

# 大量程大变率高精度雷达水位计关键技术研究

周冬生<sup>1,2,3</sup>, 宗军<sup>1,2,3</sup>, 张恒<sup>4</sup>

(1.水利部水文水资源监控工程技术研究中心,江苏 南京 210012;

2.水利部南京水利水电自动化研究所,江苏 南京 210012;

3.江苏南水水务科技有限公司,江苏 南京 210012;4.南京仁欧科技有限公司,江苏 南京 210019)

**摘要:**分析了雷达水位计在大量程大变率条件下的分辨力、精度和稳定性等问题,基于调频连续波,采用快速傅里叶变换和 Chip-Z 算法、快速自动增益控制方法、专用 DSP 数字信号处理平台和 FPGA 大规模可编程逻辑芯片等优化设计,满足了大量程、大变率、高精度水位测量对精度的要求,具有广阔的应用前景。

**关键词:**雷达水位计;分辨力;精度;稳定性

中图分类号:P335

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)01-0068-04

## 1 概述

非接触式水位计主要包括声波式、激光式和雷达式等。水位计测量范围通常在 0~10m, 测量范围超过 10m 一般称为大量程。在《水位观测标准》(GB/T50138-2010)中规定,水位计分辨力为 0.1cm、1.0cm,水位变率不低于 40cm/min,有特殊要求的不低于 100cm/min,10m 量程最大允许误差 2cm,量程 15m 以上最大允许误差 3cm。

超声波水位计由于超声波对温度和尘雾、霾的变化敏感,尤其是在进行大量程水位测量时,受大气环境变化影响很大,测量精度和稳定性较差。激光式水位计的测量精度,理论上要优于超声波方式,但水面需要反射板,大部分水文站并不适用。雷达水位计不需建水位井,对气候变化状况不敏感,对水面反射区也没有特别的要求,具有较好的稳定性和测量精度,因而应用较为广泛。然而当测量量程较大或水位变率较大时,雷达水位计也存在分辨力不高、测量精度不高和稳定性差等诸多问题有待解决。

## 2 雷达水位计误差来源分析

电磁波在均匀介质以固定的速度( $C$ )直线传播,雷达水位计利用测量电磁波从发射到水面,反射后接

收到的时间差( $t_R$ ),就可以测量出到水面的距离( $R$ ), $R=C \cdot t_R/2$ ,从而得到水位数据。

### 2.1 测量范围

雷达测距的范围主要受两个因素影响,一个是频带宽  $B$ ,或发射信号持续时间  $T$  即时宽,另一个是射频信号功率。发射信号的平均功率决定了雷达能够检测的最大距离。

### 2.2 分辨力与准确度

民用雷达的射频功率一般不超过 10mW,雷达测距的分辨力在射频功率一定的条件下,正比于雷达信号的带宽或时宽,带宽越大分辨力和准确度越高。带宽受生产工艺及成本限制不可能无限增大,在射频带宽固定的情况下,水位测量误差来自测频或时间检测误差,这个误差大小决定了分辨力和水位测量的准确度,也就是说频率或时间检测的准确度和分辨力越高则水位计分辨力和准确度越高。

### 2.3 信噪比与准确度

在大量程水位测量时,反射信号变得很弱,相位信息会淹没在噪声中,信噪比低会造成水位测量误差大,甚至错误,从而影响到测量准确度和稳定性,其测量误差大多为 1.0cm 或 2.0cm,远高于标准要求。噪声主要来源于外部和系统内部。

外部因素主要是外部环境的无线电台、移动基

收稿日期:2016-06-12

基金项目:水利部“948”(引进国际先进水利科学技术)计划项目(201503)

作者简介:周冬生(1966-),男,江苏泰兴人,高工,主要从事水文仪器研究与推广。E-mail:nsswzds@qq.com

站、雷电等形成的电磁干扰信号会与雷达回波信号叠加。量程越大,回波经过的路径越长,有效的雷达回波信号衰减越大,信噪比越低,直至有效信号完全淹没在噪声中,变得不可分辨。

系统内部因素主要为系统电路收发通道增益调整与输入信号的变化不同步。增益的非线性变化外在表现为在有用信号的基础上叠加了一部分噪声,这些外部和内部的噪声变化是随机的,直接影响了测量准确度和测量系统的稳定性。高精度水位测量要求系统电路的收发通道在全量程范围内增益线性变化,同时要保证增益的变化和信号的变化是同步、实时的,即输入信号发生变化时增益也要实时同步按比例产生变化,保证信号不失真。在水位量程很大或水位变率很大的情况下,输入到雷达接收器的信号幅度和幅度变率变大,由于增益调整与输入信号的变化不同步,信号就会工作到非线性区,导致信号传输过程中产生较大失真。

#### 2.4 动态响应速度与准确度

另一方面,雷达水位计如果采用单片机和模拟电路实现,其数据处理和运算速度较低,系统动态响应能力较差,大变率即单位时间内水位变化很大时,由于动态响应慢,响应的滞后效应影响了水位测量的实时性,进而影响了测量准确度。

#### 2.5 稳定性

影响系统稳定性的因素较复杂,直流漂移和温度漂移是影响系统长期稳定性的主要因素,水位变率很大会导致射频回波功率的起伏和系统实时响应能力变差,两者影响了系统的短时稳定性。

### 3 优化设计方案

通过上述分析可知,大量程大变率雷达水位计测量误差主要由3方面因素造成,即带宽或时宽、噪声和系统稳定性。经过综合研究和优化设计后的解决方案如下:

#### 3.1 雷达调制方式优选

现代雷达理论<sup>[1-2]</sup>表明连续调频雷达通过检测收发信号的频差实现水位测量,在发射功率相同的情况下,可以获得比脉冲制雷达大得多的带宽,利用连续调频信号来获得大带宽。带宽越大,因单位距离变化而产生的频差则越大,距离变化越容易分辨,进而提高了水位分辨力。脉冲制雷达是通过检测收发脉冲的时间差来判定距离的,其脉冲越窄距离分辨力越高,但越窄的脉冲越容易被外界的电磁信号干扰,在距离微小的变化情况下,距离信息会变得模糊,影响了距离分辨力。

另一方面,连续调频制雷达是通过回波信号的频率分析方法测量水位的,由于采用大时宽的连续调制信号,其回波的功率远大于脉冲制式的回波功率,使得信号传输过程的信噪比大于脉冲法数十倍。采用傅里叶变换快速算法FFT提出距离谱,FFT算法实际是数字式带通滤波器,本身就对噪声有滤波作用。大量程大变率情况下,可以进一步通过各种数字滤波算法滤除产生的噪音。因此,以这种方法进行水位测量的稳定性要优于脉冲制雷达。FFT法是在频域进行的,通过优化数据处理算法可最大限度地消除传送电路的电磁干扰和被测水面短时间剧烈变化对测量的影响,从而获得很高的动态响应速度及水位测量的稳定性。

与载波固定的脉冲法不同,由于载波和调制波的频率是可变的,可以根据水位的量程变化和测量精度的要求自动调整调制波的幅度和调频参数,用以满足大量程大变幅水位高精度测量需要。

分析比较表明,连续调制雷达在提高水位测量精度、稳定性和系统的信噪比方面要优于脉冲制雷达,因此优选连续线性调制雷达作为水位测量方法。

#### 3.2 硬件平台优化设计

使用具有高速数据处理和运算能力的DSP<sup>[6]</sup>芯片作为主CPU,结合大规模可编程的数字逻辑芯片FPGA,实现了雷达收发通道的全数字化设计,极大减少了温漂和直流漂移及增益变化的非线性,再结合软件的降噪算法,可基本消除这些因素产生的噪声影响。优选DSP和FPGA<sup>[6]</sup>作为系统平台提高了系统的动态响应速度和运算能力,也为系统实时性条件下优化算法提供了保证。

#### 3.3 软件算法优化

在DSP硬件平台基础上,本文提出了采用FFT+Chirp-Z<sup>[3-4]</sup>频率高精度估算算法,进而实现水位高精度的测量和分辨;采用相干累积算法进一步提高了系统的信噪比,降低了噪声对测量精度的影响;针对大量程和大变率情况下信号传输通道增益需快速线性调整的要求设计了自适应自动增益控制算法,基本消除了因为增益非线性而产生的测量误差。

### 4 测试分析

以工程测试样机为测试对象,主要针对分辨力和测量精度进行了测试。

#### 4.1 测试方法

利用安装在可移动的标尺上的面目标模拟水位,

以激光测距仪测量数据作为真值。进行多次重复测试。分辨力检测时,在5m、10m、15m、20m、25m、30m不同水位+0.4m范围分别按步距50mm移动面目标进行,这里选列出10m、20m、30m重复5次的测量数据,求得最大绝对误差和平均误差。量程变化范围0~30m、水位变率1m/min条件下进行准确度检测。

#### 4.2 分辨力检测

表1~3分别是10m、20m和30m水位下50mm步距的5次检测样本。

多次检测结果表明,0~20m范围时最大绝对误差为2mm,平均误差不大于1mm,分辨力优于1mm;20~30m范围时,最大绝对误差为2mm,平均误差不大于2mm,分辨力优于2mm。0~30m范围绝对误差为2mm,相对误差不大于0.1%。

#### 4.3 准确度检测

表4为量程30m、水位变率1m/min条件下的一次

检测样本。

系统重复测量误差不超过1mm,0~30m全量程动态最大绝对误差不超过2mm。平均测量误差不超过1mm。

## 5 结语

对工程样机进行了5m、10m、15m、20m、25m、30m仿真面目标实测。结果表明,在雷达信号调制、发射、接收、混频、滤波、ADC采集、FFT、非线性补偿、自动增益控制、数字信号处理算法等关键技术实现了设计目标,一体化雷达传感器+DSP+FPGA全数字化设计避免了传统的模拟电路设计受器件老化、环境变化影响的问题,系统的水位测量准确度、分辨率、稳定性和可扩展性得到较好的实现,为系统功能扩展和测量误差的进一步改善打下良好基础。该技术针对水文测验复杂的应用条件而设计,具有良好的适应性,可实现大量程、大变率、高精度水位测量,具有广阔的应用前景。

表1 水位10m步距50mm检测表

Table1 Test of 50mm step for water level (10m)

标尺/m	10.000	10.050	10.100	10.150	10.200	10.250	10.300	10.350	10.400
测量1/m	10.000	10.051	10.102	10.151	10.202	10.250	10.301	10.351	10.402
测量2/m	9.999	10.049	10.101	10.150	10.201	10.251	10.299	10.351	10.401
测量3/m	10.001	10.051	10.099	10.149	10.199	10.249	10.302	10.349	10.399
测量4/m	10.000	10.052	10.101	10.151	10.202	10.250	10.301	10.349	10.398
测量5/m	10.002	10.050	10.098	10.151	10.201	10.251	10.299	10.351	10.401
最大误差/m	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002
平均误差/m	0.0004	0.0006	0.0002	0.0004	0.0010	0.0002	0.0004	0.0002	0.0002

表2 水位20m步距50mm检测表

Table2 Test of 50mm step for water level (20m)

标尺/m	20.000	20.050	20.100	20.150	20.200	20.250	20.300	20.350	20.400
测量1/m	20.000	20.051	20.102	20.151	20.202	20.251	20.301	20.351	20.402
测量2/m	19.999	20.049	20.101	20.151	20.201	20.249	20.299	20.351	20.401
测量3/m	20.001	20.051	20.098	20.149	20.199	20.249	20.302	20.349	20.399
测量4/m	20.000	20.052	20.101	20.150	20.202	20.251	20.301	20.349	20.398
测量5/m	20.002	20.050	20.101	20.151	20.201	20.251	20.299	20.351	20.401
最大误差/m	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002
平均误差/m	0.0004	0.0006	0.0006	0.0004	0.0010	0.0002	0.0004	0.0002	0.0002

表3 水位30m步距50mm检测表

Table3 Test of 50mm step for water level (30m)

标尺/m	30.000	30.050	30.100	30.150	30.200	30.250	30.300	30.350	30.400
测量1/m	30.000	30.051	30.102	30.151	30.202	30.251	30.301	30.351	30.401
测量2/m	29.999	30.049	30.101	30.150	30.201	30.251	30.301	30.351	30.399
测量3/m	30.001	30.051	30.099	30.149	30.199	30.249	30.299	30.349	30.401
测量4/m	30.000	30.052	30.101	30.151	30.202	30.251	30.301	30.349	30.398
测量5/m	30.002	30.050	30.098	30.151	30.201	30.251	30.299	30.351	30.402
最大误差/m	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002
平均误差/m	0.0004	0.0006	0.0002	0.0004	0.0010	0.0006	0.0002	0.0002	0.0002

表4 准确度检测表(量程: 30m; 水位变率: 1m/min)

Table 4 Test of accuracy degree (scale: 30m; water level variability: 1m/min)

激光标尺/m	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000
测量 1/m	0.998	1.998	3.001	3.998	5.001	5.998	6.999	8.001	9.002	10.001
测量 2/m	1.001	1.997	3.001	3.999	5.002	5.999	7.001	8.001	9.001	10.001
测量 3/m	1.001	2.001	2.999	4.001	4.999	5.998	7.002	7.999	8.999	9.999
测量 4/m	0.999	2.002	3.001	4.002	4.998	6.001	6.998	7.999	8.998	10.001
测量 5/m	0.998	1.999	2.998	3.998	5.001	6.002	6.998	8.001	9.002	10.001
最大误差/m	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002
平均误差/m	(0.0006)	(0.0006)	0.0000	(0.0004)	0.0002	(0.0004)	(0.0004)	0.0002	0.0004	0.0006
激光标尺/m	11.000	12.000	13.000	14.000	15.000	16.000	17.000	18.000	19.000	20.000
测量 1/m	10.998	11.998	13.001	13.998	15.001	15.998	16.999	18.001	19.002	20.001
测量 2/m	11.001	11.997	13.001	13.999	15.002	15.999	17.001	18.001	19.001	20.001
测量 3/m	11.001	12.001	12.999	14.001	14.999	15.998	17.002	17.999	18.999	19.999
测量 4/m	10.999	12.002	13.001	14.002	14.998	16.001	16.998	17.999	18.998	20.001
测量 5/m	10.998	12.001	12.998	13.998	15.001	16.002	16.998	18.001	19.002	20.001
最大误差/m	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002
平均误差/m	(0.0006)	(0.0002)	0.0000	(0.0004)	0.0002	(0.0004)	(0.0004)	0.0002	0.0004	0.0006
激光标尺/m	21.000	22.000	23.000	24.000	25.000	26.000	27.000	28.000	29.000	30.000
测量 1/m	20.998	21.998	23.001	23.998	25.001	25.998	26.999	28.001	29.002	30.001
测量 2/m	21.001	21.997	23.001	23.999	25.002	25.999	27.001	28.001	29.001	30.001
测量 3/m	21.001	22.001	22.998	24.001	24.999	25.998	27.002	27.999	28.999	29.999
测量 4/m	20.999	22.002	23.001	24.002	24.998	26.001	26.998	27.999	28.998	30.001
测量 5/m	20.998	21.999	22.998	23.998	25.001	26.002	26.998	28.001	29.002	30.001
最大误差/m	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002
平均误差/m	(0.0006)	(0.0006)	(0.0002)	(0.0004)	0.0002	(0.0004)	(0.0004)	0.0002	0.0004	0.0006

## 参考文献:

- [1] (美)M.I.斯科尔尼克,林茂庸译. 雷达系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992. (M.I.Shikemik, translated by LIN Maoyong. Introduction to Radar Systems [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1992. (in Chinese))
- [2] 李在铭,张全芬,李晓峰. 随机信号分析及工程应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1990. (LI Zaiming, ZHANG Quanfen, LI Xiaofeng. Random Signal Analysis and Engineering Application [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1990. (in Chinese))
- [3] 杨建宇. 线性调频连续波雷达理论及实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 1991. (YANG Jianyu. Theory of Linear Frequency Modulation Continuous Wave Radar and Its Realization [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 1991. (in Chinese))
- [4] D. Brumbi. Measuring process and storage tank level with radar technology [A]. IEEE International Radar Conference [C]. 1995:256-260.
- [5] Texas Instruments. Concerto F28M35x Technical Reference Manual [Z]. 2011.
- [6] Altera Corporation. Altera Programming Hardware Data Sheet [Z]. 2005

## Key Technology of Radar Water-level Gauge with Wide Range and High Precision

ZHOU Dongsheng<sup>1,2,3</sup>, ZONG Jun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Heng<sup>4</sup>

- (1. Research Center for Water Resources and Hydrology Monitoring and Control Program, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China;  
2. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China;  
3. Jiangsu NAIWCH Water Technology Co., Ltd, Nanjing 210012, China; 4. Nanjing Renou Technology Co., Ltd, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** The resolution, precision and stability of the radar water-level gauge under the conditions of wide range and large variability were analyzed in this paper. Based on the frequency modulated continuous wave (FMCW) principle, fast Fourier transform and Chip-Z algorithm, fast automatic gain control method, dedicated DSP digital signal processing platform and FPGA large-scale programmable logic chip optimization design were used to meet the wide range and high-precision water level measurement requirements, which has broad application prospects.

**Key words:** radar water-level gauge; resolution; precision; stability;