

文章编号: 1001- 2486(2010) 02- 0141- 05

收发合置情况下海底混响仿真*

郭熙业, 苏绍 , 王跃科, 陈建云

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了实现收发合置情况下海底混响时间序列仿真, 提出了一种混合模型方法。该方法将点散射模型方法与单元散射模型方法混合使用, 既能够克服单元散射模型方法中高斯分布假设带来的计算误差, 又能够克服点散射模型方法计算复杂的问题。针对窄带发射信号, 为了便于计算, 设计了一种适用于任意采样率的基于复包络的混响信号仿真方法。最后, 通过仿真试验证实了仿真方法的有效性。

关键词: 海底混响; 混合模型; 收发合置

中图分类号: TB566 **文献标识码:** A

Research on Simulating Seafloor Reverberation in the Case of Monostatic

GUO Xi-ye, SU Shao-jing, WANG Yue-ke, CHEN Jian-yun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to simulate seafloor reverberation time series in the case of monostatic, the mixed model method is presented, using the point-scatterer model method and the patch-scatterer model method alternately. This method can not only overcome computational errors caused by the Gaussian distribution assumption in the patch-scatterer model method, but also decrease computational complexities of the point-scatterer model method. In order to simulate narrowband reverberation time series easily, the simulation method designed based on simulating reverberation complex envelop, which is feasible for any sampling frequency. Finally, the validity of the simulation method is verified by the simulation test.

Key words: seafloor reverberation; mixed model; monostatic

在浅海中, 海底混响成为主动声呐工作中的主要干扰源, 因此, 有必要在实验情况下仿真混响信号以测试主动声呐的工作性能。传统的海底混响仿真方法包括点散射模型方法和单元散射模型方法^[1], 点散射模型方法^[2]将混响信号建立为点散射体回波的叠加结果模型, 物理意义清晰, 计算准确, 但计算量随着散射体数量增加而增大。单元散射模型方法^[3,5]则认为混响信号由散射单元回波叠加而成, 散射单元内包含的大量散射体使得散射单元回波信号满足复高斯分布, 与点散射模型方法相比, 由于避免了逐一计算散射单元内点散射体回波而降低了计算复杂度, 该方法也因此被广泛用于混响仿真。然而, 当散射单元内散射体数量较少时, 复高斯分布假设不再成立, 计算误差也随之产生。

为克服上述点散射模型方法与单元散射模型方法中存在的问题, 提出了一种混合模型方法。针对窄带发射信号情况, 仿真方法基于混响复包络实现。最后, 将上述方法用于收发合置情况下仿真混响信号。

1 混合模型方法

对混响过程做出如下假设: (1) 收发合置声呐位置固定; (2) 声波在介质中沿直线传播; (3) 忽略二次散射; (4) 发射信号为窄带信号。那么, 混响信号建模为

* 收稿日期: 2009- 10- 24

基金项目: 国防科技大学博士基金资助项目

作者简介: 郭熙业(1981-), 男, 博士生。

$$R(t) = \mathcal{A} \left[\sum_{i=1}^{N(t)} S(r_i, \varphi_i) f^2(d(r_i, \varphi_i)) B_{TR}(r_i, \varphi_i) x^+(t - \tau(r_i, \varphi_i)) e^{j\phi_i} \right] \quad (1)$$

式中, (r_i, φ_i) 为第 i 个散射体的坐标向量, r_i 为距离坐标, φ_i 为方位角坐标, S 为散射项, f 为传播项, d 为散射体与声呐的距离, B_{TR} 为合置声呐的波束图样, τ 为双程传播时延, $x^+(t)$ 为发射信号 $x(t)$ 的解析信号, ϕ_i 为散射过程中的随机相位扰动, ϕ_i 在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布。

模型(1)的直观计算方法是将散射体坐标向量直接代入得出结果,这实际上就是点散射模型计算方法。显然,随着 $N(t)$ 增加,计算量显著增加。注意到(1)式所代表的混响信号数值模型具有离散序列卷积的特征,其中,参与卷积计算的一部分是 $x^+(t)$,而另一部分由 $S^2 B_{TR} e^{j\phi}$ 组成。根据这一特征,考虑将模型(1)按照时域卷积结构计算。

设定周期 T 作为卷积计算的步长。如图1所示,收发合置情况下,周期 T 对应的散射区域为扇环形,即扇环形内环上散射体对应的双向传播时延与扇环形外环上散射体对应的双向传播时延之差为 T 。为了讨论方便,称这一扇环形区域为“采样单元”。采样单元在方位角方向上受到波束图样限制,在距离方向上则受到 T 限制。通常情况下,(1)中的 S, f, B_{TR} 相对于 $x^+(t)$ 表现出慢起伏特性,而当 T 足够小,以至于 $x^+(t)$ 在采样单元内也表现出慢起伏特性,那么,模型(1)可表示为

$$R(t) \approx \mathcal{A} \left[\sum_{k=1}^{N_s} I(kT) x^+(t - kT) \right] \quad (2)$$

式中, $I(kT)$ 表示第 k 个采样单元内散射体关于 $S^2 B_{TR} e^{j\phi}$ 的共同作用结果,当采样单元内散射体数量足够多,以至于中心极限定理成立,那么, $I(kT)$ 服从复高斯分布:

$$I(kT) = \sqrt{\frac{N_a(kT)}{2}} S(r_{\pm}(kT)) f^2(d(r_{\pm}(kT))) [Normal(0, 1) + jNormal(0, 1)] \quad (3)$$

式中, N_a 表示采样单元内散射体数量, r_{\pm} 表示采样单元内环或外环对应的距离方向坐标值, $Normal(0, 1)$ 表示标准正态分布。(3)式中忽略了方位角的影响,而假设混响过程各向同性,后面的讨论中也将采用这一假设条件。对于散射体数量较少的情况,中心极限定理不再成立,对 $I(kT)$ 直接展开求和计算:

$$I(kT) = \sum_{i=1}^{N_a(kT)} S(r_i) f^2(d(r_i)) e^{j\phi_i} \quad (4)$$

设置散射体数量阈值 N_g , 当采样单元内散射体数量 $N_a > N_g$, $I(kT)$ 按照(3)式计算,这属于单元散射模型方法,而当采样单元内散射体数量 $N_a \leq N_g$, $I(kT)$ 按照(4)式计算,这属于点散射模型方法。通过设置阈值,实现了点散射模型方法与单元散射模型方法的无缝切换,称这种方法为混合模型方法。在得到 $I(kT)$ 后,利用(2)式计算混响信号,其中,采样单元数量 $N_s = T_x/T$, T_x 为发射信号时长。

计算(3),(4)的关键在于获得采样单元内散射体数量 N_a 以及散射体坐标向量 r 。在海底底质未知的情况下,一种合理的假设是散射体出现在海底任意位置的概率相同,根据这种假设,散射体数量服从泊松分布,其概率密度函数为

$$p(N_a) = \frac{(A_s \rho)^{N_a} e^{-A_s \rho}}{N_a!} \quad (5)$$

式中, A_s 为采样单元面积, ρ 为单位面积内散射体的平均数量。按照泊松分布得到散射体数量 N_a 后,则在采样单元距离方向上的被限定区域 $[r_-, r_+]$ 内按照均匀分布生成 N_a 个向量 $r = [r_1, r_2, \dots, r_{N_a}]$ 。

2 基于复包络的窄带混响仿真方法

由于发射信号为窄带信号,混响信号模型可进一步表示为

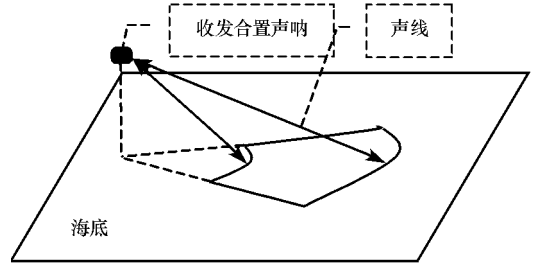


图1 采样单元分布情况
Fig. 1 Sampling patch distributions

$$R(t) = \mathcal{R} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{N(t)} S(r_i) f^2(d(r_i)) x(t - \tau(r_i)) e^{j[\omega_0 \tau(r_i) + \phi]} \right] e^{-j\omega_0 t} \right\} \quad (6)$$

式中, $x(t)$ 为发射信号复包络, ω_0 为发射信号载波中心频率。(6)式表明, 可首先计算混响复包络, 再通过数字上变频得到混响信号。其中, 混响复包络为

$$\begin{aligned} R(t) &= \sum_{i=1}^{N(t)} S(r_i) f^2(d(r_i)) x(t - \tau(r_i)) e^{j[\omega_0 \tau(r_i) + \phi]} \\ &= \sum_{k=1}^{N_s} I(kT_e) x(t - kT_e) \end{aligned} \quad (7)$$

对于式(7)的计算同样考虑采用式(1)的计算方法。由于信号项由发射信号变为信号复包络, 相应地获得慢起伏近似所需的采样周期也增加为 T_e , 采样周期的显著增加势必带来计算量的下降, 然而, 随着采样周期增加, $e^{j\omega_0 \tau}$ 在采样周期内不再具有慢起伏特性, 而必须作为随机变量处理。假设 τ 与 ϕ 的分布相互独立, 那么, 对于均匀分布于任意采样周期间隔 $[t_-, t_+]$ 内的 τ 以及均匀分布于 $[0, 2\pi]$ 内的 ϕ 所组成的随机变量 $e^{j[\omega_0 \tau(r) + \phi]}$ 有

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\cos(\omega_0 \tau + \phi)] + j\mathbb{E}[\sin(\omega_0 \tau + \phi)] &= \mathbb{E}[\cos(\omega_0 \tau) \cos(\phi) - \sin(\omega_0 \tau) \sin(\phi)] \\ &+ j\mathbb{E}[\sin(\omega_0 \tau) \cos(\phi) + \sin(\phi) \cos(\omega_0 \tau)] = 0 + j0 = \mathbb{E}[\cos(\phi)] + j\mathbb{E}[\sin(\phi)] \quad (8) \\ \mathbb{D}[\cos(\omega_0 \tau + \phi)] + j\mathbb{D}[\sin(\omega_0 \tau + \phi)] &= \mathbb{E}[\cos^2(\omega_0 \tau + \phi)] + j\mathbb{E}[\sin^2(\omega_0 \tau + \phi)] \\ &= \mathbb{E}[1/2 + (1/2) \cos 2(\omega_0 \tau + \phi)] + j\mathbb{E}[1/2 - (1/2) \cos 2(\omega_0 \tau + \phi)] = 1/2 + j1/2 \\ &= \mathbb{D}[\cos \phi] + j\mathbb{D}[\sin \phi] \quad (9) \end{aligned}$$

(8), (9)式表明在 τ 与 ϕ 独立分布情况下, $e^{j[\omega_0 \tau + \phi]}$ 实部与虚部的期望和方差分别跟 $e^{j\phi}$ 实部与虚部的期望和方差相一致, 而实部与虚部不相关, 高斯分布情况下则相互独立。那么, 根据中心极限定理, (7)式中的 $I(kT_e)$ 在散射体数量大于阈值情况下仍然按照(3)式计算, 只是其中的采样周期由 T_e 替换, 当然, T_e 的选取应该满足采样定理, 并且为了使复包络具有显著的慢起伏特性, T_e 越小越好。

当散射体数量小于阈值, 对 $I(kT_e)$ 直接展开求和计算:

$$I(kT_e) = \sum_{i=1}^{N_a(kT_e)} S(r_i) f^2(d(r_i)) e^{j[\omega_0 \tau(r_i) + \phi]} \quad (10)$$

3 仿真实现

针对收发合置情况, 对窄带混响信号进行仿真。仿真过程如下:

1) 根据声呐与海底散射体的几何关系, 确定 kT_e 时刻的采样单元, 包括采样单元边界及面积; 2) 根据(5)式所表示的泊松分布, 生成散射体数量 N_a ; 3) 当 $N_a > N_g$, 利用式(3)计算 $I(kT_e)$; 4) 当 $N_a \leq N_g$, 在采样单元边界内按照均匀分布生成散射体坐标向量 r ; 5) 将坐标向量 r 代入式(10)计算 $I(kT_e)$; 6) 利用式(7)计算混响复包络, 经过数字上变频后得到仿真混响信号。

按照 Lambert 定律, 散射项 S 为

$$S = \sqrt{10^{\frac{\mu}{10}} \sin(\alpha_i) \sin(\alpha_o)} \quad (11)$$

式中, μ 表示垂直散射系数, α_i 表示入射掠射角, α_o 表示散射掠射角, 在收发合置情况下 $\alpha = \alpha_o$ 。

传播项 f 为

$$f(d) = \frac{1}{d} 10^{-\beta d} \quad (12)$$

式中, β 表示海水吸收系数。

仿真条件如下: 海水深度 100m, 合置声呐深度 50m, 声速 1500m/s, 垂直散射系数 $\mu = -27$ dB, 海水吸收系数 $\beta = 0$, 声呐方位角束宽 $\varphi = \pi/6$, 选取散射体数量阈值的经验值 $N_g = 10$ 。发射信号采用线性调频信号, 时长 50ms, 载波中心频率为 4kHz。针对不同散射体密度 ρ 以及不同发射信号带宽 $\Delta\omega$ 情况, 分别仿真了“采样单元”内散射体数量, 混响信号瞬时值及其功率谱。混响信号的采样时间从 80ms 开始至

230ms 结束,混响复包络的采样频率为 2kHz,混响信号的采样频率为 20kHz。

图2 表明: 1) 散射体数量随采样单元序号增加而增多,这是由采样单元面积增大而引起的。2) 在低密度情况下,小序号的采样单元内散射体数量普遍分布在阈值 N_g 以下,随着序号增加,散射体数量逐渐增多至“阈值线”以上;在高密度情况下,从开始采样单元内散射体数量便大于阈值,并且随着序号增加,散射体数量随之增多。上述现象也证明了将点散射模型方法与单元散射模型方法混合使用的必要性。3) 混响信号功率谱宽度与发射信号带宽相当,并且伴随着发射信号带宽增加而增加。这一特性也从一个侧面反映了仿真结果的合理性。

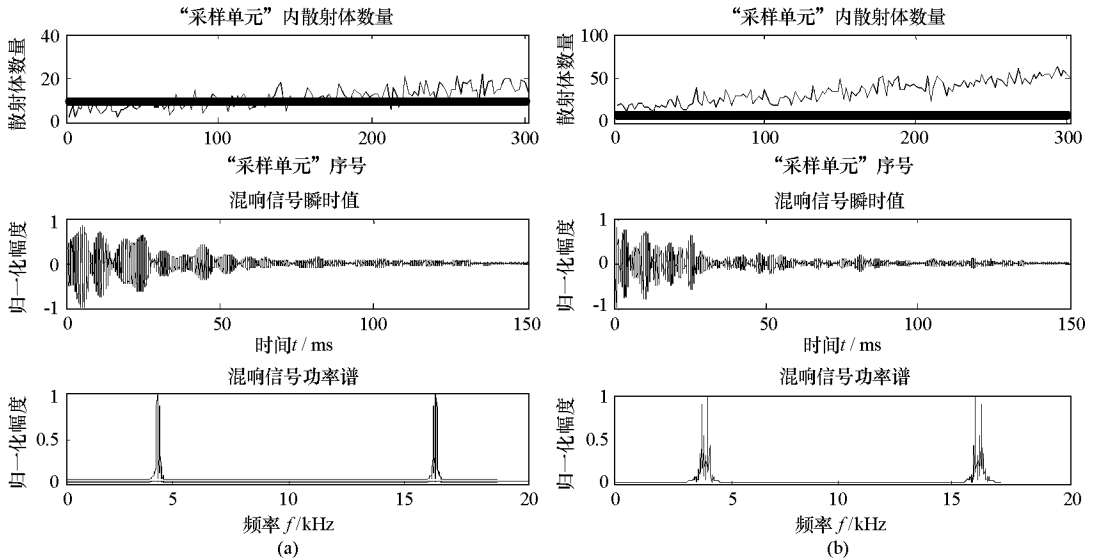


图2 (a) $\Delta\omega = 200\text{Hz}$, $\rho = 0.25$ 情况下仿真结果; (b) $\Delta\omega = 400\text{Hz}$, $\rho = 0.8$ 情况下仿真结果

Fig. 2 (a) Simulation results ($\Delta\omega = 200\text{Hz}$, $\rho = 0.25$); (b) Simulation results($\Delta\omega = 400\text{Hz}$, $\rho = 0.8$)

采用蒙特卡罗方法仿真了 $\rho = 0.25$ 情况下 5ms 处混响瞬时值的概率密度分布,如图3中(a)图所示,而(b)图显示了 $\rho = 0.8$ 情况下 5ms 处混响瞬时值的概率密度分布。在 $\rho = 0.25$ 情况下,仿真结果明显偏离高斯分布,如果仍然使用单元散射模型方法,则会得出高斯分布的错误结果,而此时混合模型方法运行在点散射模型方法,使得运算结果更加合理。在 $\rho = 0.8$ 情况下,仿真结果与理论高斯分布吻合较好,此时混合模型方法已过渡到运行单元散射模型方法,相比点散射模型方法的逐点累加,运算过程更加高效。仿真试验表明,与单独使用点散射模型方法或单元散射模型方法相比,混合模型方法更加优越。

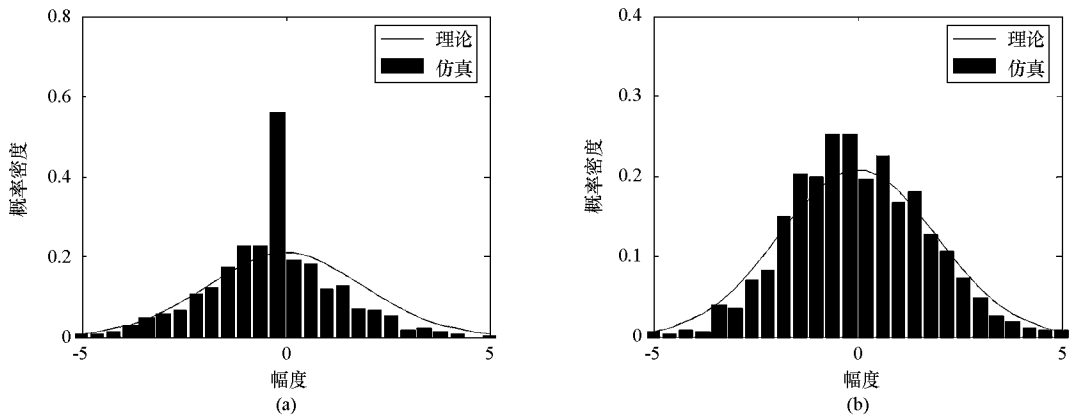


图3 (a) $\rho = 0.25$ 情况下混响信号瞬时值概率密度; (b) $\rho = 0.8$ 情况下混响信号瞬时值概率密度

Fig. 3 (a) The probability density of instantaneous reverberation($\rho = 0.25$);

(b) The probability density of instantaneous reverberation($\rho = 0.8$)

4 结论

文中提出了一种混合模型时域仿真方法,该方法通过设置散射体数量阈值实现了点散射模型方法与单元散射模型方法之间的无缝切换,既克服了单元散射模型方法在散射体数量较少情况下高斯分布假设带来的计算误差,又克服了点散射模型方法在散射体数量较多情况下计算复杂的问题。针对发射信号为窄带信号的情况,为降低计算量,设计了先计算混响包络进而得到混响信号的方法,适用于满足采样定理的任意采样率。最后,针对不同带宽、不同散射体密度情况仿真了混响信号,仿真结果与理论混响在频谱特性以及统计特性方面的一致性反映了仿真结果的合理性,针对统计特性的仿真试验则验证了混合模型方法的优越性。

参考文献:

- [1] Abraham D A, Lyons A P. Simulation of Non-Rayleigh Reverberation and Clutter[J]. IEEE J. Oceanic Eng., 2004, 29(2): 347-362.
- [2] 徐新盛,张燕,李海森,等.海底混响仿真研究[J].声学学报,1998,23(2):141-148.
- [3] 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.
- [4] Abraham D A, Lyons A P. Novel Physical Interpretations of K-distributed Reverberation[J]. IEEE J. Oceanic Eng., 2002,27(4):800-813.
- [5] LePage K D. Statistics of Broad-band Bottom Reverberation Predictions in Shallow-water Waveguides[J]. IEEE J. Oceanic Eng., 2004, 29(2): 330-346.
- [6] 杨俊岭,黄晓斌,万建伟.基于高斯序列乘积和的相干非高斯分布杂波模拟新方法[J].国防科技大学学报,2006,28(5):58-62.

(上接第72页)

参考文献:

- [1] 刘福才,梁晓明. H non 混沌系统的广义预测控制与同步快速算法[J].物理学报,2005,54(10):4584-4589.
- [2] 李丽香,彭海朋,卢辉斌,等. H non 混沌系统的追踪控制与同步[J].物理学报,2001,50(4):629-632.
- [3] 王兴元,武相军.不确定 Chen 系统的参数辨识与自适应同步[J].物理学报,2006,55(2):605-609.
- [4] 贺明峰,穆云明,赵立中.基于参数自适应控制的混沌同步[J].物理学报,2000,49(5):830-832.
- [5] 关新平,彭海朋,李丽香,等. Lorenz 混沌系统的参数辨识与控制[J].物理学报,2001,50(1):26-29.
- [6] 戴栋,马西奎,李富才,等.一种基于遗传算法的混沌系统参数估计方法[J].物理学报,2002,51(1):2459-2462.
- [7] 李丽香,彭海朋,杨义先,等.基于混沌蚂蚁群算法的 Lorenz 混沌系统的参数估计[J].物理学报,2007,56(1):51-55.
- [8] 黄思训,伍荣生.大气科学中的数学物理问题[M].北京:气象出版社,2001:411-412.
- [9] Gilks W R, Richardson S, Spiegelhalter D J. Markov Chain Monte Carlo in Practice [M]. London: Chapman & Hall, 1996.
- [10] 张金槐.多层验前正态总体动态参数的 Bayes 融合估计[J].国防科技大学学报,2003,25(4):97-101.
- [11] 李鹏波,谢红卫,张金槐.考虑验前信息可信度时的 Bayes 估计[J].国防科技大学学报,2003,25(4):107-110.
- [12] 王同权,张若棋,沈永平,等.高能离子在材料中输运的蒙特卡罗模拟[J].国防科技大学学报,2001,23(1):105-109.
- [13] 王同权,张树发,王尚武,等.电子在材料中输运的蒙特卡罗模拟[J].国防科技大学学报,2000,22(11):81-84.
- [14] Smith A F M, Robert G O. Bayesian Computation Via the Gibbs Sampler and Related Markov Chain Monte Carlo Methods[J]. Journal of Royal Statistical Society Series B, 1993, 55: 3-23.
- [15] Tierney L. Markov-chains for Exploring Posterior Distributions[J]. Annals of Statistics, 1994,22: 1701-1762.
- [16] Haario H, Saksman E, Tamminen J. An Adaptive Metropolis Algorithm[J]. Bernoulli, 2001, 7(2): 223-242.