

# 由声反向散射信号反演水中 悬浮泥沙浓度的实验分析\*

厦门大学海洋学系 粘宝卿 黄衍镇

**摘要** 声遥测水中悬浮泥沙的反向散射强度,可反演获得泥沙浓度。本文介绍其实验方法和结果,通过对实验结果的讨论,指出这种测量方法的优点及其局限性。

**关键词** 悬浮泥沙 反向散射 反演

## 一 引言

江、河、湖和大陆坡近海的水中悬浮泥沙含量是重要的水文环境要素,因而是水文科学研究、水文环境评价、水利开发及工程等所关心的问题。传统的常规的悬浮泥沙浓度的观测是人工采样法,即定时、定点直接采集水样,经过滤、烘干、称重等步骤来获得水中悬浮泥沙的含量。显然,这种方法不仅费时费力,而且数据量少又不准确。当前有光电法、声光法、声学法以及正在研究的压差式悬浮泥沙测量等几种方法,但无论哪种方法都不是完美无瑕的。

笔者研制了工作频率 1.5 MHz 声反向散射系统的试验样机,旨在用于定点遥测浅海海底边界层上方 1 m 悬浮泥沙的浓度剖面。本文介绍该试验样机进行模拟实验结果的讨论,通过对实验的方法和结果,指出声反射法反演悬浮泥沙浓度的优点及其局限性。

## 二 实验

### 1. 实验方法

声反向散射系统(ABSS)收/发合置的换能器安装在圆型实验塑槽的底部,坐底朝上,如图 1。定时发出载频 1.5 MHz、脉宽  $\tau(32 \mu\text{s})$  的声脉冲后,声波传播遇到水中的悬浮粒子,当声波波数  $k_c$  和粒子半径  $a$  满足  $k_c a \ll 1$  时,将产生反向散射,而且较前向散射强。此时位于换能器轴线  $Z$  上、距离端面  $Z_j$  的粒子反向散射信号到达换能器收/发端面的时间  $T_j = 2Z_j/c$ ,式中  $c$  为水中声速。因此,在声脉冲发出的  $T_j$  时刻,由时序脉冲控制的距离选通门开启一段时间  $\tau(32 \mu\text{s})$ ,则接收机采集到水体厚度  $L = c \cdot \tau/2$  的采样体积的悬沙反向散射信号脉冲,如图 2 中的  $S_j(t)$ ,而图 2 中的  $a$  为发射脉冲,图 2 中的  $c$  为界面反射信号脉冲。

\* 福建省科学基金资助课题。

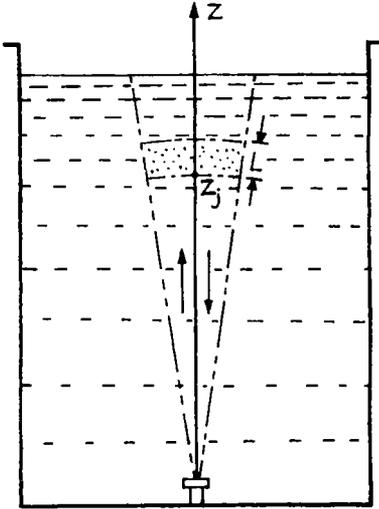
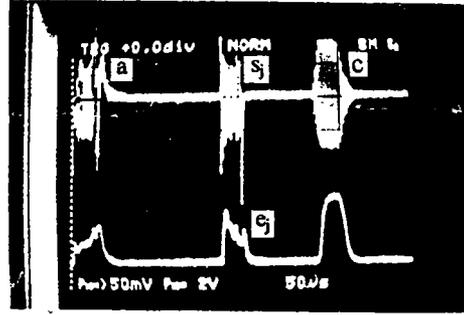


图1 实验配置示意图



- a——发射声波脉冲;
- $s_j$ ——反向散射采样脉冲;
- c——界面反射脉冲;
- $e_j$ ——对  $s_j$  提取包络。

图2 信号波形

### 2. 悬浮液的制备

经 240 目标准筛筛过的细石英粉沙,其粒径  $d \leq 63 \mu\text{m}$ , 在水中可处于缓慢沉降的悬浮态。筛后的粉沙经过烘干、称重,然后逐次增量加到已知容积的装水的圆型塑槽里,可依次得到粉沙浓度  $M$  (mg/l)不同的几种悬浮液,如表 1 中的  $M$ 。

每次将一定量的粉沙加到水中应充分搅拌,使之分布均匀。停止搅拌 5 s 后,待因搅拌而可能产生的气泡消失了,再开始采集悬浮沙的反向散射信号。

## 三 结 果

### 1. 信号的采集及处理

被采样的水体  $L$  中含有许许多多的悬沙微粒,因而所采集的反向散射信号  $S_j(t)$  近似为许许多多随机振幅和相位的同频正弦信号的迭加。所以,对  $S_j(t)$  提取的包络  $e_j(t)$  对其采样时间  $\tau$  积分为  $\langle e_j(t) \rangle$

$$\langle e_j(t) \rangle = \int_0^\tau e_j(t) dt \tag{1}$$

其实质是随机起伏的幅度包络  $e_j(t)$  在时间  $\tau$  里进行平滑,相当于  $e_j(t)$  对  $\tau$  求平均。积分电平  $\langle e_j(t) \rangle$  经保持和 A/D 变换,得到对应于  $\langle e_j(t) \rangle$  的数字量  $X_j$ ,它是代表  $e_j$  (亦即  $s_j$ ) 的 1 个子样本。由于  $e_j$  是随机量,单次取样所得的测量结果是不准的。为此,必须通过在短时间内的多次采样,建立观测样本(集合),然后对集合求平均。亦即建立代

表采样体积中  $M_j$  的一个样本集合:

$$\{X_j(i)\} \quad i = 1, 2, \dots, 32$$

式中:  $X_j(i)$  ——对第  $j$  个采样体积的第  $i$  次取数。

再对集合  $\{X_j(i)\}$  求平均:

$$\langle X_j \rangle = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} X_j(i)$$

最后,对平均的数字量  $\langle X_j \rangle$  取平方,得代表浓度  $M_j$  的反向散射信号强度  $\langle I_j \rangle$ , 即

$$M_j \Leftrightarrow \langle I_j \rangle = \langle X_j \rangle^2 \quad (2)$$

## 2. 结果

按上述的实验方法、采集和处理信号,表 1 列出了对不同的浓度  $M$ 、相同采样体积 ( $j = 4, Z_j = Z_4 = 40$  cm 上的采样体积)  $L$  所采集的反向散射信号强度的数字化读数  $\langle I \rangle$ 。

表 1 不同的质量浓度  $M$  和对应的读数 ( $I$ )

$M$ (mg/l)	500	750	1 000	1 250	1 500	1 750	2 000
$\langle I \rangle$ (reading)	63 472	115 855	231 541	301 023	417 558	616 470	823 556
$\beta = \frac{\log \langle I \rangle}{\log M}$	1.7 794	1.7 613	1.7 882	1.7 691	1.7 697	1.7 853	1.7 921

## 四 讨 论

来自位于离换能器距离  $z$  上的悬沙粒子场和时间  $t$  的声反向散射强度  $I(z, t)$  同单次散射理论给出<sup>[1]</sup>:

$$I(z, t) = N + F(z, T, P) \left( \sum_i n(i, z, t) \varphi_i \alpha_i^2 \right) \exp \left( - \int_0^z 4\alpha_s(\xi_1, t) d\xi \right) \quad (3)$$

式中  $N$  是附加噪声的强度,它会影响分布的均值;  $F$  是响应函数,它取决于所用的仪器、环境温度  $T$  和压力  $P$ ;  $n$  是半径为  $a_i$  的散射粒子数;  $\varphi_i$  是采样体积  $L$  中的反向散射函数;而  $\alpha_s$  是由于散射引起的衰减系数(衰减系数本应包括散射衰减  $\alpha_s$  和介质衰减  $\alpha_0$ , 但

$\alpha_0$  可以通过对  $F$  的适当调整来处理)。式(3)中,把与散射体不是明确有关的所有影响都归到  $F$  里。求和号里的一项表示散射场的目标强度返回到换能器的能量与每种粒径为  $i$  类的散射体数成比例。

假设粒子的大小分布和反向散射函数  $\varphi_i$  在时、空上是有效地不变,只有粒子总体上的浓度  $C(z, t)$  在变化,那么  $\varphi_i$  也可归纳入  $F$  里。于是可作如下的变换:

$$F(z, T, P) \sum_i n(i, z, t) \varphi_i \alpha_i^2 \rightarrow F'(z, T, P) C(z, t) \quad (4)$$

这里的  $F'$  还是响应函数,它和原来的  $F$  之间的关系是一个常数因子,该因子和实际的散射总体有关。

如果悬沙粒子浓度小于  $10 \text{ kg/m}^3$ ,则粒子多次散射的影响可以被忽略;并考虑到反向散射的采样体积是处于离换能器的小距离上,则式(3)中的衰减系数  $\alpha_i$  也可以被忽略。于是,重写式(3)为:

$$I(z, t) = N + F'(z, T, P) C(z, t) \quad (5)$$

由于悬沙的体积浓度  $C_v$  和质量浓度  $M$  之间的关系为  $M = C_v \rho_0$ , (如  $\rho_0$  是粉沙的密度,约为  $2.65 \text{ g/cm}^3$ );而工程上通常以质量浓度  $M$  表示水中悬沙的含量。因此,式(5)重写为:

$$I(z, t) = N + F(z, T, P) M(z, t) = N + I_s(z, t) \quad (6)$$

式(6)中,系数因子  $\rho_0$  已归入  $F$  里,而  $I_s$  为来自采样体积的实际的悬沙粒子所贡献的反向散射信号强度,它是总的接收信号强度  $I$  的一部分。显然,必须尽可能降低附加噪声的强度  $N$ ,使得  $I$  主要是来自  $I_s$ ,这样,通过测量  $I$  即可反演求得  $M$ 。

基于上述的理论推演,现讨论表 1 的实验结果:

1. 由表 1,注意到所有的  $\beta$  值近似相等,因而可归纳得出总的反向散射强度  $\langle I \rangle$  的浓度  $M$  的关系为:

$$\langle I \rangle = M^\beta \text{ 或 } M = \langle I \rangle^{1/\beta} \quad (7)$$

式(7)中的  $\beta$ ,如果取表 1 中  $\beta$  的均值,则  $\beta = 1.7779$ 。据此,在给定的观测系统和工作条件下,可由(7)反演求得  $M$ ,相对误差约 3%。

2. 式(7)中的  $\beta$  不是常数,它是采样体积所处的距离  $z$ 、环境温度  $T$  和压力  $P$  的函数,因此,  $\beta$  必须在实验室和工作现场实时标定。本文的实验是以给定的试验样机,在  $z, T, P$  均基本相同的条件下进行的,因而有近于相同的  $\beta$  值,这和理论上的预期是一致的。

3. 由悬沙的反散射强度  $\langle I \rangle$  反演其浓度  $M$  还基于如下的假设,即粒子的反向散射波

在给定的回程路径上没有受到二次或多次散射的影响。否则,将引起浓度反演的误差,因而必须进行相应的补偿校正。本实验的反向散射采样体积处于小距离( $z=40\text{ cm}$ ),被测浓度范围  $M=500\sim 2\,000\text{ mg/l}$ (小于  $10\text{ kg/m}^3$ ),可忽略散射衰减和多次散射的能量损失,因而  $M$  和  $\langle I \rangle$  之间的对应关系呈规律性。也说明用来观测声反向散射的试验样机设计合理、性能良好。

## 五 结 语

1. 声学反向散射法观测水中悬沙浓度的主要优点是:进行实时声遥测,不扰动现场观测点;数据量多,可获得浓度剖面;测量精度较高;省时省力等。因而是一种先进的方法。目前,国内正致力于这种实用型观测仪器的研制。

2. 对于给定工作频率的声反向观测系统,并非任何悬沙的观测现场都可适用。因为首先要满足  $ka \ll 1$  的条件,悬浮粒子才会产生足够强的反向散射信号。

3. 由声反向散射强度直接反演悬沙浓度,要求被测悬沙浓度的变化是在一定范围内。浓度太低,悬沙粒子数少,实际产生的反向散射强度  $I_s$  弱,以致和附加噪声强度  $N$  同数量级(甚至更低),这样将导致悬沙浓度实际上有变化时,而系统采集相应的信号  $I$  却没有明显的变化,即测量数据的误差大,甚至没有意义;浓度太高,多次散射不能忽略,散射损失起作用了,这时系统采集的信号  $I$  要小于对应的浓度  $M$ ,即误差也大。对于前者(浓度低限)取决于声接收机的灵敏度和信噪比,对于后者(浓度高限以上)要对测量数据进行补偿修正。

## 参 考 文 献

1. C. S. Clay, et al. Acoustic Oceanography (Wiley - Interscience, New York), 1997.
2. J. Sheng, et al. J. A. S. A. 1988, 83(2): 598~610.
3. 黄衍镇等. ABSS 的研制, 海洋科学, 1999(4): 54~57.