

海洋混响的统计特性

海洋混响的统计特性

〔苏〕B. B. 奥里雪夫斯基 著

科学出版社

海洋混响的统计特性

[苏] B. B. 奥里雪夫斯基 著

罗耀杰 赵 清 武延祥 译

科学出版社

内 容 简 介

海洋中的混响是研究和设计水声设备时经常遇到的问题,同时也是难以解决的问题。因此,对于混响特性的研究已逐渐引起人们的重视。本书主要阐述混响的一般特性、分析方法、混响的概率分布、相关分析、频谱分析等。对混响的时-空相关特性、不确定性函数等也作了介绍。

本书可供从事水声物理及工程的技术人员,高等学校有关专业的师生参考。

В. В. Ольшевский
СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МОРСКОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Издательство «Наука»

Москва, 1966

海洋混响的统计特性

〔苏〕В. В. 奥里雪夫斯基 著

罗耀杰 赵 清 武延祥 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

北京印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国新华书店经售

*

1977 年 1 月第 1 版 开本: 787×1092 1/32

1977 年 11 月第一次印刷 印张: 7 1/4

印数: 0001—1,650 字数: 163,000

统一书号: 13031·643

本社书号: 837·43—5

定价: 0.75 元

译者的话

海洋混响是水声学的基本物理现象之一。对主动式水声设备,它是一种强的干扰,因而直接影响设备的工作性能。

为了提高抗干扰性能,将统计理论应用于水声探测系统已逐渐引起人们的重视。因此,研究海洋混响的统计特性就显得特别重要。

近十多年来,国外发表了大量研究海洋混响(包括统计特性)的文章,但是,这些文章大多分散于各种杂志上,理论不够系统,而且缺少统一的处理方法。本书对混响的统计特性作了较为系统的分析。书中采用了统一的处理方法,着重分析了海洋混响的概率分布、相关特性及统计谱等,同时提供了一些实验数据和曲线。因此,本书对具有数理统计知识的水声工作者有一定的参考价值。遵照毛主席关于“洋为中用”的教导,我们将其译成中文。

值得指出的是,本书着重在理论分析,即使有一些实验资料也不够充分,同时也未能充分论述这些理论在工程上的应用。这些都是本书不足之处。

由于我们的水平有限,译文中难免有缺点错误之处,希望广大读者批评指正。

目 录

译者的话

第一章 混响的一般特性及其解法

§ 1 引 言	1
§ 2 海洋混响及其与其它物理现象的相似	2
§ 3 混响的能量特性	5
§ 4 混响作为随机过程的模型	19
§ 5 一维随机扰动迭加定理	27
§ 6 二维随机扰动迭加定理及其若干结论	33
§ 7 广义的二维随机扰动迭加定理	41
§ 8 概率密度的级数表示	42
§ 9 可平稳化的随机过程	46

第二章 发射信号及其特性

§ 10 信号的类型	51
§ 11 信号的有效宽度和频谱宽度	54
§ 12 调制相关函数	61

第三章 混响信号的概率分布

§ 13 瞬时值的极限分布	67
§ 14 元散射信号有限时的分布	73
§ 15 峰态系数	75
§ 16 混响的正交分量和希尔伯特变换	78
§ 17 混响瞬时相位的分布	82
§ 18 包络分布	85
§ 19 混响过程合成时的分布	94

第四章 混响的相关分析

§ 20 引 言	100
----------------	-----

§ 21	瞬时值相关函数的一般关系式	101
§ 22	正弦填充和不同形状包络的脉冲的发射	103
§ 23	宽带信号的发射	109
§ 24	包络起伏相关特性的一般关系式	115
§ 25	不同形式发射信号时的包络起伏的相关性	119
§ 26	瞬时相位的相关性	125
§ 27	空间相关性	126
§ 28	来自不同方向的混响信号的相关性	137
§ 29	频率-时间联合相关性	140
§ 30	散射体运动时的相关性	142
§ 31	基阵位移时的相关性	147
第五章 混响的频谱分析		
§ 32	引 言	152
§ 33	混响频谱的一般关系式	153
§ 34	发射不同类型信号时的混响频谱	156
§ 35	包络起伏频谱的一般关系式	164
§ 36	发射不同类型信号时的包络起伏频谱	165
§ 37	散射体运动和基阵位移时的混响频谱	168
第六章 分析混响信号的若干补充问题		
§ 38	空间-时间联合相关性	173
§ 39	不确定性函数和不确定性图	177
§ 40	混响信号的相差起伏	181
§ 41	混响通过线性系统	188
§ 42	混响及其包络的微分	195
§ 43	混响信号的平稳性及混响作为非平稳过程的特点	200
§ 44	连续发射时的混响	205
§ 45	海洋测量装置及其使用方法	213
符号一览表		
参考文献		

第一章 混响的一般特性及其解法

§ 1 引言

对各种现象(包括水声现象)的概率分析方法是极其重要的,原因有如下两个:

第一,这种方法能够研究过程的细微结构和弄清现象的物理特性,能够描述平均稳定规律和确定(在有实验数据时)所取模型与产生现象的实际原因的一致程度;

第二,在各种应用中统计处理方法常常是最有效的,例如,研究信息处理方法和分析随机过程对各种工程装置的影响,都要求首先了解输入信号的统计特性,因而很自然地把随机函数理论用于研究海洋混响特性。

混响信号的分析是以一定现象模型为基础的。根据这一模型,能够计算混响概率及其包络和相位的一维、有时是多维的分布。譬如,对这些特性中某些特性的实测,或者可以证实所取的模型,或者可以使其含义更确切。同时,可以研究海洋介质中的散射性质,弄清散射体的物理特性和研究水声信息的统计处理方法。

Ю. М. 苏哈列夫斯基最先将混响作为随机过程进行了研究。他在1947年发表的一篇文献[23]中,对混响包络的起伏特性作了结论,并指出了声散射的某些特性,可以相当近似的把混响过程作为大量元散射信号之和进行研究。

苏联科学院声学所从1955年开始进行混响统计特性的理论研究和实验研究,即对各种调制发射信号的混响概率分

布、相关特性和能量谱进行研究。在文献[13—18]中介绍了主要在1960年以前完成的若干研究成果。

这一时期国外作者也发表了一系列研究混响各个方面的论著,例如,在文献[25]中有发射正弦填充矩形脉冲时的混响包络分布及其相关特性的资料,而且有混响信号频谱成分的分析结果。在文献[37]中有混响能量谱的若干资料。在文献[30,43]以及文献[41,42]的一部分中,研究了连续发射时的混响。

应当指出,在文献[27,37,41,42,53,55]中,根据水声探测过程的统计处理,分析了发射不同调幅信号和调频信号时混响的某些特性,并提出了减小水声探测时混响干扰影响的一般途径。在这方面文献[53]是很重要的。在该文献中用不确定性图分析混响的特性,其理论在有关无线电探测的某些论著中有了发展(例如,参看文献[3])。

在较晚的文献[31,35]中专门研究了以随机扰动之和表示的混响过程的统计特性。

当然,现有结果能够总结理论研究和实验研究积累的经验 and 利用统计处理方法以统一的观点研究混响的特性。

§ 2 海洋混响及其与其它物理现象的相似

声在海洋中传播时,由于介质的各种非均匀性及其界面的不平整性,产生部分散射。可能引起声散射的物体和非均匀性主要有如下一些:

- (1) 气泡;
- (2) 鱼,海洋动物,微生物;
- (3) 杂质;
- (4) 温度的非均匀性;
- (5) 海面的不平整性;

(6) 海底的不平整性和底质的非均匀性;

(7) 可能引起声速和水的密度跃变或起伏的其它非均匀性。

声信号发射后在接收点观测到的合成散射声场随时间变化的过程称为海洋混响。因此,混响的产生与信号在统计非均匀介质中的发射和传播有关。

遗憾的是,在研究海洋混响的许多情况下,不能精确指出声散射的具体原因,并按其形状、作用和特点对散射体进行分类。同时,混响常常与由几种非均匀性引起的联合散射有关,因而不可能把它归属于任何一种具体的散射。这在某种程度上增加了对混响信号的各种特性进行研究的困难。

但是,对散射体在海洋介质中的分布,它们的可能尺寸和声特性作一定的假设,则可以对混响的特性进行相当全面的研究,而不用详细地分析由所有可能类型的非均匀性引起的声散射。以具有随机参量的元散射信号之和表示的,作为随机过程的混响模型将在下面 § 4 中加以讨论。

在接收点混响可表示为随时间衰减的起伏过程,这时平均混响级在数秒钟内的变化可以达到 30—40 分贝,有时可能更大。图 1 所示为对数自动记录仪记录的混响级的实例,而图 2 所示为自动记录照相机拍得的波形图。这些记录表示混响级随时间的变化律及其包络的起伏特性。

凭听觉,混响信号是逐渐衰减的起伏回声(其起点与脉冲发射的瞬时一致)。

因此,从混响基本特性的研究中可以清楚地看出,这是非平稳的随机过程。

海洋混响与其它一些物理现象相当相似。首先应当指出,室内混响或所谓房屋对发射信号的回声。室内混响是墙壁和其它障碍物对声反射引起的,而且这时声可能有多次反射,

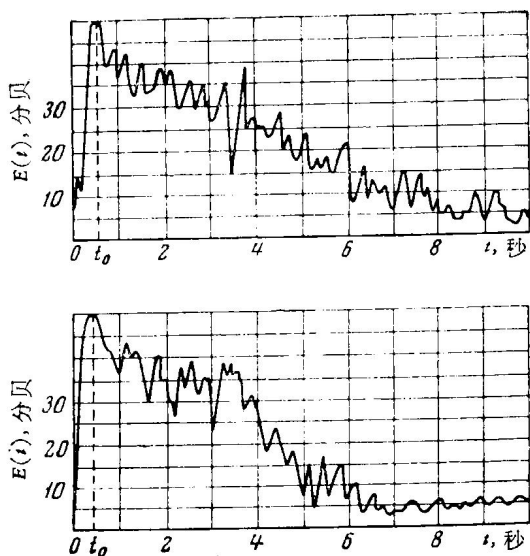


图 1 H-110 型自动记录仪记录的随时间变化的混响级。发射脉冲宽度为 300 毫秒，载频为 7 千赫，脉冲在瞬时 t_0 发射

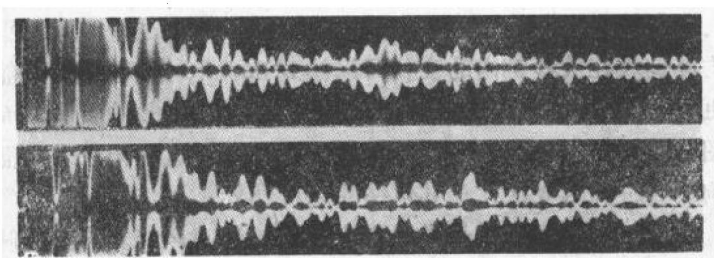


图 2 自动记录照相机拍得的混响波形图。发射脉冲宽度为 10 毫秒；载频为 25 千赫

所以在接收点可以观测到具有随机振幅和相位的元散射信号的和。

其次应当指出，虽然室内混响不同于海洋混响(介质的尺寸，信号级随时间衰减的原因等)，但是后者被称为混响，大

概是由于两种过程的物理模型相似,可能用同样的测声仪进行测量,以及收听时两类过程相似。

在无线电探测中,类似海洋混响的过程称为地物噪声或地物的杂乱反射[2,7,8]。这里指的是由植物,海面,雨点或雾滴,金属条,电离层的非均匀性等这样一些物体反射和散射的电磁波。因此,如同混响那样,地物噪声与电磁波在统计非均匀介质中的传播有关。

光在混浊介质中的散射现象也属于类似混响的一种现象。

除上面所述的现象外,从数学描述的观点来看,许多与波的散射无关的其它现象也与作为随机过程的混响相似。如同混响那样,某些类型的起伏过程也可以表示为随机扰动的和。例如,热噪声,电子仪表某些类型的噪声,特别是由散弹效应引起的噪声都属于这样的过程。在研究散弹噪声的特性时发展起来的概率方法,可以表述我们用来分析混响信号统计特性的许多随机扰动迭加定理[1,12,51]。

因此,一方面由于混响与其它物理现象很相似,可以利用在求解波散射问题和分析某些类型电起伏的应用中发展起来的随机过程理论的计算机,进行混响统计特性的研究;另一方面,混响作为水声现象的特点,使其分析方法具有相应的特点,并使其研究具有独立性,从而使统计概念在各种应用中得到发展。

§ 3 混响的能量特性

将能量处理方法应用于混响信号特性的研究,可以根据时间和发射信号、基阵及海洋介质的下列特性确定其平均强度:

- (1) 发射功率;

- (2) 信号宽度和形状;
- (3) 收-发基阵的指向性;
- (4) 声的吸收;
- (5) 海洋介质的散射特性。

混响的能量理论在文献[5,6,11,20—22,24,25,34]和许多其它文献中有相当充分的论述。所以我们只简要地、不作结论地研究这一理论的主要结果,对混响信号的非平稳性和与各类海洋介质的非均匀性相应的散射系数值给予了关注。

混响通常可分三类:

- (1) 体积混响——由海洋介质的非均匀性(例如,微生物,鱼,温度的非均匀性等)产生的声散射引起的;
- (2) 海面混响——由近海面层的气泡和波浪起伏的海面产生的声散射引起的;
- (3) 海底混响——由海底底质的非均匀性及其表面的不平整性产生的声散射引起的。

但是,从数学描述平均混响级随时间的衰减律的观点来看,这样分类是不完全恰当的。其中海面混响的规律对深水声散射层可能是正确的;海面和海底产生的声散射引起的混响有时可用相似的关系式描述等。因而最好将混响分为如下类型(参看文献[21,24]):

- (1) 体积混响——由无限空间内的非均匀性产生的声散射引起的;
- (2) 层的混响——由集中在层内的非均匀性产生的声散射引起的;
- (3) 介面混响——由两种介质分界面上产生的声散射引起的。

这样分类便于对体积混响,海面混响和海底混响进行数学描述,因为这些混响在某些条件下是上面指出的两种(有时

是三种)混响过程的线性组合,因此,对体积混响、海面混响和海底混响进行单独研究,实际证明是正确的,因为正是在这种分析中对平均混响级的衰减律进行了最充分的研究和分析,对混响作为时间过程的模型进行了测验,并将海洋介质中的声场与基阵接收的混响信号联系在一起。此外,由上面研究的混响过程的合成特性,还可以简单地说明在分析体积混响、海面混响和海底混响的总和时得到的部分结果,而不会损害研究的完整性。

在上述文献中研究的混响能量理论是近似的,其原因有如下几点:

(1) 这一理论未计及与声在海洋介质中的折射有关的传播特点,即假设声沿深度传播的平均速度为常数;

(2) 假设海洋介质在水平面内的散射特性是统计均匀的;

(3) 未计及二次散射。

此外,能量理论的适用范围取决于如下条件:

$$t \gg \delta_{0.5}, \quad (3.1)$$

式中 t ——瞬时; $\delta_{0.5}$ ——发射信号的有效宽度。

这就表示,能量理论可以描述所谓远距离混响。

还应指出,关于非均匀性散射特性的一些假设,可以作为计算平均混响级的基础,并将在 § 4 中结合其统计模型加以讨论。假设在海洋介质中散射体沿散射区范围的空间分布是统计独立的,并且是相当少的,因而在接收点上元散射信号是不相干迭加的。这样就能够假设,平均混响强度 $\langle F^2(t) \rangle^{(1)}$ 与半个散射区内的散射体平均数成正比或与 $\langle n_1(t) \rangle \delta_{0.5}$ 的值成正比。式中 $\langle n_1(t) \rangle$ 为单位时间内到达接收点的元散射信

1) 括号 $\langle \rangle$ 在这里和以后均表示所研究的随机函数按集合现实求统计平均。

号的平均数。应当指出, $\langle F^2(t) \rangle$ 和 $\langle n_1(t) \rangle$ 为时间函数, 因而这里可以按集合现实或具有相同平均散射条件的集合空间求平均。

现在研究确定散射体在海洋介质中具有不同分布时的平均混响强度的主要关系。

在上述假设条件下, 由无限空间内的非均匀性产生的声散射引起的平均混响强度有如下的关系式:

$$\langle F^2(t) \rangle = \frac{W_A k_0^2 \eta_0}{2 \pi c t^2} \cdot 10^{-0.1 \beta c t}, \quad (3.2)$$

式中 $\langle F^2(t) \rangle$ —— 平均强度 (瓦/厘米²); W_A —— 发射声功率 (瓦); $c = 1.5 \times 10^5$ 厘米/秒 —— 声速; t —— 瞬时 (秒); β —— 海洋中声的空间吸收系数 (分贝/公里)。它可以用如下的经验公式描述:

$$\beta = 0.036 f_0^{3/2}, \quad (3.3)$$

式中 f_0 —— 发射信号频谱的中心频率 (千赫);

$$k_0 = \frac{dW_p}{\langle F_1^2 \rangle dV}, \quad (3.4)$$

式中 k_0 —— 体积散射系数 (厘米⁻¹)。当入射波强度为 $\langle F_1^2 \rangle$ (瓦/厘米²) 时, 这一系数取决于到达散射空间的体积 dV (厘米³) 内的散射功率 dW_p (瓦)¹⁾; η_0 —— 取决于基阵指向性的系数, 其关系式为

1) 体积散射系数 k_0 的值等于 $\langle F_1^2 \rangle = 1$ 瓦/厘米² 时到达单位体积 (1 厘米³) 内的散射功率 (瓦)。有时 k_0 表示为

$$k_0 = \frac{4 \pi dW_p}{\langle F_1^2 \rangle dV}. \quad (3.4A)$$

因而体积散射系数与单位立体角有关。其中, 这样定义的 k_0 可用于分析海洋介质散射特性的实验数据 (例如, 参看文献 [34, 38])。

$$\eta_0 = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \varphi_n^2(\alpha, \theta) \varphi_n^2(\alpha, \theta) d\alpha \cos\theta d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \varphi_n^2(\alpha, \theta) d\alpha \cos\theta d\theta}, \quad (3.5)$$

式中 $\varphi_n(\alpha, \theta)$ 和 $\varphi_n(\alpha, \theta)$ —— 相应为辐射器和接收器基阵的归一化指向性。

为了说明上述关系式, 图 3 给出了所采用的坐标系。

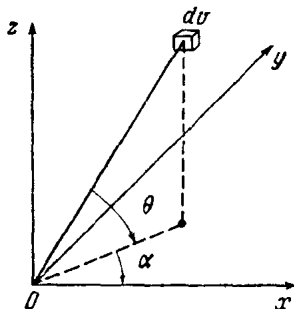


图 3 计算平均混响强度时采用的坐标系

由集中在厚度为 h 层内的非均匀性产生的声散射引起的平均混响强度可确定为

$$\langle F^2(t) \rangle = \frac{W_A k_0 h \delta_{\theta\Phi} \eta_n}{2 \pi c^2 t^3} \cdot 10^{-0.1 \beta c t}, \quad (3.6)$$

式中 η_n —— 取决于基阵指向性的系数, 其关系式为

$$\eta_n = \frac{2 \int_0^{2\pi} \varphi_n^2(\alpha, \theta_2) \varphi_n^2(\alpha, \theta_2) d\alpha}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \varphi_n^2(\alpha, \theta) d\alpha}. \quad (3.7)$$

同前, 式中 k_0 —— 层内的体积散射系数。但是常常采用所谓

海面散射系数 k_n , 它是无量纲量:

$$k_n = k_0 h. \quad (3.8)$$

因此, 将式(3.8)代入式(3.6), 可写为

$$\langle F^2(t) \rangle = \frac{W_A k_n \delta_{\Theta\Phi} \eta_n}{2 \pi c^2 t^3} \cdot 10^{-0.1 \beta c t}. \quad (3.9)$$

根据式(3.4)和(3.8), 海面散射系数 k_n 的值确定到达层的单位面积上的散射功率, 即

$$k_n = \frac{dW_p}{\langle F_1^2 \rangle dS}, dS = dV/h. \quad (3.10)$$

由两介质分界面产生的声散射引起的平均混响级可确定为

$$\langle F^2(t) \rangle = \frac{W_A k_n H \delta_{\Theta\Phi} \eta_n}{\pi c^3 t^4} \cdot 10^{-0.1 \beta c t}, \quad (3.11)$$

式中 H ——基阵至散射界面的距离; k_n ——分界面的散射系数, 它等于

$$k_n = \frac{\langle F_2^2 \rangle}{\langle F_1^2 \rangle} = \frac{dW_p}{\langle F_1^2 \rangle dS}, \quad (3.12)$$

式中 $\langle F_1^2 \rangle$ ——入射波的平均强度; $\langle F_2^2 \rangle$ ——在离分界面元面积的单位距离上测得的散射波的平均强度; η_n ——与式(3.7)一致的系数。

显然, 关系式(3.2), (3.9) 和 (3.11) 可以写为距离的函数, 因为瞬时 t 与离散射区的距离 R 的关系式为

$$t = 2R/c.$$

由上述公式可知, 平均混响强度是以如下一般规律为特征的:

(1) 平均强度与发射功率, 信号的有效宽度和取决于基阵指向性的系数成正比;

(2) 平均强度随海洋中声吸收的增大而降低;

(3) 平均强度随时间呈幂指数律衰减, 对于由分布在无限介质内, 层内和两介质分界面上的非均匀性产生的声散射引起的混响, 其指数相应为 2, 3 和 4。

通常, 在实际条件下, 可以观测到同时存在几种类型的混响信号。在一般情况下, 根据关系式 (3.2), (3.9) 和 (3.11), 可以写出平均混响强度

$$\begin{aligned} \langle F^2(t) \rangle = & A_1(t) \frac{W_A k_0 \delta_{\oplus \Phi} \eta_0}{2 \pi c t^2} \cdot 10^{-0.1 \beta c t} \\ & + A_2(t) \frac{W_A k_{\Pi} \delta_{\oplus \Phi} \eta_{\Pi}}{2 \pi c^2 t^3} \cdot 10^{-0.1 \beta c t} \\ & + A_3(t) \frac{W_A k_A H \delta_{\oplus \Phi} \eta_A}{\pi c^3 t^4} \cdot 10^{-0.1 \beta c t}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

式中 $A_1(t)$, $A_2(t)$ 和 $A_3(t)$ ——是由散射区在空间内的几何分布, 声传播的异常性和基阵的指向性确定的一些函数。

为了验证平均混响强度随时间的理论衰减律, 进行了许多实验。图 4 所示的实例为取自文献[24]的三类混响(体积,

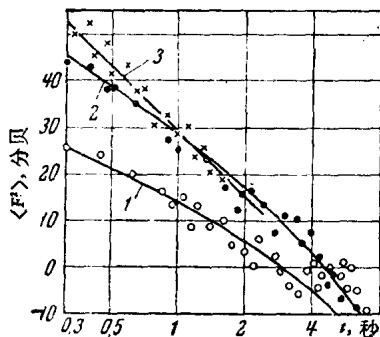


图 4 混响级随时间衰减律的理论数据与测量数据的比较(根据文献[24]的数据)

1——体积混响, 2——海面混响, 3——海底混响