

# 基于GNSS的单波束测量系统在雅鲁藏布江下游水下地形测量的应用

袁 野, 龚德林

长江水利委员会水文局西南诸河水文水资源勘测局, 云南 昆明

收稿日期: 2022年8月16日; 录用日期: 2022年9月16日; 发布日期: 2022年9月29日

## 摘 要

雅鲁藏布江是我国重要的水源地、水电能源基地和生物宝库, 是我国实施西部大开发战略的重要区域。掌握雅鲁藏布江基础地理、水文信息, 是开展雅鲁藏布江水资源开发和管理的的重要基础环节和资料支撑。但目前, 雅鲁藏布江下游河段河道资料, 对该河段水资源开发形成了很大的短板困扰。此次测量填补了此区域没有河道勘测成果的空白。本文结合雅鲁藏布江下游河段河道地形及断面测量工作, 阐述雅鲁藏布江下游河段测量使用的GNSS搭载单波束测深仪的应用及面临的困难, 以及采取的安全措施, 浅谈此次测量工作的经验及教训。

## 关键词

雅鲁藏布江, 水下地形测量, 水资源, 测量

## Application of Single Beam Surveying System Based on GNSS in Underwater Topographic Survey of the Lower Yarlung Tsangpo River

Ye Yuan, Delin Gong

Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Southwest Rivers, Kunming Yunnan

Received: Aug. 16<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 16<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 29<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The Yarlung Tsangpo River is an important water source, hydropower energy base and biological

文章引用: 袁野, 龚德林. 基于 GNSS 的单波束测量系统在雅鲁藏布江下游水下地形测量的应用[J]. 测绘科学技术, 2022, 10(4): 207-214. DOI: 10.12677/gst.2022.104021

treasure house in China. It is also an important area for China to implement the western development strategy. Mastering the basic geographic and hydrological information of the Yarlung Tsangpo River is an important basic link and data support for the development and management of water resources of the Yarlung Tsangpo River. However, at present, the river channel data of the lower reaches of the Yarlung Tsangpo River has formed a great obstacle to the development of water resources in this reach. This survey fills the gap that there is no river survey result in this area. Combined with the topographic and cross-sectional survey of the lower reaches of the Yarlung Tsangpo River, this paper expounds the application and difficulties of the GNSS single beam bathymeter used in the survey of the lower reaches of the Yarlung Tsangpo River, as well as the safety measures taken, and discusses the experience and lessons of this survey.

## Keywords

Yarlung Tsangpo River, Underwater Topographic Survey, Water Resources, Survey

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2021年3月11日,十三届全国人大四次会议表决通过的《关于国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》指出,雅鲁藏布江下游水电开发将是下阶段的重点工作之一。

开展雅鲁藏布江下游水下地形测量及河道断面测量项目,是为了收集雅鲁藏布江下游河道基础地理信息、水文信息基础资料,以支持国家“十四五”规划的顺利推进。

## 2. 测区概况

测区位于西藏自治区林芝市墨脱县,县域总面积3.4万平方公里(中国实际控制1.2万平方公里)当地居民主要为门巴族和珞巴族,全县约1.3万人口。这里是全中国最后一个通公路的县,地处世界第一的雅鲁藏布大峡谷的深处,是青藏高原海拔最低,最温和,雨量最充沛,生态保存最完好的地方。墨脱县属喜马拉雅山东侧亚热带湿润气候区。该区域大多为原始地貌,植被异常茂盛(如图1)。陆地上能够通视的长度要不很短如百米,长的则几公里。



Figure 1. Dense forests on both sides of the river  
图1. 河道两岸茂密的树林

河道勘测范围沿河道约 70 公里, 交通仅在一岸有一条单车道边防公路, 其中有一段进出县城的公路还分日期限行(双进单出)。河道两岸大多数为密林覆盖的陡峭地形, 很难找到通往江边的道路, 即便是小路也被植被掩盖而很难发现。如果要穿越, 需要请当地熟悉地形的人引导用刀在前面劈开密林, 才能勉强通过。

河道中分布的急滩随处可见(如图 2), 冲锋舟连续航行一般不到 1 公里。因此每天的主要工作就是完成一段测量则需要将冲锋舟捞起、拆卸、搬运到公路, 用车送到上游, 寻找下河的通路, 搬到江边再重新组装。

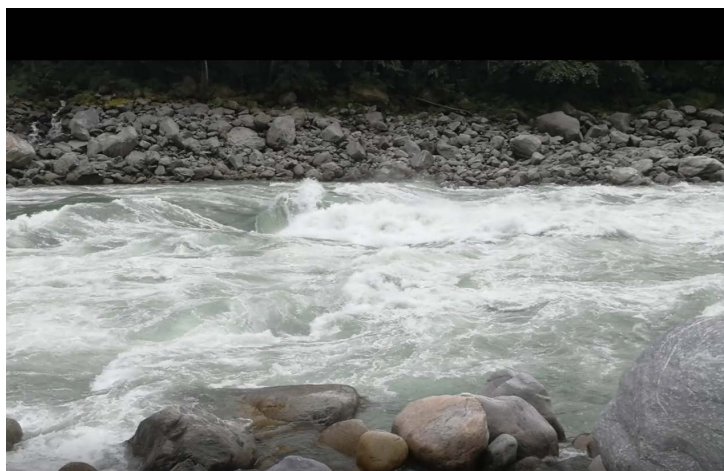


Figure 2. Turbulent rapids  
图 2. 汹涌的急滩

在这样的环境下作业, 人员体力消耗很大、效率极低, 作业风险很高, 难度大。

### 3. 作业实施

项目作业区地处高山峡谷河段, 地理环境较差, 观测项目内容多, 成果质量保证及安全生产责任重大。为保障项目的顺利进行, 项目组开展查勘, 制定实施方案, 集中优秀的管理与测绘人才、用先进的仪器设备、精细化的管理方案服务本项目; 实施中统筹谋划、精心组织、精益求精确保测绘成果的质量及生产安全。本项目共投入人员 30 人, 主要投入的设备如下表 1。

Table 1. List of main equipment invested in the project

表 1. 项目投入的主要设备清单

设备	型号	技术指标	用途
GNSS	中海达 V98	水平: $\pm(3 \text{ mm} + 0.1 \text{ ppm})$ ; 垂直: $\pm(4 \text{ mm} + 0.4 \text{ ppm})$	测深定位
声速剖面仪	HY1200	分辨率: 0.1 m/s; 精度(100 m): $\pm 0.3 \text{ m/s}$	声速测量
单频测深仪	海鹰 1603	$\pm 1 \text{ cm} \pm 1\% \text{ 水深}$	水深测量

#### 3.1. 平面坐标系统及控制测量

平面坐标系统采用 CGS2000 坐标系, 高斯正形投影 3°分带, 中央子午线为 96°, 高程系统采用 1985 国家高程基准[1]。地形图测图比例尺为 1:1000, 等高距为 2 m, 断面测量比例尺为 1:1000。

控制测量依据《全球定位系统(GPS)测量规范》(GBT\_18314-2009)采用 E 级 GPS 测量[2] [3]。埋石根据现场实地情况, 点位选择在土质坚实并易于长久保存之处, 充分考虑测量便捷, 且满足 GPS 测量的要求; 平面控制测量依照 E 级 GPS 控制网精度要求观测, 采用 6 台中海达系列(iRTK 2 和 V98)GPS 按静态测量方式, 分 1 个时段观测, 每个时段连续观测 45 min, 采用边连式构网, 卫星高度角  $\geq 15^\circ$ , 有效观测卫星数  $\geq 4$  颗, 数据采样间隔 10 s。静态测量三维坐标通过 RTK 测量校核后使用[4]。

### 3.2. 水下地形数据采集

水下地形测量采用无验潮模式测量原理, 断面方向大致与水流垂直, 部分浅滩、水流紊乱区域不宜采用横断面法的区域采用散点法测量, 为确保资料的一致性, 深水与浅水区域同时进行测量。采用冲锋舟搭载 RTK 和 HY1603 一体化测深系统进行水下测量[4] [5]。测深仪换能器与 GNSS 天线在保证同一铅锤线上。测深仪器按规定每天测前进行仪器参数设置检查、换能器静态吃水深度检查、比测等工作, 每天测前、测后应进行换能器吃水深、换能器杆倾斜角检查。水位采用 RTK 测量, 河底高程采用 GPS 高程(固定解)与水深推算, 水下地形平面采用 GNSS 定位系统[6]。采用公式(1)、(2)进行计算:  $H$  为河底高程,  $H_S$  为水深,  $H_G$  为 GNSS 接收机中心点高程值,  $H_1$  为 GNSS 接收机中心点到水面的距离,  $H_2$  为测深仪换能器吃水深度,  $H_3$  为测深仪换能器底部到水底距离(图 3)。

$$H = H_G - H_1 - H_2 - H_3 \quad (1)$$

$$H_S = H_2 + H_3 \quad (2)$$

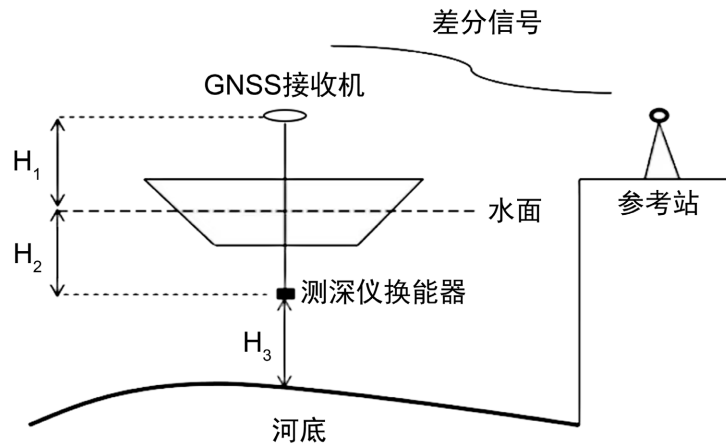


Figure 3. Principle of single beam sounding on GNSS

图 3. GNSS 搭载单波束测深原理

#### 3.2.1. 作业流程

根据收集的资料, 在测深仪里布设测线, 利用声速剖面仪确定声速, 按照要求安装好检定可用的 GNSS 和测深仪, 利用外挂电台获取精确的三维坐标, 采用单波束测深仪进行水深测量, 后经内页数据处理及质量检验后, 形成水下地形测量成果。

#### 3.2.2. 测深计划线布设

为确保测量精度, 保障水下作业连续性, 提高作业精度和效率, 按照比例尺要求确定测深计划线的间距和测深点密度。

测深计划线布设见图 4。实际测点偏离局部情况见图 5。



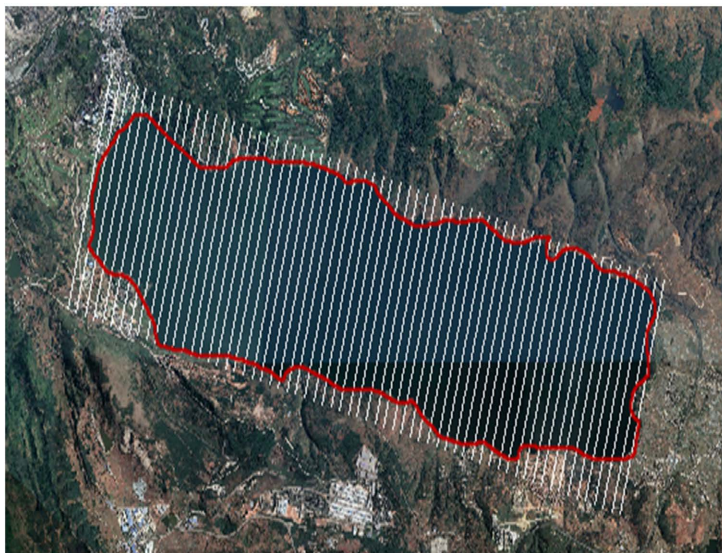


Figure 4. Survey area scope and section layout

图 4. 测区范围及断面布设图

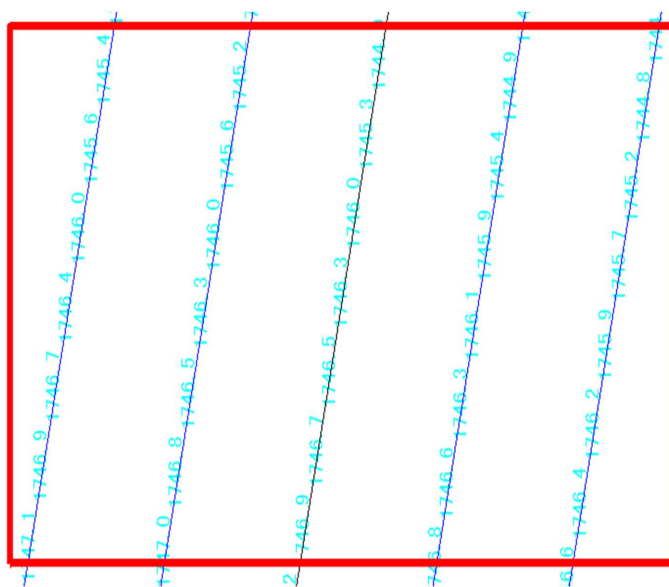


Figure 5. Partial drawing of measurement point deviation

图 5. 测点偏离情况局部图

### 3.2.3. 声速改正

雅鲁藏布江下游声速影响来源主要为水温。水下地形测量前,在水域中部采用 HY1200 声速剖面仪测量声速,声速梯度变化较小,声速改正可直接采用表层水温进行改正。每日测量前测定水面下 0.5 m 处水温,采用公式(3)进行声速计算[7]:

$$V = 1410 + 4.21T - 0.037T^2 + 1.14S \quad (3)$$

式中:  $V$  为声波在水中传播速度;  $T$  为测区的水温;  $S$  为测区的盐度,内河淡水测量一般取 0。

项目测前、测后在不同水深进行测深精度比测,每次检查 1~2 点,误差均在规范范围内。比测结果见表 2。

**Table 2.** Water depth comparison results  
**表 2.** 水深比测结果

序号	测深锤(m)					测深仪(m)					误差(m)
	1	2	3	4	平均	1	2	3	4	平均	
1	1.35	1.35	1.34	1.35	1.35	1.33	1.32	1.32	1.33	1.32	0.03
	3.56	3.57	3.57	3.58	3.57	3.57	3.57	3.56	3.57	3.57	0.00
	6.07	6.07	6.06	6.07	6.07	6.02	6.02	6.02	6.01	6.02	0.05
2	1.62	1.62	1.62	1.63	1.62	1.62	1.61	1.61	1.62	1.62	0.00
	3.88	3.88	3.89	3.90	3.89	3.84	3.85	3.84	3.84	3.84	0.05
	5.72	5.73	5.73	5.74	5.73	5.70	5.71	5.70	5.70	5.70	0.03

### 3.2.4. 水深测量过程

测量过程中, GPS-RTK 天线位置与测深仪换能器位置一致, 卫星信号稳定, GNSS 电台工作正常, 水下地形测量时风浪较小, 测船匀速行驶, 船速不超过 4 节。

特殊测区进行加密测量, 如岔河、浅滩、陡岸、深泓等特征位置; 测量过程中测深仪回波信号信号正常, 回波线清晰, 能够直观的显示断面情况, 每天收工前进行数据备份, 异地硬盘保存; 每日测量结束时, 测量 1 条与布设断面基本垂直的检测线, 共测量 3 条, 检测点 409 个, 水下地形点 2450 个。利用主测断面所测地形高程点与检测线交叉测点高程进行对比。抽取其中 150 个检测点进行高程较差精度统计, 统计结果满足规范要求, 统计情况见表 3。

**Table 3.** Statistics of underwater elevation detection accuracy  
**表 3.** 水下高程检测精度统计表

检测点数	水下高程点水深较差点数分布			允许较差(m)
	$\Delta \leq 0.2$ (m)	$0.2 < \Delta \leq 0.3$ (m)	$0.3 < \Delta \leq 0.4$ (m)	
150	122	25	3	$\pm 0.4$

### 3.2.5. 水深测量过程

HY1603 原始数据文件包含坐标、水深数据, 数据输出后, 进行去噪, 粗差数据剔除, 利用每日水边 GPS-RTK 定位测量水位, 进行数据处理, 推算出河底高程, 形成地形图编辑需要的坐标高程格式文件, 导入地形图编辑软件, 进行构网、等深线生成及编辑等工作, 最终与岸上地形图进行拼接, 检查拼接部分合理性, 生成总的 DWG 格式地形图。该项目采用 HYPACK 和清华山维软件进行水深数据编辑选取表[5]。

## 3.3. 安全措施

测区水流湍急, 下游出境为印度, 为了保障安全, 在测区下游末段布设了跨江防护索作为应急使用。为了保证架设安全, 实施过程中采用冲锋舟先将细绳跨河, 再引粗绳, 粗绳又引钢绳的方式架设完成。

为保障水下工作的安全。采用两条冲锋舟进行作业, 一条为测量船, 另外一条为应急船只; 现场临时聘用当地民工 8 人, 负责在水边或林地里开路, 搬运冲锋舟和设备设施。

测区下游河段无移动通讯信号, 采用对讲机通讯; 对讲机无法使用时, 现场备有卫星电话, 保证通讯畅通。

### 3.4. 完成的主要任务和提交的成果

经过全体参与人员 40 天的艰苦努力, 按照委托方要求, 安全、圆满地完成了任务。工作完成情况见下表 4。

**Table 4.** Statistical table of work completion  
**表 4.** 工作完成情况统计表

序号	项目名称	计划工作量	完成工作量	备注
1	控制测量			
1.1	E 级 GPS 控制点埋石及测量	18 个	18 个	
2	坝区水下地形测绘			
2.1	近坝区 12 km 范围内 1:1000 水下地形测量	12 km	14.14 km	
3	河道断面测量			
3.1	库区 1:1000 断面测量	36 个断面	36 个断面	
3.2	坝区 1:1000 断面测量	10 个断面	10 个断面	
3.3	水文大断面测量	4 个断面	4 个断面	
任务完成率 100%				

## 4. 主要问题与处理

- 测区植被茂密, 地形陡峭, 布点极其困难。陆上部分采用免棱镜全站仪或 RTK 方法进行数据采集, 测至高水位线。陆上地形测量现场每一岸雇请 2 名民工, 负责辅助测量人员清理坡面上树木杂草, 方能进行 RTK 或者免棱镜测量, 但是仍然存在部分实测点点距较大, 地形转折控制困难, 但未出现空白区域, 不影响地形资料的整体使用。水下按照 1:1000 比例尺进行实测, 但测区河道急滩流区域较多, 由于水流湍急高流速、浪高、气泡较多等多种因素, 部分区域无法进行实测。测量人员根据数据采集情况划定急流区域范围, 并根据现场流态和经验估测水深、结合附近实测点高程估算急流区域河底高程, 估算点采用不同颜色与实测点进行区分, 以提醒资料应用者需要谨慎使用[7]。
- 固定断面调整。根据设计在库区共布设 33 个固定断面, 大部分按照计划实施。但有部分断面布置在急滩上, 在实施中, 对其位置进行了适当调整。以及测区上游末端 1~3 号断面处于连续急滩、两岸均为悬崖, 且无路可走。根据现场情况在下游断面间距较大的河段, 按照每 1~3 km 布置的要求, 有镇、村等居民点、支流汇入位置及河势变化明显位置进行了适当加密。作业组共测量河道断面 36 个。
- 测区为峡谷河段, 地势陡峭, 对 GNSS 卫星遮挡严重。故此次测量尽量选择地势开阔地带架设基准站, 并使用了可同时收受北斗、GPS、GLONASS 三种定位卫星的 GNSS 接收机, 提高测量精度及作业效率[8]。
- 地形限制, 部分陡峭河段陆上地形采用免棱镜全站仪进行无协作目标法观测, 保证了陆上地形测量质量与效率。

## 5. 经验与建议

- 作业前的查勘工作十分重要。艰苦危险地区的野外作业项目必须进行野外实地查勘, 收集作业区域的相关资料。熟悉作业区域环境, 充分掌握作业区海拔高度、植被覆盖、交通及居民分布等情况; 提前

规划作业方案及作业路线; 了解作业区域的民族分布情况和风俗习惯和禁忌。尤其是针对雅鲁藏布江下游河段公路与水面连接道路较少的, 需要查勘摸清下河公路, 便于后期实施方便。

- 作业前准备。针对查勘收集的资料和掌握的信息, 编制相应的安全作业手册, 安全作业手册应包括自然地理特征和气候条件、主要危险因素分析和安全隐患对策措施、安全应急方案和地方相关单位联系方式。结合安全作业手册对参与作业的工作人员进行安全培训, 通过培训掌握野外作业环境及安全隐患和预防、应急措施等安全知识。为作业人员配备符合要求的劳保用品和应急物资。
- 作业前与属地公安、驻地部队之间的要有互联互通, 便于应对野外生产突发状况, 从而全面提高作业人员野外工作的安全保障。
- 作业期间的管理。出工前提醒当天野外工作任务可能发生的危险, 并要求作业人员应注意的安全事项。有问题及时反馈给相关人员。
- 根据作业现场环境合理配备各类应急物资和医疗物品, 作业小组必须配备可以与外界联系的应急通讯设备, 如对讲机、卫星电话等。作业小组应始终保持同进退, 严禁一人作业。
- 安全措施必须考虑周全。比如架设过河缆索, 双船作业等。

## 6. 结束语

本次测量的主要作用在于填补了此区域没有河道勘测成果的空白。通过本次艰难条件和高风险环境的测量实践得到一些启示, 即野外作业的区域情况各种各样, 特别是不同的艰险地区作业条件千变万化, 对测量工作安全生产带来了挑战, 本文通过对雅鲁藏布江下游水下地形测量的做法, 提出了一些关于保证安全生产的建议, 对于类似环境下的测量, 也是一种参考。

## 参考文献

- [1] 徐绍铨, 等. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998.
- [2] 王忠良, 朱达成, 等. GB T18314-2009. 全球定位系统(GPS)测量规范[S]. 南京: 凤凰出版社, 2009.
- [3] 章琼. CGS2000 坐标系的应用对水利测量的影响若干问题探讨[J]. 建筑与文化, 2013(10): 376-377.
- [4] 刘基余, 等. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1993.
- [5] 梁开龙. 水下地形测量[M]. 北京: 测绘出版社, 1995.
- [6] 刘士付. 水下地形测量技术分析[J]. 工程技术研究, 2020(23): 229-230.
- [7] 孟海豹, 石峰. GPS 和测深仪组合技术在水下地形测量中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(3): 37-38.
- [8] 姚林章, 罗建刚. 金沙江白格堰塞湖应急修复工程水下测量技术及质量控制[C]. 2021 年全国土木工程施工技术交流会论文集[中册]. 北京: 《施工技术》杂志社亚太建设科技信息研究院有限公司, 2021: 573-575.