

# 雷达流速仪测量精度关键技术研究

周冬生<sup>1,2</sup>, 宗 军<sup>1,2</sup>, 蒋东进<sup>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.水利部南京水利水文自动化研究所,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:**雷达流速仪在水文测验中的应用越来越广泛,目前该产品主要存在流速测量精度偏低、对波浪等外界环境影响难以克服、不能适应低流速等问题。提出在快速傅里叶变换基础上使用最大值插值拟合算法提高流速测量精度的方法,采用多普勒频率加权平均算法消减波浪对流速测量的影响,利用变频方法满足较低流速测验的精度要求,并且将研究成果应用于新型雷达流速仪样机,进行了仿真试验及验证。试验表明,方法合理可行,可较好解决目前雷达流速仪普遍存在的上述问题,具有良好应用前景。

**关键词:**雷达流速仪;多普勒效应 FFT;最大插值拟合

中图分类号:P335

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2018)05-0067-04

## 1 概述

在水文监测中,流速流量是基本要素。流速的准确测量十分重要,随着电子技术的进步和发展,非接触式流速仪如超声波、激光、微波雷达流速仪等得到长足的发展。微波雷达流速仪由于非接触测量方式、精度高、设备成本适中、安装维护方便、实时在线等优点因而得到较为广泛的应用。

雷达流速仪利用雷达多普勒效应实现流速测量,通过其发射天线面对着水流方向,向水面发射连续调制超高频电磁波,同时微波接收器接收水面的反射波。由于雷达流速仪与水面间的距离,发射波信号和接收信号间产生了相位差,表现在收发信号的差频中具有固定的距离频差,即距离谱。此外,由于水体的位移而产生的相位差,表现在收发信号中由于运动而产生的频差,这个频差称为多普勒频差或多普勒频率。通过测量收发电磁波频差(多普勒频差)就可以准确测出水面流速。

理论和实际研究表明<sup>[1]</sup>,利用雷达多普勒效应实现流速测验,其精度主要受两个因素影响,一是测频精度,二是波浪。

在水面流速测量范围内,可以通过提高多普勒频差的测量精度来提高水面流速的测验精度。流速的多普勒频差和流速是正相关的,流速越大,频差越大,较易提高频率测量精度;相反,流速较小频差越小,较难提高频率测量精度。因此,提高测验准确度特别是低流速测验准确度是个难点。

雷达流速仪测量的是水体表面流速,由于波浪的影响,雷达照射区域内不同点的流速是有差别的,导致返回的信号中含多个多普勒频率,而不是单一的频率。因此,采用适当的算法进行修正是实现波浪条件下流速准确测量的关键。

本文针对上述问题,基于雷达测速理论,在综合分析试验基础上,研究了波浪条件下改善和提高流速测量精度的综合解决方法,主要内容包括:采用频谱最大值插值拟合算法和变频方法提高水流测速精度;采用监测区域内水面流速加权平均算法校正波浪对测速的影响;进行算法仿真、样机制作和综合测试验证。经过测试验证,本文提出的方法很好地解决了雷达流速仪在波浪条件下或低流速测验时准确度的关键技术问题。

收稿日期:2018-01-22

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

## 2 频谱最大值插值拟合算法和变频调频方法

### 2.1 雷达流速仪测速原理

如图1所示,雷达流速仪以固定的发射频率照射流动的水面时,水面会对高频电磁波产生散射,部分散射的高频电磁波构成回波被雷达接收天线接收;被雷达照射的水面区域可以整体看做以平均速度运动的物体,雷达理论<sup>[1-2]</sup>表明运动物体会对电磁波产生多普勒效应,表现在雷达回波中产生多普勒频移,即:

$$F_D = f_R - f_0 \quad (1)$$

式中:  $F_D$  为多普勒频差;  $f_R$  为接收频率;  $f_0$  为发射频率。

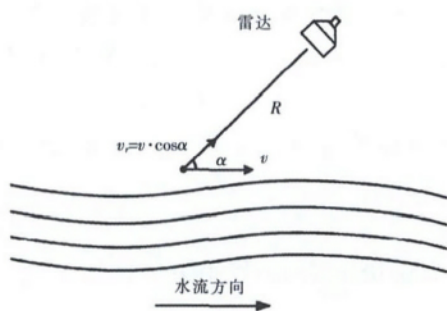


图1 雷达流速仪测量原理图

Fig.1 The schematic diagram of radar water-flow meter

根据雷达理论<sup>[3-4]</sup>,多普勒频率和速度具有如下关系:

$$F_D = 2 \cdot f_0 \cdot \frac{V}{C} \cdot \cos\alpha \quad (2)$$

即有:

$$V = \frac{1}{2} \cdot F_D \cdot \lambda \cdot \frac{1}{\cos\alpha} \quad (3)$$

式中:  $C$  为电磁波的传播速度,一般取  $C=3 \times 10^8 \text{m/s}$ ;  $\lambda$  为高频电磁波波长,  $\lambda = C/f_0$ ;  $\alpha$  为雷达波照射方向和水流方向夹角,理论为  $0 \sim 90^\circ$ ,一般设定在  $15^\circ \sim 45^\circ$ 。

式(2)表明增大雷达发射频率可以增大即增加多普勒效应频差,式(3)表明  $\lambda$  一定的条件下,流速测量准确度取决于回波多普勒频差测量的精度。

### 2.2 最大值插值拟合算法

对雷达回波信号采用快速傅立叶变换 FFT 与最大值插值拟合算法进行频谱分析,可以提高回波差频的测量精度,又兼顾实时性要求,进而提高水流速的测验精度。

多普勒频差测量通常可以在时域采用卷积法测量频率或测量周期,这种方法频率分辨率较低、运算量大、速度慢。而本文是通过对差频信号进行 FFT 处理

实现的,FFT 是在频域进行频谱分析的快速算法,和其他算法相比它具有运算速度快、分辨率高、抗干扰能力强(信噪比高)的特点。对差频信号采样、AD 转换、滤波等处理后,对其做快速 FFT 分解,求得反映流速的多普勒差频,进而求得流速。但是,这样求得的流速值精度仍然较差。

根据数字信号处理理论<sup>[5,6]</sup>,利用 FFT 作频谱分析方法计算信号的频率,其基本原理是对 AD 采集到的离散信号作  $N$  点 FFT 变换,经过 FFT 变换可以求得信号的幅度频率包络线,其中极大幅度点和对应的频率点构成了信号的频谱谱线图(简称频谱)。对频谱作进一步处理可求得信号的频率。利用 FFT 变换求取的频率是实际信号频率的近似值,如果实际频率恰好落在采样点上即实际频率是采样频率的整数倍,计算值和实际值误差为零;如果实际频率值不是采样频率的整数倍,就会产生误差,实际频率值会是两个采样值之间的某个值,这个就是 FFT 的“栅栏效应”。由于 FFT 的“栅栏效应”,使得直接采用 FFT 所获得的频率因为具有固定的采样间隔  $\Delta f$ ,从而产生  $\Delta f/2$  的测频误差。分析表明,增加采样数  $N$ ,增加谱线数量、提高频谱分辨率,可削弱泄漏效应和栅栏效应的影响,但由于增加了采样长度,将增加时间开销。

频率的测量精度受制于采样频率和参入 FFT 运算采样数  $N$ ,通过增加  $N$  或采样频率可大大增加频率分辨率( $N$  无限增大,频率值无限接近真值)。随着  $N$  的增大,傅立叶变换运算量大约为  $2N \lg N$ ,运算量亦急剧增加,但是实时性要求不允许  $N$  值很大。

为同时满足实时性和精度需要,本文提出在不增加采样点数和傅立叶变换运算点数情况下,设计采用 FFT 与最大值插值拟合算法的方法。这种算法首先通过 FFT 分析,找到频谱包络曲线的主瓣,求得最大频谱对应的频点。然后选出临近最大频谱点几个次最大谱点作插值拟合,求得差频频率,可以大为减小 FFT 的“栅栏效应”带来的测频误差,进而提高流速的测量精度。

对接收到差频信号作快速 FFT 变换可得到如图2所示的反映水流速大小的频谱图,其中横轴  $m$  代表频率采样点序号,纵轴  $A_m$  代表频谱幅度的绝对值大小。频谱的最大值点  $A_k$  对应频率采样点位置  $k$ ,对应流速的频差值;  $A_{k-1}$  和  $A_{k+1}$  是临近最大值的次最大幅值点。

根据 FFT 理论,如果取采样频率为  $f_s$ ,采样点数为  $N$ ,就有:

$$F_k = k \cdot \frac{f_s}{N} = k \cdot \Delta f \quad (4)$$

式中:  $F_k$  为反映流速的差频;  $k$  为频率采样点序号。

式(4)表明,如果反映流速的频率是采样频率间隔的整数倍数时,FFT 法频率估算没有误差;但实际上大多数情况下不是整倍数,真实的频率位于最大值点和次最大值之间,最大频差为  $\Delta f/2$ 。如图 2 所示,  $k_p$  反映真实频率的位置,代表 FFT 计算的频率位置和真实频率位置的差:

$$k_p = F_k + \delta_k \quad (5)$$

实际待测频率为:

$$F_D = k_p \cdot \Delta f = k \cdot \frac{f_s}{N} + \delta_k \cdot \frac{f_s}{N} \quad (6)$$

式(5)、(6)表明直接 FFT 计算得到的频率是有误差的,真实的频率位置偏离最大频谱点,必须进行校正,  $\delta_k$  可称为位置校正系数,这个系数值确定了,就可以准确地求得真实的频率值,进而求得真实的流速。

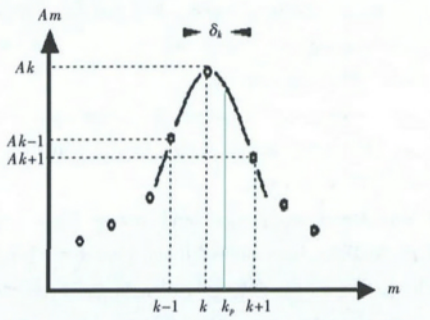


图 2 FFT 的频谱幅度图

Fig.2 The spectrum amplitude of FFT

本文采用频谱最大值插值拟合算法求得校正系数值,这个算法的主要思想是取频谱的最大值点及邻近的两个次最大谱点对应的三点频谱幅值构造一条插值拟合曲线,经多次迭代和拟合使得该曲线无限接近三点所确定的频谱包络线,这条插值拟合曲线的最大值点对应真实频率值点,从而可以求得校正系数。

理论<sup>[3]</sup>和实践表明这可以显著改善频率测量精度,和单纯的 FFT 处理相比,可提高 1~5 个数量级。

### 2.3 变频调频方法

在低速水流条件下,可以通过变参调频的方法提高调频的频率,进而提高多普勒频差值,增加频率的可监测性,使得低速条件下的测验精度得到提高。

当流速较小时,流速产生的多普勒效应减弱,频差变小,影响流速测量准确度。雷达流速仪在流速观测窗

口时段内跟踪流速的变化,在流速变小时采用变频调制方式,增加调频频率,进而增加小流速的多普勒效应频率,提高小流速条件下水流速测量的精度和分辨率。当检测到流速变大时减小调频频率,以确保差频不超过系统的采样频带宽。

### 3 消减波浪影响的加权算法

消减波浪对测速的影响,本文采用的是监测区域内面流速加权平均方法,即在观测窗口时限内,快速提取  $N$  个多普勒频谱,根据河道或渠道的水流经验模型建立一加权系数表,对所测的频率加权平均求得反映水面平均流速的多普勒频率值,进而求得平均流速。

考虑波浪的影响,式(2)可以表示为:

$$F_{Dk} = 2f_0 \cdot \frac{V_k}{C} \cdot \cos \alpha \quad (7)$$

式中:  $F_{Dk}$  为第  $k$  个多普勒频率,  $k = 0, 1, 2, \dots, m-1$ ;  $V_k$  为第  $k$  个流速。

由于不同的河流,在不同的条件下其水流模型也不相同,因此对这  $m$  个流速如何处理是一个难点问题。一般情况下,河道流速的多普勒频谱呈高斯分布,即频谱的最大值点反映了监测区域水流的平均流速,区域内浪涌频谱对平均流速贡献依次递减,根据这个特点再结合观测水道的水流模型(主要通过长期的观测水文资料建立)构建流速加权系数表  $H_k$ ,最大频谱点对应的流速其权重最大,其他依次递减,权重系数大小按高斯分布,对  $m$  个流速作加权和求得水面的平均流速,即:

$$V = \sum_{k=0}^m H_k \cdot V_k \quad (8)$$

式中:  $V$  为照射区域的水体的平均流速;  $H_k$  为加权系数,  $m$  个加权系数和为 1;其他符号意义同上。

实际测验过程中可根据河流不同季节的水流模型对加权系数作适当的调整。

### 4 验证

根据本文提出的方法,利用 DSP 软件平台进行算法仿真和模拟,设计开发算法软件,在此基础上制作了工程样机,并进行了初步测试验证。

当水流速大于 1m/s 时设定雷达波的发射频率  $f_0$  为 24GHz;当小于 1m/s 时设定  $f_0$  为 35GHz;设置系统采样频率  $f_s$  为 5kHz;FFT 运算采样点数  $N$  为 2048;雷达安装夹角  $\alpha$  为 45°。

根据水流速度的计算公式(2)、(3)设定一组多普

表1 FFT和最大值插值法处理的数据表

Table1 The data of FFT and maximum interpolation algorithms

多普勒频率/Hz	15.00	25.00	45.00	90.00	180.0	355.0	650.0	980.0
理论计算流速/ $m \cdot s^{-1}$	0.132	0.221	0.398	0.796	1.591	3.138	5.746	8.663
FFT 法流速/ $m \cdot s^{-1}$	0.184	0.305	0.469	0.847	1.627	3.209	5.835	8.735
拟合算法流速/ $m \cdot s^{-1}$	0.167	0.249	0.429	0.821	1.608	3.164	5.782	8.707
FFT 法误差/ $m \cdot s^{-1}$	0.052	0.084	0.071	0.078	0.036	0.071	0.089	0.072
拟合算法误差/ $m \cdot s^{-1}$	0.035	0.028	0.031	0.025	0.017	0.026	0.036	0.044

勒频率值,使用式(3)求出相应的一组水流速的理论值,然后使用本文提出的FFT算法和最大值插值算法对雷达回波进行处理测得相应的水流速值;依次仿真验证本文提出的测量方法,比对数据可以看出最大值插值算法的测量准确度比直接FFT方法要高很多(见表1)。

通过对不同流速的雷达回波分析计算结果表明,使用直接的FFT方法得到的流速误差要远大于最大值插值方法的流速误差,最大值插值方法测得的流速的精度要比FFT法提高一倍。流速小于0.5m/s时,FFT法测量误差和速度值相比太大,不能满足测量需要;而最大值插值方法测量误差较小,因此低流速时最大值插值法可以极大改善流速的测量精度,满足准确度要求。

## 5 结语

本文通过深入研究非接触式雷达流速仪影响流速测验准确度的关键技术,详细分析论述了影响水流速测验准确度的主要因素和解决方法,提出了使用最大值插值拟合方法提高测频精度,进而减少流速测验误差;利用变频方法满足较小流速测验精度的要求;利用流速的加权平均方法消除波浪对流速测量的影响,进而提高了流速测量的准确性。

仿真试验结果表明这些方法可较好的克服波浪影响,较好的实现水流速准确测量,对于小流速测量也能具有较好的精度,为未来系统功能扩展和测量误差的进一步改善打下较好的基础。

## 参考文献:

- [1] M.I.斯科尔尼克,林茂庸. 雷达系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992. (M.I.Shikernik, 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] B.G. Quinn. Estimating frequency by interpolation using Fourier coefficients [A]. IEEE Trans. Signal Processing[C]. Vol. 42, no. 5, pp. 1264-1268, May 1994.
- [4] D. Brumbi. Measuring process and storage tank level with radar technology [A]. IEEE International Radar Conference [C]. 1995:256-260.
- [5] M. Macleod. Fast nearly ML estimation of the parameters of real or complex single tones or resolved multiple tones [A]. IEEE Trans. Signal Processing [C]. Vol. 46, no. 1, pp. 141-148, Jan. 1998.
- [6] T. Grandke. Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals [A]. IEEE Trans. Instrum. Meas [C]. Vol. IM-32, pp. 350-355, June 1983.

## Core Technology Research on High Precision for Radar Velocity Meter

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

(1. Hydrology and Water Resources Engineering Research Center for Monitoring, 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 Technology Co., Ltd, Nanjing 210012, China; 4. Nanjing Reno Technology Co., Ltd, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Radar velocity meters are widely used in hydrological survey. At present, there are some problems from the products, such as low velocity accuracy, influence of wave or other external environment, insensitivity at low velocity and etc. The Maximum Interpolation Fitting (MIF) based on Fast Fourier Transform (FFT) has been adopted for accuracy enhancement of flow velocity computing. Besides, the frequency conversion was introduced for the accuracy of low velocity measurements. These research results were applied to a new-type radar current meter, and the tests of simulation and verification were carried out also. Field site tests indicate that the methods are reasonable and feasible, which can solve the above problems commonly existing in radar current meters.

**Key words:** hydrological infrastructure construction; causes of failure bidding and purchasing; countermeasures