

声学多普勒原理在测量海流中的某些问题*

孔德裕 邱树松 刘裕锐

(中国科学院海洋研究所)

我们曾使用转子式海流计在天津新港测量过海底泥沙的淤积,因泥沙的附着和对转子机械零件的磨损等原因而使测得结果极不可靠。此后,我们开展了声学多普勒测流仪器的研制。利用多普勒原理测流时,机体不会影响流速场的固有特性,并可得到每秒毫米级的流速^[1]。泥沙及生物附着都不会影响测量结果。在河口、港湾等浅水海区更能发挥仪器的优点。

六十年代初,国外已有人从事这方面的研究。Chalupnik et al.^[1], Kozzy et al.^[2], Kronengold et al.^[3], Vlask^[4] 等人的研究已取得相当的进展。至七十年代, Kaisude^[5] 曾用他研制的仪器在海上对风浪运动做过实验性的观测。Rasmussen et al.^[6] 也曾将他们研制的仪器置于海洋测量浮标上做过实验性的观测,取得了良好的结果。由于一些技术问题,目前这类仪器还未能达到实用阶段。

本文主要叙述自1976年以来我们所做的工作、遇到的一些问题以及对这些问题提出的解决办法和探讨性意见。

一、仪器的工作原理

在自然条件下,海水中含有相当数量的悬浮物质,包括生物和矿物颗粒、风浪和生物的生命活动所产生的气泡以及海水物理参量在空间分布上的不均匀等,这些都会使声波在传播过程中产生散射。当散射体小至某一尺寸或比重与海水相近时,此散射体可长时间悬浮水中而成为利用声散射测量海流的有利条件。图1为此测量原理的几何图形。T及R分别为发射换能器和接收换能器, V_{ABNS} 为两声束的交会区即测量区,其计算体积为 0.7cm^3 。在此体积内有无数个散射体随海水一起移动,并散射来自发射换能器的频率为 f_0 的声波。当此散射体与接收换能器间的相对速度为 u 时,则接收到的信号频率为 f'_0 。若 $f'_0 > f_0$,多普勒频移 Δf 由公式

$$\Delta f = f'_0 - f_0 = 2f_0 \frac{u \cos \theta}{c} \quad (1)$$

确定。式中 c 为声波在海水中的传播速度(m/s), u 为海水及散射体对接收点的移动速度(m/s), θ 为水流方向与接收声束间的夹角。

在实验中, Δf 始终是以谱的形式出现的。由于测量区有空间,其中散射体的尺寸和有效散射面以及移动的速度和方向都不尽相同, Δf 不可能是单一的频率。散射体的有效

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第754号。

参加本实验前期工作的还有张绍良、胡平和宋政修。

本刊编辑部收到稿件日期: 1981年5月3日。

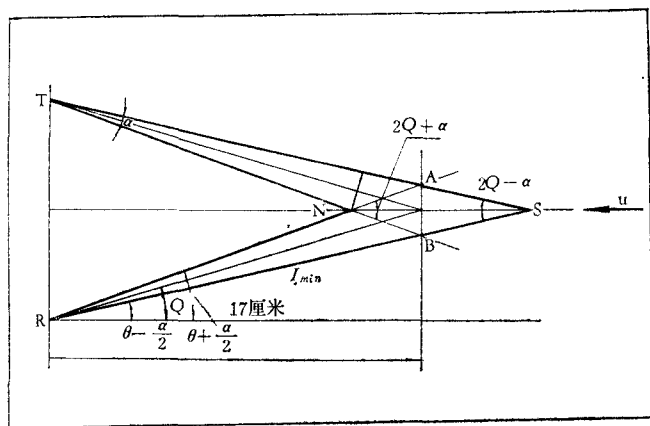


图1 两声束交会的几何图形

面积决定着 f_0 的幅度,进而决定输出信号的幅度,而与 Δf 的数值无关^[7]。如以 $f_0=7.4\text{MHz}$ 与 3.0KHz 相比,在同一情况下,前者散射强度约为后者的 10^5 倍,而其吸收衰减,如按 $\beta = 4 \times 10^{-13} f^2 (\text{dB/m})$ 计算,前者只为后者的 22 倍。可见当频率增加时,声波散射的增大远快于其衰减的增大。因此,采用较高频率时的多普勒方法测量海流是可取的。

如图 1 所示,同一声波波阵面由 N 处比由 S 处散射至接收点约早 $27\mu\text{s}$ 。若散射体是沿着交会区的中线向着接收点方向以 u_c 速度移动,则以 N 与 S 两点为几何界限而接收到的多普勒信号扩展为^[6]

$$\Delta f' = 2f_0 u_c \left[\cos\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) - \cos\left(\theta + \frac{\alpha}{2}\right) \right] / c = 4f_0 u_c \left(\sin\theta \sin\frac{\alpha}{2} \right) / c \quad (2)$$

与 (1) 式相比, (2) 式所表达的是多普勒信号的一段谱的范围。若在测量区 V_{ABNS} 内尚存在另一垂直于 u_c 的位移速度 u_p , 则 (2) 式应改写为

$$\begin{aligned} \Delta f'' &= 4f_0 u_c \left(\sin\theta \sin\frac{\alpha}{2} \right) / c + 4f_0 u_p \left(\cos\theta \cos\frac{\alpha}{2} \right) / c \\ &= \frac{4f_0 \left[u_c \left(\sin\theta \sin\frac{\alpha}{2} \right) + u_p \left(\cos\theta \cos\frac{\alpha}{2} \right) \right]}{c} \end{aligned} \quad (3)$$

可见 (3) 式比 (2) 式在频谱方面有更大的扩展,更接近于实验。通常 u_p 可以认为是海水的垂直涡动,其量值远小于 u_c 。因此, $u_p \left(\cos\theta \cos\frac{\alpha}{2} \right) / c$ 项通常是以噪音的形式出现并与其他噪音混在一起形成背景噪音。在此情况下,单独取出 u_p 是困难的,只有采取另外的观测方式取得 u_p 的谱。

二、仪器描述

本仪器主要用于河口、港湾、河道等含沙量较大的水区,测量近底处每秒 1 米以内的流速和泥沙淤淤等,亦可对清静海水测量其流速瞬时值。仪器的外形为垂直使用的圆柱形,下部有一圆形底座,两个换能器在座前部并互成 20° 交角,后部有定向尾翼。用三角架悬吊将仪器沉于海底,通过电缆和一水密箱连接,箱内有电源、记录器和时序控制机构。

采用 7.4MHz 的连续声信号,使每秒 1 毫米的流速对应 Δf 约为 10Hz。 Δf 的变化范围为 50Hz—20KHz。换能器是直径为 10 毫米的 SF 型锆钛酸铅 $[\text{Pb}(\text{Zn} \cdot \text{Ti})\text{O}_3]$ 圆片,正极与海水相接。换能器部件由 M8 螺钉固定于底盘上,两换能器中间有一水温测头,其几何形状可隔离两声束间的副瓣干扰。换能器与底座间都隔有 5 毫米厚的橡皮垫环,用于水密和消除声的固体耦合。多芯电缆从底座引出,并通过仪器顶部的转环,在海水中具有 $4 \times 360^\circ$ 的旋转量。确定流向的磁罗盘在仪器的最上端,由一空心磁力线圈使磁棒倾斜而与一环形电阻接触;电阻的变化由一振荡器转变为频率变化而输出至磁带记录器内。这种结构可分辨 $\pm 5^\circ$ 的方位。

三、换能器与声流效应

通过实验对各换能器的功率、声束主副瓣和两声束在海水中的交会区进行估计和调整,在声束开角为 1.3° 的条件下,通过调整可得到满意的结果。

声波在介质中传播由于其非线性而使海水水质点自换能器圆心以法线方向向前喷射而形成一声流^[8]。如图 2 所示,此种现象会给流速测量引入相当误差以致得不出零流速时的信号。在发射换能器的前方注入墨汁,可以观察到此种声流流束的各种形状,可借此估计到各换能器的声特性。实验得知,频率为 7.4MHz 时,发射换能器的电功率为 1.5W,数秒钟后,直径约 1 毫米的流束可达 20cm/s,向前喷射远达两米。电功率为 1W 时,流束速度约为 6cm/s,电功率在 0.5W 以下时,流束速度即在 2cm/s 以下。由于换能器间的机电参数不同,其流束的形状及喷射速度亦各异,有些换能器总是出现两条并行的流束轨迹,在此被认为其主副瓣不明显而未被采用。



图 2 电功率小于 1 瓦时的声激流流束

四、声束交会区的调整

各换能器的主瓣未必一定通过其圆心并与法线重合,虽然在工艺上做了精密加工也难以保证安装于底座之后两声束一定相交。因此,还需用声流成像法进行最后调整。此法直观可靠,任何操作引起的水涡动都不会给校正引入误差。置仪器于划有基准线的专用水槽内,在两换能器正前方交会区距离之内置一划有方格的平板,板后倾约 30° ,板上敷以直径为 0.005 毫米的沙粒,厚约 0.3—0.5 毫米。两换能器同时各加约 1.5W 的电功率,

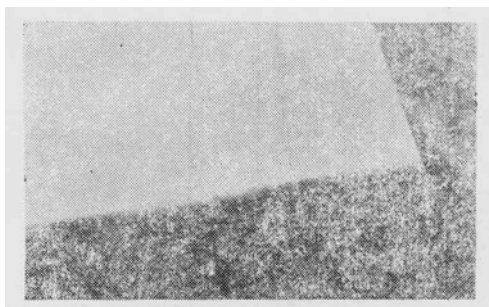


图3 电功率为 1.5 瓦时流束驱开的沙洞

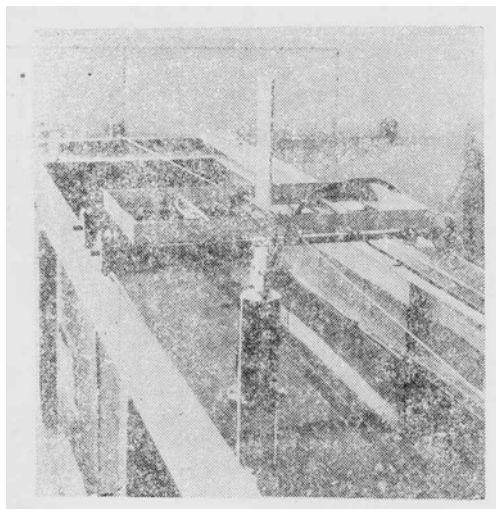


图4 实验水槽及拖曳行车

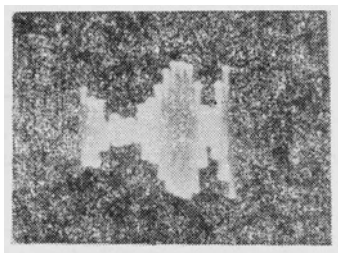
数秒钟后,斜板上即出现由流束驱开的圆形沙洞,直径约 4 毫米,如图 3 所示。若开机后的持续时间相同,此两圆洞的形成和形状也大致相同,由此可估计这两个换能器的特性相近。如某一圆洞的边界不清或成椭圆形,则此换能器即不能采用。沿基准线向外平移斜板可使两洞趋于一点,此即交会区。如不重合,可通过螺钉调整。在仪器的正常使用中,降低电功率至半瓦以下,对此交会区并无影响。采用此声学直观方法调整交会区,可使两声束达到 90% 以上的重合,此时的接收信号比 10% 以下重合者大出 20 分贝以上。

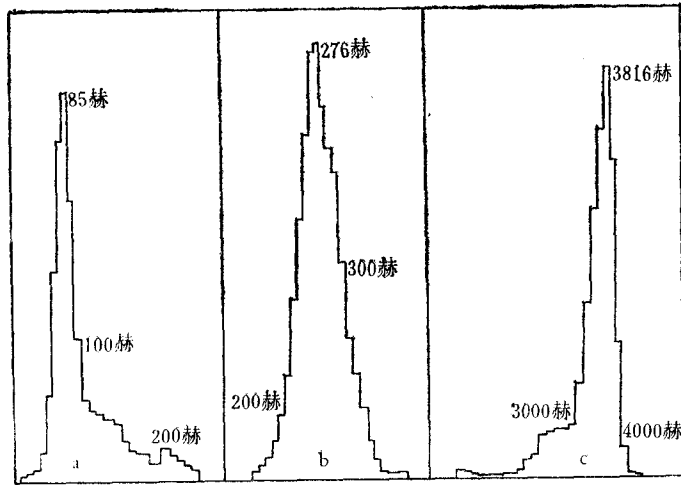
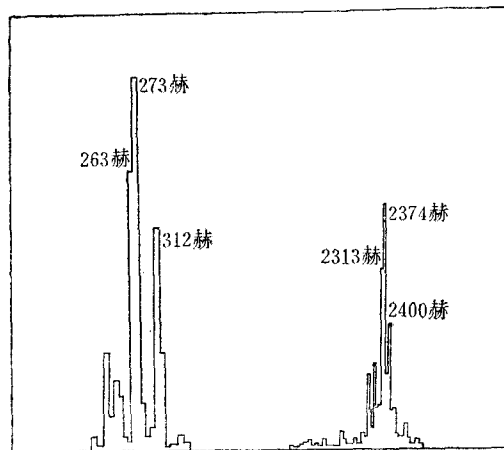
五、水槽实验

室内实验水槽为 $3 \times 0.7 \times 0.7$ 立方米塑料水槽,内壁附有吸声橡胶板。实验时加 $3 \times 0.7 \times 0.4$ 的洁净饮用水。水槽外有一独立框架,以防震动影响水体,架上有导轨及曳行车。仪器固定在行车上,换能器处于水体的中间位置。如图 4 所示。行车速度在 1—40cm/s 间连续可调。

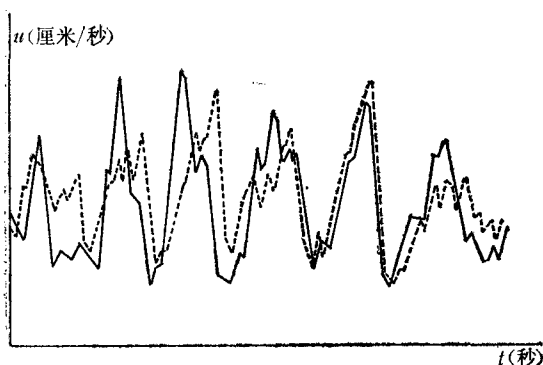
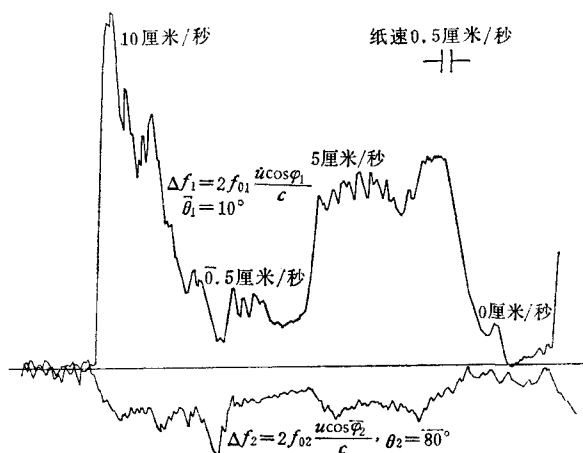
1. 拖曳速度 u 与输出信号 Δf

行车的拖曳速度 u 可认为是仪器与水体间的相对位移速度,取平均值。 Δf 信号如图 5 所示,由打印机打印,每一速度 u 对应许多 Δf 的打印值, u 与 Δf 的平均值间为一线性关系。但 Δf 的实测值总低于按公式 (1) 所得的计算值。当行车至水槽一端约半米处时,反射信号增大,此时 Δf 的实测值与计算值一致。一般讲,在这种测量水流的仪器中,接收信号是来自交会区的容积散射的多普勒信号。在许多个单一的多普勒信号间,既有频率的也有相位的差别,使图 5 所示的 Δf 及其幅值随时间而变化,并形成脱落,当此信号在计数仪表的输入计数电平以下时,仪表即无指示。实验得知,对反射的多普勒信号,此种幅值的脱落对其幅值可以忽略。图 6 及图 7 分别为水槽及海上取得的 Δf 的谱,二者在谱分析中皆包含了 Δf 幅值的脱落。曾用两只相同的仪器相并地固定在同一行车上拖曳,以检查 Δf 中的脱落和

图5 测量时的 Δf 信号

图6 水槽实验取得的 Δf 的谱图7 海上实验取得的 Δf 的谱

Δf 是否真实反映水体运动, 两个输出信号由一双笔记录器通过对 Δf 的时间积分后同时记录, 曲线如图 8 所示, 两条曲线的趋向表明仪器的输出信号是可以信赖的, 在无法取得瞬时参考值的情况下, 只能采用此法进行相对参考。曲线幅值变化表示行车拖曳速度是脉动的。图 9 所示为固定在行车上并互成 90° 角的两仪器在拖曳时所取得的信号曲线。上方曲线为与车向一致的仪器 ($\theta_1 = 10^\circ$) 所得, 下方曲线为面对槽壁而与车向垂直的仪器 ($\theta_2 = 80^\circ$) 所得。车速分别为 0.5、5 和 10 cm/s。两曲线在左方当车速为零时重合, 因槽壁有反射信号且 $\theta_2 \approx 90^\circ$, 下方曲线不为零。此为独立的两仪器所组成的二维测量方法, 表明 (3) 式中 $u_c \left(\sin \theta \sin \frac{\alpha}{2} \right) / c$ 项为零时, 有可能取得 $u_p \left(\cos \theta \cos \frac{\alpha}{2} \right) / c$ 项, 即可用此法测量海流的某一分量的变化。

图 8 在同一 u 中两仪器输出曲线图 9 互成 90° 角的两仪器在同一拖曳速度下的输出曲线

2. 零流速信号与声流

当海水静止时,仪器应给出 $\Delta f = 0$ 的信号。如上所述,只有将发射换能器的电功率降至 $0.5W$,使声流小至可以忽略时才能给出 $\Delta f = 0$ 。功率在 $0.5W$ 以上时,在静止水中仍有几百 Hz 信号输出。相当于 $10cm/s$ 以上的流速值。实际上,接收是在有背景噪音的干扰下进行的。干扰主要来自发射信号的混响,即经过散射并衰减至某一强度以下的发射信号 I_T ,和与发射信号无关的自然噪音 I'_T 。总噪音 $I_N = I_T + I'_T$,若接收换能器所能收到的最小声强为 I_{min} ,则 $\delta = I_{min}/I_N$ 相当于电信号中的信噪比 $F = S/N$ 。接收换能器是否能正常工作主要取决于 I_{min}/I_N ,而非 I_{min} 的绝对值。根据实验, $7.4MHz$ 的噪音主要来自其混响。因此在一定范围内改变发射功率对 δ 或 F 并无多大影响。所以,放大器的增益和交会区的真正重合显得非常重要。根据声学公式和已知参数,由 V_{ABNS} 散射到接收换能器 R 面上的那部分声波,其最小声强为:

$$I_{min} = \frac{P\gamma S_p\eta}{(4\pi)^2 D^4} \times 10^{-7} \times 10^{-0.1\beta D} (W/cm^2)$$

式中 P 为发射功率,在此为 $0.1W$ 。 D 为换能器至交会区中心的距离,为 $17.2cm$ 。 γ 为换能器的集中系数,为 $15,750$ 。 S_p 为散射体与入射波阵面相对位置有关的总有效面,根据

实验,估算为 0.001cm^2 。 η 为散射体对声波的吸收特性参数,在此取 $\eta = 1$,即没有吸收。依次计算,当发射电功率为 0.5W ,声功率为 100mW 时,换能器收到的散射信号其强度 $I_{100} = 5 \times 10^{-15}(\text{W}/\text{cm}^2)$,此即图 1 中粗线所示最小声强 $I_{\min}$ 。在实验过程中,仪器能满意地收到此 $I_{\min}$ 信号。在此情况下,声流和换能器间的声固体耦合及副瓣干扰等都可忽略。因此,采取降低发射功率以消除声流影响来取得海水静止时的信号是可行的。

海水中散射体尺寸相差很大,当有效面 S_p 接近于图 1 所示的声束的某一横截面时,声束的形式被破坏,交会区不再存在,声波可能直接反射至接收器,此反射信号远大于散射信号,使 Δf 信号的幅值急剧增大,在室内外的几次实验中都出现过这种现象。若此反射体的移动速度与海水一致,则 Δf 信号输出即无频率影响;若反射体为自游生物,移动速度不同于水体,则对 Δf 信号的频率及幅度皆有影响。

仪器测量的下限可达 8mm/s ,最小可达 4mm/s ,这时取决于检查设备的性能。图 6 a 所示为 u 近于 9mm/s 时的信号谱。 10mm/s 以上的信号易于处理。

六、海上实验

先后用三种方式进行了三次海上实验,其中两次为用三角架敷设于海底,一次由船上放于海中。船上的实验,信号中除海流外还包含了船只浮动的分量。在 Δf 信号中总有周期性的频移并与船浮动相对应。 Δf 信号为零差拍输出,无法取得负信号,因而 Δf 变化的周期恰为船只浮动周期的两倍。最后一次海上实验是将仪器敷设于海底,通过电缆在一水密箱中由时序控制机构控制记录的。敷设地点距岸两公里,水深 6—9 米,仪器每小时记录两分钟,其中 10 秒钟为流向,共取得了三十小时的记录。记录分析发现,当时海面 0.5—1 米波高的风浪已经影响到了海底,在低潮位时最为明显。图 7 为记录的频率谱。因无其他获取流速瞬时值的仪器,所以无法对实测记录做出定量的鉴定。但根据水槽实验,此海上记录是可以信赖的。

除海上实验外,还在河道及水库中进行过实验,以检查仪器在泥浆中的工作情况和在静止水中的输出信号。在水库实验中发现,除表示当时水静止的零输出信号外,还经常出现非零的脉动信号,如图 10 所示,其幅值达 20—30dB。持续时间从几毫秒至几百毫秒。因水是静止的,即输出端 $\Delta f = 0$,所以上述脉动信号容易被发现。通过现场观察和对记录分析认为,此种非零值脉动信号是水中自游生物在仪器附近的运动引起的。可估算出生物体的大小和游动速度。图 10 右方可能是生物体运动造成的水涡动而出现的干扰信

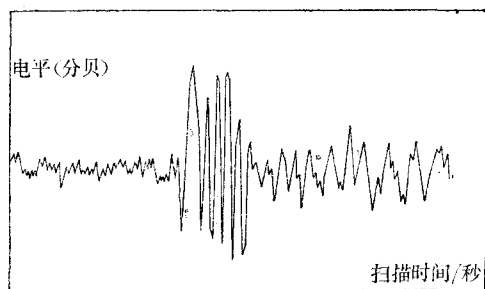


图 10 零信号中的非零脉动

号。估计此种现象在海中也可能存在。因此, 自游生物与悬浮的生物体混在一起可以在相当大的范围内影响到仪器的正常测量, 引入相当大的误差。这种影响在使用转子式海流计时是不存在的。

七、结 论

1. 发射换能器在工作时所产生的声流对低流速的测量会引入误差, 并得不出水静止时的信号。降低功率至一定额使声流小至可以忽略, 接收器仍能满意地收到散射信号。

2. 提出了利用声流成像的方法校正交会区。可使两声束达到 90% 以上的重合, 并在校正过程中可观察到换能器的某些特性。

3. 用模拟量的零差频输出, 不可能取得流速的反向值。信号幅值的脱落使频率的计数偏低。因此, 本仪器只能取得 4mm/s 以上的流速信号。在海水及泥浆中都能正常工作。

4. 海上测量及在水槽中做的单、双仪器对比实验, 都可以表示出所得到的 Δf 信号是真实的。本仪器可取得流速的瞬时值和短时间的脉动值, 也可测量水流的某个分量。

5. 磁罗盘有 $\pm 5^\circ$ 的分辨能力, 在资料中, 流向为单一的瞬时值, 与流速不同时, 会引入误差。当流速很小时, 仪器尾翼的定向能力降低, 测值误差加大。

6. 海中的自游生物可能对这种测量造成危害, 自游生物在仪器附近的活动会给测量结果带进误差。

参 考 文 献

- [1] Chalupnik, J. D. and P. S. Green, 1962. A Doppler-shift ocean-current meter, *Marine Sci. Inst.* 1, Instrument Soc. America, Plenum Press, New York, pp. 194—199.
- [2] Kozzy, F. F., M. Kronengold and J. M. Loewenstein, 1963. A Doppler current meter, *Marine Sci. Inst.*, 2, Instrument Soc. America, Plenum Press, New York, pp. 127—134.
- [3] Koronengold, M. and W. Vlask, 1965. A Doppler current meter. *Marine Sci. Inst.*, 3, Instrument Soc. America, Plenum Press, New York. pp. 237—250.
- [4] Vlask, W., 1968. Further development in the Doppler methods of water velocity measurement, *IEEE Trans. on Geosci. Electronics* GE-6(4): 197—204.
- [5] Kaisude Taira, 1971. Wave particle velocities measured with a Doppler current meter. *J. Oceanogr. Soc. Jap.* 27(5): 218—232.
- [6] Rasmussen, R. A. and N. E. Head, 1976. Characteristics of high-frequency sea reverberation and their applications to turbulence measurement *J. Acoust. Soc. Amer.* 59(1): 55—60.
- [7] Emmanuel, C. B. and P. A. Mandies, Feasibility of underwater current measurement using acoustic Doppler technics. Office of Weather Modification, Wave Propagation Laboratory, NOAA/ERL, U. S. Department of Commerce, Boulger, Colorado. 80302. pp. 59—63.
- [8] Nyborg, W. L., 1965. Acoustic streaming, physical acoustics, principles and methods, Vol. II, Part B. Academic Press, New York. pp. 266—330.

SOME EXPERIMENTS ON THE DOPPLER METHODS OF WATER CURRENT MEASUREMENT*

Kong Deyu Qiu Shusong and Liu Yurui

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

A lot of mineral particles in shallow water may damage the bearing and pivot of the Savonius roter type devices and would necessitate the securing of sensors to the bottom surface. Under existing conditions remote sensing technique represents an attractive alternative.

A monostatic short-range current meter has been designed employing the Doppler frequency shift principle to determine the current velocity and the particle movement near the bottom. Water current velocities are measured by projecting a 7.4 MHz acoustic beam and determining the Doppler shift frequency in the backscatter from a probe volume intersected by two beams. When measurements near the bottom surface are desired, a single remote sensor may provide the information normally gathered by a number of in-situ measurements. Data have been collected in three ways in shallow water of Jiaozhou Bay since last year.

Analogous experiments on acoustic streaming that enhanced the signal output in 0 cm/s of water flow were carried out in water at 7.4 MHz. Velocity measurements were made through visual timing the passage of black ink between fixed points. The intersection volume has been adjusted exactly through two holes imaged by two streamings from projecting and receiving transducers to a front slant covered with clay particles of 0.2—0.5 mm thick. The transmitting electric power was reduced slightly below 0.5 watt to minimize the influence of acoustic streaming on zero output.

Numerous experiments have been done on the related measurements in a towing tank in visualization. Any movement of fishlike zoon in sea water around the instrument will make a false Doppler frequency shift in the received signal.

Breif discussions on the transmitting power, beam pattern and streaming of the instrument are included in this paper.

* Contribution No. 754 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.