

南大洋走航 ADCP 测流中的问题分析*

刘 娜^{1,2}, 陈红霞^{1,2}, 冯 颖^{1,2}, 马洪余^{1,2}

(1. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要:在全面收集“雪龙船”走航 ADCP 数据的基础上, 结合国内外对影响船载 ADCP 海流测量准确度因素的一般认识, 通过对我国南大洋走航 ADCP 资料的处理分析, 发现了影响海流信息提取的若干问题。指出了其具体原因、影响方式和程度以及可以采取的相应补救措施等, 对今后的极地考察船走航 ADCP 海流观测具有参考和指导意义。

关键词: 船载 ADCP; 南大洋; 海流观测

中图分类号: P717

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2010)04-0523-08

1 走航 ADCP 数据

自 1995 年“雪龙船”配置 ADCP 进行流速走航观测以来, 到 2006 年第 22 次南极科学考察结束后船载 ADCP 停止工作为止, 除了没有派出“雪龙船”的第 17 次、第 20 次南极科学考察航次, 我国共完成了 8 个航次的南大洋船载 ADCP 海流走航观测。根据采用的观测仪器不同, 从时间上可以划分为两个阶段。

第一阶段为 1995—1998 年, 在这期间采用的是美国 RDI 公司出产的第一代船载 Ocean Surveyor 型 ADCP, 共完成 4 个航次的南大洋考察任务, 分别是第 13、14、15 和 16 次南极考察; 1998—2006 年为第二阶段, 采用的是 75 kHz VM-ADCP, 也完成了 4 个航次的南大洋考察任务, 分别是 18、19 次、21 和 22 次南极考察。由于第一阶段的数据采集软件版本较低、现可以获取的存储纪录为预处理数据而非原始数据(以第 14 次南极考察为例, 根据航次记录船载 ADCP 原始数据量为 600MB, 而现有预处理数据只有 237MB), 无论是厂家现在提供的相关软件还是国外常用的数据处理软件(CODAS)均无法完成数据的读取工作。从数据的格式上看, 前期记录数据存储格式为*.ICE 文件类型, 后期原始记录数据存储格式为 RDI 公司原厂提供的 WIN-ADCP 软件可直读、转换的*.NNN(NNN 为序列数, 从 000 递增)文件类型。下面我们只对可以读取和处理的第二阶段数据进行处理和分析。

从资料的原始记录数据量大小上看, 第二阶段 4 个南极科学考察航次对应的数据量分别为: 第 18 次, 422 MB; 第 19 次, 1.47 GB; 第 21 次, 301 MB; 第 22 次, 500 MB。根据和中国极地研究中心信息中心的交流、参考以往各个航次的航次报告中有关走航 ADCP 部分和中国极地科学考察队航次信息, 我们收集到的走航 ADCP 资料是完备的。

* 收稿日期: 2009-07-24

资助项目: 国家自然科学基金项目——南极绕极波绕极传播信号激发机制的研究(40706015), 艾默里冰架边缘冰间湖的成因、变化及冰-海相互作用(40676011); 国家科技支撑计划课题——南大洋水团与环流监测技术及应用研究(2006BAB18B02); 国家重点基础研究发展计划项目——南大洋海-冰-气相互作用及其对南印度洋的影响(2010CB950301); 基本科研业务费专项基金——2008 年初中国南方雪灾成因研究北极海冰异常变化及 ENSO 的影响(2008T27), 极地锚系观测系统关键技术研究(2010T01)

作者简介: 刘 娜(1977-), 女, 山东邹平人, 副研究员, 博士, 主要从事极地海洋学及气候变化方面研究, E-mail: liun@fio.org.cn

(杜素兰 编辑)

2 影响走航 ADCP 海流准确度的常规因素

船载 ADCP 海流观测本身是一个极为复杂的过程,不能简单地将其准确度量化为一个数值。我们必须定量地估算 ADCP 各种测量要素的准确性,而这是一个涉及到许多变量的问题。水体输运最大的误差来源是传感器在地理坐标中方向的准确性上,相对速度误差则主要来源于多普勒测量短期准确性的固有局限性。早在 1991 年 Eric Firing 就给出了执行 WOCE 水文计划(WHP)时发现的 ADCP 系统误差的主要影响因素。

2.1 相对速度误差

ADCP 的测流精度通常被认为是 1 cm/s。这一精度估计值是基于理论与模拟得到的,实际上达到这个精度是非常困难的。早期由于设备偏差和噪声偏置引起的较大误差在后来新型设备中已大大减少^[1]。当测量相对于船体的速度时,传感器位置的极小偏差将会导致较大的流速误差。这一误差是和船速成正比的、持续存在的、且可以通过定点校正方法予以消除^[2]。

声速误差同样也可以引起流速测量误差,但由于这一误差是随时间变化的,因此不容易消除。例如,当盐度偏差为 1、温度偏差为 1 °C 时,声速误差为 0.2%,所引起的流速误差也是 0.2%。在船速为 5 m/s 时,沿船体行进方向的流速分量误差为 1 cm/s。当水体中存在数量极少的气泡时,也会大大减少声速而导致较大的声速误差,这同样会引起流速测量误差。

另外,Pollard and Read^[3]发现每天的校准参数幅度变化高达 1%,共认为是密度散射导致的信号变化引起的。但直到现在这一点至今仍未被证实。

2.2 绝对速度误差

在地理坐标系中,通过船速与 ADCP 相对速度的叠加进行绝对速度计算时,将会带来另外两种不同来源的误差。其一为船速误差,其二为罗盘和传感器的轴向综合误差。

第一种来源误差在大空间尺度平均上影响不大,但限制了绝对流速的水平分辨率。这对于研究流幅较窄、变化较快的沿岸流是不可忽视的。相对于船速误差,后者更为复杂和难以消除,而其将带来垂直于船体行进方向、与船速成正比的流速误差。如果不能明确这一误差来源,流速测量误差将一直不能确定以及被消除。

全球定位系统(GPS)对船只定位带来的最大问题是美国国防部所采取的人为精度退化政策(SA)。这一政策开始于 1990 年 3 月,于 2000 年 5 月取消,其间时常停止和重新启用。在 95%的置信度下,不执行 SA 时 GPS 的民用精度半径为 20 m,5 min 平均的船速误差为 10 cm/s,30 min 平均的船速误差为 2 cm/s;执行 SA 时 GPS 的民用精度半径为 100 m,1 h 平均的船速误差为 4 cm/s。可见,即便是有 SA 执行时,对于船只行进方向大空间尺度海流的精度仍然不成问题。船速为 10 kn 时对于水平尺度在 10 n mile 或者更小的水体运动研究上,由 GPS 造成的流速精度问题将不能被忽视。

以上误差估计时并没有考虑 GPS 定位误差的序列相关性。而这种定位误差将随着定位星体的变化有数小时的转变周期以及 4 s 的摆动周期。在任何情况下,这种序列相关引起的误差将以牺牲长期误差的代价来减少短期的误差。高频的摆动可以通过对摆动周期整数倍数的周期取样平均进行消除。

对于通过 ADCP 测流获得跨断面的流量计算和地转流参考面影响最大的误差来源于传感器轴向与真北向的夹角。定点校正法^[4,5]可以用来计算不同时间、不同地点和不同航向时的这一误差。如果这一误差是一常数,则对其测量值的修正将达到非常高的精度。很遗憾的是,陀螺罗盘并非完美的,通常具有 0~2° 的误差。

舒勒振荡主要由经向加速度引起的,具有严重滞后的 84 min 周期振动特征。它所引起的误差已经得到

很好的理解且可以做到较好的消除。

另一误差来源于航向信息从罗盘到 ADCP 的传递过程。这一过程通常由一个同步控制发送器和一个同步数字化转换器完成。这种误差可以在码头上通过罗盘的快速定向来测定。在所有组件均为优质的情况下,误差数值将比较小($0.1\sim 0.2^\circ$)。

通过观察恒星点,还发现有另外一种罗盘误差^[3]。这种罗盘误差具有长达几天到几周的漂移,且可能还与航向有关。在 Moana Wave 的几个航次中,这一误差有 1° 左右;一次试验结果表明,标准的 Sperry Mark 37 型罗盘在航线相同但航向完全相反时的罗盘误差为 1.5° 。这种和航向有关的误差到底是罗盘故障的征兆? 究竟发生了多长时间? 在其他罗盘上是否也是一个普遍性的现象? 这些问题直到现在也没有很好的答案。

2.3 校正精度

在 GPS 信号良好时,可以在船速变化显著的时候找到一个校准点。如果 GPS 信号一直持续很好的话,1 个 CTD 站位作业将可以提供 2 个校准点。在没有 SA 的情况下,几个航次的结果表明校准点处的速度方向标准偏差通常为 0.8° 、速度大小标准偏差通常为 1.5% 。这意味着要达到在 95% 的置信度下 0.2° 的校准精度需要 64 个校准点。

校准点处的标准偏差主要依赖于固有误差、罗盘的短期变化、ADCP 的比例因子(和大小有关的因素误差)、以及每次校准操作时海洋参考层速度的时空变化。

无论是速度大小校准误差还是方向校准偏差,都会产生和船速成比例的绝对流速误差。在站点点处的校准误差的重要性远不如航线上的大。以美国调查船 Knorr 号为例,其从塔希提岛到夏威夷的这一段航线(航向主要为南北向)通常有以 4 kn 的航速和少数的站点工作或者 3 kn 的航速和大量的站点工作两种作业方式。在前一种工作方式下纬向速度的误差为 0.7 cm/s ,而在后一种工作方式下纬向速度的误差是 0.5 cm/s 。当航行时间内校准点少于 64 个时,航向的角度误差大于 0.2° ,穿越航线流速分量(主要是纬向流)的不确定性将显著增大。

从长期的角度来考虑,可以采用 GPS 载波相位差分技术代替陀螺罗盘的方式来测量船体的姿态,从而解决角度误差问题。理论上讲这将使船向精度提高到小于 0.1° ,从而极大程度上简化校正问题、提高垂直于航线方向的流速分量测量精度。多 GPS 天线组合测量系统现已成为 GPS 应用的重要分支,它不仅可以提供载体准确的位置和速度信息,而且能够提供高精度的载体姿态信息^[4]。渥太华防务研究机构的海上试验结果表明^[5]:在动态模式下,3 台以上 GPS 航向测量精度优于 0.05° (在 95% 的置信度下)。

3 影响我国南大洋走航 ADCP 海流观测的特殊因素

基于我国已有南大洋走航 ADCP 海上作业的条件,影响海流走航观测的因素主要有主客观两种原因造成的^[6]。

3.1 GPS 功能限制。

接入“雪龙”船走航 ADCP 的 GPS 信号是具有差分功能的 DGPS 系统,其作用距离是 50 km ,定位精度亚 m 级。从具体操作技术上 DGPS 可以分为三类,即:位置差分、伪距差分和相位差分;这三类差分方式的工作原理是相同的,即都是由基准站发送改正数,由用户站接收并对其测量结果进行改正,以获得精确的定位结果^[7]。这意味着如果要达到亚 m 级的船只定位精度,必须与静态基准站记录数据联合的事后解算。这对于航行在南大洋上的车载 GPS 来讲从现场操作的角度是不现实的,事后也没有进行这方面的定位修正。

随着 GPS 定位技术的发展,载波相位动态实时差分法(RTK)^[8]的应用可以将 GPS 定位精度提高到 cm 级^[9]。但 RTK 技术在考察船上应用的关键在于数据量较大的数据传输技术、时间延迟性对精度的影响、不

同型号 GPS 之间的兼容性等,这均限制了 RTK 技术在“雪龙”船上的应用。

因此“雪龙”船 GPS 在南大洋的定位精度目前仍然为 20 m(95%置信度),10 min 的船速误差为 5 cm/s。

另外,采用 GPS 载波相位差分技术代替陀螺罗盘的方式来测量船体的姿态已经在国外一些科学考察船上得到应用,这不仅能够提供高精度的载体姿态信息,也极大程度上简化了流速校正问题、提高了流速分量测量精度。当前虽然雪龙船上虽然有时有 2 台以上同步工作,但尚没有开展采用 GPS 代替罗盘测量船体姿态的工作。

3.2 罗经误差

虽然雪龙船配备了多个电罗经,但接入 ADCP 的只有国产“DH-2”型陀螺罗经信息。陀螺罗经又称电罗经,是利用陀螺仪的定轴性和进动性,结合地球自转矢量和重力矢量,用控制设备和阻尼设备制成以提供真北基准的仪器,不受地球磁场和钢质船体等铁磁物质的影响。

较理想的电罗经自身误差通常小于 1° ,而船载电罗经通常有 $2\sim 3^\circ$ 的误差,也有误差大于 4° 的纪录(第 16 次南极考察 ADCP 航次报告);“雪龙”船在南大洋航线上较高的南北向航速也会导致罗经的行进误差^[10]。以“雪龙”船在 60°S 以北向速度 20 kn 行驶为例,这一行进误差可达 1.1° 。

另外,随着时间和航行区域的变化,电罗经需要不断校正。“雪龙”船在一次南大洋航线的跨越距离超过 2 000 km,时间在 10 d 左右;而整个南极科学考察航线的跨越距离通常超过 12 000 km,跨越在 100° 左右的纬距,时间在 120 d 左右。引起的纬度误差约为 0.1° ^[11]。另外,南大洋恶劣的海况、海冰海区船体与冰体的撞击等均会导致船体复杂的运动,电罗经会因船体运动产生很多其他误差,如冲击误差、摇摆误差(最大可以大于 10° ^[11])等。同时由于安装原因又会产生基线误差、电源不稳定产生的误差、船舶转向产生的不定误差等。

现有罗经纪录只有 ADCP 数据中获得的“DH-2”型罗经信息,缺少不同罗经的同步纪录比较结果,也缺少对接入罗经的时常订正记录,没有在码头对罗盘定向校准记录,没有船体冲击纪录,也没有船只摇摆纪录。这使得当前无法完成对罗经误差带来的方向角影响的消除。

以我国第 19 次南极科学考察返程时南大洋航段采集到的罗经信息和对应的 ADCP 纪录、GPS 纪录为例,修正时钟差异后根据 GPS 计算得到的船速和根据 ADCP 纪录得到第 5 层(约 100 m 深处)与船体的相对速度大小相当,且变化频率、变化位置具有非常好的一致性对应关系(图 1a),这表明 ADCP 流速大小的纪录是非常准确的。但从 ADCP 纪录的罗盘信息和由 GPS 纪录得到的船只行进方向比较图(图 1b)可见,两者相差较大。这一方面表明在南大洋航段恶劣海况对船体的影响较大,使得船体方向与船只行进方向之间存在较大的方向夹角;另一方面两者之间较大的数值差异(平均相差 31°)也显示出罗盘方向信息具有较大的误差。而这一误差将为 ADCP 海流信息提取带来决定性的困难。

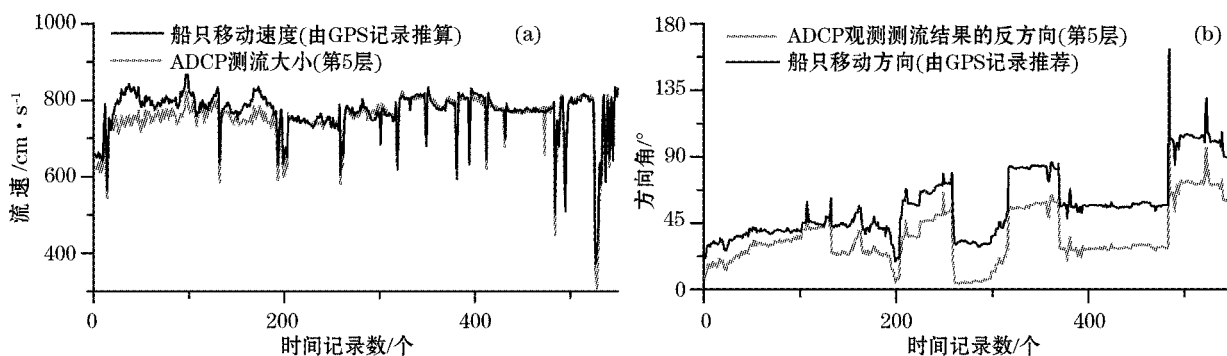


图1 第19次队 ADCP 测流与船体运动的大小(a)、方向(b)时间序列对照图

Fig. 1 Time series of the ADCP measurements by the 19th expedition team with reference of the ship cruising status. The current speed and the ship speed are in (a), and the current direction and the ship steaming direction in (b).

3.3 ADCP 参数与条件

目前“雪龙”船上装备的是 75 kHz 的 ADCP,该仪器的理论最大测量深度范围为 700 m。受传感器表面生物附着、水体环境的影响和仪器参数设定的制约,通常首层最小测量深度在 30 m 左右,最大测量深度在 500 m 左右。另外,南大洋航线上平均水深在 4 000 m 左右,因此 ADCP 不仅无法完成全深度范围内的流速剖面测量,最为关键的是 ADCP 的底跟踪功能无效,测得的实际海流速度需要利用同步的 GPS 记录通过矢量分离求得,流速测量精度不仅受限于 GPS 的记录精度,同时也受到罗经误差的影响。

3.4 时钟差异

从 ADCP 原始海流记录中消除船舶运动的影响,要求 ADCP 的记录和 GPS 的记录步调一致。

由于极地考察时间较长、跨越时区较多,受不同工作电脑内部时钟差异和现场操作人员、工作任务侧重等因素的影响,ADCP 的授时工作电脑内部时钟及其记录格式往往和 GPS 的时钟记录不尽一致。以第 16 次队为例:GPS 起始记录时间为 1999 年 11 月 23 日 00:29:31,ADCP 起始记录时间为 1999 年 11 月 23 日 08:29:15,两者相差 8 h 左右。可以判断 GPS 为国际时,ADCP 为北京时间。若以 GPS 记录时间为准,则第 16 次队 ADCP 记录时间需要减去 7 h 59 min 18 s。

3.5 船体运动状态

这主要包括船体行进速度(加速度)、行进路线和不同角度的摇摆。当船只航行在气象条件恶劣或者海况恶劣的海区时,船只的摇摆或者纵摇的倾斜角度较大,此时不仅 ADCP 的回波信号质量差,回波信号所在的水层面也不稳定。由于船只并非沿直线匀速行进,且行进的速度也多超过厂家建议的最大行进速度(12 kn);根据相对速度误差的分析,在“雪龙”正常巡航时(18 kn),所带来沿船体行进方向的相对速度误差约为 2 cm/s。

当船只航行在条件恶劣的南大洋中时,船只的摆动、行进速度变化和行进路线曲折对海流信息提取带来的困难是很大的。结合 ADCP 自身的采样频率、获取准确的海流信息所需要的统计样本数、底跟踪是否有效、GPS 的定位精度和记录时间间隔等诸多因素的共同制约,船只以较小的直线匀速行进时是获得较为准确的海流数据的理想状态。

3.6 底跟踪功能失效

在测量点水深小于走航 ADCP 底跟踪设定有效范围时,ADCP 通过发射低频率的声波至水底反射面,接受反射面的回波,由于水底反射面相对大地通常为静止状态,此时可以比采用 GPS 定位方式更为准确地求出船速和海流流速。虽然已有的走航 ADCP 具备底跟踪功能,但受考察海域水深较大、海水水质、参数设置和船体状态等因素的影响,在我国极地科考的南大洋航段底跟踪功能是没有生效的。

3.7 生物附着

受走航 ADCP 安装、拆卸条件的制约,ADCP 一般是常年固定在船只底部的。当船只执行科考任务走航 ADCP 启动工作时,由于 ADCP 换能器不停的进行能量发射,对生物附着有一定的抑制作用。但对于“雪龙”号一年之中长期处于船只停泊且走航 ADCP 停止工作状态,此时在 ADCP 换能器面上会出现严重的生物附着现象。而一旦出现生物附着,其自身是很难消除的,而通过人为的方式(潜水员或者船只进坞消除)进行消除成本非常高,所以一直没有进行生物附着的消除工作。

生物附着带来的直接后果是,ADCP 上层测量的盲区加大。以“雪龙”号满载吃水时 ADCP 所在位置按 10 m 深计算,在没有生物附着时 ADCP 可以测量的最上层测量深度为 19 m,而在第 16 次队南极考察时最上层测量深度为 24 m,到第 19 次队南极考察时最上层测量深度为 30 m。

3.8 温度、盐度信息接入误差

海水温度、盐度差异是所有走航 ADCP 海流观测时面临的共同问题。而海水温度、盐度信息通常是在最初工作参数设定时输入的。为了现实操作的方便和一致性,即便在同一航次的不同海区进行工作参数调整时,往往海水温度、盐度采用仪器厂商提供的默认值(温度:5 °C,盐度:35)。以 1994 年 1 月澳大利亚南大洋印度洋扇区夏季航次 CTD 调查结果为例(图 2),在 ADCP 量程范围内(按 600 m 计),温度变化范围是-1~14 °C,盐度变化范围是 33.9~35.4,根据相对速度误差部分的分析,所引起的流速测量误差为 1%。在船只正常巡航速度下,单 ADCP 测量流速误差就高达 10 cm/s,与绝大多数非海洋锋面海区的海流流速相当。

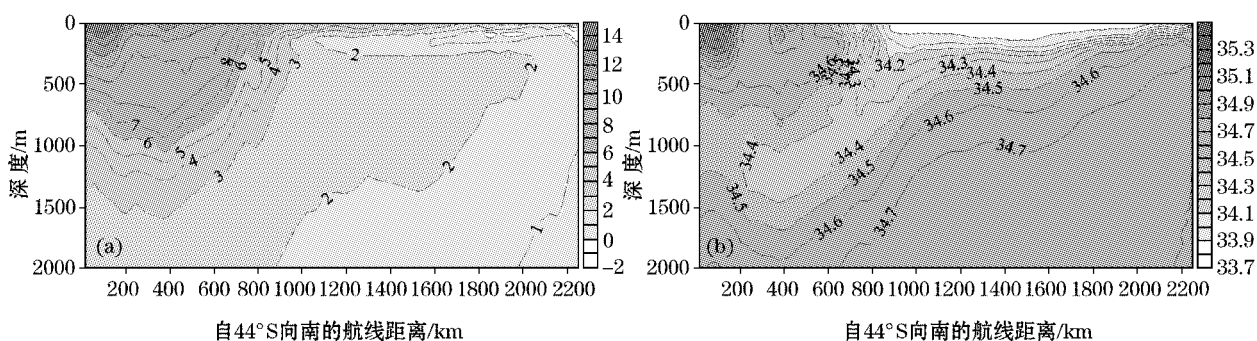


图 2 1994 年 1 月澳大利亚南大洋印度洋扇区夏季航次温度(a)、盐度(b)剖面分布图

Fig. 2 Sections respectively of temperature distribution (a) and salinity distribution(b) from the Australian cruise in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean in austral summer (Jan. 1994)

3.9 GPS 纪录错误

与 GPS 功能限制和 GPS 所引起的校正精度不同,这里是指在现有航次 GPS 纪录中所出现显著的错误。而这种错误所带来的直接后果是船体位置信息的错误,走航 ADCP 观测记录也无法进行海流信息提取。

以第 21 次南极考察航次为例(图 3),虽然威德尔海东北部海域的航迹点与执行的中山站—长城站之间的考察任务航线大体符合,但是存在 3 个显著的错误疑点。一是 60 °S 以北的 GPS 纪录的航迹点横跨南非大陆,且在非洲西北侧的大西洋也存有航迹点;二是 60 °S 以北的航线过于平直;三是所有 GPS 纪录的文件中缺少时间(h:min:s)等信息。根据这些疑点,结合第 22 次队已经没有了正确的 GPS 信号接入,从而可以判断至少在南大洋航线上 GPS 纪录是错误的。

3.10 其他环境信息差异

受南极调查航次空间跨越大、历经时间长和海域特殊等制约,不仅南大洋考察时经历的海况差异非常大,调查海区水质差异也非常大。

海况巨大差异会引起上层水体中气泡含量的差异。当海况非常恶劣时,大量的气泡被卷入超过仪器自身甚至部分测量层面在内的水体深度,这使得通过声学回波方式进行海流测量的 ADCP 观测错误甚至无法工作。

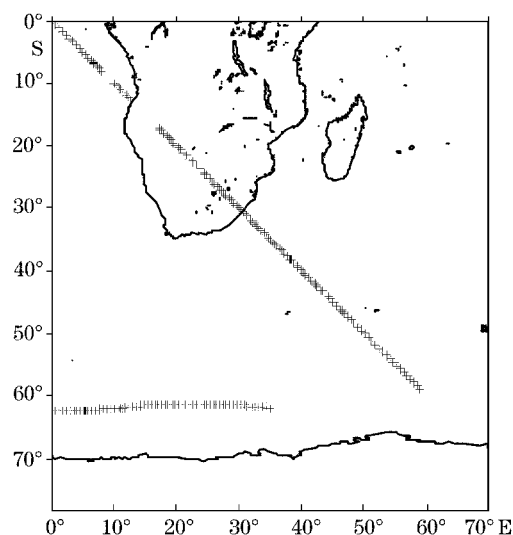


图 3 中国第 21 次南极科学考察 GPS 记录航迹图(每 4 000 s 一个“+”)

Fig. 3 Cruise route from the GPS recordings of the 21th Antarctic CHINARE (Every“+”denotes a time interval of 4 000 seconds)

水质的差异也会使得走航 ADCP 观测最大深度层面不一致。而部分海区过于纯净的水体则可能导致 ADCP 接收到的回波信号较少甚至没有,这也直接影响到我国极地走航 ADCP 海流观测。

4 对我国极地走航 ADCP 海流观测的建议

结合我国极地走航 ADCP 资料海流提取过程中发现的问题,在今后极地考察船只在加装船载走航 ADCP 测流系统时,建议做好以下几方面的工作。

4.1 加装 GPS 阵列测定船体姿态

这需要在考察船的不同部位加装 3~4 台高精度差分 GPS 即可。考虑到考察船上通常已经具备至少 1~2 台差分 GPS,只需要补充 2 台差分 GPS 后按载波相位差分技术要求加装在考察船上同步观测即可。相应的信息处理技术已经非常成熟,可以直接匹配。这项工作不仅可以解决了陀螺罗盘误差和校准问题,避免部分辅助信息接入错误,也可解决船只导航和定位精度问题。

4.2 加装新一代的大纵深走航 ADCP

随着声学海流观测技术的不断发展,船载走航 ADCP 设备也在不断更新换代、测量能力不断提升。以美国 RDI 公司现有的 38 kHz Ocean Surveyor 型 ADCP 为例,它比雪龙船原来装载的 ADCP 不仅量程上有明显的优势,对船速的要求上有所放宽,在测量精度有显著提高。

4.3 船速调整

在南大洋特定海区海况较好时,针对海流走航观测适当限制船速,使考察船不以最大巡航速度行驶,而是按船载 ADCP 海流测量所允许的最大速度行驶。目前雪龙船在海况良好时的巡航速度在 16 kn 左右,而船载 Ocean Surveyor 型 ADCP 通常要求的船只速度为不超过 12 kn。当船时和环境允许的条件下,对研究的重点海区可以适当控制船速,使得 ADCP 有较好的工作平台环境。

4.4 设备管理

这里主要是指除了相应硬件设备以外的配套管理。在调查航线上,应根据所在海区的水质条件、水体环境和所关心的研究问题,提前确定设备的参数设置情况,避免现场盲目和主观臆断性。在航线跨越水体环境变化较大时,应根据现场或者通过其他途径获得的有关环境信息及时完成辅助信息的更新。

参考文献(References):

- [1] CHERESKIN T K, FIRING E, GAST J A. On identifying and screening filter skew and noise bias in acoustic Doppler current profiler measurements[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1989(6): 1040-1054.
- [2] JOYCE T M. On in situ "calibration" of shipboard ADCPs[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1989(6): 169-172.
- [3] POLLARD R, READ J. A method for calibrating ship-mounted Acoustic Doppler Profilers, and the limitations of gyro compasses[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1989(6): 859-865.
- [4] XU J N, ZHU T, BIAN H W. GPS attitude determination technology[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2003, 15(3): 17-36. 许江宁,朱涛,卞鸿巍. GPS 姿态测量技术综述[J]. *海军工程大学学报*, 2003, 15(3): 17-36.
- [5] CHRIS J, ARDEN D A, LACHAPELLE G. Dynamic GPS attitude performance using INS/GPS reference[C]. Salt Lake City: ION GPS '94, 1994: 21-23.
- [6] CHEN H X, LIU N, PAN Z D. Data processing of shipboard-ADCP in polar scientific expeditions of China[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2007, 19(1): 69-75. 陈红霞,刘娜. 极地科学考察船载 ADCP 资料处理[J]. *极地研究*. 2007, 19(1): 69-75.
- [7] GUAN H P. Principles of GPS relative positioning and DGPS technology[J]. *Journal of Lanzhou Railway Institute*, 2003, 22(6): 59-64.

- 关惠平. GPS 相对定位原理与 DGPS 技术简介[J]. 兰州铁道学院学报. 2003, 22(6): 59-64.
- [8] EULER H J. Achieving high accuracy relative positioning in real time results[C]. Las Vegas, Nevada; IEEE Plans'94, 1994.
- [9] SHI P H. Another milestone of GPS positioning technology - RTK[J]. Ocean Mapping, 1994, 14(4): 18-27. 施品浩. GPS 定位技术的又一里程碑-RTK[J]. 1994, 14(4): 18-27.
- [10] BOWDITCH N. American practical navigator[M]. Washington, D. C: Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic Center. 1984.
- [11] REN M D. Marine gyro compass[M]. Dalian; Dalian Maritime School Publishing, 1993. 任茂东[M]. 大连: 大连海事学院出版社, 1993.

Analysis of Problems in Ship-borne ADCP Current Measurements in the Southern Ocean

LIU Na^{1,2}, CHEN Hong-xia^{1,2}, FENG Ying^{1,2}, MA Hong-yu^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*)

Abstract: Sufficient data collection from the ship-borne ADCP measurements on board of Research Vessel "Xuelong" in the southern Ocean expeditions are combined with domestic and foreign acquirements of knowledges about the causative factors effecting on ADCP measurement accuracy. Then the problems influencing the information extraction from ADCP data are found out after the data have been processed and analyzed. Finally the concrete causations, the influence ways and degrees, and the treatment measures corresponding to the problems are discussed in order to provide references for the ship-borne ADCP measurements in the future polar expedition.

Key words: ship-borne ADCP, the Southern Ocean, current measurement

Received: July 24, 2009