

相关测速声纳工作原理及海试验证

冯 雷, 王长红, 汪玉玲, 邱 薇

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

摘要:“波形不变性”原理是相关测速声纳的基本工作原理,利用射线声学方法对此原理进行了论述。分析了相关测速声纳的两种设计思路:时间相关和空间相关。提出了采用空间相关的思路设计相关测速声纳样机的具体方法,包括阵型设计、信号设计和软件工作流程,并分别在西太平洋和中国南海进行了两次试验。将海试数据结果与声多普勒流速剖面仪和差分 GPS 从速度大小和方向上进行了比较,证明了相关测速的可行性,验证了流混响和底混响的相关理论模型、声纳阵设计以及信号处理方法的正确性。

关键词: 相关测速声纳;“波形不变性”原理;海上试验

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2005)02-0070-06

Velocity measurement with correlation sonar and sea test verification

FENG Lei, WANG Chang-hong, WANG Yu-ling, QIU Wei

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: ‘Waveform invariance’ is the basic principle of correlation sonar. A ray theory based method is adopted to explain the principle. Two approaches, temporal correlation and spatial correlation, to the design of correlation sonar are analyzed. Criterion for designing a prototype based on spatial correlation is proposed, involving transducer geometry, signal design and software process. The prototype correlation sonar has undergone two tests at the west Pacific Ocean and the South China Sea respectively. Correlation function of the test data is used to confirm the ‘waveform invariance’. By comparing the velocity results obtained by the correlation sonar with those by acoustic Doppler current profiler (ADCP) and differential GPS (DGPS) respectively, the feasibility of the correlation sonar for measuring current velocity and ship velocity, the design principles, and signal processing techniques used are verified.

Key words: correlation sonar velocity log; ‘waveform invariance’; sea test

1 引 言

利用声学原理进行绝对测速的技术始于 20 世纪 70 年代^[1],测速声纳主要包括测量流体速度的流速剖面仪和测量载体速度的计程仪。到目前为止,利用多普勒原理工作的多普勒测速声纳已得到了广泛应用,其技术日臻成熟;利用相关原理工作的相关测速声纳还处在研究和发展的阶段^[2-5]。

多普勒测速声纳使用 3~4 个换能器基元,向斜下方发射信号,波束开角较小,大约为 3°~7°;相关测速声纳使用 1 个发射基元和同平面的有限个接收基元,垂直向下发射信号,波束开角较大,一般为几十度。由于上述原因,相关测速声纳较多普勒测速声纳有如下优点:1. 在相同工作频率下,相关测速声纳的换能器阵比多普勒测速声纳的换能器阵小很多,适合于体积较小的载体(如水下自主航行器)或低频工作条件(用于测量较深散射体的速度);2. 相关测速声纳较多普勒测速声纳受载体姿态的影响小。

本文将在声相关原理和设计思路的基础上,提出我们在相关声纳方面取得的进展,以及 2002 年两

收稿日期:2004-07-20;修回日期:2004-10-15

基金项目:国家 863 计划资助项目(2003AA604030)

作者简介:冯雷(1977-),男,河南安阳人,博士研究生,研究方向:信号与信息处理。

次海试的试验结果。

2 相关测速声纳的原理及设计

2.1 声相关的基本工作原理

声相关的基本工作原理是“波形不变性”,这个原理适用于各种声波散射体,如流体或海底。不同的文献对“波形不变性”有不同的解释^[1-3],这里我们用射线声学对海底作为散射体的情形进行分析。



图 1 相关测速声纳阵示意图
Fig.1 Sketch of correlation sonar

为了说明简单,以一维阵为例(见图 1)。换能器阵由 1 个发射基元(T_0)和 2 个接收基元(R_1 和 R_2)组成。

图 2 是发射基元发射的声波在海底的散射区域示意图。换能器阵以速度 V 从左向右运动。位置 1 是发射基元 T_0 发射信号时换能器阵的位置;虚线部分表示时刻 t_0 发射第一个信号时换能器阵的位置;阴影部分表示 $(t_0 + \tau)$ 时刻发射第二个信号时换能器阵的位置。位置 2 是接收基元接收信号时换能器阵的位置;虚线部分表示第一个发射信号经海底散射区域散射,回波在时刻 $(t_0 + T)$ 到达基元 R_1 ;阴影部分表示第二个发射信号经海底散射区域散射,回波在时刻 $(t_0 + T + \tau')$ 到达基元 R_2 。黑点区为散射区域。设散射区域到换能器表面的距离为 H 。正常工作时,选择两次发射的时间间隔 τ 为一个小于传播时间 T 的值,即 $\tau < T$ 。

任意选择一个散射点来进行分析。声波路径如图 3 所示。与以前关于相关测速声纳原理的文章^[1-3]不同,我们利用解析几何方法进行讨论,简化后见图 4。A、B 分别代表发射基元 T_0 第一次和第二次发射时对应的位置,C、D 分别表示接收基元 R_1 和基元 R_2 接收回波时对应的位置。P 是散射点,散射点法线与换能器运动方向直线的夹角为 θ ,交点为坐标原点 O, H 是散射点深度。由解析几何的知识可得到下面的关系式:

$$|AB| = \frac{1}{\left(1 + \frac{|OC|}{H} \sin 2\theta\right) \left(1 + \frac{|OD|}{H} \sin 2\theta\right)} \quad (1)$$

在发射基元垂直向下发射的条件下,可以认为 $PA(s_1)$ 、 $PB(s_2)$ 、 $PC(s'_1)$ 和 $PD(s'_2)$ 与底深 H 属于

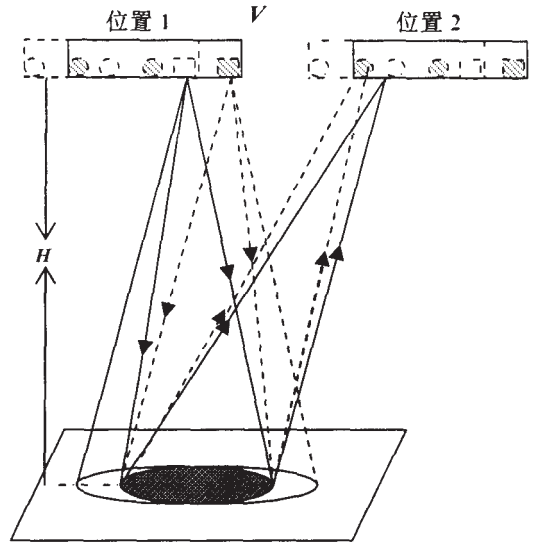


图 2 声波在海底散射区域的示意图
Fig.2 Path of scattered sound form the bottom

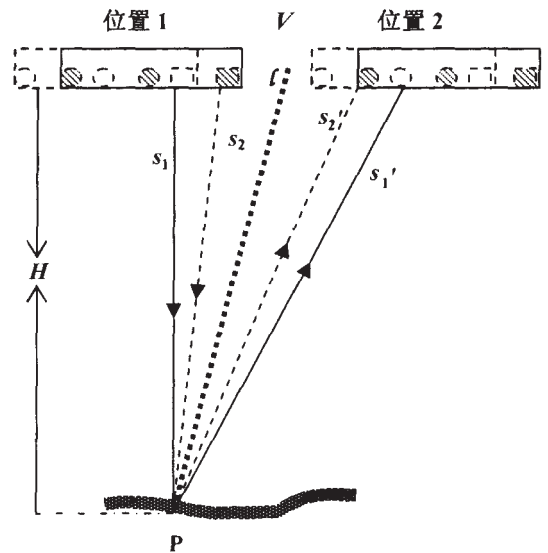


图 3 单个散射点回波路径示意图
Fig.3 Path of scattered sound from single scattering point

相同的数量级。 $|AC|$ 小于换能器在时间 T 内移动的距离,即 $|AC| < VT$ 而 $T = \frac{s_1 + s'_1}{c}$,所以有

$$\frac{|AC|}{s_1 + s'_1} < \frac{V}{c}$$

船速 V 和声速 c 相比是一个极小量,所以有 $|AC| \ll (s_1 + s'_1)$ 。同理 $|BD| \ll (s_2 + s'_2)$ 。所以 $|AC| \ll s_1$ 、 $|BD| \ll s_2$ (2)

由于 H 与 s_1 具有相同的数量级,进一步有 $|AC| \ll H$ 及 $|BD| \ll H$ 。所以

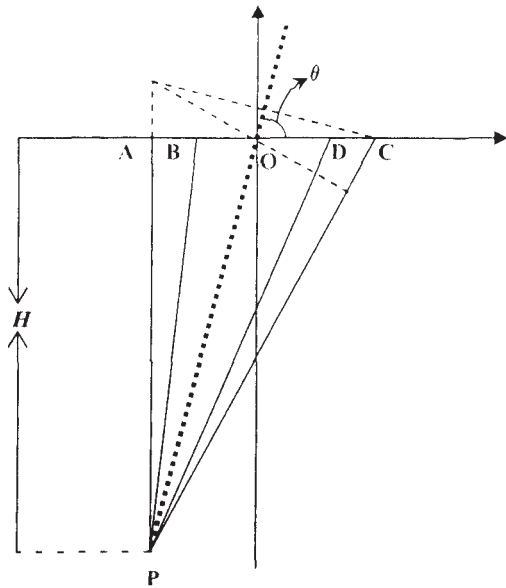


图4 单个散射点回波几何示意图

Fig.4 Geometry of echo from single scattering point

$$|OC| \ll H, |OD| \ll H \quad (3)$$

由式(1)可以得到 $|AB| \approx |DC|$ 。从矢量角度看, $AB = V\tau$ 及 $DC = d_{21} - V\tau'$, 可得:

$$V\tau = d_{21} - V\tau' \quad (4)$$

其中, d_{21} 表示基元 R_2 到基元 R_1 的空间矢量。另一方面

$$T = \frac{s_1 + s'_1}{c} \text{ 及 } T + \tau' = \frac{s_2 + s'_2}{c} + \tau$$

所以有

$$\tau' = \frac{s_2 - s_1 + s'_2 - s'_1}{c} + \tau$$

由式(2)可知 $|AB| \ll s_1$ 及 $|DC| \ll s'_1$, 所以 $s_1 \approx s_2$ 及 $s'_1 \approx s'_2$ 。因此 $\tau' \approx \tau$ 。代入式(4)得到

$$V = \frac{d_{21}}{2\tau} \quad (5)$$

因此, 可以通过接收基元间矢量 d_{21} 和两次发射信号的时间间隔 τ 来确定载体速度 V 。

将单个散射点的分析扩展到整个散射区的情况, 可得到下面的结论: 当船速和接收基元的位置满足式(5)时, 两个接收基元在各自对应时刻接收的回波所对应的散射区域和回波的路径都有很大的相似性, 也即满足此时空条件的换能器阵将在一定的时刻由不同的接收基元得到相似的回波信号, 这就是“波形不变性”。下文将基元间矢量 d_{21} 称为相关矢量, 对应的延迟 τ 称为相关延迟。对于散射体为流层的情况, 相对简单些, 与底散射体的不同之处在于对回波有贡献的流散射体是球形的层^[1]

2.2 相关测速声纳的设计思路

由声相关的基本原理可知: 如果能够获得不同基元得到的具有相似性的回波所对应的相关延迟和相关矢量, 就可以得到换能器阵相对于散射体的运动速度。因此, 在将声相关技术应用于测速时, 可以采用两种思路来实现。

第一种思路: 在运动方向上放置两个接收基元, 位置固定, 也就是相关矢量固定。发射基元发射简单脉冲信号。两个接收基元接收回波并求两个回波的互相关函数, 找出相关最大值对应的延迟, 即相关延迟。代入式(5)可以求得速度。这种思路采用了在固定相关矢量的前提下, 对相关延迟进行搜索, 从而得到速度的方法。也称为时间相关的方法^[2]。可以看出, 这种方法的缺点在于: 当速度较小时, 对应的相关延迟较大, 这时相关延迟的搜索比较困难。在实际设计时, 因为船速由船头方向和船舷方向的两个速度分量组成, 所以一般在船头方向和船舷方向各放置两个基元分别测量两个方向的速度分量。也就是说需由四个接收基元组成。

第二种思路: 利用多个接收基元组成一个接收阵, 显然任两个基元之间产生两个方向相反大小相等的矢量, 所有基元产生的矢量构成一个矢量空间。发射基元发射两个具有固定延迟(相关延迟)的相同信号。求出各个通道接收回波在相关延迟处的互相关函数, 利用各个空间矢量对应的相关函数值搜索出互相关函数最大值对应的相关矢量。将相关矢量和相关延时代入式(5)中, 可以求得速度。这种思路采用了在固定相关延迟的前提下, 对相关矢量进行搜索, 从而得到速度的方法。可以称之为空间相关的方法^[3]。可以看出, 这种方法的缺点在于: 矢量空间中的最大矢量是一定的, 对于固定的相关延迟, 可以得到的最大速度也是一定的, 因此这种方法可以测得的速度是有范围限制的。在实际设计中, 可以充分考虑接收基元的个数、布局以及选择比较合适的相关延迟, 尽量满足指标要求, 使之能够测量要求的最大速度。

2.3 系统设计

用8个接收基元组成接收阵。图5是我们设计的一种换能器阵, 图中 $R_1 \sim R_8$ 代表8个接收基元, T_0 代表发射基元。其中8个接收基元形成的矢量空间如图6所示。相关延迟是由发射信号所确定的。发射信号可以由两个具有延迟 τ 的简单脉冲^[1]组成, 但这种发射信号会带来单个码元散射层间的混

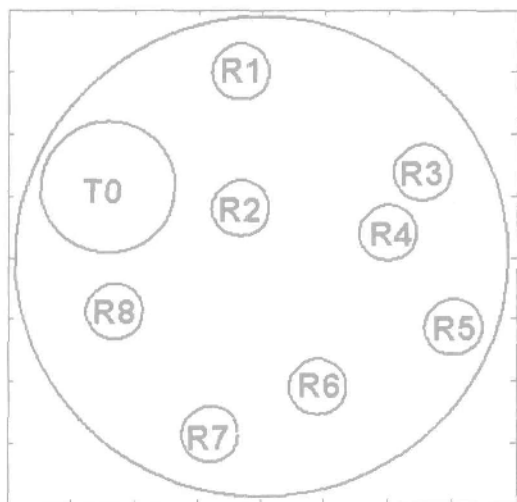


图 5 声纳基元分布示意图
Fig. 5 Geometry of correlation sonar transducers

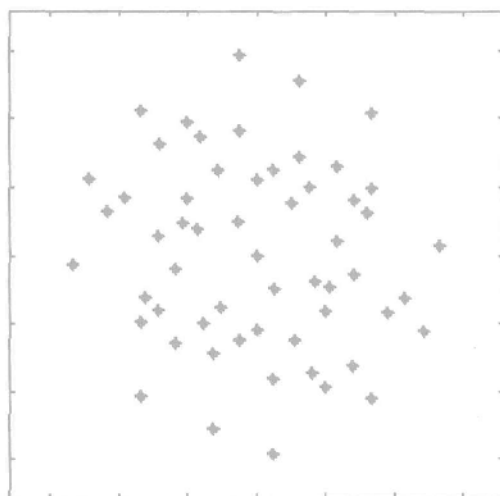


图 6 声纳接收阵空间矢量示意图
Fig. 6 Receiver vectors of a correlation sonar

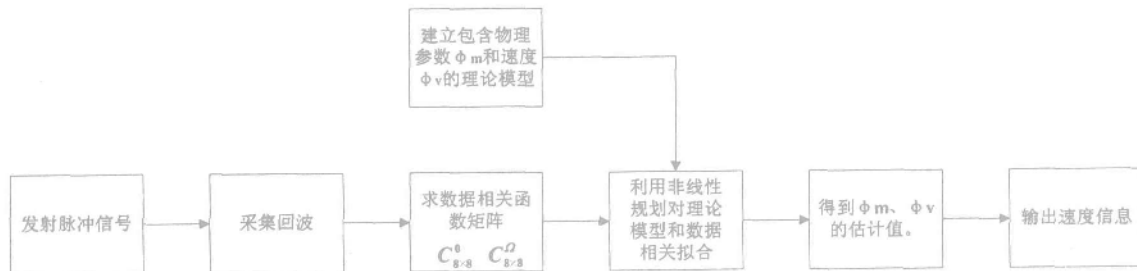


图 7 相关测速声纳工作流程图

叠。因此,我们设计了一种特殊的发射信号。这种信号的相关函数只在延时 0 和 τ 时出现远高于其他时刻相关值的峰值^[4],这个 τ 就是相关延时。

发射信号经底散射,回波被 8 个接收基元接收到。对 8 个通道的数据求互相关,可以得到延时为 0 的空间互相关函数矩阵 $C_{8 \times 8}^0$ 和延时为 τ 的空间互相关函数矩阵 $C_{8 \times 8}^\tau$ 。这两个矩阵包含了散射体的物理参数信息和散射体相对于载体的速度信息。流散射体和底散射体产生的混响具有不同的时空相关性,因此我们分别为流混响和底混响建立了各自的相关函数理论模型^[4]。利用优化方法将理论相关函数模型与数据相关函数进行拟合,最终得到物理参数和速度的估计值。考虑到模型的非线性,一般采用非线性规划方法进行拟合。整个工作流程如图 7 所示。

图 8 是由相关测速声纳样机海试获得的底回波数据得到的相关延时处各接收基元的空间相关函数经插值后的俯视图。其中灰度明暗对应相关值的大

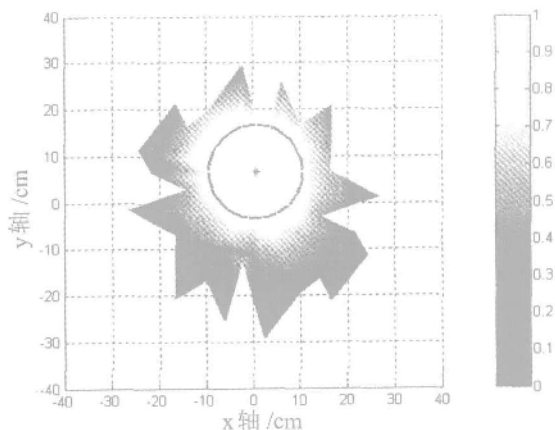


图 8 各通道接收信号相关延时处的互相关值俯视图
Fig. 8 Cross-correlation of 8 channels at τ

小。可以看到此时的相关函数峰值相对于坐标原点有一个明显的向上偏移,偏移是由散射体相对于载体的速度引起的,这和前面讲到的相关原理是一致的。此时的相关延时为 10.88ms,通过优化方法估计出的峰值偏移量即相关矢量的大小为 6.66cm(图 8 中圆中心黑点所在位置),由公式(5)得船速大小

为 306.07cm/s。相同时刻记录的差分 GPS 速度为 313.81cm/s,速度结果比较相近,这就对公式(5)的可行性进行了验证。

3 研究成果

3.1 试验设备

中科院声学所于 2000 年开始研制大深度声相关海流剖面仪 (Acoustic Correlation Current Profiler), 并利用相同的声纳系统进行声相关计程仪 (Acoustic Correlation Log) 的研究。整个相关测速声纳样机分为 2 部分: 1. 水下分机(湿端), 由内置前放及传感器的换能器阵、专用水密多芯电缆组成; 2. 水上的电子机箱(干端), 采用 VME 总线, 以 SHARC DSP 处理机为核心, 由数字平台、模拟分机构成, 完成信号的发射、采集、处理、存储和显示等。样机既可测量流场速度剖面, 也可进行底跟踪测量船速, 得到的船速经罗经修正为大地坐标速度, 进行计程。

3.2 试验介绍

相关测速声纳样机于 2002 年 1 月在黄海、东海和西太平洋进行了第一次海上试验^[5], 12 月在南海进行了第二次海上试验。两次海试都进行了测流速试验和底跟踪测船速试验。试验时船速范围为 0 ~ 600cm/s。试验海区的底深在 200m ~ 4000m 之间。

3.3 试验数据分析结果

3.3.1 ACCP 测量流速结果

图 9 是相关测速声纳样机西太平洋试验中的流速比测结果, 比测设备是 RDI 公司的 75kHz 相控阵声多普勒流速剖面仪 (ADCP)。流层深度为 250m, 比测时间大约 110min, 实线为 ACCP 的结果, 虚线为 ADCP 的结果。可以看到两者的比测结果比较接近。两者的不同主要是由它们所作用的散射体不同所引起的: ACCP 所作用的散射体是正下方的大开角对应的流层; ADCP 所作用的散射体是四个换能器倾斜方向的小开角对应的流层。

3.3.2 ACL 测量船速结果

图 10 是相关测速声纳样机南海试验在 3000m 深海域进行的底跟踪试验比测结果, 比测设备是 MAGELLAN SYSTEMS 公司的 DGPS - 1 型差分 GPS。比测时间大约 200min, 实线是 ACL 的船速结果, 虚线是 GPS 的船速结果, 阴影部分是底深度变化图。可以看到试验海区底深最大超过了 3500m。图 11 是 ACL 得到的船速计程后与 GPS 测量航迹的比较, 将近 30km 的航程, 终点累计误差为 350m, 相

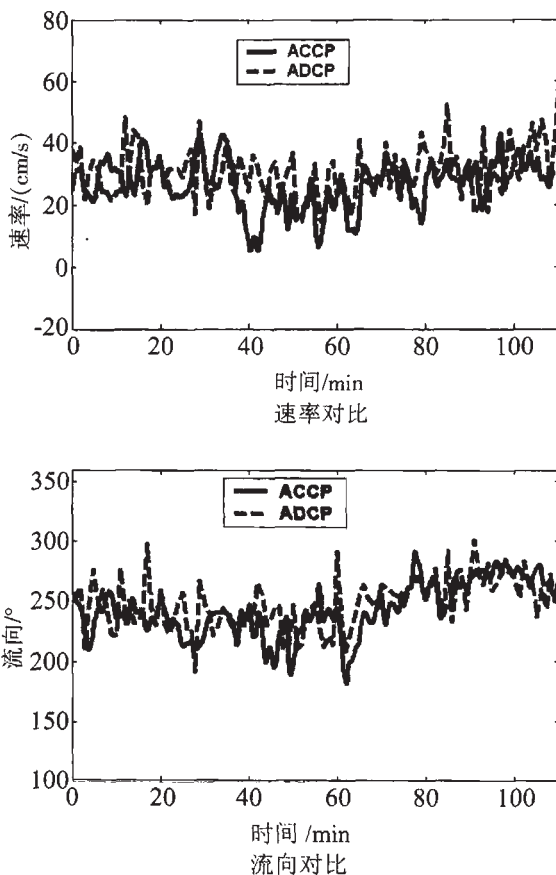


图 9 ACCP 和 ADCP 测量 250m 深水层流速对比
Fig.9 Comparison of velocity measurements from flow layer at 250m by ACCP and ADCP

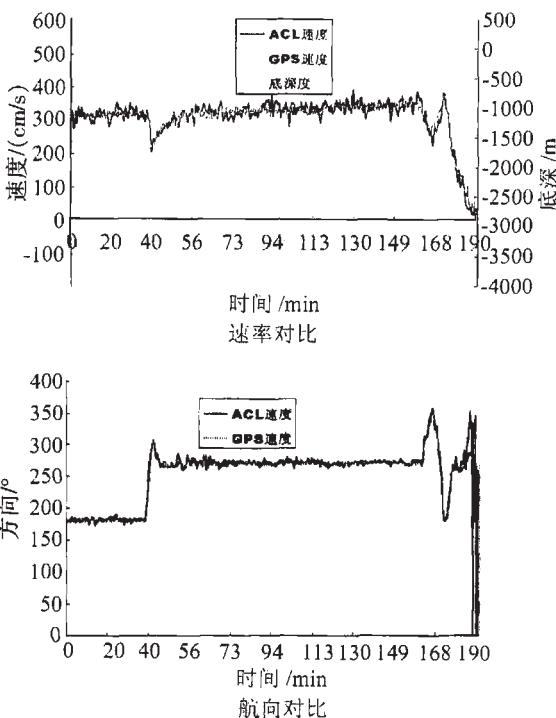


图 10 ACL 和 GPS 在 3000m 底深处船速对比
Fig.10 Comparison of ship velocity with respect to ground using ACL and DGPS at depths of about 3000m

对误差为 1.2%。

4 讨论

相关测速声纳作为一种大深度的测量流场和载体速度的声纳设备有较大的发展前途。在我们的试验中,相关测速声纳可以测量的流场剖面最大深度

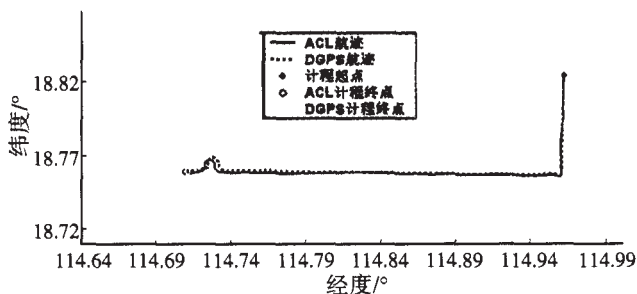


图 11 ACL 计程与 GPS 航迹比测

Fig.11 Comparison of ship track with respect to ground using ACL and DGPS

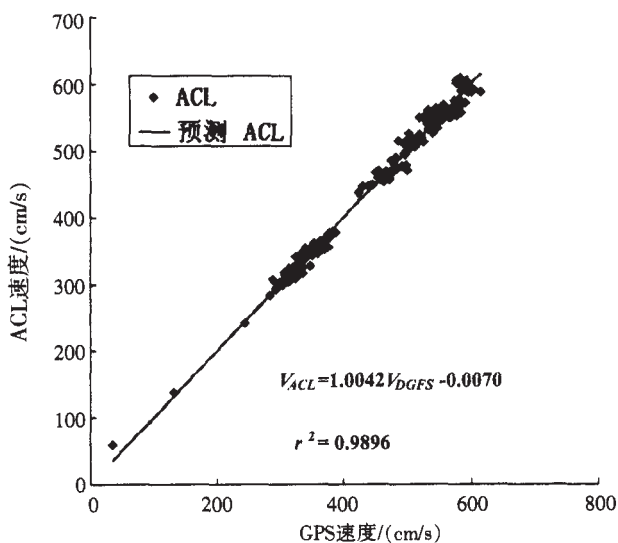


图 12 ACL 测速结果与 GPS 速度结果线性回归图

Fig.12 Linear regression of ACCP speed with respect to ground against DGPS speed

超过了 1000m,但由于没有合适的比测设备,仅仅能够从随时间平稳变化的角度说明其合理性,而没有

足够的证据证明其正确性,这也是下一步试验所需要解决的问题。相关测速声纳底跟踪测船速的最大作用底深超过了 3500m。线性回归分析表明 242 个 5min 时间段相关测速声纳测得的船速均值与对应时刻 GPS 的速度均值满足关系:

$$V_{ACL} = 1.0042V_{DGPS} - 0.0070(\text{cm/s})$$

相关系数平方(r^2)为 0.9896,说明了 ACL 测速结果与 GPS 测速结果具有很大的相关性。见图 12。

两次海上试验的结果证明了相关测速声纳的工作原理,验证了流混响和底混响的相关理论模型、声纳阵和发射信号设计以及信号处理方法的正确性。下一步的工作将以提高测速精度和工作稳定性为主,使之成为技术成熟的测速声纳。

参 考 文 献

- [1] Dickey F R, Edward J A . Velocity measurement using correlation sonar [A]. Proceedings of the IEEE Conference on Position Location and Navigation [C]. San Diego, U. S. A, 1978. 255-264.
- [2] Hole S K, Woodward B, Forsythe W . Design constraints and error analysis of the temporal correlation log [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1992, 17(3):269-279.
- [3] Bradley S E, Deines K L, Rowe F D. Acoustic correlation current profiler [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(4):408-414.
- [4] ZHU Weiqing, WANG Changhong, Huang Yong, et al. Theoretical model and error analysis of acoustic correlation current profiler (ACCP) [A]. Proceedings of IEEE Conference OCEANS '99 MTS/IEEE [C]. San Diego, U. S. A, 1999. 382-385.
- [5] 王长红,邱薇,汪玉玲,等. 大深度声相关流速剖面仪样机研制[J]. 声学技术,2002,21(增刊):421-422. WANG Chang-hong, QIU Wei, WANG Yu-ling, et al. Development of long range acoustic correlation current profiler [J]. Technical Acoustics, 2002, 21(suppl):421-422.