

海底混响仿真研究

徐新盛 张 燕 李海森 杨士莪

(哈尔滨工程大学水声研究所 哈尔滨 150001)

1996 年 12 月 12 日收到

1997 年 2 月 3 日定稿

摘要 提出了一种新颖的海底混响仿真工程实现模型。它是基于单元散射的理论,通过模拟海底混响形成的物理过程实现仿真,具有仿真效果好,工程上易于实现的特点。根据该模型实现的多通道海底混响模拟器功能强、柔软性好,所产生的海底混响仿真信号无论是在形式上还是在统计特性方面与实测海底混响相比较都有很好的一致性。此外,该模拟器还可以作为目标模拟器或者相控/束控信号源使用。

PACS 数 43.30

A model for seafloor reverberation simulation

XU Xinsheng ZHANG Yan LI Haisen YANG Shie

(Underwater Acoustical Research Institute of Harbin Engineering University Harbin 150001)

Received December 12, 1996

Revised February 3, 1997

Abstract This paper presents a new model for the implementation of seafloor reverberation simulation. Based on the element scattering theory, the model, which was characterized by both good simulating results and simplicity of the implementation, was developed by means of simulating the generating process of the seafloor reverberation. The "Space-Time" transformation technique was also developed as one of the main features of the research project, which simplified the realization of the model significantly. The multichannel seafloor reverberation simulator thus developed is flexible with multifunction. Waveforms and statistical properties of the seafloor reverberation simulated are consistent with that of the seafloor reverberation collected in the real environment. Besides, it can be used as a target simulator simulating the movements of underwater acoustic targets or as a signal generator generating phase-controlled signals.

引言

海底混响仿真是声呐仿真技术中的一个重要研究领域,涉及研究内容十分广泛。水声设备在研制过程中由于受到各方面条件的制约不可能经常进行海上或湖上试验,一般利用模拟器作仿真试验来代替。近年来随着侧扫声呐和多波束测深(条带测深仪)技术的发展,海底混响仿真模拟器的使用也越来越多。这就对海底混响仿真技术提出了更高的要求。

长期以来,国内外学者对于海洋混响作了大量的研究。模拟海洋混响的理论模型有两种,即单元散射模型和点散射模型^[1]。其中用得比较多的是单元散射模型。在利用这一模型进行仿真时,一般是通过计算散射体的散射函数、混响功率谱以及混响功率谱与接收机脉冲响应能量谱等完成。本文研究的海底混响仿真工程实现模型也采用单元散射理论,但在实现过程中利用仿真电路模拟海底反向散射波的产生与迭加。为了使模型易于实现,作了相应的简化,例如只考虑接收基阵指向角照射范围内的散射体,对于某时刻有贡献的散射体的最大个数也加以限制。因此,本文介绍的是一种新的,模拟海底混响产生物理过程的工程实现模型。依据此模型实现的多通道海底混响模拟器输出的仿真信号,其形式以及统计特性与实测海底混响信号的形式与统计特性有很好的-致性,说明该模型有较好的仿真效果。

水声模拟器是水声设备研制与使用的常用仪器。我们研制的海底混响模拟器采用 TM320C30 高速数字信号处理器作为系统的控制核心,可以在应用软件的控制下,模拟虚拟的海底地形。此外还可以作为目标模拟器使用,产生多个目标的运动轨迹,或者作为相控/束控信号源使用。研制过程中开发的“空-时”转换技术使模拟器的电路得以简化。因此它是一种功能强、结构紧凑、使用方便的水声模拟器。在实验室和湖上试验使用,收到良好的效果。

1 海底混响仿真的物理模型

1.1 散射体反向散射波的迭加过程

根据单元散射的模型,散射单元在接收基阵指向性角覆盖范围内均匀分布,每个单元包含大量的散射体,每一个散射体对于入射的声信号都会产生反向散射波。由于声信号到达各散射体的时刻有先有后,因此散射体产生的反向散射波到达接收换能器的时刻也有先后(图 1b)。接收换能器在 t_j 时刻接收到的海底混响乃是该时刻所有有贡献的反向散射波的总和,这一过程可以用图 1 来描述。

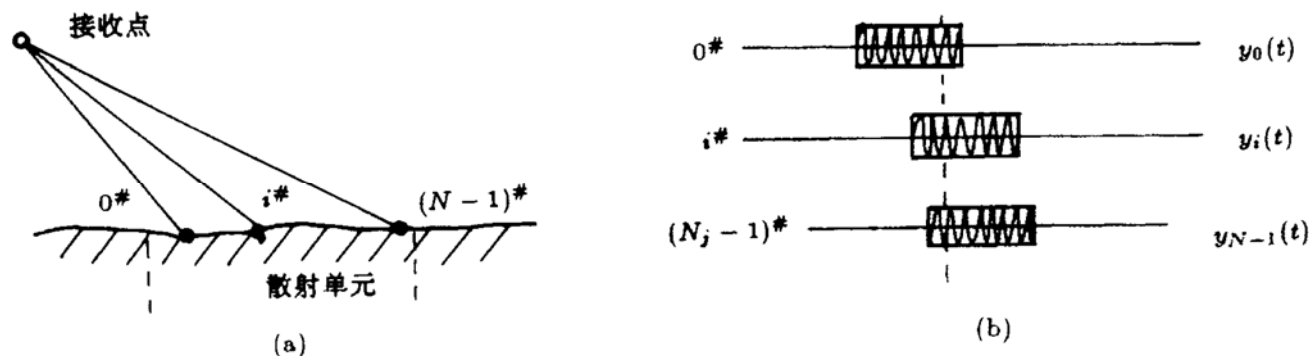


图 1 反向散射波的迭加过程

图 1 中, N 为在 t_j 时刻有贡献的散射体的个数, $y_i(t)$ 为第 i 个反向散射信号。设接收到的海底混响信号为 $y(t)$, 则在 t_j 时刻有

$$y(t_j) = \sum_{i=1}^{N_j-1} y_i(t_j) \quad (1)$$

通常,与入射信号相比,反向散射波在幅度和相位上都会发生改变。假定散射体的体积足够

小, 忽略散射过程中的脉冲展宽现象, 若入射信号为 $x(t)$, 则有

$$y(t_j) = \sum_{i=0}^{N_j-1} x_i(t_j) A_{ij} e^{j\phi_{i,j}} \quad (2)$$

式 (2) 中, A_{ij} 为反向散射波的幅度, ϕ_{ij} 为附加相移。不同的散射体所产生的反射波的幅度与附加相移都是不一样的, 不同时刻参与迭加的散射波不尽相同, 有贡献的散射体个数也是不相同的, 这一切都是随机发生, 因而海底混响信号的包络具有随机信号的特点, 所包含的相位信息也极其丰富。

随着时间的增加, 有贡献散射体与接收基阵的距离不断增加, 反向散射波的掠射角不断减小, 使接收点海底混响的强度很快下降, 这一切构成了海底混响信号形式上的基本特征。

1.2 “空-时”转换模型

式 (1) 描述了在接收点有贡献反向散射波迭加的基本过程。在整个海底混响的持续时间, 有贡献的散射波的数量是十分庞大的, 构筑实际系统时, 若要为每个散射波设置相应的仿真电路, 在工程上无法实现。图 2 中 A、B、C 为三个空间位置不同的散射体, ΔR 与 $\Delta R'$ 分别为散射体 B、C 相对于 A 的路径差。换算为时间有

$$t_R = 2\Delta R/c \quad (3)$$

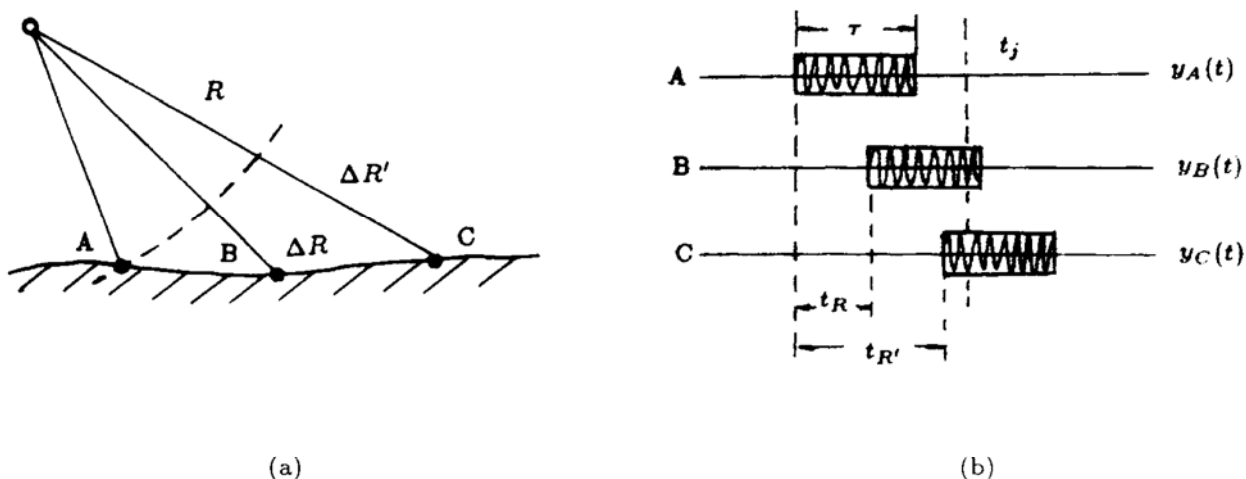


图 2 散射体在空间的离散半径

式 (3) 中 c 为声速 (下同), 各散射体产生的反向散射波见图 2(b)。我们定义 t_R 为描述两个散射体在空间离散程度的离散半径。若发射信号的脉冲宽度为 τ , 显然如果满足

$$t_R \leq \tau \quad (4)$$

则两个散射体产生的反向散射波将会在接收点产生迭加, 如图中的 A 与 B, 或 B 与 C。反之, 则不会产生迭加, 如图中的 A 与 C。这样散射体 A 的仿真电路在 t_j 时刻就可以作为散射体 C 的仿真电路使用, 从而使系统得以简化。

同一个反向散射波仿真电路被重复使用后, 所产生的信号是一个 CW 脉冲序列, 因此散射体空间位置的仿真过程可以转换为时间序列处理, 这就是所谓的“空-时”转换技术。上述脉冲序列中, 相对于前一个脉冲, 后续脉冲的发生时刻与散射体在空间位置的随机分布有关, 因此两个脉冲的间隔也是一个随机量。发射脉冲信号宽度为 τ 时, 脉冲间隔 t_d 应按式 (5) 随机选取。

$$0 \leq t_d \leq \tau \pm 1\text{ms} \quad (5)$$

后续脉冲代表空间位置越来越偏离接收点的散射体的反向散射波, 它的幅度与相位都是随机变化的。工程实现时, 可以利用一个随机脉冲序列对正弦信号源进行调制, 来产生一个脉冲间隔, 幅度、与初相位均是随机变化的 CW 脉冲串, 有

$$y_i(t) = M_i(t) \cdot \cos(\omega t + \phi_i(t)) \quad (6)$$

式 (6) 中, $M_i(t)$ 为随机脉冲序列, ω 为发射信号频率, $\phi_i(t)$ 为正弦信号的初相位。作为海底混响模拟器使用时, $\phi_i(t)$ 通常可以选为常数, 有利于简化系统。

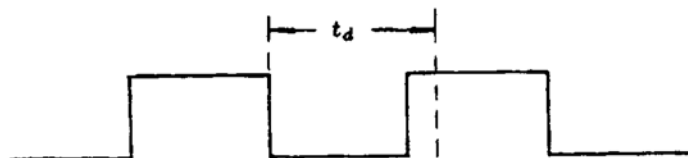


图 3 脉冲间隔随机选取范围

1.3 时间增益控制

海底混响信号的平均幅度随时间增加呈幂次函数的规律下降, 这是因为等效的散射能量中心随时间增加与接收点之间的距离不断增加的缘故。造成这种衰减的主要原因有几何扩展、海水吸收以及掠射角变化等, 可以用图 4 来解释^[2]。图 4 中, H 为海水深度, R 为距离, Ω 为投射

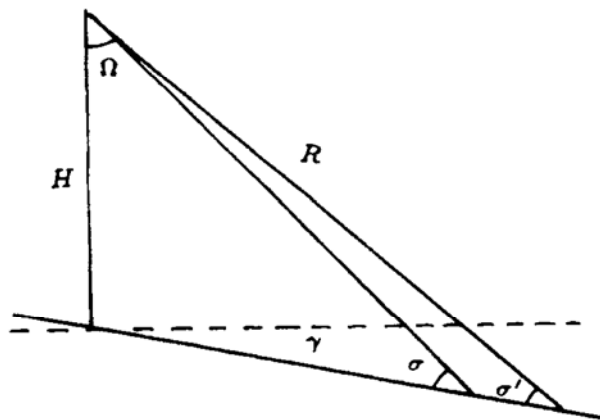


图 4 海底混响强度与散射体在空间位置的关系

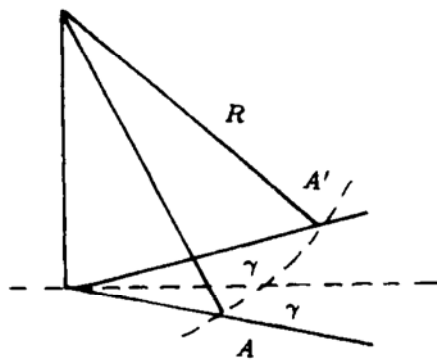


图 5 上翘海底与下倾海底混响强度比较

角, σ 为掠射角, γ 为海底倾斜角。在接收点 O 收到的海底混响强度 I_r 可以用式 (7) 求出。

$$I_r = \frac{I_i}{R^4} \cdot 10^{-2\beta R} \cdot R\Omega \cdot \frac{C\tau}{2} \cdot \frac{\alpha}{\cos \sigma} \left(\frac{H}{R}\right)^2 \cos^2 \gamma \quad (7)$$

式 (7) 中, I_i 为发射声强, τ 为发射信号宽度, α 为反向散射系数, β 为吸收系数。式 (7) 经过简化与合并后得

$$I_r \propto \frac{H^2 \cos^2 \gamma}{R^4} \cdot \frac{10^{-2\beta R}}{\sqrt{R^2 - H^2 \cos^2 \gamma}} \quad (8)$$

再转化为混响强度与时间的关系有

$$I_r \propto \frac{1}{t^\alpha} \cdot 10^{-\beta t} \quad (9)$$

反向散射强度有一定的方向性，在不同的海区方向性也不相同，因此 α 值应根据所模拟的海区选择，一般可以在 $3 \sim 5$ 之间选取，极端情况可以在 $3 \sim 6$ 之间选取^[3]。海底地形为上翘地形时，式 (9) 同样是适用的，这是因为 $\sin(90^\circ \pm \gamma)$ 具有相同的值，如图 5 所示。

综上所述，可以得出海底混响仿真的工程实现模型如下：

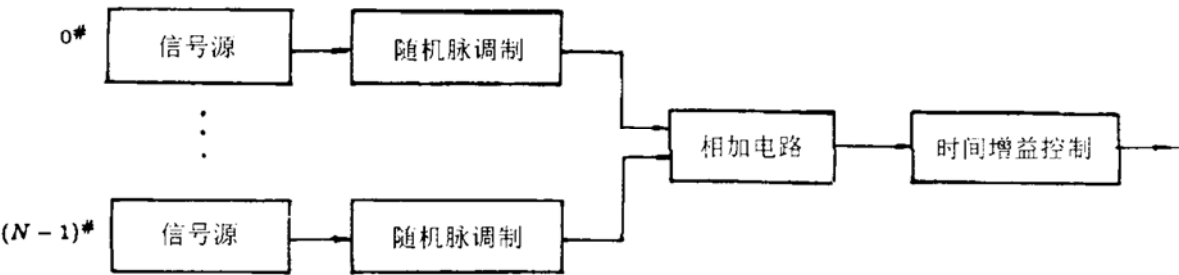


图 6 海底混响仿真工程实现模型

2 多通道海底混响模拟器

设在混响持续时间内任意时刻有贡献的散射体的最大个数为 N ，通过对海底混响二阶矩（三阶矩）的反推算可以确定大体上有

$$7 \leq N \leq 30$$

(10)

主动声呐接收基阵指向角较窄时， N 值可以选得小一些。工程实现时选为 18。由于海底混响具有很强的相干性^[4]，可以用同一个仿真信号通过相移矩阵调制来模拟接收基阵各个基元的输出。模拟器方框图见图 7。

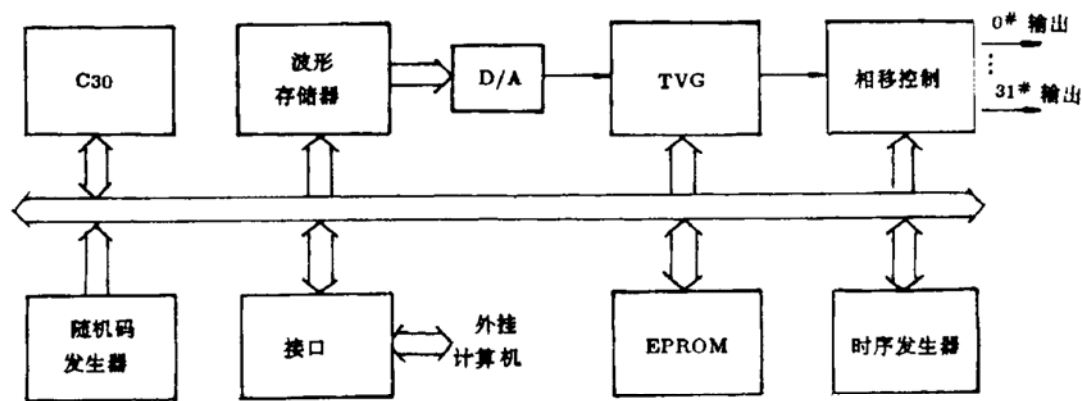


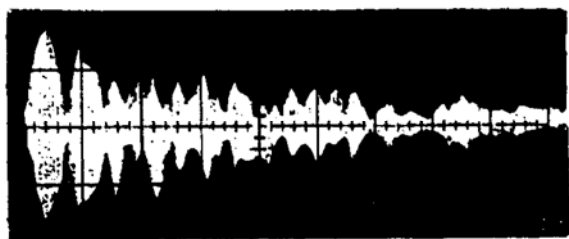
图 7 多通道海底混响模拟器方框图

随机 CW 脉冲序列由 C30 通过软件产生。由于 C30 的运算速度高，一般都可以在一个工作周期内实时完成。随机量的选取系根据随机码发生器输出的随机数确定，信号的迭加过程也是在 C30 由软件完成，并送至波形存贮器，经过 D/A 变换后，由时间增益控制电路 (TVG) 根据式 (9) 对海底混响的平均强度进行控制，最终经过相移矩阵调制后送出 32 路海底混响模拟信号。相移调制的依据是各基元与海底的相对位置，易知在软件控制下，不断地改变相移量，可以产生虚拟的

海底地形。如果信号的形式为主动目标的回波,即可以作为目标模拟器使用,不但可以产生多个目标,还可以模拟目标的运动轨迹。此外,还可以作为相控/束控信号源使用。EPROM 内装入的是系统的应用与管理程序,系统可以独立工作,也可以通过接口在外挂计算机的控制下工作。

3 实验结果

基于上述模型实现的多通道海底混响模拟器在实验室使用和湖上试验过程中均获得令人满意的效果。海底混响是一种随机信号,因此,海底混响仿真信号的分析一般采用统计的方法。将仿真信号的统计分析结果与实测海底混响信号进行比较,可以评判模拟器的仿真效果。图 8 至图 12 分别是海底混响仿真信号以及实测海底混响的波形图、概率密度函数以及自相关函数等。图中实线为理论值,圆圈是测量值,竖线代表测量值的跳动范围,实测海底混响信号的有关图形均选自文献 [5]。可以看出两者有很好的一致性,说明模拟器输出的海底混响仿真信号有很好的仿真效果。图 12 是海底混响信号经过波束形成器处理后得到的波束序列图,可以在接收基阵开角范围内任意方向上同时形成多个波束。

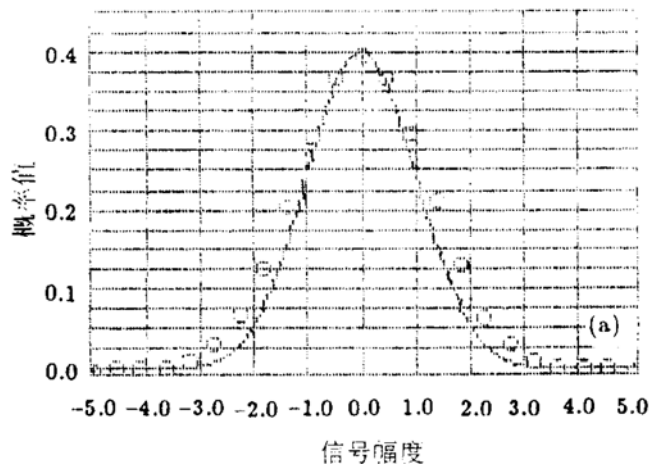


(a)

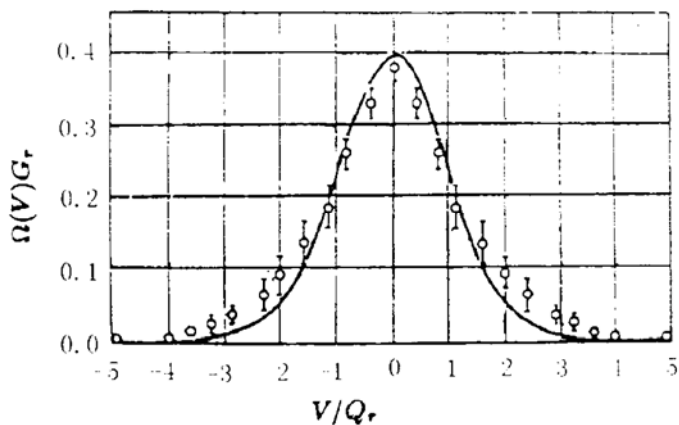


(b)

图 8 海底混响信号波形图 (a. 仿真信号 b. 实测信号 (下同))

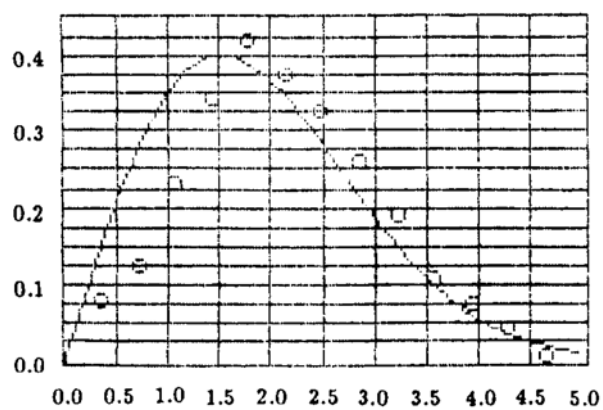


(a)

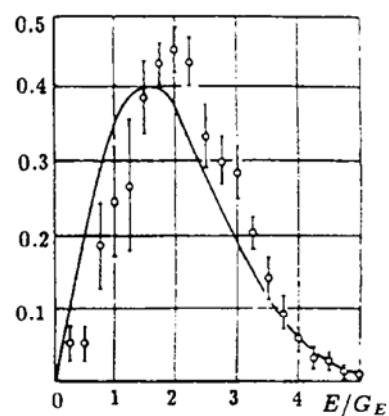


(b)

图 9 海底混响信号瞬时值的概率密度函数

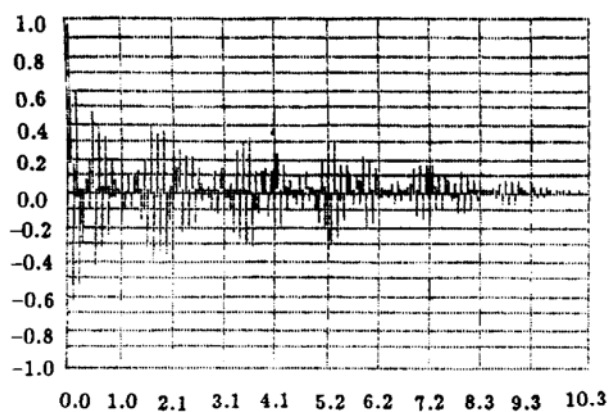


(a)

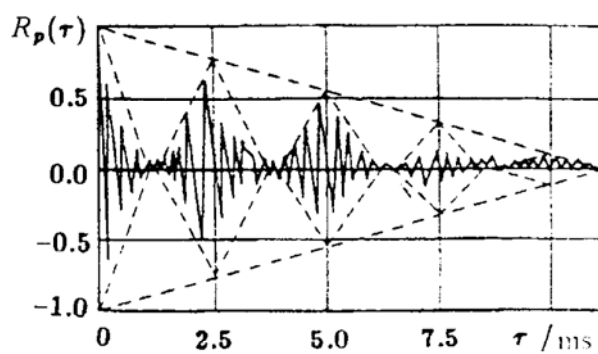


(b)

图 10 海底混响包络值的概率密度函数



(a)



(b)

图 11 海底混响瞬时值的自相关曲线

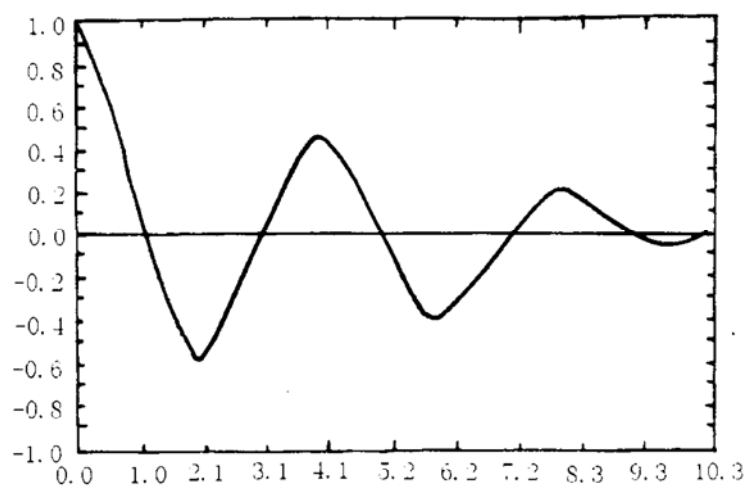
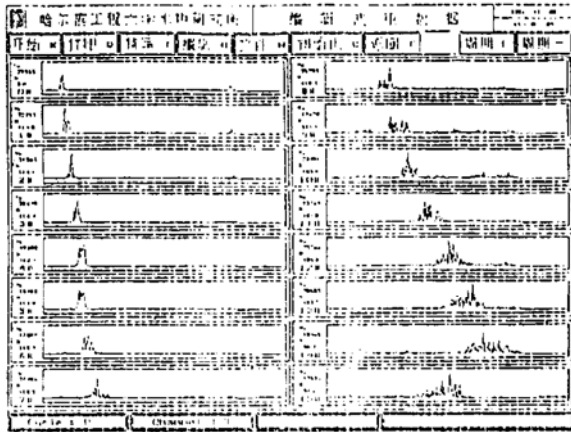
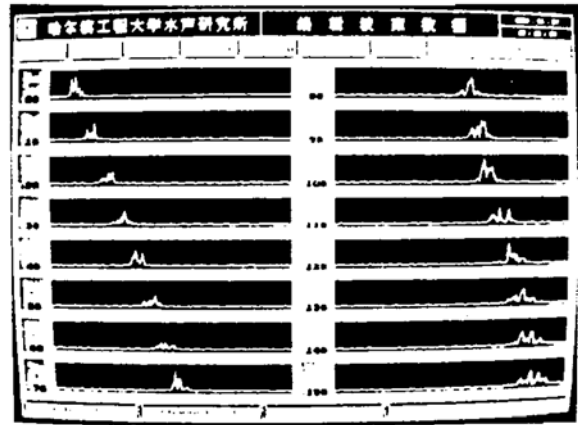


图 12 海底混响包络值的自相关曲线



(a)



(b)

图 13 海底混响仿真信号经波束形成后的波束序列图

4 结论

本文提出一种新颖的模拟海底混响产生物理过程的工程实现模型。该模型易于实现,且有较好的仿真效果,具有实际应用价值。研究过程中开发的“空-时”转换技术对于简化海底混响模拟器的电路起了很大的作用。基于该模型实现的海底混响模拟器具有功能强、柔软性好的特点,可以被应用于各相关领域。混响持续时间内有贡献散射体的个数可以根据需要相应增加,有可能进一步改善仿真效果。但是系统运算的时间也要相应增加,将影响到模拟器的实时工作性能。此外,散射体个数增加后随机数发生器送出的随机码的位数也要增加,进一步增加硬件电路。模拟器实现过程中,作了海底底质是均匀、缓变的假设,故反向散射波的幅度在同一个周期内都取相同的量级。此外,忽略了海底混响的多卜勒频移。反向散射波幅度的随机特性以及多卜勒频移仿真都可以通过软件实现,但是这同样会使运算时间加长,需要在实际应用时加以权衡。

参 考 文 献

- 1 Paul C Etter. Underwater Acoustic Modeling Principles, Techniques and Applications. Elsevier Applied Science, London and New York, 1991
- 2 杨士莪. 条带测深仪接收信号分析. 哈尔滨工程大学学报, 1995
- 3 СУХАРЕВСКИЙ И М. ТЕОРИЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ МОРЯ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ РАССЕЯНИЕМ ЗВУКА ДОКЛАДЫ. АН СССР, 1947, 55(9): 825—828
- 4 惠俊英. 水下声信道. 国防工业出版社, 1991
- 5 ОЛЬШЕВСКИЙ И В. В. СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОРСКОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ. ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА, МОСКВА: 1996
- 6 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1993
- 7 李启虎. 声呐信号处理引论. 北京: 海洋出版社, 1985