

声学悬浮泥沙观测系统的研制和应用*

张叔英

李允武

(中国科学院东海研究站, 上海 200032)

(国家海洋局海洋技术研究所, 天津 300111)

摘要 为观测水中悬浮泥沙的浓度剖面、监测水中污染物及研究近岸海区泥沙的迁移和沉积, 研制了声学悬浮泥沙观测系统 (ASSM)。总结了设计时主要技术参数的确定及解决关键技术的方法。应用此系统观测长江口悬浮泥沙, 得到典型悬浮泥沙浓度剖面。

关键词 声学观测 悬浮泥沙

1 引言

近岸海区海水中悬浮着来自河流的大量泥沙, 在潮汐、海流的作用下, 泥沙不断运动、迁移、沉降, 对港口、航道、水利、海岸工程、离岸工程影响很大, 必须研究悬浮泥沙的动力学。沿用已久的采样法虽然能直接获得采样点的悬浮泥沙浓度, 但只能得到离散数据, 而且费时费力。用声学反向散射原理观测悬浮泥沙, 可以在不扰动现场条件下连续得到浓度剖面。为了研究近岸海区海水中悬浮泥沙的动力学、观测其浓度剖面、监测水中污染物与浮游生物, 研制了声学悬浮泥沙监测系统。系统是双频的 (0.5和1.5 MHz), 其工作原理是通过测量悬浮泥沙对声波的反向散射及声成像技术等获得浓度剖面。下面就观测系统的设计、主要技术参数的确定、关键技术问题的解决方法以及在长江口应用时在不同潮汐特征时刻得到的四种典型泥沙浓度剖面进行讨论。

2 ASSM 系统结构

ASSM 系统的工作原理框图见图1。系统由脉冲信号发射机、两种频率的圆形发射/接收共用换能器、反向散射信号接收机、数据采集、信息处理与控制板、彩色图像显示器、数据打印机等组成。整个系统用 PC 机控制信号的发射、采样、数据预处理和储存的同步, 信号的后处理由 ASSM 系统的软件实现。

泥沙颗粒的直径远小于观测所用声波波长, 满足瑞利散射条件。泥沙浓度小于 5 kg/m^3

本文于1998-02-19收到, 修改稿于1998-03-15收到。

* 国家自然科学基金资助项目 (编号: 49576271和49476273)。

第一作者简介: 张叔英, 男, 60岁, 研究员, 从事海底地形剖面及海水中悬浮泥沙的声学探测研究。

时,可以忽略泥沙颗粒多次散射的影响,而反向散射强度是浓度的线性函数. ASSM 系统观测悬浮泥沙浓度的范围为 $0.1 \sim 5.0 \text{ kg/m}^3$. 对高于 5.0 kg/m^3 浓度的悬浮泥沙, 仅能定性地测量其变化趋势, 不能得出其浓度值.

为避免海面附近气泡散射的干扰, 把发射/接收换能器置于海面以下 3 m 处, 可以用支架悬挂在船舷边向下观测, 也可以用三脚架置于海底向上观测.

圆板形发射/接收共用换能器向水中发射窄波束短声脉冲, 并接收从观测的锥壳内的泥沙颗粒散射的声信号. 换能器将其转换为电信号, 经过放大、滤波、包络检波、平滑滤波后, 用 A/D 转换器转变成数字信号, 可在屏幕上显示出实时观测的悬浮泥沙浓度分布的彩色图像, 同时存入 PC 机的磁盘中, 以便作定标和补偿处理、窗口统计平均处理, 从而得到浓度剖面及其动态变化的曲线、图表、图像^[1].

3 ASSM 系统的设计

根据 Urick 所著书中的声纳方程, 考虑到观测水中悬浮泥沙的具体条件, 列出设计 ASSM 系统的声纳方程^[2,11]. 条件为: (1) 在大部分情况下, 声场满足远场条件, 距离 $r > r_n$, $r_n = \pi D^2 / (2\lambda)$, D 为圆形换能器直径, λ 为声波波长. (2) 声波在海水中传播的衰减由扩展和吸收决定. (3) 悬浮泥沙颗粒的物理特性一致, 粒径基本一致 (即其分布的均方根偏差比平均粒径小得多). (4) 海洋背景噪声比仪器的电噪声小得多, 而电噪声是白噪声. 在另文^[1]中推导出设计声学悬浮泥沙观测系统所用的声纳方程为

$$\begin{aligned} DT &= RL - NL \\ &= (10\lg P - 20\lg r - 2\beta r) + (10\lg \tau - 40\lg \lambda - 10\lg W) \\ &\quad + (10\lg C + 30\lg d) + 115, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, DT 为检测阈, 应大于 10, 单位为 dB; RL 为接收到的信号强度级, 单位为 dB; NL 为噪声级, 单位为 dB; P 为发射声功率, 单位为 W; β 为声波在水中的吸收系数, 单位为 dB/m; τ 为发射声脉冲持续时间, 单位为 s; W 为观测系统的通频带, 单位为 kHz; C 为悬浮泥沙浓度, 单位为 kg/m^3 ; d 为悬浮泥沙的平均粒径, 单位为 m. 在方程右边第二个括号内的参数 f 、 τ 、 W 及圆形换能器直径 D 都是观测系统的设计参数, 第三个括号内的参数则是悬浮泥沙的物理参数. 给定这些参数, 就可从第一个括号内计算出相应探测距离 r 的声发射功率 P .

首先确定最佳工作频率. 在声纳方程各参数中, 吸收系数 β 是频率 f 的函数, 由 Shulkin-Marsh 公式^[2], 给定声发射功率 P , 对 f 求导可得最佳工作频率^[1]:

$$f_0 = 3.85 \times 10^3 / \sqrt{\tau}. \quad (2)$$

在表 1 中给出了对应于不同观测距离 r 的最佳工作频率. ASSM 系统设计时所选工作频率为 500 及 1 500 kHz, 分别对应于观测距离为 60 及 6.6 m.

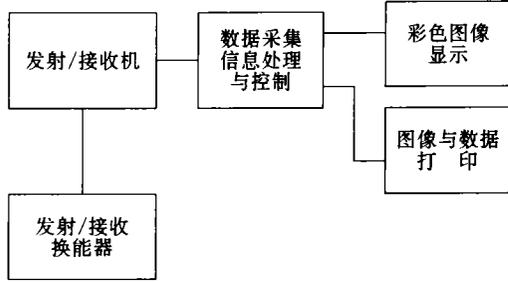


图 1

1) 张叔英, 李允武. 悬浮泥沙声学观测的原理分析. 声学报 (待发表).

表1 最佳工作频率

观测距离 r (m)	1.0	1.5	3.0	10.0	20.0	30.0	60.0	150.0	250.0	350.0
最佳频率 f_0 (kHz)	3 900	3 100	2 200	1 200	860	700	500	310	240	210

声脉冲持续时间 τ 由观测分辨率决定. 在匹配接收的情况下, 观测系统通频带 W 与声脉冲信号的带宽相等, 即 $W=1/\tau$. 观测的最小分层厚度 Δr 由 τ 决定:

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} = 750\tau, \quad (3)$$

或

$$\Delta r = \frac{0.75}{W}, \quad (4)$$

式中, c 为水中声速, 其平均值为 1 500m/s. 选分层厚度为 1.5cm, 脉冲持续时间为 20 μ s, 带宽 $W=50$ kHz. 声束的宽度为

$$\theta = \frac{59\lambda}{D}. \quad (5)$$

将典型的观测技术要求即最小可观测浓度 $C=0.1$ kg/m³、泥沙平均粒径 $d=5$ μ m 代入式 (1), 可求得表2所示的设计参考数据.

表2 设计声学悬浮泥沙观测系统的参考数据

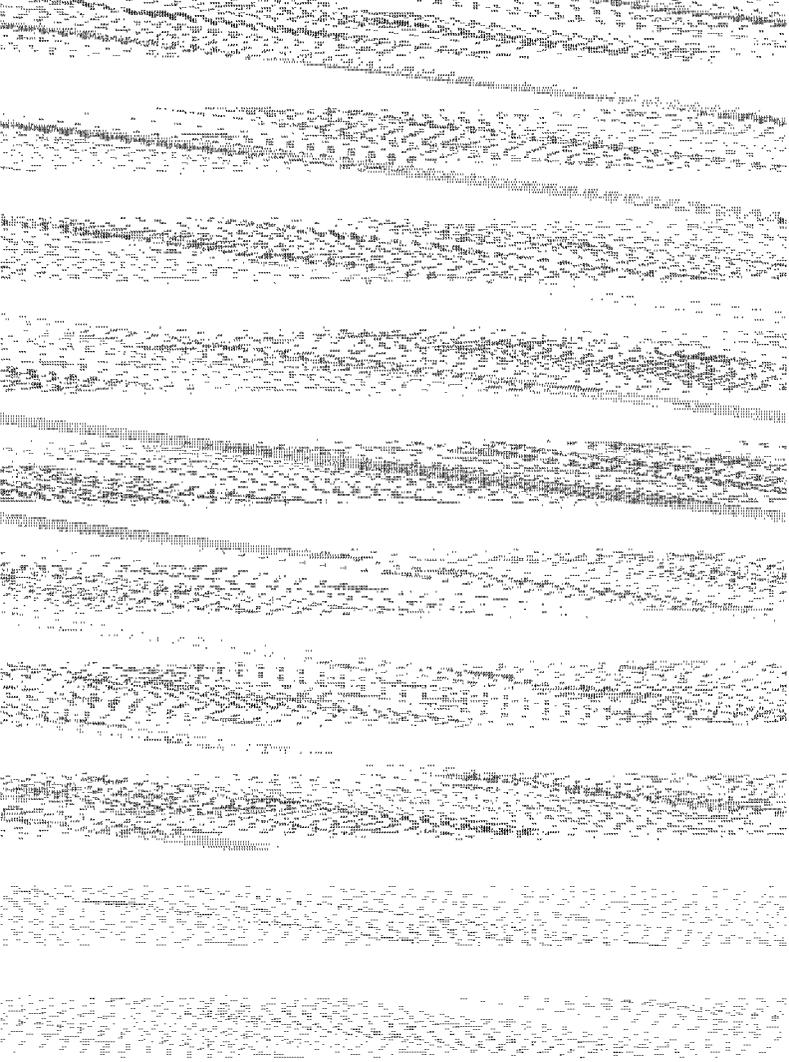
1 频率 f (kHz)	2 波长 λ (cm)	3 换能器直径 D (cm)			4 远场区界限 r_n (m)			5 声衰减系数 β (dB)	6 $10\lg P - 20\lg r$ $-2\beta r$ (dB)
		1.5°	3°	5°	1.5°	3°	5°		
150	1	40	20	12	25.7	6.4	2.4	0.056	8
200	0.75	30	15	9	18.9	4.7	1.7	0.069	3
250	0.6	24	12	7.2	14.8	3.8	1.4	0.080	-1
300	0.5	20	10	6	12.8	3.3	1.2	0.091	-4
400	0.375	15	7.5	4.5	9.4	2.4	0.85	0.114	-9
500	0.3	12	6	3.6	7.5	1.9	0.68	0.142	-13
750	0.2	8	4	2.4	5.0	1.3	0.45	0.235	-20
1 000	0.15	6	3	1.8	3.8	0.94	0.35	0.364	-25
1 500	0.1	4	2	1.2	2.6	0.64	0.24	0.730	-32
2 000	0.075	3	1.5	0.9	1.9	0.47	0.17	1.24	-37
3 000	0.05	2	1	0.6	1.3	0.33	0.12	2.71	-44

注1: 在下述典型情况下算得本表中的数值 [$\theta=59\lambda/D$, $r_n=\pi D^2/(2\lambda)$]; 探测阈 $RL-NL=10$ dB, ($NL=70+10\lg W$), 海水盐度 $S=35$, 悬浮泥沙浓度 $C=0.1$ kg/m³, 平均粒径 $d=5$ μ m, 声波束宽度等于 1.5°、3°、5°, 声脉冲持续时间 $\tau=20$ μ s, 接收机通频带 $W=50$ kHz.

注2: 在实际设计时, 根据 $P \propto \tau^{-1}$, W , C^{-1} , d^{-3} 的比例关系来改变表中第6列的数值.

4 统计平均

为了减小瑞利分布的反向散射信号包迹的统计误差, 在每一个观测时间 T 内发射如图2



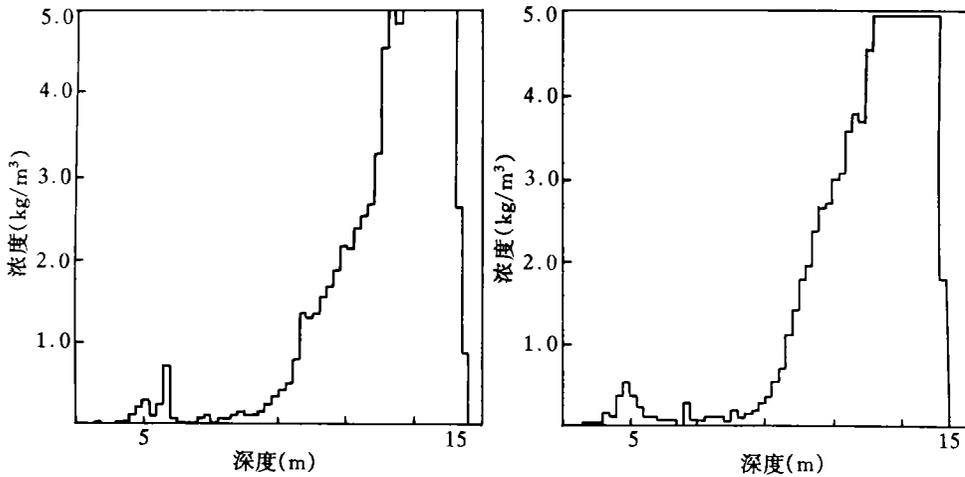


图 4

高, 浓度剖面由海面至海底呈指数形式增加; 在平潮时中间有高浓度浮泥层, 还发现在浓度不同的层间有内波^[4]。这些结果说明声学悬浮泥沙观测系统是研究泥沙沉积动力学和海岸工程不可缺少的技术手段。

参加研制 ASSM 系统的有东海研究站的任来法、凌鸿烈、刘守华、王志诚、曹民等及海洋技术研究所的张嫦娥、吴世海等, 在此表示感谢。

参考文献

- 1 任来法, 凌鸿烈, 刘守华等. ASSM—I 型声学悬浮泥沙观测系统. 声学技术, 1996, 15(2): 68~72
- 2 Urick R J. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill Book Co., New York, 1983
- 3 郭纪捷, 任来法, 李允武. 声学悬浮泥沙观测数据现场定标研究. 海洋学报, 1998, 20 (5): 120~125
- 4 Shi Zhong, Ren Laifa, Ling Honglie. Vertical suspension profile in the Changjiang Estuary. Marine Geology, 1996, 130, 29~37
- 5 Zhang Shuying. Progress in underwater acoustics geo-mapping technology. Acoustics Australia, 1996, 24, 47~51

Development and application of an acoustic suspended sediment monitoring system

Zhang Shuying,¹ Li Yunwu²

1. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032
2. Institute of Ocean Technology, State Oceanic Administration, Tianjin 300111

Abstract—An acoustic suspended sediment monitor (ASSM) has been developed for the observations of suspended sediment concentration profilers in water, monitoring pollutants in water and for the studies of coastal sediment transportation and deposition. The determination of main technical parameters and the methodology of resolving key techniques are reviewed. The ASSM was applied to observe the suspended sediment in the

Changjiang River Estuary, typical suspended sediment concentration profilers are obtained.

Key words Acoustic observation, suspended sediment