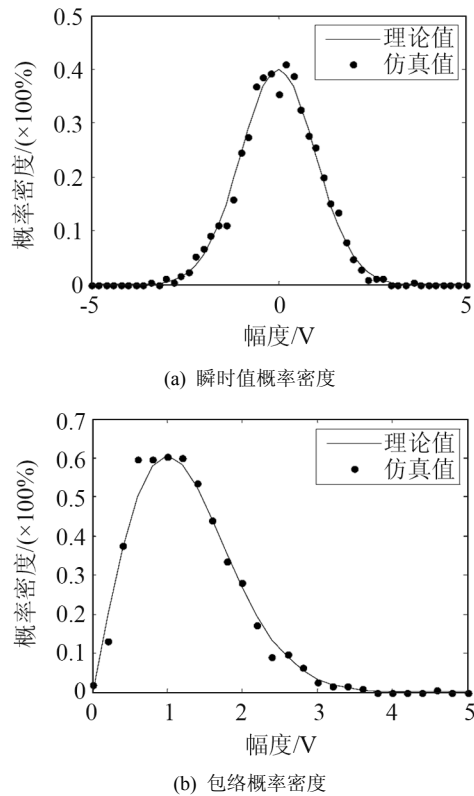


图 8 瞬时值和包络概率密度检验
Fig.8 Probability densities of reverberation instantaneous value and its envelope

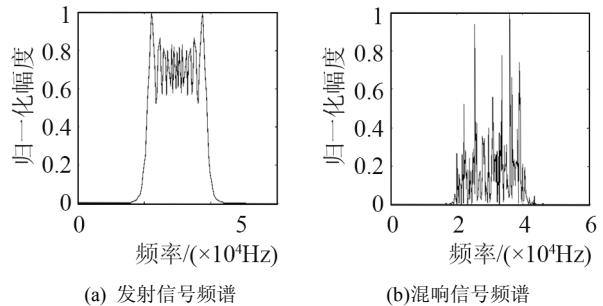


图 9 发射信号与混响频谱对比
Fig.9 The spectrums of emitting signal and reverberation signal

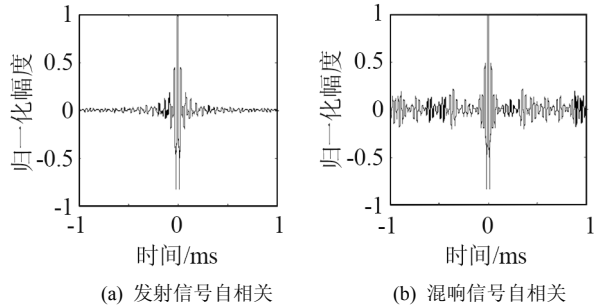


图 10 发射信号与混响自相关函数对比
Fig.10 Autocorrelation functions of emitting signal and reverberation signal

4 结 论

本文以混响的点散射模型为基础，提出了一种

混响仿真时通过时空离散化处理降低计算量的方法。该方法在远距离和大散射体分布密度时, 降低计算量的效果更加显著。对仿真混响信号的频谱、瞬时幅度、包络以及时间相关特性进行了分析, 结果与理论值相符合。作为一种降低计算量方法的讨论, 本文是在较理想的情况下分析了海底混响。当考虑海面、介质不均匀等影响因素时, 也可以利用所提方法降低计算量, 具体细节还需继续开展深入研究。

参 考 文 献

- [1] 姚万军, 蔡志明. 浅海混响的建模与预报[J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(2): 88-112.
YAO Wanjun, Cai Zhiming. Modeling and prediction of reverberation in shallow water[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2009, 21(2): 88-112.
- [2] 袁骏, 肖卉, 张明敏, 等. 双基地声纳海底混响面元划分与建模[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(4): 1-4.
YUAN Jun, XIAO Hui, ZHANG Mingmin, HE Qinghai, et al. Scattering cell division and modeling for bottom reverberation in bistatic sonar[J]. Journal of Detection and Control, 2009, 31(4): 1-4.
- [3] 张明辉. 三维环境海洋混响强度衰减规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2005. 5-7.
ZHANG Minghui. Research on reverberation intensity decaying for 3D[D]. A dissertation for the degree of Master in School of Harbin Engineering. 2005, 5-7.
- [4] 方世良. 海洋混响信号的序贯仿真[J]. 声学技术, 1996, 15(3): 101-104.
FANG Shiliang. Sequence simulation of oceanic reverberation signal[J]. Technical Acoustics, 1996, 15(3): 101-104.
- [5] Abraham D A, Lyons A P. Reverberation envelope statistics and their dependence on sonar beamwidth and bandwidth[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(1): 126-137.
- [6] Abraham D A, Lyons A P. Simulating non-rayleigh reverberation and clutter[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(2): 347-362.
- [7] 蔡平, 梁国龙, 葛凤翔, 等. 界面混响信号的仿真研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(4): 31-35.
CAI Ping, LIANG Guolong, GE Fengxiang, et al. Research on the interface reverberation simulation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000, 21(4): 31-35.
- [8] 陈文剑, 孙辉, 朱建军, 等. 基于分数阶傅里叶变换混响抑制的目标回波检测方法[J]. 声学学报, 2009, 34(5): 408-415.
CHEN Wenjian, SUN Hui, ZHU Jianjun, et al. A method for detecting target echo in reverberation based on fractional Fourier transform[J]. Acta Acustica, 2009, 34(5): 408-415.
- [9] 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.
- [10] 郭熙业, 苏绍璟, 王跃科. 基于射线理论的海底混响建模研究[J]. 声学技术, 2009, 28(3): 203-207.
GUO Xiye, SU Shaojing, WANG Yueke. Research on the signal modeling method for sea bottom reverberation based on ray theory[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(3): 203-207.
- [11] 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.
- [12] 姚万军, 蔡志明, 卫红凯. 浅海混响建模的声束跟踪理论[J]. 声学学报, 2009, 34(3): 223-228.
YAO Wanjun, CAI Zhiming, WEI Hongkai. Modeling of reverberation in shallow-water based on tracing theory[J]. Acta Acustica, 2009, 34(3): 223-228.
- [13] ZHANG Minghui, SUN Hui, CHEN Wenjian. Simulation model of bottom reverberation signals for horizontal bistatic receiving array[C]// IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2008: 1437-1440.
- [14] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993: 203-206.
LIU Bosheng, LEI Jiayu. Principles of underwater sound[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1993: 203-206.
- [15] Abraham D A, Lyons A P. Exponential scattering and K-distributed reverberation[C]. Proc. MTS/IEEE OCEANS' 01, 2001, 3: 1622-1628.
- [16] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道(第 2 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 129-131.
HUI Junying, SHENG Xueli. Underwater sound channel[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 129-131.