DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.020

星站差分 GPS 在水下地形测量中的应用

许捍卫[1],何 江[2],杨艳飞[1]

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;2.南京市国土资源局浦口分局,江苏 南京 211800)

摘要:介绍星站差分 GPS 的原理。通过 SF-2050G 型星站差分 GPS 在长江王家渡水道的应用测试,分析了星站差分 GPS 较传统差分 GPS 的优势:无需建立 GPS 本地基准站,单机作业便能大范围应用,并且随着时间的增长其定位精度可收敛至 5 cm。测试结果证明星站差分 GPS 能稳定、高效、高精度地应用于水下地形测量。

关键词:星站差分 GPS;广域差分矫正;水下地形测量

中图分类号:P21;P228.4 **文献标识码**:B **文章编号**:1006-7647(2008)02-0076-03

Application of Starfire WADGPS in underwater topographic survey//XU Han-wei[1], HE Jiang[2], YANG Yan-fei[1] (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *Pukou Sub-Bureau of Nanjing Bureau of Land Resources*, *Nanjing* 211800, *China*)

Abstract: The principle of Starfire WADGPS technology was introduced. Based on the application of SF-2050G type WADGPS in an underwater topographic survey of the Wangjiadu channel of the Yangtze River, the advantages of the Starfire WADGPS, as compared with the traditional DGPS, were pointed out: without needing for a local GPS base station, single pieces of its equipment can be used for large-scale survey with its precision that can reach 5cm. Test results show that the Starfire WADGPS is highly stable, highly efficient and highly precise in underwater topographic surveys.

Key words: Starefire WADGPS; broad domain difference correction; underwater topography survey

GPS 实时定位技术 RTK(real-time kinematic)和 RTD(real-time difference)技术的应用,使水下地形测量发生了根本性的变化,由传统模式改进为自动化作业模式[1]。这种作业模式采用回声设备获取水深数据、GPS 获取定位数据,定位数据和测深数据匹配,实时获取采样点平面位置和水深,这就不再受天气和通视条件的限制,工作效率和测量精度大幅度提高。近期 GPS 实时定位技术又发展出新的 RTG(real-time GIPSY,又称星站差分)技术,本文详细介绍采用 RTG 技术的星站差分 GPS 在水下地形测量中的应用,并将传统的 GPS 水下地形测量方法和现在的方法作比较,分析应用星站差分 GPS 进行水下地形测量的优势。

1 星站差分 GPS 介绍

1.1 Starfire 星站差分网络系统

星站差分 GPS 属于广域差分 GPS(wide area DGPS,WADGPS)范畴,Starfire 星站差分网络系统最初是 John Deere & Co. 和 NavCom Technology Inc 两家公司开发的广域差分矫正定位系统,主要用于农耕机绘制农产产能分布图[2],是世界上第一个可以提供分米级实时精度的星基增强差分系统。随着 Starfire 星站差分网络系统的广泛应用和技术完善,其逐渐发展成一个全球性的网络,为全球用户提供广域差分矫正定位服务。

Starfire 系统由 GPS 卫星系统、3 颗 L 波段通讯卫星和一个分布全球的 GPS 参考站网络构成。首先,地面参考站网络由 28 个遍布全世界的高性能双频 GPS 接收机构成,它不断地接收 GPS 卫星信号,进行解码,并将高质量的双频伪距和载波相位观测值数据发送至 2 个数据处理中心(位于美国加利福尼亚的 RedondoBeach 和伊利诺斯的 Moline)。然后,处理中心利用 WCT 广域差分转换(wide area correction transform)技术,计算出特定区域内的 GPS 差分矫正数据,数据处理中心将这些数据发送到 3 个地面卫星注入站(分别位于英格兰 Goonhilly、加拿大 Laurentides 和新西兰 Auckland),再由地面注入站发送给由 NavCom 公司自 Inmarsat 租用的 3 颗海

基金项目:河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2005407511)

作者简介:许捍卫(1969—),男,浙江桐庐人,副教授,从事地理信息系统及遥感研究。E-mail:xuhanwei@hhu.edu.cn

事卫星，由这些卫星将差分矫正信号向全球播放。于是，装备了能够同时接收 GPS 卫星和 L 波段的 Inmarsat 卫星信号的双频接收机的用户，可在全球范围内获得高精度的实时差分定位服务。Starfire 网络从 1999 年开始运行以来，具有 99.99% 的联机可靠性[3]。它在全球的全面测试数据证明，系统具备提供相当高的定位精度的能力。整个 Starfire 星站差分网络系统如图 1 所示。

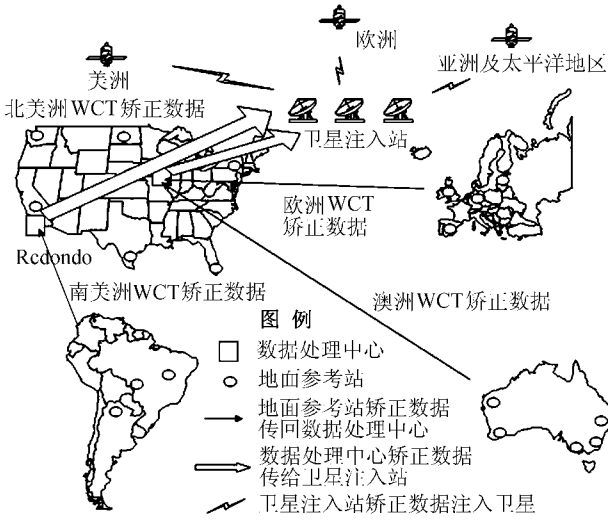

图 1　Starfire 星站差分网络系统

1.2　WCT 广域差分矫正技术

WCT 广域差分矫正是 Starfire 系统内部计算广域差分矫正数据的基本技术。WCT 技术利用每一参考站的双频 GPS 接受机中经过折射矫正的测量值，经过实时矫正处理算法和 GIPSY 软件（由 JPL-喷气动力实验室提供），演算出一组包括 GPS 卫星的星历修正量、时钟的修正量和电离层的延时参数等矫正数据，用于修正在同一网路内可见的所有 GPS 卫星测量的误差。

在 Starfire 系统网络覆盖内的双频 GPS 接收机将 WCT 技术计算出的矫正数据引入其内部折射矫正测量计算中，同时应用折射矫正测量来做矫正数据的演算及导航的演算，可以消除因电离层延迟所造成的误差以及其他主要 WADGPS 误差。经此处理后的结果有下列优点：

a. 涵盖各洲大陆的网络使差分改正信号覆盖全球北纬 76°至南纬 76°、高度角 55°的范围，可演算出各大洲单一的矫正数据，并且可以得到很好的精确度。

b. 矫正数据可以在集中的据点演算，然后广播到整个地区。由于不需分别广播每一参考站的矫正数据，广播单一组的矫正数据所需的频道容量相应地可以显著降低。

c. 一般的 WADGPS 系统只提供每一个卫星的钟差改正，而 Starfire 星站差分系统通过 RTG 技术同时提供每一个卫星的钟差改正和轨迹的矫正，因此可以得到高于其他广域差分的定位精度。

1.3　Starfire 星站差分 GPS 接收机

Starfire 星站差分 GPS 接收机现有型号主要包括 4 种类型：SF-2000R：农业与海洋定位传感器（agriculture & marine positioning sensor）；SF-2040G：综合测地型接收机（integrated geodetic receiver）；SF-2050G：测地型 GIS 接收机（geodetic GIS receiver）；SF-2050M：测地机械控制型接收机（geodetic machine control receiver）。

国内主要使用稳定性及测量精度较高的 SF-2050系列，下面以这种型号接收机为例，具体介绍 StarfireTM 星站差分 GPS 接收机的各项性能。

SF-2050 系列接收机的分体式多功能天线同时接受 GPS 卫星信号与 L 波段海事卫星信号。接收机主机采用强大的 NCT-2000D 高级 GPS 模块，拥有 10 个双频通道（CA/L1/P1/P2/L2）、2 个 WAAS/EGNOS 通道，外壳坚固、防水、防尘，内含 L-band 解码器，外接电源电压输入范围广泛（10 ~ 40 V 直流电）。整套设备单一整合包装，安装简单，携带轻便，只需一键开机，全自动化操作，支持标准 NMEA 格式（国际海事无线电委员会通用格式）及 NCT 二进制格式的数据输出。SF-2050 系列接收机还采用了 All-in-view 卫星跟踪技术、干涉抑制与多路径消除专利技术、双处理中心同时运行等独特技术，使其能够胜任水下地形测量工作。

2　星站差分 GPS 的应用情况

2.1　测量测试准备工作

为了证实星站差分 GPS 在水下地形测量中的实用性，在长江中游王家渡水道进行了测试。王家渡水道左岸属洪湖市，右岸为嘉鱼市，距下游武汉市 104 ~ 140 km，水道包含各种典型水下地貌，多年来航道相对稳定，条件良好，能对星站差分 GPS 进行全面的测试。

2.1.1　星站差分 GPS 测量系统组成

a. 硬件部分。数据连接线：双串口 PC 卡；电脑：IBM 笔记本电脑，Intel PIV 512M 内存，40G 硬盘；GPS 接收机：星站差分 SF-2050G 型号；测量船：由长江航道局提供的小型测量艇；数字化测深仪：无锡海鹰测深仪 13D 型号，测深精度为 $0.05 + 0.01H$ m。

b. 软件部分。星站差分 GPS 设置软件：StarUtil 2.3 软件；海事卫星观测软件：StarFire L-Band Communication Satellite Locator；导航测深软件：SDS 公司 EZHydro 3.0 软件；内业成图软件：杭州数维公司

Walkfield 4.0 软件。

2.1.2 SF-2050G 测量操作

用 StarUtil2.3 软件将所购海事卫星频段设置于 SF-2050G 接收机内，并进行初始化操作，设置输出 NMEA 格式；用 StarFire L-Band Communication Satellite Locator 软件计算海事卫星在当地的方位角、截止高度角与轨道高度，据此安置星站差分天线于合适位置，避免海事卫星信号被船体遮挡。

SF-2050G 接收机需要 30 min 进行初始化，这样才能够得到 15 cm 的双频 RTG 精度，在面板上有3 个指示灯，得到双频 RTG 后 3 个指示灯均是绿色常亮状态。在接收机上有 2 个 COM 接口，其中 COM1 接口输出 ASCII 码，供电子手簿、笔记本电脑上的 StarUtil 2.3 软件使用；COM2 接口用于 NMEA 格式输出，可用于导航测深等 GPS 应用软件[3]。

2.1.3 连接调试

首先，将测深仪的声波探头（能量转换器）固定在船舷上；探头电缆连上测深仪主机；用数据输出电缆与双串口 PC 卡的 1 个 RS232 串口连接；双串口 PC 卡插入笔记本电脑 PC 卡插槽；电源电缆连上蓄电池或直流电源。开机调试测深仪，将量程、吃水改正调试好，并检查数据是否进入笔记本电脑上的 EZHYDRO 软件。

然后，将 SF-2050G 的圆盘天线固定在测深仪的探头杆上；用天线电缆连接 SF-2050G 主机；用数据通讯电缆与双串口 PC 卡的另一个 RS232 串口连接；电源电缆连上蓄电池或直流电源。开机调试 SF-2050G接收机，自动搜索 GPS 信号，锁定海事卫星信号。检查差分 GPS 数据是否进入笔记本电脑上的 EZHYDRO 软件。

2.2 外业测量流程

由于 GPS 接收的是世界坐标系 WGS84 坐标，需转换至 1954 国家大地坐标系下，可利用 EZHYDRO 软件的‘地方投影转换’功能进行控制点联测。为此，将 SF-2050G 的天线架到已知控制点上（至少3 个，最大范围 100 km 内，分布均匀），整平对中，经过 30 min 初始化得到 RTG 双频解后，用导航测深软件 EZHYDRO 分别在每个控制点上采集它的 WGS84 坐标。因为已知控制点的 1954 国家大地坐标，软件会根据这几个已知控制点的 2 套坐标系自动解算出世界坐标系 WGS84 坐标和 1954 国家大地坐标系之间的转换参数，根据转换参数，软件将 SF-2050G 所测 WGS84 坐标数据自动转换为 1954 国家大地坐标数据。

在 EZHYDRO 软件里，根据比例尺及测量需要在测区范围内布设垂直于主航道的测量计划线，设置测量间隔（可按距离、时间或档距），测深仪自动定标、差分记录等参数。测量系统调试正常后，测量船开赴测区沿着计划线进行测量。测量过程中，GPS 状况、海事卫星差分信号、测深仪状况等各种信息全部在软件中实时显示，时间、定位坐标、航道水深自动匹配记入电脑硬盘中，只需 1 个人观察软件测量界面，查看系统是否工作正常。

2.3 内业数据处理

外业测量完成后，需将数据进行预处理后才能导入成图软件绘制水下地形图。首先需进行假水深点的剔除。由于水下情况复杂，测深仪发射声波遇气泡、水草、鱼类、悬浮物等直接反射而未至水底时会产生假水深数据。导航测深 EZHYDRO 软件采用内插法作相应处理，实现假水深点的剔除。

为了正确表示水下地形，需要将在瞬时江面测得的深度 $Z_{测}$ 换算至平均海平面或航行基准面起算的深度，即进行水位改正。改正原理如图 2 所示，水位改正公式为

$$Z_{绝} = Z_{海} - Z_{测} \quad (1)$$

$$Z_{相} = Z_{测} - Z_{基} \quad (2)$$

式中：$Z_{绝}$ 为 $Z_{测}$ 换算至平均海平面的绝对高程；$Z_{相}$ 为 $Z_{测}$ 换算至航行基准面的相对高程；$Z_{海}$ 为航道水位，由验潮站观测水尺所得测量区水面的海拔高程根据测量时间和验潮站位置内插而得；$Z_{基}$ 为航行基准面，是每一验潮站对呈周期性升降的江面进行长期观测后，通过潮汐分析求得的保证本航区航行通畅的深度基准面，其上为负，其下为正。

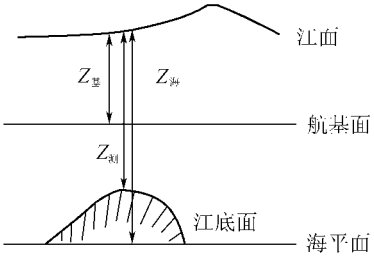

图 2 水位改正原理示意图

EZHYDRO 软件预处理后的水深数据以文本格式导出后，便可引入内业成图 WALKFIELD 软件，生成水下地形图，如图 3 所示。此图采用 1954 国家大地坐标系，1956 年黄海高程系，等高线的等高距为 1 m。由于采用星站差分 GPS 测量，数据点分布规则，精确度高，以此所建 TIN 网模型结构合理，符合实际。因此由 TIN 自动生成等高线，不需大量修改，大大减少了绘制水道地形图的工作量，提高了工作效率。

3 结 论

a. 星站差分 GPS 秉承了传统差分 GPS 的优势，使水下地形测量不再受天气和通视 （下转第 83 页）

南水北调中线工程的运行可能会对水源区、受水区产生一些不利的影响，应尽早采取适当的措施减少南水北调中线工程对生态环境的影响，避免与已建调水工程发生类似的生态环境影响。

f. 探寻计划与市场相结合的水价模式。南水北调中线干线建设所需资金较多，国家并没有实行全额拨款，而是采用多元化、多层次、多渠道的方式进行资金筹措，地方资金在总体投资中占有一定的比例；对于配套工程，基本由地方筹措资金。多元化的投资主体必然带来多元化的产权，产权关系的多元化使得运行调度中的水价问题变得复杂。在实际的运行调度中应把政府宏观调控、民主协商和水市场紧密结合起来，制定合理的水价，必要时进行水市场交易，确保南水北调中线工程建设费用能够收回，维持管理企业的正常运行，同时避免水资源的浪费。

4 结 语

南水北调中线工程是一项涉及多部门、多区域、多流域的大型调水工程，其运行管理与调度十分复杂。鉴于其问题的复杂性，南水北调中线工程的运行调度应充分吸收国外跨流域调水工程成功的经验，提早考虑其在运行调度过程中关注的问题。本文针对国外跨流域调水工程的共性，根据我国南水北调中线工程自身的特点，分析对南水北调中线工程运行调度的有利启示，为南水北调中线工程运行调度提供借鉴，以期最终实现南水北调工程科学合理的运行调度。

参考文献：

[1] 杨立信. 国外调水工程[M]. 北京：中国水利水电出版社，2003.

[2] 郑连第. 世界上的跨流域调水工程[J]. 南水北调与水利科技，2003，1(增刊)：8-9.

[3] 姿广艳，周孝德，韩娜娜. 调水工程的发展及趋势[J]. 水利发展研究，2004(9)：43-45.

[4] GILL G S，GRAY E L，SECKIER D. The California water plan and its critics，a brief view [C]//SECKIER D. California Water：a Study in Resource Management. Berkeley：University of California Press，1971.

[5] 皮钧，熊雁晖. 加利福尼亚调水工程对我国调水工程的启示[J]. 南水北调与水利科技，2004，2(4)：50-52.

[6] Central Arizona ater Conservation District (CAWCD). Central Arizona Project[EB/OL]. [2002-12-18]. http://www.cap-az.com.

[7] 李运辉，陈放耘，沈艳忱. 美国中亚利桑那调水工程[J]. 水利发展研究，2003(3)：55-58.

[8] 中华人民共和国水利部赴澳大利亚雪山工程考察团. 澳大利亚雪山工程[C]//中华人民共和国水利部. 国(境)外水利水电考察与学习报告选编. 北京：海潮出版社，2000.

[9] The Pakistan Water and Power Development Authority (WAPDA). Water wing[EB/OL]. [2002-12-16]. http://www.pakwapda.com/htmls/water-index.html.

[10] 魏昌林. 巴基斯坦的西水东调工程[J]. 世界农业，2001(6)：26-28.

(收稿日期：2007-03-29 编辑：高建群)

(上接第 78 页)

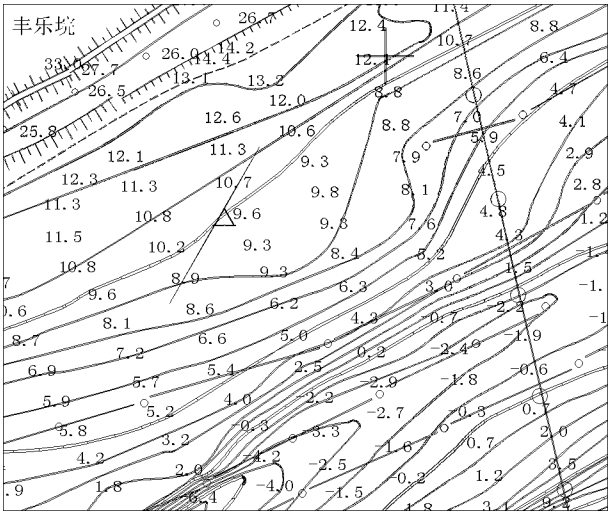

图 3 王家渡水道地形示意图

条件限制，实现了从数据采集至最终数字地形图生成的自动化，大幅度减轻了测量人员的内、外业劳动强度，能充分发挥快速和高精度定位的优势。

b. 测试结果表明，SF-2050G 型星站差分 GPS 有独特优势。星站差分 GPS 初始化成功后，定位精度可小于 15 cm，而且随着时间的增长其定位精度可收敛至 5 cm，较传统 RTD 伪距差分 GPS 的亚米级精度大幅度提高，接近 RTK GPS 的厘米级精度，满足《河道观测规范》和《工程测量规范》的限差要求，适用于不同比例尺的水下地形测量。

c. 星站 GPS 的差分改正值通过 Inmarsat 同步卫星传播，所以用户可以单机作业，不必建立本地基准站，即能广泛应用于北纬 76°到南纬 76°的江、河、湖、海的各种水下地形测量，大幅度提高了测量效率与精度。

参考文献：

[1] 杨飞，马耀昌. GPS 在水下地形测量中的应用研究[J]. 地理空间信息，2006，4(3)：20-22.

[2] 董世伟. SF-2050 测试报告[R]. 上海：SDS 公司，2003.

[3] 何江，杨正金. 星站差分 GPS 培训及基本理论[R]. 上海：上海天测科技有限公司，2003.

(收稿日期：2007-11-24 编辑：高建群)