

# 悬浮泥沙声学观测的原理分析\*

张叔英

(中国科学院东海研究站 上海 200032)

李允武

(国家海洋局海洋技术研究所 天津 300111)

1998 年 2 月 16 日收到

1998 年 4 月 8 日定稿

**摘要** 从导出声呐方程式出发对悬浮泥沙声学观测方法的原理和系统设计问题进行了分析,得到了系统主要技术参数(如最佳工作频率、声发射功率和收发换能器孔径等)的计算公式,并着重讨论了时变随机过程的数据处理、声传播损失补偿及泥沙浓度现场标定等关键技术问题。本文分析的结果为利用声散射原理观测的声学系统(如声学悬浮泥沙浓度剖面仪和声学多普勒海流剖面仪)的研制和应用提供了依据。

PACS 数: 43.30, 43.60

## A theoretical analysis of acoustic suspended sediment observation

ZHANG Shuying

(Shanghai Acoustics Laboratory, The Chinese Academy of Sciences Shanghai 200032)

LI Yunwu

(Institute of Ocean Technology, State Oceanic Administration Tianjin 300111)

Received Feb. 16, 1998

Revised Apr. 8, 1998

**Abstract** A theoretical analysis of designing an acoustic back-scatter system for observations of suspended sediments has been made through a sonar equation derived in this paper. Some formulae and data for reference in determining several main technical parameters of the system, such as optimum frequency, sound transmission power, aperture of transducer etc., are provided. And some key problems on the acoustic observation of suspended sediments, such as data processing of a time-varying stochastic process, compensation of sound propagation loss in complicated conditions and in-situ calibration of sediment concentration, are discussed in detail. The results of the analysis could be helpful to the development and application of a specific acoustic back-scatter instrument (e.g. the acoustic sediment concentration profiler, the acoustic Doppler current profiler etc.).

\* 国家自然科学基金资助项目

## 引言

自八十年代以来,用声散射原理观测悬浮泥沙的方法在河口和近岸海区的泥沙沉积动力学的研究中得到了广泛应用<sup>[1-7]</sup>,并且也被成功地应用于海洋污染物和浮游生物的监测<sup>[8,9]</sup>。与常规的采水法和光学观测法相比,声学观测方法能够在不破坏现场环境条件下,实时和连续地观测水中泥沙浓度剖面及其随时间的变化过程,因此,对于河口海洋沉积动力学问题的研究以及海岸工程、污染监测有十分重要的意义<sup>[10]</sup>。为了有助于合理地设计和研制声学悬浮泥沙观测系统,本文从主动声呐检测的角度对这种系统的探测原理和一些关键技术问题进行了讨论。

## 1 声呐方程式

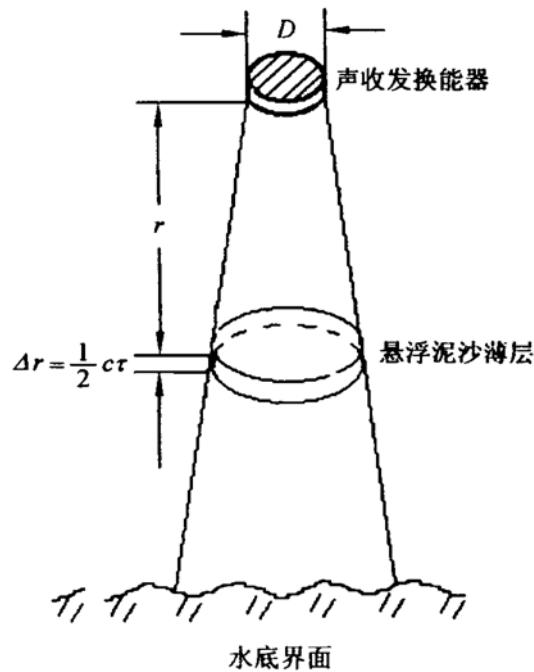


图 1 声学悬浮泥沙观测原理分析示意图

考虑远场情况 ( $r > r_n, r_n = \pi D^2 / (2\lambda)$ )<sup>[5]</sup>, 并假设悬浮泥沙粒径满足 Rayleigh 散射条件 ( $\lambda \gg d$ ), 且浓度不高 ( $C < 10 \text{ kg/m}^3$ ), 一般河口近岸海域均能满足这个条件。此时可以忽略多次散射的影响, 声波在水中传播的声衰减主要由海水的声吸收决定。相应于每一次声发射脉冲信号, 在距离  $r$  处的悬浮泥沙薄层  $\Delta r$  中的微粒产生声散射, 而声换能器接收到的后向声散射强度级由下式计算:

$$RL = SL - 2TL + S_V + 10 \lg V \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

式中单程声传播损失

$$TL = 20 \lg r + \beta r \quad (2)$$

声散射体积

$$V = \frac{1}{2} cr \cdot r^2 \Psi \quad (3)$$

在声换能器指向性很高的情况下 ( $D \gg \lambda$ ), 声收发合成波束的等效束宽  $\Psi$  为

$$10 \lg \Psi = 7.6 - 20 \lg \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right) \quad (4)$$

图 1 是声学悬浮泥沙观测原理分析示意图。在分析中应用到的一些水声学方面的公式和数据取自 Urlick 的著作<sup>[11]</sup>。有关参数的意义表述如下:

$f$  — 发射声脉冲的频率 (kHz),

$\tau$  — 发射声脉冲的持续时间 (s),

$c$  — 水中声传播速度 (m/s),

$\lambda = c/f$  — 声波波长 (m),

$\Psi$  — 声收发合成波束的等效束宽 (立体弧度),

$W$  — 观测系统的接收机通频带 (kHz),

$P$  — 声发射脉冲功率 (W),

$SL$  — 声源级 (dB), 参考级为离声源 1 m 处的  $1 \mu\text{Pa}$  平面波声压,

$\beta$  — 声波在水中传播的衰减系数 (dB/m),

$C$  — 悬浮泥沙的浓度 ( $\text{kg/m}^3$ ),

$d$  — 悬浮泥沙的平均粒径 (m)。

声源级

$$SL = 171 + 10 \lg P + 20 \lg \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right) \quad (5)$$

将 (2) ~ (5) 式代入 (1) 式得

$$RL = 10 \lg P - 20 \lg r + S_V + 10 \lg \tau - 2\beta r + 207.4 \quad (6)$$

在上式中,  $S_V$  为单位体积内悬浮泥沙的后向声散射强度。根据实际情况, 假设在声散射体积  $V$  内悬浮泥沙微粒的物理特性一致, 粒径分布满足正态分布, 而且均方根偏差比平均粒径  $d$  小得多, 则

$$S_V = 10 \lg Q + TS \quad (7)$$

式中

$$Q = \frac{C}{\rho' \cdot \Delta V} = \frac{6C}{\pi \rho' d^3} \quad (8)$$

为单位体积内悬浮泥沙的微粒数,  $TS$  为单个微粒的目标强度,

$$TS = 10 \lg \left\{ \frac{\pi^2 \cdot (\Delta V)^2}{\lambda^4} \left[ 1 - \frac{\kappa'}{\kappa} + \frac{3(\rho'/\rho - 1)}{1 + 2\rho'/\rho} \right]^2 \right\} \quad (9)$$

在 (8) 和 (9) 式中,  $C$  为悬浮泥沙的浓度,  $\Delta V = \pi d^3/6$  为单个微粒平均体积,  $\kappa'$  和  $\kappa$  分别为微粒和水的压缩率,  $\rho'$  和  $\rho$  分别为微粒和水的密度。对于沙粒, 可设  $\kappa'/\kappa = 0.1$  和  $\rho'/\rho = 2.6$ 。由此得

$$TS = 8.8 + 60 \lg d - 40 \lg \lambda \quad (10)$$

和

$$10 \lg Q = 10 \lg C + 30 \lg d - 31.3 \quad (11)$$

将 (10) 和 (11) 式代入 (7) 式得

$$S_V = 10 \lg C + 30 \lg d - 40 \lg \lambda - 22.5 \quad (12)$$

再代入 (6) 式得

$$RL = (10 \lg P - 20 \lg r - 2\beta r) + (10 \lg \tau - 40 \lg \lambda) + (10 \lg C + 30 \lg d) + 185 \quad (13)$$

对悬浮泥沙进行观测时, 背景噪声由海洋噪声决定。声波频率在 100 kHz 以上时, 海洋噪声以热噪声为主, 而窄带声接收系统接收到的海洋热噪声比观测系统接收机电噪声低 25 dB ~ 35 dB。因此, 在实际研制声学悬浮泥沙观测系统时, 认为背景噪声由接收机本机噪声决定, 是一种白噪声。为留有余地, 设背景噪声强度级为

$$NL = 70 + 10 \lg W \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

由 (13) 式和 (14) 式可以得到用于估测声学悬浮泥沙观测系统探测的声呐方程式:

$$RL - NL = (10 \lg P - 20 \lg r - 2\beta r) + (10 \lg \tau - 40 \lg \lambda - 10 \lg W) + (10 \lg C + 30 \lg d) + 115 \quad (15)$$

$RL - NL$  定义为探测阈, 应大于 10 dB。式中右边第二个括号内的参数, 由观测系统的设计参数 ( $\tau$ 、 $f$ 、 $W$  及  $D$ ) 决定, 第三个括号内的参数由观测对象 (悬浮泥沙) 的物理参数 ( $C$ 、 $d$ ) 决定。给定了这些参数, 就可以从第一个括号的表达式计算相应于不同探测距离  $r$  的声发射功率  $P$ 。

## 2 主要技术参数的确定

### 2.1 观测空间分辨率

悬浮泥沙观测的空间分辨率由声波束宽度  $\theta$  和深度方向的最小分层厚度  $\Delta r$  决定。圆形换能器的指向性函数为

$$b(\theta) = \left[ \frac{2J_1[(\pi D/\lambda) \sin \theta]}{(\pi D/\lambda) \sin \theta} \right]^2 \quad (16)$$

以半功率 (-3 dB) 点定义的声波束宽度为

$$\theta = 59(\lambda/D) \quad (^\circ) \quad (17)$$

最小分层厚度  $\Delta r$  由声发射脉冲信号的持续时间  $\tau$  决定:

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} = 750\tau = \frac{0.75}{B} = \frac{0.75}{W} \quad (\text{m}) \quad (18)$$

式中声速  $c=1500 \text{ m/s}$ ,  $B=1/\tau$  是声脉冲信号的频谱宽度。在匹配接收的情况下, 观测系统接收机通频带  $W=B$  (以 kHz 为单位)。

### 2.2 最佳工作频率

从 (15) 式可以看出, 有用信号后向声散射强度  $I_S$  与背景噪声功率  $N_b$  之比 ( $I_S/N_b$ ) 是频率的函数 (注意  $RL=10\lg I_S$ ,  $NL=10\lg N_b$ )。若给定声发射功率, 则工作频率为最佳值时此比值有极大值。当偏导数  $\partial(I_S/N_b)/\partial f=0$  时, 频率  $f$  为观测系统的最佳工作频率  $f_0$ 。给定声发射功率  $P$  后有

$$\frac{I_S}{N_b} \propto e^{-2\alpha \cdot r} \cdot f^4 \quad (19)$$

式中衰减指数  $\alpha$  由 Schulkin-Marsh 公式确定:

$$\alpha = 4.70 \cdot 10^{-6} \cdot S \cdot \frac{f_r f^2}{f_r^2 + f^2} + 6.75 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{f^2}{t_r} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (20)$$

当  $f$  比  $f_r$  足够大时, 上式右边第 1 项趋近于一个与频率  $f$  无关的常数。当海水盐度  $S$  为 35, 温度为  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $f_r=100 \text{ kHz}$  时最佳工作频率为

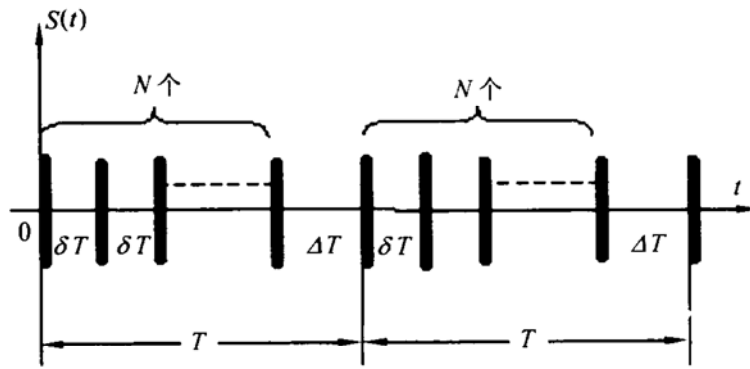
$$f_0 = \frac{3.85 \cdot 10^3}{\sqrt{r}} \quad (\text{kHz}) \quad (21)$$

## 3 关键技术问题的讨论

以 ASSM 声学泥沙观测系统<sup>[12]</sup> 为例, 对声学观测悬浮泥沙中的若干关键技术问题讨论如下:

### 3.1 观测数据的统计平均处理

悬浮泥沙的散射回波是包络满足 Rayleigh 分布的随机信号。在每一个观测时间  $T$  内, 发射如图 2 所示的  $N$  个声脉冲信号, 对相应的  $N$  个后向散射回波信号进行平方和平均处理 ( $\Delta T$  为处理数据所需时间), 得出统计意义上有效的悬浮泥沙浓度随距离  $r$  的分布函数 (称为浓度剖面)。

图2 声发射脉冲信号  $S(t)$  的示意图

在整个脉冲串的发射时间  $(N-1) \cdot \delta T$  内, 悬浮泥沙微粒移动距离不大于观测给定的最小分层厚度  $\Delta r$  的  $1/10$  时, 可认为微粒处于相对静止状态。取在观测距离  $r_m$  内要求分辨的悬浮泥沙分层数为  $r_m/\Delta r = 128$ , 粒径不大于  $0.1 \text{ mm}$  的悬浮泥沙微粒的垂直运动速度小于  $0.05 \text{ m/s}$ , 则允许的脉冲个数  $N = 12$ , 相应的声后向散射强度的测量统计误差减为  $1/\sqrt{N}$ 。

悬浮泥沙浓度剖面分布本身是时变的随机函数, 需要对每一个测量周期  $T$  得出的泥沙浓度分布函数再进行时间上的平均处理。为此设置了一个由计算机控制的在“时间-深度”二维尺度连续可变的统计平均窗口。如果时间平均的样本数为  $M$ , 统计误差将减小到  $1/\sqrt{MN}$ 。

### 3.2 声传播损失补偿

前面讨论的都是远场观测条件下的简单情况。在近场区域内, 声束扩展引起的声传播损失和悬浮泥沙的声散射体积随距离的变化规律比较复杂。悬浮泥沙本身引起的声衰减与泥沙浓度有关, 总的声衰减系数也是距离的函数。研究表明, 在距离  $r$  处浓度为  $C(r)$  的悬浮泥沙所产生的后向声散射强度为<sup>[6]</sup>

$$I_S = k^{-1}(r) \cdot C(r) \cdot \Phi^{-2}(r) \cdot \exp \left[ -2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right] \quad (22)$$

式中  $\Phi(r) = r(2 + r_n/r)/3$ , 当  $r \leq r_n$  时;  $\Phi(r) = r$ , 当  $r > r_n$  时。

在观测系统中按下式设置声传播损失的补偿函数:

$$F(r) = k(r) \cdot \Phi^2(r) \cdot \exp \left[ 2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right] \quad (23)$$

式中  $k(r)$  称为标定因子, 它是与声发射脉冲信号参数  $(P, \tau, \lambda)$  及距离  $r$  处的悬浮泥沙物理参数  $(d, \rho', \kappa')$  有关的系数。由 (21) 和 (22) 式, 得到

$$C(r) = F(r) \cdot I_S(r) \quad (24)$$

在声学悬浮泥沙观测系统中  $F(r)$  取

$$F(r) = k(r) \cdot r^{n(r)} \cdot e^{2\alpha(r)r} \quad (25)$$

在实际运算时, 把观测距离分段 (最多可分 9 段), 再根据实际情况设定每一段的  $k$ 、 $n$  和  $\alpha$  值, 逼近理想补偿曲线, 最终取得满意的处理结果。在一般情况下, 声传播损失的补偿处理比较简单。如在近场区可设 (24) 式中的  $n = 1$ , 在远场区  $n = 2$ <sup>[3]</sup>。若悬浮泥沙浓度不大, 可设  $\alpha(r)$  为常数, 且由 (19) 式进行估算后, 再逐步修正。因此, 决定悬浮泥沙浓度测量精度的关键在于标定。

### 3.3 泥沙浓度的现场标定

通常决定标定因子  $k(r)$  的方法如下: 在水中采集一定体积的水样, 用称重法得知该体积内所含的泥沙干重量, 从而确定泥沙浓度  $C(r)$ , 然后除以声观测系统同步接收到的后向散射回波强度  $I_S(r)$  (已经过声传播损失的补偿处理), 就得出标定因子  $k(r)$ 。曾经试验过从观测海区采集泥沙样品后, 在实验室特制的装置内进行声观测的标定处理。但是, 粒径微小的悬浮泥沙在海水中因离子作用会凝聚成粘性微粒或絮凝体, 从而使等效声散射微粒的物理参数 ( $d, \rho', \kappa'$ ) 与单个泥沙微粒不同, 使实验室标定所得的结果与现场情况大不相同。因此使用声学观测方法测量悬浮泥沙浓度必须进行现场标定处理。在另一篇论文<sup>[14]</sup>中介绍了长江口现场观测数据的标定方法和得到的结果。选取潮汐的特征时刻进行标定时, 24 小时内的声学观测数据与相应的采水实测数据的相对平均误差小于 20%。

### 参 考 文 献

- 1 Hess F R, Bedford K W. Acoustic backscatter system (ABSS): the instrument and some preliminary result. *Marine Geology*, 1985; **66**: 357—397
- 2 Hanes D M, Vincent C E, Huntley D A, Clarke T L. Acoustic measurements of suspended sand concentration in the C<sup>2</sup>S<sup>2</sup> experiment at Stanhope Lane, Prince Edward Island. *Marine Geology*, 1988; **81**: 185—196
- 3 Libicki C, Bedford K W, Lynch J F. The interpretation and evaluation of a 3 MHz acoustic backscatter device for measuring benthic boundary layer sediment dynamics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989; **85**: 1501—1511
- 4 Osborne P D, Vincent C E, Greenwood B. Measurements of suspended sand concentrations in the nearshore field intercomparison of optical and acoustic backscatter sensors. *Continental Shelf Research*, 1994; **14**: 159—174
- 5 Thorne P D, Vincent C E, Hardcastle P J, Rehman S, Pearson N. Measuring suspended sediment concentration using acoustic backscatter devices. *Marine Geology*, 1991; **98**: 7—16
- 6 Thorne P D, Hardcastle P J, Soulsby R L. Analysis of acoustic measurements of suspended sediments. *J. Geop. Res.*, 1993; **98**: 899—910
- 7 Shi Z, Ren L, Ling H. Vertical suspension profile in the Changjiang Estuary. *Marine Geology*, 1996; **130**: 29—37
- 8 Orr M H. *et al.* Acoustic monitoring of industrial chemical waste released at deep water dump site 106. *J. Geophys. Res.*, 1978; **83**: 6145—6154
- 9 Pieper R E, *et al.* Acoustic measurements of zooplankton distributions in the sea. *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, 1984; **41**: 226—238
- 10 McLean S R. Theoretical modeling of deep ocean sediment transport. *Marine Geology*, 1985; **66**: 243—285
- 11 Urick R J. Principles of underwater sound. McGraw-Hill Book Co., New York, 1983
- 12 Zhang S. Progress in underwater acoustic geo-mapping technology. *Acoustic Australia*, 1996; **24**: 47—51
- 13 Guo J, Li Y. Laboratory calibration of an acoustic monitoring device to measure suspended sand concentration. International Conference on Shallow-water Acoustics (SWAC'97, 21-25 Apr. Beijing China), China Ocean Press, Beijing, 1997: 609—614
- 14 郭纪捷, 任来法等. 声学悬浮泥沙观测数据现场定标研究. 海洋学报 (待发表)