

在实验室波导中单个简正波的 传输和声反向散射的测量

Clarence S. Clay

威斯康星大学地球物理和南极研究中心

我们的目的是为了在有限空间内进行“远场”声散射测量。我们使用了深度大约为 35 个声波长的厚波导并以第一号简正波激发它。该波导的顶部和底部为压力释放表面。为了仅用第一号简正波激发和接收，我们使用了垂直阵，该阵被振幅束控来同第一号简正波的本征函数相匹配。实验测量证实 90% 的能量是在第一号简正波内。用一对无方向性换能器作为探测发射器和接收器来校准散射测量系统。在 220 千赫，24 厘米深度和 100 厘米距离上，散射区域的横截面大约是 6 厘米高。在这距离，第一个 Fresnel 带是 10 厘米宽。通过散射测量得到的直径为 0.8 厘米的钢球体的目标强度为 -54 ± 1 分贝，这与目标强度的理论值 -54 分贝可相比拟。

引 言

散射函数或目标强度的实验室测量要求目标被一简单的声场所照射。理想地，声场是一平面波，并且我们在目标的远场观测散射声。通常，这种测量要求一个大水池以消除来自壁的混响。

作为在大水池中测量的一种替代办法，我们建议使用深度大约为 35 个声波长，或更深一些的充水波导。第一号简正波的激发给出了散射区域内的简单声场。虽然目标的散射包含在所有简正波中，但是仅接收第一号简正波将给出收发合置的散射函数。仅发射单号简正波的一种简单方法是使用垂直束控换能器阵来同要求发射的该号简正波的本征函数相匹配¹⁻³。假如池中的最大距离和不同号简正波的群速度之差足够大使能分离到达波，那么，可以利用传播时间来分离出第一号简正波¹⁻⁴。

使用声纳收发机驱动束控阵来测量反向散射横截面。声脉冲时间宽度取得足够大使能够同时照射整个散射体。接收器的输出被模拟选通来分离出散射信号。因为我们希望测量散射信号包络峰的幅度分布，所以门输出之后用微处理机进行模拟峰值检波，并作记录。模拟峰值检波将使数据速率减少到每个脉冲一个 A/D 转换。当然，也能用其他信号处理技术。

本研究的最初目的是要发展实验室测量活鱼目标强度的技术。活鱼研究的结果在 Huang 和 Clay 的姐妹篇文献中给出了。

一、单号简正波的发射

波导中阵之间的信号传输为, 参见 6 (494—497 页),

$$s(t) = \exp[i(\omega t + \pi/4)] \sum_{m=1}^M a_m U_m b_m, \quad (1)$$

$$a_m \equiv \sum_{\lambda=0}^{A-1} \alpha_{\lambda} Z_m(z_{\lambda}) \quad (2)$$

$$b_m \equiv \sum_{\eta=0}^{L-1} \beta_{\eta} Z_m(z_{\eta}) \quad (3)$$

$$U_m \equiv \rho(r)^{-1/2} q_m \exp(-\delta_m r - i k_m r) \quad (4)$$

$$q_m \equiv (2\pi \rho c \Pi)^{1/2} / (\nu_m k_m^{1/2}) \quad (5)$$

式中 ω 是角频率,

$Z_m(z)$ 是本征函数,

α_{λ} 和 β_{η} 是阵束控常数,

ρ 是密度,

c 是声速,

k_m 是波数的水平分量,

r_m 是波数的垂直分量,

δ_m 是简正波衰减常数,

Π 是辐射功率,

$V_r \sim \Pi^{1/2}$ 是换能器上的均方根电压,

$$\nu_m \equiv \int_0^{\infty} \rho Z_m^2(z) dz.$$

本征函数的正交性可由如下表示:

$$\int_0^{\infty} \rho Z_m(z) Z_n(z) dz \simeq \nu_m \delta(n-m), \quad (6)$$

式中当 $n=m$ 时 $\delta(n-m)=1$, 其它情况为 0。

另一种方法是用矩阵形式写出式(1), 它能以滤波器问题中所熟悉的形式表示出阵和波导传输的作用。⁷ 令 $\mathbf{a}$ 为具有元素 a_m 的 M 元列源矩阵, $\mathbf{b}$ 是具有元素 b_m 的 M 元列接收机矩阵, $\mathbf{U}$ 是其元素为 U_m 的 $M \times M$ 对角传输阵, $s(t)$ 为

$$s(t) = \exp[i(\omega t + \pi/4)] \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{b}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{a}^T$ 是 $\mathbf{a}$ 的转置。矩阵积的运算给出式(1)。当以模式谱的形式表示时, $\mathbf{a}$ 是源输入, $\mathbf{U}$ 是传输函数, $\mathbf{b}$ 是输出滤波器。当源函数仅仅激发第 m 号简正波并且接收器只接收第 m 号简正波时, 式(7)中的矩阵积简化为 $a_m U_m b_m$ 。同样, 式(1)中的和式简化为单个第 m 号简正波项。

反向散射测量的计算比传输计算更复杂, 因为散射目标变成为二次源。其过程分成二步, 首先, 源阵 $\mathbf{a}$ 向波导发射一号简正波并照射到散射目标。然后, 目标把声能散射到各号简正波中, 而接收阵 $\mathbf{b}$ 作为模式滤波器仅让散射声中的一号简正波分量通过。我们使用同一个阵来发射和接收第一号简正波。

正交条件(6)给出了确定束控常数的方法使能达到单号筒正波的发射和接收。对于在波导深度内密集地离散排列的 N 个换能器, 当密度为常数 ρ , 波导厚度为 h 时, 正交条件(6)变为:

$$\rho h \sum_{\lambda=0}^{A-1} Z_m(z_\lambda) Z_n(z_\lambda) = \nu_m \delta(n-m) \quad (8)$$

为了发射和接收第 m 号筒正波, 束控常数为

$$\alpha_\lambda = a Z_m(z_\lambda) \quad (9)$$

式中 a 是一个常数。入射到散射目标上的第 m 号筒正波为

$$P_m(t, z) = S_1 TV_T \times \{\exp[i(\omega t + \pi/4)] / \sqrt{r}\} Z_m(z) \exp(-ik_m r), \quad (10)$$

$$S_1 \equiv \rho(2\pi\rho c)^{1/2} / (\nu_m k_m^{1/2}) \quad (11)$$

$$TV_T \equiv a_m \Pi^{1/2} \quad (12)$$

式中散射体位于 (r, z) 处, TV_T 是换能器常数和均方根驱动电压的组合, $V_T \sim \Pi^{1/2}$ 。

反之, 若在 (r, z) 处的一个无方向性源向一作为接收机的阵发射, 其功率为 Π_c , 则

$$V_{ac}(t) = AS_1 \Pi_c^{1/2} \times \{\exp[i(\omega t + \pi/4)] / \sqrt{r}\} Z_m(z) \exp(-ik_m r) \quad (13)$$

式中下标 c 指校准声源, 并且 A 包括了作为接收机的阵的放大和响应。

二、单个筒正波的波传输

我们的传输实验是在充水波导中做的, 该波导的上下界面, 即空气和苯乙烯泡沫塑料近似为自由表面。结构上, 波导是象小孩用的浅水池, 该水池是用薄塑料层支撑在2.54厘米厚的苯乙烯泡沫塑料上的。水池的尺寸是2.4×2.4米, 深0.24米。换能器的垂直阵放置在一个角上, 面朝对角线方向。大部分散射测量是在离换能器1到2米的区域内进行的。频率是220千赫。布设的略图在姐妹篇文章⁵中给出。

第 m 号筒正波的本征函数是

$$Z_m(z) = \sin(m\pi z/h) \quad (14)$$

对于第一号筒正波, $Z_1(z) = \sin(\pi z/h)$, 同时如图1所示 α_λ 近似与 $Z_1(z)$ 相匹配。换能器在波导中仔细排列后, 如图2所示被传输的主要是一号筒正波。相反的传输, 即由无方向性发射, 用阵接收将给出大致相同的结果。

三、散射测量的校准

校准的过程是测量整个系统的收、发响应。使用一对无方向性换能器, 一个参考水听器和一个探测发射换能器。步骤为(1)相对于参考水听器校准探测发射器, (2)用那对换能器来校准声纳收发机和波导。

(声源的驱动和放大器增益在这过程中是不变的。)

由探测发射器到参考水听器的传输是在一个大水池里进行。对球面扩展波, 辐射功率 Π_c 。借助于均方根声压可表示成:

$$\Pi_c = 4\pi P_c^2 R_c^2 / (\rho c) \quad (15)$$

式中 $\langle p_c^2(t) \rangle^{1/2} \equiv P_c$, R_c 是距离。参考水听器的均方根输出电压是 $V_c \sim P_c$ 。

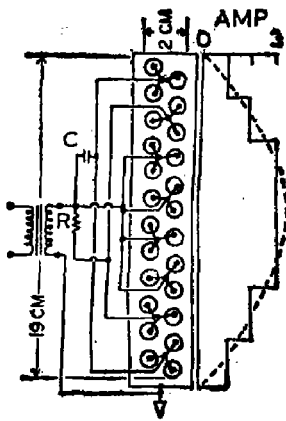


图1 换能器阵, 连结件和束控。左面的略图给示了阵的前(作用)面。阴影圆表示圆盘换能器基元。基元组与 R、C 相并联。圆盘的后边有一个共同的底。选择 R、C 以给出束控响应, 即图右边新给出的实线。虚线是理想的响应, 所有换能器基元的相位相同。

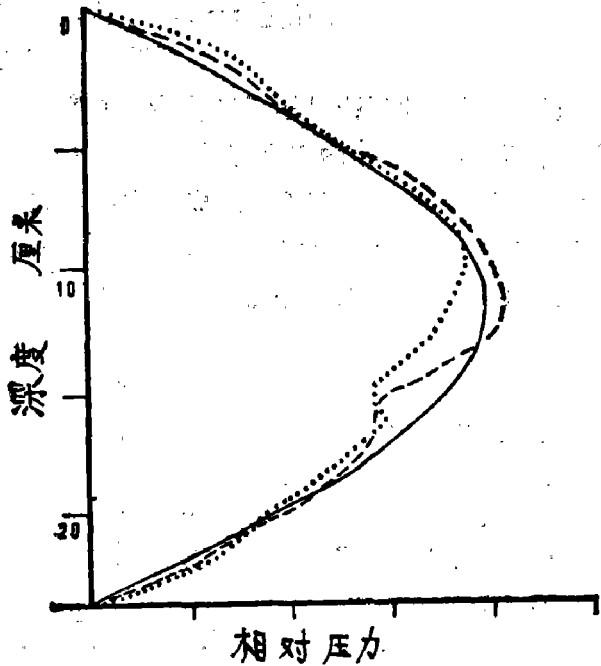


图2 压力场作为波导中强度的函数。离开换能器阵 2 米处进行的相对声压的二次测量 分别由划点线和虚线表示: 实线是第一号简正波的理论压力。⁸

然后, 我们把探测发射机安置在波导中 (r_1, z_1) 处, 并向阵发射。在放大器输出端的均方根电压 V_{∞} 为

$$V_{\infty} = AS_1 \Pi_c^{1/2} Z_1(z_1) / r_1^{1/2} \quad (16)$$

由此估算了系统常数 AS_1

根据公式(10), 入射到散射区域 r_1, z_1 处的均方根声压为

$$P_1 = S_1 TV_T Z_1(z_1) / r_1^{1/2} \quad (17)$$

使用参考水听器, 测量 P_1 给出 TS_1 。参考水听器的相应电压是 $V_1 \sim P_1$ 。这就完成了校准工作, 由此我们可以确定相对于参考水听器的 TS_1 和 AS_1 , 电压 V_{∞} 和 T , 以及几何条件。

对于散射测量, 我们假设无方向性散射源功率是

$$\Pi_s = [4\pi P_1^2 / (\rho c)] \sigma_{ss} \quad (18)$$

式中 P_1 是均方根入射声压。利用公式 (13) 以及阵和放大器的均方根输出电压、散射体的下标 s , 接收阵的均方根输出电压可表示成

$$V_{\infty} = AS_1 \Pi_s^{1/2} Z_1(z_1) / r_1^{1/2} \quad (19)$$

反向散射截面的计算采取如下步骤: (1) 算出 $V_{\infty} / V_{\infty c}$ 的比率, (2) 算出 Π_s / Π_{sc} 的比率, (3) 把后式代入前式, (4) 求解 σ_{ss} 。

$$\sigma_{ss} = [(V_{\infty} / V_{\infty c}) (P_c / P_1) R_c]^2 \quad (20)$$

由于我们使用同一个参考水听器来测量 P_1 和 P_c , 参考水听器的标准可省去了。(P_1 和 P_c 与各自的电压 V_1 和 V_c 成正比。) 发射器的驱动力与校准时相同。

作为对这过程的检验, 我们测量一钢球的目标强度 TS , 这里

$$TS = 10 \log \sigma_{ss} \quad (21)$$

频率是220千赫, 球的半径是 $a=0.4$ 厘米。相应有 $ka=3.7$ 。目标强度的实验测量值为

$$TS = -54 \pm 1 \text{ 分贝}$$

以固定钢球的理论目标强度作为我们实验和理论比较。参考文献6中的图6、2、1给出了作为 ka 函数的固定钢球的反向散射函数 S_{θ} , 这里 $\sigma_{\theta} = S_{\theta} A$ 而 A 是球的横截面积。当 $ka < 1$ 时, 函数 S_{θ} 与 $(ka)^4$ 成正比, 对大的 ka^* 函数 S_{θ} 为一趋于 $1/(4\pi)$ 阻尼振荡。当 $ka=3.7$ 时, 我们用 $S_{\theta} \simeq (4\pi)^{-1}$, 那末, $\sigma_{\theta} \simeq 4 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。理论目标强度是 -54 分贝。在钢球散射测量值的标准偏差范围内, 二者是一致的。

参 考 文 献

- [1] C. S. Clay, "Use of arrays for acoustic transmission in a noisy ocean," *Rev. Geophys.* 4, 475—507 (1966).
- [2] W. G. Kanabis, "Mode enhancement using a vertical array of transmitters: Theory and experiment," *J. Acoust. Soc. Am. Suppl.* 1 58, S30 (A) (1975).
- [3] W. R. Caswell, "Mode attenuation measurements in shallow water off the coast of Panama City, Florida," *J. Acoust. Soc. Am. Suppl.* 1 65, S18 (A) (1979).
- [4] R. H. Ferris, "Comparison of measured and calculated normal mode amplitude functions for acoustic waves in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* 52, 981—988 (1972).
- [5] K. Huang and C. S. Clay, "Probability density function of echos from live fish," *J. Acoust. Soc. Am.* 67, 795—802 (1980).
- [6] C. S. Clay and H. Medwin, *Acoustical Oceanography: Principles and Applications* (Wiley-Interscience, New York, 1977).
- [7] C. S. Clay, "Waveguides, arrays, and filters," *Geophysics* 31, 501—505 (1966).
- [8] K. Huang, "PDF of sound scattered from live fish," M. S. thesis, University of Wisconsin at Madison, Geophysical and Polar Research Center, 1977.

译自 J.A.S.A. Vol.67, No.3. March, 1980.

凌雷兴译 金国亮校

* 译注: 原文误写为 ka .