

# 超宽带(UWB)电子浮标研发和应用

汪庆\*, 张虎\*, 魏晓珊

湖北省孝感市水文水资源勘测局, 湖北 孝感

收稿日期: 2024年9月25日; 录用日期: 2025年1月16日; 发布日期: 2025年2月27日

## 摘要

浮标测流是河道高洪流量测验的常用技术, 随着科技的发展, 浮标呈现出多种不同的形式。采用超宽带(UWB)技术研发新型电子浮标, 具有精度高、造价低、无需回收的特点, 通过系统介绍、原理阐述、数据分析、成果结论, 对超宽带电子浮标研发和应用进行推介。

## 关键词

超宽带, 电子浮标, 研发, 应用

# Development and Application of Ultra Wide-Band (UWB) Electronic Buoy

Qing Wang\*, Hu Zhang\*, Xiaoshan Wei

Xiaogan Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hubei Province, Xiaogan Hubei

Received: Sep. 25<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 16<sup>th</sup>, 2025; published: Feb. 27<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Buoy current measurement is a common technique for river high flood flow measurement. With the development of science and technology, buoy has taken on many more different forms. The UWB technology is used to develop a new type of electronic buoy, which has the characteristics of high precision, low cost and disposable. Through system introduction, principle explanation, data analysis and results conclusion, the research and development and application of UWB electronic buoy are introduced.

## Keywords

Ultra Wide-Band, Electronic Buoy, Research and Development, Application

作者简介: 汪庆(1976-), 男, 湖北竹溪人, 本科, 高级工程师, 科长, 从事水文水资源勘测工作。Email: hbsywangqing@qq.com

\*通讯作者 Email: hbsywangqing@qq.com, 1370988933@qq.com

文章引用: 汪庆, 张虎, 魏晓珊. 超宽带(UWB)电子浮标研发和应用[J]. 水资源研究, 2025, 14(1): 23-30.

DOI: 10.12677/jwrr.2025.141003



## 1. 引言

浮标测流是一种常用的水文测验方法[1], 适用于河流、湖泊等水体中的流速测量, 测量结果可以用于水文预报、洪水监测等。选择合适的浮标是浮标测流的关键, 浮标的选取应考虑材料、形状、大小, 传统的浮标采用轻质、耐水、耐腐蚀材料制作, 常见的材料有塑料、泡沫、竹木等, 形状有球形、柱形、锥形, 大小应尽量适中, 不宜过大或过小。

传统浮标在实际应用中存在经纬仪捕捉浮标速度要求快、通视条件高、夜间照明等条件限制, GNSS 新型定位电子浮标造价高且需要回收等缺点, 超宽带电子浮标具备造价低、精度高、无需回收的优点。

## 2. 研发内容介绍

超宽带电子浮标研发包含浮标芯片、定位基站、PC 端解算三部分组成, 电子浮标利用 UWB 定位技术将河流中流动的浮标(标签)进行轨迹定位, 并记录流过已知距离的时间、解算出流速、流量、流向等水文要素信息[2]。

### 2.1. 研发原理

超宽带(Ultra Wide Band, UWB)是一种新型的无线电通信技术, UWB 定位技术利用电子标签设备发射脉冲信号, 定位基站接收此脉冲信号, 再根据发送和到达的时间差来计算标签相对于基站的距离, 从而获得电子标签的高精度位置数据, 其频谱范围为 3.0~10.6 GHz [3]。

UWB 技术通过发送和接收高斯单周期超短时脉冲, 信号带宽很宽, 接收机直接用一级前端交叉相关器就把脉冲序列转换成基带信号, 省去了传统通信设备中的中频级, 极大地降低了设备的复杂性, UWB 技术采用脉冲信号位置调制 PPM 单周期脉冲来携带信息和信息编码, 一般工作脉宽为 0.1~1.5 纳秒, 重复周期在 25~100 纳秒, 实际通信中使用一长串的脉冲(见图 1)。

(1) 高斯脉冲波形

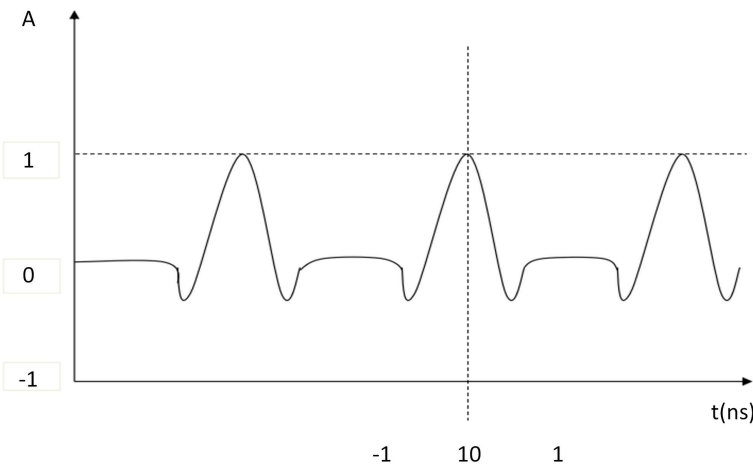


图 1. 高斯脉冲波形图

数学表达式

$$f(t) = A \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.1)$$

$A$ ——脉冲的幅度(峰值);

$t_0$ ——脉冲的中心时间(峰值出现的时间);

$\sigma$ ——高斯函数的标准差, 控制脉冲的宽度;

$t$ ——时间变量(单位纳米)。

## (2) 脉冲调制方式

UWB 脉冲调制方式有多种, 脉冲位置调制(PPM)和脉冲幅度调制(PAM)是最常用的两种方式, 现以跳时(TH)脉冲调制(PPM)为例进行介绍, TH-PPM 信号产生模型如下:

$$S(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} W(t - jT_f - C_j T_c - \delta d_{[j/N_s]}) \quad (1.2)$$

$S(t)$ ——经调制的 PPM 序列信号;

$W(t)$ ——高期脉冲波形;

$T_f$ ——未经调试的  $W(t)$  重复时间(周期) ( $T_f > T_p$ );

$T_c$ ——PN 码的周期(PN 扩频码码片时移);

$\delta$ ——数据调制时移;

$C_j$ ——用户扩频码(PN 码);

$d_{[j/N_s]}$ ——信息码系列。

① 均匀间距的脉冲串。这是一个未经调制的 PPM 脉冲系列。

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W(t - jT_f) \quad (1.3)$$

式中  $T_f$  的值比单脉冲宽度大 100~1000 倍。

② PN 码(跳时)调制

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W(t - jT_f - C_j T_c) \quad (1.4)$$

式中  $C_j$  为整数,  $C_j T_c < T_f$ , 可取 0, 1, 2……

③ 数据调制

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W(t - jT_f - C_j T_c - \delta d_{[j/N_s]}) \quad (1.5)$$

$d_{[j/N_s]}$  取二进制(0 或 1), 当 bit 位为 1 时,  $d_{[j/N_s]} = \delta$ , 那么脉冲就是要移动  $\delta$  个位置; 当 bit 位为 0 时,  $d_{[j/N_s]} = 0$ , 脉冲不移位。

## 2.2. 浮标芯片

超宽带(UWB)电子浮标由浮标芯片、定位基站、PC 端解算三部分组成。

浮标芯片由 DecaWave 公司研发, 符合 IEEE802.15.4-2011 超宽带标准, 最小误差 10 cm。技术参数: 封装: QFN 49 脚, 单电源电压: 2.8 V 至 3.6 V, 数据传输速率: 110 Kbit/s、850 Kbit/s 和 6.8 Mbit/s, 工作频率: 从 3.5GHz 至 6.5 GHz 分为 6 个频段发射频率: -14 dBm/-10 dBm, 支持数据包: 1023 字节, 调制方式: BPM (二相调制)和 BPSK (二进制相位调制), 工作温度: -40℃至 85℃ (工业级), DW1000 需外接晶振 38.4 MHz, 支持

SPI 通讯，具体使用时采用 DW1000 的二次封装模块，模块简介如图 2:

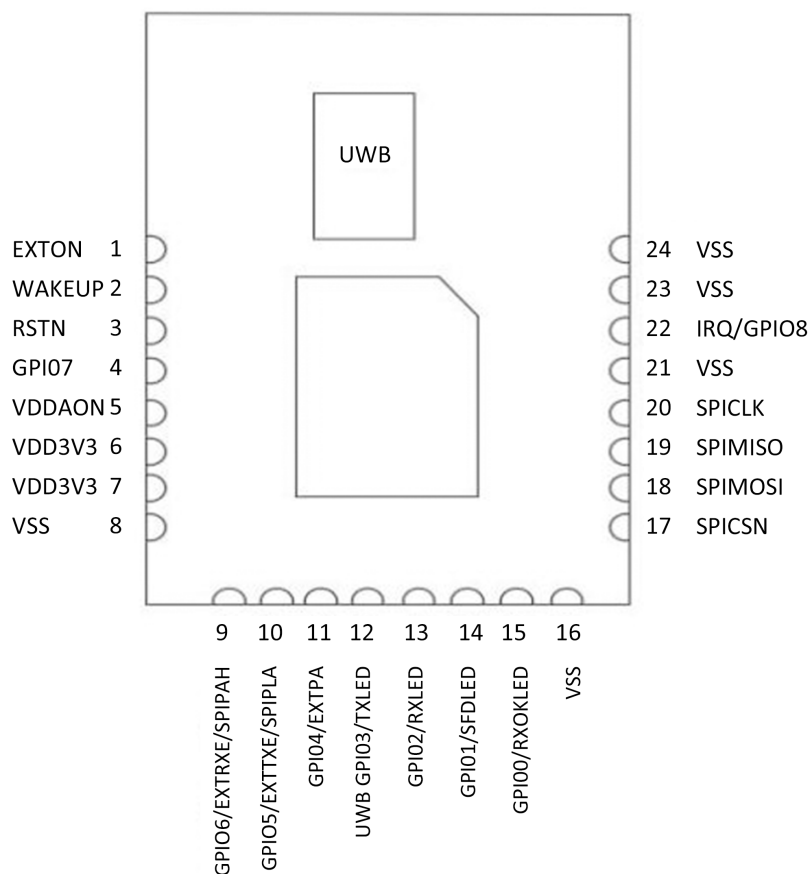


图 2. DW1000 模块示意图

### 2.3. 定位基站

定位基站采用三边定位算法，A、B、C 为基站，它们的坐标分别为 $(X_a, Y_a)$ 、 $(X_b, Y_b)$ 、 $(X_c, Y_c)$ ，都为已知点，D 点为浮标，移动的浮标 D 和固定的基站 A、B、C 通讯，确定两两之间的距离  $d_a$ 、 $d_b$ 、 $d_c$ ，确定 D 点的坐标 $(x, y)$ ，如图 3 所示。

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2} = d_a \\ \sqrt{(x-x_b)^2 + (y-y_b)^2} = d_b \\ \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2} = d_c \end{cases} \quad (1.6)$$

由上式得交点 D 坐标

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(x_a - x_c) & 2(y_a - y_c) \\ 2(x_b - x_c) & 2(y_b - y_c) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_a^2 - x_c^2 + y_a^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_a^2 \\ x_b^2 - x_c^2 + y_b^2 - y_c^2 + d_c^2 - d_b^2 \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

浮标和基站硬件电路中的单片机选择意法半导体的 STM32F103 系列，实验电路选用芯片为 STM32F103ZET6，储存容量：512 KB 片内 Flash，64 KB 片内 RAM，工作频率：72 MHz，晶振：片内双 RC 晶振(8 MHz, 40 MHz)，I/O 口：多达 80 个 GPIO 口，3 个共 16 通道的 12 位 ADC，硬件电路图如图 4:

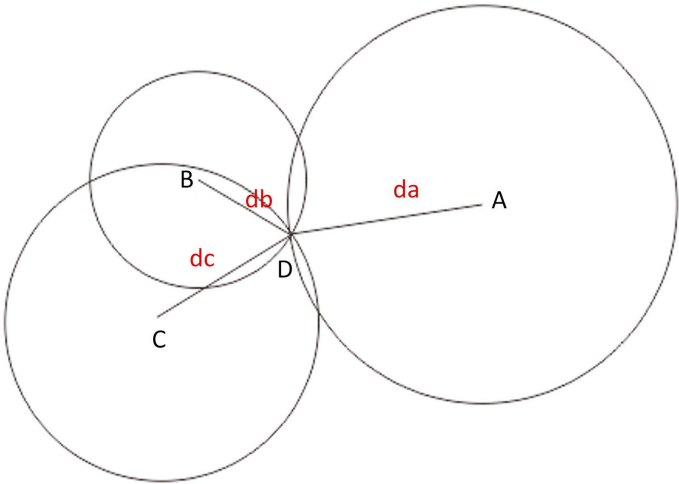


图 3. 三边定位图解

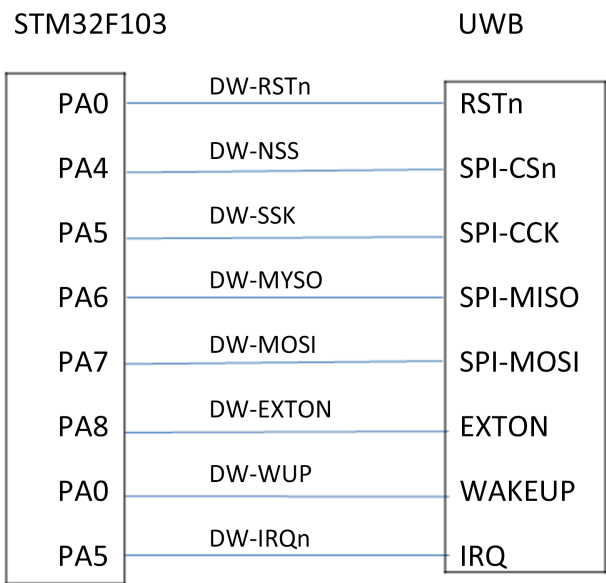


图 4. STM 系列硬件电路图

2.4. PC 端解算

PC 端解算引擎设计采用 QT (直观的 C++类库跨桌面和嵌入式操作系统)平台开发, 包含上中下浮标断面数字生成、浮标到达上中下浮标断面的逻辑(数字)判断、流量计算三部分。

首先对浮标进行定位, 然后再解算成流速, 定位就是将各基站与浮标之间的距离通过它们的定位电路进行通讯测距, 并将结果通过基站传给 PC 机, 如图 5 所示。

图中 A0、A1、A2 是基站, 基站坐标位置都是已知点, T 是水面移动的浮标, A0 将各基站与浮标的距离传给后台 PC 机, PC 机的解算引擎(电子浮标操作系统)通过三点定位原理算出浮标的位置, PC 端“电子浮标操作系统”将对浮标 T 通过上、下断面进行计时, 上、下断面的距离为已知值, 中断面的横断面面积为已知值, 这样操作系统就解算出流过中断面的流量。

电子浮标测流系统通过以下流程对浮标流过上、中、下浮标断面的解析来计算出该浮标在中断面上某点的水面流速, 其解算流程图如图 6:

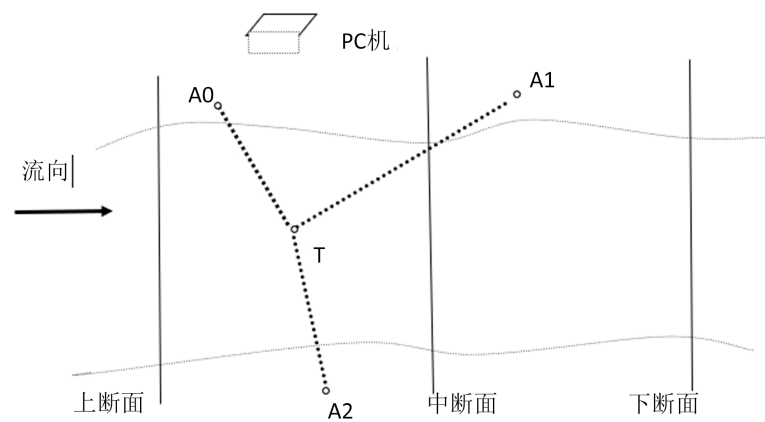


图 5. 浮标定位示意图

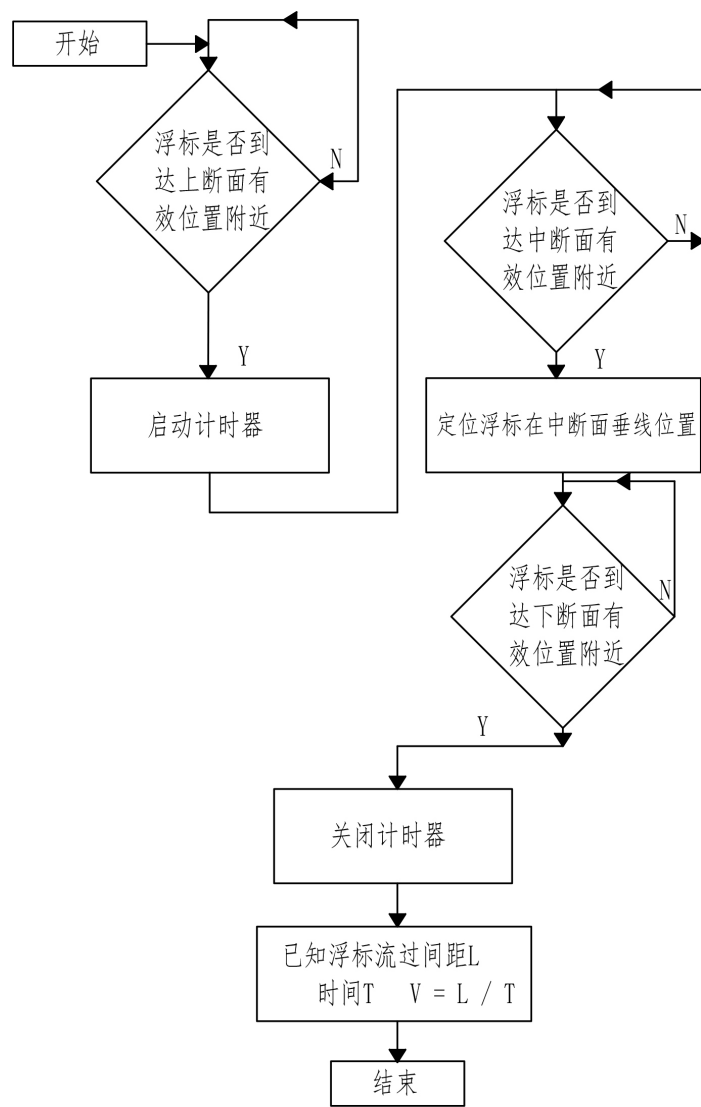


图 6. 浮标测流系统流程图

程序主界面如图 7:

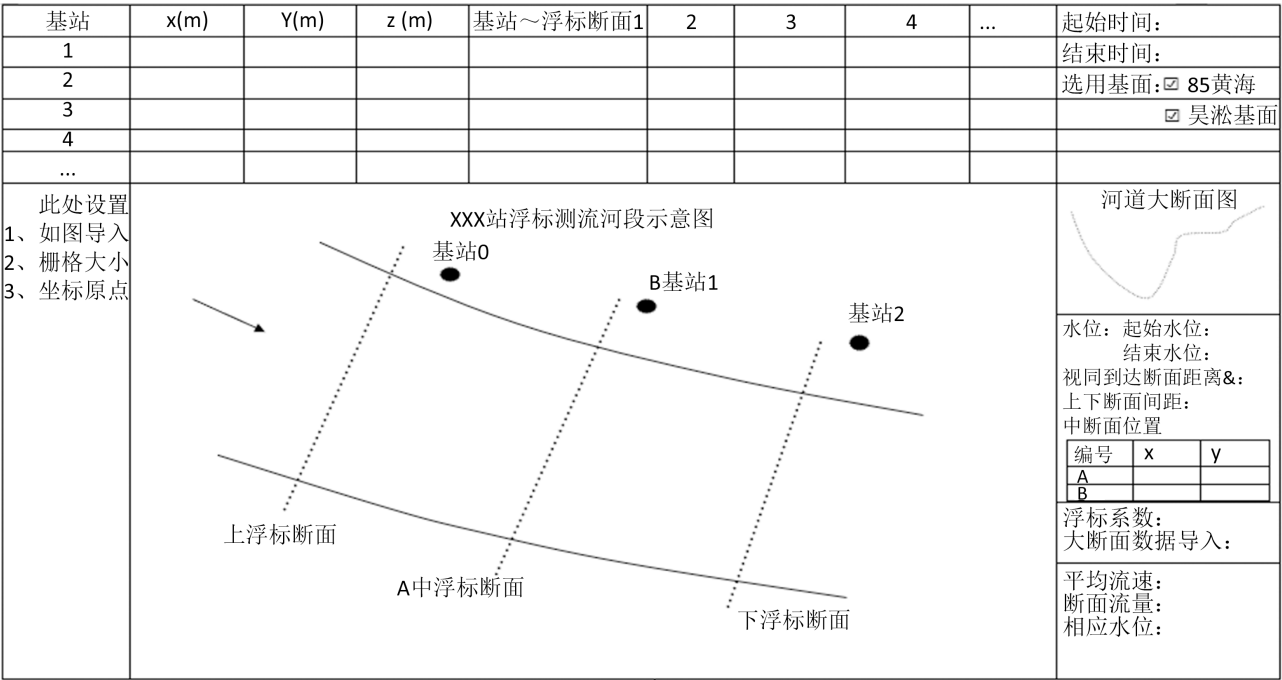


图 7. 浮标定位示意图

3. 试验结果分析

3.1. 试验结果

通过在不同河段条件下的河段进行实地比测取得以下数据(表 1):

表 1. 测量距离比测数据统计表

| UWB 测量距离(m) | 实际距离(m) (米尺测量) | UWB 测量距离(m) | 实际距离(m) (米尺测量) |
|-------------|----------------|-------------|----------------|
| 1390.00     | 1000.00        | 14650.00    | 14000.00       |
| 2550.00     | 2000.00        | 15780.00    | 15000.00       |
| 3540.00     | 3000.00        | 16750.00    | 16000.00       |
| 4660.00     | 4000.00        | 17650.00    | 17000.00       |
| 5570.00     | 5000.00        | 18660.00    | 18000.00       |
| 6780.00     | 6000.00        | 19780.00    | 19000.00       |
| 7670.00     | 7000.00        | 20460.00    | 20000.00       |
| 8620.00     | 8000.00        | 21550.00    | 21000.00       |
| 9750.00     | 9000.00        | 22600.00    | 22000.00       |
| 10750.00    | 10000.00       | 23600.00    | 23000.00       |
| 11740.00    | 11000.00       | 24610.00    | 24000.00       |
| 12770.00    | 12000.00       | 25660.00    | 25000.00       |
| 13650.00    | 13000.00       | 26800.00    | 26000.00       |

### 3.2. 成果分析

通过比测,发现 UWB 模块测量值,总是比实际值要大一些,这是由于现场环境不同,受经纬度、空气质量、环境障碍物、海拔等干扰,实际操作时,要进行一次校准,获得修正系数,通常采用 Microsoft 2016 Excel 软件进行数据拟合,并生成拟合公式,均方差精度达到 0.9998 (见图 8)。

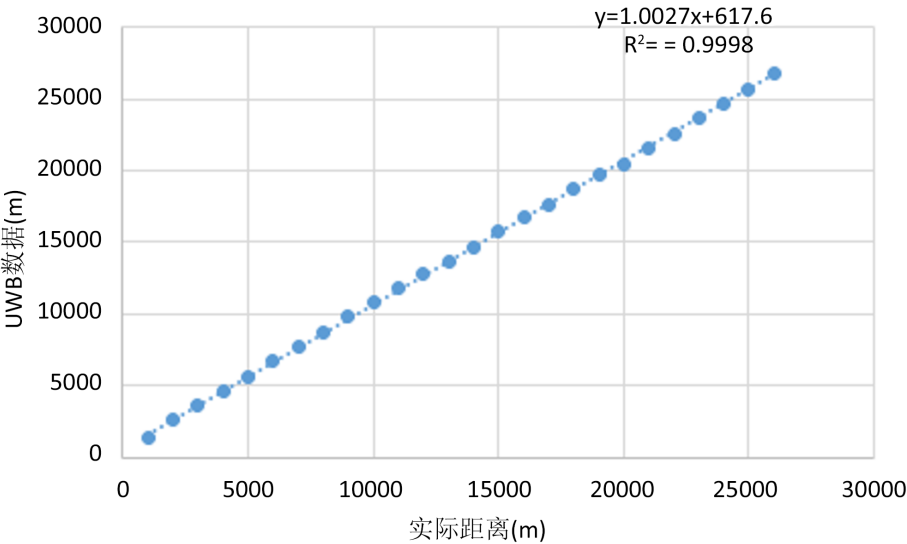


图 8. 实测距离同实际距离拟合图

### 4. 浮标优点

UWB 电子浮标优点: ① 具有内置电源,体积小,重量轻,精度高的电子浮标特性;② 采用自组网的无线传播原理,实现了真正意义的全天候测量;③ 浮标(标签)的功能设计比较单一,造价低廉,能做到一次性使用,无需回收。

### 5. 结论

超宽带(UWB)电子浮标研发成功,取得了实用新型专利证书,是一种新技术应用的电子浮标,解决浮标全天候应急测流问题,实现了浮标进入测流河段后,系统将自动完成浮标编号识别,各个浮标流经上、下断面的判定及在中断面的位置计算,最后完成流速、流量的解算,完全替代人工。浮标在设计阶段就考虑到成本问题,并将成本预计控制在低成本范围内,以实现一次性使用,能在测验河段漂浮物较多的情况下正常施测,克服了传统浮标的通视要求高、人为误差大,也克服了市场 GNSS 电子浮标造价高的缺陷,必将广泛应用到水文监测领域。

### 基金项目

湖北省水文水资源中心重点科研项目(HBSWKY202404)。

### 参考文献

- [1] 水利部. 河流流量测验规范 GB50179-2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [2] 水利部. 声学多普勒流速仪测流规范 SL337-2006 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [3] (美)尚茨(Hans Schantz). 超宽带(UWB)天线原理与设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.